氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

2001～2010年中国区域土地利用/覆盖变化对陆面过程影响的模拟研究

韩云环 马柱国 李明星 陈亮

Numerical Simulation of the Impact of Land Use/Cover Change on Land Surface Process in China from 2001 to 2010

HAN Yunhuan MA Zhuguo LI Mingxing CHEN Liang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20039

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

上海市土地利用资料优化方案对WRF模式模拟高温过程的影响

Influence of Land Use Data Optimization Schemes on WRF Model Simulations of High Temperature Processes in Shanghai

气候与环境研究. 2020, 25(4): 443 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20013

基于陆面模式基准平台ILAMB对陆面模式CoLM的评估

Evaluation of Common Land Model Based on International Land Model Benchmarking System

气候与环境研究. 2020, 25(6): 649 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20021

模型对年中国东北地区潜在植被分布和碳循环的模拟研究

Simulation of Potential Vegetation Distribution and Carbon Cycle in Northeast China from 1997 to 2010 by LPJ-WHyMe Model

气候与环境研究. 2019, 24(6): 678 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19033

气候与植被覆盖变化对中国西南亚高山区流域碳水循环的影响模拟

Simulations of the Impact of Climate and Vegetation Cover Changes on Carbon and Water Cycles of a Subalpine Basin in the Mountain Region of Southwestern China

气候与环境研究. 2020, 25(1): 19 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18068

成都地区城市化对气候影响的模拟研究

Simulation Study of Urbanization Impact on Climate in Chengdu

气候与环境研究. 2020, 25(3): 240 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182

1960～2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势

Linear Trends in Occurrence of High Temperature and Heat Waves in China for the 19602018 Period: Method and Analysis Results

气候与环境研究. 2020, 25(3): 225 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19134

关注微信公众号，获得更多资讯信息

韩云环, 马柱国, 李明星, 等. 2021. 2001～2010 年中国区域土地利用/覆盖变化对陆面过程影响的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 26(1): 75−90. HAN Yunhuan, MA Zhuguo, LI Mingxing, et al. 2021. Numerical Simulation of the Impact of Land Use/Cover Change on Land Surface Process in China from 2001 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (1): 75−90. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20039

2001 ~ 2010 年中国区域土地利用/覆盖变化对陆面过程影响的模拟研究

韩云环[1, 2, 3] 马柱国[2, 3] 李明星[2] 陈亮[2]

1 河北经贸大学数学与统计学学院，石家庄 050061
2 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，北京 100029
3 中国科学院大学，北京 100049

摘 要 基于 2001 年和 2010 年中分辨率成像光谱仪 MODIS（MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer）土地覆盖数据，利用公共陆面模式（Community Land Model, CLM）模拟真实的土地利用/覆盖变化（Land Use/Cover Change, LUCC）对地表能量平衡和水分循环过程的影响。研究表明：1）在 2001～2010 年，中国 LUCC 最明显的区域位于干旱半干旱区过渡带、半干旱半湿润区过渡带和南方地区；中国区域荒漠减少 0.92%，草地减少 0.01%，农田增加 0.77%，森林增加 2.86%，植被覆盖度整体增加。2）在 2001 年和 2010 年两种土地利用/覆盖背景下，LUCC 使大部分地区感热通量增加，植被蒸腾、蒸发潜热通量增加，土壤表面蒸发潜热通量减小。3）LUCC 使大部分地区地表径流减小；中国西北东部、华北和东北地区土壤湿度减小，其他地区土壤湿度增加，仅干旱半干旱过渡带上的土壤湿度发生了显著变化。4）当典型过渡带区域由荒漠变为草地后，感热通量增加 1.11 W m^{-2}，潜热通量增加 0.14 W m^{-2}；冠层蒸腾和蒸发分别增加 0.039 mm d^{-1}、0.009 mm d^{-1}。土壤湿度平均减小 0.01 m^3 m^{-3}，且随深度增加变干更明显，这是由于根系吸收了较多深层土壤水分，以满足植被显著增加的蒸腾而产生的结果。当草地变为灌木时，其能量通量和水分循环的变化与上述结果类似。

关键词 陆面过程模型（CLM） 陆面过程 土地利用/覆盖变化 中分辨率成像光谱仪（MODIS）
文章编号 1006-9585(2021)01-0075-16 **中图分类号** P461.8 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20039

Numerical Simulation of the Impact of Land Use/Cover Change on Land Surface Process in China from 2001 to 2010

HAN Yunhuan[1, 2, 3], MA Zhuguo[2, 3], LI Mingxing[2], and CHEN Liang[2]

1 *College of Mathematics and Statistics*, *Hebei University of Economics and Business*, *Shijiazhuang* 050061
2 *Key Laboratory of Regional Climate−Environment for Temperate East Asia*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

收稿日期 2020-04-03；**网络预出版日期** 2020-09-11
作者简介 韩云环，女，1988 年出生，博士研究生，讲师，主要从事土地利用/覆盖变化和气候变化研究。E-mail: hanyh@tea.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金 41530532、41275085，国家重点研发计划项目 2016YFA0600404，科技部公益性行业（气象）科研专项项目 GYHY201506001-1，河北经贸大学博士科研启动基金和河北经贸大学校内科研基金 2019QN05

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41530532 and 41275085), National Key Research and Development Program (Grant 2016YFA0600404), Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest (Grant GYHY201506001-1), PhD Scientific Research Startup Foundation of Hebei University of Economics and Business University and Scientific Research Foundation of Hebei University of Economics and Business (Grant 2019QN05)

Abstract Based on MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) land cover data, this study simulated the effects of real land use/cover change (LUCC) from 2001 to 2010 on land surface energy balance and water cycle process using Community Land Model (CLM). The results showed the following: 1) The most dramatic changes in China were located in the transition zones of arid/semiarid areas and semiarid/semi-humid areas, and the areas in southern China during 2001–2010. The barren land decreased by 0.92%, grassland decreased by 0.01%, cropland increased by 0.77%, and forest increased by 2.86%, indicating increased vegetation coverage on the whole. 2) In the case of land use/cover in 2001 and 2010, LUCC increased sensible heat in most parts of China. Canopy transpiration and canopy evaporation latent heat fluxes increased, while ground evaporation heat flux decreased. 3) LUCC decreased the surface runoff in most parts of China. Soil moisture decreased in eastern northwest, North China, and northeast regions but increased in other regions. Soil moisture changed significantly only in the transition zone of arid/semiarid areas. 4) After the barren land turned into grassland in typical transition zone, sensible heat and latent heat increased by 1.11 W m^{-2} and 0.14 W m^{-2}, respectively. Canopy transpiration and canopy evaporation increased by 0.039 and 0.009 mm d^{-1}, respectively. Meanwhile, soil moisture decreased by 0.01 m^3 m^{-3} on average. Because the root absorbed more deep soil water to meet the significantly increased canopy transpiration, soil moisture decreased more with increased soil depth. The changes in energy fluxes and water cycle are similar to the above process when the grassland turned into shrubland.

Keywords Community Land Model (CLM), Land surface process, Land use/cover change, MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

1 引言

已有的研究表明，过去 300 年人类活动已经影响了 42%～68% 的陆地表面（Vitousek et al., 1997; Hurtt et al., 2006）。除温室气体和气溶胶外，土地利用/覆盖变化（Land Use/Cover Change, LUCC）是人类活动影响气候的另外一个重要因素（IPCC, 2013），其影响着局地、区域和全球的气候变化（邵璞和曾晓东, 2012; Mahmood et al., 2014）。LUCC 主要通过生物地球物理和生物地球化学过程影响气候，其中生物地球化学过程是通过向大气排放或者吸收温室气体进而改变碳循环过程来影响气候系统（Pielke et al., 2002; Brovkin et al., 2013）；而生物物理过程是通过引起地表属性和下垫面性质（如地表反照率、粗糙度、土壤湿度）的变化（Yu and Xie, 2013），改变陆面过程中波文比以及降水在蒸散发、径流和土壤水之间的分配来进一步对气候产生影响（Notaro et al., 2006; Findell et al., 2007; Wang et al., 2020），它不仅影响温度、降水，也会对季风和大气环流产生影响（Lei et al., 2008; Imhoff et al., 2010; Lee et al., 2011; Zha et al., 2019）。LUCC 是自然和人为共同影响最显著的问题，其与气候变化和人类活动的相互作用是全球变化研究的核心内容之一（傅伯杰等, 2005; 刘纪远等, 2011）。

LUCC 对气候变化影响的研究主要包括气候效应的观测研究和模拟研究。在观测中很难将土地利用/覆盖变化对局地气候的影响信息从全球变化的大背景中剥离（华文剑等, 2014），而模拟研究中的问题包括模型误差、物理过程和参数的不确定性、对研究尺度和高时空分辨率输入数据的依赖等（Verburg et al., 2004; 张华和张勃, 2005）。目前，多数模拟工作都是采用理想的敏感性土地覆盖试验，如符淙斌和袁慧玲（2001）利用虚拟极端情况模拟东亚地区自然植被恢复后对区域气候和环境的可能影响程度；Zheng et al.（2002）设计了不同程度的植被退化试验研究植被变化对区域气候的可能影响及其机制；陈海山和张叶（2013）将中国东部沿海城市的百分比增加到 50% 探讨此区域大规模城市化对东亚冬季风的可能影响；这些没有考虑人类活动影响下的实际变化情况，不能反映实际 LUCC 的影响。也有一些关于真实 LUCC 气候效应的模拟研究，如 Wang et al.（2014）基于 WRF 模拟 2001～2008 年 LUCC 的气候效应，得出 LUCC 使中国大部分区域温度升高；陈海山等（2015）基于区域气候模式 RegCM4.0 探讨了 1990～2010 年中国 LUCC 对区域气候的影响，表明 LUCC 的影响有显著的季节性差异，不同地区 LUCC 对气候影响的机理不同；王明娜等（2016）利用 WRF 模拟分析了 2001～2010 年中国北方半干旱区 LUCC 对地表温度的影响，得出 LUCC 导致局地多年平均温度降低。由于模式物理过程、试验设计和使用资料等不同，这些研究结果之间存在差异，对于中国 LUCC

