

郑志远, 韦志刚, 李振朝, 等. 2014. 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率参数化研究 [J]. 大气科学, 38 (2): 297–308, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13147. Zheng Zhiyuan, Wei Zhigang, Li Zhenchao, et al. 2014. Study of parameterization of surface albedo of bare soil over the Gobi desert in the Dunhuang region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 297–308.

# 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率参数化研究

郑志远<sup>1</sup> 韦志刚<sup>1</sup> 李振朝<sup>2</sup> 魏红<sup>2,3</sup> 刘慧<sup>2,3</sup>

1 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

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用敦煌站观测资料, 选取其中观测资料完整且连续性好的 7 个年份每年 5~10 月的地表净辐射四分量和土壤湿度资料, 分析研究了敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量之间的关系, 结果表明: 地表反照率与太阳高度角呈  $e$  指数关系, 随太阳高度角的增大而减小, 当太阳高度角大于 40°时, 地表反照率趋于稳定。表层土壤含水量的增大可导致地表反照率的减小, 地表反照率与 5 cm 深土壤湿度呈线性关系。另外, 建立了敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量之间的双因子参数化公式, 提出了一种更加适合该地区的地表反照率参数方案, 并且选取 2002 年 6~9 月的实测资料对拟合的参数化公式进行模拟验证。本文所提出的地表反照率参数化方案能够很好地再现该地区裸土地表反照率的“U”型日变化特征, 可准确地模拟出地表反照率的动态变化趋势。基于此参数化方案计算得到的地表反射辐射与实测值基本一致。

**关键词** 敦煌 戈壁 裸土 地表反照率 太阳高度角 土壤含水量 参数化

文章编号 1006-9895(2014)02-0297-12

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13147

## Study of Parameterization of Surface Albedo of Bare Soil over the Gobi Desert in the Dunhuang Region

ZHENG Zhiyuan<sup>1</sup>, WEI Zhigang<sup>1</sup>, LI Zhenchao<sup>2</sup>, WEI Hong<sup>2,3</sup>, and LIU Hui<sup>2,3</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** The relationships among surface albedo, solar elevation angle, and surface soil moisture over the Gobi desert in the Dunhuang region were analyzed by using the data of field observational surface radiation and soil moisture from May to October during a seven-year period. The results showed that the bare soil surface albedo decreases with an increase in solar elevation angle and tends to be a constant when solar elevation angle is larger than 40°. Surface albedo decreases with an increase in surface soil moisture content and shows a liner dependence on soil moisture. On the basis of the relationship of the bare soil surface albedo with the two factors of solar elevation angle and surface soil moisture content, a double factorial parameterization formula of the bare soil surface albedo is put forward over the Gobi desert in the Dunhuang region, which is more suitable for the surface albedo parameterization scheme in this area. The scheme proposed by this paper is able to reproduce the surface albedo “U” type of diurnal variation for accurate simulation of the

收稿日期 2013-04-10, 2013-07-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41275011、41375001, 国家重点基础研究发展计划资助 2009CB421402

作者简介 郑志远, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事陆气相互作用与地球系统数值模拟方面的研究。E-mail: OvilaNobel@gmail.com

通讯作者 韦志刚, E-mail: wzg@bnu.edu.cn

dynamic trend of the surface albedo, in addition to accurate calculation of the bare soil surface albedo and reflected radiation. The variation characteristics as well as the trend of the bare soil surface albedo and reflected radiation are consistent with the observational data. Moreover, the calculated surface reflective radiation based on the parameterization scheme is also a good representation of the surface reflection and radiation characteristics of diurnal variation.

**Keywords** Dunhuang, Gobi, Bare soil, Surface albedo, Solar elevation angle, Surface soil moisture content, Parameterization

## 1 引言

地表反照率是下垫面最重要的性质之一，也是影响陆气相互作用和气候及其变化的重要因子之一。它直接决定着地表对太阳辐射的吸收和反射能力，进而影响太阳辐射能在地表和大气之间的分配。这种分配反过来又影响了地表热量平衡和水循环过程，并对植物的生长、发育、光合和呼吸作用等多种生态生物化学过程起到重要作用 (Wang et al., 2001, 2002a, 2002b)。随着大气和陆面模式的发展，地表反照率已成为数值模式的重要参数之一。因此，深入研究地表反照率的变化特征及其参数化方案，不仅有助于我们了解当前天气气候的形成机理，而且也可为将来天气和气候的模拟与预测奠定基础。

地表反照率的计算偏差可以引起地表温度、地一气间的热量和能量交换的计算偏差，并且通过耦合效应可以影响土壤和植被的蒸散发。地表反照率对许多因子都很敏感，太阳高度角、土壤含水量、土壤颜色及土地利用和季节性积雪冻土等因子的变化都会引起地表反照率的改变。数值模式模拟结果表明，气候对地表反照率变化非常敏感 (Henderson-Sellers et al., 1995)。但事实表明，陆面过程参数化方案对陆面热量和辐射平衡的估算并不理想 (Henderson-Sellers et al., 1993)，如美国国家大气研究中心 National Center for Atmospheric Research (简称 NCAR) 的 National Centers for Environment Prediction (简称 NCEP) 系统和欧洲中心的中期数值预报模式 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (简称 ECMWF) 由于过高估计了冬季北方森林的林冠层反照率 (设置为 0.6~0.8，为实际值的 5 倍)，导致两个模式对北方森林每日冬季温度的模拟值比实际值低了 10°C~15°C (Betts and Ball, 1997; Baldocci et al., 2006)，与实际值相差甚远。Otterman et al. (1984) 用能量平衡模型对北半球高纬度地区冬季的能量平衡各分量进行模拟研究发现，由于模式中对地表反照率模拟偏低，从而导致了对 65°N 以北的高纬度地区地表温度模拟偏高，偏差量达到 5°C。肖登

攀等 (2011) 以及王鸽和韩琳 (2010) 研究也指出当前陆面过程模式中，地表反照率作为诊断变量由其他参数导出，由于包含了许多先验的预定参数及某些过程处理中的简化假设，丢失了一些空间和光谱信息，使地表反照率的计算存在一定的误差。地表反照率在时间和空间上仍然存在较大的不确定性。因此，如何在陆面模式及与之相耦合的天气和气候模式中真实的描述下垫面的反照率信息，是提高现有模式模拟水平迫切需要解决的一个问题。

在众多陆面过程模式如 Community Land Model (简称 CLM)、Common Land Model (简称 CoLM)、Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (简称 BATS)、Simple Biosphere Model (简称 SiB)、Simplified Simple Biosphere Scheme (简称 SSiB) 和 National Center for Atmospheric Research, Land Surface Model (简称 NACR-LSM) 等中，裸土的光学特性被认为是各向同性的。地表反照率也仅被定义为土壤颜色、土壤质地和表层含水量的函数 (Dickinson and Kenney, 1986)，与太阳高度角无关。在一些模式中，沙漠地区的地表反照率甚至定义为常数。卫星遥感和台站场地观测表明，裸土表面具有产生黑色阴影的光学垂直结构，具有各向异性 (Kimes, 1983)。Tsvetinskaya et al. (2002) 及 Wang et al. (2004) 等通过对遥感数据的分析研究发现，裸土反照率的空间变率很大。Monteith and Szeice (1961) 的研究结果表明，当太阳高度角在 20°~60° 的范围变化时，裸土反照率也相应的从 0.19 减小到 0.16。Idso et al. (1975) 研究发现如果在地表反照率变化中考虑太阳高度角的变化，无论土壤干湿状况与否，地表反照率变化曲线随时间的变化都一致。还有一些使用其他不同算法计算地表反照率的研究也发现 (Ranson et al., 1991)，裸土反照率与太阳高度角的变化密切相关。因此，如果在裸土地表反照率计算方法中不考虑太阳高度角的变化，必然会给地表反照率的计算带来误差。

干旱区裸土地表反照率的日变化特征非常显著。同时，日益严重的荒漠化和季节性积雪冻土的存在使干旱区地表反照率的季节变化和年变化比

较大, 因此研究干旱区裸土地表反照率变化对区域气候的影响是非常必要的。早在 1975 年, Charney (1975) 就研究了 Sahel 地区沙漠地表反照率的改变对大气环流的反馈作用及其对气候的敏感性, 在此研究的基础上他首先提出了沙漠化问题的地球生物—物理反馈机制: 即陆面状况的变化—反照率的异常—地面辐射平衡—气候变化; 他又在其进一步的研究中发现地表反照率的增大可以引起局地降水的明显减少 (Charney et al., 1977), 今天看来这个结论过于强调了地表反照率对气候变化的负反馈作用, 但是, 却引起了人们对叠加在大尺度、准定常的气候系统上的扰动反馈作用的注意 (隆霄等, 2003)。类似的工作还有 Laval and Picon (1986)、Cess and Rober (1987) 及 Sud and Fennessy (1982) 等人的研究, 这些研究对 Charney 等人的工作进行了进一步的验证, 结果表明土地荒漠化将导致较高的地表反照率、较小的土壤含水量和较低的地表粗糙度, 使降水减少, 植被状况恶化, 加速了荒漠化进程。此外, Fuller and Ottke (2002) 对西非地区地表反照率与降雨、地表覆盖和人口等因素之间的关系进行了深入的研究与探讨, 结果表明控制植被类型和冠层结构的长时期气候形态比短时期降雨波动对地表反照率有更重要的影响。李伟平等 (2000) 对反照率改变对夏季北非副热带高压的影响进行了敏感性试验, 表明北非地表反照率增大可以抑制局地对流和降水的发生, 导致北非地区下沉气流增强, 从而加强了北非副高等。

戈壁、沙漠是干旱区一类重要的下垫面类型, 它主要由裸土 (尤其是干燥土壤) 组成, 对太阳辐射有着特殊的响应过程, 地表对大气的加热作用也较为突出 (张强和曹晓彦, 2003)。该地区地表反照率的日变化对土壤含水量的日变化依赖较小, 而是与太阳高度角变化关系密切。鲍艳等 (2007) 研究结果指出, 以夏季的沙漠、戈壁下垫面为例, 在无降水和灌溉等外来水源强迫的情况下, 这些地区的土壤表层水含量通常小于  $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 日变化幅度小于  $0.004 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , 太阳高度角日变化是裸土反照率计算中必须要考虑的一个因素, 在较为干燥的下垫面, 这种作用会超过土壤水变化对地表反照率的影响。这种情况下, 太阳高度角变化对反照率变化的影响更为重要。

近些年来, 众多学者对地表反照率与太阳高度角和表层土壤湿度之间的关系方面的进行了探究,

得出了宝贵的经验。如 Paltridge 等早在 1981 年就得出了地表反照率和太阳高度角的理论关系式 (Paltridge and Pratt, 1981), 研究发现地表反照率与太阳高度角呈  $e$  指数关系; Wang et al. (2005b) 利用 30 个沙漠站点的地表反照率观测资料, 在 Briegleb et al. (1986) 经典反照率算法和 MODIS/BDRF 算法 (Schaaf et al., 2002; Jin et al., 2003) 的基础上, 重新确定了公式中的参数, 得出了以太阳天顶角为函数的单参数和双参数计算方案, 数值试验结果表明这两个参数化方法可以减少陆面模式对地表温度 (尤其是正午时分) 模拟的负偏差; Zhang et al. (2002) 根据敦煌 2000 年 5~7 月的观测资料拟合了晴天地表反照率公式, 并使用敦煌 2001 年夏季两个月的资料拟合了一般天气状况下的反照率公式 (张强等, 2003), 王胜等 (2006) 用陆面过程模式检验效果良好; 吴艾笙和钟强, (1993) 对 Paltridge 等发展的关系式进行了改造, 使用 HEIFE 试验中的戈壁、沙漠站的资料拟合了一个新的关系式, 已用于实际计算; 张果等 (2010)、刘辉志等 (2008) 和 Liu et al. (2008)、Guan et al. (2009) 和 Roxy et al. (2010) 分别对内蒙古荒漠草原、吉林通榆退化的农田和草原和我国西北半干旱区通榆、黄土高原榆中站和印度 Kerala 站的地表反照率特征及其与太阳高度角和土壤湿度的关系进行了分析研究, 发现地表反照率日变化呈 “U” 型且与上述两因子均呈  $e$  指数关系; Zhang and Huang (2004) 对敦煌地区荒漠戈壁地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量的关系研究发现, 地表反照率与太阳高度角呈  $e$  指数关系, 但与 5 cm 深土壤湿度呈线性关系。Wang et al. (2005a) 对青藏高原寒旱区 Gaize 站研究发现当太阳高度角在  $10^\circ$  和  $50^\circ$  之间变化时对地表反照率的影响较小, 但反照率与土壤湿度呈  $e$  指数关系; 此外, Wang et al. (2005b) 还根据 Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (简称 MODIS) 产品为天气和气候模式提出了一种与太阳高度角有关的地表反照率参数化方案。Yang et al. (2008) 对 Wang et al. (2005b) 的方法进行了评估与改进。鲍艳等 (2007) 通过在陆面过程模式 BATS 中引入以上几种不同裸土的地表反照率参数化方案, 对比分析了各个方案, 结果表明考虑了太阳天顶角变化的裸土参数化方案能够更好地模拟出地表反照率的状况, 有效地改善了沙漠、戈壁地表的辐射和热状况的模拟。

本文试图利用敦煌站观测资料，在试验基础上，分析研究我国西北干旱区敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量二者之间的关系，提出一种更加适合该地区的裸土地表反照率参数化方案，为改进由于模式中反照率的计算误差从而引起的地表温度、能量分量等的计算偏差，为发展干旱地区具有区域特色的裸土参数化方案和区域模式的改进打下基础。在正确认识和了解西北地区气候及其变化特点的同时，也能推动陆—气相互作用的研究进展，促进天气和气候模式对西北干旱地区的天气预报和气候模拟和预测的能力。

## 2 观测站点、试验仪器、数据资料和研究方法介绍

### 2.1 观测站点

敦煌绿洲位于甘肃河西走廊西端，甘、青、新三省交界处，绿洲形状为倒三角状，境内东有三危山，南有鸣沙山，西临库姆塔格沙漠，北接戈壁与天山余脉相连，地势南北高中间低，自东南向西北略微倾斜，历来就有“敦煌盆地”和“戈壁绿洲”之称。

本次试验观测点为敦煌绿洲西侧的双墩子戈壁。敦煌双墩子戈壁观测站（见图1）在塔克拉玛干沙漠东端，位于北纬 $40^{\circ}10'$ 、东经 $94^{\circ}31'$ ，海拔高度为1150 m，周围被沙漠、戈壁包围，其距敦煌绿洲边缘的最近距离大约为7 km，距离偏南边的鸣沙山大约20~30 km，深居内陆，远离海洋，气候十分干旱。试验场地为平坦的沙石戈壁（表面较多石子，下面主要以细沙为主），场地周围为下垫面均一、平坦的典型戈壁滩。该地温度日较差较大，白天有记录的最高地表温度接近60°C，有记录的最高气温高达43.6°C，最低气温曾达到-28.5°C；天空少云，太阳辐射强，日照充足，年无霜期178 d；该地区多风，为沙尘暴多发区之一（韦志刚等，2005）。地表年平均大气压为873 hPa，该观测站点处在极端干旱的气候区，年平均降水量约为39 mm（王胜等，2004），盛行风向为东风，该地区干旱少雨，地表干燥，蒸发力极强，属于大陆干旱性干旱气候（李红寿等，2008）。

### 2.2 试验仪器

敦煌双墩子荒漠戈壁野外观测站主要的有铁塔的风、温、湿梯度观测，地表净辐射四分量观测，

地表分光辐射观测，地表和土壤温度观测，土壤湿度观测和土壤热通量观测，风、温、湿脉动超声观测。铁塔的风、温、湿梯度共4层，分别在18、8、2、1 m高处，并在这些高度上有风向观测；地表净辐射四分量观测有向下、向上短波辐射和向下、向上长波辐射，它们被安装在离地面约1.5 m高的辐射仪器架上；地表有3个温度感应头，互为120°；土壤温度观测有6层，其深度分别为5、10、20、40、80、180 cm；土壤湿度感应头在5、10、20、40、80、180 cm处；土壤热通量在2.5和7.5 cm两个深度；另外，加强观测期时还架设了一套涡动相关湍流观测系统，架设高度为3 m。

本次试验所用仪器还有荷兰Kipp & Zonen公司生产的CNR-1—净辐射四分量观测仪（见图2），精度为 $10 \text{ W m}^{-2}$ 和美国ESI公司生产的37GP-SS—5 cm深土壤湿度观测仪，精度 $\pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ，数据采集器为澳大利亚dataTaker公司生产的DT600。文中所用时间均指平太阳时。观测点地方时与北京时间相差1小时42分。各仪器每日观测时间范围为当地时间00:00~23:30，每半个小时记录一次数据，此数值为数据记录时刻前后10分钟的平均值。

### 2.3 数据资料

王超等（2010）和Zhou and Huang（2011）对“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验”（The Field Experiment of Air–Land Interaction in the Arid Area of Northwest China，简称NWC-ALIEX）连续12年的观测试验资料及加强观测试验资料的质量问题进行了详细的分析，分析结果指出：此观测试验的资料是比较好的，正常数据占总数据的91.2%，非正常数据只占总数据的8.8%（王超等，2010）。因此，此野外观测站所得的试验资料真实可信，可用来分析敦煌典型干旱区一些重要的陆面过程参数并揭示西北干旱区一些重要陆面过程特征（黄荣辉等，2013）。

本文所用地表净辐射四分量资料观测日期为：2003、2004、2005、2007、2008、2009和2010年每年的5月1日~10月31日，共7年，总样本数为61824个。选取5 cm深土壤湿度为表层土壤含水量资料，观测时段及样本总数同地表净辐射四分量。文中用2002年6月1日~9月30日的地表净辐射四分量和土壤含水量资料进行模拟验证与对比分析，共3个月，数据总数为5856个。

本文在分析研究前，为保证研究结果准确可

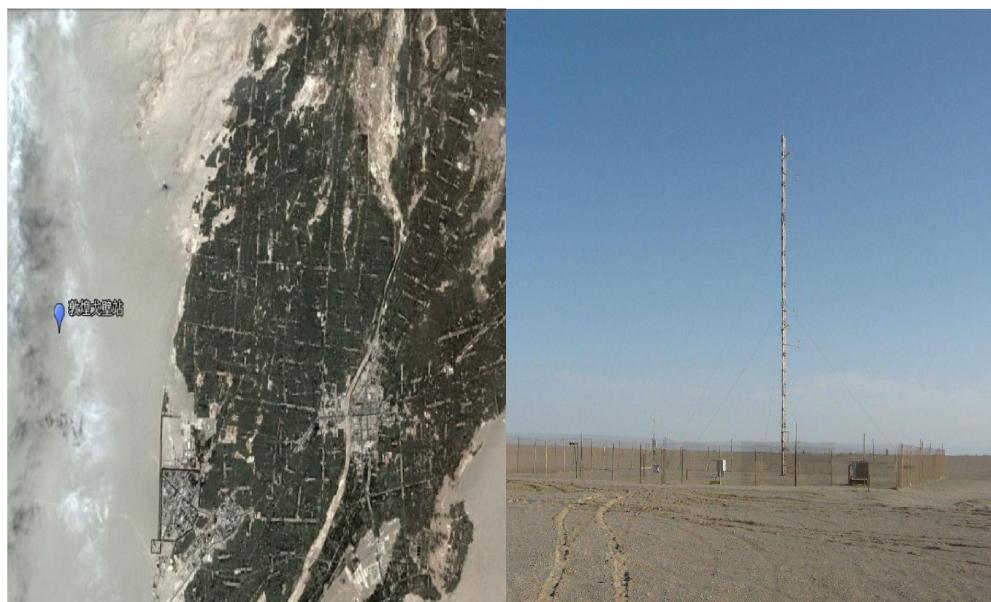


图 1 敦煌荒漠戈壁地区野外试验站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of observation station of the field experiment over the Gobi desert in the Dunhuang region



图 2 敦煌荒漠戈壁地区净辐射四分量观测仪

Fig. 2 The four-component net radiometer over the Gobi desert in the Dunhuang region

信, 对地表净辐射四分量资料进行了简单的质量控制, 具体如下:

(1) 研究下垫面为裸土, 我们根据天气监测记录, 剔除了有降雪和地表有积雪的时段。

(2) 为保证资料的可靠性与准确性, 剔除了一些明显不合理的野点(王超等, 2010)。

(3) 鉴于清晨和傍晚时刻总辐射和地面反射辐射较小, 观测误差相对较大, 会影响地表反照率的计算精度, 故我们选取总辐射大于  $50 \text{ W m}^{-2}$ 、反射辐射大于  $20 \text{ W m}^{-2}$  的时段辐射资料。

