

曾剑, 张强, 王胜. 2011. 中国北方不同气候区晴天陆面过程区域特征差异 [J]. 大气科学, 35 (3): 483 - 494. Zeng Jian, Zhang Qiang, Wang Sheng. 2011. Regional differences in the characteristics of clear-sky land surface processes in distinct climatic zones over Northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 483 - 494.

中国北方不同气候区晴天陆面过程区域特征差异

曾剑^{1, 2} 张强^{1, 2, 3} 王胜¹

1 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, 兰州 730020

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 甘肃省气象局, 兰州 730020

摘 要 采用 2008 年 7~9 月份观测的中国干旱—半干旱区实验观测协同与集成研究资料, 将我国北方干旱—半干旱区根据气候类型和地理位置划分为西北干旱区、黄土高原区和东北冷区三个区域, 分析了干旱—半干旱区陆面热量平衡和辐射平衡日变化的区域差异。结果显示: 不同气候区域的地表辐射和能量过程差异明显, 而这种差异主要源于大气和土壤中可利用水分的不同, 因而区域差异的分析也可归结于探讨陆面辐射和能量过程对不同强弱干旱气候的响应特征。在辐射平衡的比较方面: 晴天的总辐射在各区域呈现随纬度上升而递减的趋势; 反射辐射在东北冷区最小而在西北干旱区最大; 大气逆辐射在东北冷区最明显, 在黄土高原区最弱; 地表长波辐射在西北干旱区最强而在东北冷区最弱。在能量平衡方面: 西北干旱区的地表可利用能量的 70% 左右用于加热大气, 小部分消耗于蒸发和加热土壤; 黄土高原区可利用能量中用于加热大气的能量占 30%, 蒸发水分的消耗能量约 50%; 东北冷区接近一半的可利用能量用于蒸发, 另一半的大部分消耗于加热大气。

关键词 地表辐射平衡 地表能量平衡 区域差异 干旱—半干旱区

文章编号 1006 - 9895 (2011) 03 - 0483 - 12 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Regional Differences in the Characteristics of Clear-Sky Land Surface Processes in Distinct Climatic Zones over Northern China

ZENG Jian^{1, 2}, ZHANG Qiang^{1, 2, 3}, and WANG Sheng¹

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

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081*

3 *Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730020*

Abstract By dividing the semi-arid and arid regions into three parts: arid region in the northwest, Loess Plateau, and cold region in the northeast, the regional differences in the diurnal variation of land surface radiation and energy processes in the semi-arid and arid regions are investigated using the data measured during July and September, 2008, provided by the Experimental Co-observation and Integral Research in the Semi-arid and Arid Regions over northern China. The results show that pronounced regional differences in land surface radiation and energy processes are seen in distinct climatic zones and the differences are primarily attributed to the regional differences in available

收稿日期 2010-04-28, 2010-09-29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40830597

作者简介 曾剑, 男, 硕士研究生, 主要从事陆面过程、气候、陆—气耦合等研究。E-mail: libiecho@163.com

water either in land or in the atmosphere. Consequently, the studies of the regional differences in land surface processes to a large extent are the analyses on how the arid climate for different intensities affects the land surface processes. For radiation components, downward short-wave radiation decreases with the latitude increasing, and the upward short-wave radiation is largest in the arid region and smallest in the cold region. The downward long-wave radiation is strongest in the cold region and weakest in the Loess Plateau while the upward long-wave radiation is obvious in the arid region and weak in the cold region. For energy components, 70% of the land surface available energy is consumed by heating the atmosphere in the arid region, and the remaining 30% is used for evaporation and heating the soil. In the Loess Plateau, however, only 30% of energy goes to atmosphere heating and 50% is lost to evaporation. Roughly half the energy is lost to evaporation in the cold region, and most of the other half is used for heating atmosphere.

Key words land surface radiation balance, land surface energy balance, regional differences, semi-arid and arid regions

1 引言

地表热量平衡和辐射平衡是陆面过程和陆—气相互作用研究的主要内容,它描述地表和大气的能量交换过程和耦合过程,是联系陆地和大气的能量和物质纽带。从陆—气系统的观点,地表热量和辐射过程是整个系统最中先运行的部分,在系统中充当扰(驱)动源(WMO, 1987)。因此,对这些过程的研究从某种程度上是对陆—气系统的触发机制的研究。自然因素如太阳活动和生态环境的变化以及人类活动对天气气候的影响最终都是通过地表能量和辐射过程来实现,同时它们也是通过地表能量和辐射过程的变化对气候变化作出反应和调整。也就是说,地表能量和辐射过程综合反映了地表的各物理变量的变化,作用于大气,改变局地甚至更大尺度的环流,因而地表能量和辐射过程是理解气候变化和气候异常的重要方面。基于此,可以这样理解气候变化:环流是直接原因,而陆面过程及其与大气的耦合却是根本性的原因。因此, Dickinson (1995) 评价陆面过程是改善数值模式模拟能力的两个重要方面之一。随着对地表能量和辐射过程重要性的深刻认识,各种致力于准确描述和参数化陆面能量和辐射平衡的研究已经开展和处于发展中。但随着研究的深入,参数化方面遇到了极大的挑战,目前陆面过程能量和辐射平衡参数化的估算效果并不理想(Henderson-Sellers et al., 1993),另外,能量不闭合度等方面也需要进一步的探讨,解决这些问题也并不如预想中的简单(张强, 1995)。

全球的干旱荒漠地区(包括沙漠、干旱地区和半干旱地区)的面积较大,约占陆地的 25%。在我

国,干旱和半干旱地区甚至有更高的比率。据胡隐樵和张强(2002)估计,这个比率达 40%,而这些区域主要分布于我国的北方,几乎占据北方全部的陆面面积。由于干旱和半干旱地区与湿润和半湿润地区在土壤属性、植被覆盖度、下垫面均匀性以及气候背景等方面差异很大,其陆面能量和辐射过程自然明显异于南方湿润地区。干旱和半干旱是北方的典型气候状态,这是陆—气耦合的结果,因而对陆面能量和辐射过程的研究有重要的意义:一方面可以深刻理解干旱和半干旱气候的形成和维持以及东亚季风活动机理,另一方面也可以为北方地区在区域尺度上的陆面过程参数化提供必要的准备以及改善模式的模拟能力,最终有利于天气预报准确性的提升。在过去的 20 年中,不少陆面过程试验已经在这些地区开展,如黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)(Andre, 1988; Hu et al., 1992; Wang et al., 1992; 胡隐樵等, 1994; Zhang and Hu, 1995),内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用(IMGRASS)(吕达仁等, 2002a, 2002b),西北干旱区陆—气相互作用观测试验研究(NWC-ALIEX)(张强等, 2005),华北平原地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究(胡非等, 2005),西北河西走廊干旱区绿洲系统能量与水分循环过程观测与模拟研究(吕世华和罗斯琼, 2005)。以上的试验以及正在开展的黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)(张强和王胜, 2007, 2008; 张强等, 2009)建立了不少的观测站点,可以利用部分这些站点所获得的数据进行陆面过程的区域特征和差异分析。