的气候效应仍不能得出确切的结论。

不同来源的土地覆盖数据存在差异，也导致模拟结果存在不确定性（陈锋和谢正辉, 2008），土地覆盖数据的准确性是数值试验可靠和准确的基础（Wang et al., 2014）。遥感数据可以以较高的时空分辨率准确地描述地球表面，逐渐成为创建土地覆盖模型初始场的重要数据源。已有研究表明，现有的国际土地覆盖中，MODIS 土地覆盖数据在中国有更高的整体分类精度和可靠性（冉有华等, 2009; 杨永可等, 2014）。随着退耕还林/还草工程的实施，中国区域的土地利用/覆盖从 2000 年开始发生了较大变化（Hvistendahl, 2012; Fan et al., 2015; Piao et al., 2015; Hua et al., 2017），全面启动退耕还林/还草工程后，工程建设的任务和目标是要求到 2010 年完成一定的规模，2001～2010 年是国家实施此工程以来土地利用/覆盖变化最显著的 10 年。因此，本文针对人类活动作用下中国区域真实的 LUCC 情况，利用 2001～2010 年的 MODIS 观测土地覆盖数据分析中国区域 21 世纪以来的 LUCC 及其影响。

土地利用/覆盖变化对气候影响的关键过程是陆面和大气的相互作用（Deng et al., 2013），陆面过程对解释 LUCC 影响气候变化的物理机制尤为重要（张强, 1998），陆面模式的不断完善为研究陆面过程变化问题提供了理想的工具。基于此，本文利用 2001 年和 2010 年 MODIS 观测的土地覆盖数据，生成两套中国陆表覆盖资料，运用 CLM 模式模拟分析 2001～2010 年 LUCC 对陆面过程中能量平衡和水分循环的影响，为探讨 LUCC 对气候的影响及可能机制奠定基础。

2　数据、模式介绍和试验设计

2.1　观测数据

中分辨率成像光谱仪（MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS）土地覆盖数据由搭载在美国地球观测系统（EOS）的 Terra（AM-1）和 Aqua（PM-1）两颗卫星上的 MODIS 反演获取。本文所用 MODIS 土地覆盖分为由国际地圈生物圈计划（International Geosphere Biosphere Programme, IGBP）定义的 17 类，其空间分辨率为 500 m。

观测的温度和降水数据采用中国地面气温（降水）月值 0.5°（纬度）×0.5°（经度）格点数据集 v2.0，该数据是基于国家气象信息中心基础资料专项整编的中国地面 2472 台站资料，利用薄盘样条法插值生成的格点数据。

用于验证模拟结果的观测土壤湿度来自中国气象数据网（http://data.cma.cn/[2015-09-10]）的中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集，观测时间为每月的 8 日、18 日和 28 日，包含 10 cm、20 cm、50 cm、70 cm、100 cm 共 5 层土壤相对湿度值。为保证数据的可靠性，剔除了缺测值较多的站点数据，从全国 778 个站点中选取了 232 个站点的数据进行分析；同时为保证与模式结果的可比性，把相对湿度单位换算成与模式结果相对应的体积含水量，分析的时间段也与模式模拟时间相对应，为 2001～2008 共 8 年。

与模式模拟结果对比检验的潜热通量数据来自于 Jung et al.（2009）的研究结果。它是基于全球涡度相关通量观测塔的数据，通过模型树集成 MTE（Model Tree Ensemble）算法得到。该资料为全球 1982～2011 年的月值数据，空间分辨率为 0.5°。

2.2　CLM 模式介绍

陆面模式 CLM（Community Land Model）结合了 LSM（Bonan, 1996）、IAP94（Dai and Zeng, 1997）和 BATS（Dickinson et al., 1993）等陆面模式的优点后发展成第三代陆面过程模式（Oleson et al., 2004）。大量研究对模式中的陆面参数和水文过程进行改善，更新了基于 MODIS 资料的下垫面数据集和冠层截留方案（Lawrence and Chase, 2007; Thornton and Zimmermann, 2007），引进并完善了径流、地下水、冻土和碳氮循环过程，改进了蒸发、土壤可利用含水量等算法（Niu et al., 2005, 2007; Niu and Yang, 2006），发展成为 CLM3.5。CLM 模式广泛地考虑了生物物理过程、生物地球化学过程、水文过程和动态植被过程，用来模拟陆地生态系统中能量、水分、化学元素和微量气体等的循环过程。本文所使用的版本（CLM3.5），为了订正陆面水循环过程的偏差，引入了描述土壤孔隙度的参数化方案，改善了土壤湿度模拟中的偏差（李明星和马柱国, 2015），并且在中国各区域 CLM3.5 模拟结果与观测的土壤湿度、蒸散（潜热）和径流均有高达 0.8 以上的相关系数（李明星等, 2011; Li and Ma, 2015; Li et al., 2017），表明在区域尺度上 CLM3.5 能够较好描述月及更长时间尺度的水分能量过程的变化特征和趋势（Li and Ma, 2010）。本

文通过进一步对 CLM3.5 模拟的潜热通量和土壤湿度结果与观测进行对比检验，表明其确实有较好的可用性（见 3.1 节）。

2.3 大气驱动场和陆面数据

除了模式物理过程，大气驱动场的质量是影响陆面模式模拟结果的一个关键因素（Dickinson et al., 2006），应用实际观测资料对于提高大气驱动场的质量具有重要的意义。因此本文采用中国气象局的观测气象资料（http://data.cma.cn/[2010-09-08]）构建一个中国区域的大气驱动场，包含气温、降水、气压、风速、比湿和辐射 6 个物理量。通过观测资料插补和网格化，建立了空间分辨率约 0.5°（纬度）×0.5°（经度），时间分辨率 3 h（每日 8 次），时间跨度为 2001～2008 年的驱动场，由于辐射观测资料时空覆盖太低，所以直接采用了 Princeton 的资料（Sheffield et al., 2006; Li and Ma, 2010）。

陆面数据包括地形、土壤质地、土壤颜色、植被功能类型和生理学参数。陆地网格单元的植被部分有 17 种植被功能类型（plant functional types, PFTs），文中不同地表陆面数据的差异主要是 PFTs 不同，相对应的茎、叶面积指数和冠层高度等参数也不同，描述了不同植被生物物理和生物化学过程的差异。两种不同植被覆盖的 PFTs 分别为 2001 年、2010 年 MODIS 观测的植被覆盖类型和比例，MODIS 的 PFTs 分类与 CLM3.5 不同，当一些格点上 MODIS 出现特定的分类而 CLM 的 PFTs 中没有时，将根据格点的位置信息和两种分类类型的性质，判断每个点 MODIS 的特定类型所对应的 CLM 中属性最接近的 PFT，从而确定具体位置上 MODIS 类型对应的 CLM 中的类型及相应比例，将 MODIS 的 PFTs 在 CLM 中展现出来。除去 PFTs，生成两套不同地表陆面数据的其他数据均用 CLM3.5 原始的地形、土壤属性和生理学参数等资料，这些数据主要通过实验观测和 MODIS 产品获得（Lawrence and Chase, 2007）。

2.4 试验设计

考虑到陆面模式对初值的敏感性和模式对各物理量的“记忆性”，首先检测 CLM 模式各物理量达到平衡所需的时间，各物理量的计算采用区域平均值，区域大小为包括整个中国陆面的矩形区域（19.5°N～54.5°N，73.5°E～134.5°E）。严格按照检验标准（Cai et al., 2014），重复运行 2001 年的驱动场直到各个变量达到平衡，调整期时长定为 n，如果

$$\left|\mathrm{Var}^{n+1}-\mathrm{Var}^{n}\right|<0.001\times\left|\mathrm{Var}^{n}\right|, \qquad (1)$$

那么变量Var^{n}即达到平衡。区域平均的各量调整期时间如表 1 所示，土壤湿度的记忆性最长，最深层土壤湿度需要 68 年才能达到平衡。

经过各量的调整期检验后，本文分别利用 2001 年和 2010 年的陆面覆盖数据，重复利用 2001～2008 年的大气驱动场进行了 80 年的积分运算，模式积分时间步长为 30 min，模拟结果每个月输出一次。前面 72 年结果作为调整期，使用最后 8 年的模拟结果进行比较分析。本研究设计 2 组试验的区别就是地表土地利用/覆盖数据不同，用 2001 年和 2010 年的地表差异描述 2001～2010 年的土地利用/覆盖变化情况，从而研究 LUCC 对中国区域陆面过程的影响。为了便于表述，应用 2001 年、2010 年陆面覆盖资料的模拟结果分别命名为 E2001 和 E2010。

中国区域土地利用覆盖类型及其变化复杂多样，本文选取典型区域分析不同 LUCC 对陆面过程的影响异同。所选研究区域海拔高度有较大空间差异性（图 1a），年平均气温受海拔高度和纬度的影响，从北到南递增（图 1b）；年降水量由西北至东南递增（图 1c），依次形成干旱、半干旱、半湿润和湿润等气候类型。大部分研究区域温度显著增加（图 1d），年降水量不同程度的减少（图 1e），呈现明显的暖干化趋势，此地区生态环境脆弱，对气候和地表变化特别敏感，是研究 LUCC 影响的理想区域。

作为主要研究对象的 3 个典型区域（图 1a）分别为区域 1（106°N～114°N，40°E～44°E）、区域 2（104.5°N～107°N，36.5°E～40°E）和区域 3（102°N～114°N，32°E～41°E）。这 3 个典型区域分别代表了不同的土地利用/覆盖变化情况，各

表 1 区域平均各变量调整期时间

Table 1 Spin-up time for individual variables based on averaged values for the whole China a

