

陈锋, 谢正辉. 2009. 基于中国植被数据的陆面覆盖及其对陆面过程模拟的影响 [J]. 大气科学, 33 (4): 681–697. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2009. A land cover dataset based on Chinese vegetation data and its impact on land surface simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 681–697.

基于中国植被数据的陆面覆盖及其对陆面过程模拟的影响

陈锋^{1,2} 谢正辉^{1*}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文基于中国 1:100 万植被图、马里兰大学 AVHRR 森林覆盖资料和中国 753 个气象站点 40 年的降水气温资料, 发展了一套用于气候模拟的中国陆面覆盖资料 (Chinese land cover derived from vegetation map, 简称 CLCV)。该套资料与 CLM (Community Land Model) 原来所用的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 陆面覆盖资料相比有较大不同: 其中裸土比例减少了 14.5%, 森林、灌木、草原和农作物比例分别增加了 3.3%、4.8%、4.4% 和 0.3%, 冰川、湖泊和湿地比例分别增加了 0.4%、0.8% 和 0.6%。将 CLCV 和 MODIS 资料分别与全国土地资源概查汇总结果分省统计资料和基于中国 1 km 土地利用图的土地利用资料比较表明, CLCV 与两者较为接近。最后, 利用 CLM 模式分别采用 CLCV 与 MODIS 陆面覆盖资料在中国区域内进行数值模拟, 结果显示, 使用 CLCV 资料所模拟的蒸散增加了约 7.7 mm/a; 地表反照率、感热和径流分别减小了约 0.7%、0.3 W/m² 和 7.6 mm/a; 与 MODIS 卫星反演地表反照率和 GRDC (Global Runoff Data Centre) 径流资料比较表明, 利用 CLCV 资料所模拟的地表反照率有一定改进, 并能基本模拟出径流分布趋势。

关键词 中国植被图 陆面覆盖 通用陆面模式 CLM 陆面过程模拟

文章编号 1006-9895 (2009) 04-0681-17

中图分类号 P461

文献标识码 A

A Land Cover Dataset Based on Chinese Vegetation Data and Its Impact on Land Surface Simulations

CHEN Feng^{1,2} and XIE Zhenghui^{1*}

1 *Institute of Atmospheric and Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract The authors develop a new land cover dataset (CLCV) based on the 1:1000000 Vegetation Atlas of China, the AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) Continuous Fields Tree Cover of UMD (University of Maryland), and the precipitation and temperature data of 753 weather stations in China, and investigate its effects on the energy and water balance over continental China. Compared to the MODIS data, the CLCV data have a decrease of 14.5% in bare soil fraction, which is realized through increased tree, shrub, grass, crop, glacier, lake, and wet land at 3.3%, 4.8%, 4.4%, 0.3%, 0.4%, 0.8%, and 0.6%, respectively. Compared to the statistic

收稿日期 2008-01-16, 2008-07-03 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-126-2, KZCX2-YW-217, 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB321703

作者简介 陈锋, 男, 1982 年出生, 博士研究生, 目前主要从事陆面过程模式发展研究。E-mail: chenfeng@mail.iap.ac.cn

* 通讯作者: E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

data and land use data, the CLCV data is much closer to them than the MODIS data. The simulation results show that the simulated evapotranspiration increases about 7.7 mm/a, and the simulated surface albedo, heat flux, and runoff decrease about 0.7%, 0.3 W/m², and 7.6 mm/a, respectively; compared to the MODIS albedo data and the GRDC runoff data, the simulated surface albedo and runoff by the CLM with CLCV data get much closer to the observed data than that with the MODIS data.

Key words vegetation atlas of China, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), land cover, CLM (Community Land Model), land surface simulation

1 引言

陆地覆盖通过影响地表反照率、下垫面粗糙度,进而影响陆面和大气之间的水分能量平衡,从而影响气候与环境。20 世纪 80 年代以来,人们开始认识到地表覆盖类型对气候模拟的影响 (Dickinson, 1984; Sellers, 1987), 显式地考虑了植被在地表水分及能量平衡中的作用, 以及土壤、植被与大气间复杂的交换过程, 并在此基础上发展了一系列陆面模式, 如 BATS (Dickinson et al., 1986)、SiB (Sellers et al., 1986)、SSiB (Xue et al., 1991)、IAP94 (Dai et al., 1997)、LSM (Bonan, 1995)、SiB2 (Sellers et al., 1996)、CoLM (Dai et al., 2003)、CLM (Oleson et al., 2004; Dickinson et al., 2006) 等。Henderson-Sellers et al. (1993) 利用 GCM 模式进行了热带雨林砍伐的试验, 描述了当亚马孙流域森林被草地取代后地表温度及降水的响应。Twine et al. (2004) 使用陆面模式 IBIS 研究发现: 地表覆盖由森林变为农田后年平均净辐射和蒸散变小、径流增加, 而由草原变为农田后, 结果完全相反。Benitez et al. (2004) 选取不同的地表覆盖资料, 发现模式的模拟结果的幅度变化最大可达 45%。在国内, 中国科学家对东亚或中国区域植被覆盖变化的气候影响进行的数值模拟研究 (Xue, 1996; 吕世华等, 1999; 符淙斌等, 2001; 郑益群等, 2002; Gao et al., 2003; 郭建侠等, 2004; 丁一汇等, 2005; 曹丽娟等, 2008) 表明: 地表覆盖变化对中国区域地面气温、降水等具有明显影响, 显著的植被变化还可影响到东亚夏季风的强度变化。以上研究表明, 陆面覆盖对气候模拟有重要影响, 一个合理的陆面覆盖对于陆面水分能量过程和气候模拟是十分重要的。

目前, 用于陆面过程模式及气候系统模式中的陆面覆盖资料主要由卫星遥感获得, 如 IGBP

(Loveland et al., 2000)、UMD (Hansen et al., 2000)、GLC2000 (Fritz et al., 2003)、MODIS (Strahler et al., 1999) 等。McCallum et al. (2006) 比较了这四种常用卫星反演的地表覆盖资料, 发现除在格陵兰岛、撒哈拉沙漠、亚马孙流域等冰盖、沙漠、热带雨林地区完全一致外, 其余地区都存在一定的差异, 尤其是在亚洲地区, 只有 4% 的区域完全一致。由此可见, 卫星遥感反演所得的地表覆盖资料存在着一定的不确定性 (Hansen et al., 2003)。中国科学院植物研究所等 50 多个单位根据半个世纪以来全国各地开展植被调查所积累的资料, 结合航空遥感和卫星影像等现代技术以及地质学、土壤学和气候学等最新的研究成果绘制而成的中国 1:100 万植被图, 较真实地反映了中国区域实际陆面覆盖状况, 国内外许多研究都以此信息作为参考标准 (朴世龙等, 2001; 师庆东等, 2003; 刘勇洪等, 2004, 2006; Fang et al., 2005; Pan et al., 2005)。为减少陆面覆盖资料不确定性对陆面过程模式模拟的影响, 本研究以中国 1:100 万植被图为基础, 结合马里兰大学发展的森林覆盖资料 (AVHRR Continuous Fields Tree Cover data) 和中国 753 个气象站点 40 年的气候 (降水、气温) 资料, 发展了一套用于气候模拟的基于 NCAR/CLM 植被功能型分类的中国陆面覆盖资料, 与 MODIS 陆面覆盖资料进行比较。并利用 NCAR 的陆面过程模式 CLM, 分别采用这两套陆表覆盖资料在中国区域进行数值模拟, 以此来探讨本研究所生成的陆面覆盖资料对陆面水分和能量过程模拟的影响。

2 基于中国植被数据的陆面覆盖资料

本节将简单介绍中国 1:100 万植被图、AVHRR 森林覆盖资料, 并在这些资料的基础上发展一套用于气候模拟的基于 NCAR/CLM 植被功能型分类的

中国区域陆面覆盖资料。

2.1 中国 1:100 万植被图

中国 1:100 万植被图是由植被生态学家侯学煜院士主编,中国科学院有关研究所、有关部委和各省区有关部门、高等院校等 53 个单位 250 多位专家共同编制的国家自然资源和自然条件的基本图件(侯学煜等, 2001)。它是根据半个世纪以来全国各地开展植被调查所积累的第一手资料,结合航空遥感和卫星影像等现代技术及相关的地质学、土壤学和气候学最新的研究成果编制而成,详细反映了我国植被分类系统(吴征镒, 1980)中 11 个植被类型组、54 个植被型的 796 个群系和亚群系植被单位的分布状况(具体植被类型组及植被类型见图 1)、水平地带性和垂直地带性分布规律,同时反映了我国 2000 多个植物优势种、主要农作物和经济作物的实际分布状况及优势种与土壤和地面地质的密切关系,为开展亚洲乃至全球植被和自然环境的研究、生物多样性关键地区和特有种分布中心的确定等提供了系统而丰富的参考资料(王献溥, 2001)。

2.2 AVHRR 森林覆盖资料

AVHRR 森林覆盖资料是由马里兰大学(University of Maryland)基于 1992~1993 年 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 资料于 2000 年发展的一套全球 1 km 森林连续分布(Continues Field Tree Cover) 资料(DeFries et al., 2000)。该资料根据基于 IGBP 分类的 AVHRR 地表覆盖数据(Fritz et al., 2003) 及 IGBP 分类系统对森林的定义,利用一个线性混合模型来约束森林覆盖比例的最大、最小值,并结合叶子寿命及叶子类型,从而得到的全球 1 km 森林覆盖、常绿森林覆盖、落叶森林覆盖、阔叶森林覆盖和针叶森林覆盖比例资料。

2.3 中国区域陆面覆盖资料(CLCV)

用于气候模拟的植被功能型分类是基于 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) 的核心计划 GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystem) 提出来的(Walker, 1994)。它将在一组环境条件下具有相同机制相似反应的有机体组归为一类,认为同一类植被功能型具有类似的气候反馈作用(Noble et al., 1996; Shao et al., 1996; Skarpe, 1996)。NCAR/CLM 模式以植被功能型为基础划分陆面覆盖。它将陆面覆盖类型分为冰

川、湖泊、湿地及 16 类植被功能型:裸土、温带常绿针叶林、寒带常绿针叶林、寒带落叶针叶林、热带常绿阔叶林、温带常绿阔叶林、热带落叶阔叶林、温带落叶阔叶林、寒带落叶阔叶林、温带常绿阔叶灌木、温带落叶阔叶灌木、寒带落叶阔叶灌木、极地 C3 草、非极地 C3 草、C4 草和农作物。