但是,我国北方干旱—半干旱地区面积广阔,

各个地区的干旱程度并不一样，因而气候也有一定的差异。已往的研究只是选某个地区的一个或几个站进行能量和辐射过程的分析，代表性不强，说服力不够。更合理的方法是从整体的角度出发，将北方干旱区根据干旱程度和气候类型划分为适当的区域进行比较研究，以求更具体和更客观地理解干旱区和半干旱区的能量和辐射平衡特征，理解干旱气候对陆面过程的影响。

本文利用中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究的资料，比较分析夏季晴天西北干旱区、黄土高原区和东北冷区的能量和辐射过程的差异，从而认识我国北方干旱一半干旱区陆面过程的区域特征差异，也可以为下一步陆面过程对不同干旱程度气候响应的研究提供必要的基础。

2 观测实验和数据

“中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究”是由中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室和季风亚洲全球变化区域集成研究计划(MAIRS)共同承办的数据分享平台。过去三十年，在我国干旱/半干旱地区由不同项目、不同部门所建立的实验观测站多达40多个，这些站针对不同的研究目的积累了大量的实验数据。尽管这些站的建立为研究这个地区的环境变化问题奠定了数据基础，也取得了重要的研究进展，但由于普遍缺乏严格的数据质量评估和控制方案、规范的仪器维护和标定办法以及数据汇交和共享体系，目前这些分散在单个站点的观测数据在可用性、可比性、连续性、共享性等方面普遍存较严重的问题，制约着数据的产出和使用，数据不能共享也造成了国家科技投入的巨大浪费。这种单部门、单学科的研究状况不可能从气候环境系统整体相互作用的角度和更高的层次认识该地区气候和水资源的变化和预测问题，也难以产生具有重大国际影响的科学成果。针对以上问题，由中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室牵头，在“973”项目“北方干旱化与人类适应”的支持下，在自愿参加、统一观测规范、统一仪器标定和统一的数据质量的准则下，实施了“中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究(简称协同观测实验)”的预实验，通过两年来的预实验取得了一批宝贵的观测数据，这些数据的获取将为区域地球系统模式参数化方案的确定和深入

了解干旱一半干旱区地气相互作用机理提供了资料基础。

目前共有18个干旱一半干旱区的观测站加入到协同观测实验，主要分布在西北干旱区、黄土高原地区和东北冷区。这些观测站具体为：阿克苏、临泽、大野口、张掖、盈科、阿柔、榆中、兴隆山、定西、玛曲、长武、安塞、东苏、密云、奈曼、锦州和通榆，其中通榆站包括农田和草地站。由于分布的空间跨度大，观测站的气候背景有比较明显的差异。这些站的下垫面涵盖丰富多样，包括裸土、戈壁、草地、湿地、农田、沙漠以及绿洲。另外，由于我国地势从东到西明显升高，这些站点海拔在25~3500 m之间，其中西北区的站点海拔较高，东北冷区的海拔最低。各个站的观测项目包括梯度观测和通量观测，其中梯度观测包括地面气压、降水、近地面层风向风速和温度及湿度廓线、地表辐射平衡以及土壤温度和湿度廓线观测；通量观测主要包括近地面层感热/潜热通量及CO₂通量等观测。但各个站的观测项目也有少许差别，临泽、奈曼和张掖3个站没有降水观测，玛曲站没有地表热量通量观测，安塞站没有地表辐射分量、热量通量、土壤湿度观测，阿克苏站在观测期间由于仪器故障而没有任何观测。各站使用的仪器基本一致，如水汽和CO₂分析仪(Li-Cor, Li-7500)、3D超声风速仪(Campbell, CSAT3)、空气温度和湿度计(HMP45C)、辐射计(Kipp&Zonen, CNR-1; Eppley, PSP and PIR)、雨量计(TE525; RMYoung 52202/52203)、土壤热通量板(REBS, HFT-3; HFP01 probe)、土壤湿度计(Campbell, CS616)和土壤温度计(Campbell, 107 or 109 probe)。这些仪器都经过统一标定和得到规范的仪器维护，数据经过统一和严格的质量评估和控制。由于这些站点设立的初衷各异，仪器放置的高度和深度不尽相同，而且某些站选址存在一定的区域代表性的问题。更多的信息可以在项目主页上获取(<http://observation.tea.ac.cn> [2010-12-01])。

为了探讨分析能量和辐射平衡的区域差异，本文按气候类型和地理位置将我国北方干旱一半干旱地区划分为三个区域并分别记为：I区为西北干旱区，II区为黄土高原区，III区为东北冷区(如图1a所示)。利用气候中心整理的1951年~2008年的月平均温度和降水资料，按照马柱国等(2005)以

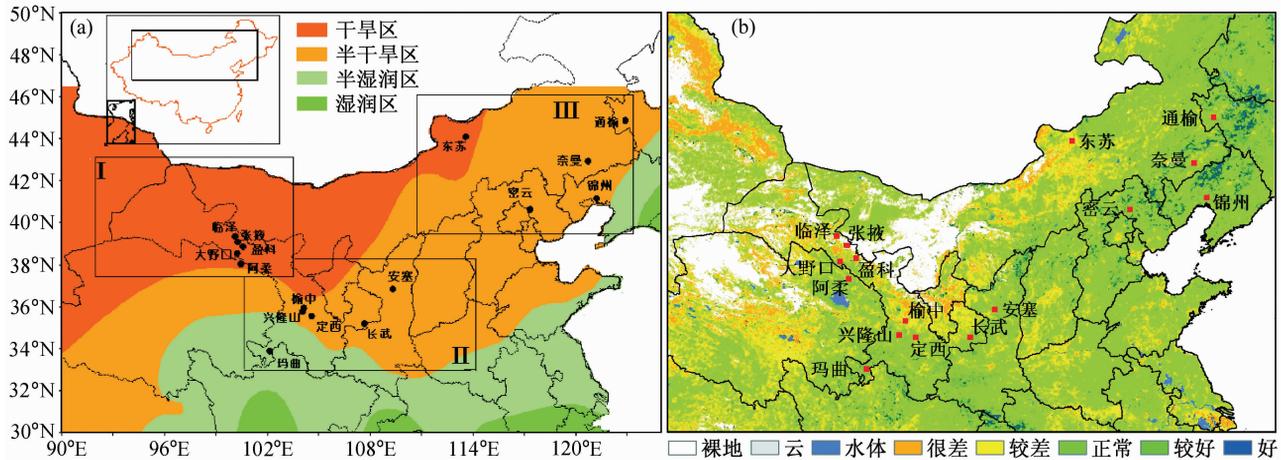


图1 气候区和研究分区 (a) 以及生态质量指数 (b)

Fig. 1 (a) Climatic zones and (b) EQI over northern China

及马柱国和符淙斌 (2005) 改进后的 Thornthwaite (1948) 潜在蒸散估计方法, 计算得到了如图 1a 的气候类型分布: 可以看到 I 区基本处于干旱气候区, II 区和 III 区处于半干旱区。考虑到区域代表性的问题, 从每个区中选择区域典型气候和下垫面代表站点分析, 其中 I 区选取了张掖站, 该站地面主要为沙土, 有少量沙生植物, 基本代表了干旱区下垫面特征。II 区选取榆中站和安塞站, 榆中站位于开阔平坦的小山顶, 下垫面属于典型的黄土高原地貌, 基本为原生植被覆盖, 植被主要为低矮草地植被群落; 安塞站位于黄土高原中部, 下垫面主要是矮草覆盖。III 区选取了密云站、奈曼站及通榆草地站和农田站, 密云站下垫面主要为园地 (李子树、苹果树), 耕地 (玉米/裸地); 奈曼站地表覆盖度为 65%, 植被高度 30~50 cm; 通榆草原站建立在半干旱区的草原, 土壤主要为风沙土、淡黑钙土等, 植被主要为半干旱气候条件下的草原植被; 通榆农田站建立在半干旱区的农田, 土壤主要为风沙土、淡黑钙土等, 生长季主要为玉米 (最高可达 1.8 m 左右) 和大豆; 这些基本代表了东北农田区和草原区下垫面特征。图 1b 是 2008 年平均的生态质量指数 (Ecological Quality Index, 简称 EQI) 的空间分布 (中国环境监测总站, 2004)。EQI 用于衡量植被总体生长状况和生态环境质量, 评价植被生态气象等级。生态质量等级标准划分为: 很好: $EQI \geq 50$; 较好: $25 \leq EQI < 50$; 正常: $-25 \leq EQI < 25$; 较差: $-50 \leq EQI < -25$; 很差: $EQI < -50$ 。图 1b 显示 III 区东北冷区植被覆盖最好, 其次是 II 区

黄土高原区, I 区西北干旱区的植被覆盖最稀疏。本文中考察的范围纬度跨度大, 为了便于比较, 各区的时间已从北京时间转换为当地时间。文中采用的微气象数据是 2008 年 7 月 1 日~9 月 1 日的观测资料, 而且本文只考虑晴天的平均情况。

3 陆面过程区域特征差异

土壤湿度和温度是陆面过程研究中十分重要的变量, 它联系着地表辐射过程和能量过程, 直接影响地表能量分配。在此, 为了简明说明问题, 只考虑土壤表层 5 cm 处和土壤深层 50 cm 处的温度和湿度。图 2a 描述了土壤深度 5 cm 处的平均温度日变化, 各个地区几乎一致地在下午 16 时 (当地时间, 下同) 的土壤温度最高, 夜间土壤温度随时间逐渐下降, 在早晨 08 时附近土壤温度最低。这跟土壤的辐射冷却和蒸发冷却有关, 也间接地暗示来自太阳的能量在早晨 06~08 时还不足够弥补该层土壤损失的能量。在地区差异方面, 西北干旱区的白天和夜间的表层土壤温度在三个地区中最高, 其次是黄土高原, 但它的夜间土壤温度比东北冷区的低, 东北冷区的白天土壤温度最低。另外值得注意的就是表层土壤温度日变化的振幅, 西北干旱区和黄土高原区最高和最低土壤温度相差约 10°C , 而东北冷区的日变化幅度只是 5°C 。这跟土壤的含水量和植被覆盖程度有关 (Gao et al., 2008)。图 2b 是土壤深度 50 cm 处的温度日变化。与表层相比该层日变化不明显, 且量值变小, 各区的冷热排列未发生变化。图 2c 和图 2d 分别是土壤表层和深层湿度

的日变化，与土壤温度相比振幅变化小。不同于一般情况，东北冷区的深层土壤湿度的日变化比表层的更明显，这主要是来自于通榆站的影响。一方面由于通榆的草原站和农田站都出现了这种情况，因而可以排除灌溉的影响；另一方面很可能是受重新挖土埋仪器造成影响，尽管浅层土壤湿度变化比较正常，但也可能跟这个地区的土壤属性（风沙土和淡黑钙土）或者是动物洞穴有关。在区域比较方面，土壤湿度由西北干旱区、黄土高原区到东北冷区逐渐升高，这跟各区植被的覆盖状况和气候的干

湿程度对应。

3.1 地表辐射过程的区域特征差异

一般而言，在全球中高纬地区太阳总辐射随着纬度的上升而递减，随着海拔增加而增加，但具体到局部地区，有些因子如大气中的水汽和云量或者气溶胶等对总辐射的削弱效应会发生变化。在我国北方的干旱一半干旱区（如图 3a），低纬地区（如黄土高原区）的总辐射基本上大于高纬地区（如东北冷区）。研究的三个区从南到北相隔大约 2 个纬度分布，总辐射的峰值也呈现从南到北按大约 50 W/m²

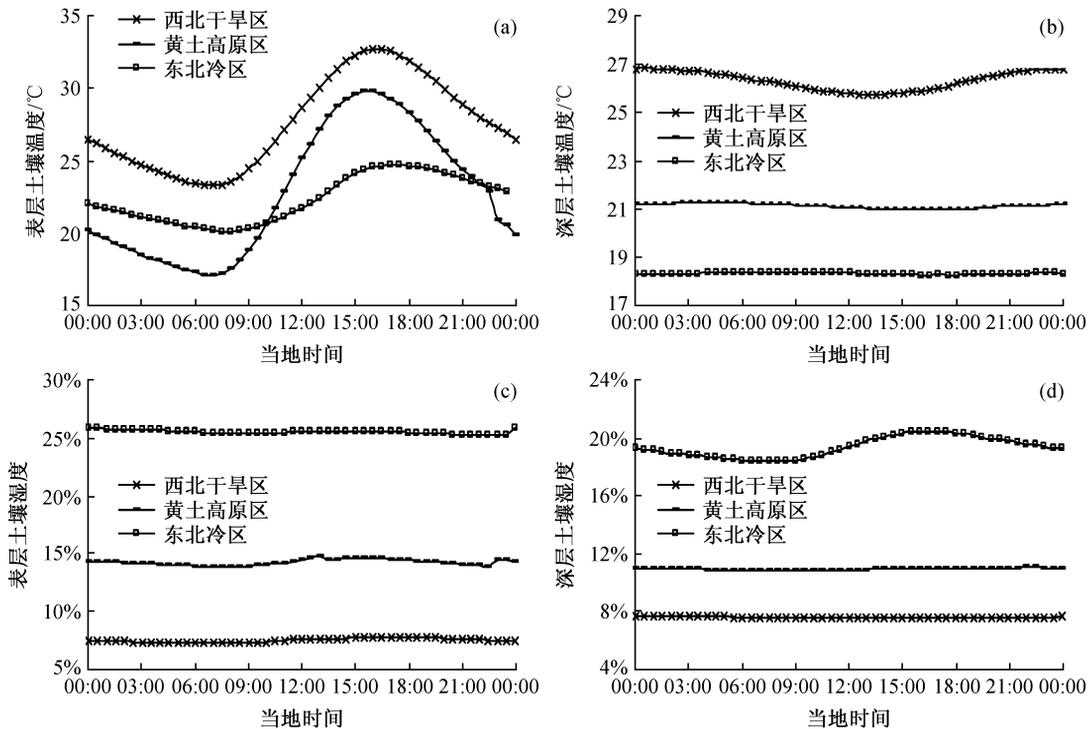


图 2 浅层 (5 cm) (a, c) 和深层 (50 cm) (b, d) 土壤温度 (a, b) 和土壤湿度 (c, d) 的区域差异

Fig. 2 The regional differences of soil (a, b) temperature and (c, d) moisture at (a, c) shallow level (5 cm) and (b, d) deep level (50 cm)

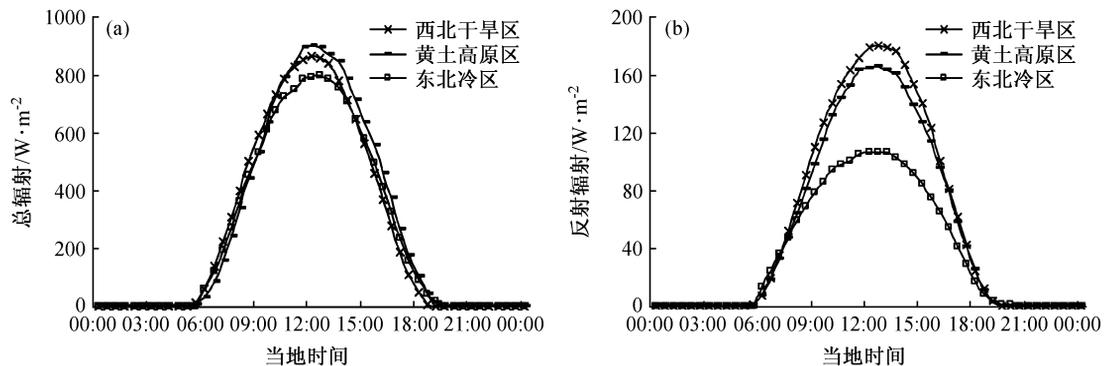


图 3 总辐射 (a) 和短波反射辐射 (b) 日变化的区域差异

Fig. 3 The regional differences of (a) global radiation and (b) upward short-wave radiation

的量值区间递减,这似乎是纬度单因子控制的变化。这种对应递减关系在一定程度上否定了气溶胶负效应的区域差异。尽管不少研究也指出气溶胶是我国总辐射减少的原因(Che et al., 2005; Xia et al., 2006),而且一般认为黄土高原区和西北干旱区的气溶胶和光学厚度比东北冷区强(罗云峰等, 2000),但东北区总辐射却是最弱。这可能的原因是观测站点(如西北干旱区的张掖站、黄土高原的榆中站)远离市区,也就是远离气溶胶高浓度区,因而总辐射中气溶胶的削弱作用体现不出来。但有另一种理解,尽管气溶胶对总辐射的削弱在西北干旱区和黄土高原要比东北冷区大,之所以黄土高原、西北干旱区与东北冷区之间的总辐射仍然按大约 50 W/m^2 的量值区间递减,是因为东北冷区也同时受到了水汽和云的削弱,而且东北冷区的平均海拔才 200 m 左右,与西北干旱区和黄土高原区的平均 1800 m 左右的海拔相比,这种削弱更明显。

跟总辐射不同,反射辐射除了受到纬度和天空状况的影响外还跟地表属性关联密切。图 3b 说明了这一关系。首先,可以看到东北冷区与黄土高原地区和西北干旱区的反射辐射之间的相对差值变得更加明显,而东北冷区的反射辐射峰值约为 100 W/m^2 ,这可以从东北冷区更好的植被覆盖和更湿润的土壤解释。其次,黄土高原区的反射辐射峰值(约 160 W/m^2)比西北干旱区的反射辐射峰值(约 180 W/m^2)小 20 W/m^2 左右,尽管黄土高原地区观测到更大的总辐射。总辐射和反射辐射在这两个地区的不一致,表明了西北干旱区内的植被覆盖要比黄土高原区差,土壤含水量更低。这三个地区的总辐射和反射辐射的对比分析结果基本与预想的一致,也符合植被覆盖情况(图 1b)的观测结果。

不考虑陆—气系统中各种非直接的耦合和反馈作用,反照率(反射辐射与总辐射的比值)主要与地表属性如植被覆盖、土壤湿度、土壤颜色和太阳入射角度有关。在前面的讨论中,我们已经对这三个地区的地表状况有较为清楚的认识,各区按植被覆盖的好坏与湿度的高低的顺序为:东北冷区,黄土高原区,西北干旱区。一般地,植被覆盖的地表反照率比裸土要低,湿的地表比干的低。因而可以预期这三个站的反照率也应该有这样的排列顺序,而图 4 证明这个预期结论。从量值而言,东北冷区的反照率在 $0.12 \sim 0.19$ 之间,黄土高原区域

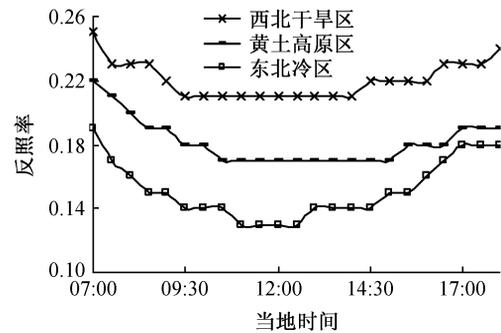


图 4 反照率的区域差异

Fig. 4 The regional differences of albedo

在 $0.17 \sim 0.22$ 之间,西北干旱区在 $0.21 \sim 0.25$ 的范围内。应注意的是这跟这三个地区的土壤颜色深浅也有一定的关系。另外,三个地区的反照率都呈现出典型的 U 型日变化,反照率早晚高,中午低。不少研究指出这可能与太阳高度角以及傍晚和夜间的露水过程有关(Menenti et al., 1989; Minnis et al., 1997)。各区反照率日振幅相近,约 0.04 ,但相对振幅(反照率日振幅与反照率日平均值之比)由西北干旱区、黄土高原区到东北冷区增大,这跟土壤湿度的日振幅一致。

图 5a 描述了三个地区大气逆辐射的平均日变化。从时间变化上看,三个地区的大气辐射都是在早晨出现最低值,在午后三点到五点之间达到峰值。早晨的最低值可能与早晨太阳加热造成的雾气消散和空气湿度降低有关,也可能是受这时段的最低土壤温度的影响,因为土壤温度和地表长波辐射存在着耦合过程(Betts, 2006; Dickinson et al., 2006),而峰值的出现时间相对于总辐射和地表温度出现了明显的滞后,其原因主要是大气辐射是地气辐射系统中更为复杂的过程,涉及的影响因子多,是多个变量参与的多种正负反馈作用的综合结果,因而对单个变量变化的反应比其它辐射过程要慢得多。从各个地区的比较上看,东北冷区的峰值最大,接近 370 W/m^2 ;其次为西北干旱区,约为 350 W/m^2 ;最小是黄土高原区, 330 W/m^2 左右。这是因为东北冷区的气候比其他两个区湿润,云量较多,所以该区的大气逆辐射相对强。西北干旱区比黄土高原区的大气长波辐射更强表明:尽管前者比后者相对干,云量少,但西北干旱区因此而温度升高的土壤通过更强的长波辐射和热通量交换更加强烈的加热大气,弥补了部分的大气辐射。

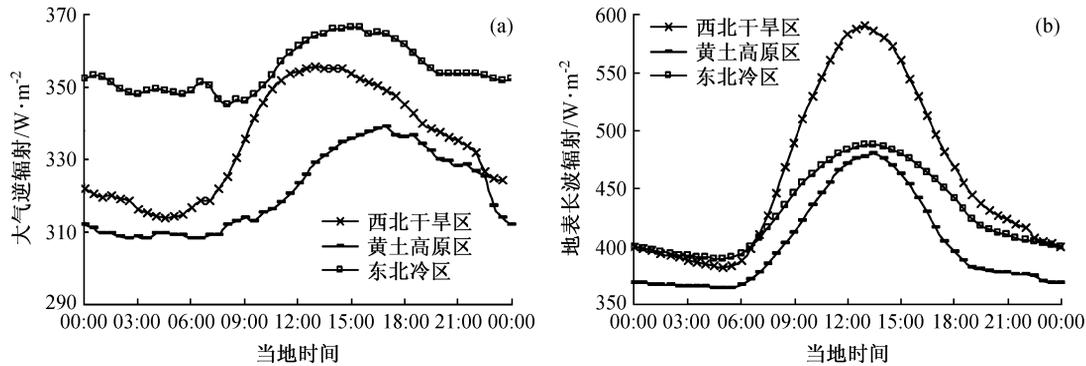


图 5 大气逆辐射 (a) 和地表长波辐射 (b) 日变化的区域差异

Fig. 5 The regional differences of (a) downward and (b) upward long-wave radiation

图 5b 是地表长波辐射的平均日变化, 跟大气逆辐射不同, 各区地表辐射变化位相一致, 峰值基本出现在下午 13~14 时之间, 稍微落后于总辐射。这是由于地表辐射直接受到地表温度单一因子的控制, 而地表温度对太阳总辐射的响应时间相对短。从各区的量值比较上看, 西北干旱区最大, 峰值将近 600 W/m^2 ; 其次, 黄土高原地区的峰值为 550 W/m^2 ; 东北冷区的地表辐射最小, 只有 480 W/m^2 左右。如前所述, 这种情况是对地表温度的响应 (图 2a)。

对比图 5a 和图 5b, 东北地区的大气长波辐射在量值上并未跟地表长波辐射一致对应, 大气长波辐射在三个地区中最大, 但地表长波辐射却是最小; 而黄土高原地区和西北干旱区的大气长波辐射与地表长波辐射却一致对应。这可以从影响大气辐射的两个主要因子云量 (水汽) 和地表温度在长波辐射过程中的作用方面解释。云 (水汽) 对大气辐射有双面性: 一方面, 它反射太阳辐射, 降低地表温度, 减少地表长波辐射, 最终对大气辐射起负的效应; 另一方面, 云 (水汽) 吸收地表的长波辐射然后向地表发射长波辐射, 它的大小直接决定大气辐射量, 这是云的正效应。但是其总的效应难以确定, 而且随着气候背景的不同而变化。理论上, 在完全没有云 (水汽) 和完全阴雨天的两种极端情况下大气辐射都不强, 应该都小于有一定云量的晴天。因而可以预期云量跟大气辐射的关系是呈抛物线式分布, 并且有一个最佳值云量对应最大大气长波辐射, 这里所谓的最佳值含义是云的正效应跟负效应的差值最大。张强和曹晓彦 (2003) 在分析敦煌地区不同天气条件下的辐射平衡特征时, 发现晴天、阴天、降水天的大气长波辐射日积分值分别为

32.42 、 33.61 、 $31.81 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 而地表长波辐射分别为 44.06 、 41.12 、 $34.52 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可以看到, 阴天的大气辐射比晴天的大, 但地表长波辐射比晴天的小。这说明了在敦煌地区晴天和阴天云的正效应大于其负效应。回到所讨论的三个地区, 我们可以认为: 晴天条件下, 在东北冷区, 云总体上正作用于大气长波; 在黄土高原区和西北干旱区, 云的作用相对不明显, 大气逆辐射更多地是依赖地表辐射。

地表有效辐射是地面向外的净长波辐射, 尽管与地面吸收的短波辐射相比量值较小, 但它对辐射平衡有较大的影响。图 6a 描述了三个地区有效辐射的日变化。三个地区变化一致, 在下午 13 时出现峰值。这是由于有效辐射的主要影响因子之一是地表温度, 地表温度越高有效辐射越大, 地面损失的能量就越多。因为大气有效辐射是地表辐射绝对值与大气逆辐射绝对值之间的差值, 因而它与空气湿度和温度也密切相关。一般情况下, 有效辐射在湿热的地区低, 在干冷地区高。三个地区有效辐射的量值比较可以印证这一般性的结论。东北冷区夏天湿润凉爽, 有效辐射 (峰值约 140 W/m^2) 远小于其他两个区; 西北干旱区夏天干且温差大, 有效辐射 (峰值约 240 W/m^2) 最大; 黄土高原区湿润程度和温差跟西北干旱区较为接近, 有效辐射 (峰值约 200 W/m^2) 只是稍微小于西北干旱区。

地表净辐射比有效辐射复杂, 它是地面从辐射过程中吸收的能量。从它的日变化 (图 6b) 可以看到, 净辐射在晚上负值 (约 -100 W/m^2), 在白天为正值且于下午 13 时附近达到峰值。三个地区中, 西北干旱区的净辐射最小, 峰值约 450 W/m^2 , 地

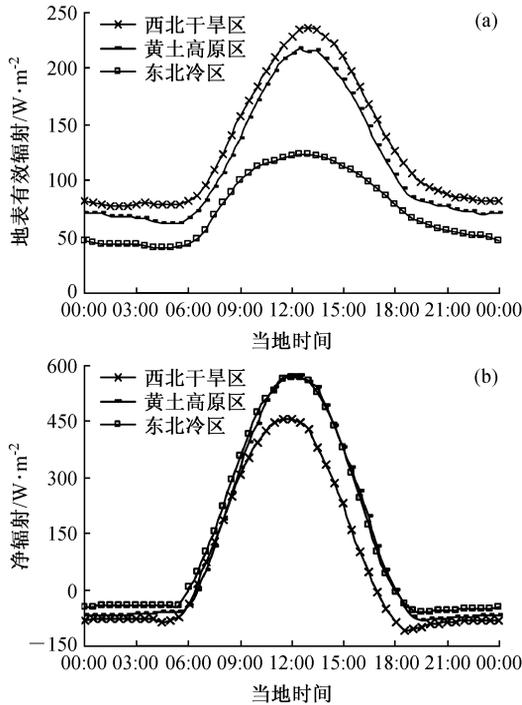


图 6 有效辐射 (a) 和净辐射 (b) 日变化的区域差异
Fig. 6 The regional differences of (a) net long-wave radiation and (b) net radiation

表可利用能量最低；黄土高原区和东北冷区的净辐射相近，峰值约 $580 W/m^2$ ，但有效辐射对可利用能量的贡献在这两个地区不同，在东北冷区有效辐射的正贡献更大。净辐射的区域差异主要是这三个地区气候干湿状况差异造成的，而这种差异对于农业的发展有重要的意义。

3.2 地表能量过程的区域特征差异

地表的能量过程主要是分析地表从辐射过程中获取的能量的分配。地表可利用能量以三种方式消耗释放：加热大气的感热通量、加热土壤的土壤热通量、蒸发水分的潜热通量。能量分配方式对局地甚至更大尺度的天气意义深刻，而分配方式的区域差异是气候的空间差异的根本原因。

感热通量和潜热通量关系密切，这是因为它们是地表可利用能量主要的消耗体，相互影响大。给定某一可用能量，其中一个变大，另一个就相应的变小。此外，它们受到地表属性影响较大。在图 7a 中，感热通量在夜间出现小的负值，说明夜间大气向地面传送能量；在白天感热通量为正值，能量由地面向大气传送，且在下午 13 时附近达到感热通量峰值。感热通量从西北干旱区、黄土高原区到东北冷区递减，与气候干燥程度正相关，其中，西北

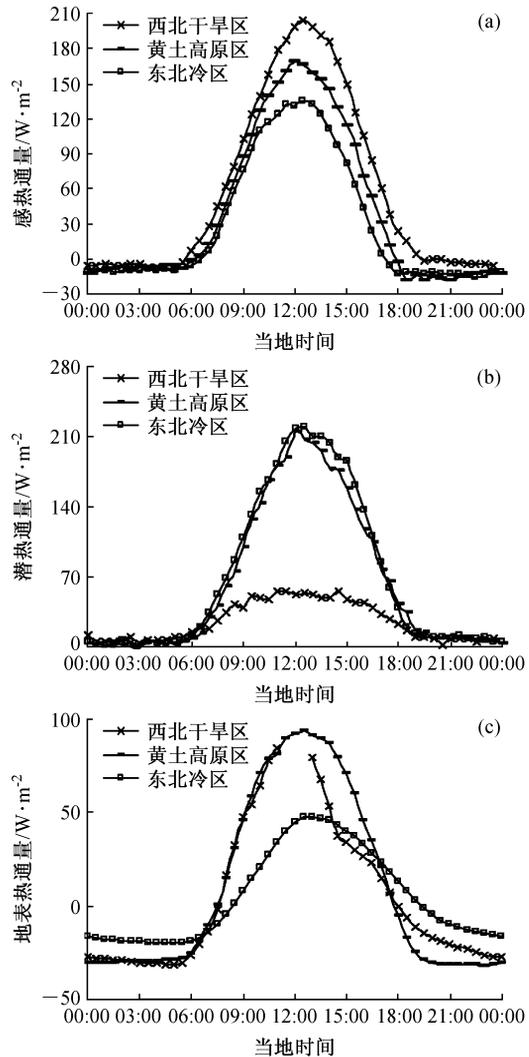


图 7 地表感热通量 (a)、潜热通量 (b)、土壤热通量 (c) 日变化的区域差异
Fig. 7 The regional differences of surface (a) sensible heat flux, (b) latent heat flux, and (c) soil heat flux

干旱区的感热通量峰值达到 $200 W/m^2$ 左右，黄土高原地区峰值 $170 W/m^2$ 左右，东北冷区峰值约 $130 W/m^2$ 。在图 7b 中，潜热通量的日变化和感热相近，但没有负值出现，表明水汽总是由地面向上传送。在量值方面，潜热通量在三个地区的排列刚好与感热通量相反：从西北干旱区、黄土高原地区到东北冷区递增，其中黄土高原区和东北冷区的潜热通量接近，峰值约为 $220 W/m^2$ ，西北干旱区峰值只有 $60 W/m^2$ 左右。因此，从感热通量和潜热通量的区域比较可以看到陆面能量过程在维持和改变区域气候中的作用：一方面，在西北干旱区和黄土高原区空气被强烈加热，这使得本来相对干燥的

大气的相对湿度更小，不利于降水的形成；另一方面，在西北干旱区地表向大气中输送的水汽比黄土高原少，降水几率也比黄土高原更低，这有利于维持了西北干旱区的干旱气候和黄土高原的半干旱气候。相比其他两个地区，东北冷区相对凉快，但地表向大气的水分输送充足，有利于维持半干旱的气候。

理论上，由于水的热传导率比空气要高，所以湿润地表的地表热通量高于同等温度梯度和土壤成分的干地表。图 7c 是三个区域 5 cm 处观测到的平均地表热通量日变化，由图看到尽管东北冷区土壤最为湿润，但热通量最小，其主要是因为该区多个站都不是裸土地表。黄土高原区的土壤热通量比西北干旱区的要大，因为前者的土壤湿度更大。