变量	调整期时间
感热通量	25
潜热通量	33
蒸散	33
土壤湿度	68
地表径流	9

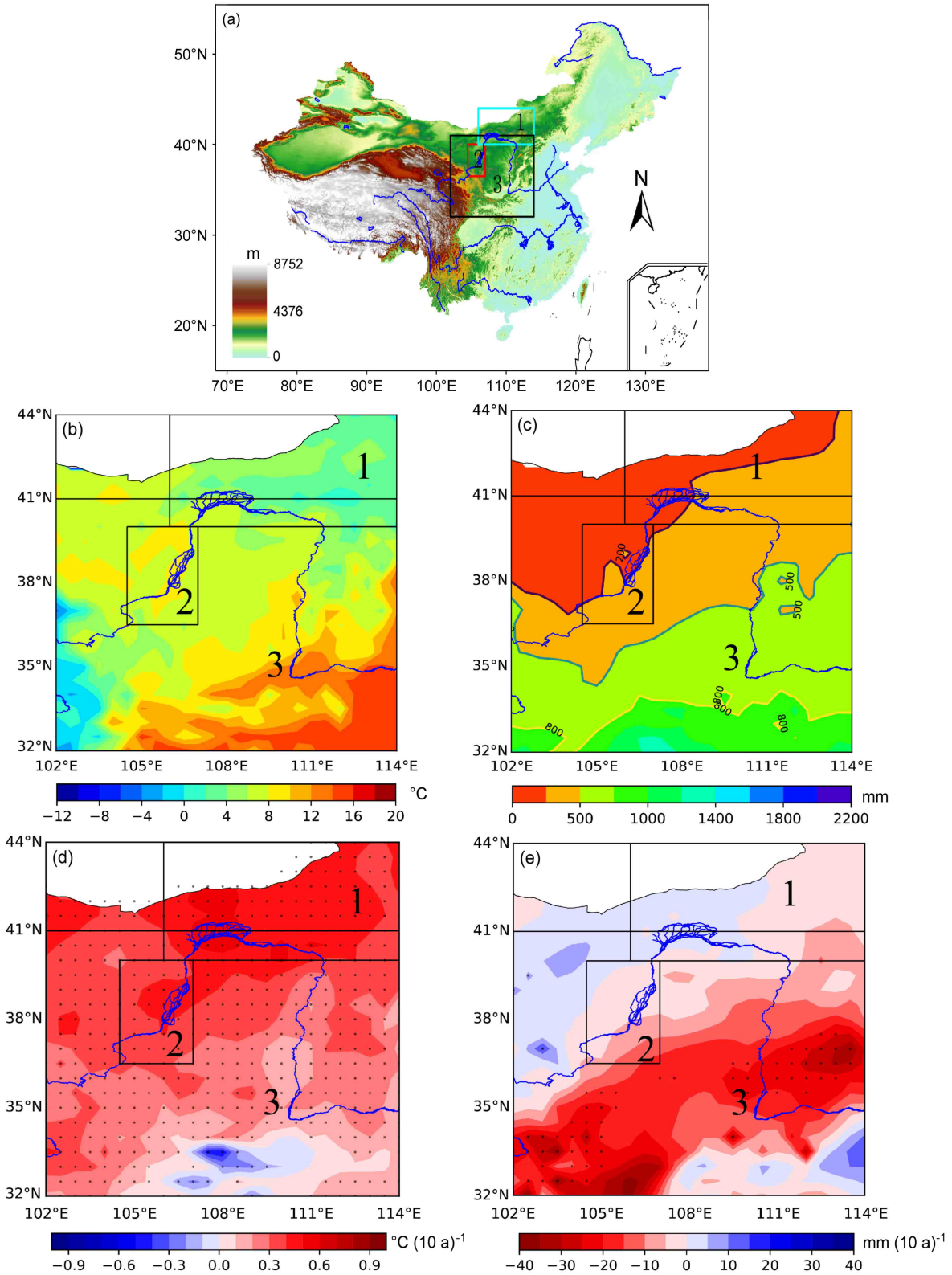

图 1　（a）3 个典型区域位置和地形；（b）1961～1990 年年平均气温、（c）年平均降水量；基于 1961～2010 年数据计算结果的（d）年平均气温变化趋势、（e）年平均降水量变化趋势。黑色圆点表示通过 0.05 的显著性检验

Fig. 1　(a) Location and topography of the three typical regions; (b) mean annual air temperature and (c) mean annual precipitation during 1961–1990; (d) trends of mean annual air temperature and (e) trends of mean annual precipitation calculated based on data from 1961 to 2010. The black dots denote the 0.05 significance level

区针对的科学问题不同。其中区域 1 为荒漠—草地过渡带，是荒漠变草地的典型区域，此区域仅分析荒漠变草地的影响；区域 2 为草地—灌木过渡带，是荒漠或草地变灌木的典型区域，此区域仅分析荒漠或草地变灌木的影响。区域 3 黄土高原地区是气候变化的敏感区，也是受人类活动尤其是退耕还林影响较大的区域，受到广泛关注（张强等, 2013, 2014; Fan et al., 2015; Zhao et al., 2018），为了分析每一个典型区域 LUCC 的影响，选取的典型区域 3 和其他两个区域有部分重合。黄土高原地区各土地类型变化比较复杂，比如荒漠减少 1.76%，开放灌木增加 0.23%，森林增加 3.47% 等（表 2），文中分析区域 3 中 LUCC 的影响是整个区域所有变化影响的平均结果。

3 结果分析

3.1 模式检验

在比较 LUCC 引起陆面过程的差异之前，很有必要检验 CLM 模式的模拟性能。本节参照 E2001 模拟的土壤湿度和潜热通量与观测进行对比，以检验和评估模式的模拟能力。图 2a、2b 分别是观测和模拟的土壤湿度的空间分布。整体上，模拟和观测土壤湿度的空间分布基本一致，模式能够模拟出河套地区低值区和东北、江淮流域高值区的空间分布特点。观测站点的土壤湿度与其对应格点的模拟值的空间相关系数为 0.59，它们之间的偏差与输入场误差、模式参数化、粗分辨率下的次网格效应有关，由于单站观测值存在很大的局地性，观测点的小气候环境与格点尺度的气候驱动存在的差异是模拟和观测差异存在的主要原因。

图 2c、2d 是观测和模拟潜热通量的空间分布，两者分布一致，均由西北向东南递增，模式能够抓住北方潜热通量较小，南方尤其是华南地区潜热通量较大的特征，但模拟的结果中，干旱区数值偏小，湿润区数值偏大。模拟和观测的潜热通量的空间相关系数高达 0.94。

本文选取站点密集，资料比较完整的黄土高原区域（102°N～114°N，32°E～41°E）检验模拟的土壤湿度和潜热通量的变化趋势，结果表明 2001～2008 年，观测和模拟的月平均土壤湿度和潜热通量时间序列分别和其观测值的相关系数达 0.83 和 0.97，均通过了 99% 的显著性检验。

表 2 2001、2010 年中国和黄土高原区域每种土地利用/覆盖类型所占比例

Table 2 Percentage for every land use/cover type in 2001 and 2010 in China and the Loess Plateau

类型	土地利用类型所占比例			
	中国区域		黄土高原	
	2001年	2010年	2001年	2010年
水	0.73%	0.73%	0.06%	0.07%
常绿针叶林	0.39%	0.46%	0.17%	0.31%
常绿阔叶林	1.67%	2.01%	0	0
落叶针叶林	0.10%	0.17%	0.01%	0.01%
落叶阔叶林	0.99%	0.79%	1.49%	1.47%
混合林	12.44%	15.02%	13.72%	17.07%
郁闭灌木	0.58%	0.18%	1.03%	0.74%
开放灌木	1.78%	1.21%	2.79%	3.02%
多树的草地	6.46%	5.22%	1.81%	0.87%
稀树草地	0.41%	0.03%	0.40%	0.01%
草地	30.18%	30.17%	46.11%	41.87%
永久湿地	0.23%	0.33%	0.01%	0.04%
农田	15.42%	16.19%	15.28%	19.59%
城市和建成区	0.85%	0.85%	1.02%	1.02%
农田和自然植被镶嵌体	4.00%	3.77%	2.11%	1.69%
雪、冰	0.70%	0.73%	0	0
荒漠或低植被覆盖地	23.07%	22.15%	13.98%	12.22%

以上结果及中国区域的观测模拟对比验证（2.2 节）表明，CLM3.5 总体上能较好地模拟潜热通量和土壤湿度的空间分布和时间变化特征，其水循环和能量平衡过程对逐月、年的变化具有较好的模拟能力，能够适用于 LUCC 对陆面过程影响的数值模拟研究。

3.2 中国区域土地利用/覆盖变化

图 3a 是 2001 年土地利用/覆盖空间分布，其主要类型的分布和干湿区分界线（200 mm、500 mm、800 mm 年降水量等值线）基本吻合，表明降水决定了植被类型的分布。2001～2010 年，中国区域荒漠减小 0.92%，灌木减少 0.97%，草地减小 0.01%，农田增加 0.77%，森林增加 2.86%，其中混合林增加最多为 2.58%（表 2），整体植被覆盖度增加。图 3b是 LUCC 的空间分布，最明显的变化区域位于干旱半干旱区过渡带、半干旱半湿润区过渡带和南方地区。整体来看，35°N 以南的南方区域土地覆被类型复杂，变化最显著（图 3b），

