

沈晓燕, 张宇, 王少影, 等. 2015. 若尔盖高原典型年份植被覆盖变化对 2010 年区域气候影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 443–453. Shen Xiaoyan, Zhang Yu, Wang Shaoying, et al. 2015. A numerical simulation of the impact of vegetation cover changes in the Zoigê Plateau in typical years on the regional climate in 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 443–453, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14229

若尔盖高原典型年份植被覆盖变化对 2010 年区域气候影响的数值模拟

沈晓燕^{1,2} 张宇¹ 王少影¹ 尚伦宇¹ 张珊^{1,2} 徐永明³

¹ 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 730030

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式, 采用 1981 年、1990 年、2000 年、2010 年卫星遥感地表分类数据, 模拟分析了黄河源区若尔盖高原典型年份真实地表植被覆盖变化对 2010 年区域气候的影响。得到以下主要结论: 1) 对于地表能量, 植被覆盖变化对潜热影响较显著, 较为显著的气候响应是地表温度的变化, 且局地地表温度变化较区域平均温度变化明显。2) 蒸腾效率和反照率会改变地表温度, 但它们的相对重要性随季节和地点而变化, 在夏季, 若尔盖高原蒸腾效率改变对温度的影响大于反照率的作用。3) 植被覆盖度变化在低层对温湿度均有影响, 在中高层仅对温度有较小扰动。

关键词 土地利用/覆盖变化 WRF 模式 黄河源区

文章编号 1006-9585(2015)04-0443-11

中图分类号 P461⁺.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14229

A Numerical Simulation of the Impact of Vegetation Cover Changes in the Zoigê Plateau in Typical Years on the Regional Climate in 2010

SHEN Xiaoyan^{1,2}, ZHANG Yu¹, WANG Shaoying¹, SHANG Lunyu¹, ZHANG Shan^{1,2},
and XU Yongming³

¹ Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

³ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The impact of real vegetation cover changes in typical years on the regional climate of the Zoigê Plateau in 2010 was studied by using the Weather Research and Forecasting (WRF) model and the surface classification data of satellite remote sensing in the years 1981, 1990, 2000, and 2010. The main conclusions are: 1) The simulated latent heat flux has clearly changed in association with different surface classification data; the dominant climate response is the variation of surface temperature; and the local change is more significant than the regional average. 2) The change is driven by changes in both transpiration efficiency and albedo, with changes in transpiration efficiency dominating in Zoigê in summer. 3) After comparing the simulated profiles of temperature and humidity among different surface data, we concluded that simulated changes in vegetation cover affect temperature and humidity at low levels, but impose only

收稿日期 2014-10-23; 网络预出版日期 2015-03-13

资助项目 全球变化重大研究计划 2011CB952002, 西部之光项目 Y229C71001

作者简介 沈晓燕, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与数值模拟研究。E-mail: sxygwm@163.com

通讯作者 张宇, E-mail: yuzhang@lzb.ac.cn

small disturbance on temperature at high levels.

Key words Land use/cover change, WRF model, Source Region of the Yellow River

1 引言

人类活动对气候的强迫不仅包括温室气体以及气溶胶排放导致的气候变化,还包括土地利用和土地覆盖变化(land use and land cover change,以下简称 LULCC)引起的气候效应(邵璞和曾晓东,2012)。LULCC 对全球、区域以及局地气候的影响日益引起了人们的重视,IPCC (2007) 第四次评估报告指出土地利用变化是人类影响气候的重要强迫之一(毛慧琴等,2011)。IPCC (2014)第五次评估报告指出 LULCC (包括森林采伐、农田开发)会通过改变地表辐射强迫、水分循环、温室气体和气溶胶排放来影响气候,并指出 LULCC 对全球尺度气候变化影响并不显著,但区域气候对 LULCC 响应明显。LULCC 通过生物物理和生物化学途径影响气候,其中生物物理过程着眼于地表参数的变化(如反照率、叶面积指数等),这些参数对于地表—植被—大气间能量、动量和水汽交换至关重要。

Charney et al. (1975) 最早探索了地表反照率和撒哈拉干旱的正反馈机制,此后大量学者基于单一地表参数研究了 LULCC 的区域气候效应(Shukla and Mintz,1982; Sud and Smith,1985; Hales et al., 2004; Tian et al., 2004)。随着模式和遥感的发展,相关研究愈来愈多(Diffenbaugh, 2009; Wang et al., 2013),如大范围恢复自然植被对东亚气候的影响研究(符淙斌和袁慧玲,2001),沙漠化和植被增加的区域气候效应研究(丁一汇等,2005),利用卫星遥感数据提高地表覆盖数据或者地表参数的准确性对气候影响的研究(Cheng and Byun, 2008; Ge et al., 2008; Chng et al., 2010; Moore et al., 2010),以及利用目前观测地表类型与潜在或理想状况下或者未来可能的植被类型进行模拟对比分析研究(Abiodun et al., 2012) 等。

青藏高原是世界上最高、地形最复杂的大高原,它的动力和热力作用对我国天气、气候的变化具有重要的意义(王兰宁等,2002)。黄河源区是青藏高原重要的水源涵养地和水源补给区,也是气候变化的敏感区,该地区植被变化直接决定着其在涵养水源、调节气候方面所具有的生态潜力(周华

坤等,2012)。若尔盖高原地处黄河上游、青藏高原东北部,土地利用类型以草地为主,是我国气候变化和人类活动影响较为敏感的区域之一(王文丽等,2008)。近年来黄河源区高寒草原草甸覆盖度下降、沼泽草甸分布面积骤减、土地荒漠化发展强烈(王根绪等,2004; 胡光印等,2009),遥感数据资料和 GIS 技术得出,1975~2005 年,主要由于过度超载放牧,若尔盖高原沙地以 0.76% 的年平均增长率增长,同时,高覆盖度草地、湿地和林地面积呈持续减少趋势,荒漠、中覆盖度草地和耕地面积呈持续增加趋势(王文丽等,2008; 李晋昌等,2011)。柳媛普等(2008)将源区植被改为稀疏植被,利用 MM5 模拟得出黄河源区草原退化导致该地区温度升高、湿度减小、降水和径流减小。

以上研究大多是基于虚拟的植被覆盖状况和假定的植被变化情况来完成的,本文研究区域选择若尔盖高原地区,采用遥感地表覆盖数据,利用 WRF 模式模拟分析了若尔盖高原典型年份实际植被覆盖状况的变化(1981 年、1990 年、2000 年、2010 年)对 2010 年区域气候的影响。

2 模式、资料和方法

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是由 NCEP/NCAR 等机构研发的中尺度天气预报模式,为完全可压缩非静力模式,采用 F90 语言编写。水平方向采用 Arakawa C (荒川 C) 网格点,垂直方向采用地形跟随质量坐标,时间积分采用三阶或四阶的 Runge-Kutta 算法。