本研究按上述陆面覆盖分类方式,结合马里兰大学 AVHRR 森林覆盖资料和全国 753 个气象站点降水和气温(T) 资料,从基于中国植被分类系统的中国植被图中提取冰川、湖泊、湿地和 16 类植被功能型的面积比例,生成一种新的陆面覆盖数据(图 1)。具体步骤如下:

(1) 将植被图中的 11 类植被类型组及 54 类植被类型归为裸土、森林、灌木、草、农作物、冰川、湖泊、湿地共 8 类,并将植被图处理成精度为 30 秒的栅格数据,以便于生成模式需要的网格数据;

(2) 基于马里兰大学 AVHRR 森林覆盖资料,以植被图中森林覆盖面积比例为总量控制,将森林划分为常绿针叶林、落叶针叶林、常绿阔叶林和落叶阔叶林四大类;

(3) 以全国 753 个气象站点 1960~1999 年的日平均降水、气温资料为基础,用距离平方反比法插值到全国 4196 个 0.5° (经度) $\times$ 0.5° (纬度) 网格,得到 40 年平均气候态降水、气温和积温(GDD) 资料,采用 Nemani et al. (1996) 提出的划分规则,将森林、灌木、草原继续划分为热带、温带和寒带;

(4) 以面积为权重,将 30 秒的资料聚集为 0.5° 的模式输入数据。

为方便描述,将新发展的陆面覆盖资料命名为基于植被图的中国陆面覆盖资料(Chinese Land Cover derived from Vegetation map, 简称 CLCV)。

3 CLCV 与 MODIS 陆面覆盖资料的比较及验证

本节将对新发展的陆面覆盖资料 CLCV 进行评估,并比较 CLCV 与 MODIS 陆面覆盖资料在中国区域典型气候区域的差别。以多年平均降水量 P 为标准,将中国区域划分为四个典型气候区:干旱区($P \leq 200$ mm)、半干旱区($200 \text{ mm} < P \leq 400$ mm)、半湿润区($400 \text{ mm} < P \leq 800$ mm)、湿润区($P > 800$ mm)(中华人民共和国年鉴社, 2006)。

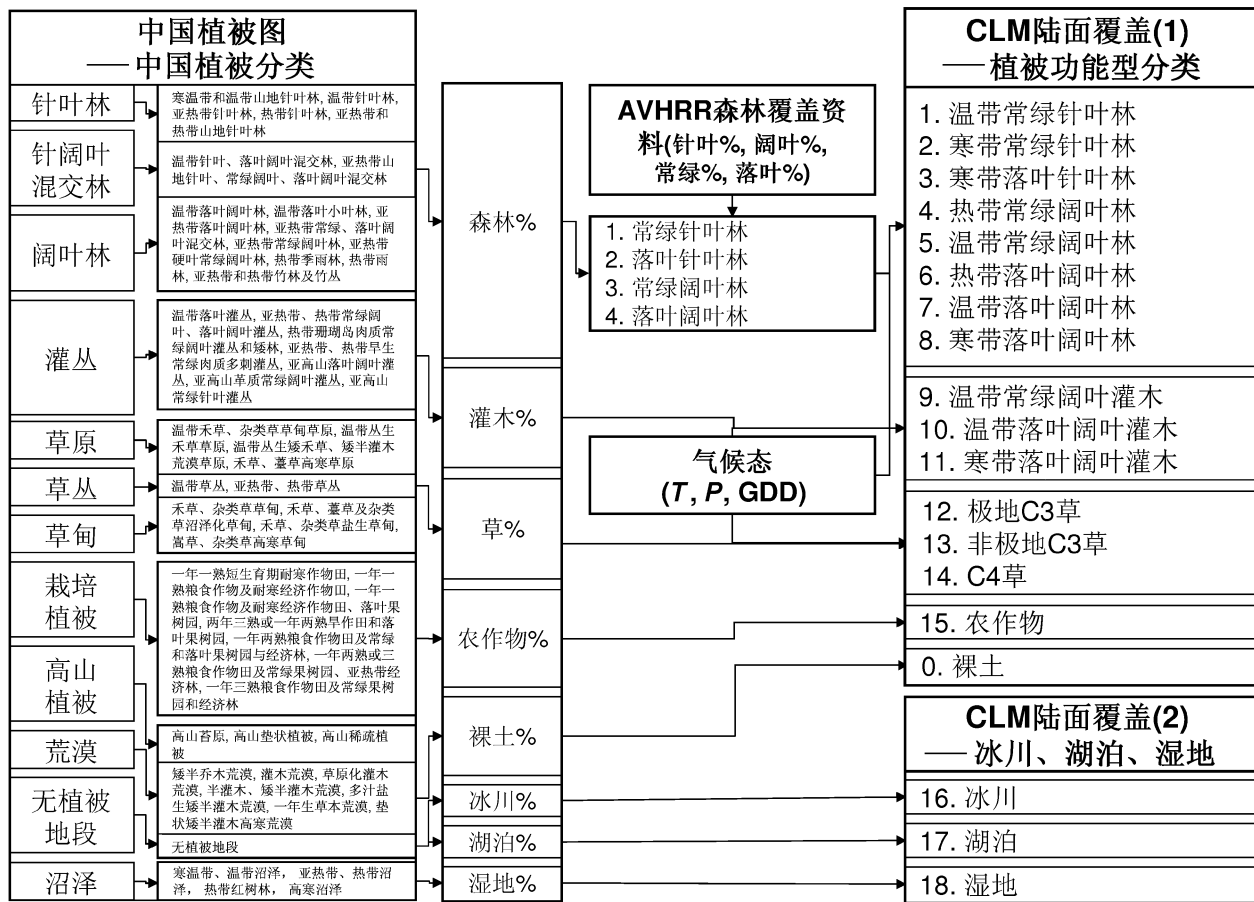


图1 中国陆面覆盖资料 (CLCV) 生成示意图

Fig. 1 Schematic of the generation of Chinese Land Cover derived from Vegetation map (CLCV)

3.1 CLCV 与 MODIS 陆面覆盖资料的比较

表1为整个中国区域及下分的四个子区域内, CLCV和MODIS陆面覆盖资料中各种覆盖类型所占的面积百分比。由表1可知,就整个中国区域而言,CLCV中裸土的分布比MODIS陆面覆盖资料偏小14.5%,森林、灌木、草和农作物总比例均有不同程度的偏大,温带落叶阔叶林、温带落叶灌木、C3草偏大较多,冰川、湖泊和湿地也有略微偏大。CLCV和MODIS资料在半干旱区差别最大:主要是由于在青藏高原及内蒙古等地区,MODIS资料中主要为裸土或是灌木,而CLCV中主要为草;差别最小的为半湿润区:主要差别是由裸土、落叶阔叶林和温带落叶阔叶灌木造成的。图2及图3是CLCV与MODIS资料中主要地表覆盖的分布图。

裸土: CLCV与MODIS陆面覆盖资料相差最大的是裸土,其面积比例从MODIS资料中的

36.9%减小为CLCV中的22.4%(见表1)。由图2a和2g可以看出,两份资料中裸土主要分布在多年平均降水量小于200mm的干旱区,青藏高原西部北部、甘肃西部和内蒙古中东部等区域差别尤为显著。在这些地区,CLCV中的裸土比例比MODIS资料有不同程度的偏小。

针叶林: CLCV中针叶林的面积比例与MODIS陆面覆盖资料相当(CLCV为6.0%,MODIS为6.7%,见表1)。由图2b和2h可知,针叶林主要分布在东北大、小兴安岭长白山地区、秦岭、云贵高原及东南沿海等湿润半湿润地区,且在东北CLCV略微偏大,而在东南沿海CLCV略微偏小。

阔叶林: CLCV中阔叶林的面积比例比MODIS陆面覆盖资料偏大约4%(CLCV为10.7%,MODIS为6.7%,见表1)。由图2c和2i可知,阔叶林主要分布在东北大、小兴安岭长白山地区、云贵高原及东南沿海等湿润半湿润地区,尤其是分布

表 1 整个中国区域、干旱区、半干旱区、半湿润区、湿润区 CLCV 和 MODIS 陆面覆盖资料各类陆面覆盖的面积百分比及其差值 (C-M)
Table 1 Land Cover Type Percentage Composition for MODIS data and CLCV data in the whole China, the arid, semi-arid, semi-humid, and humid regions of China, and their differences (C-M)

陆面覆盖类型	全国				干旱区				半干旱区				半湿润区				湿润区	
	MODIS	CLCV	C-M	MODIS	CLCV	C-M	MODIS	CLCV	C-M	MODIS	CLCV	C-M	MODIS	CLCV	C-M	MODIS	CLCV	C-M
裸土	36.9%	22.4%	-14.5%	93.0%	71.3%	-21.8%	62.7%	25.7%	-37.0%	16.9%	5.4%	-11.5%	2.2%	1.3%	-0.9%			
温带常绿针叶林	4.5%	4.3%	-0.2%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	2.2%	4.1%	1.9%	12.4%	9.9%	-2.5%			
寒带常绿针叶林	2.2%	1.7%	-0.5%	0.1%	0.0%	-0.1%	0.5%	0.3%	-0.2%	5.4%	4.8%	-0.6%	1.5%	0.4%	-1.1%			
寒带落叶针叶林	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-			
热带常绿阔叶林	0.1%	0.1%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.4%	0.4%	-			
温带常绿阔叶林	0.7%	0.5%	-0.2%	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.3%	0.1%	-0.2%	2.1%	1.4%	-0.7%			
热带落叶阔叶林	0.2%	0.2%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.7%	0.7%	-			
温带落叶阔叶林	3.9%	7.2%	3.3%	0.0%	1.2%	1.2%	0.1%	0.7%	0.6%	2.0%	4.9%	2.9%	10.7%	17.3%	6.6%			
寒带落叶阔叶林	1.8%	2.7%	0.9%	0.0%	0.1%	0.1%	0.3%	0.6%	0.3%	4.5%	7.7%	3.2%	1.2%	0.6%	-0.6%			
温带常绿阔叶灌木	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-	0.0%	0.0%	-			
温带落叶阔叶灌木	0.9%	7.1%	6.2%	0.6%	0.6%	-	1.4%	1.3%	-0.1%	1.0%	6.2%	5.2%	1.0%	15.6%	14.6%			
寒带落叶阔叶灌木	2.8%	1.4%	-1.4%	1.6%	0.4%	-1.2%	8.5%	2.3%	-6.2%	3.6%	2.8%	-0.8%	0.3%	0.1%	-0.2%			
极地 C3 草	6.8%	8.6%	1.8%	0.6%	2.0%	1.4%	7.0%	25.8%	18.7%	16.0%	13.6%	-2.4%	1.8%	0.4%	-1.4%			
非极地 C3 草	14.6%	17.1%	2.5%	2.4%	18.4%	16.0%	13.2%	30.4%	17.2%	19.9%	17.1%	-2.8%	18.8%	9.8%	-9.0%			
C4 草	4.4%	4.5%	0.1%	0.2%	1.8%	1.6%	0.5%	4.2%	3.7%	3.5%	3.8%	0.3%	10.3%	7.6%	-2.7%			
农作物	19.8%	20.1%	0.3%	0.9%	2.5%	1.6%	5.0%	6.0%	1.1%	24.4%	27.0%	2.6%	36.3%	33.1%	-3.2%			
冰川	0.2%	0.6%	0.4%	0.5%	1.1%	0.6%	0.1%	0.8%	0.7%	0.2%	0.5%	0.3%	0.1%	0.1%	-			
湖泊	0.2%	1.0%	0.8%	0.1%	0.6%	0.5%	0.6%	1.6%	1.0%	0.2%	0.6%	0.4%	0.2%	1.3%	1.1%			
湿地	0.0%	0.6%	0.6%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.2%	0.2%	0.0%	1.5%	1.5%	0.0%	0.2%	0.2%			
方差	-	-	15.2	-	-	41.1	-	-	115.0	-	-	11.4	-	-	20.4			