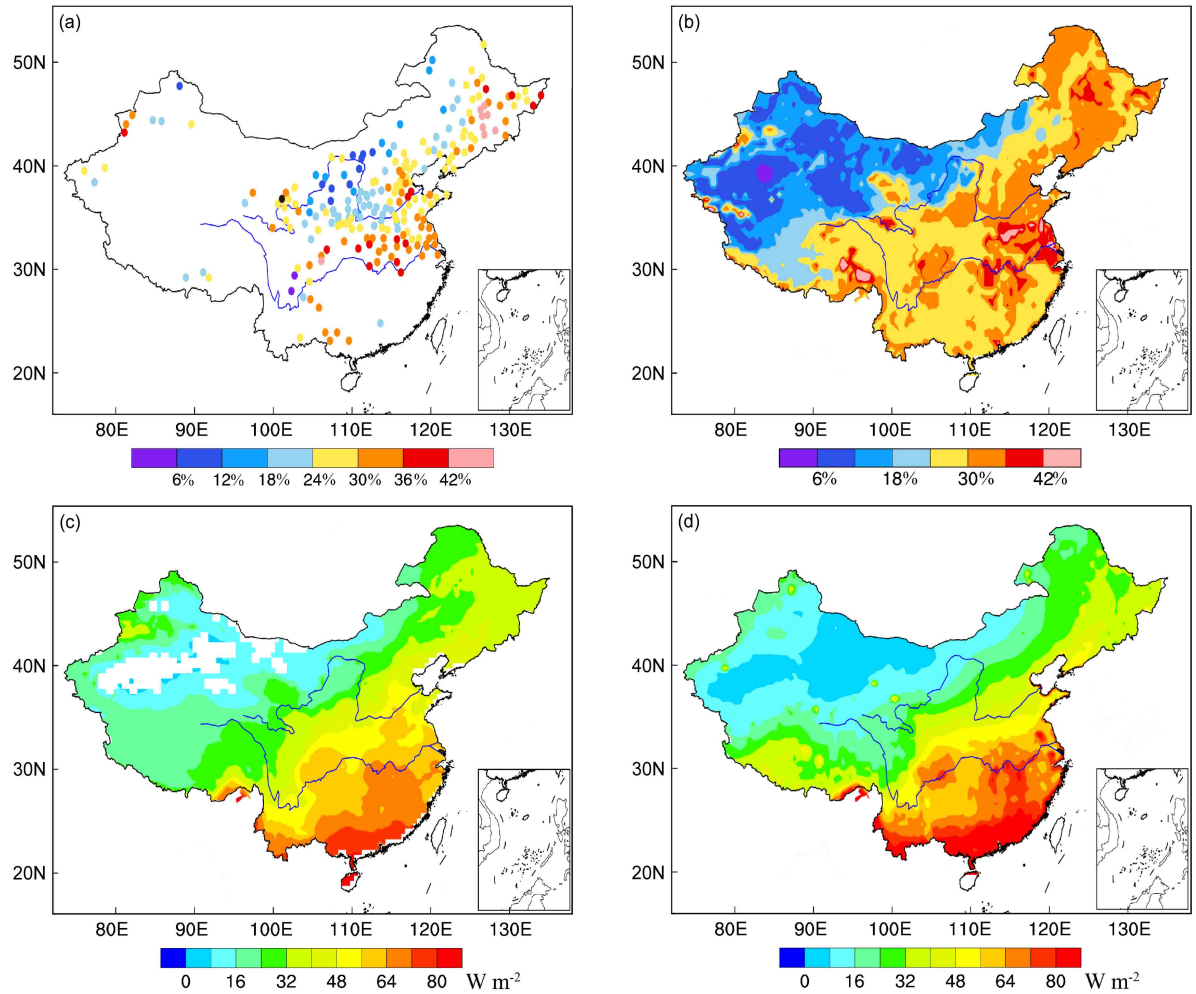

图 2　2001~2008 年（a）观测土壤湿度（0～49.3 cm）和（b）模拟土壤湿度（0～50 cm）、（c）观测潜热通量和（d）模拟潜热通量

Fig. 2　(a) Observed soil moisture (0–49.3 cm) and (b) simulated soil moisture (0–50 cm), (c) observed latent heat flux and (d) simulated latent heat flux during 2001–2008

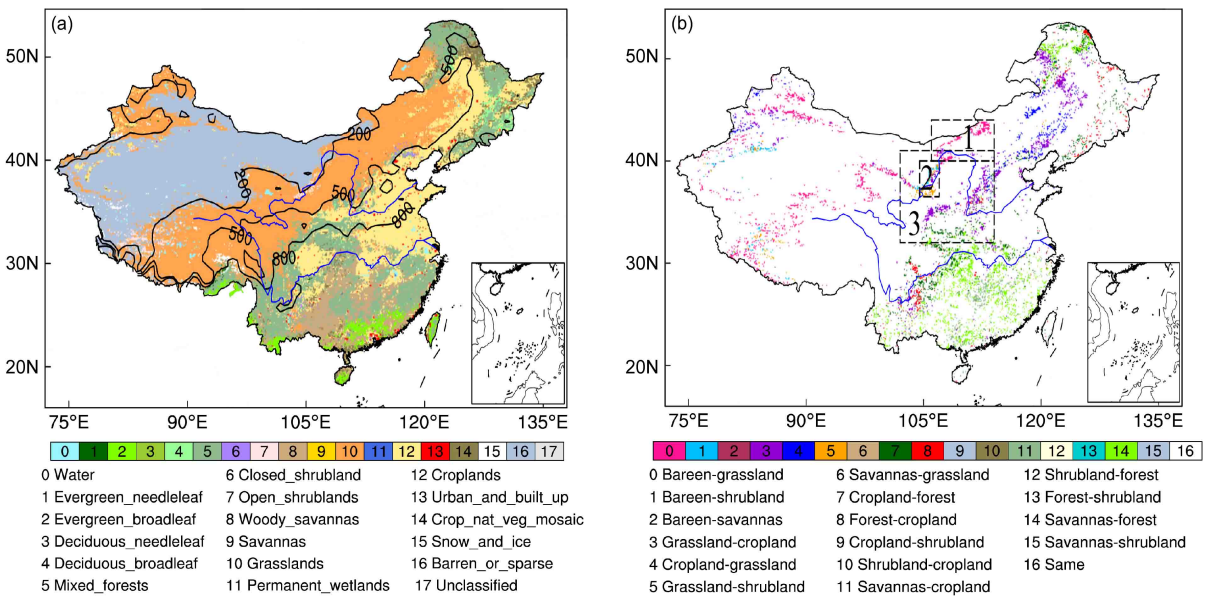

图 3　（a）2001 年土地利用/覆盖类型空间分布和（b）2001～2010 年主要土地利用/覆盖类型的变化

Fig. 3　(a) Spatial distribution of land use/cover types in 2001 and (b) changes in major land use/cover types in 2001–2010

这是因为北方植被的基数远远小于南方，南方地区一个小变化就会远大于北方地区的一个大变化；且南方地区水热充沛，其 LUCC 影响的相对程度远低于北方区域 LUCC 影响的相对程度，这也是本文选取北方部分区域进行研究的原因之一。

3.3 LUCC 对地表属性的影响

叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）是描述叶片的疏密程度和冠层结构特征的重要参量，影响着土壤—植被—大气之间物质和能量的交换过程（Sprintsin et al., 2011; 刘洋等, 2013）。LAI 变化是 LUCC 的“指示器”，是 LUCC 影响区域水循环和能量平衡过程的基础。

试验中已将 MODIS 的各土地覆盖类型对应到 CLM 的 PFTs，LAI 是根据 PFTs 和 CLM 中各 PFTs 的月 LAI 数据得到。图 4a 是中国区域 2001～2010 年 LAI 变化的空间分布。不难看出，差值较大的区域分布在气候过渡带和南方区域，且以 LAI 增大为主要特征，说明相对于 2001 年，2010 年中国区域植被整体变好。3 个典型区域 1、2、3 LAI 的变化量分别为 0.14 m^2m^{-2}、0.22 m^2m^{-2}和 0.15 m^2m^{-2}。

地表反照率是地表反射太阳辐射与总入射太阳辐射之比，它决定了地表和大气间的辐射能量的分配过程，直接影响地表吸收的净辐射（Zhao and Zeng, 2002），是研究地表能量平衡过程的重要参数。

图 4b 是 LUCC 引起的地表反照率的变化。除干旱区外，全国大部分的地表反照率发生了显著变化，且以减小为主，尤以北方的河套平原和长江流域中上游的地表反照率下降得明显，这是因为该地区植被覆盖显著变好，地表变暗，地表反照率相应减小。3 个典型区域 1、2、3 的地表反照率变化量分别为−0.002、−0.03、−0.01。

3.4 LUCC 对陆面能量平衡的影响

图 5a 是 LUCC 引起的净太阳短波辐射的差异，由于地表反照率减小，大部分区域净短波辐射变化均为正，除了典型区域 2、东北西部、长江流域上游显著增加外，其他地区均没有通过显著性检验，说明 LUCC 对地表吸收的净太阳短波辐射并没有产生十分明显的影响。但植被和土壤吸收的净太阳短波辐射在全国大范围发生了显著变化（图 5b、5c），表明 LUCC 改变了地面吸收的太阳辐射在植被和土壤表面之间的分配。LUCC 使植被吸收太阳辐射增加，地表吸收太阳辐射减小，这是因为植被覆盖增加后，植被拦截的太阳辐射增加，而到达土壤表面的太阳辐射则减小，3 个典型区域植被吸收的太阳辐射分别增加 12.76 W m^{-2}、24.22 W m^{-2}、9.86 W m^{-2}，土壤表面吸收的太阳辐射分别减少 12.15 W m^{-2}、17.86 W m^{-2}、7.37 W m^{-2}。

吸收的太阳辐射是感热通量的来源，同植被和土壤表面吸收的太阳辐射变化和分布相对应，植被叶面感热通量显著增加，土壤表面感热通量显著减小，总感热通量增加（图 5d、5e、5f）。与感热通量的差异相比，LUCC 引起的潜热通量变化较小

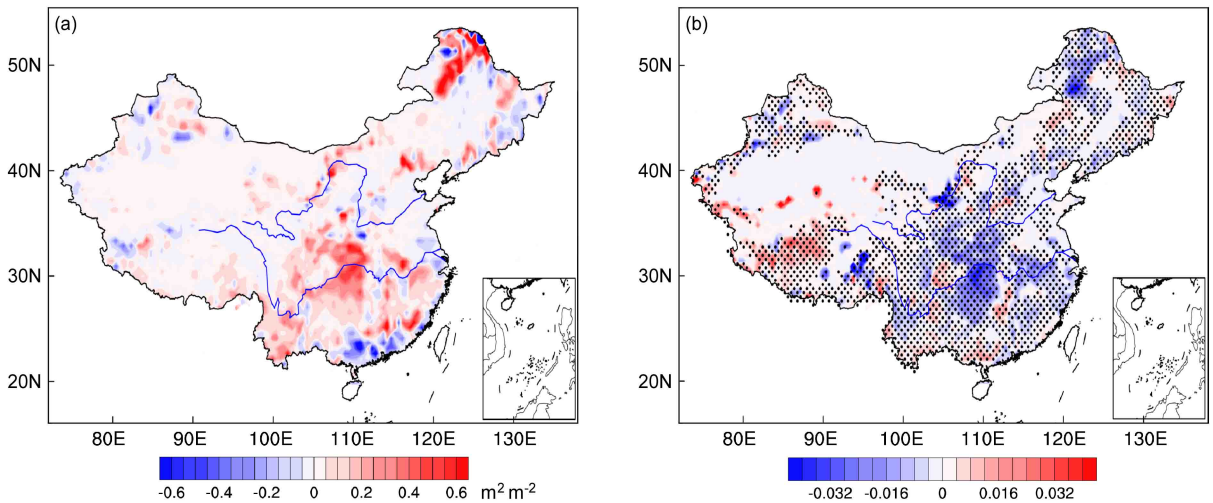

图 4 LUCC 引起的地表属性差异（E2010 减 E2001，E2001、E2010 分别为 2001 年、2010 年陆面覆盖资料的模拟结果）：（a）叶面积指数；（b）地表反照率。黑色圆点表示通过 0.05 的显著性检验