图 8 是描述夏季晴天条件下各个地区感热通

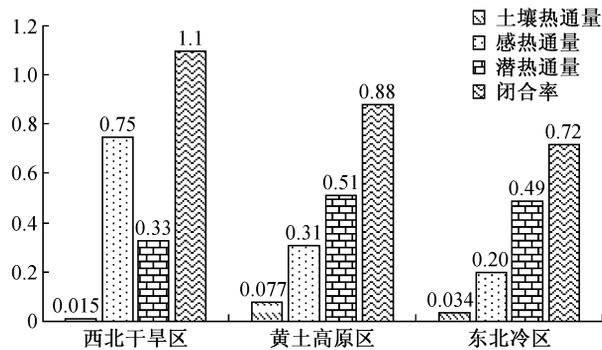


图 8 夏季晴天条件下各个地区感热通量、潜热通量和土壤热通量日积分值占净辐射日积分值的比例

Fig. 8 The regional differences in the proportion of daily integral of sensible heat flux, latent heat flux, and soil heat flux to the daily integral of net radiation

量、潜热通量和土壤热通量日积分值占净辐射日积分值的比例。西北干旱区的地表的水分少，可利用能量大部分（约 70%）用于加热大气，约 30% 消耗于蒸发和加热土壤；黄土高原区可利用能量中用于加热大气的能量占 30%，蒸发水分的消耗能量约 50%；东北冷区接近一半的能量用于蒸发，20% 左右消耗于加热大气。总之，三个地区中，感热通量所占比例最大的为西北干旱区，其次为黄土高原，最小为东北冷区；潜热通量所占的比例在黄土高原和东北冷区相当，在西北干旱区最小。另外，图 8 显示地表能量闭合率 $[(H + L_E) / (R_n - G)]$ ，其中 H 、 L_E 、 G 分别为地表感热、潜热和土壤热通量， R_n 为地表净辐射]从西北干旱区、黄土高原区到东北冷区递减，其中西北干旱区闭合率接近 1，甚至出现地表有效能量高估的现象。这一方面跟仪器测量潜热通量所带来的误差有关。气候湿度越高，潜热通量的测量误差越大，可能造成的不平衡差额更大。另一方面跟下垫面的非均匀程度有关。西北地区植被覆盖低和地形相对平缓，下垫面相对均匀，使得通量受平流和局地环流的影响减弱而能量平衡度增强；而东北下垫面复杂，地表能量平衡度下降。

4 陆面过程区域特征差异小结

前面的部分逐一分析了陆面辐射和能量过程各分量的区域差异，但是显得相对的零散，缺乏总结性的讨论。图 9 概括性地描述上面讨论的各区每个变量的相对大小。图 9 是通过比较三个区域中各变

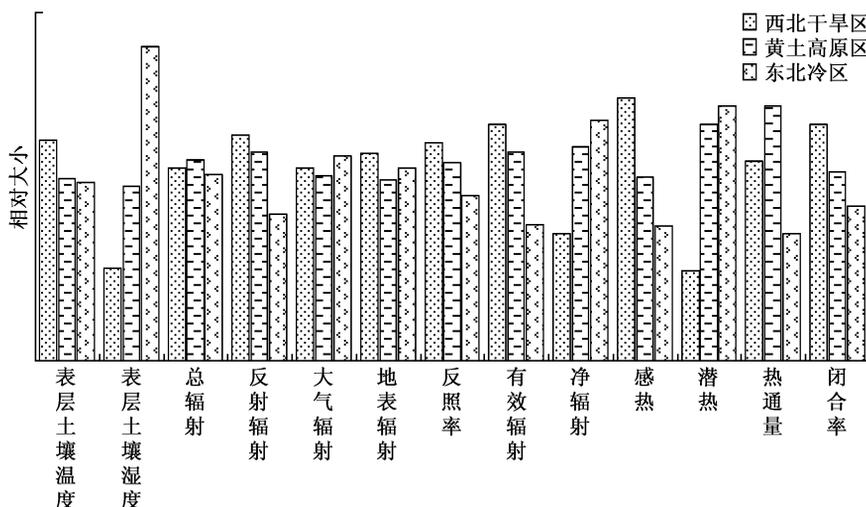


图 9 陆面过程的区域差异

Fig. 9 The regional differences of land surface processes

量日积分值相对大小得到的,但表层(5 cm)土壤温度和湿度以及反照率则是利用了平均值。所有变量中,区域差异较大的有表层土壤湿度、反射辐射、有效辐射、净辐射以及能量过程个各分量;而这些变量对气候系统中可利用水分比较敏感。从图9也可以比较总结出各区陆面过程的基本特征。西北干旱区地表面(边界层大气)热而干,这直接导致植被稀疏,地表反射作用强,反照率大。另外,这导致了强的有效辐射和弱的净辐射,可利用能量主要通过感热和土壤热传导过程消耗。东北冷区的情况和西北干旱区基本相反。在这三个区的比较中,黄土高原区都是处在西北干旱区和东北冷区之间。这些差异本质上是由于陆面过程中可利用水分的不同导致的。

5 结论和讨论

通过对我国北方干旱—半干旱区陆面辐射过程和能量过程的区域差异分析发现,大气和土壤中可利用水分在不同区域的陆面过程中扮演及其重要的角色。从某种角度来说,对我国北方干旱—半干旱区陆面过程的区域差异分析,实质上是分析强弱干燥气候对陆面过程的影响,而对于这个问题定性和初步定量的工作已经完成,只是没在本文中涉及。

本文结果都是基于夏季晴天条件下得到的。分析结果显示不同气候区域的辐射和能量过程差异明显。在辐射平衡的比较方面:晴天的总辐射在黄土高原最大,峰值约 900 W/m^2 ,其次为西北干旱区,约峰值 850 W/m^2 ,最小的是东北冷区,约峰值 800 W/m^2 ,基本呈现随纬度上升而递减的趋势,这似乎是一个单因子占主导的情况,但是海拔高度的差异在东北冷区与西北干旱区和黄土高原区之间的总辐射差异所起到的作用也是存在的,只是转化为大气水汽和云的削弱。反射辐射在东北冷区最小,峰值约 100 W/m^2 ,在西北干旱区最大,峰值约 180 W/m^2 ,而黄土高原在两者之间,峰值约 160 W/m^2 ,这几乎是对植被覆盖状况的线性响应。大气逆辐射在东北冷区最明显,峰值约 370 W/m^2 ,黄土高原区最弱,峰值约 330 W/m^2 ;地表长波辐射西北干旱区最强,峰值约 600 W/m^2 ,而东北冷区最弱,峰值约 480 W/m^2 ,这跟地表温度直接相关。另外各区的大气长波辐射和地表长波辐射在量值方面的对应关系表面:晴天条件下,在东北冷