在大、小兴安岭的寒带落叶阔叶林和东南沿海的温带落叶阔叶林, CLCV 偏大较多 (分别从 1.8% 增大到 2.7% 和从 3.9% 增大到 7.2%, 见表 1)。

灌木: CLCV 中灌木面积比例是 MODIS 陆面覆盖资料的 2 倍多 (CLCV 为 8.5%, MODIS 为 3.7%, 见表 1), 两者在空间分布上也有较大差别。图 2d 和 2j 显示, MODIS 资料中灌木主要分布在降

水量在 200~400 mm 的半干旱区, 半湿润区也有少量分布, 而 CLCV 中的灌木主要分布在湿润半湿润区, 尤其在湿润区, 与 MODIS 资料的偏差达到了 14.4%, 而在半干旱区, 偏差也达到了 6.3%。

草: CLCV 中草的面积比例比 MODIS 陆面覆盖资料偏大 4.4% (CLCV 为 30.2%, MODIS 为 25.8%, 见表 1), 其偏差主要由 C3 草分布不同引

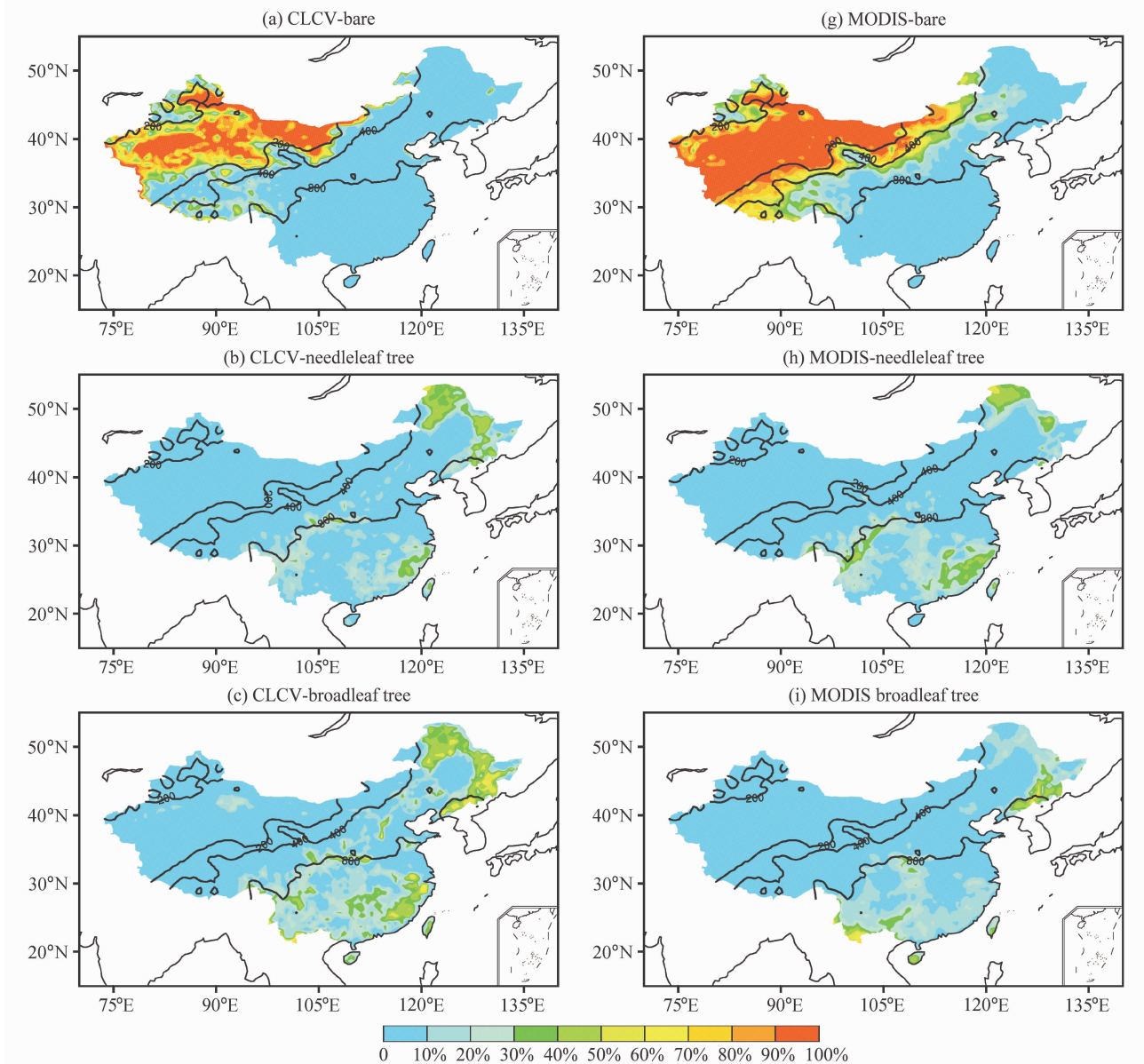


图 2 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) CLCV 资料 (a~f) 和 MODIS 资料 (g~l) 各 CLM 植被功能型在中国区域的分布: (a, g) 裸土; (b, h) 针叶林; (c, i) 阔叶林; (d, j) 灌木; (e, k) C3 草; (f, l) 农作物。彩色阴影为该地表覆盖类型占该网格的面积百分比; 等值线为多年平均降水量, 单位: mm (下同)

Fig. 2 Distribution of CLM plant functional types (PFTs) at the $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ grid resolution for (a~f) CLCV data and (g~l) MODIS data in China: (a, g) Bare soil; (b, h) needleleaf tree; (c, i) broadleaf tree; (d, j) shrub; (e, k) C3 grass; (f, l) crop. Isolines refer to the mean annual precipitation (mm), similarly hereinafter

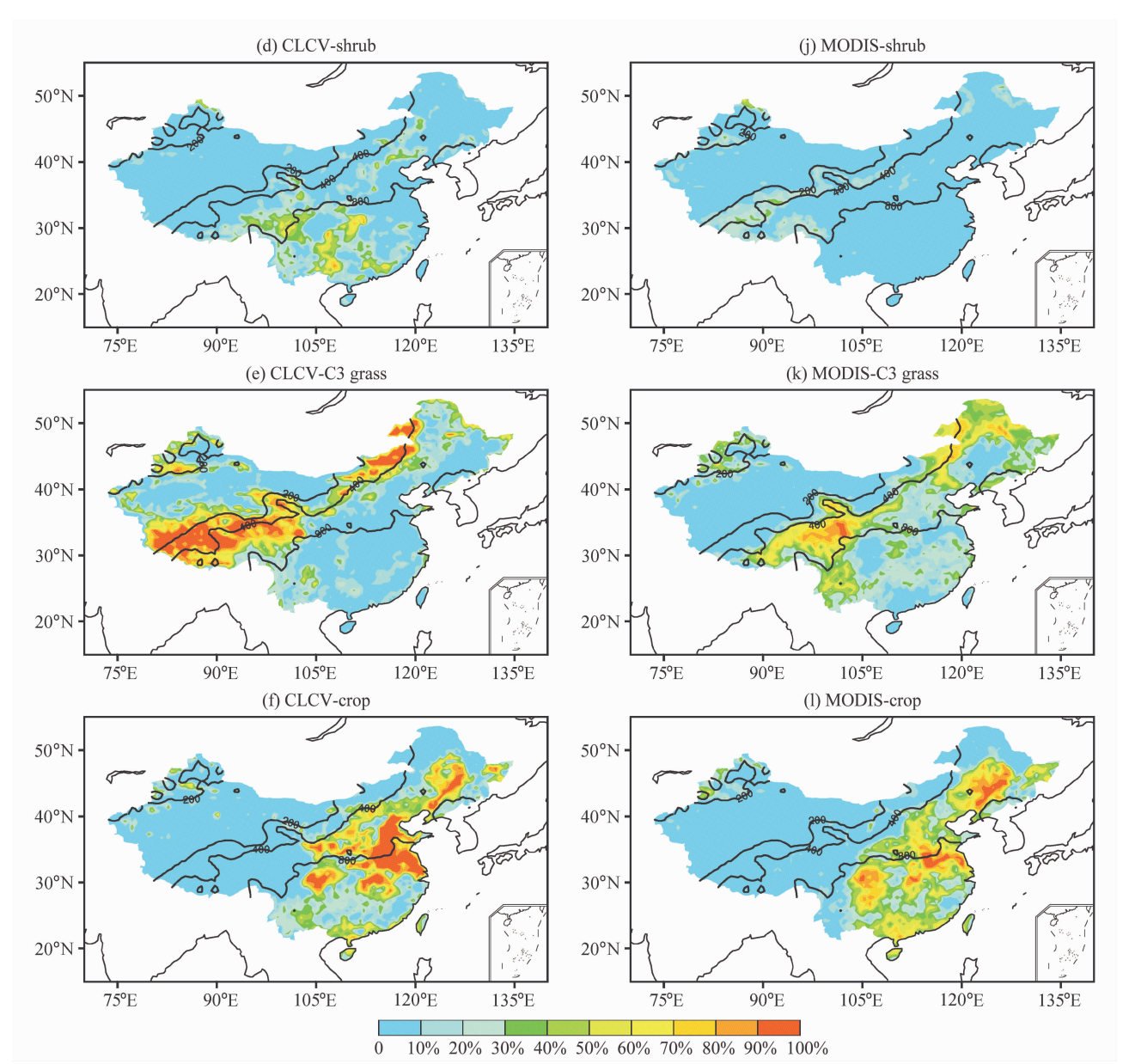


图 2（续）
Fig. 2 （Continued）

起（CLCV 为 25.7%，MODIS 为 21.4%，见表 1）。由图 2e 和 2k 可知，在 MODIS 资料中，C3 草主要分布在半湿润和湿润地区，而在 CLCV 中，C3 草主要分布在半干旱和半湿润地区：两者在青藏高原中西部、内蒙古中东部、东北大小兴安岭长白山地区及南方丘陵地区差别较大。