Fig. 4 Surface property differences due to LUCC (E2010 minus E2001, E2001 and E2010 denotes simulation results with land cover data in 2001 and 2010, respectively): (a) Leaf Area Index (LAI); (b) albedo. The black dots denote the 0.05 significance level

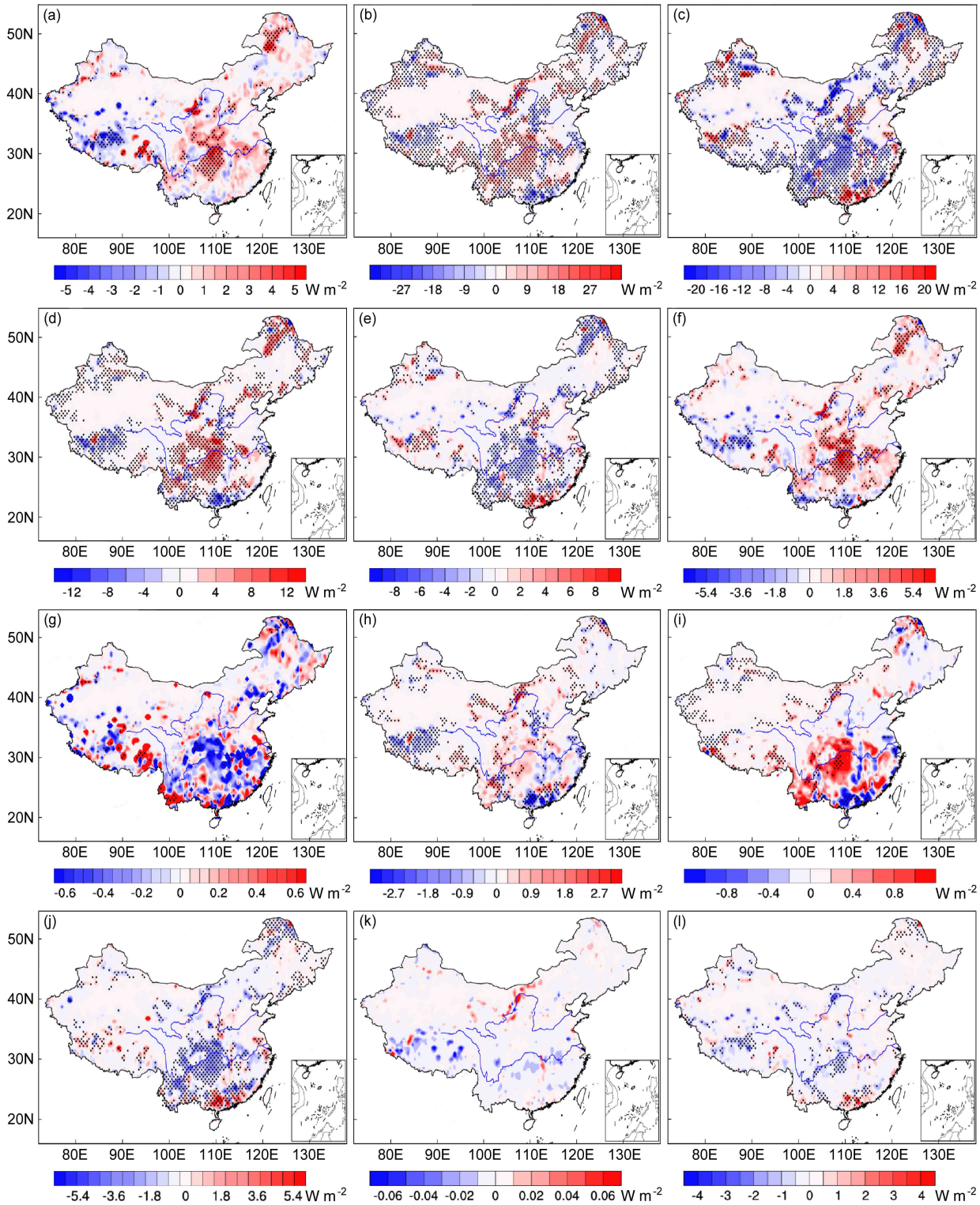

图 5　LUCC 引起的（a）净太阳短波辐射、（b）植被吸收太阳短波辐射、（c）土壤吸收太阳短波辐射、（d）植被叶面感热通量、（e）土壤表面感热通量、（f）感热通量、（g）潜热通量、（h）冠层蒸腾潜热通量、（i）冠层蒸发潜热通量、（j）土壤蒸发潜热通量、（k）土壤热通量、（l）净长波辐射的差异（E2010 减 E2001）。黑色圆点表示通过 0.05 的显著性检验

Fig. 5　Differences of (a) absorbed solar radiation, (b) solar radiation absorbed by vegetation, (c) solar radiation absorbed by the ground, (d) sensible heat from vegetation, (e) sensible heat from the ground, (f) sensible heat flux, (g) latent heat flux, (h) canopy transpiration, (i) canopy evaporation, (j) ground evaporation, (k) heat flux into soil, and (l) net infrared (longwave) radiation due to LUCC (E2010 minus E2001). The black dots denote the 0.05 significance level

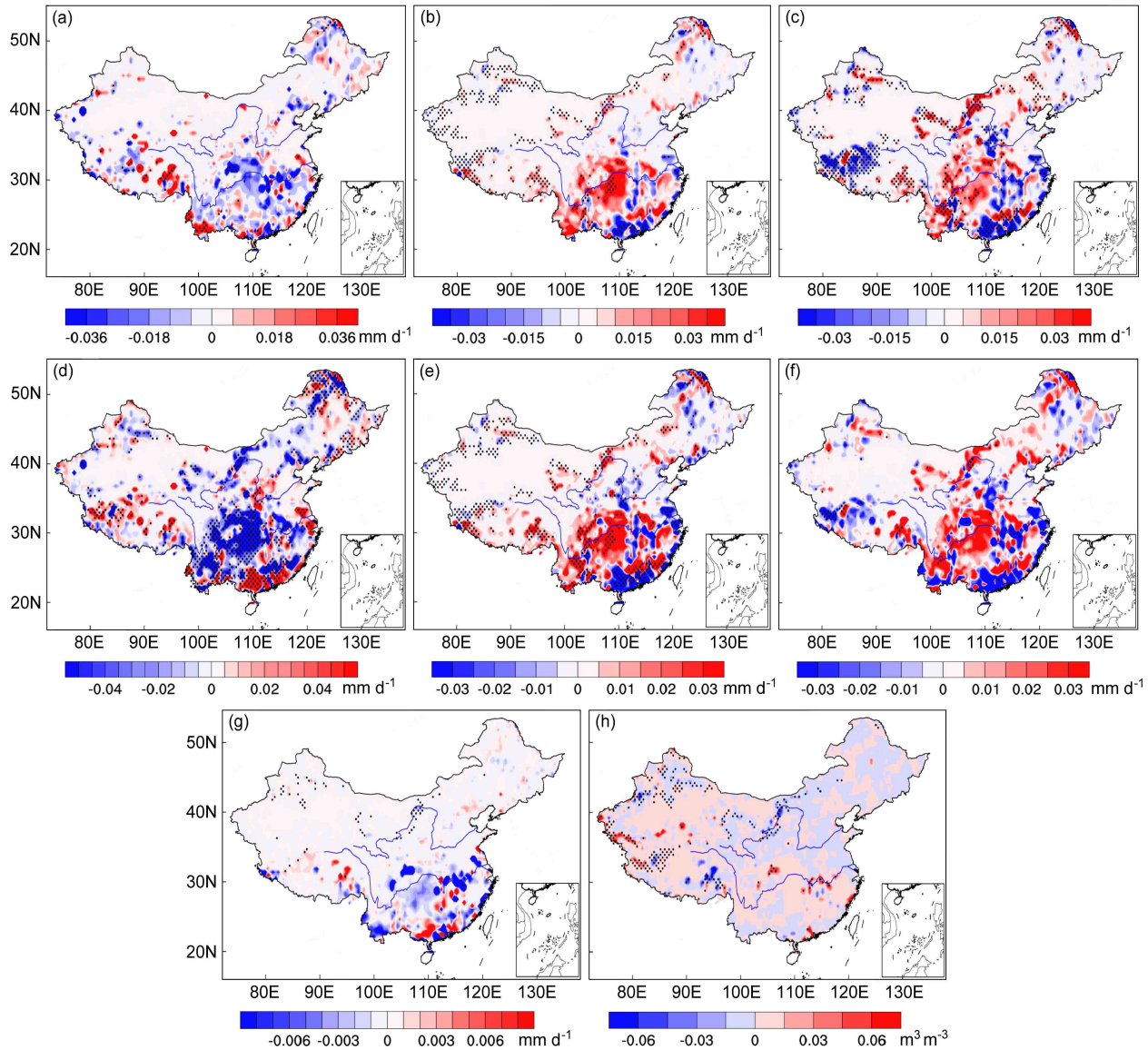

图 6 LUCC 引起的（a）总蒸散发、（b）冠层蒸发、（c）冠层蒸腾、（d）土壤蒸发、（e）截留、（f）入渗、（g）地表径流、（h）土壤湿度的差异（E2010 减 E2001）。黑色圆点表示通过 0.05 的显著性检验

