

管晓丹,程善俊,郭瑞霞,等. 干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展[J]. 干旱气象,2014,32(1):135-141, [GUAN Xiaodan, CHENG Shan-jun, GUO Ruixia, et al. Review of Researches on Numerical Simulation of Soil Moisture over the Arid and Semi-arid Region[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(1):135-141], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-01-0135

干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展

管晓丹,程善俊,郭瑞霞,季明霞

(兰州大学干旱气候变化教育部重点实验室,兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:总结和回顾了干旱半干旱地区土壤湿度研究在区域气候变化研究过程中的重要性,详尽描述了干旱半干旱区土壤湿度数值模拟的研究现状。在过去几十年里,大型地面观测试验计划的开展、卫星遥感监测能力的加强促进了干旱半干旱地区陆面模式模拟土壤湿度能力的提高,推动了干旱半干旱地区土壤湿度数值模拟的研究进程。尤其是干旱半干旱地区气候观测站的建立,积累了长期宝贵的连续性观测数据,增强了检验卫星反演方法的能力,促进了陆面模式的参数化改进。近年来随着气象学、生态学以及水文学、土壤学等学科之间交叉合作的加强,气候变化背景下土壤湿度对碳、氮循环的影响研究得到越来越多的重视,尤其在干旱半干旱地区,局地碳通量和水分供应存在密切联系。因此,未来半干旱地区土壤湿度的研究不仅要开展观测计划,积累长期连续的高质量数据,改进卫星反演能力和模式参数化方案,而且要进一步深化和加强学科交叉内容的研究,分析气候变化背景下土壤湿度在生态学、水文学、土壤学等学科的变化形式和特点,多角度、多方向地开展和改进干旱半干旱地区土壤湿度的数值模拟研究。

关键词:干旱半干旱区;土壤湿度;观测;卫星;数值模拟

文章编号:1006-7639(2014)-01-0135-07 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-01-0135

中图分类号:P426.1

文献标识码:A

引言

土壤湿度作为陆地和大气相互作用过程中的一个关键变量,在地—气间的水分和能量交换中起到支配和调控作用。其最直接的影响表现为土壤湿度通过改变地表反照率、土壤热容量、地表蒸发以及植被生长状况等方面,引起地表水分和能量的再分配及大气环流结构的变化,进而导致气候发生异常。此外,土壤湿度作为水循环中的主要环节,是地表水文过程中重要的信息载体和综合指标之一,是陆—气水循环过程中的重要因子^[1]。因此,土壤湿度一直是研究干旱和气候变化的一个客观定量的综合指标。通过土壤湿度的变化研究气候变化已经取得了一系列的成果,分别表现在短期气候变化和长期气候变化 2 个方面。从短期气候变化的角度看,土壤湿度通过改变地表反照率及土壤热容量和向大气输送的感热、潜热等方式,影响区域气候特征的变化。

在年际到年代际的时间尺度上,土壤湿度更多的受到气候变化的影响,从而引起土壤热容量和地表反照率的改变,导致地表和低层大气之间水热平衡过程发生变化,进一步产生对气候的反馈作用。

干旱半干旱地区约占全球陆地总面积的 30% 左右^[2],是全球气候变化最敏感的地区之一和重要的组成部分。针对全球不同气候区对增温贡献的研究表明,干旱半干旱地区是近百年增温最显著的地区,尤其是在半干旱地区,其对全球陆地增温的贡献率达到 44%^[3]。干旱半干旱地区主要分布在南北半球的中纬度地区,这里降水稀少、水资源缺乏、生态环境脆弱。近年来研究发现半干旱地区在近几十年来表现出明显的干旱化趋势,生态系统遭到破坏,极端天气气候事件频发,对半干旱地区乃至全球气候变化产生重大的影响。

我国干旱半干旱地区分布广泛,占国土总面积的 56% 左右,主要集中在北方地区,其中 40% 左右

收稿日期:2013-05-10;改回日期:2013-11-28

基金项目:国家自然科学基金青年基金(40305119)、国家重大科学研究计划项目(2012CB955301)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-107、lzujbky-2013-109 和 lzujbky-2013-ct05)及干旱基金(IAM201313)共同资助