模式初始和边界条件采用 1° (纬度) $\times$ 1° (经度) NCEP/NCAR 的 FNL 全球再分析资料,每 6 h 更新一次数据。采用二重嵌套,模拟区域如图 1 所示,中心点位于 (33.5°N , 102°E),垂直方向分为 30 层,模式层顶气压为 50 hPa。模式基本参数设置如表 1 所示,模拟积分时间为 2010 年 5 月 25 日 00:00 (协调世界时,下同)至 8 月 31 日 12:00,模拟结果 6 h 输出一次。参数化方案选择如下:微物理参数化采用 WSM6 方案,长、短波辐射分别使用 RRTM 方案和 Dudhia 方案,边界层采用 YSU 方案,近地层选用 Monin-Obukhov 方案,地表参数化选用

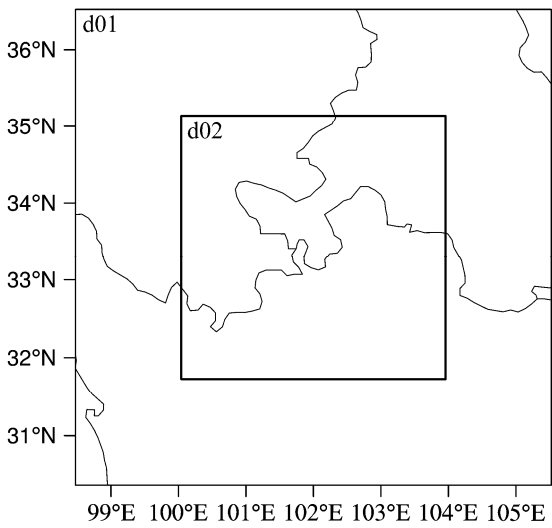


图 1 模式模拟区域
Fig. 1 Domains of numerical simulations

Noah-LSM 方案, 仅第一重嵌套区域采用 New Grell 积云参数化方案。

表 1 模拟区域网格参数设置

Table 1 Parameters of the nested grid in simulation domains			
模拟区域	格点数	水平分辨率/km	时间积分步长/s
1	28×28	25	150
2	76×76	5	30

地表覆盖数据集为“大尺度土地利用/覆盖的区域气候效应”全球变化重大研究计划项目的中国及周边区域 1981 年、1990 年、2000 年、2010 年 4 期 5 km 和 30 km 分辨率土地覆盖分类产品, 其中土地利用分类和处理采用 Wang et al.(2014)的方法, 本文选用数据分辨率为 5 km 的覆盖分类产品, 1981 年、1990 年、2000 年和 2010 年模式模拟区域的地表覆盖类型如图 2 所示。

由于植被变化的气候效应在夏季比较显著, 因此模拟时段选择 6~8 月, 用 3 月平均值代表夏季的情况。进行了 case1、case2、case3 和 case4 共 4 组模拟, 地表覆盖数据分别采用 1981 年、1990 年、2000 年和 2010 年地表覆盖数据, 大气强迫数据均采用 2010 年再分析资料, 用以分析 4 个典型年份植被覆盖变化对若尔盖高原 2010 年区域气候的影响。

3 结果分析

3.1 植被覆盖变化分析

图 3 为若尔盖高原典型年份间植被覆盖变化。1990 年相对 1981 年, 最为显著的植被类型变化是

浓密灌丛变为草地、浓密灌丛和草地变为稀疏灌丛, 2000 年相对 1990 年变化类型与 1990 年相对 1981 年变化相反, 为稀疏灌丛变为草地和浓密灌丛, 其模拟结果可用于对前者的检验, 2010 年相对 2000 年, 存在较小区域稀疏灌丛变为农田, 但农田增加是重要植被类型转换之一, 因此也进行了分析。

表 2 为区域内主要植被类型 1981 年、1990 年、2000 年和 2010 年所占比例, 落叶针叶林、永久性湿地和农田变化幅度较小, 浓密灌丛、稀疏灌丛和草地变化显著, 浓密灌丛 1990 年比 1981 年显著减少, 稀疏灌丛 2000 年相对 1981 年变化明显, 草地面积 2010 年与 1981 年相比增加了 20%。

表 2 1981 年、1990 年、2000 年和 2010 年不同植被类型所占模拟区域比例

Table 2 Percentages occupied by different vegetation types in 1981, 1990, 2000, and 2010

年份	占比					
	落叶针叶林	浓密灌丛	稀疏灌丛	草地	永久性湿地	农田
1981	22.6%	17.4%	3.0%	54.0%	1.7%	1.2%
1990	21.0%	5.0%	11.0%	60.0%	1.3%	1.3%
2000	20.0%	7.0%	1.2%	71.0%	0.3%	1.4%
2010	18.0%	4.0%	0.8%	74.0%	0.2%	2.0%

地表覆盖类型的变化会改变地表参数 (反照率、冠层阻抗等), 其中变化显著的植被类型的基本地表参数如表 3 所示, 这些参数的改变会通过陆面过程影响地表能量和水分收支, 对大气边界层产生影响, 进而影响自由大气。因此, 地表参数的改变是 LULCC 影响气候的基本原因 (Davin and de Noblet-Ducoudré, 2010)。如反照率改变会影响地表辐射, 冠层阻抗、叶面积指数、根深的改变会影响植被的蒸散发和潜热通量, 粗糙度会影响湍流运动, 对近地层温湿度产生影响。这些参数有时对气候因子的作用相反, 其相对重要性会随季节和地点而不同 (Deng et al., 2013)。

表 3 变化明显的植被类型的关键地表参数

Table 3 Key parameter values of obviously changing vegetation types

	气孔阻抗	叶面积指数	反照率	粗糙度 Z_0
	R_{cmin}	LAI		
浓密灌丛	300	0.5~3.66	0.25~0.30	0.01~0.05
稀疏灌丛	170	0.6~2.6	0.22~0.30	0.01~0.06
草地	40	0.52~2.90	0.19~0.23	0.10~0.12
农田	40	1.56~5.68	0.17~0.23	0.05~0.15

