

钱正安, 宋敏红, 吴统文, 等, 2017. 世界干旱气候研究动态及进展综述(I): 若干主要干旱区国家的研究动态及联合国的贡献[J]. 高原气象, 36(6): 1433-1456. Qian Zheng'an, Song Minhong, Wu Tongwen, et al, 2017. Review of advances in world arid climate research (I): Development and contribution of some main dryland countries and the UN [J]. Plateau Meteorology, 36(6): 1433-1456. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2017. 00075.

世界干旱气候研究动态及进展综述(I): 若干主要干旱区国家的研究动态及联合国的贡献

钱正安¹, 宋敏红², 吴统文³, 蔡 英¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225;
3. 中国气象局气候中心, 北京 100008)

摘要: 为回顾和评述过去 70 年来世界干旱气候的研究动态及进展, 本综述系列文章(I) 首先从横向评述了世界若干主要干旱区国家的研究动态和联合国专业机构的贡献。其要点如下: (1) 20 世纪世界出现了两大干旱事件, 即 20 世纪 30 年代美国的“沙尘暴干旱”和 1968-1999 年的北非持续干旱。它们灾情重, 警示作用强, 推进了世界干旱气候研究。(2) 作为当今世界科技强国, 美国的干旱气候研究起步早, 在干旱气候的每一分支领域都起了引领作用, 特别是在干旱指数和判据的提出和应用、干旱气候成因及气候模式的模拟方面。(3) 中国作为发展中大国, 中蒙干旱区是世界独特的中纬度干旱区, 我国的干旱气候研究起步虽晚, 但中国西北地区水流输送、西北干旱气候成因及中蒙地区春季沙尘暴等方面的研究也取得了令人鼓舞的成果。(4) 其他国家如澳、英、日本及联合国等也对世界干旱气候研究、遏制全球变暖及应对全球气候变化等方面作出了重要贡献。

关键词: 世界干旱气候; 重大干旱事件; 八大干旱区; 中蒙干旱区; 干旱气候形成原因
文章编号: 1000-0534(2017) 06-1433-24 中图分类号: P426. 616 文献标志码: A
DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2017. 00075

1 引言

世界各国不同地区及季节都可能出现不同强度和不同成因的干旱。干旱作为世界最主要灾害性气候之一, 不仅美国、澳大利亚、中国及蒙古国等永久半永久性干旱区面积大、干旱频繁出现的国家和地区重视和关注干旱的研究; 就是地理环境优美, 较少出现干旱的一些欧、亚气象科技强国, 如英、日及法等国也都有不少出色的干旱气候基础研究及应用性成果。

各国的干旱气候研究各有所长。中蒙干旱气候区仅是全球八大主要干旱区之一。科学无国界, 他山之石可以攻玉。显然, 要深入分析中蒙干旱气候, 不仅应有全球干旱研究视野, 而且应借鉴和分享先进国家干旱气候的研究成果。因此, 先了解全

球干旱气候的事实、回顾和评述其主要研究动态和进展是必要的。这里主要关注世界半永久性干旱区的干旱, 对发生在各国湿润半湿润区的环流异常性干旱暂不在本文的讨论之列。

干旱是一古老的话题。很难准确地说出何时为“世界干旱气候研究活动之初”。若不算 20 世纪 10 年代末期最早问世的柯本(Koppen) 世界植被-气候区划图版本(Leopold et al, 1961) 的话, 值得提及 1940 年前后的几件事: 据世界气象组织 WMO (World Meteorological Organization) 前秘书长 Obasi 在《21 世纪的气候》一书前言中回顾(秦大河等, 2007), 世界气象组织 WMO 的前身—国际气象组织 IMO—在 1929 年成立了气候学(还不是干旱气候学分支) 技术委员会; 20 世纪 30 年代美国出现了严重的“沙尘暴干旱”; 1947 年美国 Tannehill

收稿日期: 2017-04-24; 定稿日期: 2017-10-16

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602100); 成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201721)

作者简介: 钱正安(1940-), 男, 江苏镇江人, 研究员, 主要从事高原气象、数值预报和模拟及干旱气候研究. E-mail: qza@lzb.ac.cn

通信作者: 宋敏红. E-mail: songmh@cuit.edu.cn

(1947) 出版了《干旱—它的成因和影响》一书,这可能是美国(也是世界)干旱气候研究早期较系统的专著;接着,Thornthwaite(1948)指出定义干旱应同时考虑水分收支两方面影响的有效湿度(moisture availability)重要概念及计算潜在蒸腾 PET 的经验计算公式(下称其计算的 PET 为 PET-Th 值)(Thomas,1997)。之后,联合国建立,世界干旱区研究顾问委员会建立,美国等及联合国相关专业机构对世界干旱气候研究的组织、协调就更有序了。故可把 1940 年前后视为世界干旱气候研究史上的重要里程碑和转折点。因此,主要回顾和介绍过去 70 多年来的世界干旱气候研究。

相关的干旱气候文献浩如烟海,又散布在各国气象、地理、植物及环境等各专业期刊,以及各学科专著中。鉴于干旱问题的全球性,涉及到各学科交叉的复杂性,虽然它的部分分支内容研究:如干旱指数(WMO,1975; Heim,2002; Redmond,2002; Keyantash et al,2002; Svoboda et al,2002; Lawrimore et al,2002)、北非南撒哈尔干旱(Druyan,1989; 史培军等,2001; Shinoda,1990; Nicholson et al,1980,2000)及中国西北干旱(高由禧,1989; 马柱国等,2007; 黄建平等,2013; 符淙斌等,2002; 张强等,2000,2001,2011; 董安祥等,2006; 王劲松等,2012; 钱正安等,2001; 王涛等,2003; 胡隐樵等,1987,1994a,1994b,2004; 王介民等,1999; 黄荣辉等,2013; 汪卫国等,2005; 程国栋等,2006a; 李新周等,2004; 叶笃正等,1990; Qian et al,1998)等的研究进展较多,但迄今世界干旱气候研究综述性文献寥寥(耿其昌等,1985)。要作这样时空间跨度的干旱气候研究评述并非易事。在回顾、总结过程中力求广泛搜集、涉猎更多文献,更全面的了解国内外前辈及同行们的成果。所幸上述研究成果还算丰富,这些年来我们也一直在边研究、边搜集,努力从不同部门及渠道,并顺藤摸瓜地从不同文献中搜索新的文献。如两本 WMO 的干旱技术报告(WMO,1975)是经原在日内瓦 WMO 总部任高官的颜宏教授协助获取的;1992 年 Hulme and Marsh 的最新版全球干旱半干旱区分布图是从一本干旱区地貌学书中偶然发现的(Thomas,1997);有关 2002 年夏季美国大旱的报道则是乘坐航班,从《华盛顿邮报》知悉的(Booth,2002)。

鉴于各干旱区的地理及气候环境迥异,发达国家和发展中国家对干旱气候的重视程度及研究水平

也有较大差异。为了稍仔细一点介绍和评述世界干旱气候的研究动态和进展,本综述(I)首先介绍 20 世纪世界两次重大干旱事件;接着以若干主要干旱区国家的干旱气候研究动态及联合国相关专业机构的贡献为纬线;继而,综述(II)再以世界干旱气候五方面核心内容的研究进展为经线(钱正安等,2017);分别从横、纵两方向较全面地梳理和勾画过去大半个世纪以来世界干旱气候研究的主要动态和进展的经纬脉络和图像。

万事开头难。这里的梳理和归纳,可能取材偏颇,挂一漏万。以笔者的浅薄,文中的看法和评述也不一定准确。但聊胜于无,抛砖是为了引玉。

2 近百年全球的两次重大干旱事件

早在 1955 年于美国新墨西哥州召开的干旱区会议上,就已明确世界干旱气候研究,要以干旱灾害为重点(Hodge et al,1963; Dregne,1970)。历史反复证明,某地区一次重大干旱事件的发生,既造成当地巨大的灾害和损失,也立即引起相关学者的关注和研究,以及当地政府决策者们的反思。于是,催生了许多干旱研究论文或著作发表,从而加深人们对该次干旱气候的认识,也促使当地政府采取更合适的对策。在这种意义上,坏事变好事,重大干旱事件的出现对干旱气候研究有促进和推动作用。20 世纪世界各地出现了一系列干旱事件。其中,有两次在文献中累被提及,堪称 20 世纪的重大干旱事件:即 20 世纪 30 年代美国的沙尘暴干旱(Tannehill,1947; Wilhite et al,1985,1987; Fye et al,2003; Cook et al,1999)和 20 世纪下半叶的北非南撒哈尔持续干旱(Nicholson et al,1980,2000; 兰天,2000)。该两次事件灾情重,警示作用强,后者更是全球瞩目。故先予以介绍。

2.1 20 世纪 30 年代美国的沙尘暴干旱

1870 年后,当时的美国政府热衷于“种麦比放牧生产力更高”,鼓励中西部大平原区牧场主垦荒种麦。于是,美国中、北部大平原区:从北达科他州向南至奥克拉何马州等 5 个州的大片低草原成百万公顷地被开垦(Tannehill,1947; Fye et al,2003; Cook et al,1999; 兰天,2000)。刚开始虽然巧逢美国中、西部 1905-1917 年间的湿期(Fye et al,2003; Cook et al,1999),也曾连年丰收。但好景不常,因大片草原被开垦,严重破坏了植被,遇上 1929-1940 年的大旱(1934-1936 年尤盛)后,美国则付出了惨痛的代价。最初,1931 年春弱沙尘

暴还仅出现在太平沿岸的华盛顿及奥勒岗两州。1932 年及 1933 年沙尘暴活动渐增,已扩展到中部大平原区。1934 年及 1935 年夏季又干又热,美国大部分州降水偏少 6 成左右,该两年小麦减产 3~4 成,春季沙尘暴更多。如 1934 年 5 月 12 日南部大平原的强沙尘暴就席卷了大半个美国:沙尘刮起,形成一条东西长 2 400 km、南北宽 1 500 km、高 3.2 km 的巨大沙尘输送带;这次沙尘暴竟持续了 3 天,把南部大平原区约 3 亿吨肥沃的表层土壤先卷挟到空中,再输送并沉降在美国东部大地和大西洋上(Tannehill, 1947; 兰天, 2000)。1935 年 3~4 月更多强风,几乎连刮 27 天,被称为“黑色星期天”的“1935 年 4 月 14 日”强沙尘暴亦给南部大平原区人们留下可怕的记忆(Tannehill, 1947; 兰天, 2000)。那些年的大旱、频繁的沙尘活动、外加蝗虫灾害曾使全美国上下一片惊恐。连时任总统罗斯福 1934 年还专门在国会作了“论大平原未来的报告”,重申水土保持的重要性。于是,过去多年一直未被重视的美国《水土保持法》很快获国会通过,随即采取了诸如我国“退耕还草”、营造防风林带等一系列水土保持补救措施。加上 1936 年(特别是 1939 年)后,降水逐渐增多,沙尘活动才逐渐减弱。因它多沙尘暴活动,美国英语文献中常用“dust bowl of 1930s”,或“1930s dust bowl drought”等生僻的术语专称它(Tannehill, 1947; Fye et al, 2003; Cook et al, 1999),造成其他语种及不熟悉美国干旱史实学者们的误译(近 20 年大部分中文文献、新闻报道、乃至部分中英文词典中竟然将美国 1930 年代发生的“dust bowl”及“dust bowl drought”等生硬地直译为“尘盆”、“尘窝”、“土谷”及“土谷干旱”等。这里 dust bowl 实际是“沙尘笼罩”义,应分别意译为“沙尘暴”或“沙尘暴干旱”。美国英语文献也将这类沙尘暴严重的干旱称为“1930's-like drought”,或“dust bowl-like drought of 1930's”;反之,则称“1950's-like drought”,以与多数像 1950 年代(1956 年尤旱)沙尘暴不严重的干旱区别(Fye et al, 2003; Cook et al, 1999)。

诚然,这次大旱确与连年持续少雨有关,是“天灾”;但过度垦荒的“人祸”也加重了灾情。最后造成中、北部大平原区北达科他州等前述 5 个州,约 250 万人离家出走的“生态移民潮”。曾被列为“历史上三大人为生态灾难”之一(兰天, 2000)。该事件是支持后来 Charney(1975)提出地-气正反馈相互作用致旱机理的重要佐证之一。根据 Fye et

al(2003)和 Cook et al(1999)全美国高分辨率树木年轮重建的近 500 年干、湿资料序列,即便是近 500 年间最强的 1570-1587 年特大干旱(megadrought),也未见如此强的沙尘活动。而 20 世纪 30 年代后因美国在实践中已注重水土保持,尽管后来也出现了 20 世纪 50 年代、1987/1988 年、及 2002 年等大旱,后三者的严重干旱面积也占全国 40%左右,但像 20 世纪 30 年代那样的沙尘暴干旱历史悲剧未重演。这就从正、反两方面说明,人类和环境友好发展的重要性。

2.2 北非南撒哈尔 20 世纪下半叶的持续干旱

众所周知,全球面积最大的干旱半干旱区在北非 10°N-35°N 之间。它分布在世界第一大沙漠撒哈拉(Sahara)沙漠及其南北两侧地区[图 1 及钱正安等(2017)图 1~2]。该干旱区的面积远在 1×10^7 km² 以上。Nicholson et al(1980, 2000)曾详细分析了北非地区的降水分布和变化,那里的降水大体沿纬圈呈带状分布,在 16°N-30°N 纬带内,年平均雨量都在 50 mm 或 25 mm 以下,年际降水变率接近 1.0。又据 Mantimin et al(2011)报道,北非利比亚东南部的 El-kutra 站(24.2°N, 23.3°E)过去 50 年的平均雨量才 1.8 mm,这意味着那里可能出现终年无雨日。从干旱区面积、年最低雨量及年际降水变率看,世界第一大干旱区非它莫属。

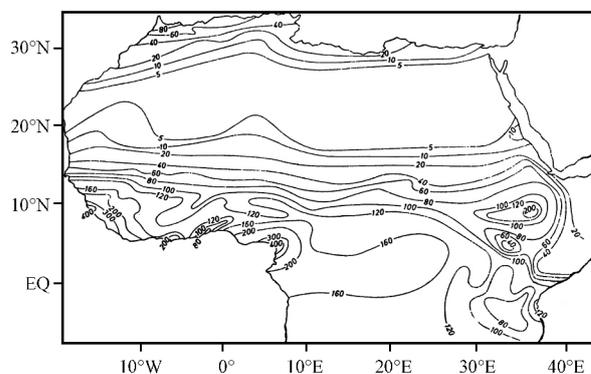


图 1 北非干旱半干旱区多年平均降水量分布
(单位: cm) (Nicholson, 1980)

Fig. 1 Distribution of annual mean precipitation in arid and semi-arid areas of North Africa. Unit: cm
(From Nicholson, 1980)

过去人们常把北非撒哈拉沙漠以南约 1 000 km 宽的半干旱带区(10°N-20°N)统称为南撒哈尔地带(或气候区)(Druryan, 1989; Nicholson, 1980)。根据 Nicholson(1980)的分析,在南撒哈尔地带(图 1),雨量主要向南递增,约每 2.5°N 一带,每带内

东西方向亦有少许差别,故该地带雨量分布呈“四带五区”的细节分布特征。该地带接近北非赤道辐合带 ITCZ 的最北界位置。降水集中在 6-9 月,尤其是 8 月,其多年平均雨量在 200~800 mm,个别地区可低至 22 mm(吉野正敏,2002),甚至更低。它包括几内亚、尼日尔、埃塞俄比亚及苏丹等约 20 个国家,那里人口相对密集,土地利用不合理问题突出,这次北非大旱主要就发生在南撒哈尔地区,约是 5 亿人口的家園,是典型的副热带干旱区。