(4) 选取  $5 \text{ cm}$  深土壤湿度小于 1.5% 的资料近似作为干燥土壤情况, 分析研究地表反照率与太阳高度角之间的关系。

(5) 选取当太阳高度角大于  $40^\circ$  时的数据, 探讨地表反照率与  $5 \text{ cm}$  深土壤湿度之间的关系。

(6) 根据 Huang et al. (2005)、Zhang and Huang (2004)、张强等(2005)和郑志远等(2012)研究发现, 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率日变化呈“U”型, 且地表反照率日变化范围大约为 0.2~0.5, 其日均值为  $0.255 \pm 0.021$ , 我们对计算得出的地表反照率进行了分段质量控制。分段质量控制地表反照率具体规则如下:(1)当太阳高度角小于  $20^\circ$  时, 控制反照率范围 0.2~0.5; (2)当太阳高度角大于  $20^\circ$  时, 控制反照率范围 0.2~0.35。

#### 2.4 研究方法

地表反照率通过辐射分量的观测数据计算获得:

$$\alpha = S_u / S_d, \quad (1)$$

式中,  $S_u$  为地表反射太阳辐射(也即净辐射传感器测定的向上短波辐射);  $S_d$  为地表接收太阳辐射(也即净辐射传感器测定的向下短波辐射)。本文所用辐射数据为  $30 \text{ min}$  平均值, 故所得的地表反照率也为  $30 \text{ min}$  平均值。

### 3 地表反照率与太阳高度角之间的关系

目前, 大部分陆面过程模式, 如 BATS、CLM、CoLM 和 NACR-LSM 等中, 裸土的地表反照率均表示为土壤质地和表层土壤含水量的函数, 基本表达式采用 Dickinson and Kenney(1986)发展的方法:

$$\alpha = \alpha_{\text{sat}} + 0.11 - 0.4 \times W_s, \quad (2)$$

其中,  $\alpha_{\text{sat}}$  为饱和土壤反照率, 与土壤的质地有关,  $W_s$  为表层土壤体积含水量。公式(2)被大多数陆面过程模型(如 SSIB、CLM、CoLM 和 NACR-LSM

等)所采用, 只是在不同的模式中根据计算需要具体表达形式稍有变化(如在 NACR-LSM 中,  $W_s$  为表层土壤水- $5 \text{ cm}$  土壤层的体积含水量), 但因为没有考虑太阳高度角对反照率计算的影响, 缺点也非常明显。

地表反照率表征了地面对太阳辐射的反射能力, 反映了地表的物理特性。地表反照率一般与地表土壤颜色、地表粗糙度、植被覆盖率、土壤湿度和太阳高度角等因素有关。针对本文的研究区域为敦煌荒漠戈壁裸土地区, 地表颜色、粗糙度和植被覆盖率基本不变, 故对敦煌荒漠戈壁地表反照率的研究可以主要考虑太阳高度角和土壤湿度的影响(张强等, 2003)。

为分析太阳高度角对地表反照率的影响, 需要尽量减少土壤含水量的影响。本文选取  $5 \text{ cm}$  深度土壤湿度小于 1.5% 的资料近似作为干燥土壤情况进行分析研究。图 3 为符合干燥土壤指标的 28039 个样本(约占总样本 45.35%) 地表反照率与太阳高度角关系图, 如图 3 所示, 地表反照率随太阳高度角的增大而减小, 在太阳高度角大于  $40^\circ$  时, 地表反照率变化较为平缓, 以后太阳高度角对地表反照率的影响较小。这种变化趋势与 Paltridge and Pratt (1981)、张强等(2003)、刘辉志等(2008)、Liu et al. (2008)、Guan et al. (2009)、张果等(2010) 和 Roxy et al. (2010) 的研究结果一致。

根据图 3 中的数据, 拟合得到了地表反照率与太阳高度角之间的关系式:

$$\alpha_i = 0.25 + 0.24 \times \exp(-0.10 \times h_\theta), \quad (3)$$

式中,  $\alpha_i$  是干燥土壤地表反照率;  $h_\theta$  是太阳高度角, 单位为度。

### 4 地表反照率与表层土壤含水量之间的关系

为了更加准确的分析研究地表反照率与表层土壤含水量( $5 \text{ cm}$  深)的关系, 需尽量减少太阳高度角的影响。地表反照率随太阳高度角的增大而减小, 当太阳高度角小于  $40^\circ$  时, 对地表反照率的影响较大, 而当大于  $40^\circ$  时地表反照率变化较为平缓, 趋于稳定(如图 3 所示), 即以后太阳高度角对地表反照率的影响较小。因此, 选取研究时段内太阳高度角大于  $40^\circ$  时的数据, 分析研究地表反照率与表层  $5 \text{ cm}$  深土壤湿度之间的关系, 有效样本数为 14258 个(约占总样本 23.06%), 图 4 为地表反照

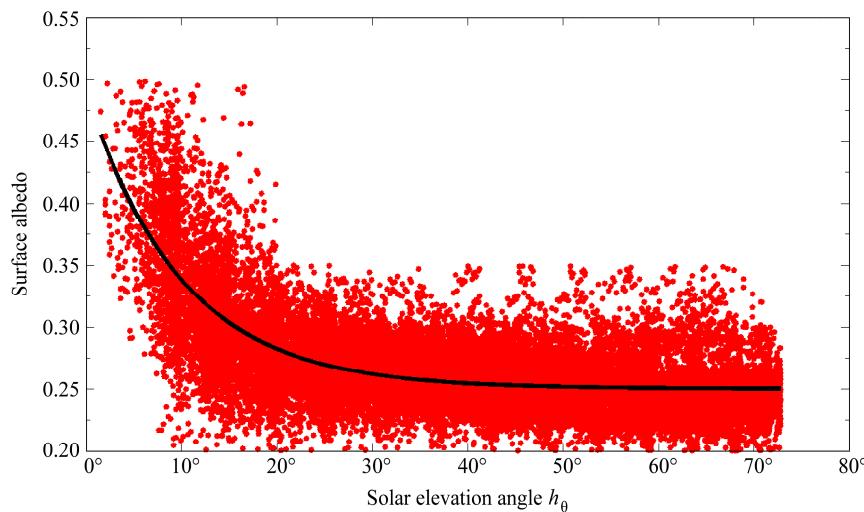


图 3 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角之间的关系

Fig. 3 The relationship between surface albedo and solar elevation angle over the Gobi desert in the Dunhuang region

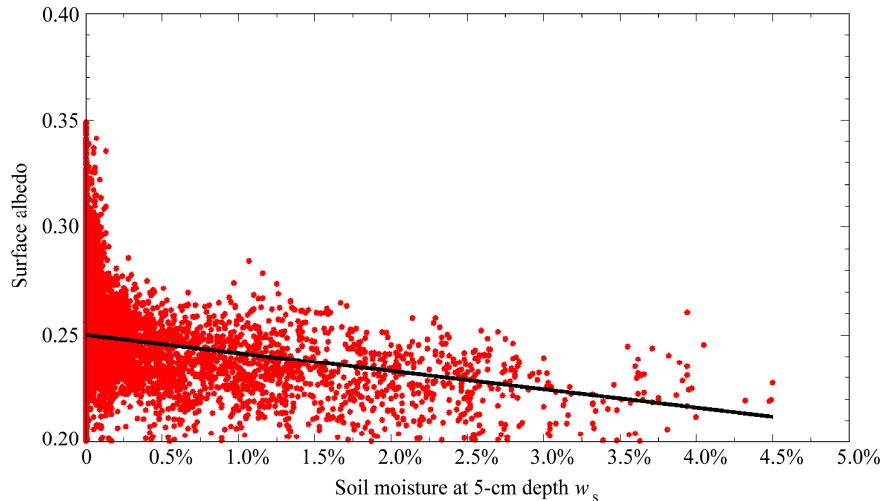


图 4 敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与 5 cm 深土壤湿度之间的关系

Fig. 4 The relationship between surface albedo and 5-cm-depth soil moisture over the Gobi desert in the Dunhuang region