区,云总体上正作用于大气长波;在黄土高原区和西北干旱区,云的作用相对不明显,大气逆辐射更多地是依赖地表辐射。

地表能量平衡跟地表可利用水分关联更加密切,区域差异表现得也更加明显:西北干旱区的地表的水分少,可利用能量大部分(约70%)用于加热大气,小部分消耗于蒸发和加热土壤。黄土高原区可利用能量中用于加热大气的能量占30%,蒸发水分的消耗能量约50%。东北冷区接近一半的能量用于蒸发,另一半大部分左右消耗于加热大气。黄土高原区和东北冷区同属半干旱区,能量分配有一定的相似性,但差异还是存在的,而这依然是地表可利用水分差异造成的。这些能量分配型能够很好的说明陆面能量过程在维持和改变区域气候中起到的作用。

致谢 本文研究过程中,中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室和季风亚洲全球变化区域集成研究计划提供了资料,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Andre J C, Goutorbe J P, Perrier A. 1986. HAPEX-MOBILHY: A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67 (2): 138 - 144.
- Betts A K. 2006. Radiative scaling of the nocturnal boundary layer and the diurnal temperature range [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D07105, doi: 10.1029/2005JD006560.
- Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. 2005. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961 - 2000 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (1029): 2341 - 2352.
- Dickinson R E. 1995. Land-atmosphere interaction [R]. U. S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991 - 1994, *Reviews of Geophysics Supplement*, 917 - 922.
- Dickinson R E, Oleson Keith W, Bonan Gordon, et al. 2006. The community land model and its climate statistics as a component of the community climate system model [J]. *J. Climate*, 19 (11): 2302 - 2324.
- Gao Z Q, Lenschow D H, Horton R. et al. 2008. Comparison of two soil temperature algorithms for a bare ground site on the Loess Plateau in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D18): 105 - 116, doi: 10.1029/2008JD010285.
- Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. 1993. The project for intercomparison of land-surface parameteriza-

- tion schemes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74 (7): 1335 - 1349.
- 胡非, 程雪玲, 赵松年, 等. 2005. 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)*, 35 (增刊): 66 - 72. Hu F, Cheng X L, Zhao S N, et al. 2005. Hard state of the urban canopy layer turbulence and its self-similar multiplicative cascade models [J]. *Science in China (Series D) (in Chinese)*, 35 (Suppl.): 66 - 72.
- Hu Y Q, Yang X L, Zhang Q, et al. 1992. The characters of energy budget on the Gobi and desert surface in Hexi region [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 6 (1): 82 - 91.
- 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 1994. 黑河试验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. *高原气象*, 13 (3): 225 - 236. Hu Y Q, Gao Y X, Wang J M, et al. 1994. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 13 (3): 225 - 236.
- 胡隐樵, 张强. 2002. 开展干旱环境动力学研究的若干问题 [J]. *地球科学进展*, 16 (1): 18 - 23. Hu Y Q, Zhang Q. 2002. Some issues of arid environment dynamics [J]. *Advance in Earth Science (in Chinese)*, 16 (1): 18 - 23.
- 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 2002a. 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*, 9 (2): 295 - 306. Lü D R, Chen Z Z, Chen J Y, et al. 2002a. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil - vegetation - atmosphere interaction (IMGRASS) [J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 9 (2): 295 - 306.
- 吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 2002b. 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*, 9 (2): 307 - 320. Lü Daren, Chen Z Z, Wang G C, et al. 2002b. Climate - ecology interaction in Inner Mongolia semi-arid grassland—Preliminary results of IMGRASS project [J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 9 (2): 307 - 20.
- 吕世华, 罗斯琼. 2005. 沙漠—绿洲大气边界层结构的数值模拟 [J]. *高原气象*, 24 (4): 465 - 470. Lü S H, Luo S Q. 2005. Numerical simulation of boundary layer structure in desert - oasis [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (4): 465 - 470.
- 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 2000. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. *科学通报*, 45 (5): 549 - 554. Luo Y F, Lü D R, Li W L, et al. 2000. Analyses on the spatial distribution of aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 45 (5): 549 - 554.
- 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. *大气科学*, 29 (5): 671 - 681. Ma Z G, Huang G, Gan W Q, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over Northern China during the last century [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (5): 671 - 681.
- 马柱国, 符滨斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. *地球物理学报*, 48 (3): 519 - 525. Ma Z G, Fu C B. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 48 (3): 519 - 525.
- Menenti M, Bastiaanssen W G M, van Eick D. 1989. Determination of surface hemispherical reflectance with Thematic Mapper data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 28 (C): 327 - 337.
- Minnis P, Mayor S, Smith W L, et al. 1997. Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35 (4): 879 - 891.
- Thorntwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 38: 55 - 94.
- Wang J M, Liu X H, Ma Y M. 1992. Turbulence structure and transfer characteristics in the surface layer of HEIFE Gobi area [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 6 (1): 92 - 104.
- World Meteorological Organization (WMO). 1987. Report of Third Session of JSC Working Group on Land Surface Processes and Climate [R]. Manhattan, Kansas, WCRP-8, WMO/TD-No. 232.
- Xia X A, Wang P C, Chen H B, et al. 2006. Analysis of downwelling surface solar radiation in China from National Centers Environmental Prediction reanalysis, satellite estimates, and surface observation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D9): D09103, doi: 10.1029/2005JD006405
- Zhang Q, Hu Y Q. 1995. On flux-profile relationship with heat advection over moist surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 19 (1): 9 - 21.
- 张强. 1995. 简评陆面过程模式 [J]. *气象科学*, 18 (3): 295 - 304. Zhang Q. 1995. Simple review of land surface process model [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 18 (3): 295 - 304.
- 张强, 曹晓彦. 2003. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. *大气科学*, 27 (2): 245 - 254. Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. 2003. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or Gobi [J]. *Chinese Journal of*

- Atmosphere Sciences (in Chinese), 27 (2): 245 - 254.
- 张强, 黄荣辉, 卫国安, 等. 2005. 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, 20 (4): 427 - 441. Zhang Q, Huang R H, Wei G A, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20 (4): 427 - 441.
- 张强, 王胜. 2007. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究 [J]. 干旱气象, 25 (2): 1 - 4. Zhang Q, Wang S. 2007. Processes of water transfer over land surface in arid and semi-arid region of China [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 25 (2): 1 - 4.
- 张强, 王胜. 2008. 关于黄土高原陆面过程及其观测试验研究 [J]. 地球科学进展, 23 (2): 167 - 173. Zhang Q, Wang S. 2008. On land surface processes and its experimental study in Chinese Loess Plateau [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 23 (2): 167 - 173.
- 张强, 胡向军, 王胜, 等. 2009. 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, 24 (4): 363 - 371. Zhang Q, Hu X J, Wang S, et al. 2009. Some technological and scientific issues about the experimental study of land surface processes in Chinese Loss Plateau (LOPEX) [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (4): 363 - 371.
- 中国环境监测总站. 2004. 中国生态环境质量评价研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 156pp. China National Environmental Monitoring Centre. 2004. Assessment of Eco-environmental Quality in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 156pp.