农作物：CLCV 中农作物的面积比例相对于 MODIS 陆面覆盖资料略微偏大（CLCV 为 20.1%，MODIS 为 19.8%，见表 1），但由图 2f 和 2l 可知，其空间分布与 MODIS 资料大致相同，主要分布在

东北、华北及四川盆地等地区。

冰川：CLCV 中冰川的面积比例是 MODIS 陆面覆盖资料的 3 倍（CLCV 为 0.6%，MODIS 为 0.2%，见表 1）。由图 3a 和 3d 可知，冰川主要分布在天山山脉、喜马拉雅山脉和念青唐古拉山脉，且 CLCV 中的面积比例比 MODIS 资料大。冰雪对陆面反照率及陆面水文过程等方面的影响较大，因而冰川面积的变化对模型模拟结果的影响也较为明显。

湖泊：CLCV 中湖泊的面积比例是 MODIS 陆面覆盖资料的 5 倍（CLCV 为 1.0%，MODIS 为

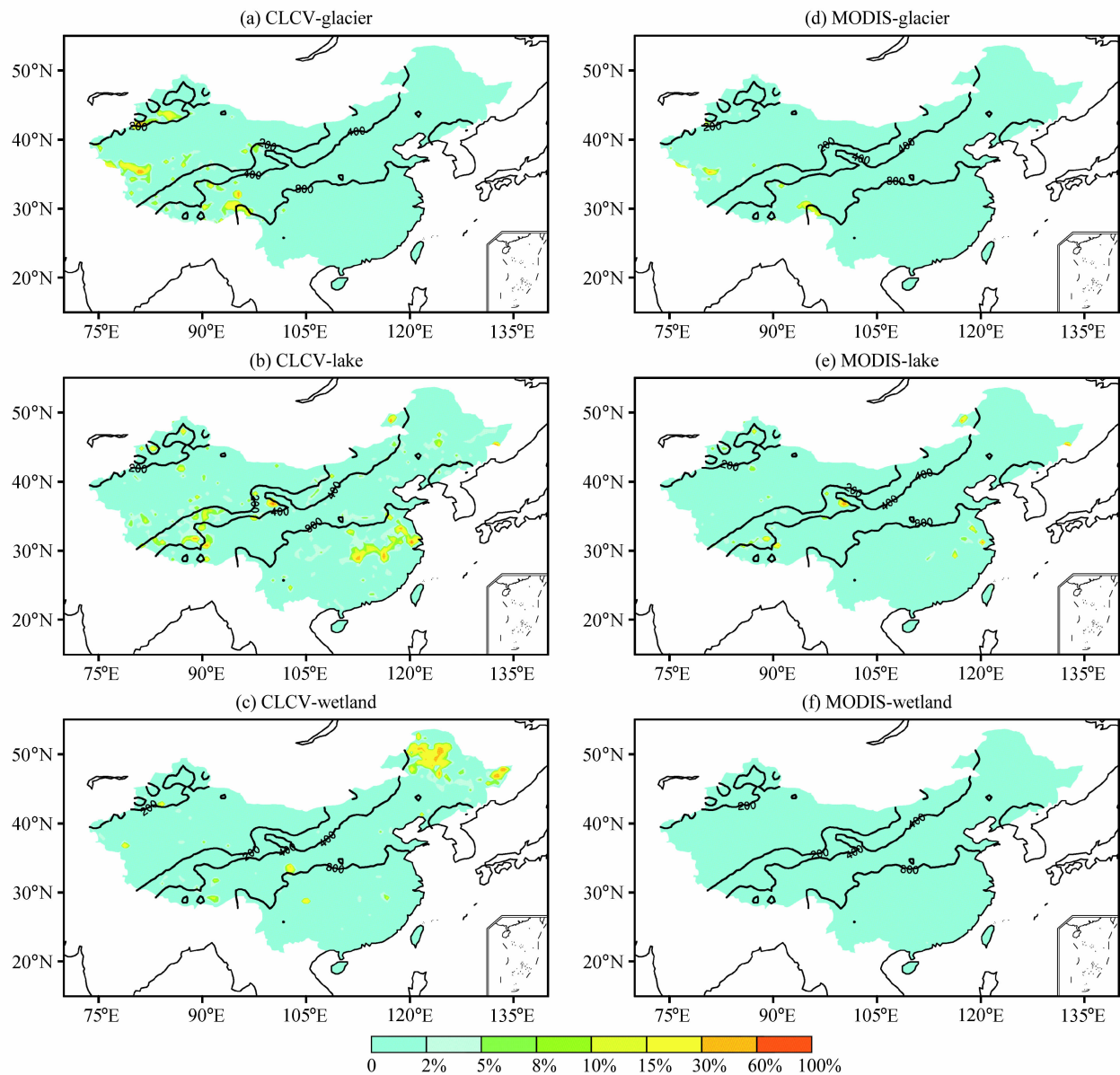


图 3 $0.5^{\circ}(\text{纬度}) \times 0.5^{\circ}(\text{经度})$ CLCV 资料 (a~c) 和 MODIS 资料 (d~f) 冰川、湖泊、湿地在中国区域的分布: (a、d) 冰川; (b、e) 湖泊; (c、f) 湿地

Fig. 3 Distribution of (a, d) glacier, (b, e) lake and (c, f) wetland at the $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ grid resolution for (a~c) CLCV data and (d~f) MODIS data in China

0.2%，见表 1)。由图 3b 和 3e 可知，湖泊面积比例差别较大的地区主要分布长江沿线湖泊及青藏高原湖泊，CLCV 比 MODIS 资料有一定程度的偏大。

湿地：CLCV 中湿地的面积比例比 MODIS 陆面覆盖资料偏大 0.6%，MODIS 资料中国区域湿地面积几乎为 0（CLCV 为 0.6%，MODIS 为 0.0%，见表 1)。由图 3c 和 3f 可知，CLCV 中湿地主要分布在东北三江平原地区，青藏高原等地也稍有分布。

3.2 CLCV 和 MODIS 陆面覆盖资料与其他资料的比较

为比较 CLCV 和 MODIS 陆面覆盖资料的空间分布，本节将两份陆面覆盖资料与全国土地资源概查汇总结果分省统计资料（中国自然资源丛书编撰委员会，1995）和基于中国 1 km 土地利用图（地球系统科学数据共享网，2008）的土地利用资料进行比较，分析几种资料的空间差异程度。

3.2.1 与全国土地资源概查汇总结果分省统计资料的比较

图4为CLCV、MODIS陆面覆盖资料与统计资料比较的泰勒图。根据泰勒图(Taylor, 2001)的数学意义可知,图4的纵坐标为经统计资料归一化后CLCV(或MODIS)资料的标准差,横坐标为经统计资料归一化后CLCV或MODIS资料的中心均方根误差(RMSE),弧度为CLCV(或MODIS)资料与统计资料的相关系数,图中REF点表示CLCV(或MODIS)资料与统计资料的标准差相同且相关系数为1,距离该点越近,说明CLCV(或MODIS)资料与统计资料越接近。由图4可见,CLCV的标准差都比MODIS资料更接近于统计资料,且CLCV与统计资料的中心均方根误差都比MODIS资料与统计资料的中心均方根误差小;除了非植被地表覆盖类型(noveg类型,包括裸土、冰川、湖泊和湿地)外,CLCV与统计资料的相关系数都比MODIS资料与统计资料的相关系数高;尽管MODIS资料与统计资料的noveg类型相关系数略高了约0.03,但其MODIS资料的标准差高达统计资料的近1.4倍,而CLCV的标准差与统计资料相当。由此可见,CLCV相对于MODIS资料更接近于统计资料,能在很大程度上反映陆表覆盖的现实状况。

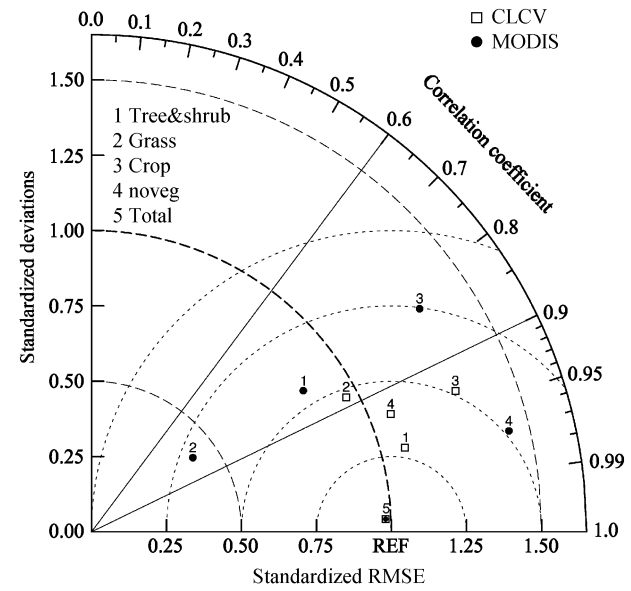


图4 CLCV和MODIS资料与全国土地资源概查汇总结果分省统计资料比较结果的泰勒图

Fig. 4 The Taylor figure for MODIS data and CLCV data compared with the statistic data from the national land resource survey

3.2.2 与基于中国1 km土地利用图的土地利用资料的比较

为了定量比较CLCV、MODIS陆面覆盖资料与土地利用资料,采用以下公式来评价三者的相似程度:

$$R_D = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(C_i - \bar{C}) - (L_i - \bar{L})]^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(M_i - \bar{M}) - (L_i - \bar{L})]^2},$$