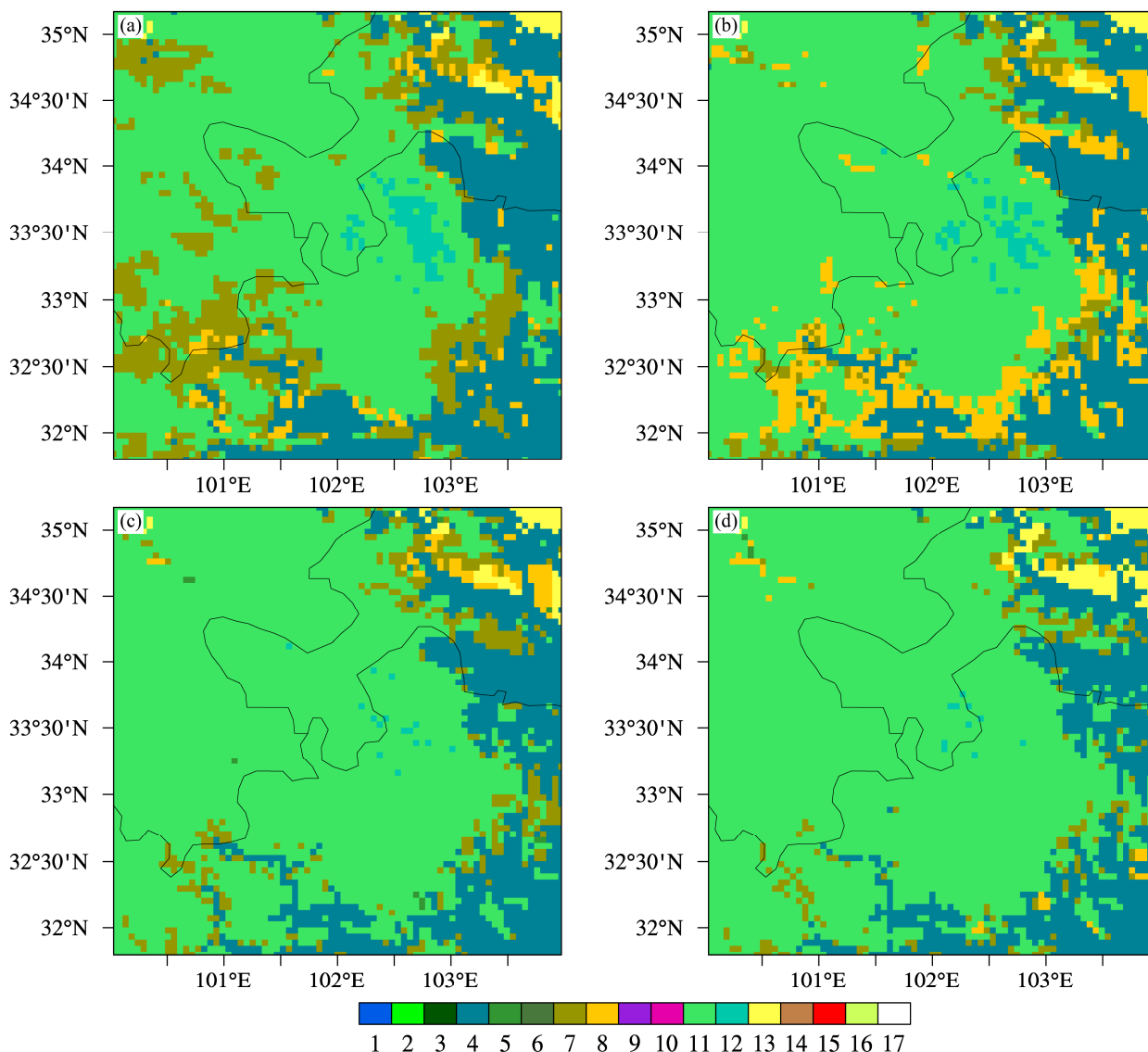


图2 (a) 1981年、(b) 1990年、(c) 2000年、(d) 2010年遥感地表植被覆盖类型: 1 水体、2 常绿针叶林、3 常绿阔叶林、4 落叶针叶林、5 落叶阔叶林、6 混交林、7 郁闭灌丛、8 稀疏灌丛、9 树林草原、10 稀树草原、11 草原、12 永久性湿地、13 农田、14 裸地、15 城镇、16 自然植被镶嵌体、17 冰雪

Fig. 2 Land use categories in year (a) 1981, (b) 1990, (c) 2000, and (d) 2010: 1 Water body, 2 Evergreen needleleaf Forest, 3 Evergreen broadleaf Forest, 4 Deciduous needleleaf forest, 5 Deciduous broadleaf forest, 6 Mixed forest, 7 Closed shrubland, 8 Open shrubland, 9 Woody savanna, 10 Savanna, 11 Grassland, 12 Permanent wetland, 13 Cropland, 14 Barrens, 15 Urban and built-up, 16 Natural vegetation mosaics, and 17 Snow and ice

3.2 植被覆盖变化对地表能量的影响

植被覆盖变化会影响地表辐射收支和能量分配。由模拟结果可知,地表覆盖变化对向下短波辐射和长波辐射影响较小(图略),可通过反照率影响向上短波辐射,从而对净辐射产生影响。图4为反照率和净辐射差值图,1990年相对1981年,浓密灌丛和草地变为稀疏灌丛,反照率增加,反射太阳辐射增加,净辐射减小,浓密灌丛变为草地,反

照率降低,净辐射增加。1990年和2000年间变化与之相反。2010年相对2000年,稀疏灌丛变为农田,反照率降低,净辐射增加。由表4可知,反照率变化越大,净辐射改变越明显,稀疏灌丛变为农田反照率差值最大,净辐射增加最明显,为 26.67 W m^{-2} 。根据双样本 t 检验,这几种植被类型变化导致的净辐射改变均未通过显著性检验,表明植被覆盖变化对净辐射无明显的影响。

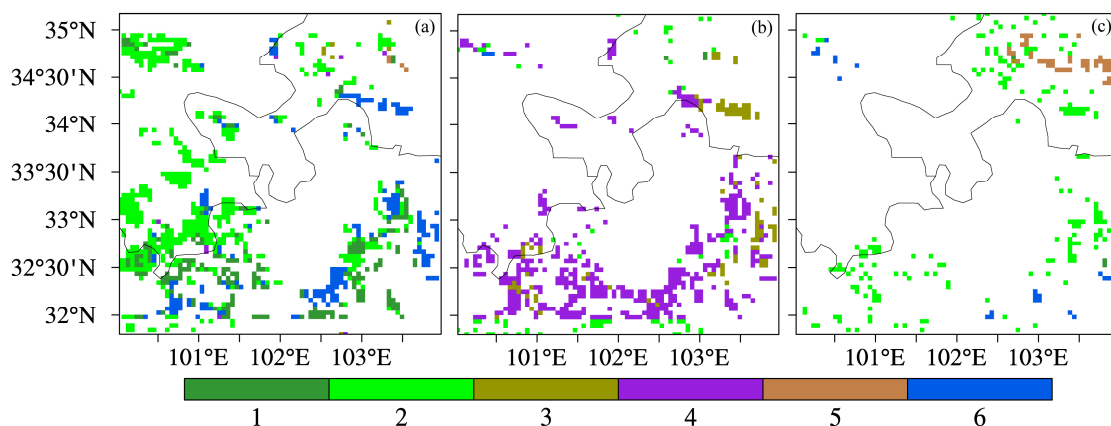


图 3 (a) 1990 年相对 1981 年、(b) 2000 年相对 1990 年、(c) 2010 年相对 2000 年的地表植被覆盖类型变化: 1 郁闭灌丛变为稀疏灌丛, 2 郁闭灌丛变为草地, 3 稀疏灌丛变为郁闭灌丛, 4 稀疏灌丛变为草地, 5 稀疏灌丛变为农田, 6 草地变为稀疏灌丛

Fig. 3 Changes of land use categories of (a) 1990 relative to 1981, (b) 2000 relative to 1990, and (c) 2010 relative to 2000: 1 Closed shrublands change to open shrublands, 2 Closed shrublands change to grasslands, 3 Open shrublands change to closed shrublands, 4 Open shrublands change to grasslands, 5 Open shrublands change to croplands, and 6 Grasslands change to open shrublands