率与 5 cm 深土壤湿度关系图。如图 4 所示, 随着土壤湿度的增大, 地表反照率逐渐减小。

本文依据 Idso et al. (1975) 和 Dickinson and Kenney (1986) 提出的地表反照率与表层土壤含水量呈线性关系, 拟合出敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与 5 cm 深土壤湿度之间的关系式为:

$$\alpha_2 = 0.25 - 0.0085 \times w_s, \quad (4)$$

式中,  $\alpha_2$  为地表反照率,  $w_s$  为 5 cm 深土壤湿度。

敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率随 5 cm 深土壤湿度的增大而减小, 这种变化趋势与 Idso et al. (1975)、张强等 (2003)、张果等 (2010)、刘辉志等 (2008) 和 Liu et al. (2008)、Guan et al. (2009)、Roxy et al. (2010) 和 Wang et al. (2005a) 的研究

结果一致。但是, 张果等 (2010)、刘辉志等 (2008)、Liu et al. (2008)、Guan et al. (2009)、Roxy et al. (2010) 和 Wang et al. (2005a) 所拟合出地表反照率与表层土壤水含量呈  $e$  指数关系, 而本文所拟合出的地表反照率随 5 cm 深土壤湿度关系式与 Idso et al. (1975) 和张强等 (2003) 所拟合的关系相同, 均为线性关系, 只是系数有所不同, 这可能是所研究区域不一样所致。

## 5 地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量二者之间的关系

如上所述, 本文已通过对多年实测资料分析研究, 得出了地表反照率分别随太阳高度角和表层 5

cm 深土壤湿度的变化特征，并且分别拟合出了地表反照率与太阳高度角和 5 cm 深土壤湿度之间的单因子参数化公式。但是，在现实世界中太阳高度角和表层土壤含水量这两个因子同时对地表反照率起作用，共同作用影响着地表反照率及其变化特征。故需将这两因子同时考虑进来，探究并得出更加适合该地区裸土地表反照率与太阳高度角和表层土壤湿度之间的双因子参数化公式。

当探究太阳高度角对地表反照率的影响时，必须剔除土壤湿度的影响，这样拟合出来的关系式才是单一因子太阳高度角对地表反照率的影响。因此，我们可得出干燥土壤地表反照率与太阳高度角之间的关系式，见公式(3)。同理，当探究土壤湿度对地表反照率的影响时，必须剔除太阳高度角的影响，这样拟合出来的关系式才是单一因子土壤湿度对地表反照率的影响。当太阳高度角较高时(大于40°，反照率随太阳高度角基本不变)，此时地表反照率可认为仅受土壤湿度的影响。因此，我们可得出地表反照率与表层5 cm 深土壤湿度之间的关系式，见公式(4)。

观察公式(3)和(4)可知，当表层土壤湿度为零时，即为干土时，此时地表反照率实际上只受太阳高度角的影响，可公式(3)来表达。但是，当表层土壤为干燥土壤时，也即  $w_s = 0$ ，依据公式(4)，此时应有  $\alpha = 0.25$ ，地表反照率为一定值，不能反映出地表反照率“U”型的日变化特征，显然不符合地表反照率的实际变化特征。同时，当  $w_s = 0$  时，地表反照率与表层土壤湿度  $w_s$  无关，其变化只与太阳高度角  $h_\theta$  有关，而式(3)所得到的正好为干燥土壤的地表反照率。

如前所述，实际中我们必须要同时考虑太阳高度角和表层土壤湿度对地表反照率的影响，才能准确地反映和计算出地表反照率的变化特征与大小。因此，我们用公式(3)代替公式(4)中的固定值0.25，便得到了以下太阳高度角和表层土壤湿度对地表反照率的双因子参数化公式：

$$\alpha = 0.25 + 0.24 \times \exp(-0.10 \times h_\theta) - 0.0085 \times w_s, \quad (5)$$

式中， $\alpha$  为地表反照率， $h_\theta$  是太阳高度角， $w_s$  为 5 cm 深土壤湿度。

## 6 模拟验证与对比分析

敦煌荒漠戈壁地区地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量之间的双因子参数化公式(5)

在该地区的适用性如何呢？是否能够准确地再现地表反照率和反射辐射的变化特征？能否在量值上准确反演出地表反照率与反射辐射的值？这些是考查我们拟合公式的成败所在，也是本文需解决的最核心的问题。因此，需对拟合公式进行模拟验证，与实测资料进行对比分析，探究参数化公式(5)的适用性。本文选取 2002 年 6 月 1 日~9 月 30 日该地区的实测地表净辐射四分量和土壤湿度观测资料，所用观测仪器及数据采集和后续处理说明等，详见本文第 2 节。

图 5 分别给出了敦煌荒漠戈壁地区 2002 年 6、7、8 和 9 月裸土地表反照率平均日变化的模拟值与实测值对比分析图。如图所示，在考虑太阳高度角和表层土壤湿度二因子的双重作用下，用双因子参数化公式(5)能很好的再现地表反照率的“U”型日变化特征，模拟值与实测值无论是变化趋势还是量值上，均表现出了很好的一致性。6、7、8 和 9 月份地表反照率的模拟值与实测值的相关系数的平方分别为： $R_6^2 = 0.9642$ ， $R_7^2 = 0.8690$ ， $R_8^2 = 0.8952$ ， $R_9^2 = 0.8122$ ，可见模拟值与实测值相关性很好。图 6 是地表反照率平均日变化的实测值与模拟值对比分析图，从此图中可看出，在早晚太阳高度角较小时，也即地表反照率较大时，参数化公式所模拟的地表反照率相对于高太阳高度角时效果较差，相比之下，量值上也有些偏差。观察双因子参数化公式(5)可知，此公式所模拟出的地表反照率的日变化特征呈绝对“U”型，而实际观测中，反照率的日变化绝大多数大体上呈“U”型。但是，在实测中，很多时候因受当时具体气象和环境等因素的影响，地表反照率的日变化又表现的很不规则，不再呈规则的“U”型。此时，公式(5)将不能准确模拟出此种情形下地表反照率的日变化特征。同时，这可能还与本文研究时剔除了日出、日落时误差相对较大的地表辐射，进而导致早晚低太阳高度角时较大的地表反照率未参与拟合有关，这些需在今后做进一步深入地研究。

本文又分别给出了敦煌荒漠戈壁地区 2002 年 6、7、8 和 9 月裸土地表反射辐射平均日变化的模拟值与实测值对比分析图，如图 7 和图 8 所示。由公式(5)计算得到地表反照率，进而计算得到的地表反射辐射与实测值的日变化特征高度一致，模拟值与实测值相关性非常好。6、7、8 和 9 月份地表反射辐射的模拟值与实测值的相关系数的平方

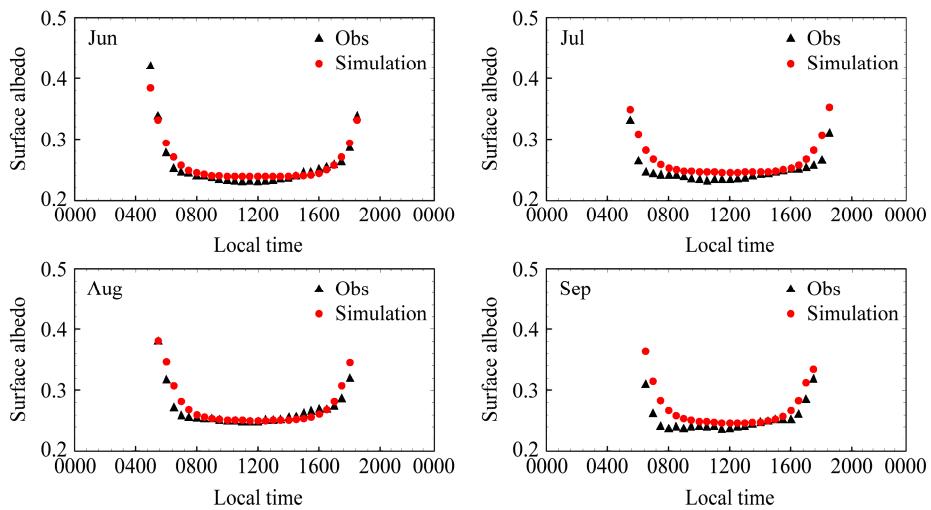


图 5 2002 年 6~9 月敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率平均日变化特征图。黑色▲为实测值，红色●为模拟值

Fig. 5 The mean diurnal variation characteristics of bare soil surface albedo over the Gobi desert in the Dunhuang region during June to September, 2002

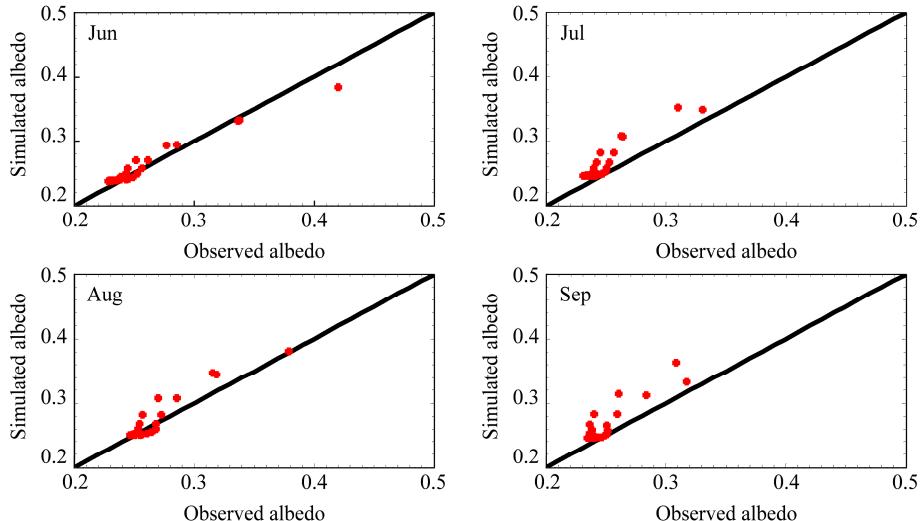


图 6 2002 年 6~9 月敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率平均日变化实测值与模拟值的比较

Fig. 6 The comparison between measured and simulated mean diurnal variations of bare soil surface albedo over the Gobi desert in the Dunhuang region during June to September, 2002

分别为:  $R_6^2 = 0.9987$ ,  $R_7^2 = 0.9976$ ,  $R_8^2 = 0.9979$ ,  $R_9^2 = 0.9963$ , 每个月的相关系数均在 0.99 以上。

通过上述分析研究可知, 本文利用实测资料, 在试验基础上所拟合的敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角和地表反照率的双因子参数化公式, 不仅能够很好的再现地表反照率和反射辐射的日变化特征, 而且能够准确的计算出地表反射辐射的量值, 为进一步准确计算地表能量平衡和热状况奠定了基础。同时, 也为数值模式中准确参数化裸土地表反照率提供了参考。

## 7 总结与讨论

本文利用在敦煌站观测资料, 在试验基础上,

分析研究我国西北干旱区敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角和土壤湿度二者之间的关系, 并拟合出了地表反照率与太阳高度角和表层土壤含水量的双因子参数化公式, 提出一种更加适合该地区的裸土地表反照率参数化方案, 并用该地区实测资料对拟合公式进行了对比验证, 具体结论如下:

(1) 地表反照率随太阳高度角的增大而减小, 当太阳高度角大于 40°时, 地表反照率趋于稳定, 与太阳高度角呈  $e$  指数关系, 拟合公式为:  $\alpha = 0.25 + 0.24 \times \exp(-0.10 \times h_\theta)$ 。

(2) 地表反照率与 5 cm 深土壤湿度呈线性关系, 反照率随着土壤含水量的增大而逐渐减小, 拟

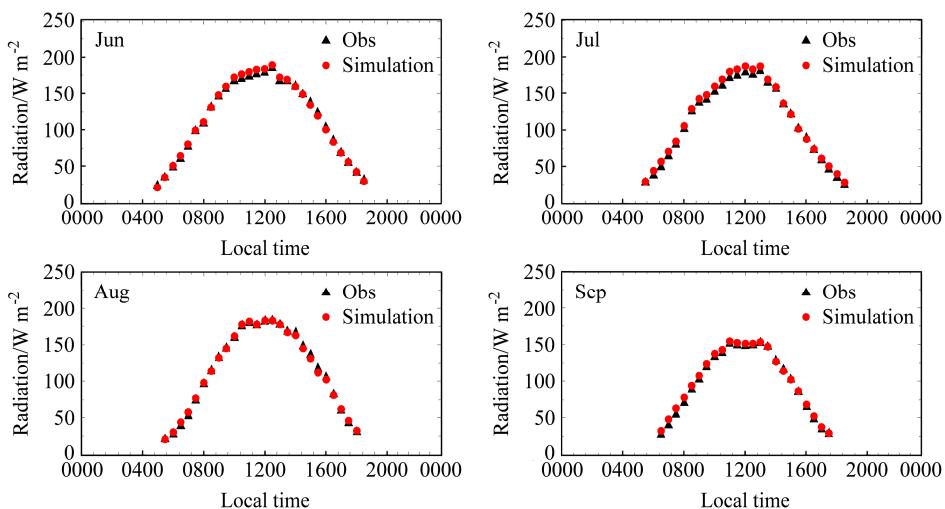


图 7 2002 年 6~9 月敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反射辐射平均日变化特征。黑色▲为实测值，红色●为模拟值

Fig. 7 The mean diurnal variation characteristics of bare soil reflected radiation over the Gobi desert in the Dunhuang region during June to September, 2002

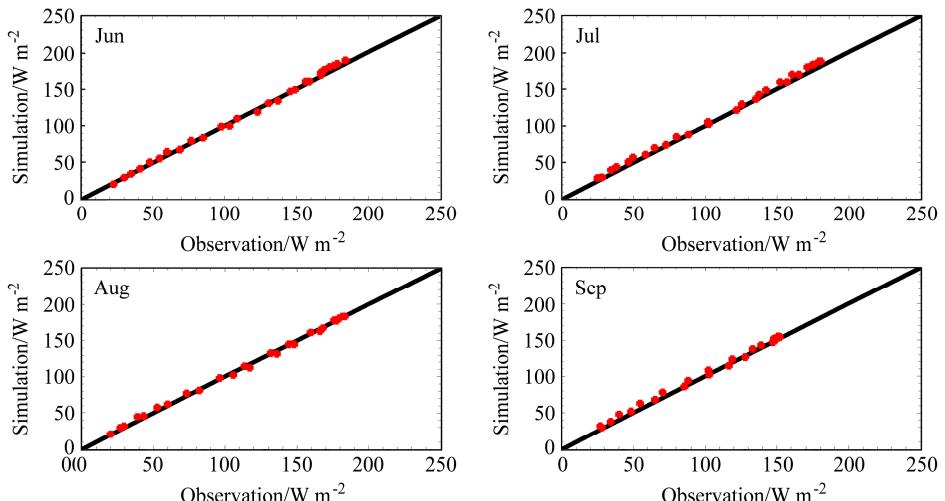


图 8 2002 年 6~9 月敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反射辐射平均日变化实测值与模拟值的比较

Fig. 8 The comparison between measured and simulated mean diurnal variations of bare soil surface reflected radiation over the Gobi desert in the Dunhuang region during June to September, 2002

合公式为： $\alpha = 0.25 - 0.0085 \times w_s$ 。

(3) 根据地表反照率与太阳高度角度和土壤湿度两因子之间的单因子参数化公式，提出一种更加适合该地区的裸土地表反照率参数化方案，拟合出了敦煌荒漠戈壁地区裸土地表反照率与太阳高度角和土壤含水量的双因子参数化公式为：

$$\alpha = 0.25 + 0.24 \times \exp(-0.10 \times h_\theta) - 0.0085 \times w_s$$

(4) 选取 2002 年 6~9 月该地区实测资料对拟合的参数化公式进行模拟验证，通过与实际观测值对比分析发现，本文所提出的地表反照率参数化方案能够很好地再现地表反照率的“U”型日变化特征，可准确地模拟出地表反照率的动态变化趋势。同时，由此参数化方案计算得到的地表反射辐射也

很好地再现了地表反射辐射的日变化特征，其量值与实测值基本一致，相差很小。

值得指出的是，本文据实测资料所提出敦煌荒漠戈壁地区地表反照率与太阳高度角和表层土壤湿度的双因子参数化公式如何更加准确的模拟出日出和日落低太阳高度角时地表反照率的值，以及该公式能否耦合到天气和气候模式中去，还需更多更具代表性的资料去分析研究与验证，这也是后续研究工作的重点内容。

**致谢** 感谢审稿专家及《大气科学》编辑部对本文所提的宝贵意见。感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所鲍艳副研究员对本文在修改过程中给予的悉心指导。感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所候旭宏高级工程师对本文所用野外台站仪器的安装与维护、观测数据的

采集与后期分析处理等工作的帮助。本文的完成与大家的鼎力相助密不可分，在此表示衷心的感谢。

## 参考文献 (References)

- Baldocci D, Kelliher F M, Black T A, et al. 2006. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange [J]. *Glob. Change Biol.*, 6 (Suppl.1): 69–83.
- 鲍艳, 吕世华, 奥银焕, 等. 2007. 反照率参数化改进对裸土地表能量和热过程模拟的影响 [J]. 太阳能学报, 28 (7): 775–782. Bao Yan, Lü Shihua, Ao Yinhuan, et al. 2007. Improvement of surface albedo parameterization over bare soil on surface radiation and thermal process modeling [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica* (in Chinese), 28 (7): 775–782.
- Betts A K, Ball J H. 1997. Albedo over the boreal forest [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D24): 28901–28910.
- Briegleb B P, Minnis P, Ramanthan V, et al. 1986. Comparison of regional clear-sky albedos inferred from satellite observations and model computations [J]. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 25 (2): 214–226.
- Cess R D. 1987. Biosphere-albedo feedback and climate modeling [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35 (9): 1765–1767.
- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 (428): 193–202.
- Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (9): 1366–1368.
- Dickinson R E, Kenney P J. 1986. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model National Center for Atmospheric Research [R]. Boulder Co. Teth. Note Tn-275+STR, 12–51.
- Fuller D O, Ottke C. 2002. Land cover, rainfall and land–surface albedo in west Africa [J]. *Climatic Change*, 54 (1–2): 181–204.
- Guan X D, Huang J P, Guo N, et al. 2009. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (4): 692–700.
- Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. 1993. The Project for intercomparison of land-surface parameterization schemes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74 (7): 1335–1349.
- Henderson-Sellers A, Pitman A J, Love P K, et al. 1995. The project for intercomparison of land surface parameterization schemes (PILPS): Phase 2 and 3 [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76 (4): 489–503.
- Huang Ronghui, Wei Guoan, Zhang Qiang, et al. 2005. The preliminary scientific achievement of the Field Experiment on Air-Land interaction in the Arid Area of Northwest China (NWC-AIEX) [C]// Proceedings of the 4th CTWF International Workshop on the Land Surface Models and Their Applications. 15–18 Nov., 2005, Zhuhai, China.
- 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最近进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 189–210.
- Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, 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 Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 189–210.
- Idso S B, Jackson R D, Reginato R J, et al. 1975. The dependence of bare soil albedo on soil water content [J]. *J. Appl. Meteor.*, 14 (1): 109–113.
- Jin Yufang, Schaaf Crystal B, Woodcock Curtis E, et al. 2003. Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 2. Validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D5): 4159, doi:10.1029/2002JD002804.
- Kimes D S. 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies [J]. *J. Appl. Opt.*, 22 (9): 1364–1372.
- Laval K, Picon L. 1986. Effect of a change of the surface albedo of the Sahel on climate [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43 (21): 2418–2429.
- 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 2008. 影响莫高窟小气候的环境因子对比分析 [J]. 干旱气象, 26 (2): 25–29. Li Hongshou, Wang Wanfu, Zhang Guobin, et al. 2008. Contrast analysis of environment factors influencing microclimate of Mogao grottoes [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 26 (2): 25–29.
- 李伟平, 吴国雄, 刘辉. 2000. 地表反照率的改变影响夏季北非副热带高压的数值模拟 [J]. 气象学报, 58 (1): 26–39. Li Weiping, Wu Guoxiong, Liu Hui. 2000. A numerical simulation study of the impacts of surface albedo on the summer time North Africa subtropical high [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (1): 26–39.
- 刘辉志, 涂钢, 董文杰. 2008. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征 [J]. 科学通报, 53 (10): 1220–1227. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie. 2008. Variation characteristics of surface albedo over different underlying surfaces in semi-arid area [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 53 (10): 1220–1227.
- Liu H Z, Wang B M, Fu C B. 2008. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, northeastern China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (5): 757–764.
- 隆霄, 王澄海, 郭江勇, 等. 2003. 干旱区天气、气候数值模拟的研究进展 [J]. 干旱气象, 21 (4): 59–65. Long Xiao, Wang Chenghai, Guo Jiangyong, et al. 2003. Developments of study on climate and weather numerical simulation in arid area [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 21 (4): 59–65.
- Monteith J L, Szeice G. 1961. The radiation balance of bare soil and vegetation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 87 (372): 159–170.
- Otterman J, Chou M D, Arking A. 1984. Effects of nontropical forest cover on climate [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (5): 762–767.
- 帕尔特里奇·G W, 普特拉·C M R. 1981. 气象学和气候学中的辐射过程 [M]. 吕达仁, 黄润恒, 林海, 译. 北京: 科学出版社, 84–87. Paltridge G W, Pratt C M R. 1981. *The Radiation Processes in Meteorology and Climatology* (in Chinese) [M]. Lü Daren, Huang Runheng, Lin Hai, Translated. Beijing: Science Press, 84–87.
- Ranson K J, Irson J R, Daughtry C S T. 1991. Surface albedo from bidirectional reflectance [J]. *Remote Sens. Environ.*, 35 (2–3): 201–211.
- Roxy M S, Sumithranand V B, Renuka G. 2010. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal diffusivity at astronomical observatory, Thiruvananthapuram, south Kerala [J]. *Journal of Earth System Science*, 119 (4): 507–517.
- Schaaf C B, Gao F, Strahle A H, et al. 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS [J]. *Remote Sens. Environ.*, 83 (1–2): 135–148.
- Sud Y C, Fennessy M J. 1982. A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM [J]. *J. Climatol.*, 2 (2): 105–125.

- Tsvetsinskaya E A, Schaaf C B, Gao F, et al. 2002. Relating MODIS-derived surface albedo to soils and rock types over northern Africa and the Arabian peninsula [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (9): 671–674, doi:10.1029/2001GL014096.
- 王超, 韦志刚, 李振朝. 2010. 敦煌戈壁气象塔站资料的质量控制 [J]. 干旱气象, 28 (2): 121–127. Wang Chao, Wei Zhigang, Li Zhenchao. 2010. A quality control routine for Dunhuang Gobi meteorology tower data [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 28 (2): 121–127.
- 王鸽, 韩琳. 2010. 地表反照率研究进展 [J]. 高原山地气象研究, 30 (2): 79–83. Wang Ge, Han Lin. 2010. Progress in the research of surface albedo [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 30 (2): 79–83.
- Wang K C, Wang P C, Liu J M, et al. 2005a. Variation of surface albedo and soil thermal parameters with soil moisture content at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 116 (1): 117–129.
- 王胜, 张强, 卫国安. 2004. 敦煌干旱区一次降水过程陆面特征模拟 [J]. 干旱气象, 2004, 22 (4): 46–50. Wang Sheng, Zhang Qiang, Wei Guoan. 2004. Simulation of land-surface characteristic under precipitation condition in Dunhuang arid region [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 22 (4): 46–50.
- 王胜, 张强, 卫国安. 2006. 降水条件下的典型干旱区陆面特征模拟验证 [J]. 地球物理学报, 49 (2): 383–390. Wang Sheng, Zhang Qiang, Wei Guoan. 2006. Modeling land-surface characteristics under precipitation in a typical arid region of China [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49 (2): 383–390.
- Wang S, Grant R F, Verseghy D L, et al. 2001. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS—the Canadian Land Surface Scheme [J]. *Ecol. Model.*, 142 (1–2): 135–142.
- Wang S S, Grant R F, Verseghy D L, et al. 2002a. Modelling carbon dynamics of boreal forest ecosystems using the Canadian Land Surface Scheme [J]. *Climatic Change*, 55 (4): 451–477.
- Wang S S, Grant R F, Verseghy D L, et al. 2002b. Modeling carbon-coupled energy and water dynamics of a boreal aspen forest in a general circulation model land surface scheme [J]. *Int. J. Climatol.*, 22 (10): 1249–1265.
- Wang Z, Zeng X, Barlage M. 2004. Using MODIS BRDF and albedo data to evaluate global model land surface albedo [J]. *J. Hydrometeor.*, 5 (1): 3–14.
- Wang Z, Barlage M, Zeng X B, et al. 2005b. The solar zenith angle dependence of desert albedo [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (5): L05403, doi:10.1029/2004GL021835.
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文. 2006. 敦煌戈壁不同近地层大气稳定度下的感热交换系数 [J]. 高原气象, 25 (5): 834–839. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen. 2006. Transfer coefficients of sensible heat under the atmospheric stability in near surface layer over Dunhuang Gobi [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25 (2): 834–839.
- 吴艾笙, 钟强. 1993. 黑河实验区若干下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系 [J]. 高原气象, 12 (2): 147–155. Wu Aisheng, Zhong Qiang. 1993. Relationships between global radiation, surface albedo and solar elevation angle for several underlying surfaces in the HEIHE Experimental area [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 12 (2): 147–155.
- 肖登攀, 陶福禄, Moiwo Juana P. 2011. 全球变化下地表反照率研究进展 [J]. 地球科学进展, 26 (11): 1217–1224. Xiao Dengpan, Tao Fulu, Moiwo Juana P. 2011. Research progress on surface albedo under global change [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 26 (11): 1217–1224.
- Yang F L, Mitchell Kenneth, Hou Y T, et al. 2008. Dependence of land surface albedo on solar zenith angle: Observations and model parameterization [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47 (11): 2963–2982.
- Zhang Q, Cao X Y, Wei G A, et al. 2002. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region [J]. *Ads. Atomos. Sci.*, 19 (1): 121–135.
- Zhang Q, Huang R H. 2004. Parameters of land-surface processes for Gobi in north-west China [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 110 (3): 471–478.
- 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 Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (2): 245–254.
- 张强, 王胜, 卫国安. 2003. 西北地区戈壁局地陆面物理参数的研究 [J]. 地球物理学报, 46 (5): 616–623. Zhang Qiang, Wang Sheng, Wei Guoan. 2003. A study on parameterization of local land-surface physical processes on the Gobi of Northwest China [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 46 (5): 616–623.
- 张强, 黄荣辉, 王胜, 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 Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 20 (4): 427–441.
- 张果, 周广胜, 阳伏林. 2010. 内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征 [J]. 生态学报, 30 (24): 6943–6951. Zhang Guo, Zhou Guangsheng, Yang Fulin. 2010. Analysis on dynamic characteristics of surface albedo over a desert steppe in Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 30 (24): 6943–6951.
- 郑志远, 韦志刚, 李振朝, 等. 2012. 敦煌戈壁秋初太阳分光辐射及其反照率特征 [J]. 太阳能学报, 33 (11): 1937–1943. Zheng Zhiyuan, Wei Zhigang, Li Zhenchao, et al. 2012. Characteristics of solar spectral radiation and albedo during early autumn in Dunhuang Gobi [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica* (in Chinese), 33 (11): 1937–1943.
- Zhou Degang, Huang Ronghui. 2011. Characterization of turbulent flux transfer over a Gobi surface with quality-controlled observations[J]. *Science China Earth Sciences*, 54 (5): 753–763.