Fig. 6 Differences of (a) evapotranspiration, (b) canopy evaporation, (c) canopy transpiration, (d) ground evaporation, (e) interception, (f) infiltration, (g) surface runoff, (h) volumetric soil water due to LUCC (E2010 minus E2001). The black dots denote the 0.05 significance level

（图 5g），且大部分地区均没有通过显著性检验。潜热通量是由地表蒸发、冠层蒸发和冠层蒸腾 3 个物理分量组成。土地利用/覆盖变化后，植被覆盖增加，叶面积增大，叶片拦截降水后叶面水分增多，冠层蒸腾和蒸发潜热通量增加（图 5h、5i），但增加的叶面积阻碍了地气之间的水热交换，使土壤蒸发潜热通量减少（图 5j），从而总潜热通量尤其是北方地区变化不明显。但 LUCC 引起了北方典型区域的冠层蒸散发和土壤蒸发潜热通量的显著变化，3 个区域冠层蒸腾潜热通量分别增加 1.13 W m^{-2}、1.21 W m^{-2}、0.74 W m^{-2}，冠层蒸发潜热通量分别增加 0.27 W m^{-2}、0.30 W m^{-2}、0.23 W m^{-2}，土壤蒸发潜热通量分别减小了1.26 W m^{-2}、1.55 W m^{-2}、1.03 W m^{-2}，总潜热通量的变化为 0.14 W m^{-2}、−0.04 W m^{-2}、−0.06 W m^{-2}。

土壤热通量是反映土壤表层和深层之间的热交换状况的物理量（张宏等, 2012），影响着植物根系对水分和营养物质的吸收。整个中国区域土壤热通量的变化均不显著（图 5k），其变化具有明显的南北差异，北方尤其是研究的典型区域，土壤热

表 3　各典型区域 LUCC 引起的地表属性、能量通量和水分循环物理量的差异（E2010 减 E2001）

Table 3　Differences in surface properties, energy fluxes, and water cycle variables caused by LUCC in each typical region (E2010 minus E2001)

	物理量的差值											
	叶面积指数/$m^2\ m^{-2}$	地表反照率	吸收太阳辐射/$W\ m^{-2}$	植被吸收太阳辐射/$W\ m^{-2}$	地表吸收太阳辐射/$W\ m^{-2}$	植被感热通量/$W\ m^{-2}$	地表感热通量/$W\ m^{-2}$	感热通量/$W\ m^{-2}$	潜热通量/$W\ m^{-2}$	冠层蒸腾潜热通量/$W\ m^{-2}$	冠层蒸发潜热通量/$W\ m^{-2}$	地表蒸发潜热通量/$W\ m^{-2}$
区域1	0.14	−0.002	0.61	12.76	−12.15	1.43	−0.32	1.11	0.14	1.13	0.27	−1.26
区域2	0.22	−0.03	6.36	24.22	−17.86	10.91	−4.99	5.92	−0.04	1.21	0.3	−1.55
区域3	0.15	−0.01	2.49	9.86	−7.37	4.52	−1.79	2.73	−0.06	0.74	0.23	−1.03

	物理量的差值											
	土壤热通量/$W\ m^{-2}$	净长波辐射/$W\ m^{-2}$	蒸散/$mm\ d^{-1}$	冠层蒸发/$mm\ d^{-1}$	冠层蒸腾/$mm\ d^{-1}$	土壤蒸发/$mm\ d^{-1}$	截留/$mm\ d^{-1}$	地表径流/$mm\ d^{-1}$	入渗/$mm\ d^{-1}$	土壤湿度/$m^3\ m^{-3}$	叶面温度/K	地表温度/K
区域1	0.02	−0.67	0.004	0.009	0.039	−0.044	0.014	-4.4×10^{-4}	0.032	−0.01	−0.22	−0.13
区域2	0.03	0.45	−0.001	0.011	0.042	−0.054	0.016	1.1×10^{-4}	0.039	−0.02	0.13	−0.08
区域3	0.01	−0.19	−0.001	0.008	0.026	−0.035	0.009	-2.82×10^{-5}	0.026	−0.01	−0.03	−0.11

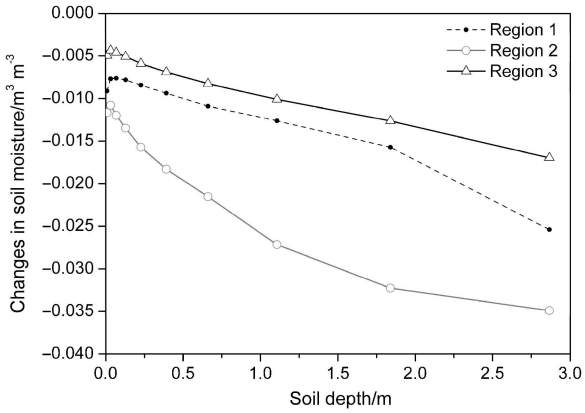

图 7　各典型区域 LUCC 引起的不同深度土壤湿度的变化（E2010 减 E2001）

Fig. 7　Changes in soil moisture at different depths in typical regions due to LUCC (E2010 minus E2001)

通量增加，但 35°N 以南的南方地区土壤热通量减小。3 个典型区域土壤热通量分别增加 0.02 W m^{-2}、0.03 W m^{-2}、0.01 W m^{-2}。土壤热通量的变化相对于感热、潜热较小，其在能量平衡过程中比重较低。

图 5l 显示大部分 LUCC 显著的区域净长波辐射均减少。地表发射的净长波辐射是地表发射长波辐射和大气逆辐射的差值，因为 E2001 和 E2010 大气长波辐射相同，净长波辐射的变化跟地表发射长波辐射的变化一致；又由斯蒂芬—玻尔兹曼定律的地表发射能量可知，地表发射能量的变化和地表温度的变化一致，由此可推断地表温度也发生了类似净长波辐射的变化。

3.5　LUCC 对陆面水分循环的影响

土地利用/覆盖变化改变了区域的下垫面状况，随着地表粗糙度、感热通量和潜热通量等的变化，地表水循环过程也存在不同程度的响应。蒸散发过程是连接大气和陆面水文循环过程中的一个重要环节，它作为气候系统的一个核心过程，将水文循环、能量收支和碳循环等紧密联系起来（Jung et al., 2010）。蒸散（图 6a）及其 3 个分量（图 6b、6c、6d）与潜热的变化结果一致（表 3），由于冠层蒸发和冠层蒸腾的增加量和土壤蒸发的减小量部分抵消，总蒸散变化较小。蒸散的变化中，土壤蒸发变化最大，其次为冠层蒸腾，冠层蒸发量变化最小。

截留直接与叶面积有关，LUCC 引起的 LAI 增加使中国大部分区域截留显著增加（图 6e），3 个典型区域截留分别增加 0.014 mm d^{-1}、0.016 mm d^{-1}、0.009 mm d^{-1}。同样由于增加的叶片具有滞水作用，增加了下渗时间，中国大部分区域入渗量增加（图 6f），地表径流减小（图 6g），但除了区域 1 和区域 2，其他区域均没有通过显著性检验。3 个典型区入渗量变化分别为 0.032 mm d^{-1}、0.039 mm d^{-1}、0.026 mm d^{-1}。地表径流量数值及变化均较小，3 个区域的变化分别为−0.00044 mm d^{-1}、0.00011 mm d^{-1}、-2.82×10^{-5} mm d^{-1}。区域 2 由荒漠/草地变为灌木后，地表径流反而增加，可能原因是增加的植被减小了地表与大气的水分交换，土壤蒸发减小量为 0.054 mm d^{-1}，而入渗量增加了 0.039 mm d^{-1}，还有一部分水分以增加的地表径流形式存在。