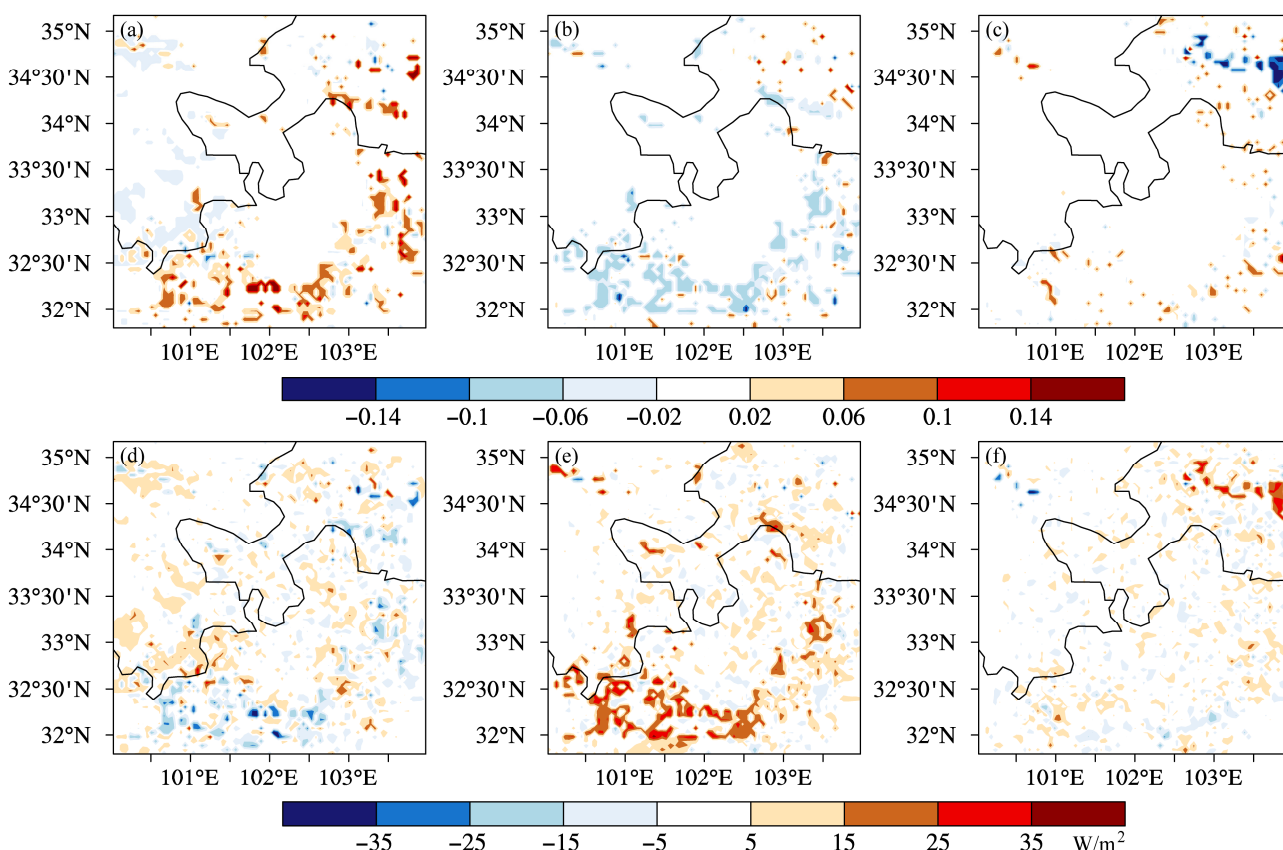


图 4 case2 与 case1 (左列)、case3 与 case2 (中列)、case4 与 case3 (右列) 的 (a-c) 地表反照率和 (d-f) 净辐射的差值场

Fig. 4 Differences of (a-c) albedo and (d-f) net radiation between case2 and case1(left panel), case3 and case2 (middle panel), and case4 and case3 (right panel)

植被类型的改变会影响蒸腾效率, 即植被将水分从土壤传输到大气的的能力, 从而影响潜热通量。蒸腾效率体现在植被根深、气孔阻抗、叶面积指数

等地表参数上。地表总蒸发量 (E) 包括顶层土壤的直接蒸发 (E_{dir})、冠层拦截水的蒸发 (E_c) 以及冠层的蒸腾 (E_t); 地表植被类型的改变导致叶面积

表 4 植被类型变化导致的地表参数变化

Table 4 Vegetation parameter variations resulting from vegetation cover type changes

植被类型变化	R_{cmin}	LAI	反照率	净辐射 /W m ⁻²	潜热通量 /W m ⁻²	感热通量 /W m ⁻²
浓密灌丛→稀疏灌丛	-130	-2.14	0.055	-12.22	-16.38	0.313
浓密灌丛→草地	-260	-2.16	-0.028	10.19	-1.28	5.18
草地→稀疏灌丛	130	0	0.077	-20.11	-14.29	-2.85
稀疏灌丛→浓密灌丛	130	2.12	-0.058	10.36	16.56	-1.54
稀疏灌丛→草地	-130	0	-0.078	22.41	15.95	3.30
稀疏灌丛→农田	-130	1.57	-0.14	26.67	25.47	7.43

指数 (LAI, 记为 L_{AI}) 以及气孔阻抗 (R_{cmin}) 发生改变, 影响冠层阻抗 (R_c); 冠层的蒸腾与冠层阻抗相关 (Chen and Dudhia, 2001)。计算公式如下:

$$E = E_{dir} + E_c + E_t, \quad (1)$$

$$E_t = \sigma_f E_p B_c \left[1 - \left(\frac{W_c}{s} \right)^n \right], \quad (2)$$

$$B_c = \frac{1 + \frac{\Delta}{R_t}}{1 + R_c C_h + \frac{\Delta}{R_t}}, \quad (3)$$

$$R_c = \frac{R_{cmin}}{L_{AI} F_1 F_2 F_3 F_4}, \quad (4)$$

其中, σ_f 为植被覆盖度, E_p 为潜在蒸发, W_c 为冠层截留含水量, s 为冠层最大含水量, n 为定值, B_c 是与冠层阻抗相关的函数, C_h 为热量和水汽的地表交换系数, R_t 是地表温度、地表气压和 C_h 的函数, R_c 为冠层阻抗, Δ 为无量纲量, F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 介于 0 和 1 之间, 分别代表太阳辐射、水汽压、空气温度和土壤湿度的效应。

1990 年相对 1981 年, 草地 ($R_{cmin}=40$) 变为稀疏灌丛 ($R_{cmin}=170$), 叶面积指数不变, 气孔阻抗增加, 冠层阻抗增加, 蒸腾效率降低, 潜热减小 (-14.29 W m^{-2} , 见图 5)。浓密灌丛 ($R_{cmin}=300$) 变为稀疏灌丛和草地, 气孔阻抗减小, 叶面积指数减小, 气孔阻抗减小使得冠层阻抗减小, 叶面积指数减小使得冠层阻抗增加, 二者变化对冠层阻抗产生相反的影响, 但由模拟结果可知潜热均减小, 或许是由于叶面积指数对于潜热通量的影响更为显著。同时这两种类型转换叶面积指数变化相差不大, 但由于浓密灌丛变为草地, 气孔阻抗减小较大, 潜热通量降低较不明显。1990 年与 2000 年间变化相反。2010 年相对 2000 年, 稀疏灌丛变为农田 ($R_{cmin}=40$), 气孔阻抗减小, 叶面积指数增加, 二