Thiaw and Bell(王绍武,2000)曾给出了南撒哈尔地区 1951-1999 年逐年 7-9 月的降水距平(图 2)。刘家琼等(2003)和 Rowell et al(1992)曾详细介绍了这次南撒哈尔干旱的发展过程。该地带在经历了 20 世纪 50 年代至 60 年代中期的相对湿期后;从 1968 年起急剧转旱,其中 1972-1973 年,1982-1984 年,1990-1992 年,特别是 1982-1984 年更旱;在此期间,曾有几回仅维持 1~2 年的相对湿年,仅到 1999 年西部的降水距平才近 100 mm,几乎连旱了 32 年(图 2)。比该地带历史上 20 世纪 10 年代及 40 年代的干旱期都旱得多[图 2,钱正安等(2017)图 4]。

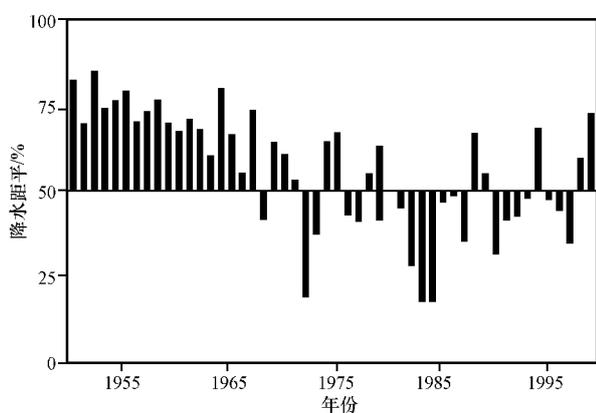


图 2 1951-1999 年 7-9 月南撒哈尔地区逐年降水距平直方柱

纵轴降水距平是对 1961-1990 年平均雨量之差(王绍武,2000)

Fig. 2 Square column of precipitation anomaly from July to September during 1951-1999 in South Sahaer area. The precipitation anomaly in vertical axis means the difference with mean precipitation during 1961-1990

(From Wang, 2000)

(From Wang, 2000)

长期干旱给那些主要在 20 世纪 60 年代刚获得民族独立不久的约 20 个小国带来了灾难。那里本来就生产力低下,抗灾能力弱(Hulme, 1996),仅 20 世纪 70 年代初的干旱就造成该地区 20 万以上人口死亡;1984 年干旱更在埃塞俄比亚造成大饥

荒,使近 100 万人口死亡;家畜减少 40%;一些部落间还发生了战争。

对这次持久大旱的原因,已有许多文献(Shinoda, 1990; Folland et al, 1986, 1991; Nicholson, 1988; Sud et al, 1985; Giannini et al, 2003; Washington et al, 2003; Prospero et al, 1986; Chamey, 1975)对其进行了分析,详见钱正安等(2017) 5.1 小节的讨论。

该事件是 20 世纪全球范围最大,持续最久的干旱。它使撒哈拉沙漠约以 $50 \text{ km} \cdot \text{a}^{-1}$ 的平均速度向南撒哈尔半干旱区扩展。它也提出了带全球性的荒漠化和人类过垦土地、滥伐森林、过采地下水及温室气体排放等高强度的人类活动对自然环境的影响问题(王涛等,2003)。为此,自 1990 年起 WMO 和联合国环境署 UNEP 联合组织了各国政府间气候变化委员会 IPCC 的历次科学评估报告工作;在 1994 年 6 月还通过了《联合国防治荒漠化公约》。

“荒漠化(Desertification)”是在干旱半干旱和半湿润区,由于气候变异和人类过垦过牧等不合理的土地利用等多种因素造成的土地退化现象(王涛等,2003),它包括沙漠化、水土流失及盐渍化等不同土地退化形态。沙漠化(Sand Desertification)是我国北方广大地区土地退化的主要形式(王涛等,2003;秦大河等,2002;程国栋等,2006a)。沙漠化的发展是一种自加速过程,已退化了的土地想恢复它,代价很大,其花费将呈指数增长,那是一种不可逆过程。显然,应合理利用土地,尽量避免沙漠化的发展。

3 若干主要干旱区国家的研究动态

以下有代表性地简述世界几个主要干旱区国家,即发达国家美国和澳大利亚、发展中大国中国,以及发展中小国蒙古国等不同发展水平国家的干旱气候研究动态。

3.1 美国

美国干旱区主要分布在中、西部(钱正安等,2001),在南北向伸展的落基山东侧与密西西比河之间,其干旱半干旱区面积(按年平均雨量在 500 mm 以下计)约占全国总面积的 31% 左右,比中国干旱半干旱区面积小;年平均雨量在 200 mm 以下的干旱区面积很小;最早的内华达州的年平均雨量接近 100 mm,比中国西北极端干旱区湿得多(Tannehill, 1947)。但后面将指出,美国中、西部的确实常发生干旱,平均约每 10 多年出现一次年代际旱

期(Fye et al ,2003; Cook et al ,1999)。

美国是当今世界科技最强国(包括干旱气候研究领域)。首先,美国的干旱气候研究开展较早,这也可能与前述 20 世纪 30 年代美国沙尘暴干旱事件的推动有关,Tannehill(1947)最早发表了干旱气候专著。该书前部以较多篇幅描述了那次沙尘暴干旱的可怕情景及危害;然后,重点对比分析了过去 40 年间(1899-1938 年)最湿(最干)的 1915(1934)年夏季平均雨量分布及环流的差异;分别讨论了大气环流、太阳黑子及沿海冷洋流对美国干旱气候形成的影响。在那时他已用了干、湿年(夏季)对比的合成分析方法分析干湿年盛行环流等的差异,开始用树木年轮代用资料分析美国地质时期的干旱气候变化。他也继柯本后较早给出全球干旱半干旱区分布图(Tannehill,1947),内容较丰富,有些至今仍有部分参考价值。1946-1956 年间美国又遇持续 11 年的干旱(Fye et al ,2003; Cook et al ,1999),重又对干旱区研究感兴趣,于 1951 年建立了美国“沙漠和干旱区研究分会”;1957 年还制定了干旱区研究计划;以后还出版了两本综合性的(包括干旱区气候、植物、动物及管理研究文集(Hodge et al ,1963; Dregne 1970)。再以后,美国不仅对本国相继出现的 1987/1988 年大旱等进行了研究;而且还对北非南撒哈尔(Nicholson et al ,1980,2000; Giannini et al ,2003; Charney ,1975)及中蒙(Manabe et al ,1990; Broccoli et al ,1992)等其他地区的干旱气候进行了不少研究。

美国干旱气候的研究内容扩及它的每一分支领域。

为客观地确定某地某次干旱事件的强度及持续时间,也和其他干旱事件相比较,首先应有一客观定量的标准,即干旱(期)的“标准”(英文中多用“indices”(Heim,2002; Redmond,2002; Keyantash et al ,2002; Svoboda et al ,2002; Lawrimore et al ,2002),以下中译文统一称“指数”)。钱正安等(2017)还提及划分干旱(区)的“标准”(英文多用 criteria(Thomas,1997),以下中译文统称“判据”)。既与干旱(期)“指数”相区别;也避免目前文献中对干旱“指数”,又称干旱标准、指标及定义等混乱称谓;对干旱区“判据”亦然。美国对干旱指数的讨论已近百年。Heim(2002)曾详细评述了美国干旱指数的研究。待 Thornthwaite 提出有效湿度先锋性概念后(Thomas,1997),Palmer(1965)提出他的

干旱强度指数 PDSI(Palmer Drought Severity Index)。综合考虑了每周(月)的降水、气温及前期的土壤湿度三要素。美国农业部率先用 PDSI 指数。以后新提出的其他干旱指数常和 PDSI 指数比较,美国和中国部分学者甚至还将它和代用的树木年轮资料统计拟合,重建了各地地质时期的 PDSI 干、湿指数序列(Fye et al ,2003; Cook et al ,1999; 李江风等,2000; Li et al ,2006; 安顺清,1985; 卫捷等,2003)。被称为世界最广泛使用的干旱指数,是美国干旱指数研究的转折点。当然,美、中、澳学者也指出了它的若干不足(安顺清,1985; 卫捷等,2003; Alley,1984; Olapid,1985; Mckee et al ,1993)。如它更适合于短时间尺度的农业干旱及不过干、过湿地区等的局限性。另外,美国也提出了标准化的降水指数(Standardized Precipitation Index,SPI)(Mckee et al ,1993),从卫星上大范围监测的标准化了的植被指数 NDVI 等一批也广泛使用的干旱指数(Kogan,1995)。

在努力绘制更新、更准确的全球干旱半干旱区图方面,美国学者的贡献亦多。如 Tannehill(1947)和 Thornthwaite(1948)的干旱区图;Trewartha 曾 5 次修改后的柯本植被—气候区划图(秦大河等,2007),它在植物学界应用颇多;地理学教授 Meigs(吉野正敏,2002)也利用有效湿度 P/PET 判据计算绘制了较新的全球干旱半干旱区图[钱正安等(2017)图 1]。

美国降水分三大区系。其中,中西部干旱区的降水主要与落基山东侧,北来的极地冷干气流,南来的墨西哥湾暖湿气流及西来的过落基山背风坡下沉暖干气流三者的交绥有关(Tannehill,1947; Hobbs et al ,1996)。美国中西部干旱常出现在春末及夏季。诱生干旱的环流常与当地盛行中、高层高压脊位置有关(Tannehill,1947; Fye et al ,2003; Cook et al ,1999; Trenberth et al ,1988)。它既不同于其他大多数副热带干旱区,也不同于同受大地形影响的中蒙干旱区(钱正安等,2001,2011)。从树木年轮重建的高分辨率、长序列旱涝资料显示(Fye et al ,2003; Cook et al ,1999):美国过去 500 年间分别出现了年代际(6~21 年)尺度的干(湿)期 21(4)次,干期数是湿期数的 5 倍。与同纬度区的我国东部相比,美国中、西部更多干旱和龙卷等强不稳定性对流天气;而东亚夏季风区更多暴雨洪涝。美国东西两侧均濒临大洋,但数值模拟显示,过去 150 年

北美的主要干旱却更多与太平洋(特别是中、东热带太平洋)海温(Sea Surface Temperature, SST)引起的全球环流异常有关(Trenberth et al, 1988)。

过去人们对北非降水气候所知甚少。南撒哈尔大旱后,美国学者Nicholson et al(1980, 2000)利用翔实的雨量资料,揭示了南撒哈尔地带降水主要呈前述“四带五区”的细节分布特征;他还指出该地带陆面变化对干旱形成的影响(Nicholson, 1988)。Charney(1975)更作了增加北非 18°N 以北的地面反照率从14%~35%的模拟试验,相当于典型草地变成极端荒漠化区。以模拟过垦过牧使植被锐减对降水的影响,结果北非模拟的降水减少约40%。于是他提出了著名的干旱和沙漠形成的陆—气相互作用的新理论。可惜,他在模拟中过分夸大了地面反照率的变化幅度而遭人诟病。其实目前多数学者已认同土地过垦过牧确实是造成前述南撒哈尔干旱等的次要原因(Giannini et al, 2003)。同时,Manabe et al(1990, 1992)还作了青藏高原大地形对中蒙中纬度干旱气候影响的模拟;Willhite et al(1985)和Glantz(1987)也分析了上次北非大旱对环境和社会经济等的影响。在干旱监测和预测方面美国也作了有益的探索。

另外,以美国科学家为主,多国学者参加,几代人为发展全球海—气耦合的共用气候系统模式(CCSM)(Blackmon et al, 2000)、MM5中尺度模式,并将MM5模式与CCSM全球模式耦合嵌套的区域气候模式系统(Giorgi et al, 1991)、乃至美国国家环境预测中心NCEP/NCAR等首先提供的全球长序列再分析值格点资料(Kalnay et al, 1996; Kanemitsu et al, 2002)等,也都应视为美国等对世界干旱气候研究的重要贡献。

美国干旱气候研究主要在NCEP及NCAR等国家中心、亚利桑那和内布拉斯加等中、西部各州大学的干旱研究所或中心开展。而美国出版的杂志《科学》《美国气象学会公报》(BAMS)、《气候杂志》(Journal of Climate)及《地球物理研究通讯》(Geophysical Research Letters)等是集中发表重要干旱气候研究论文的期刊。

3.2 澳大利亚

澳大利亚是世界上干旱区面积占很大比例(约75%)的大国,干旱半干旱区面积接近 $5.8 \times 10^6 \text{ km}^2$,是面积仅次于北非的世界第二大干旱半干旱区(Thomas, 1997; 钱正安等, 2011)。其干旱区主

要分布在该国中部及西南部的西澳大利亚、维多利亚及南澳大利亚三州[钱正安等(2017)图1,图2]。

澳大利亚常出现全国性干旱灾害,Kirono et al(2011)更称干旱是该国气候的正常分量。据该国前气象局长Gibbs et al(WMO, 1975; Gibbs, 1987)统计,过去近百年来该国出现一半面积以上干旱年的概率约50年一遇。干旱区的平均雨量不足250 mm。据澳大利亚学者McMahon et al(2008)报道,该国中部干中心Mungeranie站过去102年的平均雨量才132 mm,年雨量变率达0.79。其少雨程度及降水年际变率却不及中蒙干旱区(钱正安等, 2011)。

位于南半球的该国关注当地夏半年(10月至翌年5月)作物及牧草生长期的降水情况。先进的农、牧业及开矿业是该国的三大经济支柱。环绕该国东部及东南部沿海有一长2400 km、东西宽60~180 km的小麦及牧草生长带,特别是东南部的墨累及达令河流域,是该国的“粮仓(food basket)”。

专注于单一降水量干旱指数分析是该国定义干旱的特点之一。他们过去也曾使用月雨量累积距平指数。在对比分析该国先前使用的Foley指数(Foley, 1957)及美国PDSI指数(Palmer, 1965),效果均不是很好,之后,Gibbs(1987)提倡用新的(季)雨量十分位区间(Rainfall decile range)干旱指数。据此他们绘制了澳大利亚1885-1965年间逐年的干、湿等级图,与Foley当年查阅过去历年新闻报道及农、牧业灾情实况综合整理出的干、湿年表相当一致。因此,该干旱指数一直沿用至今(WMO, 1975)。1974年WMO第26届执行委会还邀请Gibbs作了“干旱—它的定义、描述和影响”的专题报告(WMO, 1975)。可是,最近Nicholls在对比分析澳大利亚1982, 1994及2002年3次全国大旱后,强调2002年的高温对增加蒸发、加剧干旱的重要影响,提出仅考虑降水量的干旱指数还应考虑气温要素的争论(Nicholls, 1985, 2004)。

因澳大利亚干旱区主要位于南回归线(23.5°S)两侧,这显示南半球Hadley环流下沉支对该干旱区背景形成的影响,同北非及西南亚等干旱区,是全球典型的副热带干旱区之一。因该国四面临海,它的降水气候更易受热带太平洋、印度洋及南面海洋等海温SST的影响。McBride et al(1983)根据更长序列的资料,分析了各季节南方涛动指数SOI与同季及滞后季节区域平均雨量间的相关。其中,春

季(9-10月)的SOI与夏季(12月至翌年2月)雨量的滞后负相关系数达-0.60,这还得到近期 Kirono et al(2011)多模式集合模拟结果的支持。于是, McBride et al(1983)满怀信心地认为,根据春季的SOI可以预测该国东南部夏季的干旱。该国北部及西北部是最多雨区,它更多受印度洋及西太平洋SST的影响。Streten(1981,1983)曾仔细分析了环流和北部沿海冷海温对该国干旱的影响。南半球副热带高压(澳大利亚高压单体)环流异常也是其干旱加剧的直接诱因,正常年夏季副高脊线位于27°S附近。它若明显偏北,则该国北部偏旱;反之亦然。Shi et al(2008)和Cai et al(2006)也作了观测和模拟研究,结果表明近50年来该国西北部的雨量增加了50%,而该国南方的雨量则减少20%。White(2000)则分析了南方海洋上SST异常连同海平面气压SLP异常在南方海洋缓慢东移,即所谓的“环南极波动”对该国降水的影响。