截留、蒸散、入渗、径流等各水分循环分量共同影响着土壤湿度的变化，土壤湿度积累了地表水文过程的大部分信息，是陆气相互作用中能量和物

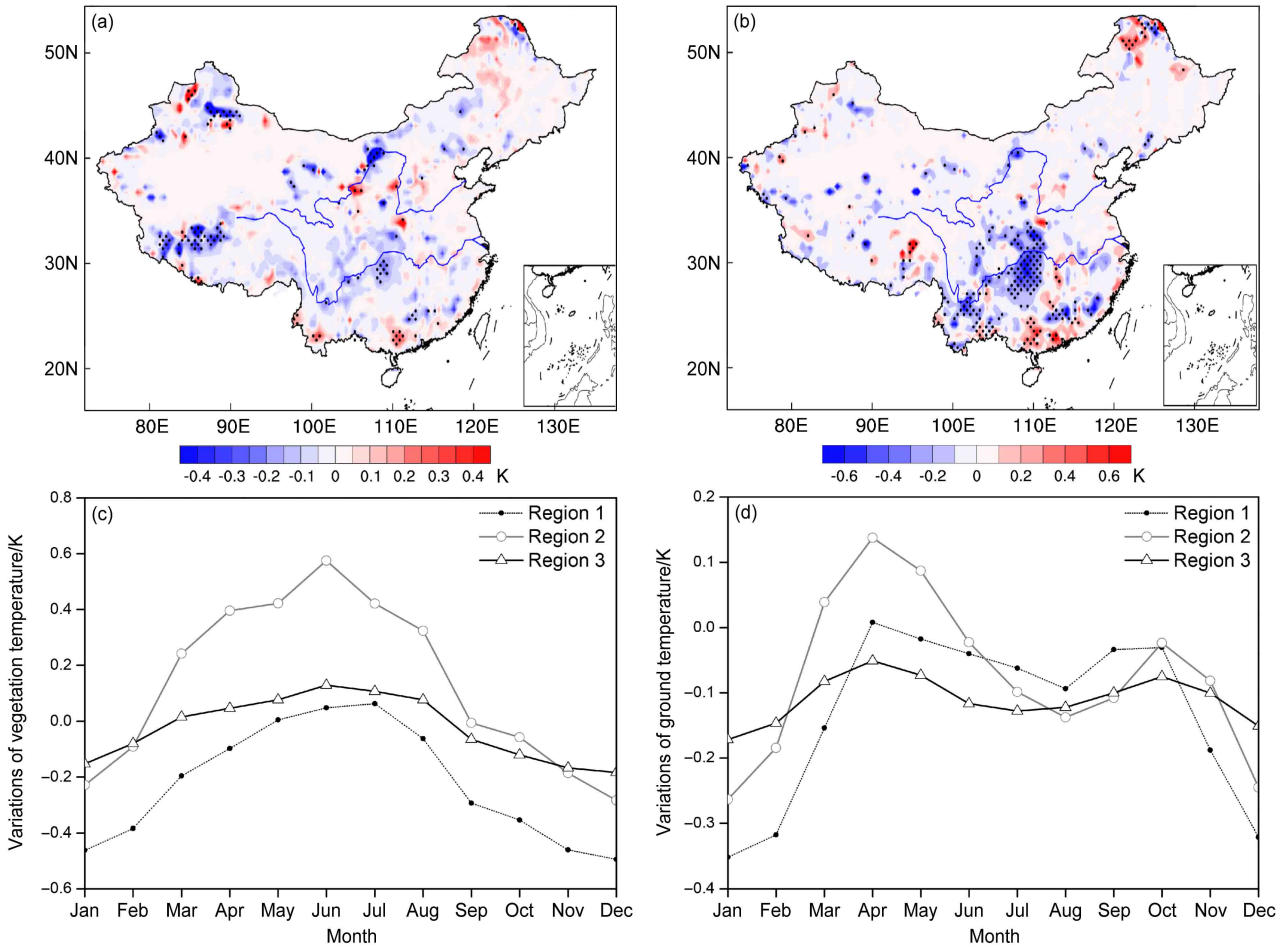

图 8 LUCC 引起的地表热力状况的差异（E2010 减 E2001）：（a）叶面温度和（b）地表温度（黑色圆点表示通过 0.05 的显著性检验）；各典型区域（c）叶面温度和（d）植被温度的月变化

Fig. 8 Differences in thermal conditions due to LUCC (E2010 minus E2001): (a) Vegetation temperature; (b) ground temperature (the black dots denote the 0.05 significance level); monthly variations of (c) vegetation temperature and (d) ground temperature change in typical regions

质交换的调节器（李明星等, 2011）。中国北方的西北东部、华北和东北地区土壤湿度减小，其他地区土壤湿度增加，但仅干旱半干旱过渡带上的土壤湿度发生了显著变化（图 6h）。3 个典型区域土壤湿度分别减小 0.01 $m^3\ m^{-3}$、0.02 $m^3\ m^{-3}$、0.01 $m^3\ m^{-3}$。

图 7 是 LUCC 引起的各典型区域不同深度土壤湿度的变化，随着深度加深，土壤湿度减小得越明显，这是由于植被覆盖增加后，叶面蒸腾量明显增加，根系吸收深层土壤水分满足作物蒸腾的需求，从而导致深层土壤湿度明显变干。

综上，LUCC 通过改变大气降水的分配影响水循环过程，植被覆盖增加后，截留增加，冠层蒸散增加，土壤蒸发减小，入渗增加，径流减小，土壤湿度减小，并且随深度增加变干越明显。

3.6 LUCC 对地表热力状况的影响

图 8a、8b 是 LUCC 引起的植被叶面温度和地表温度变化的空间分布。整体来看，大部分区域的叶面温度和土壤表面温度降低，但只有干旱半干旱区过渡带和南方的局地区域变化显著。3 个典型区域植被叶面温度变化为−0.22 K、0.13 K、−0.03 K，地表温度变化为−0.13 K、−0.08 K、−0.11 K，仅区域 2 的植被叶面温度和地表温度变化显著。3 个区域的年平均叶面温度变化增减不一，从月变化图（图 8c）可得，生长季尤其是 5～8 月，3 个区域的叶面温度均增加，其他月份温度降低。这是因为，当植被覆盖增加后，植被吸收的太阳辐射增加，引起叶面温度升高，但植被蒸腾和蒸发增加带走热量，使叶面温度降低，这两个过程的综合作用决定着叶面温度的变化。土壤表面温度减小主要是土壤表面吸收的净太阳短波辐射减少造成的，但区域 2 在 3～5 月土壤表面温度升高（图 8d），可能原因是地表反照率减小引起此时净太阳辐射增加，但植被

叶面拦截的太阳辐射增量较少，使到达土壤表面的太阳辐射能量增加，从而土壤表面温度升高。

综上，植被覆盖增加使生长季叶面温度升高，土壤表面温度降低。

4 结论和讨论

本文基于 MODIS 观测的 2001 年和 2010 年两种地表覆盖数据，利用陆面模式 CLM3.5 模拟 LUCC 对陆面过程的影响，分析了两种下垫面情形下能量通量、水分平衡和热力状况的差异。主要得出以下结论：

（1）在 2001～2010 年，中国 LUCC 最明显的区域位于干旱半干旱区过渡带、半干旱半湿润区过渡带和南方地区。中国区域荒漠减少 0.92%，灌木减少 0.97%，草地减少 0.01%，农田增加 0.77%，森林增加 2.86%，植被覆盖度整体增加。

（2）在 2001 年和 2010 年两种土地利用/覆盖背景下，LUCC 引起大部分地区感热通量增加，植被蒸腾、蒸发潜热通量增加，土壤表面蒸发潜热通量减小。土壤热通量的变化相对于感热、潜热通量较小，其在能量平衡过程中比重较低。

（3）LUCC 使大部分地区叶面蒸发和蒸腾均增加，土壤表面蒸发减小，径流减小。中国西北东部、华北和东北地区土壤湿度减小，其他地区土壤湿度增加，仅干旱半干旱过渡带上的土壤湿度发生了显著变化。植被覆盖增加使生长季叶面温度升高，其他月份温度降低，全年土壤表面温度均降低。

（4）当典型过渡带区域由荒漠变为草地后，感热通量增加 1.11 W m^{-2}，潜热通量增加 0.14 W m^{-2}；冠层蒸腾和蒸发分别增加 0.039 mm d^{-1}、0.009 mm d^{-1}，土壤湿度平均减小 0.01 m^3 m^{-3}，且随深度增加变干越明显，这是由于根系吸收了较多深层土壤水分，以满足植被显著增加的蒸腾而产生的结果。当草地变为灌木时，其能量通量和水分循环的变化与上述结果类似。

本文模拟的大部分结果与相关研究结果一致，如植被覆盖增加使感热通量和潜热通量增加（Zhang et al., 2020），总蒸散发增加（Wang et al., 2014, 2020），地表径流减少（Li et al., 2016）；关于土壤湿度的变化，本文得出植被覆盖变好以后，会引起中国北方各区域土壤湿度变干，这与过去的研究结果一致（李婧华等, 2013），尤其是关于黄土高原地区，观测结果也表明，植被的恢复引起土壤湿度变干，并且深层土壤干层在不断扩张（Yang et al., 2012; Xiao et al., 2014; Deng et al., 2016）。关于模式结果中一些地方土壤湿度变化没通过显著性检验，推断有以下原因：LUCC 的影响有明显的季节差异（丁一汇等, 2005; 陈海山等, 2015; Lian et al., 2017），这可能导致 LUCC 影响的年平均结果不显著；另外，文中研究 LUCC 的影响是基于 2010 年和 2001 年地表数据的对比，2010 年仍处于退耕还林的前期，短期内土地利用/覆盖变化及其影响相对较小，可能导致结果不显著。随着退耕还林/还草工程的进一步实施，近几年的土地利用覆盖数据相对于 2001 年的变化更明显，水循环对 LUCC 的响应会增大，从而 LUCC 的影响也会更显著。因此，考虑较长时间的退耕还林/还草引起的 LUCC 的影响和 LUCC 的季节性差异是值得进一步研究的科学问题。

由于使用数据资料、试验设计和模式的差异，本研究得出的结果和前人的研究存在差异和不确定性。陈海山等（2006）、王平和沈润平（2013）等用 CLM 模拟指出，植被覆盖的增加使土壤变得更湿，这与本文模式结果及观测的结果正好相反；其主要原因可能是运用的 CLM 模式版本、驱动场、土地覆盖数据、研究区域或者考虑的土壤湿度深度的差异造成的。本文的结论尽管是依赖于陆面模式的离线（offline）模拟结果，但我们从中不难看出植被变化对地表水热过程具有重要的影响，这势必影响到区域气候的变化，进一步的工作需要利用大气—陆面耦合模式进行深入研究。

此外，除了 LUCC 的影响，气候变化也会对地表能量平衡和水分循环过程产生影响。研究表明，黄土高原暖干化的趋势引起地表感热通量、潜热通量和土壤热通量呈减小趋势，年际干湿波动对能量平衡分量的影响显著（张强等, 2013, 2014）。水分循环过程也与气候变化密切相关，温度、降水强度、降水持续时间和总降水量的变化影响着土壤湿度、径流和蒸散发等水循环分量（Hua et al., 2013; Tang, 2020）。不同的气候背景下，同样 LUCC 的影响也会有差异（Pitman et al., 2011; 胡祖恒等, 2018）。能量平衡和水分循环过程是受多因素影响的多个环节形成的复杂过程，下一步工作需要考虑更全面的因素才能掌握其实际的变化规律和机制。

参考文献（References）

Bonan G B. 1996. Land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and users' guide [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN - 417.

