

doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.01.002

黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述 [J]. 气候变化研究进展, 2013, 9 (1): 009-014

干旱半干旱区气候变化研究综述

黄建平¹, 季明霞¹, 刘玉芝¹,
张 镭¹, 龚道溢²

1 兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室,
兰州 730000;

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点
实验室, 北京 100875

摘要: 从干旱半干旱区气候的时空变化特征、陆气相互作用的观测试验以及气候变化的动力学机制等几个方面系统总结了近年来国内外干旱半干旱区气候变化的最新研究进展, 指出目前干旱半干旱区气候变化研究以特定区域研究为主, 缺乏对全球不同区域干旱半干旱区气候变化时空关联的系统性归纳研究, 且野外观测试验持续时间较短, 这在很大程度上限制了对干旱半干旱区气候变化机理的认识和陆面过程模式的发展。针对这些问题, 从资料获取、资料分析及数值模拟3个方面提出未来干旱半干旱区气候变化研究的主要方向。

关键词: 干旱; 半干旱; 气候变化

引言

干旱半干旱区约占全球陆地总面积的30%, 这里降水稀少、水资源缺乏、生态环境极其脆弱, 对全球变化的响应十分敏感。全球气候变化的重要表现是全球变暖, 不同气候区域对全球变暖的贡献存在显著差异, 干旱半干旱区作为全球陆地的特殊组成部分, 对全球变暖具有很大贡献。研究表明, 干旱半干旱区是近100年来温度增加最显著的地区, 特别是半干旱区, 对全球陆地变暖的贡献达到44%^[1], 因此干旱半干旱区的气候变化是全球变化研究领域不可忽视的重要组成部分。

干旱半干旱区气候变化与包括水文、生态在内的各种物理、化学和生物过程密切相关, 其变化规

律和动力机制非常复杂, 是一个多学科交叉的科学难题。虽然针对干旱半干旱区气候变化已经相继开展了大量的工作, 但目前仍存在很多尚未解决的科学问题, 例如尚无法区分自然变化和人类活动在干旱半干旱区气候变化中的相对贡献, 也不能准确预测干旱半干旱区气候未来的变化趋势, 特别是干旱半干旱区气候对全球气候变化的区域响应。虽然这些问题在湿润区和半湿润区也同样存在, 但是干旱半干旱区地表脆弱, 对人类活动的响应更加敏感, 所以上述这些问题在干旱半干旱区尤为突出。在全球气候变化背景下, 典型干旱半干旱区气候未来如何变化、区域可持续发展战略如何选择, 都依赖于对干旱半干旱区气候变化规律和机理的深刻理解。因此, 继续开展干旱半干旱区气候变化及其影响的研

收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2012-08-24

资助项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955301); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(708088)

作者简介: 黄建平, 男, 教授, 主要从事全球气候变化研究, hjp@lzu.edu.cn

究具有重大的科学意义。本文就目前干旱半干旱区气候变化的相关研究成果进行总结,并对该研究的未来发展趋势进行讨论。

1 干旱区的划分标准

降水是衡量干旱气候的主要变量之一,在气象上,很多学者用这一单一气象要素来划分干旱区^[1-2],例如,汤懋苍等^[2]利用美国国家环境预报中心NCEP再分析降水资料,取南北纬60°之间的中低纬地区平均年降水量 250 mm作为旱区的标准,将全球划分出3类旱区:(1)副热带旱区,包括北非撒哈拉穿过阿拉伯半岛到印度的塔尔沙漠及北美、南美、南非和澳大利亚的西部共有5块;(2)亚洲内陆旱区,从里海往东到中国内蒙古中部,其经度范围为50°~114°E,纬度可达47°N;(3)其他小块旱区,包括羌塘高原、东非索马里沿海、美国内华达州、南美厄瓜多尔、秘鲁北部及阿根廷南部等。事实上,干湿状况除了取决于降水,还受蒸散的影响,因为降水是主要的水分来源,而潜在蒸散则反映水分充足条件下的最大可能水分支出。因此,经典的干旱区划分除了考虑降水,还应该考虑蒸发,比如联合国环境规划署(UNEP)^[3]的划分标准,将年降水量与年潜在蒸发量的比值 A 在0.05~0.65之间的区域定义为干旱区,并分为4种类型: $A < 0.05$ 为极端干旱区,0.05 $A < 0.2$ 为干旱区,0.2 $A < 0.5$ 为半干旱区,0.5 $A < 0.65$ 为半湿润干旱区。根据UNEP的标准,Hulme^[4]在全球划分出9个干旱半干旱区,即美国西南部、巴塔哥尼亚、北非、萨赫勒、非洲之角、南非、西南亚、中亚、澳大利亚(图1)。

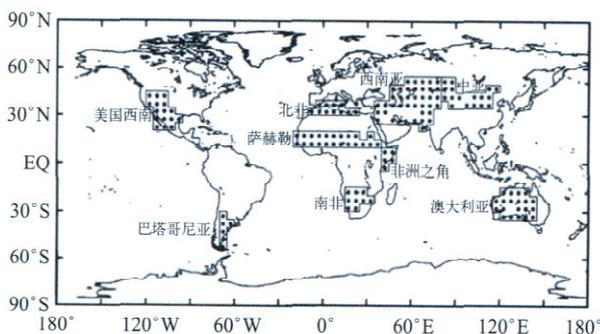


图1 全球9个干旱半干旱区分布^[4]

Fig. 1 Global distribution of arid and semi-arid regions^[4]

2 干旱半干旱区气候的时空变化特征

近年来学者们更加注重于研究干旱半干旱区气候变化对全球变暖的响应。政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告^[5]指出,温室气体增加和人类活动加剧,使对流层温度升高,平流层温度降低,因而对流层顶抬高,赤道环流强度减弱,副热带急流及中纬度风暴路线向两极移动,进而使得热带地区范围增大,副热带干旱区向两极扩展。李新周等^[6]利用1860—1995年全球格点Palmer干旱指数(PDSI)资料,分析了全球七大干旱区近百年来PDSI的变化趋势。结果表明:除澳大利亚、北非干旱区外,南美洲、南非、北美洲、中亚和中国西北等全球主要干旱区近百年来呈明显变干趋势,且所有干旱区都表现为暖时段干旱年所占比率明显高于冷时段,全球增暖的持续可能导致干旱区的干旱化加剧。马柱国等^[7]分析了1951—2002年全球干湿变化趋势,指出在增暖背景下,20世纪下半叶全球干湿变化趋势具有明显的区域差异,非洲大陆、欧亚大陆、澳洲大陆和南美大陆以干旱化趋势为主,尤以非洲大陆和欧亚大陆最为剧烈。北美大陆自1976年以后表现为变湿趋势,南美大陆存在30年左右的干湿振荡周期,但最近处于干化的时段,澳洲大陆的变化与之类似。研究还表明,增暖已经改变了全球环境干湿变化的分布格局,南美大陆和澳洲大陆尽管降水为增加趋势,但仍然表现为干旱化趋势,其中温度升高是其表现为干旱化特征不可忽视的原因。章大全等^[8]根据中国气象局1958—2007年194站的温度、降水和PDSI均一化数据库得到,中国华北、东北及西北东部等干旱与半干旱区的干旱化进程对温度比降水变化更为敏感。施雅风等^[9]则指出,由于全球显著变暖和循环加快,中国西北(主要是新疆地区)于1987年气候发生突变,中国西北气候由暖干向暖湿转型,而且这种转型可能是世纪性的。

3 陆气相互作用的观测试验

观测试验是获得资料的最直接手段,是研究干旱半干旱区气候变化的基础。20世纪80年代开始,

国际上在全球不同气候生态区先后开展了一系列大型陆面过程试验, 其中与干旱半干旱区相关的试验有 10 个左右^[10], 比如在美国中部堪萨斯草原开展的“第一次国际卫星陆面气候计划试验”(FIFE)^[11]、世界气象组织(WMO)在赤道湿润带向撒哈拉沙漠过渡半干旱区进行的 HAPEX-Sahel 试验^[12]、欧盟在沙漠化威胁地区西班牙进行的 EFEDA 试验^[13], 以及 1988—1990 年水文研究所与撒哈拉中心国际半干旱地区热带作物研究所(ICRISAT)合作进行的撒哈拉能量平衡试验(SEBEX)^[14]等。

在亚洲干旱半干旱区, 也先后开展了若干大型综合观测试验, 如中日合作在中国甘肃黑河流域进行的“黑河地区地气相互作用野外观测试验研究”(HEIFE)^[15], 该项目是以水分和热量交换为中心的地气相互作用综合观测项目, 着重研究干旱气候的形成和变化的陆面物理过程, 为气候模式的中纬度干旱和半干旱地带水分和能量收支的参数化方案提供观测依据。1997—2001 年期间进行的“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用”(IMGRASS) 试验^[16], 在甘肃敦煌荒漠戈壁进行的“我国西北干旱区陆气相互作用野外观测试验”^[17], 近年来以鄂尔多斯干旱、半干旱区至湿润区气候过渡带和生态地理过渡带为背景的“稀疏植被下垫面与大气相互作用研究”野外观测试验^[18], 以及“黄土高原陆面过程试验研究”(LOPEX)^[19]等。这些试验对我国干旱半干旱区的陆气能量、水分交换与循环作了较为系统的观测, 取得了很多有意义的研究成果。

除了以上这些短暂的野外观测试验之外, 近年来在干旱半干旱区还建立了一些长期观测站, 通过长期观测试验, 从陆气相互作用的角度, 加深了对干旱半干旱区气候的认识, 对进一步认识干旱化的形成机理、开展有序人类活动提供了坚实的研究基础。如符淙斌主持的“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”项目^[7], 于 2002 年在吉林通榆设立通榆观测试验站, 其核心内容就是运用多学科交叉的手段对我国北方干旱化的事实、形成机理和预测及其对环境的影响进行系统的研究, 并为国家应对干旱化的决策提供科学基础。2005 年兰州大学也建立了专门进行半干旱气候变化研究的兰州大学半干

旱气候与环境观测站(SACOL)^[20], 进行干旱半干旱区荒漠、草甸、原始森林(特殊植被)等多种下垫面的陆面物理过程, 陆气间能量、水分和物质交换过程, 沙尘, 黑碳气溶胶等长期定点对比观测, 取得了连续的高质量的区域观测资料。Huang 等^[21-24]通过分析该地区的连续观测资料发现, 沙尘气溶胶可作为冰云凝结核改变冰云物理特性、云量和云寿命, 从而间接影响陆气系统辐射收支, 对大气产生显著的非绝热加热, 影响大气环流并造成云快速蒸发, 导致降水减少, 干旱化加剧。除定点观测之外, 兰州大学每年还进行大型野外观测试验, 并开展了我国北方季节性积雪中黑碳气溶胶的大范围观测, 发现我国东北地区黑碳气溶胶含量与欧洲地区相当, 为定量估计黑碳气溶胶通过对积雪反照率的影响对增温的贡献提供了第一手资料^[25]。值得一提的是, 2012 年批准立项的“全球典型干旱半干旱地区气候变化及其影响”国家重大基础研究项目, 就是以全球典型干旱区气候变化为核心, 通过大气、水文、生态等多学科交叉研究, 揭示其规律及对全球变暖的响应机制, 旨在提出国际领先的干旱半干旱区气候变化机理理论和科学预测干旱半干旱区气候变化趋势的新方法, 为干旱半干旱区的可持续发展提供依据。相信该项目的实施, 将进一步提高我国在国际干旱半干旱研究领域的发展水平。

4 干旱半干旱区气候变化的动力学机制

近年来, 随着全球变化科学的发展, 有关干旱半干旱区的气候变化及其区域响应成为该领域的关键热点问题之一, 引发了关于干旱半干旱区气候变化动力学机制的深入探讨。综合以往干旱半干旱区气候变化动力学机制的相关研究, 可归结为 3 类观点。

第一类观点主要考虑了自然因素。提到干旱区的形成, 人们首先就会想到三圈环流。由于南北半球的副热带地区位于 Hadley 环流的下沉区, 因此形成了一条环绕全球、集中了世界上绝大部分干旱区的干旱带, 这就是干旱区形成的最初理论解释。但并非所有的副热带地区都是干旱区, 如东亚季风区和非洲季风区等, 这些地区同处副热带却雨量丰沛,

气候湿润。因此,又有一些学者认为干旱区气候的形成是由于干旱区地处内陆、远离海洋,同时由于大地形的作用,水汽很难到达所致,但这并不能完全解释干旱区的形成机理。Folland等^[26]也指出,萨赫勒地区长期干旱化源于全球海洋温度的变化,随后Rowell等^[27]、Hunt^[28]、Giannini等^[29]成功模拟了海温异常对萨赫勒地区降水的重要作用,进一步证明了这种观点。

第二类观点认为陆气相互作用是干旱半干旱区气候变化的重要因素。尽管陆地仅占整个地球表面积的30%左右,但却是人类活动的主要范围,随着人口增多,人类活动范围的扩大以及活动能力的增强对气候的扰动越来越引起关注,尤其是干旱半干旱区生态环境脆弱,对人为扰动更加敏感,是气候变化的关键区。20世纪70年代, Otterman^[30]提出有关陆气相互作用对干旱化的影响,他将萨赫勒地区长期干旱归结于人类过度放牧使地表裸露,进而使地面反照率增加,这是人类活动影响气候与环境变化的开创性研究。Charney^[31]为此提出了动力学解释:萨赫勒地区处在Hadley环流的下沉区,本来就干旱少雨,过度的放牧使得地表裸露,反照率增大,反射掉更多的太阳辐射,与周围相比形成一个辐射热汇,为了维持热力平衡,该地区的空气就要下沉,从而加强了Hadley环流的下沉区,使干旱加剧,其结果就是使植被进一步退化,这是一个正反馈过程。Rotenberg等^[32]研究指出,过去几十年的陆面过程变化(主要是土地退化)对地球系统产生负强迫,其大小相当于同一时期人类活动释放CO₂所产生温室效应的20%左右。

随后进行的很多改变地表植被覆盖类型的敏感性试验,也都验证了陆面反馈过程的重要性。如Xue^[33]在试验中将蒙古和内蒙古假定为草原,在荒漠化方案中,上述区域指定为沙漠。试验结果表明,荒漠化改变了水热平衡,荒漠化试验中蒸发受所在地域地表能量平稳的支配,在荒漠化地区及其南部地表上的对流潜热加热的减少,加强了对流下沉运动(或减弱了上升运动),相应的季风环流减弱,降水减少。类似的试验也被Xue等^[34]应用到萨赫勒地区,他将萨赫勒地区的植被都换成荒漠类型(带灌

木的裸露地表),控制试验取实际的植被类型,结果发现雨季(7—9月)降水的变化非常明显,与实际观测的少雨期与多雨期的差别非常接近。虽然这些敏感性试验只是一种极端情况,实际观测的土地覆被的变化远没有这样强烈,但由此可以说明陆面反馈对干旱化有相当大的作用。Zeng等^[35]利用大气-陆地-植被耦合动力模型,模拟萨赫勒地区1950年以来的降水变化,发现如果给定土壤湿度而不考虑植被的作用,模拟的降水年际变率和低频变化都远比实际观测的低,如果不考虑植被的作用但加入土壤水分与大气的相互作用,则模拟的降水年际变率有所提高,如果同时考虑水分和植被的反馈作用,那么模拟的降水与实际观测非常一致,因此,他们认为植被对持续性干旱的维持或加强有重要的作用。史培军等^[36]也发现,陆面过程反馈是萨赫勒地区20世纪60年代之后降水显著减少的主要原因之一。此外, Rotstayn等^[37]的模拟结果表明,人类活动导致的气溶胶辐射强迫(直接和间接)的空间变化加剧了萨赫勒干旱化趋势。IPCC最新发布的《管理极端事件和灾害风险促进气候变化适应特别报告》^[38]指出,1950年以来的观测数据表明,世界上很多地区都发生了较以往更剧烈和更长时间的干旱,特别是欧洲南部和西非,而有证据表明,人类活动对干旱形势的分布有着重要的影响。

第三类观点认为全球变暖可能导致干旱化加剧。IPCC报告^[5]指出,全球变暖使全球平均降水增加,但是区域差异明显,主要是热带及高纬度降水增加,而中纬度降水减少。考虑到世界上主要的干旱及半干旱地区大都位于中纬度,所以全球变暖对这些地区的负面影响更为深刻。李新周等^[6]指出,全球增暖的持续可能导致干旱区的干旱化加剧。马柱国等^[7]也指出全球增暖已经改变了全球环境干湿变化的格局,南美大陆和澳洲大陆尽管降水为增加趋势,但仍然表现为干旱化趋势,其中温度升高是其表现为干旱化特征不可忽视的原因。以上观点认为热力过程“干会变得更干”是全球变暖背景下副热带及中纬度干旱半干旱区进一步干旱化的主要机制^[39],但这一传统思想被新的研究结果所挑战。Johanson等^[40]认为,全球变暖背景下,副热带急流向两极移动,

热带展宽受大气稳定度增加和热带海表温度变化的共同影响。Wu等^[41]提出西部沙漠和东部季风同时存在的非绝热加热和涡度环流的正反馈机制,为解释干旱气候变化建立了新的概念模型。

5 问题与发展趋势

目前,虽然干旱半干旱区气候变化和干旱化机理的研究已经取得了一系列的重要进展,但仍然存在问题,主要包括:(1)目前研究以特定区域为主,缺乏对全球不同区域干旱半干旱区气候变化时空关联的系统性归纳研究;(2)虽然针对干旱半干旱区的陆面观测试验已相继展开,但仍缺乏陆气系统的能量、水分和物质循环等方面可信度较高、持续时间较长、观测要素较全的系统观测研究,这在很大程度上限制了对干旱半干旱区气候变化机理的认识和陆面过程模式的发展;(3)现代资料分析中虽然已经发现一些新的事实,但资料分析的结果缺少动力学机制解释,对造成干旱半干旱区气候变化的机理和数值模拟研究还十分缺乏,进而导致对干旱半干旱区气候变化成因的认识分歧很大,目前尚不能定量区分自然变化和人类活动等因素的相对贡献。

上述问题将引领未来干旱半干旱区气候变化领域发展的方向。(1)资料获取方面,加强陆气系统的能量、水分和物质循环等方面的系统观测研究,获取可信度较高、持续时间较长、观测要素较全的资料,结合卫星、遥感等多种手段,发展新的资料获取方法,为陆面模式的发展提供更准确、完善的陆面参数数据库。(2)资料分析方面,注重全球不同区域干旱半干旱区气候变化时空关联的系统性归纳研究,构建全球干旱半干旱区干湿振荡的完整图像。加强对比各地区人类活动、下垫面和气候变化三者相互作用的空间差异,且现代资料分析的结果要与动力学机制的研究相结合。(3)数值模拟方面,完善和发展有效的陆面非均匀的参数化方案以及复杂下垫面的边界层理论,构建适合干旱半干旱区气候系统的区域气候模型,通过观测资料和数值模式探讨干旱半干旱区气候变化的主要物理和动力过程,全球变化背景下大尺度环流变化对区域增温的反馈和对

干旱化趋势的影响,定量识别人类活动和自然变化对干旱半干旱区气候变化的相对贡献。■

参考文献

- [1] Huang J P, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12: 5391-5398, doi:10.5194/acp-12-5391-2012
- [2] 汤懋苍, 江灏, 柳艳香, 等. 全球各类旱区的成因分析[J]. *中国沙漠*, 2002, 22 (1): 1-5
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP). World atlas of desertification [M]. Sevenoaks: Edward Arnold, 1992: 69
- [4] Hulme M. Recent climatic change in the world's drylands [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23 (1): 61-64
- [5] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 235-336
- [6] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. *干旱区研究*, 2004, 21 (2): 97-103
- [7] 马柱国, 符凉斌. 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 D 辑: 地球科学*, 2007, 37 (2): 222-233
- [8] 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59 (1): 655-663
- [9] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23 (2): 152-164
- [10] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-TIBET/ TIPEX [J]. *高原气象*, 1999, 18 (3): 280-294
- [11] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, *et al.* The first ISLSCP field experiment (FIFE) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, 69: 22-27
- [12] Goutorbe J P, Lebel T, Tinga A, *et al.* HAPEX-Sahel: a large scale study of land atmosphere interactions in the semi-arid tropics [J]. *Annales Geophysicae*, 1994, 12: 53-64
- [13] Bolle H J, Andre J C, Arrue J L, *et al.* EFEDA: European field experiment in a desertification threatened area [J]. *Annales Geophysicae*, 1993, 11: 173-189
- [14] Wallace J S, Allen S J, Culf A D, *et al.* SEBEX: the Sahelian energy balance experiment [R]. Final report on ODA Project T06050C1, ODA-report 92/9, 1992
- [15] 胡隐樵, 高由禧. 黑河试验 (HEIFE): 对干旱地区陆面过程的一些新认识[J]. *气象学报*, 1994, 52 (3): 285-296
- [16] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用 (IMGRASS) 综合研究[J]. *地球科学*, 2002, 27 (2): 295-306
- [17] 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆-气相互作用试验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (4): 427-441
- [18] 胡隐樵, 孙菽芬, 张强, 等. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展[J]. *高原气象*, 2004, 23 (6): 281-296
- [19] 张强, 胡向军, 王胜, 等. 黄土高原陆面过程试验研究 (LOPEX) 有关科学问题[J]. *地球科学进展*, 2009, 24 (4): 363-371
- [20] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, *et al.* An overview of the semi-arid climate

- and environment research observatory over the loess plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25 (6): 906-921
- [21] Huang J P, Minnis P, Lin B, *et al.* Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L06824, doi: 10.1029/2005GL024724
- [22] Huang J P, Lin B, Minnis P, *et al.* Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L19802, doi: 10.1029/2006GL026561
- [23] Huang J P, Fu Q, Su J, *et al.* Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9: 4011-4021
- [24] Huang J P, Minnis P, Yan H R, *et al.* Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from a train satellite measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10: 6863-6872
- [25] Huang J P, Fu Q, Zhang W, *et al.* Dust and black carbon in seasonal snow across northern China [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92: 175-181
- [26] Folland C K, Palmer T N, Parker D E. Sahel rainfall and worldwide sea surface temperatures [J]. *Nature*, 1986, 320: 602-607
- [27] Rowell D P, Forland C K, Maskell K, *et al.* Modeling the influence of global sea surface temperatures on the variability and predictability of seasonal Sahel rainfall [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19 (9): 905-908
- [28] Hunt B G. Natural climatic variability and Sahelian rainfall trends [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 24: 107-131
- [29] Giannini A, Saravanan R, Chang P. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales [J]. *Science*, 2003, 302: 1027-1030
- [30] Otterman J. Baring high-albedo soils by overgrazing: a hypothesized desertification mechanism [J]. *Science*, 1974, 186: 531-533
- [31] Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101: 193-202
- [32] Rotenberg E, Yakir D. Contribution of semi-arid forests to the climate system [J]. *Science*, 2010, 327: 451-454
- Xue Y. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner
- [33] Mongolian grassland on the regional climate [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9 (9): 2173-2189
- [34] Xue Y, Shukla J. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: desertification [J]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 2232-2245
- [35] Zeng N, Neelin J D, Lau K M, *et al.* Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction [J]. *Science*, 1999, 286: 1537-1540
- [36] 史培军, 龚道溢. Sahel 气候与环境变化研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16 (3): 406-412
- [37] Rotstayn L D, Lohmann U. Tropical rainfall trends and the indirect aerosol effect [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 2103-2116
- [38] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 582
- [39] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 5686-5699
- [40] Johanson C M, Fu Q. Hadley cell expansion: model simulations versus observations [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 2713-2725
- [41] Wu G X, Liu Y, Zhu X, *et al.* Multi-scale forcing and the formation of subtropical desert and monsoon [J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27 (9): 3631-3644

An Overview of Arid and Semi-Arid Climate Change

Huang Jianping¹, Ji Mingxia¹, Liu Yuzhi¹, Zhang Lei¹, Gong Daoyi²

1 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The spatial and temporal characteristics and dynamic mechanism of arid and semi-arid climate change have been reviewed in this paper. Recently, most of the research on the arid and semi-arid regions' climate change mainly focused on the specific regions. However, there are less systematic studies for the relationship of climate change on the different global arid and semi-arid regions. The understanding of the mechanism of land surface process model development is another shortage on the climate change studies because the experiments are limited to work on it. Finally, the questions in arid and semi-arid climate change studies and future research direction are proposed.

Key words: arid climate; semi-arid climate; climate change