澳大利亚的气候模式及降水气候模拟工作也较先进。如前述美国的共用全球气候模式系统CCSM 1983年时的最早版本CCSM就采用了澳大利亚气象局Puri et al的谱模式动力框架方案(Blackmon et al,2000)。在近年各国政府间气候变化委员会IPCC向WMO提交的历次气候变化评估报告中,就常见到该国联邦科学和工业组织CSIRO mk 2.0及3.0模式系列气候模拟的结果,据陈晓晨等(2014)的全球气候模式对比CMIP5对中国地区的降水模拟评估,CSIRO的mk 2.0及3.0模拟效果相当好。澳大利亚国从1965年起就以每月干旱声明(Drought statement)形式发布该月有无干旱的信息。这在世界各国中算是较早的。根据他们的模拟预测,该国未来其南部的降水偏少趋势仍将持续,而且干旱似有向该国东南沿海一带发展的趋势(Shi et al,2008;Cai et al,2006)。

值得提及澳大利亚先进的干旱区农业管理模式(戴贝特,2009;伯恩斯,2007)。在该国东南部的小麦种植区,已有20%的农场主们利用卫星导航技术,引导拖拉机精确作业,确保每一寸土地都得到充分利用,播种和施肥一次完成。让秸秆留茬在田,已有60%的耕地采用先进的免耕或少耕法,以保持土壤水分和土壤含碳量,使农产量提高。

该国的干旱气候研究主要在澳大利亚气象局及CSIRO(含大气研究室)进行。《澳大利亚气象杂志》(Australian Meteorological Magazine)是该国的

主要气候出版刊物。另外,在联合国出版的国际性期刊《干旱环境杂志》(Journal of Arid Environment)上,也常见到澳大利亚学者们的干旱气候文章。

3.3 中国

中国也是多干旱灾害的大国。本文主要关注其西北地区的永久半永久性干旱半干旱区,它是中蒙干旱区的主体部分。至于青藏高原上还有大片高寒的半永久性干旱半干旱区及我国东部湿润半湿润区内不时出现的环流异常性干旱,则不在主要讨论之列。

对古老的干旱问题,我国(特别是东部)史书及古籍中零散的旱涝记载描述较早较多。后来,竺可桢(1972)、叶笃正等(1990)、国家科学技术委员会(1990)、中央气象局气象科学研究所(1981)及张家诚等(1985)等对环流异常性旱涝研究也相当丰富。但西北干旱气候研究起步较晚。粗略梳理,西北区干旱气候研究约经历了1950年代中期前漫长的民国旧政府和新中国创建初期的西北探险、考察及建站期;1950年代后期至1970年代末的干旱气候研究初期及1980年代以来的干旱气候研究大发展期三大阶段(钱正安等,2001,1998)。

以下分别是对该三大阶段西北干旱气候研究活动的简要回顾。

3.3.1 20世纪50年代中期以前

广袤、神奇的大西北自然曾吸引了纷至沓来的许多国内外的探险家、考古学家及其他学者。如瑞典探险家和学者斯文赫定(An Sven Hedin)等曾八进我国,发现了新疆楼兰古国遗址;民国政府建立后,我国历史学家黄文弼等也都曾先后分别考察了大西北的环境状况(王涛等,2003;郝北洋,2007)。

值得提及中瑞于1927-1934年间的联合西北科学考察。考察项目包括考古、地质及气象等学科。这次考察袁复礼等在北疆盆地南缘戈壁滩上采集到72具小爬行动物化石,是当时考古界的重大发现。1980年后人们又陆续在青藏高原北侧的酒泉、兰州及临夏盆地等(特别是临夏),多批次发现恐龙等多种哺乳动物化石(邓涛等,2007;瞿学忠等,2009;张馨玉等,2009)。通过不同种属哺乳动物生息的环境及气候条件以及承替关系分析,说明西北地区地质时期曾很湿润。为人们解读和重建青藏高原隆升史和中国西北干旱气候演变史提供了最重要的实物依据。当然,这次考察也使我国丢失了

大量珍贵文物(王涛等,2003)。

早在20世纪30年代,民国政府虽也在西北一些省会城市建立了测候所(徐德源等,1995),但站点太少,诺大的新疆,到1949年仅有乌鲁木齐等四站,因测站极少,资料不连续,又主要为空军服务,民国旧政府迁台时留下有价值的气候资料很少。

值得提及我国气象界前辈竺可桢这一时期的两项先锋性研究:他最早进行了中国气候区划分析(竺可桢,1931),这是继柯本世界气候区划不久后的事;同时,他也最早进行了东亚季风的研究(竺可桢,1934),当时称“东南季风”。

1949年新中国建立后的气象事业初创期,原中央气象局业务千头万绪,百废待兴,主要忙于建站和日常观测和预报等业务(徐德源等,1995);中国科学院当时也因主要关注于青藏高原地形影响和东亚大气环流分析。都还无暇顾及西北干旱气候研究(高由禧,1989;施雅风等,2000)。

3.3.2 20世纪50年代至70年代干旱研究初期

中国真正意义上的西北干旱气候研究可追溯到1958年大跃进高潮中。该年春季中国科学院成立了改变西北干旱面貌组(高由禧,1989;施雅风等,2000),原中国科学院地理所及地球物理所的前辈们施雅风、高由禧等在甘肃省委支持下,在当年夏季即率领7个小分队共2000余人分赴祁连山区进行大面积雪面黑化,融冰化雪的调查和研究,试图缓解西北干旱问题。当年冬天就在兰州安营扎寨,建立了我国第一个干旱专业性研究机构—原中国科学院兰州地球物理所(现中国科学院西北生态环境资源研究院的一部分)(高由禧,1989;施雅风等,2000)。据当时的融冰化雪试验报告总结“若选择河西暖高压脊控制的晴好天气进行山区雪面黑化作业试验,能部分增加黑河流量。”但该试验杯水车薪,终难解西北旱区之渴;其做法也不符合人与环境和谐发展的科学发展观;加上时遇国家三年经济困难调整时期,1960年该试验被迫告停。

20世纪50年代西北区西部偏湿,1952、1958年及1959年新疆更明显偏湿,1958年8月的天山暴雨山洪还冲毁了原库车县城(徐德源等,1995)。新疆气象局开始注意中亚低涡发展等对新疆强降水的影响和新疆的水平衡分析(徐德源等,1995;张学文,1962)。60年代中期,原兰州大气高原物理所和甘肃省气象局协作进行河西干热风的野外观测、预报和防御研究(罗四维等,1973;曹泰生等,

1974;钱正安,1973)。河西干热风是夏季新疆暖高压脊发展东移的产物,常造成河西、阿拉善地区的高温干旱过程。从两例干热风天气过程的诊断分析和数值预报揭示,干热风时高原北侧盛行下沉运动,其高温与下沉增温有关。这应是我国探讨西北干旱形成的最早尝试(曹泰生等,1974;钱正安,1973)。随着我国气象资料的积累及当时的高原气象等气象科研协作区会战研究,也开始较系统地分析西北地区及青藏高原上的平均环流及系统、以及高原大地形的影响等研究(中国气象局,1966,1978;中国科学院兰州高原大气物理研究所,1981;罗四维等,1957,1982;汤懋苍,1963;高原低值系统协作组,1978;赵卫等,1978;杨昭等,1984;张琼等,1997)。许多学者先后分析了高原北侧地区和高原上的西风带槽、西太平洋副热带高压(西太副高)、南亚高压和高原低涡等对西北区降水的影响。中国气象局出版了两本中国气候图集(中国气象局,1966,1978),原兰州高原大气物理所等联合绘制出版的《高原气候图集》填补了中国和世界气候图上高原区气候图的空白(中国科学院兰州高原大气物理研究所,1981)。这些也是后来认识中蒙干旱区夏季干、湿环流的基础。

这一时期,中央气象局气象科学研究院等整理了我国1470—1979年间的史书及古籍中的旱涝记载,较早出版了《中国近五百年旱涝分布图集》(中国气象局气象科学研究院主编,1981)。陈咸吉(1982)在我国的气候区划中又以“有效湿度”为判据,分区添加了极端干旱、干旱及湿润区等。可惜作者在文中自己却说成是“干燥度系数”,造成一些文献后来的引用也有误。添加了极端干旱、干旱及湿润区等。竺可桢(1972)还根据考古、物候、方志及器测四时期中大量的考古及物候记载,总结了我国近五千年的冬季地面气温的变化曲线。叶笃正等(1979)和徐国昌等(1983)比Manabe et al(1990,1992)更早提出了夏季高原地形热力和动力作用对中蒙干旱气候区形成的影响。为后来的中蒙干旱气候成因研究指明方向。

3.3.3 20世纪80年代以来的干旱研究大发展期

20世纪70年代末以来,面对全球明显增暖,南撒哈尔持续干旱及东亚夏季风持续减弱,我国北方干旱化加剧,先后出现了1995,1997和2000年的西北区东部和华北区的年代际大旱;几乎同期,蒙古国也出现了1999—2002年大旱的严峻事实;我

国也加强了干旱气候研究:中国气象局分别于 1985 年及 1991 年成立了兰州干旱气象和乌鲁木齐沙漠气象研究所;于 20 世纪 80 年代末以后,分别在南疆沙漠腹地的塔中(83°50'E,38°40'N)等增设了 6 个油田气象站;中国科学院、国家气象局及自然科学基金委也先后启动了多个干旱专项项目;以此为契机,我国干旱气候研究也迎来了全面发展的新时期。

新时期的干旱气候研究已扩及中蒙(而不仅是中国西北区)干旱气候的基本事实和特征,夏季降水的干、湿环流型,春季沙尘暴活动,干旱气候的成因,西北核心旱区夏季降水主要水汽源地及输送分析,以及旱区陆面过程观测研究等 6 个方面。这些方面的内容相当丰富,进展明显。限于篇幅,这里只能择其具有区域性及代表性者,依次总结如下。

(1) 中蒙干旱气候的基本事实和特征

中蒙干旱区的降水主要出现在夏半年(5-9 月),占年水量的 80%左右(钱正安等,2011;白肇焯等,1988;谢金南,2000;罗哲贤,2005;丁一汇等,2001;徐国昌,1997;李栋梁等,2000;李江风,1991;王文辉,1990;王江山,2004;戴加洗等,1990;张家宝等,1987;陈豫英等,2010,2011)。该区降水主要受高原地形、东亚和南亚夏季风及西风带扰动的共同影响。为定量描述干旱(期),学者们除广泛利用我国传统的年(夏季)降水百分距平及标准化的雨量标准差外(钱正安等,2001;叶笃正等,1996;国家科学技术委员会,1990;中国气象局气象科学研究所,1981),还使用中国气象局推荐的综合变量指数 C_i 及其改进指数 MC_i (孙安健等,2000)、以及美国的 PDSI 指数(Palmer,1965)。为划分极端干旱、干旱及半干旱区等干旱环境,除用中国气象局的有效湿度外(陈咸吉,1982),徐国昌(1997)和钱正安等(2011)还用了年平均雨量判据,后者划分的干旱半干旱区较前者似更切合实际。根据后者,中蒙干旱半干旱区总面积约 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其主体部分在中国西北地区,面积约 $3.69 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其年平均雨量小于等于 25 mm 的极端干旱区主要在南疆盆地东端。受高原大地形及天山、博格达山、乃至达板城峡谷等中、小地形的综合影响,干中心托克逊站的年平均雨量仅 6.9 mm。从干旱区面积、年平均最低雨量及降水年际变率等看,中蒙干旱区是仅次于北非及

澳大利亚干旱区的世界第三大干旱区(钱正安等,2011)。根据李栋梁等(1995,1997)、马晓波(1993)、李万源等(2005,2006)及陈豫英等(2010,2011)先后分别对中国西北及中蒙干旱区温度及降水场时空间变化的 EOF 及 REOF 分析,中蒙干旱区常出现关中汉中、黄河河套、南、北疆、青海高原、蒙古国西北部、中北部、以及东部等 9 个温、湿气候异常分区;各分区的降水普遍存在 3~4 年及 15~20 年的年际、年代际等更长准周期变化规律。过去 50 多年间中蒙干旱区除新疆中部近 20 年呈增暖增湿趋势外(施雅风等,2003),其他地区多呈增暖变干趋势(柳媛普等,2011;李万源等,2005,2006;陈豫英等,2010,2011)。全球明显增暖以来,中蒙干旱区也是北半球明显增暖区之一,区内 2°C 以上的最强增暖带在中蒙西南边界附近。中蒙干旱区增暖主要出现在冬、春季。

概言之,中蒙干旱区冬季严寒漫长,偶有暴风雪和冻害;夏季干热而短促,大气边界层深厚,地面感热加热强,光、热资源丰富;春季多风沙天气;春秋过渡季节短暂,气温日较差大(春秋季节更可达 30°C 以上),降水变率大,气候大陆度高。是全球独特的中纬度干旱区。

(2) 夏季降水的干、湿环流型

辨认干旱区盛行的干、湿环流型是夏秋季降水预报的基础。西北各省(区)已分别从 100 hPa 南亚高压及 500 hPa 副高等系统的位置关系,简洁地总结出西北区东、西部夏季的常见干、湿组合环流型。即西北区东部 500 hPa 若出现“东高西低”“北槽南涡”流型常多雨(董安祥等,2006;白肇焯等,1988;谢金南,2000;罗哲贤,2005;孙国武等,1996;张家宝等,1987;蔡英等,2015);钱正安等(2015)更将该高、中层组合流型及其地面雨带分布形象地绘成了三维图像;相反,若为“上高下高”流型,则高温干旱(孙国武等,1996;蔡英等,2015)。西北区西部若是“上高下低”形势多雨;若为“上高下高”形势则高温干旱(孙国武等,1996;杨昭等,1984;张家宝等,1987;蔡英等,2015),即对西北区西部(特别是新疆中西部)也要注意中亚中、低层低槽(涡)的影响。

还值得指出夏季高原北侧旱区独特的“垂直经圈环流”的重要性和复杂性。叶笃正等(1979)最早揭示,沿 90°E 高原北侧平均存在从高原北缘上升,旋即向北下沉的“次级闭合经圈环流”,其下沉支属

高原北缘热力诱生的补偿下沉气流性质,是西北干旱带形成的气候背景。后来钱正安等(1998,2001)进一步绘制了30年6-8月平均北半球多个经度的经圈环流图,揭示全球仅在高原经度(80°E-105°E)北侧旱区存在该平均经圈环流;且以90°E附近最强(钱正安等,2001;栾晨,2012);再后来还揭示了高原北侧旱区8个千年夏季在500~400 hPa间平均存在该环流;8个湿年平均不存在该经圈环流(Qian et al,2001)。这启示高原北侧的平均经圈环流,对高原北侧的干旱区背景及干、湿年变化均有指示意义。故可称它为“干旱经圈环流”。可再逐年查前述8个湿年表明,其中的两典型湿年1979年和1981年高原北侧居然也出现了闭合经圈环流,且相当深厚,从400 hPa一直延伸到地面;后来又发现另一新疆典型湿月1996年7月(不在前述“8个湿年”之列),高原北侧也出现了深厚闭合经圈环流(栾晨,2012)。它们是明显的反例。再查1981年夏季,高原中北部感热加热强(栾晨,2012)、高原东侧中低层偏南风及高原上偏南风均明显偏强(蒋兴文等,2007),即东亚和南亚季风水汽输送特强,且高原上的偏南风直接参与北侧经圈环流中。结果经圈下沉支位置更北,反造成高原北坡上升区更强更宽广雨区。1979年夏季及1996年7月的情况类似。

即仅当高原北侧500~400 hPa层间出现该闭合经圈环流时,才是名副其实的“干旱经圈环流”,为干年;若高原北侧虽出现了闭合经圈环流,但高原上偏南风强,且参与了高原北侧的闭合经圈环流,东亚季风水汽输送也强,则高原北侧还可能是典型湿年(栾晨,2012;徐国昌等,1979)。显示了地形及东亚、南亚夏季水汽输送共同影响中蒙干旱区及干、湿年的重要性和复杂性。

相比较,是Hadley环流的下沉支影响了北非等副热带干旱区形成;是高原北侧的闭合经圈环流下沉支影响了西北或中蒙干旱区的形成。这也有别于北半球其他经度中纬度上空平均出现的Ferrel经圈环流。这补充了前辈叶笃正等(1979)原有的认识,也丰富了世界干旱气候的内容和理论体系。