Brovkin V, Boysen L, Arora V K, et al. 2013. Effect of anthropogenic land-use and land-cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the twenty-first century [J]. J. Climate, 26(18): 6859−6881. doi:10.1175/JCLI-D-12-00623.1

Cai X T, Yang Z L, David C H, et al. 2014. Hydrological evaluation of the Noah-MP land surface model for the Mississippi River basin [J]. J. Geophys. Res., 119(1): 23−38. doi:10.1002/2013JD020792

陈锋, 谢正辉. 2008. 农作物分布对南水北调受水区域陆面过程模拟的影响 [J]. 地理科学进展, 27(4): 28−36. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2008. Effects of crop distribution on land surface simulations over the intake area of the South-to-North Water transfer project [J]. Progress in Geography (in Chinese), 27(4): 28−36. doi:10.11820/dlkxjz.2008.04.005

陈海山, 倪东鸿, 李忠贤, 等. 2006. 植被覆盖异常变化影响陆面状况的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 29(6): 725−734. Chen Haishan, Ni Donghong, Li Zhongxian, et al. 2006. Modeling of impacts of vegetation coverage change on land surface conditions [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(6): 725−734. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.06.001

陈海山, 张叶. 2013. 大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验 [J]. 科学通报, 58(13): 1221−1227. Chen Haishan, Zhang Ye. 2013. Sensitivity experiments of impacts of large-scale urbanization in East China on East Asian winter monsoon [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 58(13): 1221−1227. doi:10.1007/s11434-012-5579-z

陈海山, 李兴, 华文剑. 2015. 近 20 年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟 [J]. 大气科学, 39(2): 357−369. Chen Haishan, Li Xing, Hua Wenjian. 2015. Numerical simulation of the impact of land use/land cover change over China on regional climates during the last 20 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(2): 357−369. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14114

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(4): 433−460. doi:10.1007/s00376-997-0063-4

Deng L, Yan W M, Zhang Y W, et al. 2016. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China [J]. Forest Ecology and Management, 366: 1−10. doi:10.1016/j.foreco.2016.01.026

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: 317678. doi:10.1155/2013/317678

Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere−Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version le as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-387 + STR.

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. doi:10.1175/JCLI3742.1

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 Meteor. Sinica (in Chinese), 63(5): 613−621. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.007

Fan X G, Ma Z G, Yang Q, et al. 2015. Land use/land cover changes and regional climate over the Loess Plateau during 2001−2009. Part I: Observational evidence [J]. Climatic Change, 129(3): 427−440. doi:10.1007/s10584-014-1069-4

Findell K L, Shevliakova E, Milly P C D, et al. 2007. Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate [J]. J. Climate, 20(14): 3621−3634. doi:10.1175/JCLI4185.1

傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 2005. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 20(5): 556−560. Fu Bojie, Niu Dong, Zhao Shidong. 2005. Study on global change and terrestrial ecosystems: History and prospect [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20(5): 556−560. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.05.011

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(14): 1199−1203. Fu Congbin, Yuan Huiling. 2001. An 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., 46(14): 1199−1203. doi:10.1007/BF02900602

胡祖恒, 徐忠峰, 马柱国. 2018. 欧洲地区不同温室气体背景下土地利用/覆盖变化的气候效应 [J]. 气候与环境研究, 23(2): 176−184. Hu Zuheng, Xu Zhongfeng, Ma Zhuguo. 2018. The impact of land use/land cover changes under different greenhouse gas concentrations on climate in Europe [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23(2): 176−184. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17010

Hua W J, Chen H S, Zhu S G, et al. 2013. Hotspots of the sensitivity of the land surface hydrological cycle to climate change [J]. Chinese Sci. Bull., 58(30): 3682−3688. doi:10.1007/s11434-013-5846-7

华文剑, 陈海山, 李兴. 2014. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述 [J]. 地球科学进展, 29(9): 1025−1036. Hua Wenjian, Chen Haishan, Li Xing. 2014. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 29(9): 1025−1036. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.09.1025

Hua W J, Chen H S, Zhou L M, et al. 2017. Observational quantification of climatic and human influences on vegetation greening in China [J]. Remote Sensing, 9(5): 425. doi:10.3390/rs9050425

Hurtt G C, Frolking S, Fearon M G, et al. 2006. The underpinnings of land-use history: Three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands [J]. Global Change Biology, 12(7): 1208−1229. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01150.x

Hvistendahl M. 2012. Turning over a new leaf in China's forests [J]. Science, 337(6090): 26−27. doi:10.1126/science.337.6090.26

Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, et al. 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. Remote Sensing of Environment, 114(3): 504−513. doi:10.1016/j.rse.2009.10.008

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M].

Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1–1535.

Jung M, Reichstein M, Bondeau A. 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model [J]. Biogeosciences, 6(10): 2001−2013. doi:10.5194/bg-6-2001-2009

Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 467(7318): 951−954. doi:10.1038/nature09396

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(G1): G01023. doi:10.1029/2006JG000168

Lee E, Sacks W J, Chase T N, et al. 2011. Simulated impacts of irrigation on the atmospheric circulation over Asia [J]. J. Geophys. Res., 116(D8): D08114. doi:10.1029/2010JD014740

Lei M, Niyogi D, Kishtawal C, et al. 2008. Effect of explicit urban land surface representation on the simulation of the 26 July 2005 heavy rain event over Mumbai, India [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(20): 5975−5995. doi:10.5194/acp-8-5975-2008

李婧华, 陈海山, 华文剑. 2013. 大尺度土地利用变化对东亚地表能量、水分循环及气候影响的敏感性试验 [J]. 大气科学学报, 36(2): 184−191. Li Jinghua, Chen Haishan, Hua Wenjian. 2013. Sensitivity experiments on impacts of large-scale land use change on surface energy balance, hydrological cycle and regional climate over East Asia [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(2): 184−191. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.02.007

Li M X, Ma Z G. 2010. Comparisons of simulations of soil moisture variations in the Yellow River basin driven by various atmospheric forcing data sets [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(6): 1289−1302. doi:10.1007/s00376-010-9155-7

李明星, 马柱国. 2015. 基于模拟土壤湿度的中国干旱检测及多时间尺度特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 45(7): 994−1010. Li Mingxing, Ma Zhuguo. 2015. Soil moisture drought detection and multi-temporal variability across China [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 45(7): 994−1010. doi:10.1007/s11430-015-5076-8

Li M X, Ma Z G. 2015. Sensible and latent heat flux variability and response to dry−wet soil moisture zones across China [J]. Bound.-Layer Meteor., 154(1): 157−170. doi:10.1007/s10546-014-9963-x

李明星, 马柱国, 牛国跃. 2011. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究 [J]. 科学通报, 56(16): 1809−1820. Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. 2011. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China [J]. Chinese Sci. Bull., 56(16): 1809−1820. doi:10.1007/s11434-011-4493-0

Li M X, Ma Z G, Lü M X. 2017. Variability of modeled runoff over China and its links to climate change [J]. Climatic Change, 144(3): 433−445. doi:10.1007/s10584-015-1593-x

Li Y Z, Liu C M, Zhang D, et al. 2016. Reduced runoff due to anthropogenic intervention in the Loess Plateau, China [J]. Water, 8(10): 458. doi:10.3390/w8100458

Lian L S, Li B F, Chen Y N, et al. 2017. Quantifying the effects of LUCCs on local temperatures, precipitation, and wind using the WRF model [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 189(10): 501. doi:10.1007/s10661-017-6204-z

刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 等. 2011. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探 [J]. 地球科学进展, 26(10): 1015−1022. Liu Jiyuan, Shao Quanqin, Yan Xiaodong, et al. 2011. An overview of the progress and research framework on the effects of land use change upon global climate [J]. Advances in Earth Sciences (in Chinese), 26(10): 1015−1022.

刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 等. 2013. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望 [J]. 地球信息科学学报, 15(5): 734−743. Liu Yang, Liu Ronggao, Chen Jingming, et al. 2013. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data [J]. Journal of Geo-Information Science (in Chinese), 15(5): 734−743. doi:10.3724/SP.J.1047.2013.00734

Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, et al. 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate [J]. Int. J. Climatol., 34(4): 929−953. doi:10.1002/joc.3736

Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. 2005. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models [J]. J. Geophys. Res., 110(D21): D21106. doi:10.1029/2005JD006111

Niu G Y, Yang Z L. 2006. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale [J]. Journal of Hydrometeorology, 7(5): 937−952. doi:10.1175/JHM538.1

Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. 2007. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data [J]. J. Geophys. Res., 112(D7): D07103. doi:10.1029/2006JD007522

Notaro M, Liu Z, Williams J W. 2006. Observed vegetation−climate feedbacks in the United States [J]. J. Climate, 19(5): 763−786. doi:10.1175/JCLI3657.1

Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-461+STR.

Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. 2015. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years [J]. Global Change Biology, 21(4): 1601−1609. doi:10.1111/gcb.12795

Pielke R A, Marland G, Betts R A, et al. 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360(1797): 1705−1719. doi:10.1098/rsta.2002.1027

Pitman A J, Avila F B, Abramowitz G, et al. 2011. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate [J]. Nature Climate Change, 1(9): 472−475. doi:10.1038/nclimate1294

冉有华, 李新, 卢玲. 2009. 四种常用的全球 1 Km 土地覆盖数据中国区域的精度评价 [J]. 冰川冻土, 31(3): 490−500. Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. 2009. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 31(3): 490−500.

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. doi:10.3878/

j.issn.1006-9585.2011.10029

Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. J. Climate, 19(13): 3088−3111. doi:10.1175/JCLI3790.1

Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, et al. 2011. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 151(5): 565−574. doi:10.1016/j.agrformet.2011.01.001

Tang Q H. 2020. Global change hydrology: Terrestrial water cycle and global change [J]. Science China Earth Sciences, 63(3): 459−462. doi:10.1007/s11430-019-9559-9

Thornton P E, Zimmermann N E. 2007. An improved canopy integration scheme for a land surface model with prognostic canopy structure [J]. J. Climate, 20(15): 3902−3923. doi:10.1175/JCLI4222.1

Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. 2004. Land use change modelling: Current practice and research priorities [J]. GeoJournal, 61(4): 309−324. doi:10.1007/s10708-004-4946-y

Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. 1997. Human domination of Earth's ecosystems [J]. Science, 277(5325): 494−499. doi:10.1126/science.277.5325.494

王明娜, 韩哲, 张庆云. 2016. 21 世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响 [J]. 气候与环境研究, 21(1): 65−77. Wang Mingna, Han Zhe, Zhang Qingyun. 2016. Impact of land use and cover change in the semi-arid regions of China on the temperature in the early 21st century [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(1): 65−77. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15197

王平, 沈润平. 2013. 基于 CLM 模型的植被覆盖变化对黄土高原气温和降水的影响研究 [J]. 科学技术与工程, 13(20): 5754−5760. Wang Ping, