

文章编号: 1001-8166(2008)02-0167-07

# 关于黄土高原陆面过程及其观测试验研究<sup>\*</sup>

张强, 王胜

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,  
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**总结了国际上陆面过程及其试验研究的现状,分析了黄土高原陆面过程的特殊性和重要意义,探讨了黄土高原陆面过程试验研究中需要关注的一些重要科学问题。并且,对如何开展黄土高原陆面过程试验研究提出了一些初步思路。

**关键词:**黄土高原;陆面过程;试验研究;科学问题;重要意义

**中图分类号:** P433;P423.2 **文献标识码:** A

随着气候系统概念的提出,气候学的研究对象已从单纯的大气圈发展到了气候系统各圈层,而且强调从气候系统各圈层之间相互作用角度来理解气候变化和气象灾害问题。陆面过程是以地球陆地表面物质、能量和水分的交换与输送为核心内容,对陆地表面物理、化学及生态生理过程的综合反映。它是气候系统各个圈层之间相互联系的纽带,气候系统响应外部强迫和调整内部变化主要通过陆面过程来实现。目前的研究已认识到,无论是气候变化还是大气环流的调整都与陆面过程的贡献分不开,发生在我们身边的暴雨、沙尘暴和冰雹等主要突发性气象灾害大多与陆面过程密切相关,天气和气候突变也大多是由陆面过程的调整 and 变化引起的。因此,陆面过程研究日益受到国际科学界的普遍关注,已经成为目前国际热点科学问题之一<sup>[1]</sup>。

黄土高原是我国十分独特的陆地类型和生态环境区域,地理分布北起阴山、南至秦岭、西抵日月山、东到太行山,地跨我国7个省区,其中包括了陕西和宁夏的大部分地区,甘肃、青海、河南、内蒙和青海的一部分地区,总面积达62.68万km<sup>2</sup>,分布范围十分广泛。黄土厚度一般为80~120m,最大厚度可达180~200m,黄土多呈灰黄色、棕黄色和棕红色,黏

性较差,抵抗风侵蚀和水土流失的能力很弱。它是我国干旱半干旱地区的重要组成部分,也是我国气候分界区和农牧交错带的主要分布区域,这样一片重要而特殊区域的陆面过程对我国生态环境格局的形成以及东亚地区气候和大气环流的影响无疑具有十分重要的作用。另外,黄土高原是迄今为止被发现的历时最长(约22Ma)、最完整的古气候记录的保存者,它的形成和演化过程及其与气候变化的关系多年来一直受到国际地学界的高度关注<sup>[2]</sup>,黄土高原的风尘沉积黄土和古土壤的分布特征直接表征了干旱化过程和风力搬运的动力学机制<sup>[3]</sup>。通过较短尺度(10~100年)的陆面过程观测和数值模拟研究才可以揭示黄土高原环境演化与气候变化相互作用的规律,认识黄土高原气候变化的敏感性和脆弱性这类重大科学问题。所以这一区域陆面过程问题已经日益成为我国迫切需要研究的重要的基础性科学问题之一。

## 1 陆面过程试验研究进展

### 1.1 国际研究进展

在国际上,最初并没有把陆面过程作为一个单独的研究领域来对待,而是在其它一些研究领域涉

\* 收稿日期 2007-10-16,修回日期 2007-12-14.

\* 基金项目:国家自然科学基金项目“西北干旱荒漠区大气边界层厚度特征及其形成机制研究”(编号:40575006)资助。

作者简介:张强(1965-)男,甘肃靖远人,研究员,博士生导师,博士后合作导师,主要从事大气边界层、陆面过程、绿洲气象学和城市大气环境等领域的研究。E-mail: zhangqiang@cm a.gov.cn