式中, R_D 为中心均方差之比,即CLCV和土地利用资料的中心均方差与MODIS陆面覆盖资料和土地利用资料的中心均方差之比; C_i 为CLCV中某个网格内第*i*种地表覆盖的比例, $\bar{C}$ 为CLCV中该网格内所有地表覆盖比例的平均值; M_i 为MODIS资料中对应网格内同种地表覆盖的比例, $\bar{M}$ 为MODIS资料中该网格内所有地表覆盖比例的平均值; L_i 为土地利用资料中对应网格内同种地表覆盖的比例, $\bar{L}$ 为土地利用资料中该网格内所有地表覆盖比例的平均值; n 为地表覆盖种类,在本研究中,为了减小由于细分植被带来的误差,因此将地表覆盖类型区分为裸土、森林、灌木、草、农作物、冰川、湖泊、湿地共8类,即 $n=8$ 。显然,在这里 $\bar{C}=\bar{M}=\bar{L}$,由中心均方差的数学意义可知, $R_D<1$ 时,说明CLCV与土地利用资料较为接近; $R_D>1$ 时,说明MODIS资料与土地利用资料较为接近。

图5(见文后彩图)为CLCV和土地利用资料的中心均方差与MODIS资料和土地利用资料的中心均方差之比的空间分布图。由图5可以看出,在塔里木盆地及内蒙古西部等沙漠地区,由于3种资料较为一致,因此 R_D 近似为1;在青藏高原、内蒙古中东部、华北平原、东北大小兴安岭长白山地区及长江以南大部分地区, $R_D<0.9$,说明CLCV在这些地区与土地利用资料较为接近;在新疆东北部、四川盆地西侧及秦岭等区域, $R_D>1.5$,说明MODIS资料在这些地区与土地利用资料较为接近。但总体来说,CLCV资料与土地利用资料较为接近,而MODIS资料与两者差别较大。

4 利用CLCV与MODIS陆面覆盖资料的陆面过程模拟结果比较

为了深入评估CLCV对陆面模式模拟的影响,本节将利用NCAR通用陆面模式(Community Land

Model, CLM) (Oleson et al., 2004; Dickinson et al., 2006), 分别采用这两套陆表覆盖资料对中国区域的陆面水分能量过程进行模拟, 选取地表反照率、感热通量、蒸散以及径流等模拟要素, 比较 CLCV 和 MODIS 陆面覆盖资料所引起 CLM 模拟的水分能量过程变化及其可能原因。

4.1 CLM 模式简介

NCAR 通用陆面模式 (Community Land Model version2.0, CLM2.0) 是结合了 BATS、LSM 和 IAP94 的优点后开发的第三代陆面模式。模型包括植被冠层物理过程、土壤物理过程、水文过程等等, 可以提供表面反照率 (可见光和红外光波段的直射和散射光)、向上长波辐射、感热通量、潜热通量、水汽通量, 以及东西向和南北向的地表应力等大气模式所需要的量, 也可以模拟地表径流、基流、植被冠层蒸发、植被蒸腾、土壤蒸发等水文循环变量。

CLM2.0 模式的陆面覆盖分为植被 (包括裸土)、冰川、湖泊、湿地, 分别用其占网格面积的百分比表示, 其中植被又分 16 类植被功能型 (如图 1)。另外, 模式还考虑了陆面覆盖的次网格不均匀性, 在单个网格内最多可考虑四种植被功能型。

4.2 实验设计

本研究选取中国区域作为研究区域, 进行 2 次模拟: 一是采用 MODIS 陆面覆盖资料, 称为 MODIS-Run 试验; 二是采用新的陆面覆盖资料, 称为 CLCV-Run 试验。

模式模拟的降水强迫资料采用距离平方反比方法, 从全国 753 个气象站点日降水资料插值而成; 其他气象强迫资料采用 3 小时一次的 T62(1.875°×1.915°) NCEP 再分析资料。模式运行的土壤及植被特征数据来源于 NCAR 网站 <http://www.cgdl>.

ucar.edu/tss/clm/。MODIS 试验的植被覆盖数据采用 Lawrence et al. (2007) 发展的 MODIS 陆面覆盖资料; CLCV 试验的植被覆盖数据采用基于植被图的中国陆面覆盖资料 (CLCV)。

模拟的空间精度为 0.5°(经度)×0.5°(纬度), 时间步长取为 0.5 小时, 模拟时间为 1987~1992 年, 取 1988~1992 年结果作分析。

4.3 结果分析

4.3.1 反照率

表 2 显示了 CLCV-Run 试验和 MODIS-Run 试验模拟的地表反照率统计结果。从表 2 可知, CLCV-Run 试验模拟的地表反照率在全国区域比 MODIS-Run 试验偏小 0.7%, 且四季均有不同程度偏小; 在干旱区, CLCV-Run 试验模拟的年平均和季节反照率均比 MODIS-Run 试验偏大; 而在其他区域, CLCV-Run 试验模拟的年平均和季节反照率均比 MODIS-Run 试验偏小; 在湿润区的偏差最大, 在干旱区偏差最小。

图 6 为 CLCV-Run 试验模拟的反照率与 MODIS-Run 试验模拟的反照率、两者偏差以及与 MODIS 反演多年平均反照率的偏差分布图。由图 6e 可以看出, 在天山山脉、喜马拉雅山脉、念青唐古拉山脉等地区, CLCV 中冰川面积比 MODIS 资料大, 导致模拟反照率偏大; 在青藏高原中部, MODIS 资料中灌木被 CLCV 中 C3 草替代, 引起模拟反照率偏小; 在内蒙古中东部, MODIS 资料中裸土被 CLCV 中 C3 草替代, 使得模拟反照率偏小; 在东北大小兴安岭、长白山地区, MODIS 资料中 C3 草被 CLCV 中针叶林和阔叶林取代, 造成模拟反照率偏小; 在黄土高原, MODIS 资料中裸土和 C3 草被 CLCV 中阔叶林取代, 导致模拟反照率偏小; 在浙江及福建等地区, MODIS 资料中 C3

表 2 整个中国区域、干旱区、半干旱区、半湿润区、湿润区 CLCV 和 MODIS 陆面覆盖资料模拟的年、季平均反照率及其差值
Table 2 Simulated mean annual and seasonal surface albedo based on MODIS (M) data and CLCV (C) data for the whole China, the arid, semi-arid, semi-humid, and humid regions of China, and their differences

	全国			干旱区			半干旱区			半湿润区			湿润区		
	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M
全年	32.0	31.3	-0.7	35.9	36.2	0.3	36.4	36.2	-0.2	31.4	30.6	-0.8	27.1	25.7	-1.4
春季	29.0	28.4	-0.6	32.2	32.4	0.2	32.6	32.5	-0.1	28.5	27.8	-0.7	25.0	23.7	-1.3
夏季	26.8	26.0	-0.8	31.3	31.5	0.2	29.1	28.7	-0.4	25.1	24.1	-1.0	23.7	22.3	-1.4
秋季	32.9	32.3	-0.6	35.7	36.1	0.4	35.6	35.9	0.3	33.1	32.1	-1.0	29.2	27.5	-1.7
冬季	39.2	38.6	-0.6	44.4	44.7	0.3	48.3	47.8	-0.5	38.9	38.5	-0.4	30.7	29.1	-1.6

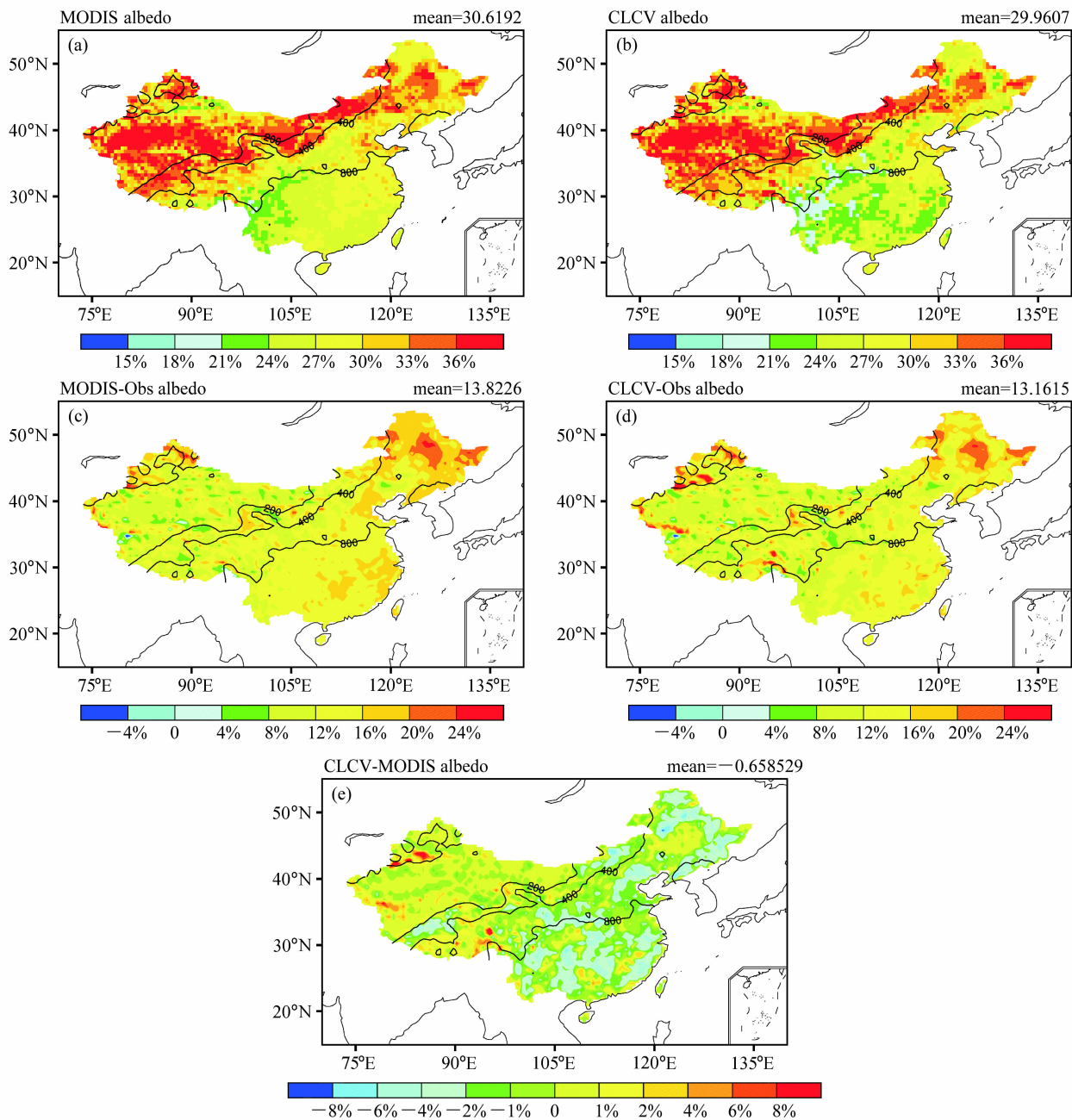


图 6 模拟地表反照率及其偏差（彩色阴影）：(a) 基于 MODIS 陆面覆盖资料模拟的地表反照率；(b) 基于 CLCV 模拟的地表反照率；(c) 基于 MODIS 陆面覆盖资料模拟的地表反照率与 MODIS Broadband Blacksky 地表反照率的偏差；(d) 基于 CLCV 模拟的地表反照率与 MODIS Broadband Blacksky 地表反照率的偏差；(e) 基于 CLCV 模拟的地表反照率与基于 MODIS 资料模拟的地表反照率的偏差