者变化均导致冠层阻抗减小, 潜热显著增加 (均值为 25.47 W m^{-2})。Tao et al. (2013) 得出从草地/混交林区域变为郁闭灌丛, 潜热减小 $15 \sim 25 \text{ W m}^{-2}$, 与本文潜热变化值接近。

除了浓密灌丛变为草地, 未通过显著性检验外, 其余几种植被类型的变化潜热通量均通过了置信区间 95% 的显著性检验, 表明植被类型变化对潜热有明显的改变。而感热通量差异不明显, 均未通过显著性检验 (图略)。

3.3 植被覆盖变化对地表温度和降水的影响

地表覆盖变化会对地表温度产生影响 (Betts, 2001), 图 6 为平均地表温度差值场, 图 7 为地表温度日较差差值场。用 1990 年地表覆盖数据模拟的 6~8 月区域平均地表温度比 1981 年高 0.15 K (见表 5), 2000 年比 1990 年降低 0.07 K, 2010 年相对 2000 年变化不明显, 略微增加 0.02 K。14:00 地表温度和 02:00 地表温度变化空间分布类似于平均地表温度, 但 14:00 地表温度变化明显, 02:00 地表温度变化较小 (图略)。夏季 (6~8 月) 地表温度日较差 1990 年比 1981 年高 0.29 K, 2000 年比 1990 年降低 0.16 K, 2010 年相对 2000 年变化不明显。局地温度变化显著, 1990 年相对 1981 年模拟区域南部 (浓密灌丛变为稀疏灌丛以及草原变为稀疏灌丛) 和西部 (浓密灌丛变为草地) 温度明显升高, 温度日较差增加。2000 年相对 1990 年模拟区域南部 (稀疏灌丛变为草原) 和东部 (稀疏灌丛变为浓密灌丛) 温度明显降低, 温度日较差减小。2010 年相对 2000 年模拟区域西北、东南和东部 (浓密灌丛变为草地) 温度升高, 温度日较差增加, 东北部 (稀疏灌丛变为农田) 温度降低, 温度日较差减小。温度变化最为显著区域有浓密灌丛变为稀疏灌丛, 温度升高 1.35 K (见表 6), 稀疏灌丛变为农田, 温度降低 1.16 K。温度日较差变化最为显著区域有浓密灌丛变为稀疏灌丛, 日较差增加 2.86 K, 稀疏灌丛变为农田, 日较差减小 2.53 K。Diffenbaugh (2009) 同样得出地表覆盖变化的主要气候响应是地表温度的改变, 区域平均地表温度降低 0.19 K, 变化不明显, 但局地温度变化显著, 植被覆盖变化区域温度降低 1.52 K, 与本文结果相近。

区域平均夏季累积降水变化不明显 (见图 8), 如表 4 所示, 用 1990 年地表覆盖数据模拟的夏季累积降水比 1981 年增加 0.72 mm, 模拟区域中部和南部有明显降水量增加区域, 2000 年比 1990 年增

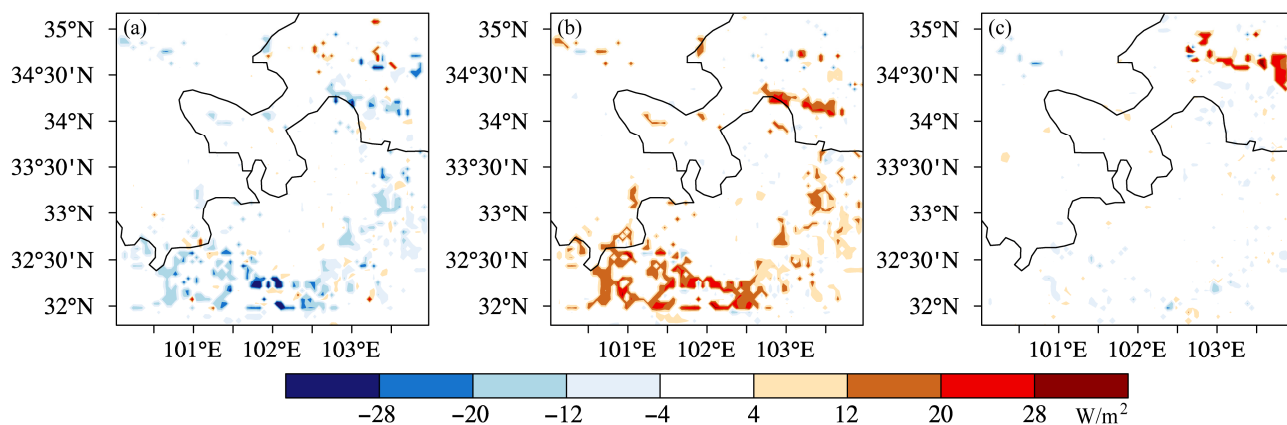


图 5 模拟试验 (a) case2 与 case1、(b) case3 与 case2、(c) case4 与 case3 的潜热通量差值场

Fig. 5 Differences of simulated latent heat fluxes between (a) case2 and case1, (b) case3 and case2, and (c) case4 and case3

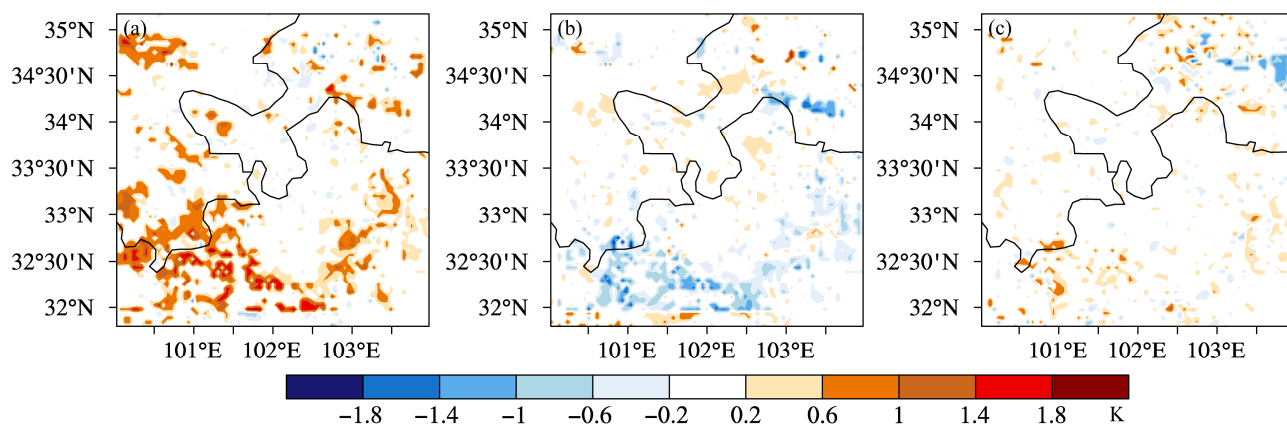


图 6 同图 5, 但为平均地表温度差值场

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for average surface temperatures