及了部分内容,在数值模式中也一般作为下边界层条件来处理。直到 20 世纪 80 年代初,陆面过程的概念才逐渐明确,并且陆续开始实施了“世界气候研究计划/全球水分和能量循环计划”(WCRP/GEWEX)、“国际地圈生物圈计划/水分循环中的生物学作用”(IGBP/BAHC)、“国际地圈生物圈计划/全球变化与陆地生态计划”(IGBP/GCTE)、国际气候变化及其可预测性研究计划(CLIVAR)以及人文影响研究计划(IHDP)等一系列大型研究计划<sup>[5]</sup>,这些大型研究计划都把陆面过程研究作为其主要研究内容之一。

陆面过程野外科学试验研究是陆面过程研究的最基础性也最为重要的方面,它是推动陆面过程研究取得重大进展的主要手段。正因为如此,从 20 世纪 80 年代初开始,国际上科学界在全球具有代表性的气候或生态区相继进行了一系列重要的陆面过程试验研究。据不完全统计,全球陆面过程试验研究总数大约已超过了 50 个,其中最具代表性的有 HAPEX/MOBILMY、FIFE、EFEDA、BOREAS、NOPEX、GAME、EBEX-2000 等试验计划<sup>[6~10]</sup>。其中,最初在法国西南部开展的 HAPEX/MOBILMY 试验<sup>[9]</sup>是国际上最早的陆面过程野外试验研究,该试验研究获得了湿润地区陆面过程特征,并在大、中、小三种尺度陆面过程关系研究方面取得了一定进展,对陆面过程参数化工作也有重要贡献。随后,在美国堪萨斯(Kansas)草原开展的 FIFE<sup>[5]</sup>试验无论在陆面过程研究方法方面,还是在陆面过程机理方面均取得了全面进展,其特殊地位和意义是迄今其它试验研究无可替代的;后来开展的 EFEDA 计划<sup>[10]</sup>则对欧洲半干旱地区陆面过程特征有了一些新的认识。到 20 世纪 90 年代以后,开始由比较单纯的陆面过程研究逐渐转向注重对陆面过程与气候和环境的关系研究,为期 4 年的 BOREAS 计划<sup>[7]</sup>对加拿大北部森林与大气之间相互影响及其与气候变化的关系进行了深入分析;EBEX-2000 试验<sup>[10]</sup>则专门针对地表能量不平衡问题进行了研究。这些试验研究从对局地的土壤—植被—大气相互作用的综合观测入手,借助卫星遥感资料和数值模式由点及面分析研究了陆面过程特征及其参数化关系。并且,观测试验的时段不断延长,观测试验项目也更加丰富,观测试验的系统性和综合性也不断加强。同时,还正在尝试通过对一个区域尺度上陆面过程特征的系统观测试验研究,不断探索建立用于大气数值模式的陆面过程参数化方案。总之,通过最近 20 多年在全球各地进

行的陆面过程野外科学试验研究,大大促进了国际陆面过程的研究进展。这不仅对陆面过程的理解和认识日趋成熟,而且还发展了诸如 BATS、SIB、CLM 等一些应用广泛的陆面过程模式,较大程度改进了 GCM、CCM、RegCM 等模式的模拟能力,初步奠定了国际陆面过程研究的基础。

## 1.2 国内研究现状

我国自 20 世纪 80 年代末开始,也紧跟国际陆面过程研究步伐,相继开展了“黑河地区地气相互作用观测试验研究”(HEIFE)<sup>[11~15]</sup>、“内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用”(IMGRASS)<sup>[16,17]</sup>、“青藏高原大气科学试验(TIPEX)<sup>[18]</sup>”、“亚洲季风实验—青藏高原实验(GAME-Tibet)<sup>[19]</sup>”、“淮河流域水分和能量循环实验(HUBEX)<sup>[20]</sup>”、“西北干旱区陆—气相互作用观测试验研究(NWC-ALIEX)<sup>[21]</sup>”以及在吉林通榆进行的“干旱化和有序人类活动观测试验<sup>[22]</sup>”等一些比较有影响的陆面过程观测试验研究。另外,国家自然科学基金重点项目“地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究<sup>[23]</sup>”、“绿洲系统能量与水分循环过程观测与模拟研究<sup>[24]</sup>”和“城市边界层三维结构研究<sup>[25]</sup>”等不少科研项目都涉及到了很多陆面过程观测试验的内容。在上述众多观测试验研究中,“黑河地区地气相互作用观测试验研究”是我国最早的陆面过程野外科学试验研究,它对干旱区陆面过程特征获得了不少新的认识,开创了我国陆面过程研究的先河;“西北干旱区陆—气相互作用观测试验研究”是一个持续时间比较长的野外观测试验研究,它对极端干旱地区陆面过程参数化及其对我国气候的影响进行了比较深入的观测研究;在青藏高原进行的 2 次观测试验研究“青藏高原大气科学试验”和“亚洲季风实验—青藏高原试验”主要研究了青藏高原特殊大地形条件下陆面过程对东亚甚至全球大气的热力和动力作用及其对我国气候和亚洲季风的影响;“内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用”项目重点研究了典型半干旱区草原下垫面的陆气交换和大气边界层特征,并对草地温室气体(N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>)收支做了定量研究;“干旱化和有序人类活动观测试验”则侧重于农牧交错带有序人类活动对陆面过程特征以及气候的影响研究;“淮河流域水分和能量循环实验”以南方湿润地区陆面过程特征及其对暴雨天气过程的影响为主要研究目标;“地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究”在半湿润的河北平原上进行了复杂下垫面陆面过程观测试验;“绿洲系统能

量与水分循环过程观测与模拟研究”对绿洲陆面过程特征及其与干旱荒漠背景的相互作用进行了比较系统观测分析;“城市边界层三维结构研究”针对典型城市陆面过程的复杂性开展了观测试验研究。总之,国内这10多年坚持不懈的试验研究工作取得了一些很有价值的科学结果,为陆面过程国际陆面过程试验研究做出了积极贡献,也使我国陆面过程试验研究在国际上取得了一定地位。

目前,国际上美国和欧洲在陆面过程研究方面处于领先水平,近些年来日本和澳大利亚等国也有了长足进展。我国陆面过程研究的总体水平还相对比较落后,但在陆面过程观测试验研究方面有一定的特色和实力。我国陆面过程研究需要充分突出黄土高原和青藏高原等在全球比较特殊的陆地类型这一自然优势,寻求对陆面过程的理论突破和原始创新。

## 2 黄土高原陆面过程研究的科学意义

### 2.1 黄土高原独特的气候背景

黄土高原的气候背景比较特殊,它处在东南季风影响区的边缘,是东南湿润季风气候向西北内陆干旱气候过渡带,也是暖温带阔叶落叶林向典型草原和荒漠草原过渡的地带。其年平均降水一般在400 mm左右,这种降水量水平正好处在生态和农作物维持与生长的临界值。所以,该地区生态环境和农业生产对降水量变化的响应十分敏感,是典型的气候变化敏感地带,也是生态和农业脆弱地区。在历史上,我国降水和生态分界线的摆动就主要发生在该地区。在这种特殊气候背景条件下,该地区陆面过程特征受季风进退和强弱的影响很大,陆面过程特征的年际变化远比一般地区更加显著。

### 2.2 黄土高原陆面过程特征的特殊性

黄土高原也是全球独一无二范围较大的典型黄土分布区,其土壤粒隙较大,土壤结构比较松散,组分以碱性为主,与西北干旱区的沙土壤、东北的黑土壤和西南的红土壤等土壤类型相比,土壤属性比较特殊,这种土壤类型的陆面过程参数尤其是地表反照率等热力参数和土壤含水率、土壤张力、饱和水力传导度、土壤持水量等土壤水分特征参数以及植被凋萎含水量等生态特性参数会有较明显的独特性,这必然会形成比较特殊的陆面过程特征。所以该地区陆面过程在全球具有一定的独特性。

黄土高原陆面过程中水分的作用也比较特殊,其土壤水分作为非饱和水资源不仅为自然植被和农

作物随时提供水分,而且也是植被和作物输送和传递养分的主要载体。一般而言,黄土高原200 cm厚度土壤水分容量大约为590~640 mm,具有较好的“土壤水库”作用,土壤水分在陆面小尺度水循环过程中发挥着重要作用。一般情况下,黄土高原农作物生长季节土壤水分均未达最适宜状态,植被蒸腾和地表蒸发过程严重受土壤水分胁迫影响,陆面水分循环过程在很大程度上受土壤水分控制。同时,在黄土高原地区,植被稀少,生态脆弱,自然植被和农作物生长对土壤水分的依赖更加明显,植被生态生理过程与土壤水分过程具有比较特殊的相互作用机制。尤其,自20世纪以来,气候变化使黄土高原200 cm厚度土壤总贮水量总体呈减少趋势,而且100 cm厚度土壤贮水量减少更加明显。土壤水分的这种变化必然会牵扯到陆面热力过程、水分过程和生态生理过程的响应,这无疑会对陆面过程特征产生明显的影响。另外,由于黄土高原降水较少,来自大气和土壤的水汽在夜间冷却凝结被表面土壤吸收的部分——“露水”和“蒸馏水”的贡献可能会在陆面小尺度水分循环中凸显其重要性。一般,影响露水形成的因素比较复杂,气候背景、地表性质、近地层大气湿度、水平风速、大气温度层结、地表温度等与水汽分布、水分输送、凝结相变过程有关的因子都可能与露水的形成有关。陈满祥等<sup>[26]</sup>根据水分平衡结果初步推算,在年平均降水量为100 mm的甘肃民勤,其表面土壤获得的露水可能在100~200 mm左右,竟然超过了自然降水量,这是相当可观的水分贡献量。多年来以色列和德国等国科学家一直在探索干旱地区露水开发利用技术,并且取得了一定成效。黄土高原的温度日较差一般与民勤大体相近,而年平均降水量却在400 mm左右,我们可以由此推断在黄土高原地区露水的总量可能会更大。虽然,对大多数降水丰沛的湿润地区而言,露水对当地农作物及生态环境的意义也许并不太明显。但对自然降水量正巧处在生态和农作物维持与生长临界水平的黄土高原地区来说其意义却非同一般。所以,露水可能在黄土高原陆面水分循环过程中占有独特地位。

### 2.3 地理环境对黄土高原陆面过程的影响

黄土高原所处的地理环境也比较特殊。黄土高原气候大部分地区受青藏高原大地形影响很显著,青藏高原地形产生的东北侧下沉气流正好落在该区域,在该区域的陇中一带形成一条东西分布的干舌,这种系统性下沉气流及其形成的特殊气候和环境无

疑会对该地区陆面过程特征产生一定影响。可见,与其它地区相比,由于黄土高原陆面过程受周边环境因素影响比较特殊,其陆面过程特征也可能会表现出某些独有的特点。

#### 2.4 人类活动对黄土高原陆面过程的影响

黄土高原地区是一个陆面过程受人类活动影响比较显著的区域。在历史上,该地区土地的开垦和过度放牧等活动就不断改变着土地覆盖格局,尤其是近几十年人类对土地覆盖格局的改变日趋明显。同时,该地区400 mm左右的年降水量正好具备了采取雨水集流等降水资源利用措施的气候基础,具有通过改变自然降水的地表分配方式使原本生态和农业效益低下的自然降水产生比较显著生态和农业效益的气候背景,所以对自然降水地表分配方式改变的行为已越来越广泛。另外,目前在黄土高原地区正在实施以土地利用模式和产业结构调整以及生态植被恢复等为主要内容的西部大开发工程,这无疑会改变区域内土壤、植被、大气的许多物理属性和物理过程。从物理本质上讲,无论是土地利用模式的调整还是自然降水地表分配方式的改变实际上都是人类对陆面过程的部分干预,而且这种干预可能隐含着比较重要的生态学和气候学意义。

#### 2.5 研究黄土高原陆面过程的现实意义

黄土高原也是我国气象和环境灾害频发地区,几乎十年九旱,沙尘暴、冰雹、局地暴雨等天气灾害频发。同时,黄土高原的地质构造、地形和地貌比较特殊,沟壑纵横分布,水土流失严重,生态退化明显,常常会由暴雨引发山洪、泥石流等次生自然灾害。气象和环境灾害对当地脆弱的生态和农业生产系统以及薄弱的社会经济基础构成了严重威胁,对人民生命财产造成的损失也十分巨大,占到GDP的3%~6%左右,明显高于全国平均值1%~3%,严重制约了该区域国民经济的发展和社会生活的进步。并且,已经有研究表明<sup>[27]</sup>,该地区气候变暖对生态格局和农业结构的影响也十分严重,如何应对和适应气候变暖的影响已经成为该地区无法回避的问题。陆面过程往往是气象和环境灾害形成以及气候变化影响的关键性环节。所以对该地区陆面过程研究也是目前事关该地区社会经济发展的一项十分迫切的研究工作。

### 3 对黄土高原陆面过程的初步研究

截止目前,在我国黄土高原地区,已经初步开展了一些涉及陆面过程的观测试验工作。其中,中

国气象局兰州干旱气象研究所在定西建立的干旱生态综合观测站,已经开展了长达10多年的相关观测工作;中国科学院水土保持研究所在长武、杨凌、延安等多点开展相关观测工作,已经积累了5年以上观测资料;中国林业科学研究院和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在毛乌素沙地也开展了较长时间的观测试验研究工作。最近,中国科学院寒区旱区环境研究所和兰州大学又分别在榆中和平凉等地开展了相关的观测试验。但这些观测试验工作只是涉及了部分陆面过程的观测内容,还没有开展过专门针对陆面过程的综合观测试验。而且,目前的观测手段也相对较单一,与卫星遥感和数值模拟结合还很不充分。

在野外观测试验工作的基础上,国内外科学家也从不同方面对黄土高原陆面过程做了一些初步的研究工作。如在土壤物理性质<sup>[28~30]</sup>、土壤水分循环特征<sup>[31~34]</sup>及土壤水分利用模拟研究方面<sup>[35,36]</sup>取得了一些很不错的结果。在黄土高原作物生长的蒸散特征方面也有不少研究成果<sup>[37~40]</sup>。另外,李凤民等<sup>[41]</sup>对黄土高原土壤微生物生物量C进行了研究,李斌等<sup>[42]</sup>用统计分析方法研究了黄土高原植被与气候的关系,张强等<sup>[43]</sup>对陇中黄土高原定西地区的陆面过程特征做了一些初步分析。不过,以往对黄土高原陆面过程的研究几乎很少涉及地表能量平衡和循环特征,也缺乏把土壤水分与大气水分有机联系起来的分析工作,对大气—植被—土壤相互作用机理也重视不足。总体上来说,该领域研究工作比较分散和初步,远远不够深入和系统。尤其,至今还没有在该地区开展过综合性陆面过程野外科学试验研究,陆面过程参数化工作基本还是空白。

### 4 我国陆面过程研究的局限性

就目前国际陆面过程研究进展来看,我国陆面过程观测试验研究还存在一些明显的局限性。首先,我国综合性的陆面过程野外科学试验的空间布局还缺乏全面性。虽然,我国已经在青藏高原、极端干旱地区、干旱荒漠地区、半干旱草原地区、农牧交错带、南方暴雨区等典型区域开展了一系列以陆面过程为主的观测试验研究,但在黄土高原和四川盆地等一些典型地区还十分缺乏综合性的陆面过程野外科学试验研究工作。特别是像黄土高原这样在全球独特的大范围陆地类型区域,陆面过程试验研究的缺乏严重影响了国际陆面过程野外科学试验研究的系统性。其次,虽然以往观测试验研究在一些代



代表性观测区域获得了对陆面过程的局地观测结果,但很少有试验研究把这些陆面过程的局地观测结果有效转化为数值模式的陆面过程参数化方案或卫星遥感反演模式中需要的参数。所以,在目前国际上流行的陆面过程模式或卫星遥感反演方法中很少有我国陆面过程观测试验结果的贡献。第三,复杂下垫面问题在目前陆面过程观测试验中还没有得到很好的解决,这使得以往取得的有些陆面过程观测试验结果缺乏足够的代表性和可靠性。第四,大多数陆面过程观测试验的手段还比较单一,缺乏与卫星遥感反演和数值模拟等方法的合理配合,影响了对陆面过程的深入认识和对理论问题的探索。目前许多西方发达国家在开展陆面过程观测试验时,已经充分与卫星遥感和数值模式相结合来研究陆面过程空间特征及对天气、气候的影响。第五,多数观测试验研究主要偏重于热力和动力过程,而对水分过程和生态生理过程重视不够。特别是,由于对陆面水分过程的研究不足,极大制约了数值模式对降水的模拟能力。第六,以往陆面过程观测试验大多仅在较短时段内开展有效的野外观测试验,往往遗漏了降水和沙尘暴等小概率天气事件对陆面能量和水分循环的影响。IGBP/BAHC在第一阶段的工作总结中特别强调了长时间、连续的陆面过程观测资料序列对提高GCM模式预测能力的必要性。第七,在以往陆面过程观测试验中对陆面水分平衡的观测还不够完善,大多数时候并没有考虑降水露水的贡献,影响了对水分平衡的客观估计和大气水分循环的模拟能力<sup>[44]</sup>。而对降水露水的估算需要系统完善的大气和土壤水分观测资料,而这正是以往观测试验研究比较薄弱的地方。

## 5 讨论

正是由于我国陆面过程科学试验研究还存在这许多明显的局限性,大大影响了对我国陆面过程特征比较全面系统的认识以及对共性规律的揭示和基础理论的探索,也限制了陆面过程观测试验结果在改进数值模式方面的作用。至今在国际上比较流行的陆面过程模式中还很少引用我国科学试验研究获得的陆面过程参数化结果。

开展黄土高原陆面过程科学试验研究需要最大限度克服以往观测试验研究的不足,更要以综合性野外观测试验与卫星遥感反演和数值模拟等方法的合理配合为主要手段,以获取黄土高原陆面过程的定量认识和区域大气数值模式的陆面过程参数化方

案为主要目标,以突出研究黄土高原土壤水和降水露水对表面水分平衡的贡献以及植被生态生理过程对水分变化的响应为主要特色。通过该科学试验研究的开展,有可能会实现对陆面过程关键科学问题的理论或认识突破,填补我国黄土高原地区综合性陆面过程科学试验研究的空白。

## 参考文献(References):

- [1] World Meteorological Organization(WMO). Report of Third Session of JSC Working Group on Land Surface Processes and Climate [R]. Manhatan, Karnsas, 29 June-3 July 1987, WCRP-8, WMO/TD-No. 232.
- [2] Sun Donghua, Shaw J, An Zhisheng, et al. Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2Ma Late Cenozoic eolian sediments from the Chinese Loess Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25: 85-88.
- [3] 安芷生, 王苏民, 吴锡浩, 等. 中国黄土高原风积证据: 晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动 [J]. 中国科学 D 辑, 1998, 28(6): 481-490.
- [4] IGBP Secretariat. Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle: The Operational Plan [R]. IGBP Report No. 27, 1993.
- [5] 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.
- [6] Bolle H J, André J C, Arrue, et al. EFEDA-European field experiment in a desertification-threatened area [J]. Annual Geophysics, 1993, 11(2): 173-189.
- [7] Piers Sellers, Forrest Hall, K Jon Ranson, et al. The boreal ecosystem Atmosphere Study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(9): 1549-1577.
- [8] Halldin S, Gottschalk L, Griend van de, et al. NOPEX—A northern hemisphere climate processes land surface experiment [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212(1): 172-187.
- [9] Yamazaki N, Kalahari H, Yatagai A, et al. Current status of GAME reanalysis project and some preliminary results [C]. International GAME/HUBEX Workshop. Sapporo: 12-14 September, 2000: 24-29.
- [10] Steven P Oncley, Foken T, Vogt R, et al. The Energy Balance Experiment EBEX-2000 [C]. 15th Conference on Boundary Layer and Turbulence. Wageningen: American Meteorology Society, 2002: 1-4.
- [11] Andre J C. Hapex-Mobilmy [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1988, 68: 138-144.
- [12] Hu Yinqiao, Yang Xuanli, Zhang Qiang, et al. The characters of energy budget on the Gobi and desert surface in Hexi region [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 5(1): 82-91.
- [13] Wang Jiemin, Liu Xiaohu, Ma Yaomin. Turbulence structure characteristics in the surface layer of HEIFE Gobi area [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 5(1): 92-104.
- [14] Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. Some achievements

- in scientific research during HEIFE [J]. *Plateau Meteorology*, 1994, 13(3): 225-236. [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.]
- [15] Zhang Qiang, Hu Yingqiao. The flux-profile relationship under the condition of heat advection over moist surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 19: 8-20.
- [16] Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Study on soil-vegetation-atmosphere interaction in Inner-Mongolia semi-arid grassland [J]. *Earth Science Frontier*, 2002, 9(2): 295-306. [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.]
- [17] Lü Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, et al. Climate-ecology interaction in Inner Mongolia semi-arid grassland—Preliminary results of IMGRASS Project [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 307-320. [吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 内蒙古半干旱草原气候—生态相互作用问题——IMGRASS 计划初步结果[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 307-320.]
- [18] Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. Turbulent characteristics in the surface layer over Garze area in Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(3): 289-300. [刘辉志, 洪钟祥. 青藏高原改则地区近地层湍流特征[J]. 大气科学, 2000, 24(3): 289-300.]
- [19] Wang Jiem in. Land surface process experiment and interaction study in China—from HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 280-294. [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.]
- [20] Zhang Guangzhi, Xu Xiangde, Wang Jizhi. A dynamic study on PBL characteristics by using 98 HUBEX and TIPEX data [C]. *Proceedings of the 2nd Session of the International Workshop on TIPEXGAME/Tibet*. Kunming, 2000: 58-60.
- [21] Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wei Guoan, et al. NW C-ALIEX and its research advances [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 427-441. [张强, 黄荣辉, 卫国安, 等. 西北干旱区陆面过程观测野外试验(NW C-ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 427-441.]
- [22] Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu Jilin province [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(2): 378-389. [刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 378-389.]
- [23] Hu Fei, Cheng Xueling, Zhao Songnian, et al. Hard state of the urban canopy layer turbulence and its self-similar multiplicative cascade models [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(suppl.): 66-72. [胡非, 程雪玲, 赵松年, 等. 城市冠层中温度脉动的硬湍流特性和相似性级串模型[J]. 中国科学:D 辑, 2005, 35(增刊): 66-72.]
- [24] Lü Shihua, Luo Siqiong. Numerical simulation of boundary layer structure in desert-oasis [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(4): 465-470. [吕世华, 罗斯琼. 沙漠—绿洲大气边界层结构的数值模拟[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 465-470.]
- [25] Chen Yan, Jiang Weimei, Xu Min, et al. The flux-profile relationship under the condition of heat advection over moist surface [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(2): 265-274. [陈燕, 蒋维楣, 徐敏, 等. 城市规划中绿化布局对区域气象环境影响的数值试验研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 265-274.]
- [26] Wang Futang. Impact of climate change on cropping system and its implication for agriculture in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11: 407-415.
- [27] Chen Manxiang. *Hydrology & Water Resources* [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2000: 57. [陈满祥. 水文水资源论文集[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2000: 57.]
- [28] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64: 77-96.
- [29] Shulan Zhang, Xueyun Yang, Martin Wiss, et al. Changes in physical properties of a loess soil in China following two long-term fertilization regimes [J]. *Geoderma*, 2006, 136: 579-587.
- [30] Shulan Zhang, Harald Grip, Lars Lovdahl. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 90: 117-125.
- [31] Xu Ximin, Chen Haibin, Yuan Huanying. The research of artificial forestland on soil water in the semi-arid of the loess plateau [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(5): 60-64. [许喜明, 陈海滨, 原焕英. 黄土高原半干旱区人工林地土壤水分环境的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 60-64.]
- [32] Sun Changzhong, Huang Baolong, Chen Haibin, et al. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the loess plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(3): 7-14. [孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7-14.]
- [33] Wang Jian, Wu Faqi, Meng Qinqian. Desiccation of deep soil layer and soil water cycle characteristics on the loess plateau [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(5): 65-68. [王健, 吴发启, 孟秦倩. 黄土高原丘陵沟壑区坡面果园的土壤水分特征分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 65-68.]
- [34] Li Yushan. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91-100. [李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91-100.]
- [35] Shulan Zhang, Lars Lovdahl, Harald Grip. Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese loess plateau [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93: 283-298.
- [36] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the loess plateau area of China [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198: 263-268.