Fig. 6 (a) The simulated surface albedo based on the MODIS data; (b) the simulated surface albedo based on the CLCV data; (c) the difference between the simulated surface albedo based on the MODIS data and the MODIS Broadband Blacksky surface albedo; (d) the difference between the simulated surface albedo based on the CLCV data and the MODIS Broadband Blacksky surface albedo; (e) the difference between the simulated surface albedo based on the CLCV data and MODIS data

草被 CLCV 中阔叶林取代，导致模拟反照率偏小。比较图 6c、d 可以看出，虽然总体上模式模拟的反照率比 MODIS 反演值 (Moody et al., 2005) 普遍偏高，但 CLCV-Run 试验在大部分地区的偏

差略小于 MODIS-Run 试验的模拟结果偏差，且在东北山区，华北北部及华中、华东地区，CLCV-Run 试验与 MODIS 反演值的偏差有较大改善。

4.3.2 感热

表 3 显示了 CLCV-Run 试验和 MODIS-Run 试验模拟的感热统计结果。从表 3 可知, CLCV-Run 试验模拟的感热在全国区域比 MODIS-Run 试验偏小 0.3 W/m², 除夏季偏大外, 其余季节均有不同程度偏小; 在干旱半干旱区, CLCV-Run 试验模拟的感热比 MODIS-Run 试验偏小, 而在湿润半湿润区, CLCV-Run 试验模拟的感热比 MODIS-Run 试验偏大, 且在干旱半干旱区的偏差比湿润半湿润区大。

图 7 为 CLCV-Run 试验模拟的感热和 MODIS-Run 试验模拟的感热及其偏差分布图。比较图 6e 和图 7c 可以看出, CLCV-Run 试验和 MODIS-Run 试验模拟的感热偏差, 与模拟反照率的偏差在空间分布上形状较相似, 在青藏高原中东部、甘肃等区域偏小, 而在东北大小兴安岭、长白山地区、黄土高原、浙江及福建等地区偏大。这可能是由于在其他条件不变的情况下, 反照率偏大, 被地表吸收的太阳辐射偏小, 而地表净长波辐射偏小不多, 导致净辐射偏小, 地表温度偏低, 模拟感热偏小; 反之, 模拟感热偏大。

4.3.3 蒸散

表 4 显示了 CLCV-Run 试验和 MODIS-Run

试验模拟的蒸散统计结果。从表 4 可知, CLCV-Run 试验模拟的蒸散在全国区域比 MODIS-Run 试验偏大 7.7 mm/a, 且四季均有不同程度偏大; 在四个气候区, 除半干旱区在夏季偏小外, 其余气候区 CLCV-Run 试验模拟的年平均和季节蒸散大多比 MODIS-Run 试验偏大, 且随着湿润程度的加强, 模拟蒸散偏大也越来越多。

图 8 为 CLCV-Run 试验模拟的蒸散与 MODIS-Run 试验模拟的蒸散及其偏差分布图。由图 8c 可以看出, 在青藏高原中东部, MODIS 资料中灌木被 CLCV 中 C3 草替代, 导致模拟蒸散偏小; 在四川盆地西侧, MODIS 资料中 C3 草被灌木替代, 导致模拟蒸散偏大; 在长江沿线及东北地区, CLCV 中湖泊和湿地面积比 MODIS 资料大, 导致模拟蒸散偏大。

4.3.4 径流

表 5 显示了 CLCV-Run 试验和 MODIS-Run 试验模拟径流的统计结果。从表 5 可知, CLCV-Run 试验模拟的径流在全国区域比 MODIS-Run 试验偏小 7.6 mm/a, 且四季均有不同程度偏小; 在四个气候区, 除半干旱区 CLCV-Run 试验在夏季模拟略微偏大外, 其余气候区 CLCV-Run 试验模拟的年平均和季节径流均比 MODIS-Run 试验偏

表 3 同表 2, 但为感热
Table 3 Same as Table 2, but for sensible heat flux

	全国			干旱区			半干旱区			半湿润区			湿润区		
	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M
全年	340.0	339.7	-0.3	426.5	418.2	-8.3	307.6	285.6	-22.0	273.5	280.1	6.6	357.8	367.4	9.6
春季	105.8	104.8	-1.0	144.3	141.6	-2.7	113.7	102.6	-11.1	89.3	91.6	2.3	88.5	90.6	2.1
夏季	125.3	126.7	1.4	152.7	150.5	-2.2	98.4	98.0	-0.4	96.4	99.2	2.8	147.9	151.4	3.5
秋季	77.1	76.8	-0.3	94.7	92.7	-2.0	67.0	60.7	-6.3	57.6	58.7	1.1	89.0	91.3	2.3
冬季	31.7	31.4	-0.3	34.8	33.4	-1.4	28.6	24.3	-4.3	30.3	30.5	0.2	32.3	34.1	1.8

表 4 同表 2, 但为蒸散
Table 4 Same as Table 2, but for evapotranspiration

	全国			干旱区			半干旱区			半湿润区			湿润区		
	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M
全年	334.8	342.5	7.7	106.4	110.5	4.1	255.9	260.1	4.2	354.2	361.4	7.2	537.4	550.4	13.0
春季	302.3	313.5	11.2	95.8	100.1	4.3	200.0	211.6	11.6	294.3	303.9	9.6	528.5	546.7	18.2
夏季	704.9	713.7	8.8	253.2	260.9	7.7	608.4	606.4	-2.0	805.3	816.4	11.1	1009.4	1021.8	12.4
秋季	271.1	279.1	8.0	60.3	64.4	4.1	194.1	200.1	6.0	275.2	283.0	7.8	475.0	487.5	12.5
冬季	60.8	63.8	3.0	16.3	16.7	0.4	20.9	22.4	1.5	42.1	42.3	0.2	136.6	145.5	8.9

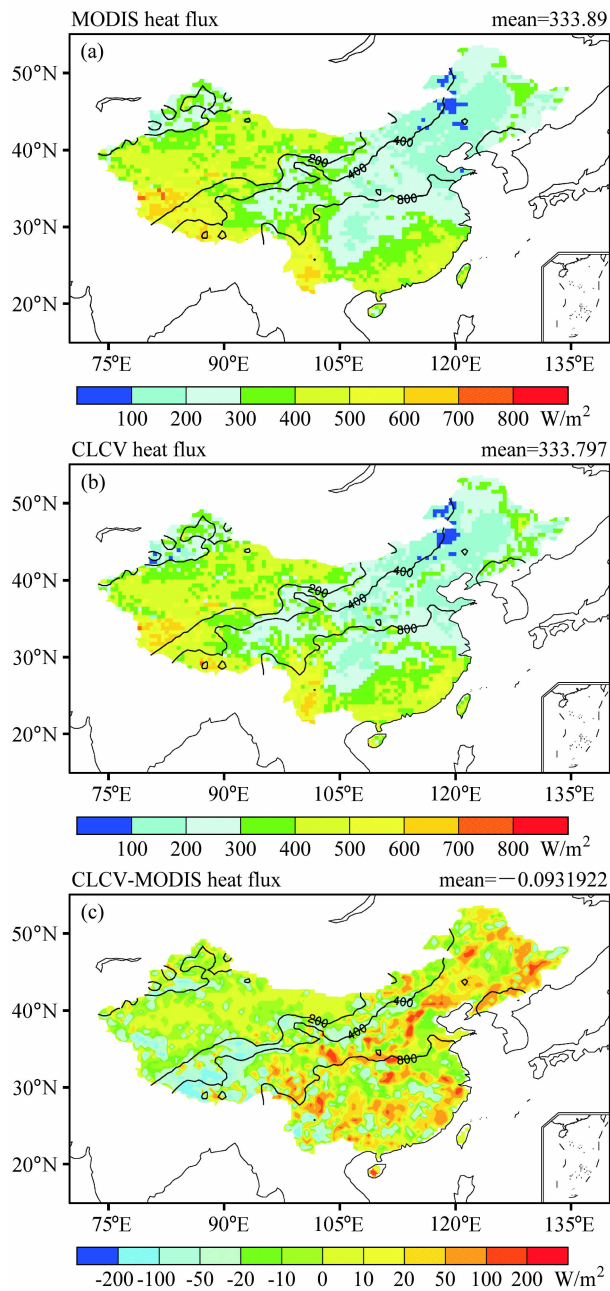


图7 模拟的感热及其偏差(彩色阴影)：(a) 基于MODIS陆面覆盖资料模拟的感热；(b) 基于CLCV模拟的感热；(c) 基于CLCV模拟的感热与基于MODIS资料模拟的感热的偏差

Fig. 7 (a) The simulated sensible heat flux based on the MODIS data; (b) the simulated sensible heat flux based on the CLCV data; (c) the difference between the simulated sensible heat fluxes based on CLCV data and MODIS data.