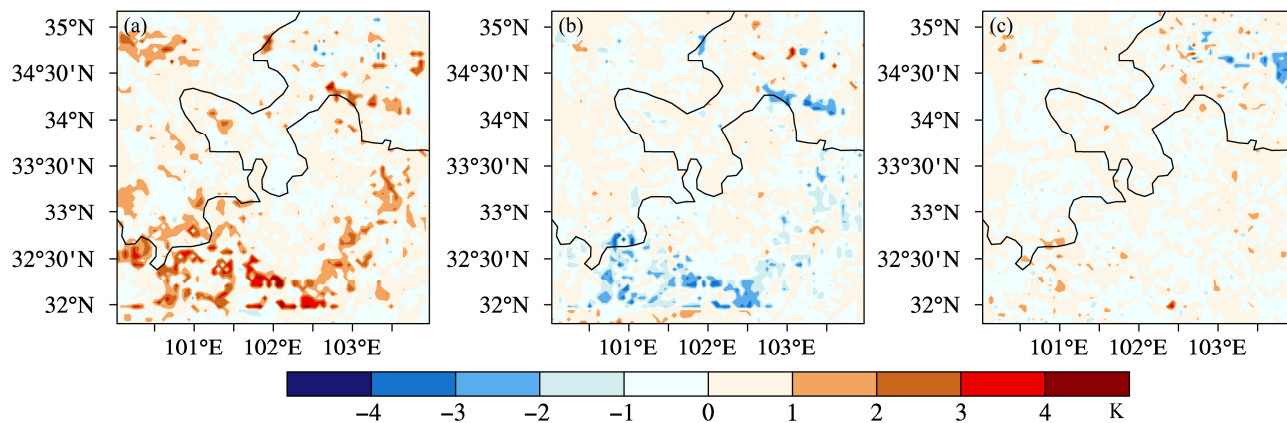


图 7 同图 5, 但为温度日较差

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for diurnal temperature ranges

加 5.57 mm, 模拟区域东南部降水量明显增加, 最大可达 255 mm, 2010 年比 2000 年减小 0.73 mm, 降水量变化较大区域与植被覆盖变化区域不一致, 可能是由于降水改变的影响因素较为复杂。

反照率和蒸腾效率的改变都会导致地表温度的改变, 其相对重要性需进一步分析 (Deng et al., 2013)。1990 年相对 1981 年, 浓密灌丛变为草地, 净辐射增加, 潜热变化不明显, 地表温度升高, 浓

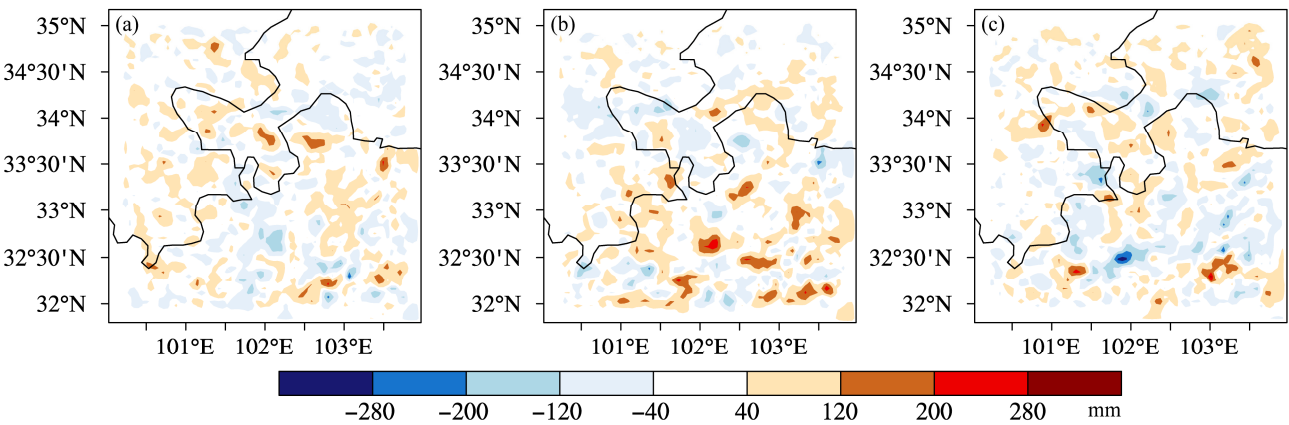


图 8 同图 5, 但为累积降水量
Fig. 8 Same as Fig. 5, but for cumulative rainfall

表 5 模拟试验 6~8 月平均地表温度、14:00 地表温度、02:00 地表温度、温度日较差差值区域平均及 6~8 月累积降水量差值

Table 5 Regional-mean differences of surface temperatures, surface temperatures at 1400 UTC, surface temperatures at 0200 UTC, and diurnal temperature ranges averaged for Jun–Aug and cumulative rainfalls of Jun–Aug between different expts

	14:00 地	02:00 地	累积降		
	地表温	表温度/	表温度/	温度日	水量/
	度/K	K	K	较差/K	mm
Case 2—Case 1	0.15	0.37	0.08	0.29	0.72
Case 3—Case 2	−0.07	−0.19	−0.02	−0.16	5.57
Case 4—Case 3	0.02	0.01	0.02	−0.003	−0.73

表 6 植被类型改变导致的地表温度、14:00 地表温度、02:00 地表温度、温度日较差变化

Table 6 Changes of surface temperatures, surface temperatures at 1400 UTC, surface temperatures at 0200 UTC, and diurnal temperature ranges induced by vegetation cover type change

	地表温	14:00 地表	02:00 地表	温度日
	度/K	温度/K	温度/K	较差/K
浓密灌丛→稀疏灌丛	1.35	3.42	0.57	2.86
浓密灌丛→草地	0.77	1.66	0.41	1.25
草地→稀疏灌丛	0.64	1.92	0.19	1.74
稀疏灌丛→浓密灌丛	−1.25	−3.22	−0.50	−2.71
稀疏灌丛→草地	−0.73	−2.21	−0.26	−1.86
稀疏灌丛→农田	−1.16	−3.12	−0.59	−2.53

密灌丛变为稀疏灌丛以及草地变为稀疏灌丛，净辐射减小，潜热通量降低，地表温度升高，表明潜热通量对地表温度的影响大于净辐射的影响，浓密灌丛变为稀疏灌丛潜热变化较大，净辐射差值较小，地表升温高于草地变为稀疏灌丛。2010 年相对 2000

年稀疏灌丛到农田的转换也同样得出潜热通量的影响大于净辐射，从而地表温度降低。1990 年和 2000 年间温度变化与 1981 年和 1990 年变化相反。

6~8 月平均地表温度，稀疏灌丛和浓密灌丛间的转换通过了 95%置信区间的 t 检验，稀疏灌丛变为农田通过了 90%置信区间的 t 检验，其余均未通过显著性检验。6~8 月 14:00 平均地表温度，稀疏灌丛和浓密灌丛、稀疏灌丛和草原间的转换，浓密灌丛变为草地以及稀疏灌丛变为农田均通过了 95%置信区间的 t 检验。6~8 月 02:00 平均地表温度仅稀疏灌丛变为农田通过了显著检验，表明植被覆盖变化对白天温度的影响大于夜间温度。6~8 月地表温度日较差，仅浓密灌丛和稀疏灌丛之间的转换以及稀疏灌丛变为农田通过了 95%置信区间的显著性检验。