(3) 春季的沙尘暴

沙尘暴是世界各干旱区春、夏季常见的灾害性天气。在卫星沙尘观测以前,我国只有徐国昌等(1979)少数河西地区及南疆盆地沙尘暴个例分析。缺少西北区、乃至中蒙干旱区面上沙尘暴较系统的

认识和理解。以“1993·5·5”甘肃特强沙尘暴及1999-2002年中蒙东区强沙尘活动为契机,中(包括台湾)、日、蒙古国及韩国学者齐努力,大大推进了中蒙地区沙尘暴在以下五方面的研究(Qian et al,2002;方宗义等,1997;钱正安等,2006,1997;胡隐樵等,1996;牛生杰等,2001;张强等,2011;宋敏红等,2007,2006;许宝玉等,1997;李祥余等,2009;中国气象局减灾司,2002;杨德保等,2003;中央大学地球科学学院等,2005;王式功等,2000;石广玉等,2003;Takemi et al,2000;中国科学院南京土壤研究所,1996;Mikami et al,2004;Tanaka et al,2005;张书余,2008;Liu et al,2004)。

① 以前河西走廊地区常认为沙尘暴是由纯冷锋引起的(徐国昌等,1979)。Qian et al(2002)首先指出大多数沙尘暴常由低压冷锋带来大范围冷空气强风引起,属大尺度天气。但根据地面单站风压曲线及加密卫星云图实测资料首先揭示,“1993·5·5”甘肃特强沙尘暴属强对流性质(方宗义等,1997;钱正安等,1997,2006;胡隐樵等,1996),由低压冷锋+锋前干飚线共同引起。先由冷锋前干飚线触发沙尘暴,待其后冷锋赶上,又再度加强。为西北区沙尘暴史上罕见。江吉喜等更揭示其最强沙尘浓度出现在2.2 km高度(方宗义等,1997)。钱正安等(1997,2006)和胡隐樵等(1996)还构建了其形成的概念模型。也得到Takemi et al(2000)二维积云模式模拟的验证。

② 沙尘暴是怎样形成的?钱正安等(1997,2006)曾简洁地指出“沙源是物质基础,强风是动力,大气层结不稳定是热力条件”。它较好地解释了中蒙地区沙尘暴的时空分布特征:中蒙干旱区的最强沙尘暴就出现在多沙漠、戈壁的南疆盆地、河西、阿拉善及蒙古国西北部和南部一带。塔中、民勤及蒙古国南部的多年平均沙尘暴日数分别达每年65,25及30天。当然,这还少于北非及西南亚干旱区。沙尘暴主要出现在多强风的春季(3-5月),南疆盆地持续时间更长。在一日中沙尘暴常在午后一傍晚气层最不稳定时爆发。即沙尘暴的地区性分布、季节及日变化十分明显。

③ 中蒙沙尘暴活动区域特征明显。宋敏红等(2007)曾按各地沙尘暴的诱发低压、冷空气入侵路径及沙尘主要影响区等,首次将中蒙沙尘暴分为中蒙东、中、西三大区系(钱正安等,2006,2007)。

如 1999-2002 年春季我国华北、东北区频繁的沙尘活动就属中蒙东区系;它因多日本海或东北低压而爆发;主要因东路冷空气入侵,带来蒙古国东及南戈壁省的沙尘;主要影响蒙古国赛音山达及我国二连浩特以东地区。蒙古国也是东亚地区的重要沙尘源区。

在以上三区系中,中蒙西区沙尘暴主要影响南疆盆地等,它出现频数最高,受南疆盆地地形所阻,其沙尘较少东移出南疆盆地,少数东移者则影响柴达木及青海东部;中蒙中区沙尘暴频数次多,强度最强,除影响中蒙中区外,还常东移影响华北区;而中蒙东区的沙尘暴次数少、强度弱。须注意,中蒙三区系的沙尘暴活动变化趋势也不同。如 1999-2002 年中蒙东区沙尘天气活跃时,中蒙中、西区沙尘暴活动则在持续减弱中。

④ 在我国及中亚地区习惯性地将沙尘天气依次分为扬沙、浮尘、沙尘暴及强沙尘暴 4 类。这样分类合理吗?一些学者(钱正安等,2006;牛生杰等,2001;张书余,2008)先后对各地该 4 类沙尘天气时地面平均沙尘浓度的统计表明,从扬沙到强沙尘暴,其平均沙尘浓度依次呈等比级数增长,公比为 3,反映了沙尘浓度不同的本质。故以前的分类是科学的。

⑤ 沙尘暴是可预报的(强对流性沙尘暴例外)(许宝玉等,1997)。以中蒙中区系为例,各地沙尘暴爆发前 3~4 天,常有一次河西或蒙古热低压连续升温减压的发展过程;沙尘暴当日 07:00(北京时间),一些风口站(额济纳旗等) 850 hPa 也先出现动量下传大风;沙尘暴当日中午时地面降压速率更达 $1 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$;查中蒙东、西区系也有类似的征兆(张小玲等,2006;李祥余等,2009)。据此,再结合卫星沙尘图和数值预报产品等,不断滚动地实现沙尘暴的中、短期、特别是临近预报是可能的。

这些认识大大改进了人们对中蒙干旱区沙尘暴现象的原有认识、理解及预报。

(4) 西北核心旱区夏季降水的水汽源地及输送南疆盆地东端、河西走廊、内蒙古中西部、黄河河套、以及陇东南一带是西北干旱区的极端干旱、干旱、及半干旱区所在,下称西北核心旱区。夏秋季偶而也会出现每日大于等于 25 mm 的暴雨。其水汽主要来自哪里?事关降水预报及干旱气候形成等问题。过去西北区的水汽源地纷争颇大,说来自中亚(张家宝等,1987)、高原上、孟加拉湾(孟

湾)(王江山,2004;戴加洗等,1990)及四川盆地(周琴南,1984;孙纪改等,1989;谢金南,2000)、渤海(刘子臣等,1995)、以及西北本地源(白肇焯等,1988;西北暴雨编写组,1992)者都有。一段时间以来该研究陷入分歧大、难深入的困境。

钱正安等课题组一直在关注、梳理并推进西北区水汽输送分析工作(钱正安等,2001,2017;蔡英等,2003,2004,2015;周建琴等,2009a,2009b),连同陶诗言等(1964)、陆渝荣等(1983)、牟惟丰(1991,1992)及谢金南等(2000)同行们的许多重要工作,共同推进了该项研究。

台海地区是西北核心旱区夏秋季暴雨的主要水汽源地。明确指出当台海区、我国东部及河西地区分别相继出现连续台风或东部型南亚高压活动、副高西伸北挺及河西偏东风等特定环流后,将有利于台海水汽向西北核心旱区输送,酿成暴雨。最后,还形象清晰地归纳、提炼了台海水汽如何西北输的逆“之”字形输送路径,借助西伸副高外围急流—华南东南风急流、高原东侧偏南风急流以及河西偏东风气流等的“三支急(气)流三棒接力式”输送模型。这些也得到数值模拟的检验。因而,台海区应作为西北核心旱区夏秋季降水中期预报的着眼点。

这一独特而复杂的利于台海水汽向西北输送的特定环流形势及其水汽输送模型既不同于核心旱区周边的北疆等其他分区(张家宝等,1987;周琴南,1984;孙纪改等,1989;谢金南,2000;刘子臣等,1995),也不同于夏季我国东部东北、华北及江淮区等简单的经向型水汽输模型(Simmonds et al,1999;黄荣辉等,1998;Qian et al,1991)。在世界其他各干旱区也未见同类研究。这既推进了新世纪西北区的水汽输送分析,也丰富了世界干旱气候的内容和体系。

(5) 旱区陆面(物理)过程

陆面过程主要描述和模拟地-气间热量等能量和水汽等物质的交换,以及相关生化过程的影响。它有助于提高气候模式的精度,是当代边界层气象学和数值预报分支的结合。

为了准确地描述和模拟西北旱区的陆面过程,要认识旱区陆面过程的特点及相关的几十个陆面特征参数。有学者指出,地表反照率的绝对误差必须达到 0.02~0.05 的精度才能适应气候模拟的需要。为此,学者们在西北旱区沙漠戈壁、绿洲及草原等不同代表性下垫面区设站观测,于是有中日黑河地

区陆气相互作用观测试验(HEIFE, 1990-1992 年)(胡隐樵等, 1987, 1994a, 1994b; 王介民等, 1999)、内蒙古半干旱草原土壤-植物-大气相互作用(IMGRASS, 1997-1998 年)(王介民等, 1999; 胡隐樵等, 2004) 及中国西北干旱区陆-气相互作用观测试验及其延续试验 [NWCALIEX, 1999-2000 年(黄荣辉等, 2013; 胡隐樵等, 2004)] 等一系列大型有代表性观测试验研究。它们各有特点、有互补性。特别是黑河 HEIFE 及 NWCALIEX 试验。前者更注重沙漠和绿洲陆面过程差异的观测对比、绿洲和沙漠环境相互作用和绿洲效应机理的解释; 后者持续了 10 余年, 更注意对不同陆面参数的优化及陆面过程方案的检验。

HEIFE 及 NWCALIEX 两试验均显示夏季沙漠、绿洲白天反照率差异大, 分别为 0. 255 和 0. 15 (胡隐樵等, 1994a, 1994b; 王介民等, 1999; 黄荣辉等, 2013); 沙漠戈壁区地面感热加热强, 蒸发微弱(胡隐樵等, 1987, 1994a, 1994b); 敦煌沙漠的总体输送系数的观测值似乎偏小, 而黑河试验值偏大, 沙漠的感热输送系数随层结稳定度变化的幅度更大(胡隐樵等, 1994b)。在 HEIFE 及 NWCALIEX 试验前后, Gamo et al(1993) 许多学者曾先后分别揭示河西干旱区夏季大气边界层(planetary boundary layer, PBL) 深厚, 可达 3~4 km 或以上(张强等, 2011; 李岩瑛等, 2009), 我们估计南疆盆地东端的极端干旱区若羌等的 PBL 还会更高, 特别是连续干日盛期(李岩瑛等, 2009), 它使气块抬升凝结高度增高, 云下雨滴蒸发强, 雨滴未及地前就蒸发干了致旱。强调的是, 河西及阿拉善地区夏季深厚的 PBL 可能也是形成西北干旱气候背景的原因之一, 详见李岩瑛等(2009) 的文献。

由于夏季白天沙漠戈壁和绿洲地面间热力特性的明显差异, 绿洲白天呈“冷岛”及“湿岛”(苏从先等, 1987)。300 m 以下有“逆位温”现象, 气层很稳定。在甘肃金塔绿洲中心低层还观测到局地下沉运动, 地面气流由绿洲中心向四周辐散, 并得到数值模拟的支持(吕世华等, 2004, 2005); 而临近绿洲的沙漠, 白天则出现“逆湿”现象, 有向下的水汽输送。这显然是 300 m 高度层上下有沙漠(绿洲) 干热(凉湿) 空气平流或扩散至周围绿洲(沙漠) 的结果, 是绿洲及沙漠区间的相互作用。据此胡隐樵等(1994a, 1994b) 提出, 在夏季沙漠戈壁环境深厚大气边界层背景下, 绿洲低层及周围地区似乎存在

一自组织的, 有明显温、湿梯度的凉湿热力内边界层, 该局地更凉湿的小气候环境, 既利于绿洲内植被的生长, 抑制了绿洲内水分的损耗; 而输送到绿洲周围的少量水汽则利于绿洲周围至沙漠过渡带中沙生植物的生长, 造就了绿洲周围的缓冲带。这似乎是夏季浩瀚沙漠戈壁环境下小片绿洲得以存在的机理(胡隐樵等, 1994a, 1994b)。

NWCALIEX 试验及其后续研究则用 BATS 方案等 4 种常用陆面方案气柱模式, 根据实测地面反照率及感热总体输送系数, 模拟的敦煌站夏季白天的地面感热及地表面温度有明显改进; 加进区域气候模式 RegCM 作西北区植被减少的气候模拟, 也得到西北区大部变干, 西北区东部变湿的结果(黄荣辉等, 2013)。

值得提出同期内金继明(1995) 发展了一个适合寒区旱区的简单雪盖-大气-土壤传输模式; 李倩等(2006) 以土壤总焓和土壤水总质量代替了原冻土模型中的温度和体积含水量预报方程, 提高了计算精度和效率。初步试验表明, 该两方案效果较好。

另外, 孙菽芬(2005) 还出版了《陆面过程物理、生化机理和参数化模型》专著, 填补了我国在该分支领域的空白, 是一本有理论、有实践, 值得相关学科学者们反复阅读的好书。

(6) 干旱气候成因

西北干旱区是如何形成的? 原来多归结为高原地形及远离海洋等的影响(钱正安等, 2001)。再后来我国学者又概括为是高原地形、东亚及南亚夏季风及西风带环流共同影响的产物(白肇焯等, 1988; 谢金南, 2000; 罗哲贤, 2005; 丁一汇等, 2001; 叶笃正等, 1979; 徐国昌等, 1983; 吴国雄等, 2005; 李江风, 1991; 张家宝等, 1987)。显然, 它应同时回答半永久性西北干旱区气候背景及其相对干、湿年各是怎样形成的两个问题(钱正安等, 2001)。

综合已有研究, 几经修改构建了如下西北干旱气候是如何形成的框图(图 3)。图 3 左半侧的高原地形、远离海洋及地区性因素等三常定或慢变因子造成了干旱气候背景; 图 3 右半侧的夏季风环流、西北区东、西部盛行水平环流、以及高原北侧盛行经圈环流等三快变因子的年际及(夏季) 季节内的变化造成了干旱区背景下的相对干、湿年。这些详见文献中(钱正安等, 2001, 2011; Qian et al, 2001; 栾晨, 2012; 吴统文等, 1996a, 1996b) 插图

的文字说明或介绍。

为强调我国西北干旱区部分,该图才仅冠以西北干旱气候形成框图名。若一并考虑蒙古国部分,则还要考虑杭爱山等地形及蒙古槽等西风带扰动的影响。联系到截止20世纪90年代末我国北方还存在土地过垦过牧,沙进人退的事实(王涛等,2003)

及黄建平等(2013)对干旱区沙尘气溶胶影响云和降水过程的证据,该两因子可一并纳入图3左半侧地方性因素框图内。注意,乍一看图3右半侧三框区字面皆为“环流”,其实高原北侧的经圈环流亦为地形动、热力综合作用使然(钱正安等,2011;叶笃正等,1979;徐国昌等,1983)。

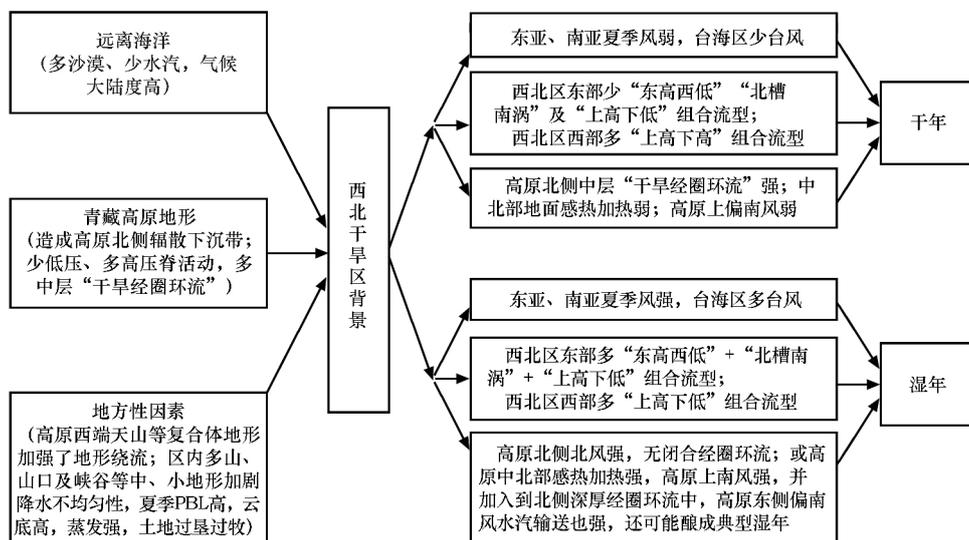


图3 西北干旱气候形成的概念模型

Fig. 3 Conceptual model of arid climate formation in Northwest China

当然,干旱气候研究要“产学研结合”。要直接为发展干旱区的经济服务,不仅前述降水的干、湿环流型、水汽输送及其概念模型、以及夏季降水和春季沙尘暴的预报着眼点等成果应尽早用于预报中,就是陆面过程观测结果等也应尽早用于气候模式陆面过程方案的改进和模拟中。