小，且随着湿润程度的加强，模拟径流偏小也越来越多。

图9(见文后彩图)为CLCV-Run试验模拟的径流与MODIS-Run试验模拟的径流、两者偏差以

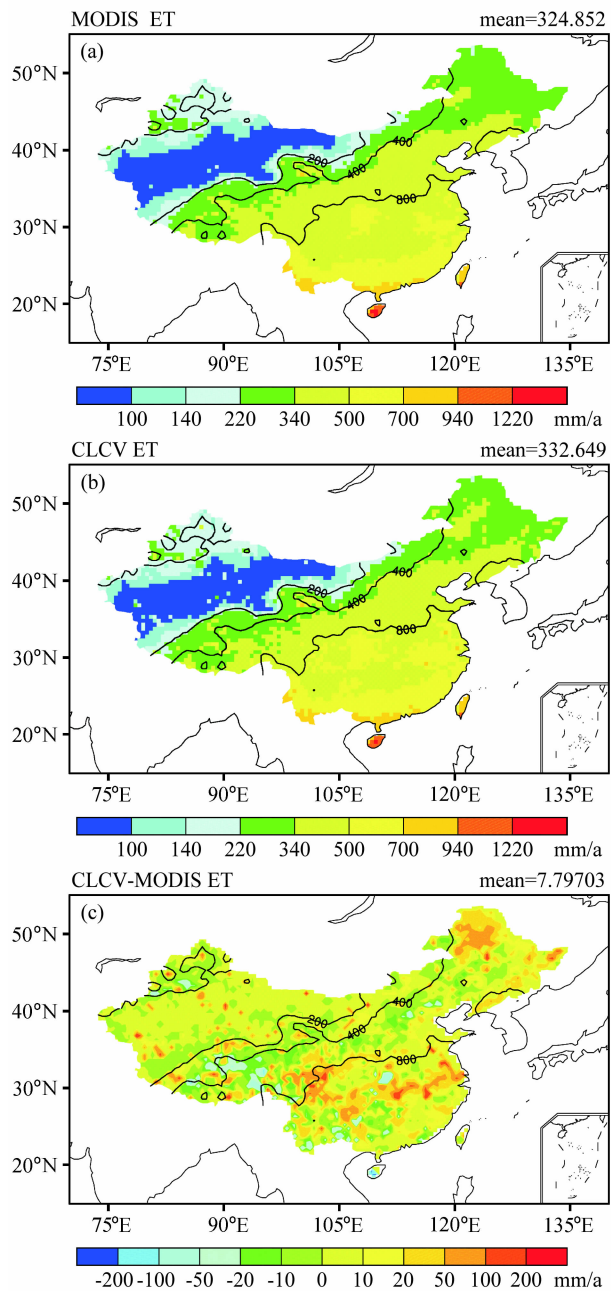


图8 同图7，但为蒸散及其偏差

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for evapotranspiration (ET)

及GRDC (Global Runoff Data Centre) (Fekete et al., 2000) 多年平均径流分布图。比较图8c和图9c可以看出，CLCV-Run试验与MODIS-Run试验模拟的径流偏差分布与蒸散偏差空间分布形状比较一致，且存在反相关关系。在青藏高原中东部，CLCV-Run试验模拟径流偏大；而在四川盆地西侧、长江沿线及东北地区，CLCV-Run试验模拟径流偏小。由图9a~d可以看出，虽然没有考虑到人

表 5 同表 2, 但为径流
Table 5 Same as Table 2, but for runoff

	全国			干旱区			半干旱区			半湿润区			湿润区		
	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M	M	C	C-M
全年	317.5	309.9	-7.6	20.0	16.1	-3.9	59.7	57.5	-2.2	227.3	220.1	-7.2	782.8	769.2	-13.6
春季	326.1	316.1	-10.0	21.9	18.0	-3.9	56.0	48.6	-7.4	121.5	113.8	-7.7	925.7	907.0	-18.7
夏季	585.2	574.2	-11.0	37.2	30.3	-6.9	132.2	132.3	0.1	553.8	540.6	-13.2	1286.9	1269.5	-17.4
秋季	246.0	239.8	-6.2	16.0	11.8	-4.2	44.1	43.8	-0.3	210.1	203.7	-6.4	570.8	560.4	-10.4
冬季	112.6	109.5	-3.1	4.8	4.2	-0.6	6.6	5.4	-1.2	23.8	22.4	-1.4	347.6	339.8	-7.8

为活动等因素影响, 两组试验模拟所得的径流在数量上与 GRDC 径流相差较大, 但是两组试验模拟所得的径流分布与 GRDC 资料均较为一致, 呈现东南向西北递减的趋势; 且 CLCV-Run 试验模拟的径流总体上比 MODIS 资料略微偏小, 更加接近于 GRDC 资料。

5 结论与讨论

本研究以中国 1:100 万植被图为基础, 结合 AVHRR 森林覆盖资料和中国 753 个气象站点 40 年的降水气温资料, 发展了一套用于气候模拟的基于 NCAR 植被功能型分类的中国陆面覆盖资料 (CLCV), 通过与 MODIS 陆面覆盖资料对比, 以及对分别采用 CLCV 和 MODIS 陆面覆盖资料进行的两组区域模拟试验结果的比较, 可以得到以下结论:

(1) 基于中国植被数据的 CLCV 与 MODIS 陆面覆盖资料存在一定差别, 尤其是裸土、温带落叶灌木及 C3 草三类植被差别较大。在空间上, 不同气候区内差别程度不同, 干旱半干旱区差别较大, 湿润半湿润区差别较小。

(2) 将 CLCV 及 MODIS 陆面覆盖资料与全国土地资源概查汇总结果分省统计资料和土地利用资料相比后发现, CLCV 与这些资料较为一致, 而 MODIS 资料与之相差较大。造成这种现象的原因可能是由于 MODIS 陆面覆盖资料在中国区域误差较大, 但需要指出的是, CLCV 和其他验证资料同属中国国内资料, 可能会存在一定的同源性。

(3) 由 CLCV-Run 和 MODIS-Run 试验对中国区域模拟结果显示, 改变地表覆盖后会对陆面水分能量过程有一定的影响, CLCV-Run 试验比 MODIS-Run 试验模拟的中国区域多年平均地表反照率偏小 0.6%, 感热偏小 0.3 W/m², 蒸散偏大 7.7

mm/a, 径流偏小 7.6 mm/a。在空间分布上, 地表反照率、感热、蒸散和径流在湿润半湿润区偏差较大; CLCV-Run 试验比 MODIS-Run 试验模拟的反照率在干旱区表现为偏大, 在其余区域表现为偏小, 感热在干旱半干旱区表现为偏小, 在湿润半湿润区表现为偏大, 而蒸散在四个气候区均表现为偏大, 径流在四个气候区内均表现为偏小。

(4) CLCV-Run 试验和 MODIS-Run 试验模拟结果对比显示: 反照率偏差与感热偏差呈一定的负相关关系, 蒸散偏差与径流偏差也呈一定的负相关关系。这可能是由于反照率偏大, 被地表吸收的太阳辐射偏小, 而地表净长波辐射偏小不多, 导致净辐射偏小, 地表温度偏低, 模拟感热偏小; 蒸散偏大, 土壤湿度偏小, 入渗能力偏大, 径流偏小; 反之, 则相反。当然, 陆面过程是一个高度复杂的非线性过程, 因此, 这种对应关系在大多数地区较为明显, 但在有些地区, 由于受到其他过程的影响, 表现不太明显。

(5) 最后, 虽然 CLCV 中冰川、湖泊和湿地的分布及比例相对于其他植被来说与 MODIS 陆面覆盖资料差别不大, 但是由于不同覆盖类型的参数化方案不同, 对模型结果造成了较大的影响。

参考文献 (References)

Benitez P, McCallum I, Obersteiner M, et al. 2004. Global supply for carbon sequestration: Identifying least-cost afforestation sites under country risk considerations [R]. Laxenburg, Austria, IIA-SA, IR-04-022; 22.
Bonan G B. 1995. A land surface model (LSM Version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide [R]. NCAR Tech Note NCAR/TN-417+STR, 165pp.
曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 2008. 中国当代土地利用变化对黄河流

- 域径流影响[J]. 大气科学, 32(2): 301-308. Cao L J, Zhang D F, Zhang Y, et al. 2008. The effects of current land use in China on streamflow in the Yellow River basin[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(2): 301-308.
- Dai Y J, Zeng Q C. 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies. Part I: Formulation and validation in off-line experiments[J]. Adv. Atmos. Sci., 14: 433-460.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84: 1013-1023.
- DeFries R, Hansen M, Townshend J R G, et al. 2000. A new global 1-km data set of percent tree cover derived from remote sensing[J]. Global Change Biology, 6: 247-254.
- 地球系统科学数据共享网. 2008. <http://www.geodata.cn/>. Data-Sharing Network of Earth System Science. <http://www.geodata.cn/>.
- Dickinson R E. 1984. Modeling evapotranspiration for three dimensional global climate models [M]// Hansen J E, Takahashi T. Climate Processes and Climate Sensitivity. Amer. Geophys. Union, Washington D C, 58-72.
- Dickinson R E, Kennedy P J, Sellers A H, et al. 1986. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model [R]. Tech. Rep. NCAR/TN-275+STR, National Center for Atmospheric Research.
- Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, 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.
- 丁一汇, 李巧萍, 董文杰. 2005. 植被变化对中国区域气候影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 63(5): 613-621. Ding Y H, Li Q P, Dong W J. 2005. A numerical simulation study of the impacts of vegetation changes on regional climate in China[J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63(5): 613-621.
- Fang J, Piao S, Zhou L, et al. 2005. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation[J]. Geophys. Res. Lett., 32, L21411, doi: 10.1029/2005GL024231.
- Fekete B M, Vorosmarty C J, Grabs W. 2000. Global composite runoff fields based on observed discharge and simulated water balance [R/OL]. Rep. 22, Global Runoff Data Cent., Koblenz, Germany. <http://www.grdc.sr.unh.edu/html/paper/ReportUS.pdf>
- Fritz S, Bartholome E, Belward A, et al. 2003. Harmonization, mosaicing and production of the Global Land Cover 2000 database (beta version) [R]. European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 41pp.
- 符淙斌, 袁慧玲. 2001. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验[J]. 科学通报, 46(8): 691-695. Fu C B, Yuan H L. 2001. A virtual numerical experiment to understand the impacts of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia[J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 46(8): 691-695.
- Gao X J, Luo Y, Lin W T, et al. 2003. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model[J]. Adv. Atmos. Sci., 20(4): 583-592.
- 郭建侠, 丁一汇, 杜继稳, 等. 2004. 陕北地区植被治理与退化对一次区域降水过程影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 9(3): 527-539. Guo J X, Ding Y H, Du J W, et al. 2004. A numerical simulation of the impact of afforestation and desertification on summer rainfall in northern Shaanxi[J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 9(3): 527-539.
- Hansen M C, DeFries R S, Townshend J, et al. 2003. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters; First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm[J]. Earth Interact, 7(10): 1-15.
- Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 21(6-7): 1331-1364.
- Henderson-Sellers A, Durbidge T B, Pitman A J, et al. 1993. Tropical deforestation: Modeling local to regional scale climate change[J]. J. Geophys. Res., 98(D4): 7289-7315.
- 侯学煜, 等. 2001. 1:1000000 中国植被图集 [M]. 北京: 科学出版社, 260pp. Hou X Y, et al. 2001. 1:1000000 Vegetation Atlas of China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 260pp.
- Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0) [J]. J. Geophys. Res., 112, G01023, doi: 10.1029/2006JG000168.
- 刘勇洪, 牛铮. 2004. 基于 MODIS 遥感数据的宏观土地覆盖特征分类方法与精度分析研究[J]. 遥感技术与应用, 19(4): 217-224. Liu Y H, Niu Z. 2004. Regional land cover image classification and accuracy evaluation using MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 19(4): 217-224.
- 刘勇洪, 牛铮, 徐永明, 等. 2006. 基于 MODIS 数据设计的中国土地覆盖分类系统与应用研究[J]. 农业工程学报, 22(5): 99-104. Liu Y H, Niu Z, Xu Y M, et al. 2006. Design of land cover classification system for China and its application research based on MODIS data[J]. Transactions of the CSAE (in Chinese), 22(5): 99-104.
- Loveland T R, Reed B C, Brown J F, et al. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data[J]. Int. J. Rem. Sens., 21(6/7), 1303-1330.
- 吕世华, 陈玉春. 1999. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟[J]. 高原气象, 8(3): 416-424. Lü S H, Chen Y C. 1999. The influence of Northwest China afforestation on regional climate in China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 8(3): 416-424.
- McCallum I, Obersteiner M, Nilsson S, et al. 2006. A spatial comparison of four satellite derived 1 km global land cover datasets[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8(4): 246-255.
- Moody E G, King M D, Platnick S, et al. 2005. Spatially complete global spectral surface albedos: Value-added datasets derived from Terra MODIS land products[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 43, 144-158.