3.4 植被覆盖变化对温湿度廓线的影响

图 9 为植被类型变化区域的温湿度差值廓线图。在低层，植被覆盖变化对比湿及温度均有影响，其中对比湿影响范围更高，可至 $\sigma=0.6$ 。使用 1990 年地表覆盖数据的模拟结果相对 1981 年，几种植被类型变化导致比湿降低，温度升高，2000 年相对 1990 年比湿升高，温度降低，比湿和温度变化的绝对值 ($|\Delta q|$ 、 $|\Delta T|$) 均随高度减小。通过比较图 9a、9c 以及图 9b、9d，稀疏灌丛变为草地，地表粗糙度增加，湍流运动加强，水汽和热量输送加强，温度和比湿变化幅度大于草地变为稀疏灌丛区域，浓密灌丛和稀疏灌丛地表粗糙度相差不大，温度和比湿变化幅度相近。浓密灌丛变为草地潜热变化较小， $|\Delta q|$ 也较小，仅在 0.01 附近，稀疏灌丛变为农田，潜热变化最明显，比湿变化最大。在中高层，

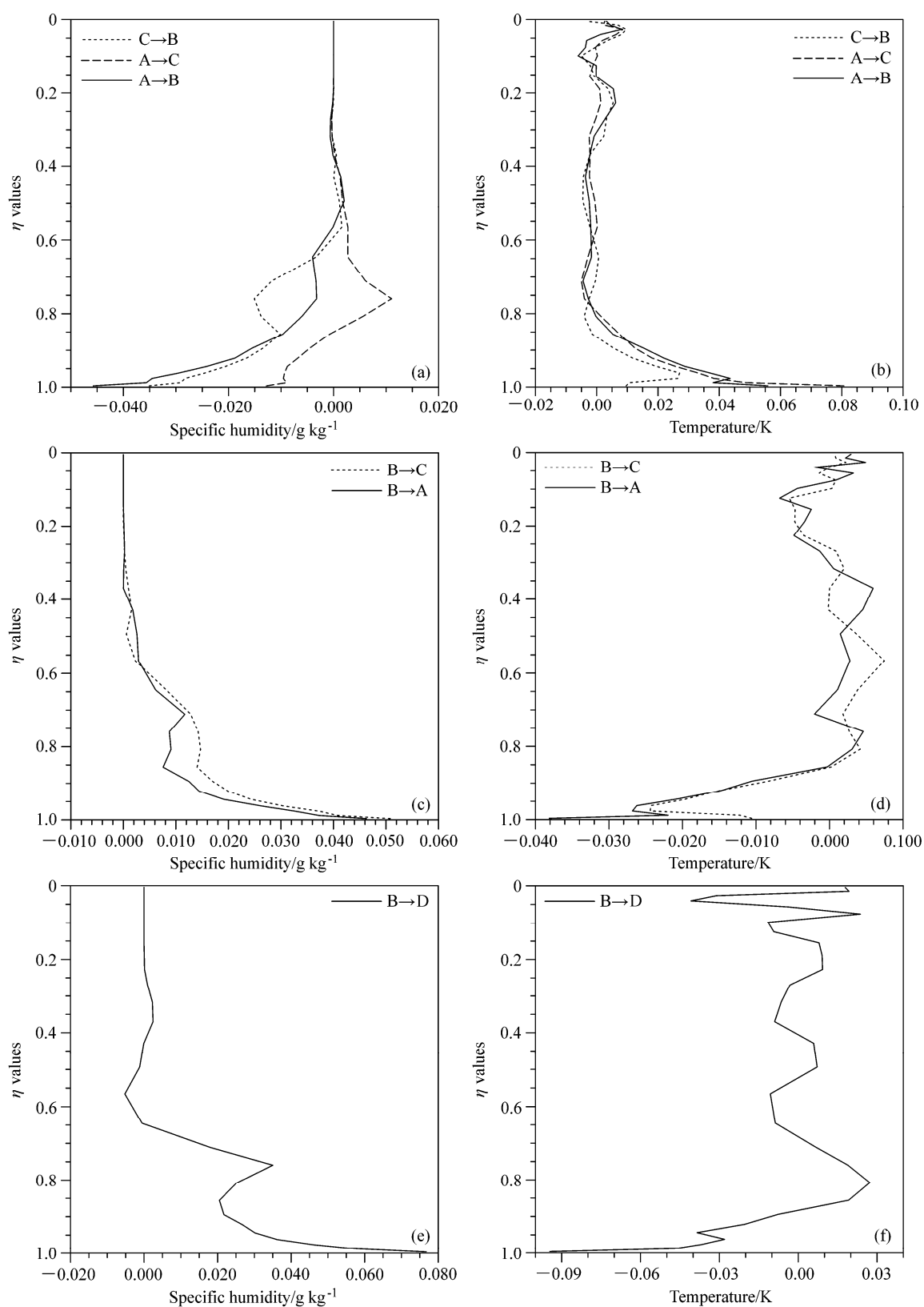


图9 (a, b) case2 相对 case1、(c, d) case3 相对 case2、(e, f) case4 相对 case3 的植被变化区域湿度(左列)和温度(右列)差值廓线。A 郁闭灌丛, B 稀疏灌丛, C 草地, D 农田

Fig. 9 Differences of specific humidity (left panel) and temperature (right panel) from simulations between (a, b) case2 and case1, (c, d) case3 and case2, and (e, f) case4 and case3. A is for closed shrublands, B open shrublands, C grasslands, and D croplands

植被覆盖变化仅对温度产生影响,而比湿变化接近为 0。Deng et al. (2013) 通过分别模拟分析反照率、蒸腾效率和地表粗糙度改变的作用,得出蒸腾效率和地表粗糙度对温度和比湿的影响仅局限于近地大气,而反照率改变可影响较高层大气,这或许可以解释温度在中高层仍有扰动。

4 结论

本文基于 WRF 模式,采用 1981 年、1990 年、2000 年、2010 年卫星遥感地表分类数据,模拟分析了若尔盖高原典型年份实际地表植被覆盖变化对 2010 年区域气候的影响,结论如下:

(1) 植被覆盖变化通过地表参数影响地表能量收支,对潜热通量的影响最显著。植被覆盖变化引起累积降水量区域平均变化不明显,由于降水受环流和水汽变化影响,其局地变化明显区域与植被覆盖变化区域空间分布不一致。

(2) 较为显著的气候响应是地表温度的改变。使用 1990 年地表覆盖数据模拟的结果比 1981 年高 0.15 K,2000 年比 1990 年降低 0.07 K,2010 年相对 2000 年变化不明显。但局地地表温度变化明显,温度显著升高的区域为浓密灌丛变为稀疏灌丛区域(温度升高 1.35 K)。温度显著降低的区域为稀疏灌丛变为农田区域(温度降低 1.16 K)。