同样,干旱区管理也要为改善当地的生态环境服务。可喜的是,进入21世纪以来,我国的干旱气候研究和干旱区管理,已出现了气、水、土、生各学科共同围绕西北旱区典型内陆河流域,例河西走廊黑河及南疆塔里木河等,以水问题为联系纽带,深入探讨干旱荒漠环境下如何综合利用气、水、土、生资源及治理的,可持续发展的旱区管理新理念(王涛等,2003;程国栋等,2006a,2006b;贾宝余等,1998;王根绪等,2002;陈学林,2006)。我国政府充分发挥制度的优越性,全流域一盘棋,为确保流域下游也有一定的生态用水,先后于1999,2000及2006年分别对西北干旱区内的南疆塔里木河、河西黑河及石羊河等三流域实行全流域强制性统一分水的重大水管理措施,并已初见效果(贾宝余等,1998;王根绪等,2002;陈学林,2006)。

为加强我国干旱研究和学术交流,从20世纪50年代末起,我国的干旱气候研究主要在中国科学院、国家气象局及相关高校开展;西北区各主要干旱区研究单位先后创办了《高原气象》、《中国沙漠》、《干旱气象》、《干旱区研究》及《干旱区地理》等干旱气象或干旱区地理等专业期刊。

3.4 蒙古国

中蒙干旱半干旱区北部覆盖了蒙古国全境。其南部(约47°N以南)的南戈壁、中戈壁、东戈壁及戈壁阿尔泰等四省的荒漠、戈壁及草原区、以及西北部乌布苏省的大湖盆地区更干,年雨量小于200 mm [钱正安等(2017)图3]。作为一发展中小国,它的干旱气候研究少得多。从见诸报道的蒙古国气候文献及与蒙古学者间的互访和交流可知,该国的干旱气候研究主要在蒙古国科学院水文气象研究所和地理研究所进行。前苏联地质学家穆尔扎也夫(1958)较早总结了蒙古国的气候特征,干旱和严冬是蒙古国常见的气象灾害。蒙古学者 Natsagdorj et al (1982, 1993, 1999) 引用同时考虑季(或月)温度和降水距平(ΔT和ΔR)及其标准差(σ_T和σ_R),定义了标准化了的组合指数I:

$$I = \Delta T / \sigma_T - \Delta R / \sigma_R \quad (1)$$

作为春、夏季的干旱指数或冬季的严寒指数,两者的临界值自然不同,初步分析了蒙古国近 50 年地面气温及降水气候的变化特征及其南北部的地区差异。指出受全球增暖影响,蒙古国近几十年平均增温 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,冬季增暖更明显。蒙古南部戈壁区的降水气候及变化与接壤的中国内蒙古区接近。近 30 年来干旱化明显。Natsagdorj (1993) 和 Mandakh et al (2002) 分析了蒙古国的沙尘暴活动。在全球增暖形势下,我国学者(李万源等, 2005, 2006; 陈豫英等, 2010, 2011; 马晓波, 1995; 高晓清, 1995) 及日本许多学者(Yatagai et al, 1994, 1995) 详细分析了蒙古国过去 50 年的地面气温及降水的分布及变化特征。蒙古国中北部年降水量稍多,可达 400 mm 以上,南半部稀少,西南角可少至约 30 mm,与我国内蒙古额济纳旗站雨量接近。中国北方及蒙古国是亚洲显著增暖区之一(李万源等, 2005, 2006),特别是冬、春季。近 30 多年蒙古国南部的降水一直在减少中(陈豫英等, 2010, 2011); 1999-2002 年连旱 4 年; 随之中蒙东区沙尘暴活跃。根据气温及降水的 EOF 分析异常模态,蒙古国至少可划为东部、中北部的半干旱区、西北部及南部的干旱区四个分区(陈豫英等, 2011)。其中,中北部分区等的降水存在较清楚的 3~4 年及 15 年左右的年际及年代际周期变化。这些结果也与蒙古国学者的结论吻合。Mijiddorj et al (1993) 通过史料记载重建了蒙古国近 200 年的气候资料。另外,在一些外国学者参与下, Davi et al (2006)、Pederson et al (2001) 及汪卫国等(2005) 分别通过树木年轮及湖泊沉积等代用资料,重建了蒙古国北部主要农牧业区及南部近 400 年的河流流量及气温资料序列。过去数百年蒙古国温、湿气候变化的组合较复杂,既有西北部和南部荒漠、戈壁及干草原带的冷干(暖湿)年际/年代际型的组合;也有杭爱山以北的北部森林、草原带的冷湿(暖干)年际/年代际型组合(汪卫国等, 2005)。

3.5 其他国家和联合国的贡献

还值得提及英国、日本、法国等及联合国相关专业机构对世界干旱气候研究的贡献。前述诸国本土虽少干旱危害,但同样关注世界干旱气候研究。如目前最新版本的全球干旱半干旱区图就是在联合国的支持下,由英国学者 Hulme and Marsh 完成的(Thomas, 1997),英国学者 Foland et al (1992, 1991, 1986) 对影响南撒哈尔大旱的环流及 SST 成

因作了大量分析;而日本学者无论是在中日合作的黑河地气观测试验中,还是后来的东亚沙尘暴观测研究中,对中国西北区的荒漠化、陆面过程和中蒙干旱区的降水及沙尘暴等的分析、观测及模拟都做出了不少有意义的工作(吉野正敏, 2002; Takemi et al, 2000; Mikami et al, 2004; Tanaka et al, 2005; Yatagai et al, 1994, 1995)。

地处西亚的小国以色列的干旱气候研究亦有特色。它面积仅 1 万多平方公里,其 60% 的国土是沙漠,年平均雨量在 300 mm 以下,南部的 Negev 地区干旱尤甚,年雨量更在 25 mm 以下,属极端干旱区。他们建国不久就在联合国支持下,建立了世界第一个干旱区研究所(Negev Institute for Arid Zone Research) (Leopold et al, 1961),重建且扩建了古代的水利工程,植树种草防止水土流失(查雯, 2008)。他们统一管理全国的地表水和地下水,使水资源得到最佳调度和利用;发展高效、节水、高科技的干旱区农业技术,全国喷灌和滴灌的面积已达 90%。在过去 25 年中,其农产量提高了 25 倍,已成为向欧洲出口蔬菜和水果的重要基地。他们还关注过去 50 年间北非沙漠及我国新疆沙漠区增暖的差异(Mamtimin et al, 2011) 和中亚地区的沙尘暴活动(Bruins, 2012; Indoitu et al, 2012)。以色列被视为世界干旱区管理的“试验田”“以色列榜样”(Leopold et al, 1961; 钱正安等, 2001)。

许多相关的全球干旱气候会议、活动及项目的执行常是跨地区、国界的,国际合作及协调不可少。值得提及联合国及其相关专业机构 UN WMO, 科教文组织 UNESCO、发展规划署 UNEP 以及联合国粮食和农业组织 UNFAO 等,在计划、组织,并协调干旱气候诸项目方面的努力。早在 1951 年就由 UNESCO 发起,成立了世界干旱区研究顾问委员会; 1955 年更明确提出,全球干旱气候研究要以干旱灾害为重点;要加强多学科交叉和国际合作研究;为各国的干旱气候研究指明了方向。在 Meigs 全球干旱区划图出版后,面对世界人口爆炸,粮食安全危机,需要摸清全球可利用土地资源及粮食生产的潜力,1957 年 UNESCO 更制定了进一步划分全球干旱区的研究计划。Hulme et al 在 UNESCO 和 UNEP 组织支持下,在大量试验后,巧妙地采取“全球分区+对各该分区的 PET-Th 值进行订正”的方法,从而绘制了 Hulme et al (1992) 全球最新的干旱区分布图[钱正安等(2017)图 2]。WMO 对北

非南撒哈尔持续性干旱事件十分重视,1974年WMO第26届执委会特别选择干旱作为与会者讨论的主题,邀请前澳大利亚气象局长 Gibbs、美国 Landsberg 及法国 Rodier 等著名气象学家分别作了三次干旱主题讲座(WMO,1975);1975年WMO又发表了下属的农业气象委员会干旱评价工作组准备的《干旱和农业》的技术报告,从农业气象角度对干旱问题进行了较系统的阐述;吸引多国学者加入到北非干旱的研究队伍中(Druyan,1989;史培军等,2001;Shinoda,1990;Wilhite et al,1985;Glantz,1987;Nicholson,1980,2000;Folland et al,1986;Giannini et al,2003;Charney,1975),大大促进了北非干旱的研究。为了加强干旱区研究,UNESCO先后在美国、澳大利亚、以色列及印度等国分别建立了干旱研究所或中心;帮助各国(主要是非洲和西南亚各国)培训干旱专家,进行区域性考察(WMO,1975)。之后,UN WMO 和 UNEP 等还提出了“十年减灾计划”,通过了“联合国防治荒漠化公约”。为及时关注全球气候变化,UN 和 WMO 还组织了 IPCC,从 1990 年起定期发布全球气候变化评估报告 TARn。为减排 CO₂,遏制全球增暖,召开了一系列全球气候变化会议。

4 结论

将上述 70 多年来,美、中、澳、英、日及联合国等的干旱气候研究的主要动态和贡献总结如下:

(1) 20 世纪世界出现了 30 年代美国的“沙尘暴干旱”和 20 世纪下半叶北非南撒哈尔的持久干旱两大干旱事件。它们灾情重,警示作用强,对世界干旱气候研究有推动作用。

(2) 美国干旱气候研究起步早,他们在干旱指数和判据的提出及应用、对全球干旱区的划分、干旱气候变化、形成原因,乃至率先开展干旱预警监测探讨等每一个分支领域都起到了引领作用。

(3) 中国是发展中的干旱气候研究大国,中蒙干旱气候区是全球独特的中纬度干旱区。我国的干旱气候研究起步虽晚,但特别是 20 世纪 80 年代以来,在干旱气候的各个分支领域也都取得了令人鼓舞的进展,在中国西北区夏季干、湿环流型、西北核心旱区的水汽输送、中蒙沙尘暴活动分析等方面有创新和特色。丰富和发展了世界干旱气候的内容和理论体系,对降水及沙尘暴的预报有明显的应用价值。

(4) 澳大利亚、英国、日本等世界干旱气候研究强国和联合国也都对推进本国和他国的干旱气候研究、遏制全球增暖和应对全球气候变化做出了自己的贡献。

参考文献(References):

- Alley W M, 1984. The Palmer drought severity indices: Limitations and assumptions[J]. *J Climate Appl Meteor*, 23: 1100-1109.
- Blackmon M, Boville B, Bryan F, et al, 2000. The community climate system model[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 81(4): 2357-2376.
- Booth W, 2002. US wildfires are a symptom of a bigger problem: Drought[M]. Washington: The Washington Post, 5.
- Broccoli A J, Manabe S, 1992. The effects of orography on mid-latitude Northern Hemisphere dry climate[J]. *J Climate*, 5(11): 1181-1201.
- Bruins H J, 2012. Ancient desert agriculture in the Negev and climate-zone boundary changes during average wet and drought years[J]. *J Arid Environ*, 86: 28-42.
- Cai W J, Cowan T, 2006. SAM and regional rainfall in IPCC AR4 Models: Can anthropogenic forcing account for southwest Western Australian winter rainfall reduction? [J]. *Geophys Res Lett*, 33(L24): L24708. DOI: 10.1029/2006GL028037.
- Charney J G, 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 101(428): 193-202.
- Cook E R, Meko D M, Stahle D W, et al, 1999. Drought reconstruction for the continental United States[J]. *J Climate*, 12: 1145-1162.
- Davi N K, Jacoby G C, Curtis A E, 2006. Extension of drought records for Central Asia using tree rings: West-Central Mongolia[J]. *J Climate*, 19(2): 288-299.
- Dregne H E, 1970. Arid lands in transition, Baltimore[J]. Maryland: Geo W King Printing Co, 1-524.
- Druyan L M, 1989. Progress in South Sahara drought research[J]. *Inter J Climate*, 9(1): 131-142.
- Foley J C, 1957. Drought in Australia[M]. Melbourne: Bureau of Meteorology, 43.
- Folland C K, Owen J A, Ward M N, et al, 1991. Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region of Africa using empirical and dynamical method[J]. *J Forecasting*, 10: 21-56.
- Folland C K, Palmer T N, Parker D E, 1986. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-85[J]. *Nature*, 320: 602-606.
- Fye F K, Stahle D W, Cook E R, 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(7): 901-909.
- Gamo M, Hayashi M, Tamagaya I, et al, 1993. Seasonal variation of the mixed layer characteristic in the HEIFE area [M]//Yasushi M ed. Proceeding of the international symposium on HEIFE. Kyoto: Kyoto University, 316-321.
- Giannini A, Saravanan R, Chang P, 2003. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scale[J]. *Science*, 302:

- 1027–1030.
- Gibbs W J , 1987. A drought watch system , WCP-134 [J]. Geneva: World Meteorological Organization , 1–23.
- Giorgi F , Means L O , 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: A review [J]. *Reviews of Geophysics* , 29: 191–216.
- Glantz M H , 1987. Drought and economic development in the sub-Saharan Africa [M]//Glantz ed. *Drought and hunger in Africa: Denying famine a future*. Cambridge , England: Cambridge University Press , 1–37.
- Heim R R Jr , 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. *Bull Amer Meteor Soc* , 83 (8) : 1149–1165.
- Hobbs P , Locatelli J D , Martin J E , 1996. A new conceptual model for cyclones generated in the lee of the Rocky Mountains [J]. *BAMS* , 77 (6) : 1169–1178.
- Hodge C , Ducisberg P C , 1963. Aridity and Man—The challenge of the arid lands in United States [M]. Baltimore , Maryland: The Horn-Shater Company , 1–584.
- Hulme M , 1996. Recent climatic change in the world's drylands [J]. *Geophysical Research Letters* , 23 (1) : 61–64.
- Indoitu R , Orlovsky L , Orlovsky N , 2012. Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations [J]. *Journal of Arid Environment* , 85 (2) : 62–70.
- Kalnay E , Kanamitsu M , Kistler R , et al , 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull Amer Meteor Soc* , 77 (3) : 437–471.
- Kanamitsu M , Ebisuzaki W , Woollen J , et al , 2002. NCEP-DOE MIP-II Reanalyses (R-2) [J]. *Bull Amer Meteor Soc* , 83 (3) : 1631–1643.
- Keyantash J , Dracup J A , 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices [J]. *Bull Amer Meteor Soc* , 83 (8) : 1167–1180.
- Kirono D G C , Kent D M , Hennesy K J , et al , 2011. Characteristic of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions: Results from 14 global climate models [J]. *J Arid Environ* , 75: 566–575.
- Kogan F N , 1995. Drought of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data [J]. *Bull Amer Meteor Soc* , 76: 655–668.
- Lawrimore J , Heim Jr R R , Svoboda M , et al , 2002. Beginning a new era of drought monitoring across North America [J]. *Bull Amer Meteor Soc* , 83 (8) : 1191–1198.
- Leopold A S , 1961. *The Desert* [M]. New York: Time Incorporated , 1–192.
- Li J B , Gou X H , Cook E R , et al , 2006. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in Northwest China [J]. *Geophy Res Lett* , 33 , L07715. DOI: 10. 102902006GL25803.
- Liu C M , Qian Z A , Wu M C , et al , 2004. A composite study of the synoptic differences between major and minor dust storm springs over the China-Mongolia Areas [J]. *TAO* , 15 (5) : 999–1018.
- Mantimin B , Et-TanTawi A M , Schaeter D , et al , 2011. Recent trends of temperature change under hot and cold desert climate: Comparing the Sahera (Libya) and Central Asia (Xinjiang , China) [J]. *J Arid Environ* , 75: 1105–1113.
- Manabe S , Broccoli A J , 1990. Mountains and arid climates of middle latitudes [J]. *Science* , 247: 192–195.
- Mandakh N , Khaulenbek , 2002. Research activities of dust storm in Mongolia: Transpotation process of dust storm and its temporal-spatial distribution in Gobi [R]. International workshop on dust storm held in Beijing , China on October 31–November 2.
- McBride J L , Nicholls N , 1983. Seasonal relationships between Australian rainfall and the Southern Oscillation [R]. *Mon Wea Rev* , 111: 1998–2004.
- McKee T B , Doesken N J , Kleist J , 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales [R]. Preprints , Eighth Conf on Applied Climatology , Anaheim , CA , Amer Meteor Soc , 179–184.
- McMahon T A , Muphy R E , Peel M C , et al , 2008. Understanding the surface hydrology of the Lake Eyre Basin: Part I—Rainfall [J]. *J Arid Environ* , 72: 1853–1868.
- Mijiddorj R , Namhay A , 1993. Reconstruction of 2-century year climate phenomena oscillations existing in Mongolia by historical sources [R]. Proc first PRC-Mongolia workshop on climatic change in arid and semi-arid region over Central Asia , held in Beijing , China Mongolia Hydrometeorological Service and China Meteorological Administration , 11–16.
- Mikami M , Shi G Y , 2004. An overview of Japan-Sino Joint Project ADEC-Aeolian dust experiment on climate impact [R]. The AOGS 1st annual meeting , held on 5–7 July , in Singapore , 453–454.
- Natsagdorj L , Jugder D , 1993. Dust storms in Gobian Zone of Mongolia [R]. The first PRC-Mongolia workshop on climate change in arid and semiarid region over the Central Asia , held in Beijing on 8–11 May , 99–104.
- Natsagdorj L , 1982. Atmospheric circulation and dangerous weather phenomenon over the territory of Mongolia [M]. Ulaanbaatar: Hydro-Meteorological Research Institute of Mongolia , 300.
- Natsagdorj L , Namhai A , 1999. The latest climate changes in Mongolia [C]//The first PRC-Mongolia workshop on climate change in arid and semiarid region over the Central Asia. Beijing , 104–108.
- Nicholls N , 1985. Towards the prediction of major Australian drought [J]. *Austri Met Mag* , 33: 161–166.
- Nicholls N , 2004. The changing nature of Australian droughts [J]. *Climatic Change* , 63 (3) : 323–336.
- Nicholson S E , Some B , Kone B , 2000. An analysis of recent in West Africa , including the rainy seasons of the 1997 El Nino and the 1998 La Nina years [J]. *J Climate* , 13: 2628–2640.
- Nicholson S E , 1980. The Nature of rainfall Flectuations in subtropical West Africa [R]. *Mon Wea Rev* , 108 (4) : 473–487.
- Nicholson S E , 1988. Land surface and atmosphere interaction: Physical processes and surface changes and their impact [J]. *Prog Phy Geogr* , 12: 36–65.
- Olapid E O , 1985. A comparative performance analysis of three meteor-

- ological drought indexes[J]. *J Climate*, 5: 655-644.
- Palmer W C, 1965. Meteorological drought [M]. US Weather Bureau Research Paper, 45, 58.
- Pederson N, Jacoby G C, D'Arrigo R D, et al, 2001. Hydrometeorological reconstructions for Northeastern Mongolia derived from tree rings: 1651-1995 [J]. *J Climate*, 14: 873-881.
- Prospero J M, Nees R T, 1986. Impact of the North African drought and El Nino on mineral dust in Barodos trade winds [J]. *Nature*, 320: 735-738.
- Qian W H, Quan L S, Shi S Y, 2002. Variations of the dust storm in China and its climate control [J]. *J Climate*, 15(10): 1216-1229.
- Qian Z A, Bromely R A, Ayles M A, 1991. Some analyses and numerical simulation of East Asia Meiyu in 1983 [J]. *Adv Atmos Sci*, 8(1): 67-78.
- Qian Z A, Wu T W, Cai Y, et al, 2001. The impact of land-sea contrast terrain and atmospheric circulation on precipitation climates over the QXPN [C]//Wang M X, Eds. Dynamics of atmospheric and oceanic circulation and climate, Celebration of the 80th birthday of Prof Zhu B-Z. Beijing: China Meteorological Press, 396-410.
- Qian Z A, Wu T W, 1998. Some investigation on influence of Qinghai-Xizang Plateau on Northwest China drought climate [R]. The Eighth Conference on Mountain Meteorology, held in Flagstaff, Arizona, USA on 3-7 August.
- Redmond K T, 2002. The depiction of drought-a commentary [R]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(8): 1143-1165.
- Rowell D P, Folland C K, Maskell K, et al, 1992. Modeling the influence of global sea temperatures on the variability and predicability of seasonal Sahel rainfall [J]. *Geophy Res Lett*, 19(9): 905-908.
- Shi Ge, Cai Wenju, Cowan Tim, et al, 2008. Variability and trend of Northwest Australia rainfall: Observations and coupled climate modeling [J]. *J Climate*, 21: 2938-2959.
- Shinoda M, 1990. Long-term Sahelian drought from the late 1960's to the mid-1980's and its relation to the atmospheric circulation [J]. *J Meteor Soc Japan*, 68(5): 613-624.
- Simmonds I, Bi Daohua, Hope P, 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. *J Climate*, 12: 1353-1367.
- Streten N A, 1981. Southern Hemisphere sea surface temperature variability and apparent association with Australian rainfall [J]. *J Geophys Res*, 86(c1): 485-497.
- Streten N A, 1983. Circulation contrasts in the Southern hemisphere winters of 1972 and 1973 [J]. *Aus Meteor Mag*, 31: 161-170.
- Sud Y C, Smith W E, 1985. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation [J]. *Prog Phy Geogr*, 12: 36-65.
- Svoboda M, LeComte D, Hayes M, et al, 2002. The drought monitor [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(8): 1181-1190.
- Takemi T, Satomara T, 2000. Numerical experiments on the mechanisms for the development and maintenance of long lived squall line in dry environment [J]. *J Atmos Sci*, 57(6): 1718-1740.
- Tanaka T Y, Chiba M, 2005. Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR [J]. *J Meteor Soc Japan*, 83A: 255-278.
- Tannehill I R, 1947. Drought-Its causes and effects [M]. Princeton: Princeton University Press, 1-264.
- Thomas D S G, 1997. Arid zone geomorphology—Process, form and change in dryland [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons Press, 5-12.
- Thornthwaite C W, 1948: An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Trenberth K E, Branstator G W, Arkin P A, 1988. Origins of the 1988 North American drought [J]. *Science*, 242: 1640-1645.
- Washington R, Preston A, Todd M, 2003. The role of Indian and Pacific Ocean SSTs in African rainfall variability [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(7): 899-900.
- White W B, 2000. Influence of the Antarctic circumpolar wave on Australia precipitation from 1958-1997 [J]. *J Climate*, 13: 2125-2141.
- Wilhite D A, Glantz M H, 1985. Understanding the drought phenomenon: the rule of definition [J]. *Water International*, 10(3): 111-120.
- WMO, 1975. Drought and Agriculture [R]. WMO Technical Note No 138, WMO-No 392, Geneva, Switzerland, 113, 127.
- Yatagai A, Yasunari T, 1994. Trends and decadal-scale fluctuation of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period(1951-1990) [J]. *J Meteor Soc Japan*, 72(6): 937-957.
- Yatagai A, Yasunari T, 1995. Interannual variations of summer precipitation in the arid/semiarid regions in China and Mongolia: Their regionality and relation to the Asian summer monsoon [J]. *J Meteor Soc Japan*, 73: 903-923.
- 安顺清, 1985. 修正的 Palmer 指数 [J]. *气象*, 11(12): 5-11. An S Q, 1985. Revised Palmer Index [J]. *J Meteor*, 11(12): 5-11.
- 白肇焯, 徐国昌, 陈乾, 等, 1988. 中国西北天气 [M]. 北京: 气象出版社, 1-442. Bai Z Y, Xu G C, Chen Q, et al, 1988. Weather of Northwest China [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-442.
- 伯恩斯 M, 2007. 澳大利亚农业高科技抗旱增产 [N]. 参考消息, 5月17日第7版. Burns M, 2007. High-tech agricultural drought resistance and yield in Australian [C]. Reference News, 17 May, 7th ed.
- 蔡英, 钱正安, 2003. 华北和西北区干湿年间水汽场和东亚夏季风的对比分析 [J]. *高原气象*, 22(1): 14-25. Cai Y, Qian Z A. 2003. Contrast analyses on water vapor and EASM between dry and wet years of Northwest and North China [J]. *Plateau Meteor*, 22(1): 14-25.
- 蔡英, 宋敏红, 钱正安, 等, 2015. 西北旱区夏季强干、湿事件环流及水汽输送的再分析 [J]. *高原气象*, 34(3): 597-610. Cai Y, Song M H, Qian Z A, et al, 2005. Reanalyses of circulation and water vapor transport between strong dry and wet years of Northwest China in summer [J]. *Plateau Meteor*, 34(3): 597-610. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2015. 00049.

- 蔡英, 2004. 青藏高原及周围地区水汽气候学与东亚夏季风水汽输送等对西北区东部和华北夏季降水的影响[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 1-130. Cai Y, 2004. Water climate over the Tibetan Plateau and its surrounds and influence of water vapor transportation over East Asia in summer monsoon on summer precipitation in the east of Northwest China and North China[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 1-130.
- 曹泰生, 钟强, 钱正安, 1974. 一次强河西热风过程的数值分析和预报[C]//中央气象局气象科学研究所编, “数值预报和数理统计预报”会议论文集. 北京: 科学出版社, 60-75. Cao T S, Zhong Q, Qian Z A, 1974. Numerical analysis and prediction of a strong hot wind process in Hexi[C]//Institute of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration. The Conference on Numerical Forecasting and Mathematical Statistics. Beijing: Science Press, 60-75.
- 查雯, 2008. 以色列农业发展靠节约[R]. 环球时报, 12月5日第19版. Cha W, 2008. Israel's agricultural development depends on economy[R]. Global Times, December 5, 9th ed.
- 陈咸吉, 1982. 中国气候新探[J]. 气象学报, 40(1): 35-47. Chen X J, 1982. A new approach of the climate division of China[J]. Acta Meteor Sinica, 40(1): 35-47.
- 陈晓晨, 徐影, 许崇海, 等, 2014. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展, 10(3): 217-225. Chen X C, Xu Y, Xu C H, et al, 2014. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 10(3): 217-225.
- 陈学林, 2006. 2000-2004 年黑河流域生态用水[J]. 干旱区资源与环境, 20(2): 104-108. Chen X L, 2006. The ecological water dispatching in the Heihe River from 2000 to 2004[J]. J Arid Land Resource and Environment, 20(2): 104-108.
- 陈豫英, 陈楠, 钱正安, 等, 2011. 中蒙干旱半干旱区降水时空变化特征分析(II): 综合气候分区及各分区降水时间变化的进一步分析[J]. 高原气象, 30(1): 13-21. Chen Y Y, Chen N, Qian Z A, et al, 2011. Temporal and spatial change features of precipitation over CMASA (II): Synthetical climate subregions of the CMASA and further analyses of periodic change of precipitation in its various ones[J]. Plateau Meteor, 30(1): 13-21.
- 陈豫英, 陈楠, 王式功, 等, 2010. 中蒙干旱半干旱区降水的时空变化特征(I): 年降水的特征及5-9月降水的 EOF 分析[J]. 高原气象, 29(1): 33-43. Chen Y Y, Chen N, Wang S G, et al, 2010. Temporal and spatial change features of precipitation over CMASA(I): Features of annual precipitation and EOF of precipitation from May to September[J]. Plateau Meteor, 29(1): 33-43.
- 程国栋, 赵传燕, 2006a. 西北干旱区生态需水研究[J]. 地球科学进展, 24(11): 1101-1108. Chen G D, Zhao C Y, 2006. Study on ecological water demand in arid area of Northwestern China[J]. Adv Earth Sci, 24(11): 1101-1108.
- 程国栋, 赵文智, 2006b. 绿水及其研究进展[J]. 地球科学进展, 21(3): 221-227. Chen G D, Zhao W Z, 2006. Green water and its research progresses[J]. Adv Earth Sci, 21(3): 221-227.
- 戴贝特 M, 2009. 澳大利亚干得“冒火”[N]. 参考消息, 2月22日第6版. Beit M, 2009. Australia is doing “mad” [R]. Reference News, February 22, 6th ed.
- 戴加洗, 周陆生, 吴永森, 等, 1990. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1-356. Dai J X, Zhou L S, Wu Y S, et al, 1990. Climate of Tibetan Plateau[M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-356.
- 邓涛, 耿艺, 李荣山, 等, 2007. 古生物见证中国西北环境变迁[J]. 中国国家地理, (562): 56-71. Deng T, Geng Y, Li R S, et al, 2007. Ancient creatures witness the change of environment in Northwest China[J]. Chinese National Geography, (562): 56-71.
- 丁一汇, 王守荣, 2001. 中国西北地区气候与生态环境概论[M]. 北京: 气象出版社. Ding Y H, Wang S R, 2001. An introduction to climate and ecological environment in Northwest China[M]. Beijing: China Meteorology Press.
- 董安祥, 白虎志, 雷小斌, 2006. 中国西北干旱气候学的新进展及其主要科学问题[J]. 干旱气象, 24(4): 57-62. Dong A X, Bai H Z, Lei X B, 2006. New development of arid climate research in Northwest China from 2001 to 2005 and main scientific problems[J]. J Arid Meteor, 24(4): 57-62.
- 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等, 1997. 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社. Fang Z Y, Zhu F K, Jiang J X, et al, 1997. Research of duststorm in China[M]. Beijing: China Meteorology Press.
- 符涓斌, 温刚, 2002. 中国北方干旱化的几个问题[J]. 气候与环境研究, 7(1): 22-29. Fu C B, Wen G, 2002. Several issues on aridification in the Northern China[J]. Climatic Environ Res, 7(1): 22-29.
- 高晓清, 1995. 蒙古乌布苏湖水位与青海湖水位变化的对比分析[M]//刘晓东编. 中国西部区域气候变化其相关问题研究. 兰州: 兰州大学出版社, 35-40. Gao X D, 1995. Comparative analysis of water level between Mongolia Uvs Nuur Lake and Qinghai Lake[M]//Liu Xiaodong ed. Study on regional climate and its related issues in Western China. Lanzhou: Lanzhou University Press, 35-40.
- 高由禧, 1989. 关于我所开展干旱气候研究的历史[J]. 高原气象, 8(2): 103-106. Gao Y X, 1989. The history of arid climate research in LIPAP[J]. Plateau Meteor, 8(2): 103-106.
- 高原低值系统协作组, 1978. 盛夏青藏高原低涡发生发展的初步研究[J]. 中国科学, 8(3): 342-350. Cooperation group about plateau low value system, 1978. Preliminary study on the development of low vortex in the Tibetan Plateau in midsummer[J]. China Sci, 8(3): 342-350.
- 耿其昌, 等译, 1985. 干旱气候的过去和现在[M]//Barry R G. 世界沙漠研究. 重庆: 科学技术出版社重庆分社, 16-19. Geng Q C, et al, eds, 1985. The past and present of the arid climate[M]//Barry R G. The study of global desert. Chongqing: Science and Technology Press, 16-19.