- [37] Kimura R, Bai L, Fan J et al. Evapo-transpiration estimation over the river basin of the loess plateau of China based on remote sensing[J]. *Journal of Environment* 2007, 68: 53-65.
- [38] Zhongkui Xie, Yajun Wang, Wenlan Jiang et al. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China[J]. *Agricultural Water Management* 2006, 81: 173-184.
- [39] Reiji Kimura, Jun Fan, Xingchang Zhang et al. Evapotranspiration over the grassland field in the Liudaogou basin of the Loess plateau, China[J]. *Acta Oecologica* 2006, 29: 45-53.
- [40] Gan Zhuoting, Liu Wenzhao. Evapotranspiration of winter wheat field on loess plateau tableland [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 435-438. [甘卓亭, 刘文兆. 黄土塬区麦田蒸散特征[J]. *应用生态学报* 2006, 17(8): 435-438.]
- [41] Li Feng-min, Qiu-Hua Song, Patrick K. Jjemba et al. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro-ecosystem [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 2004, 36: 893-902.
- [42] Li Bin, Zhang Jintun. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in loess plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2003, 23(1): 82-89. [李斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系[J]. *生态学报* 2003, 23(1): 82-89.]
- [43] Yang Xingguo, Zhang Qiang, Wang Runyuan, et al. The characteristics of surface radiation and energy balance in Loess plateau of middle part Gansu in winter [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(6): 828-834. [杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究[J]. *高原气象* 2004, 23(6): 828-834.]
- [44] Zhang Qiang, Huang Ronghui. 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.

## On Land Surface Processes and Its Experimental Study in Chinese Loess Plateau

ZHANG Qiang, WANG Sheng

(Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Change and Disaster of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In this paper, international research advances in land surface processes and its experimental study are summed up, the particularities and important meanings of land surface processes in China's loess plateau are analyzed, some key scientific problems on the experimental study of land surface processes in China's loess plateau are discussed. Finally, some preliminary ideas, by which the experimental study of land surface processes in China's loess plateau will be implemented in future, are presented.

**Key words:** China's loess plateau; Land surface processes; Experimental study; Scientific problems; Important meaning.