(3) 植被覆盖变化区温度的显著变化是由于蒸散发和潜热通量的影响,其对地表温度影响的相对重要性会随季节和地点而不同。在若尔盖高原,夏季蒸散发的影响(即潜热通量改变)对地表温度的影响大。同时植被覆盖变化对白天温度的影响大于夜间温度。

(4) 由温湿度廓线可知,在低层,植被覆盖变化对比湿及温度均有影响,其中对比湿影响范围更高,可至约 4 km 范围,在中高层,仅对温度有较小影响。

由于固定的大气强迫场数据只选用了 2010 年,难以说明结果的代表性以及体现年代际的变化,因此,要全面、深入研究地表植被覆盖变化对区域气候的影响,还需对多年气候进行相应的模拟分析。

致谢 感谢中国科学院若尔盖高原湿地生态系统研究站为本文研究提供的帮助,以及该站各位工作人员在野外台站建设和维护中付出的辛勤劳动,同时本课题(项目)得到中国

科学院寒区旱区环境与工程研究所中国科学院超级计算兰州分中心的支持,特此感谢。

参考文献 (References)

- Abiodun B J, Adeyewa Z D, Oguntunde P G, et al. 2012. Modeling the impacts of reforestation on future climate in West Africa [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 110 (1–2): 77–96.
- Betts R A. 2001. Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: Near-surface temperature change and radiative forcing [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2 (1–4): 39–51.
- Charney J, Stone P H, Quirk W J. 1975. Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism [J]. *Science*, 187 (4175): 434–435.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (4): 569–585.
- Cheng F Y, Byun D W. 2008. Application of high resolution land use and land cover data for atmospheric modeling in the Houston-Galveston metropolitan area, Part I: Meteorological simulation results [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (33): 7795–7811.
- Chng L K, Abdullah A M, Sulaiman W N A, et al. 2010. The effects of improved land use on the meteorological modeling in Klang Valley region Malaysia [J]. *Environment Asia*, 3: 117–123.
- Davin E L, de Noblet-Ducoudré N. 2010. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes [J]. *J. Climate*, 23 (1): 97–112.
- Deng X Z, Zhao C H, Yan H M. 2013. Systematic modeling of impacts of land use and land cover changes on regional climate: A review [J]. *Advances in Meteorology*, 2013: Article ID 317678.
- Diffenbaugh N S. 2009. Influence of modern land cover on the climate of the United States [J]. *Climate Dyn.*, 33 (7–8): 945–958.
- 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 Yihui, Li Qiaoping, Dong Wenjie. 2005. A numerical simulation study of the impacts of vegetation changes on regional climate in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (5): 613–621.
- 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 Congbin, Yuan Huilin. 2001. A virtual test of impacts of restoring natural vegetation on summer climate and environmental of East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 46 (8): 691–695.
- Ge J J, Qi J G, Lofgren B. 2008. Use of vegetation properties from EOS observations for land-climate modeling in East Africa [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.* (1984–2012), 113 (D15): D15101.
- Hales K, Neelin J D, Zeng N. 2004. Sensitivity of tropical land climate to leaf area index: Role of surface conductance versus albedo [J]. *J. Climate*, 17 (7): 1459–1473.
- 胡光印, 董治宝, 王文丽, 等. 2009. 近 30a 玛曲县土地利用/覆盖变化监测 [J]. *中国沙漠*, 29 (3): 457–462.
- Hu Guangyin, Dong Zhibao, Wang Wenli, et al. 2009. Change of land use/cover in Maqu County from 1975

- to 2005 [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 29 (3): 457–462.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [M]. Parry M L, Canziani O F, Palutikaf J P, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 976.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [M]. Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 688.
- 李晋昌, 王文丽, 胡光印, 等. 2011. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响 [J]. *生态学报*, 31 (12): 3451–3459. Li Jinchang, Wang Wenli, Hu Guangyin, et al. 2011. Impacts of land use and cover changes on ecosystem service value in Zoige Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 31 (12): 3451–3459.
- 柳媛普, 吕世华, 李锁锁. 2008. 黄河源区草地农牧化对气候环境影响的数值模拟 [J]. *中国沙漠*, 28 (4): 733–740. Liu Yuanpu, Lü Shihua, Li Suosuo. 2008. Numerical simulation of grassland agricultural–pastoralization influencing climate environment in source regions of Yellow River [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 28 (4): 733–740.
- 毛慧琴, 延晓冬, 熊喆. 2011. 土地利用变化对气候影响的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 16 (4): 513–524. Mao Huiqin, Yan Xiaodong, Xiong Zhe. 2011. An overview of impacts of land use change on climate [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16 (4): 513–524.
- Moore N, Torbick N, Lofgren B, et al. 2010. Adapting MODIS-derived LAI and fractional cover into the RAMS in East Africa [J]. *International Journal of Climatology*, 30 (13): 1954–1969.
- 邵璞, 曾晓东. 2012. 土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 17 (1): 103–111. Shao Pu, Zeng Xiaodong. 2012. Progress in the study of the effects of land use and land cover change on the climate system [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17 (1): 103–111.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. *Science*, 215 (4539): 1498–1501.
- Sud Y C, Smith W E. 1985. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 33 (1): 15–49.
- Tao Z, Santanello J A, Chin M, et al. 2013. Effect of land cover on atmospheric processes and air quality over the continental United States —A NASA Unified WRF (NU-WRF) model study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13: 6207–6226.
- Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, et al. 2004. Land boundary conditions from MODIS data and consequences for the albedo of a climate model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (5), doi: 10.1029/2003GL019104.
- 王根绪, 丁永健, 王建, 等. 2004. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化 [J]. *地理学报*, 59 (2): 163–173. Wang Genxu, Ding Yongjian, Wang Jian, et al. 2004. Land ecological changes and evolutionary patterns in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 15 years [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 59 (2): 163–173.
- 王兰宁, 郑庆林, 宋青丽. 2002. 青藏高原下垫面对中国夏季环流影响的研究 [J]. *南京气象学院学报*, 25 (2): 186–191. Wang Lanning, Zheng Qinglin, Song Qingli. 2002. Influences of surface conditions over the Tibetan Plateau on China summer circulation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 25 (2): 186–191.
- Wang L X, Xiao P F, Feng X Z, et al. 2014. Effective compositing method to produce cloud-free AVHRR image [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (1): 328–332.
- Wang M N, Zhang X Z, Yan X D. 2013. Modeling the climatic effects of urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 113 (3–4): 377–385.
- 王文丽, 董治宝, 胡光印, 等. 2008. 若尔盖高原近 30 年沙地变化趋势分析 [J]. *中国沙漠*, 28 (4): 617–621. Wang Wenli, Dong Zhibao, Hu Guangyin, et al. 2008. Analyses on change trend of sandy land in Zoige Plateau in last 30 years [J]. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 28 (4): 617–621.
- 周华坤, 赵新全, 温军. 2012. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征 [J]. *草业学报*, 21 (5): 1–11. Zhou Huakun, Zhao Xinquan, Wen Jun. 2012. The characteristics of soil and vegetation of degenerated alpine steppe in the Yellow River source region [J]. *Acta Prataculturae Sinica* (in Chinese), 21 (5): 1–11.