- 国家科学技术委员会, 1990. 气候(中国科学技术白皮书第5号) [R]. 北京: 科学技术文献出版社. State Science and Technology Commission, 1990. Climate (No 5 blue book from China Science and Technology) [R]. Beijing: Science and Technology Literature Press.
- 郝北洋, 2007. 中瑞西北科学考察记[N]. 作家文摘, 4月3日第13版. Hao B Y. 2007. Scientific expedition in Northwest China from China and Sweden [R]. Writer's Digest, April 3, 13th ed.
- 胡隐樵, Yasushi M, 1996. 强沙尘暴发展与干飚线——黑风暴形成的一个机理分析[J]. 高原气象, 15(2): 178-185. Hu Y Q, Yasushi M, 1996. Development of the strong dust storm and dry squall line a mechanism analysis on generating black storm [J]. Plateau Meteor, 15(2): 178-185.
- 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 1994a. 黑河试验(HEIFE)的一些研究结果[J]. 高原气象, 13(3): 225-236. Hu Y Q, Gao Y X, Wang J M, 1994a. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. Plateau Meteor, 13(3): 225-236.
- 胡隐樵, 高由禧, 1994b. 黑河试验(HEIFE)——对干旱地区陆面过程的新认识[J]. 气象学报, 52(3): 285-296. Hu Y Q, Gao Y X, 1994b. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE [J]. Acta Meteor Sci, 52(3): 285-296.
- 胡隐樵, 孙菽芬, 郑元润, 等, 2004. 稀疏植被下垫面与相互作用于研究进展[J]. 高原气象, 23(3): 281-296. Hu Y Q, Sun S F, Zhang Y R, et al, 2004. Review of study on interaction between underlying surface with sparse vegetation and atmosphere [J]. Plateau Meteor, 23(3): 281-296.
- 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等, 2013. 干旱半干旱区气候变化综述[J]. 气候变化研究进展, 9(1): 9-14. Huang J P, Ji M X, Liu Y Z, et al, 2013. An overview of arid and semi-arid climate change [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 9(1): 9-14.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等, 1998. 夏季东亚夏季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 22(4): 460-469. Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, et al, 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Chinese J Atmos Sci, 22(4): 460-469.
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等, 2013. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的进展[J]. 大气科学, 37(2): 189-210. Huang R H, Zhou D G, Chen W, et al, 2013. Recent progress in studies of air-land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate [J]. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 189-210.
- 吉野正敏著. 陈维平等译, 2002. 中国的沙漠化[M]. 北京: 中国科学技术出版社. Yoshino J M. Chen W P, eds. 2002. Chinese Desertification [M]. Beijing: China Science and Technology Press.
- 贾宝全, 徐英勤, 1998. 旱区生态用水的概念和分类——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 21(2): 8-12. Jia B Q, Xu Y Q, 1998. Overview and classification of ecological water use in arid areas take Xinjiang as an example [J]. Arid Land Geography, 21(2): 8-12.
- 蒋兴文, 李跃清, 李春, 等, 2007. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. 高原气象, 26(3): 476-483. Jiang X W, Li Y Q, Li C, et al, 2007. Characteristics of summer water vapor transportation in Sichuan Basin and its relationship with regional drought and flood [J]. Plateau Meteor, 26(3): 476-483.
- 金继明, 1995. 一用于 GCM 的简单雪盖—大气—土壤传输模式(SAST) [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. Jin J M, 1995. A simple snow atmosphere soil transport model (SAST) for GCM [D]. Beijing: The Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 兰天. 2000. 人类无序活动导致环境灾难[R]. 科学新闻周刊, 31期. Lan T, 2000. Human disorderly activities lead to environmental catastrophes [R]. Science News Weekly, 31 issue.
- 李栋梁, 彭素琴, 姚辉, 1995. 我国西北地区冬季平均气温的气候特征[J]. 大气科学, 19(2): 192-199. Li D L, Peng S Q, Yao H, 1995. Climatic features of the mean temperature in Northwest China during winter time [J]. Chinese J Atmos Sci, 19(2): 192-199.
- 李栋梁, 谢金南, 王文, 1997. 中国西北夏季降水特征及其异常研究[J]. 大气科学, 21(3): 331-340. Li D L, Xie J N, Wang W, 1997. A study of summer precipitation features and anomaly in Northwest China [J]. Chinese J Atmos Sci, 21(3): 331-340.
- 李江风, 袁玉江, 由希尧, 2000. 树木年轮水文学研究与应用[M]. 北京: 科学出版社: 186-252. Li J F, Yuan Y J, You X R, 2000. Research and application of tree ring hydrology [M]. Beijing: Science Press: 186-252.
- 李江风, 1991. 新疆气候[M]. 北京: 气象出版社. Li J F, 1991. Climate of Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorology Press.
- 李倩, 孙菽芬, 2006. 冻土模式的改进和发展[J]. 地球科学进展, 21(12): 1339-1349. Li Q, Sun S F, 2006. Development of frozen soil model [J]. Adv Earth Sci, 21(12): 1339-1349.
- 李万源, 钱正安, 2005. 中蒙干旱半干旱区冬、夏季地面气温时空变化特征分析(I): 1月[J]. 高原气象, 24(6): 889-898. Li W Y, Qian Z A, 2005. Temporal and spatial feature analyses of winter and summer surface air temperature in CMASA, part (I): January [J]. Plateau Meteor, 24(6): 889-898.
- 李万源, 钱正安, 2006. 中蒙干旱半干旱区冬、夏季地面气温时空变化特征分析(II): 7月[J]. 高原气象, 25(4): 624-632. Li W Y, Qian Z A, 2006. Temporal and spatial feature analyses of winter and summer surface air temperature in CMASA, part (II): July [J]. Plateau Meteor, 25(4): 624-632.
- 李祥余, 何清, 黄少鹏, 2009. 南疆一次强沙尘暴前后塔中站近地面各气象要素的变化特征[J]. 高原气象, 28(3): 652-662. Li X Y, He Q, Huang S P, 2009. Characteristics of meteorological elements in the surface layer before and after a severe sandstorm in the Taklimakan Desert Hinterland, Southern Xinjiang, China [J]. Plateau Meteor, 28(3): 652-662.
- 李新周, 刘晓东, 马柱国, 2004. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱研究, 21(2): 97-103. Li X Z, Liu X D, Ma Z G, 2004. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years [J]. Arid Zone Research, 21(2): 97-103.

- 李岩瑛, 钱正安, 薛新玲, 等, 2009. 西北干旱区夏半年深厚混合层与干旱气候形成[J]. 高原气象, 28(1): 46-54. Li Y Y, Qian Z A, Xue X L, et al, 2009. Deep mixed layer in Northwest China dry area in summer half year and formation of the dry climate[J]. Plateau Meteor, 28(1): 46-54.
- 刘家琼, 丘明新, 刘金祥, 2003. 大漠之绿[M]. 北京: 化学工业出版社. Liu J Q, Qiu M X, Liu J X, 2003. Desert Green[M]. Beijing: Chemical Industry Press.
- 刘子臣, 张健宏, 1995. 黄土高原上两次低空东北急流大暴雨的诊断分析[J]. 高原气象, 14(1): 107-113. Liu Z C, Zhang J H, 1995. A diagnostic analysis of the regional storm rainfall of two low N-E jets over Loess Plateau[J]. Plateau Meteor, 14(1): 107-113.
- 柳媛普, 白虎志, 钱正安, 等, 2011. 近 20 年新疆中部明显增湿事实的进一步分析[J]. 高原气象, 30(5): 1195-1203. Liu Y P, Bai H Z, Qian Z A, et al. 2011. Further analyses of obvious moistening in Central Xinjiang in recent 20 years[J]. Plateau Meteor, 30(5): 1195-1203.
- 陆渝荣, 高国栋, 1983. 中国大气中的水汽输送[J]. 高原气象, 2(4): 34-48. Lu Y R, Gao G D, 1983. The mean transfer of water-vapour in the atmosphere over China[J]. Plateau Meteor, 2(4): 34-48.
- 栾晨, 2012. 中国西北区西部夏季强降水若干统计及其干、湿年形成的对比分析[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. Luan C, 2012. Some statistical study of strong precipitation and comparative analysis of the formation of severe dry and wet years in summer in the west of Northwest China[D]. Lanzhou: Cold Arid Environmental and Engineering Research Institute.
- 罗四维, 钱正安, 刘子田, 1973. 河西干热风的天气气候特征及预报[C]//河西干热风会议交流材料, 1973 年 2 月 16-17 日, 张掖. Luo S W, Qian Z A, Liu Z T, 1973. Weather and climate characteristic and prediction of dry and hot wind in Hexi Corridor[C]// Meeting exchange materials of dry and hot wind in Hexi Corridor, 16-17 February 1973, Zhange.
- 罗四维, 钱正安, 王谦谦, 1982. 夏季 100hPa 南亚高压和我国东部旱涝的天气气候研究[J]. 高原气象, 1(2): 1-10. Luo S W, Qian Z A, Wang Q Q, 1982. The climatic and synoptical study about the relation between the Qinghai-Xizang high pressure on the 100mb surface and the flood and drought in East China in summer[J]. Plateau Meteor, 1(2): 1-10.
- 罗四维, 1957. 一个高空低槽越过青藏高原的分析[J]. 气象学报, 28(2): 157-165. Luo S W, 1957. Analysis of an upper trough over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sinica, 28(2): 157-165.
- 罗哲贤, 2005. 中国西北干旱气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1-232. Luo Z X, 2005. Dynamics theory of drought climate in Northwest China[M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-232.
- 吕世华, 陈玉春, 陈世强, 等, 2004. 夏季河西地区绿洲-沙漠环境相互作用热力过程的初步分析[J]. 高原气象, 23(2): 127-131. Lü S H, Chen Y C, Chen S Q, et al, 2004. Preliminary study of thermodynamic of oasis-desert interaction in Hexi area in summer[J]. Plateau Meteor, 23(2): 127-131.
- 吕世华, 尚伦宇, 梁玲, 等, 2005. 金塔绿洲小气候效应的数值模拟[J]. 高原气象, 24(5): 649-659. Lü S H, Shang L Y, Liang L, et al, 2005. Numerical simulation of microclimate effect in Jintata Oasis[J]. Plateau Meteor, 24(5): 649-659.
- 马晓波, 1993. 蒙古五十年来旱涝变化和降水趋势的研究[J]. 高原气象, 12(4): 450-457. Ma X B, 1993. Study of drought, flood and precipitation trend in Mongolia for last 52 years[J]. Plateau Meteor, 12(4): 450-457.
- 马晓波, 1995. 50 年来蒙古国与北半球的气温变化[J]. 高原气象, 14(3): 348-358. Ma X B, 1995. Air temperature variations in Mongolia and Northern Hemisphere for recent 50 years[J]. Plateau Meteor, 14(3): 348-358.
- 马柱国, 符淦斌, 2007. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系[J]. 中国科学(地球科学), 37(2): 222-233. Ma Z G, Fu C B, 2007. Fact of global aridity in the second half of the twentieth century and its relation with the large scale background[J]. Science in China (Earth Science), 37(2): 222-233.
- 牟维丰, 1991. 我国干旱区大降水过程水汽来源[J]. 应用气象学报, 2(3): 308-314. Mu W F, 1991. A review on the supply of water vapour to heavy rain process in arid regions of China[J]. J Appl Meteor Sci, 2(3): 308-314.
- 牟维丰, 1992. 1991 年江淮暴雨洪涝环流形势异常的分析[J]. 气象, 18(8): 16-21. Mu W F, 1992. Analysis of abnormal circulation situation of Jianghuai rainstorm and flood in 1991[J]. Mon Meteor, 18(8): 16-21.
- 穆尔扎也夫 A, 1958. 蒙古人民共和国自然地理[M]. 柏郁华译. 北京: 三联书店, 1-529. Moorezayev A, 1958. Natural geography of the People's Republic of Mongolia[M]. Bai Y H, translator. Beijing: Joint Publishing, 1-529.
- 牛生杰, 孙继明, 2001. 贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J]. 高原气象, 20(3): 298-301. Niu S J, Sun J M. 2001. Researches on optical properties of atmospheric aerosol in Helan Mountain area[J]. Plateau Meteor, 20(3): 298-301.
- 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等, 2006. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展[J]. 地球物理学报, 49(1): 83-92. Qian Z A, Cai Y, Liu J T, et al, 2006. Some advances in dust storm research over China[J]. Chinese J Geophysics, 49(1): 83-92.
- 钱正安, 宋敏红, 吴统文, 等, 2017. 世界干旱气候研究动态及进展综述(II): 主要研究进展[J]. 高原气象, 36(6): 1457-1476. Qian Z A, Song M H, Wu T W, et al, 2017. Review of advances in world dryland climate research (II): Main investigation progress[J]. Plateau Meteor, 36(6): 1457-1476. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00076.
- 钱正安, 焦彦军, 1997. 中、美和苏丹强沙尘暴的对比分析[J]. 甘肃气象, 15(1): 1-10. Qian Z A, Jiao Y J, 1997. Comparison and analysis of strong sandstorm in China, America and Sulta[J]. Gansu Meteor, 15(1): 1-10.
- 钱正安, 宋敏红, 李万源, 等, 2011. 全球及中蒙干旱区部分地区降水分布细节[J]. 高原气象, 30(1): 1-12. Qian Z A, Song M

- H, Li W Y, et al. 2011. Global, China-Mongolia arid-and semi-arid-areas (CMASA) and the details of precipitation distribution in part regions of CMASA [J]. Plateau Meteor, 30(1): 1-12.
- 钱正安, 吴统文, 梁潇云, 2001. 青藏高原及周围地区的平均垂直运动场特征 [J]. 大气科学, 25(4): 444-454. Qian Z A, Wu T W, Liang X Y, 2001. Feature of mean vertical circulation over the Qinghai-Xizang Plateau and its neighborhood [J]. Chinese J Atmos Sci, 25(4): 444-454.
- 钱正安, 吴统文, 吕世华, 等, 1998. 夏季西北干旱气候形成的数值模拟——高原地形和环流场等的影响 [J]. 大气科学, 22(5): 753-763. Qian Z A, Wu T W, Lü S H, et al, 1998. Numerical simulation of Northwest China arid climate formation-effects of the Qinghai-Xizang Plateau terrain and circulation field [J]. Chinese J Atmos Sci, 22(5): 753-763.
- 钱正安, 吴统文, 宋敏红, 等, 2001. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题 [J]. 地球科学进展, 16(1): 28-38. Qian Z A, Wu T W, Song M H, et al, 2001. Arid disaster and advances in arid climate researches over Northwest China [J]. Adv Earth Sci, 16(1): 28-38.
- 钱正安, 1973. 河西干热风形成原因的初步分析 [J]. 气象, (3): 10-16. Qian Z A. 1973. Preliminary analysis of the causes of arid and hot wind in Hexi Corridor [J]. Mon Meteor, (3): 10-16.
- 秦大河, 丁一汇, 等译, 2007. 21 世纪的气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1-259. Qin D H, Ding Y H, et al, eds. 2007. Climate in twenty-first century [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-259.
- 秦大河主编, 2002. 中国西部环境演变评估(综合卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1-80. Qing D H, ed. 2002. Assessment of environmental evolution in Western China (comprehensive volume) [M]. Beijing: Science Press, 1-80.
- 施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等, 2000. 中国冰川与环境——现在、过去和将来 [M]. 北京: 科学出版社, 243-257. Shi Y F, Huang M H, Yao T D, et al, 2000. Glacier and environment in China—now, past and future [M]. Beijing: Science Press, 243-257.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等, 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 1-124. Shi Y F, Shen Y P, Li D L, et al, 2003. Evaluation of climate shift in Northwest China from warm dry to warm wet [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-124.
- 石广玉, 赵思雄, 2003. 沙尘暴研究中的若干问题 [J]. 大气科学, 27(4): 591-608. Shi G Y, Zhao S X, 2003. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. Chinese J Atmos Sci, 27(4): 591-608.
- 史培军, 龚道溢, 2001. Sahel 气候与环境变化研究进展 [J]. 地球科学进展, 16(3): 406-412. Shi P J, Gong D Y, 2001. Progress in the study on Sahel climate and environmental change [J]. Adv Earth Science, 16(3): 406-412.
- 宋敏红, 钱正安, 蔡英, 等, 2007. 中蒙强、弱沙尘暴年春季平均环流及沙尘活动变化分析 [J]. 气象学报, 65(1): 94-104. Song M H, Qian Z A, Cai Y, et al, 2007. Analysis of spring mean circulations for strong and weak dust-storm activity years [J]. Acta Meteor Sinica, 65(1): 94-104.
- 苏从先, 胡隐樵, 1987. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应” [J]. 大气科学, 11(4): 390-396. Su C X, Hu Y Q, 1987. The microclimate character and “cold island effect” over the oasis in Hexi region [J]. Chinese J Atmos Science, 11(4): 390-396.
- 孙安健, 高波, 2000. 华北平原夏季严重旱涝特征诊断分析 [J]. 大气科学, 24(3): 393-402. Sun A J, Gao B, 2000. A diagnostic analyses of serious flood/drought during summer season in the North China Plane [J]. Chinese J Atmos Science, 24(3): 393-402.
- 孙国武, 罗哲贤, 李兆元, 等, 1996. 中国西北干旱气候研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1-394. Sun G W, Luo Z X, Li Z Y, et al, 1996. Study of drought climate in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-394.
- 孙纪改, 李文源, 1989. 青藏高原东北侧低空急流与低值系统的统计学特征 [J]. 宁夏气象 (4): 21-25. Sun J G, Li W Y, 1989. Statistical characteristics of low level jet and low value system in the northeast side of Tibetan Plateau [J]. Ningxia Meteor (4): 21-25.
- 孙淑芬, 2005. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 [M]. 北京: 气象出版社, 1-306. Sun S F, 2005. Physical and biochemical mechanism and parameterization model of land surface processes [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-306.
- 台湾中央大学地球科学院主办, 2005. 2005 年海峡两岸沙尘暴与环境治理学术研讨会 [C]//11 月 29-30 日在台湾中坜, 1-565. Institute of Earth Sciences, Taiwan National Central University, host, 2005. Symposium on dust storm and environmental governance across the Taiwan Straits in 2005 [C]//November 29-30 at Zhongli, Taiwan, 1-565.
- 汤懋苍, 1963. 祁连山区的气压系统 [J]. 气象学报, 33(2): 175-188. Tang M C, 1963. Pressure system in the mountainous region of western Kansu [J]. Acta Meteor Sci, 33(2): 175-188.
- 陶诗言, 朱福康, 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. 气象学报, 34(4): 385-395. Tao S Y, Zhu F K, 1964. The 100mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the west Pacific subtropical anticyclone [J]. Acta Meteor Sinica, 34(4): 385-395.
- 汪卫国, 冯兆东, Khosbayan P, 等, 2005. 蒙古全新世气候变化研究进展 [J]. 地球科学进展, 20(2): 240-247. Wang W G, Feng Z D, Khosbayan P, et al, 2005. The studies of holocene climate changes in Mogolia: A review [J]. Adv Earth Science, 20(2): 240-247.
- 王根绪, 程国栋, 2002. 干旱区内陆河流域生态需水量及其估算——以黑河为例 [J]. 中国沙漠, 22(2): 129-134. Wang G X, Cheng G D, 2002. Water demand of eco-system and estimate method in arid inland river basins [J]. J Desert Res, 22(2): 129-134.
- 王江山, 2004. 青海天气气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1-616. Wang J S, 2004. Weather and climate in Qinghai [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1-616.

- 王介民, 1999. 陆面过程实验和地气相互作用于研究—从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. 高原气象, 18(3): 280-294. Wang J M, 1999. Land surface process experiments and interaction study in China—from HEIFE to IMGRASS and GAME-Tibet/TIPEX [J]. Plateau Meteor, 18(3): 280-294.
- 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等, 2012. 我国干旱气象研究进展评述 [J]. 干旱气象, 30(4): 497-508. Wang J S, Li Y H, Wang R Y, et al, 2012. Preliminary analysis on the demand and review of progress in the field of meteorological drought research [J]. J Arid Meteor, 30(4): 497-508.
- 王绍武, 2000. 美国第 24 届气候诊断与预测年会 [J]. 气象科技, (4): 13-21, 27. Wang S W, 2000. The Twenty-fourth annual conference on climate diagnosis and prediction [J]. Meteor Sci Tech, (4): 13-21, 27.
- 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等, 2000. 沙尘暴研究进展 [J]. 中国沙漠, 20(4): 349-356. Wang S G, Dong G R, Chen H Z, et al, 2000. Advances in studying sand-dust storms of China [J]. J Chinese Desert, 20(4): 349-356.
- 王涛, 陈广庭, 赵哈林, 等, 2003. 中国沙漠与沙漠化 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1-955. Wang T, Chen G T, Zhao H L, et al, 2003. Desert and desertification in China [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1-955.
- 卫捷, 马柱国, 2003. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较 [J]. 地理学报, 58(增刊 1): 117-124. Wei J, Ma Z G, 2003. Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index [J]. Acta Geographica Sinica, 58(Suppl1): 117-124.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等, 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局 [J]. 大气科学, 29(1): 47-56. Wu G X, Liu Y M, Liu X, et al, 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer [J]. Chinese J Atmos Sci, 29(1): 47-56.
- 吴统文, 钱正安, 1996a. 夏季西北干旱区干、湿年环流及高原动力影响差异的对比分析 [J]. 高原气象, 15(4): 387-396. Wu T W, Qian Z A, 1996a. Comparative analyses of differences between circulation and dynamical effect of Qinghai-Xizang Plateau over Northwest China drought area in dry-and wet-summer [J]. Plateau Meteor, 15(4): 387-396.
- 吴统文, 钱正安, 1996b. 青藏高原北侧地区干湿年夏季垂直环流差异的对比分析及青藏高原的热力影响 [J]. 气象学报, 54(5): 558-568. Wu T W, Qian Z A. 1996b. The comparative analyses of differences between vertical circulation on north side of Tibetan Plateau in wet and dry summer and thermal effects of the Plateau [J]. Acta Meteor Sinica, 54(5): 558-568.
- 西北暴雨编写组, 1992. 西北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 1-164. Writing group about rainstorm in Northwest China. 1992. Rain-storm in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-164.
- 谢金南主编, 2000. 中国西北干旱气候变化与预测研究 [M]. 北京: 气象出版社, 第 1 卷, 1-343; 第 2 卷, 1-308; 第 3 卷, 1-376. Xie J N, 2000. Climatic change and prediction of drought in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press, Vol 1: 1-343; Vol 2: 1-308; Vol 3: 1-376.
- 徐德源, 沙占祥, 孙振远, 等, 1995. 新疆通志·气象志 [Z]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1-413. Xu D Y, Sha Z X, Sun Z Y, et al. 1995. Xinjiang Tongzhi·Meteorological records [Z]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1-413.
- 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄, 1979. 甘肃省“4·22”特大沙尘暴分析 [J]. 气象学报, 37(4): 26-35. Xu G C, Chen M L, Wu G X, 1979. On an extraordinary heavy sandstorm on April 22 in Gansu [J]. Acta Meteor Sinica, 37(4): 26-35.
- 徐国昌, 张志银, 1983. 青藏高原对西北干旱气候形成的作用 [J]. 高原气象, 2(2): 9-16. Xu G C, Zhang Z Y, 1983. The effect of Qinghai-Xizang Plateau in the formation of dry climate over the Northwest of China [J]. Plateau Meteor, 2(2): 9-16.
- 徐国昌, 1997. 中国干旱半干旱区气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1-101. Xu G C, 1997. Climate change in arid and semi-arid regions of China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-101.
- 许宝玉, 钱正安, 焦彦军, 1997. 西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析与预报 [M]//方宗义主编. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 37-43. Xu B Y, Qian Z A, Jiao Y J, 1997. Comprehensive analysis and prediction of the situation and factor fields of five severe dust storms in Northwest China [M]// Fang Z Y, ed. Study of dust storm in China. Beijing: China Meteorological Press, 37-43.
- 杨德保, 尚可政, 王式功, 2003. 沙尘暴 [M]. 北京: 气象出版社, 1-181. Yang D B, Shang K Z, Wang S G, 2003. Dust storm [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-181.
- 杨昭, 阳燮, 1984. 南亚高压和青海汛期降水的关系 [C]//青藏高原气象科学实验文集(二). 北京: 科学出版社, 159-171. Yang Z, Yang X, 1984. Relationship between South Asia high pressure and precipitation during flood season in Qinghai [C]//Works of Meteorological Sciences in the Qinghai-Xizang Plateau, the second edition. Beijing: Science Press, 159-171.
- 叶笃正, 高由禧, 等编, 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 1-278. Ye D Z, Gao Y X, et al, eds, 1979. Meteorology in Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1-278.
- 叶笃正, 黄荣辉, 1990. 旱涝气候研究进展 [M]. 北京: 气象出版社, 1-156. Ye D Z, Huang R H, 1990. Research progress of drought and flood climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-156.
- 叶笃正, 黄荣辉. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1-387. Ye D Z, Huang R H, 1996. Law and cause of drought and flood in the Yellow River and the Yangtze River [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1-387.
- 张家宝, 邓子风, 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社, 1-410. Zhang J B, Deng Z F, 1987. Introduction of precipitation in Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-410.
- 张家诚, 林之光, 1985. 中国气候 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1-603. Zhang J C, Lin Z G, 1985. Chinese Climate [M]. Shanghai:

- Shanghai Technology Press , 1-603.
- 张强,郭妮,2011. 沙尘暴——形成机理及监测预报和影响评估技术研究[M]. 北京:气象出版社,1-257. Zhang Q, Guo N, 2011. Dust Storm—Mechanism, monitoring and forecasting, and impact assessment technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-257.
- 张强,胡隐樵,曹晓彦,等,2000. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠,20(4): 357-362. Zhang Q, Hu Y Q, Cao X Y, et al, 2000. On some problems of arid climate system of Northwest China[J]. J Desert Res, 20(4): 357-362.
- 张强,卫国安,黄荣辉,2001. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数[J]. 中国科学(地球科学), 31(9): 783-792. Zhang Q, Wei G A, Huang R H, 2001. Overall transport coefficient of momentum and sensible heat in desert and gobi of Northwest China [J]. Science of China (Earth Science), 31(9): 783-792.
- 张强,张杰,乔娟,等,2011. 我国干旱区深厚大气边界层与陆地热力过程的关系研究[J]. 中国科学(地球科学), 41(9): 1365-1374. Zhang Q, Zhang J, Qiao J, et al, 2011. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China [J]. Science of China (Earth Science), 41(9): 1365-1374.
- 张琼,钱正安,陈敏连,1997. 关于夏季南亚高压的进一步研究 I. 与我国西北地区降水关系的统计分析[J]. 高原气象, 16(1): 52-62. Zhang Q, Qian Z A, Chen M L, 1997. The further study about south Asia high in summer I. Statistic analyses of relationship between it and precipitation distribution over Northwest China [J]. Plateau Meteor, 16(1): 52-62.
- 张书余,2008. 干旱气象学[M]. 北京:气象出版社,1-292. Zhang S Y, 2008. Arid meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-292.
- 张小玲,宋敏红,钱正安,等,2006. 2006年春季中蒙中、东区沙尘暴低层环流及变化初步分析[J]. 高原气象, 25(增刊1): 77-84. Zhang X L, Song M H, Qian Z A, et al, 2006. Preliminary analysis of circulation and variation of dust storms in the central and eastern China during the spring of 2006 [J]. Plateau Meteor, 25 (Suppl1): 77-84.
- 张学文,1962. 新疆气象论文选[C]//乌鲁木齐:新疆气象学会,63. Zhang X W, 1962. Selected papers of Xinjiang Meteorology [C]// Urumqi: Xinjiang Meteorological Society, 63.
- 赵福吉,1978. 盛夏南疆降水过程和南亚高压[J]. 气象, (9): 12-14. Zhao F J, 1978. Precipitation process in southern Xinjiang and south Asia high pressure in midsummer [J]. Mon Meteor, (9): 12-14.
- 中国科学院兰州高原大气物理所主编,1981. 高原气候图集[Z]. 海口:海南人民出版社,1-538. Lanzhou Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 1981. Climatic atlas of Tibetan Plateau [Z]. Haikou: Hainan People's Press, 1-538.
- 中国科学院南京土壤研究所,1996. 中国土壤图集[Z]. 北京:地图出版社,1-200. Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 1996. China soil atlas [Z]. Beijing: Map Publishing House, 1-200.
- 中国气象局,1966. 中国气候图集[Z]. 北京:地图出版社,1-162. China Meteorological Administration. 1966. China climatic atlas [Z]. Beijing: Map Publishing House, 1-162.
- 中国气象局,1978. 中华人民共和国气候图集[Z]. 北京:地图出版社,1-226. China Meteorological Administration, 1978. Climatic atlas of the People's Republic of China [Z]. Beijing: Map Publishing House, 1-226.
- 中国气象局减灾司,2002. 沙尘暴监测预警服务研究[M]. 北京:气象出版社,1-272. Disaster Reduction Department, China Meteorological Administration, 2002. Study on monitoring and early warning service of sandstorm [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-272.
- 中国气象局气象科学研究院主编,1981. 中国近500年旱涝分布图集[Z]. 北京:地图出版社,1-332. Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, 1981. Atlas of droughts and floods in China in recent 500 years [Z]. Beijing: Map Publishing Press, 1-332.
- 周建琴,蔡英,钱正安,等,2009a. 夏季不同源地水汽对西北地区降水影响的数值模拟(I): 试验个例、方案设计及对照试验结果[J]. 高原气象, 28(6): 1211-1219. Zhou J Q, Cai Y, Qian Z A, et al, 2009a. Simulation on impact of water vapor in various source areas on NWC precipitation summer (I): Experiment schemes and contrast run results [J]. Plateau Meteor, 28(6): 1211-1219.
- 周建琴,钱正安,蔡英,等,2009b. 夏季不同源地水汽对西北地区降水影响的数值模拟(II): 减、增各源区水汽影响的敏感性试验[J]. 高原气象, 28(6): 1220-1232. Zhou J Q, Qian Z A, Cai Y, et al, 2009b. Simulation on impact of water vapor in various source areas on NWC precipitation summer (II): Sensitive run results of effects of decreasing (increasing) water vapor in various source areas [J]. Plateau Meteor, 28(6): 1220-1232.
- 周琴南,1984. 关于南疆降水水汽来源问题的研究[C]. 北方天气文集(4), 179-181. Zhou Q N, 1984. Study on water vapor source of precipitation in southern Xinjiang [C]. Northern Weather Collection (4), 179-181.
- 竺可桢,1931. 中国气候区域[Z]. 前中央气象研究所集刊,1931年1月. Zhu K Z, 1931. China climate region [Z]. The collection of the former Central Meteorological Institute, January 1931.
- 竺可桢,1934. 东南季风与中国雨量[J]. 地理学报(1): 1-27. Zhu K Z, 1934. Southeast monsoon and rainfall in China [J]. Acta Geograph Sinica (1): 1-27.
- 竺可桢,1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 3(2): 168-189. Zhu K Z, 1973. Preliminary study of climate changes in China in the past five thousand years [J]. Science of China, 3(2): 168-189.

Review of Advances in World Arid Climate Research (I) : Development and Contribution of Some Main Dryland Countries and the UN

QIAN Zheng'an¹ , SONG Minhong² , WU Tongwen³ , CAI Ying¹

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , Gansu , China;

2. Chengdu University of Information Technology , Chengdu 610225 , Sichuan , China;

3. National Climate Center , China Meteorological Administration , Beijing 100081 , China)

Abstract: To review the development status and advances in world dryland climate investigation in the past 70 years , first of all , the companion paper (I) introduces the development status and contribution of some main dryland countries and the UN. The main points are as follows: (1) In the 20th century , there were two major drought events occurring: one was “the dust bowl drought of 1930” , US. Another one was southern Sahel long term one from 1968–1999. (2) The US is the strongest county in the dryland climate research in past century. Its dry climate studies begin earlier , act the leading role almost in the each branch field of its , especially in putting award and using of drought indices and the causes of the arid climate forming. (3) As a developing country , China dry climate research begin something late , but some encouraging pregresses in China–Mongolia dry climate have been already made since 1980 then , say the summer water vapor transform in the center area of Northwest China dar climate , the spring dust storm in China–Mongolia zone and the dryland climate forming. (4) And also Australia , British , Japan and the UN have an important contribution to world dryland climate investigation and combating global warming.

Key words: World drought dryland; major arid event; eight major arid zones; China–Mongolia dry zone; dry climate forming causes