作者简介:管晓丹(1983-),女,吉林省通化人,讲师,主要从事陆面过程和土壤湿度变化研究. E-mail: guanxd@lzu.edu.cn

已经出现干旱化现象,北方干旱化是我国最为棘手的生存环境问题之一,严重阻碍了我国的经济展^[4-9]。干旱半干旱地区自古以来就是人类活动的频繁地带,古老的文明表征这里一度为适宜人类生存的地区。在近千年来的气候变化和人类活动的共同作用下,干旱半干旱地区的区域气候发生了很大改变。尤其在近几十年,随着经济的发展,土地利用方式发生明显改变,城市的扩展,工业发展和人口增加导致能源和水资源紧缺等问题出现。干旱半干旱地区作为全球气候变化最敏感的地区之一,其能量循环和水循环受到气候变化的影响。土壤湿度在干旱半干旱气候变化中发挥着重要作用,干旱半干旱地区年降水少,土壤湿度的大小决定着植被的生长状态,同时也是表征干旱半干旱地区干旱化程度的重要变量。

目前研究土壤湿度的方法主要包括地面观测、卫星遥感和数值模拟等方法,其中地面观测是最早开展的测量土壤湿度的方法,是检验卫星遥感和数值模拟结果好坏的重要工具。土壤水分监测的方法有很多种,其中传统的方法主要包括称重烘干法、中子仪法、测量土壤传导性等。此外,还可以通过测量土壤的基质势间接测得土壤湿度,如张力计法、电阻块法、干湿计法等,旱区土壤水分的监测工作主要在长期定位观测站进行。

卫星遥感为大范围、高频率、迅速获取全球和区域土壤湿度状况提供了有效手段。土壤湿度的卫星反演主要包括被动微波和主动微波反演。被动微波遥感监测土壤湿度的研究和应用已有较为成熟的技术和模型,但反演产品的空间分辨率较低,适用于大范围区域,对区域性的土壤湿度变化分析则具有局限性。主动微波遥感利用其产品的高空间分辨率,与被动微波反演达成互补。无论是被动微波还是主动微波,在反演土壤湿度过程中遇到的最大问题就是植被和地表粗糙度对土壤湿度的影响在微波反演过程中并没有得到很好解决,也是目前微波反演土壤湿度研究领域中的一个难题^[10]。

随着大型观测计划的实施,陆面模式的发展,利用模式模拟土壤湿度取得了一系列的研究成果。20世纪70年代初,Charney等利用大气环流模式进行的数值试验,表明土壤湿度对东亚季风有反馈作用,对土壤湿度的改进有助于改善降水和温度的预报^[11];Namias等^[12]发现土壤湿度的季节性异常对大气季节变化有重要作用;Shukla等^[13]利用数值模式进行的模拟研究发现干、湿土壤对后期降水和气温的影响有较大差异;Walker等^[14]的敏感性试验表

明干土壤可促进未来气温升高、降水减少,湿土壤可促进气温降低,降水持续。一系列的研究成果表明了土壤湿度与大气系统有着重要的关系。土壤湿度的变化,不仅能影响陆面系统的水分分布,对陆—气相互作用也产生一定的影响。干旱半干旱地区属于年降水 < 600 mm的区域,蒸腾活动旺盛,土壤湿度对植被生长和分布影响显著。因此,作为干旱半干旱地区水循环和能量循环的重要组成部分,土壤湿度的研究在干旱半干旱地区的陆面过程和陆气相互作用中占有重要地位。本文对干旱半干旱地区土壤湿度模拟的研究成果进行了归纳总结,以期对未来干旱半干旱地区土壤湿度模拟研究提供一点借鉴。

1 干旱半干旱地区陆—气相互作用野外观测

1.1 干旱半干旱地区陆—气相互作用观测试验

自20世纪80年代开始,在国际上开展了一系列大型陆面过程观测试验,其中与干旱半干旱区相关的有10个左右^[15]。例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)^[16]、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^[17]、欧盟在沙漠化威胁地区西班牙进行的EFE-DA试验等^[18]。以及在我国甘肃黑河流域开展的“黑河地区地气相互作用野外观测试验研究”(HEIFE)^[19]、内蒙古地区的“内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用”(IMGRASS)试验^[20]、甘肃敦煌戈壁进行的“我国西北干旱区陆气相互作用野外观测试验^[21]、黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)^[22]和在鄂尔多斯干旱半干旱和湿润半湿润气候过渡带进行的“稀疏植被下垫面与大气相互作用研究”野外观测试验^[23]。这些在我国干旱半干旱区开展的试验,为研究干旱半干旱地区的陆面过程、陆气相互作用、以及能量循环和水分循环提供了较为系统的观测资料。通过对这些观测资料的分析,加深了对干旱半干旱区陆气相互作用机理的认识。

1.2 干旱半干旱地区陆—气相互作用观测试验站

随着干旱半干旱气候变化的研究发展,由短期的观测试验获取的资料不能满足人们对干旱半干旱地区气候变化研究的需求。因此,近年来在干旱半干旱地区陆续建立了长期观测试验站,积累长期的观测资料,以加深对干旱半干旱区的陆气相互作用和气候变化的认识。中国科学院大气物理研究所和

兰州大学分别在东北和西北半干旱区建立了吉林通榆^[24-26]和兰州榆中^[27-31]半干旱气候变化观测站,为积累长期高质量的半干旱地区气象和陆面过程数据提供了可能。

Guan 等^[28]通过分析兰州榆中站不同层土壤湿度与地表反照率的关系发现两者之间存在显著的指数关系,并且这种关系随着土壤深度的加深而减弱;同时研究发现兰州榆中半干旱地区的土壤热容量、土壤导热系数、土壤热扩散率都与土壤湿度存在一定的关系。长期观测数据的积累,不仅增加了对半干旱地区陆面过程机理的认识,而且推动了半干旱地区陆面模式参数化的发展,提高了模式的模拟能力。在连续观测数据的基础上,为研究干旱半干旱地区陆面过程的机理提供了可能。

Huang 等^[32-35]通过分析该地区的连续观测资料发现,西北半干旱地区的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。通过长期以来对土壤湿度的观测和模拟研究发现,在影响土壤湿度的众多气候因素中(例如降水、温度、土壤类型、日照时数、风速等),以温度和降水在土壤湿度长期变化中所占的比重最大^[36-38]。通过对比目前国际上应用较广泛的土壤湿度资料,发现降水与土壤湿度之间存在短期、相对简单的相互影响关系,而气温与土壤湿度的关系则较为复杂和长远^[39]。

干旱半干旱地区一直以来都是陆面过程研究中的难点和重点。观测资料的缺少以及复杂下垫面所导致的模式模拟结果和观测值具有显著的差异。干旱半干旱区气候变化研究过程中发现,目前的干旱半干旱地区出现局地气候变化迅速,干旱化程度快速而严重,对于干旱半干旱区典型下垫面的能量和水分分布及循环特征等都造成了一定的影响和研究的难度。如何利用观测资料进行干旱半干旱地区陆面过程和陆气相互作用的机理研究,改进陆面模式,提高模拟能力,是目前分析观测资料的主要研究目标。

2 干旱半干旱地区土壤湿度数值模拟

随着 20 世纪 80 年代国际和国内一系列大型观测计划的开展,有效地促进了陆面模式的发展进程。从最初的只考虑空气动力学总体输送公式和由几个均匀的陆地表面参数构造的参数化方案描述的土壤水分、蒸发和地表径流的“Bucket”箱式模型,发展到考虑生物圈和大气圈之间相互作用的第二代陆面模

式。在这期间,由于大型观测试验的开展,模式参数化得到迅猛发展。第二代模式大约包含有 20 多个繁简程度不同的土壤—植被—大气传输方案对应的陆面模式。第三代模式开始于 20 世纪 90 年代,植物生理生化和生态学研究取得了显著进展,以及卫星资料在模式中的应用,加速了第三代模式的发展^[40]。

土壤湿度作为与温度、降水具有直接关系的陆地干湿表征要素之一,长期以来是干旱半干旱地区数值模拟研究的难点和重点,研究人员通过大型观测试验、观测站和高分辨率卫星资料等改进陆面模式参数化方案,减小模拟误差,推进模式的发展。目前针对干旱半干旱地区的陆面过程进行模拟使用的模式主要包括 NCAR 的 Noah^[41]、CLM^[42],以及澳大利亚 CABLE^[43],Noah-MP^[44]等陆面模式。

Noah 陆面模型是在全球能量和水循环试验(GEWEX)大陆尺度国际计划(GCIP)背景下,由美国环境预报中心(NCEP)联合其它大陆尺度国际计划(GCIP)合作者共同发展,用于 NCEP 气候和天气预报及同化系统的业务化运行和研究。Noah 陆面模式既可以作为一维单点模式单独运行,也可以耦合在气象模式中用来模拟土壤湿度、土壤温度、雪深、冠层水含量、陆面水分和能量通量等参量。

CLM 是地球系统模式 CESM 中的陆面模式部分,也可用于单独的陆面模式研究。其优点在于对下垫面的分析较为细致。CLM 由 BATS、IAP94 和 LSM 发展而来,是一个单点模式,在应用上可以考虑水平网格内的地表特征差异或不同植被类型下的生态学差异以及不同土壤类型的水力学和热力学特征差异等,按照国际地圈生物圈 IGBP 陆面类型定义来分类,下垫面分为包括湖面和永久湿地在内的 18 种类型。作为一个完善的陆面过程模式模型,CLM 按照不同的物理过程特征,模式结构可以分为 2 部分,地面上与植被覆盖相关的和与地表下土壤中水热传导相关的物理过程。在这 2 个部分中,重要的物理过程包括辐射传输、湍流扩散和土壤的水热传导等。目前,CLM 已经更新到 4.0 版本。

CABLE(CSIRO Atmosphere Biosphere Land Exchange)模式在澳大利亚干旱半干旱地区应用广泛。该模式是澳大利亚气象局正在发展的气候和地球系统模拟器(ACCESS)计划中的陆面过程模式。该模式由澳大利亚气象局联合该国研究单位联邦科学与工业研究组织(CSIRO)和几所大学共同研发,作为综合耦合模式中的陆面过程模拟。其优势在于模式中植被第一生产力由年的碳同化资料决定,碳同化

由植物的呼吸流失量订正得到。单位面积内生物数量的季节增长/减少由分片设计的叶、根和木之间的同化结果决定。

Noah - MP 模式是基于 Noah 陆面模式的基础上改进的模式,主要是在 Noah 陆面模式原有的 11 个物理模块上进行了改进,每个物理模块由原来的一种参数化方案发展成为 2~3 种参数化方案,可针对不同复杂下垫面进行陆面模式的模拟。

通过以上模式对于干旱半干旱地区陆面过程进行模拟取得了一系列的研究成果,其中包括 Zhang 等^[45]通过分析敦煌 2000 年 5~6 月的陆面观测试验(NWC - ALIEX)数据,发现地表和大气之间的总体输送系数和整体感热传输系数受观测站点的建筑影响显著;并通过分析土壤水分、温度和大气湿度等,发现土壤水分的反演形成与土壤表面温度状态有关^[46]。房云龙等^[47]基于观测计划数据,进行陆面过程模拟研究,对陆面过程模式 Common Land Model 中的反照率、粗糙度长度和土壤热力性质 3 个方面的参数进行优化,加深理解干旱地区地气相互作用过程。Gao 等^[48-49]通过对比不同陆面模式在干旱半干旱地区的模拟结果,发现不同模式对干旱半干旱地区的敏感度具有很大差异;根据观测资料,模拟干旱地区地表能量和水分的分配过程^[50-51];Chen 等^[52-53]改进 Noah 陆面模式的粗糙长度参数化方案,进而改进了该地区地表温度的模拟结果;Wen 等^[54]分析了典型下垫面的能量和水分循环特征,对 Noah 陆面模式的参数化方案进行了改进;Dan 等^[55-56]利用生态模式,模拟了干旱地区生态及土壤湿度的变化,推动了干旱半干旱地区模式模拟的发展;Zhang 等^[57]基于中国西北干旱区、青藏高原和东北地区陆面过程的相同点和不同点,进行相关的地表热量-水文过程机制研究。

近年来,随着学科交叉的深入,学科交叉研究的加强,土壤湿度的变化研究成为气候学、生态学、土壤学和水文学等不同学科的重要研究内容。我国干旱半干旱地区下垫面以草地和农田为主,生态环境脆弱,植被覆盖类型和长势变化都与土壤湿度有着密切的关系。干旱半干旱地区农作植被的种植对该地区水分循环与分布都具有一定的影响。例如在干旱地区种植胡麻会导致相对耗水多,种植后土壤由适宜变为严重干旱,在干旱地区自然降水很难充足补充的情况下,致使来年其他作物都难以生长^[58]。干旱半干旱地区,土壤水分亏缺能明显抑制作物根系和地上部生长,显著降低作物的生物量、产量和收获指数。禾谷类作物小麦在灌浆期遇到水分

胁迫时,会引起光合速率降低、灌浆时间缩短、灌浆速率下降、植株老化提前等现象^[59]。在植被类型发生空间分布和时间变化的同时,对干旱半干旱的碳氮分布和循环造成一定的影响。Andrew Neal 等^[60]通过对干旱地区土壤湿度和碳氮分析发现,土壤湿度决定了 CO₂ 通量的时间和空间分布。植被呼吸释放 CO₂ 的主要驱动力来自浅层土壤水分,呼吸率的差异在控制土壤水分后变得更加明显。Wohlfahrt 等^[61]研究发现干旱地区不仅是地球碳平衡的重要成员,更是主要的碳源区和汇区,干旱地区的碳循环已经在土地利用、物种入侵、气候变化和荒漠化的作用下发生了改变^[62-64]。一般干旱环境中,碳通量都表现出了与水分供应的密切联系,研究表明土壤湿度对控制干旱地区碳通量发挥着重要作用^[65]。

3 问题和展望

通过以上的分析发现,随着干旱半干旱地区长期观测站点的建立和空间定点观测计划的开展,积累了大量的土壤湿度观测资料,这些宝贵数据的分析研究促进了土壤湿度与区域气候变化相互关系的认识。不断实施且观测范围不断扩大的各种观测计划以及相关集成研究,为干旱半干旱地区模式参数化的发展提供了前提。但仍存在以下一些问题,主要有:

(1) 目前土壤湿度资料仍难以满足区域和全球尺度气候变化研究的需求。大尺度长序列土壤湿度资料的缺乏仍然是影响全球干旱化研究的重要问题,是改进模式模拟和检测卫星反演土壤湿度的主要障碍。

(2) 模式的下垫面类型与实际情况仍有很大的差异。近十年,由于全球气候变化的影响,下垫面植被的空间分布发生了明显变化,尤其是对小区域的干旱半干旱地区进行土壤湿度模拟,下垫面植被和土壤类型仍然是阻碍模拟土壤湿度能力提高的因素。

(3) 利用模式模拟干旱半干旱地区土壤湿度变化及其对碳氮空间分布和循环特征的影响需要更进一步研究。

由此可见,在未来的研究发展中,拓展干旱半干旱地区土壤湿度研究的思考角度,以目前先进研究探测手段和全新的研究视角,利用已经取得的研究成果,开展不同干旱半干旱地区的碳氮循环变化特征分析,分析气候变化背景下,生态、水文、土壤学等学科交叉领域中土壤湿度的变化特点及在不同系统

中产生的反应。以更新的视角、更多的资料加强探索干旱半干旱地区陆—气相互作用的认识,促进区域气候变化的研究发展。

参考文献:

- [1] 孙倩倩. 东北地区土壤湿度的时空分布特征及其预报方法的研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2013.
- [2] 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.
- [3] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012,12:5391-5398.
- [4] 符淙斌,安芷生,郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I):主要研究成果[J]. 地球科学进展,2005,20(11):1157-1167.
- [5] 马柱国,符淙斌. 中国干旱和半干旱带的10年际演变特征[J]. 地球物理学报,2005,48(3):519-525.
- [6] 符淙斌,马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学,2008,32(4):752-760.
- [7] 尹晗,李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象,2013,31(1):182-193.
- [8] 琚建华,吕俊梅,谢国清,等. MJO和AO持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象,2011,29(4):401-406.
- [9] 吴哲红,詹沛刚,陈贞宏,等. 3种干旱指数对贵州省安顺市历史罕见干旱的评估分析[J]. 干旱气象,2012,30(3):315-322.
- [10] Zhang A, Jia G. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,134:12-23.
- [11] Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975,101(428):193-292.
- [12] Namias J. Surface-atmosphere interactions as fundamental causes of droughts and other climatic fluctuations[J]. *Arid Zone Research*, 1963,20:345-359.
- [13] Shukla J, Mintz Y. The influence of land-surface evaporation on the earth's climate[J]. *Science*, 1982,215:1498-1501.
- [14] Walker J, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977,103(435):29-46.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 胡隐樵,高由禧,王介民,等. 黑河试验(HEIFE)的一些研究成果[J]. 高原气象,1994,13(3):225-236.
- [20] 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]. 地学前缘,2002,9(2):295-306.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 胡隐樵,孙菽芬,郑元润,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(3):281-296.
- [24] Liu H, Wang B, Fu C. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, northeastern China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008,25(5):757-764.
- [25] Liu H, Tu G, Dong W. Three-year changes of surface albedo of degraded grassland and cropland surfaces in a semiarid area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008,53(8):1246-1254.
- [26] 王鹤松,贾根锁,冯锦明,等. 我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化[J]. 大气科学,2010,34(5):882-890.
- [27] Huang J, Zhang W, Zuo J, 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.
- [28] Guan X, Huang J, Guo N, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,26(4):692-700.
- [29] Wang G, Huang J, Guo W, et al. Observation analysis of land-atmosphere interactions over the Loess Plateau of northwest China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010,115(7):1-15.
- [30] Xie J, Huang J, Wang G, et al. The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid Loess Plateau of Northwest China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010,10:8205-8218.
- [31] Zuo J, Huang J, Wang J, et al. Surface turbulent flux measurements over the Loess Plateau for a semi-arid climate change study[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,26(4):679-691.
- [32] Huang J, 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.
- [33] Huang J, 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.
- [34] Huang J, 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.
- [35] Huang J, Minnis P, Yan H, 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.
- [36] 程德瑜. 农业气候学[M]. 北京:气象出版社,1994.
- [37] 符淙斌,董文杰,温刚,等. 全球变化的区域响应和适应[J]. *气象学报*,2003,61(2):245 - 250.
- [38] 张学霞,葛全胜,郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系—基于遥感数据和物候资料的分析[J]. *植物生态学报*,2004,28(4):499 - 506.
- [39] 程善俊,管晓丹,黄建平,等. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应[J]. *干旱气象*,2013,31(4):641 - 649.
- [40] 孙菽芬. 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,2005.
- [41] Mitchell K. The community NOAA land - surface model (LSM) [J]. *User, s Guide, Public Release Version*, 2001, 2(7): 1.
- [42] Dai X P, Zeng X, Dickinson R E. The Common Land Model (CLM): Technical documentation and user's guide[M]. Atlanta:Georgia Inst of Technol, 2001.
- [43] Kowalczyk E A, Wang Y P, Law R M, et al. The CSIRO Atmosphere Biosphere Land Exchange (CABLE) model for use in climate models and as an offline model. CSIRO Marine and Atmospheric Research paper 013, 2006.
- [44] Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah - MP): 1. Model description and evaluation with local - scale measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011,116(D12), doi:10.1029/2010JD015139.
- [45] Zhang Q, Huang R. Water Vapor Exchange Between Soil and Atmosphere over a Gobi Surface Near An Oasis in Summer[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004,43(12):1917 - 1928.
- [46] Zhang Q, Zeng J, Zhang L Y. Characteristics of land surface thermal - hydrologic processes for different regions over North China during prevailing summer monsoon period [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012,55(11):1872 - 1880.
- [47] 房云龙,孙菽芬,李倩,等. 干旱区陆面过程模型参数优化和地气相互作用特征的模拟研究[J]. *大气科学*,2010,34(2):290 - 306.
- [48] Gao Z, Chae N, Kim J, et al. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB₂) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004,109(6):D06102.
- [49] Gao Z. Determination of soil heat flux in a Tibetan short - grass prairie[J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 2005,114(1):165 - 178.
- [50] Yang K, He J, Tang W, et al. On downward shortwave and long-wave radiations over High altitude regions:Observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010,150(1):38 - 46.
- [51] Yang K, Guo X, Wu B. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(1):19 - 28.
- [52] Chen Y, Yang K. Parameterizing thermal roughness length is crucial for dryland energy budget modeling [J]. *GEWEX News*, 2011,21(1):5 - 6.
- [53] Chen Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011,116(20):D20104.
- [54] Wen J, Wei Z, Lv S, et al. Autumn daily characteristics of land surface heat and water exchange over the Loess Plateau mesa in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007,24(2):301 - 310.
- [55] Dan L, Ji J, Li Y. The interactive climate and vegetation along the Pole - Equator belts simulated by a global coupled model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2007,24(2):239 - 249.
- [56] Dan L, Ji J, Liu H. Use of a land surface model to evaluate the observed soil moisture of grassland at the Tongyu reference site [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008,25(6):1073 - 1084.
- [57] Zhang Q, Zeng J, Yao T. Interaction of aerodynamic roughness length and windflow condition and its parameterization over vegetation surface[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012,57(13):1559 - 1567.
- [58] 史晓霞. 黄土高原半干旱区主要作物生育期土壤水分变化[J]. *干旱气象*,2011,29(4):461 - 465.
- [59] 赵鸿,李凤民,熊友才,等. 土壤干旱对作物生长过程和产量影响的研究进展[J]. *干旱气象*,2008,26(3):67 - 71.
- [60] Andrew N. Soil moisture controls on spatial and temporal patterns of carbon dioxide fluxes in drylands[D]. Tucson, Arizona: The university of Arizona, 2012.
- [61] Wohlfahrt G, Fenstermaker L F, Arnone J A. Large annual net ecosystem CO₂ uptake of a Mojave Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2008,14(7):1475 - 1487.
- [62] Conant R T, Paustian K, Elliott E T. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon[J]. *Ecological Applications*, 2001,11(2):343 - 355.
- [63] Bell C, McIntyre N, Cox S, et al. Soil microbial responses to temporal variations of moisture and temperature in a Chihuahuan Desert Grassland[J]. *Microbial Ecology*, 2008,56(1):153 - 167.
- [64] Scott R L, Cable W L, Hultine K R. The ecohydrologic significance of hydraulic redistribution in a semiarid savanna[J]. *Water Resources Research*, 2008,44(2):W02440.
- [65] Thomas C K, Law B E, Irvine J, et al. Seasonal hydrology explains interannual and seasonal variation in carbon and water exchange in a semiarid mature ponderosa pine forest in central Oregon [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009,114(G4):G04006.

Review of Researches on Numerical Simulation of Soil Moisture over the Arid and Semi – arid Region

GUAN Xiaodan, CHENG Shanjun, GUO Ruixia, JI Mingxia

(Key Laboratory for Semi – Arid Climate Change of the Ministry of Education, College for Atmospheric and Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The importance and current situation of researches about soil moisture in arid and semi – arid regions have been summarized and reviewed in this paper, especially about the numerical simulation of soil moisture. The large – scale observation experiments, remote sensing and land surface models are the main traditional methods of studying the variability of soil moisture and they promoted the development of study about soil moisture in the past periods. The foundation of climatic observation sites in drylands carried out the accumulation of the long period of high quality data, which enhanced the testing ability of the retrieval methods of remote sensing and improved the parameterized scheme of land surface models. In recent study, the fields of research has extended from climate system to ecosystem. The carbon and nitrogen cycle and the interaction between them and soil moisture have become a new research perspective, especially in drylands because there was a close relationship between carbon fluxes and soil moisture in drylands, so the carbon and nitrogen cycle became a new research topic in drylands. The combination of traditional and modern methods that takes advantage of long term of observation, remote sensing, land surface model, carbon and nitrogen cycle is becoming the main aspect of conducting the soil moisture research.

Key words: drylands; soil moisture; observation; satellite; numerical simulation

欢迎订阅 2014 年《干旱气象》

《干旱气象》由中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办,是我国干旱气象领域科学研究的专业性学术期刊,反映有关干旱气象监测、预测和评估的最新研究成果,充分展示干旱气象领域整体的研究和应用水平。期刊主要刊载干旱气象及相关领域有一定创造性的学术论文、研究综述、简评,国内外干旱气象发展动态综合评述、学术争鸣以及相关学术活动。具体包括:国内外重大干旱事件分析、全球及干旱区气候变化、干旱气象灾害评估及对策研究、水文、生态与环境、农业与气象、可再生能源开发与利用、地理信息与遥感技术的应用等。本刊还免费刊载干旱气象研究成果、研究报道、学术活动、会议消息等。《干旱气象》已被《中国学术期刊(光盘版 CAJ – CD)》、万方数据 – 数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科技论文统计源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、教育阅读网、台湾华谊线上图书馆等全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强,适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为双月刊,国内外公开发行。2014 年正刊 6 期,每期定价 36 元,全年 216 元。欢迎广大读者订阅,并可以随时邮局款汇购买,款到开正式发票。

编辑部地址:甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部

邮政编码:730020 联系电话:0931 – 4670216 – 2270 电子信箱:ghs_ghqx@sina.com

银行汇款:兰州市工商银行拱星墩分理处 户 名:中国气象局兰州干旱气象研究所

帐 号:2703001509026401376

邮 汇:兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部