- Nemani R, Running S W. 1996. Implementation of a hierarchical global vegetation classification in ecosystem function models [J]. *Journal of Vegetation Science*, 7 (3): 337–346.
- Noble I R, Gitay H. 1996. A functional classification for predicting the dynamics of landscapes [J]. *Journal of Vegetation Science*, 7: 329–336.
- Oleson KW, Dai Y J, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR/TN–461+STR, 173pp.
- Pan Y Z, Shi P J, Zhu W Q, et al. 2005. Measurement of ecological capital of Chinese terrestrial ecosystem based on remote sensing [J]. *Science in China (Ser. D)*, 48 (6): 786–796.
- 朴世龙, 方精云. 2001. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化 [J]. *第四纪研究*, 21 (4): 294–302. Piao S L, Fang J Y. 2001. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China [J]. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 21 (4): 294–302.
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43 (6): 505–531.
- Sellers P J. 1987. Modeling effects of vegetation on climate [M]// Dickinson R E. *The Geophysiology of Amazonia: Vegetation and Climate Interactions*. New York: John Wiley & Sons, 244–264.
- Sellers P J, Los S O, Tucker C J, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data [J]. *J. Climate*, 9: 706–737.
- Shao G F, Shugart H H, Hayden B P. 1996. Functional classification of coastal barrier island vegetation [J]. *Journal of Vegetation Science*, 7: 391–396.
- 师庆东, 吕光辉, 潘晓玲, 等. 2003. 遥感影像中分区分类法及在新疆北部植被分类中的应用 [J]. *干旱区地理*, 26 (3): 264–268. Shi Q D, Lü G H, Pan X L, et al. 2003. Vegetation classification method of divided area and DEM at north Xinjiang [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 26 (3): 264–268.
- Skarpe C. 1996. Plant functional types and climate in a southern African savanna [J]. *Journal of Vegetation Science*, 7: 397–404.
- Strahler A, Muchoney D, Borak J, et al. 1999. MODIS Land Cover Product; Algorithm Theoretical Basis Document, Version 5.0 [R]. Boston University, Boston, MA, USA, 72pp.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 7183–7192.
- Twine T E, Kucharik C J, Foley J A. 2004. Effects of land cover change on the energy and water balance of the Mississippi River basin [J]. *J. Hydrometeorology*, 5 (4): 640–655.
- Walker B H. 1994. Landscape to regional scale response of terrestrial ecosystems to global change [J]. *AMBIO*, 23 (1): 67–73.
- 王献溥. 2001. 《1:1000000 中国植被图集》问世 [J]. *植物杂志*, 5: 9. Wang X P. 2001. The publication of 1:1000000 vegetation atlas of China [J]. *Plants (in Chinese)*, 5: 9.
- 吴征镒. 1980. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1382pp. Wu Z Y. 1980. *The Vegetation of China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 1382pp.
- Xue Y, Sellers P, Kinter J, et al. 1991. A simplified biosphere model for global climate studies [J]. *J. Climate*, 4: 345–364.
- Xue Y K. 1996. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate [J]. *J. Climate*, 9 (9): 2173–2189.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果 [J]. *气象学报*, 60 (1): 1–16. Zheng Y Q, Qian Y F, Miao M Q, et al. 2002. The effects of vegetation change on regional climate I: Simulation results [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 1–16.
- 中国自然资源丛书编撰委员会. 1995. 中国自然资源丛书: 综合卷 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 744pp. Compilation Committee of Chinese Natural Resources Series. 1995. *Chinese Natural Resources Series: Introduction (in Chinese)* [M]. Beijing: Chinese Environmental Sciences Press, 744pp.
- 中华人民共和国年鉴社. 2006. 中华人民共和国年鉴 2006 [M]. 北京: 新华出版社, 1238pp. The Yearbook's Editorial Board of Xinhua News Agency. *The People's Republic of China Yearbook 2006 (in Chinese)* [M]. Beijing: Xinhua Publishing House, 1238pp.

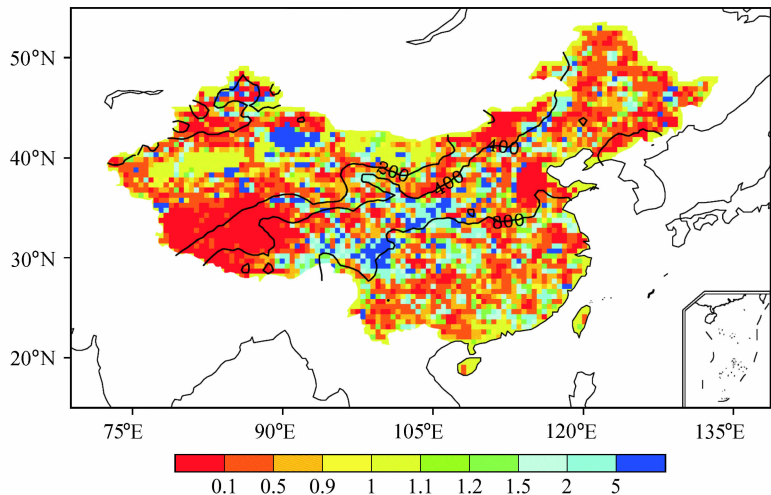


图 5 CLCV 资料和土地利用资料的中心均方差与 MODIS 资料和土地利用资料的中心均方差之比 R_D (彩色阴影) 的空间分布
Fig. 5 Distribution of the ratio (R_D) of center RMS differences between MODIS data, CLCV data and land use data (color shading)

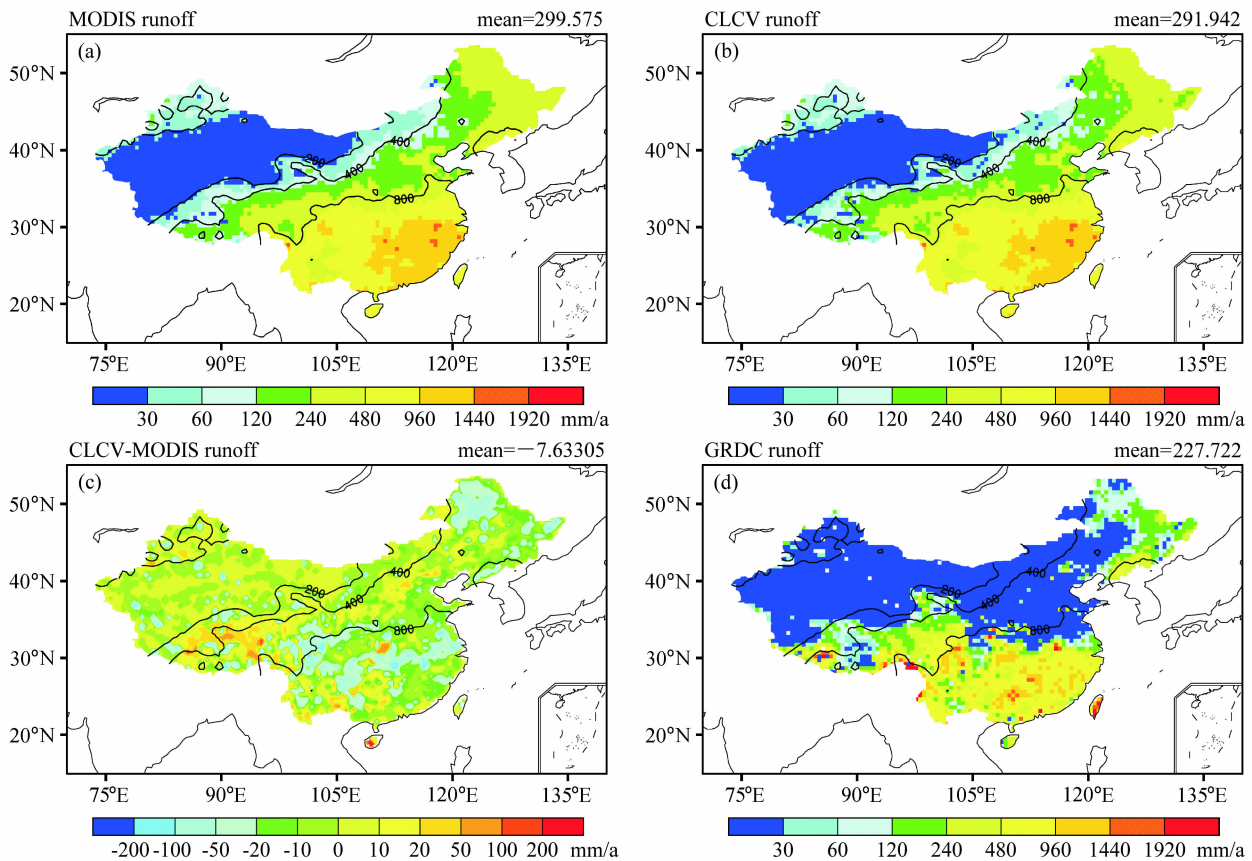


图 9 模拟的径流及其偏差 (彩色阴影): (a) 基于 MODIS 陆面覆盖资料模拟的径流; (b) 基于 CLCV 模拟的径流; (c) 基于 CLCV 模拟的径流与基于 MODIS 资料模拟的径流的偏差; (d) GRDC 多年平均径流分布图
Fig. 9 (a) The simulated runoff based on the MODIS data; (b) the simulated runoff based on the CLCV data; (c) the difference between the simulated runoff based on CLCV data and MODIS data; (d) the annual mean runoff from GRDC data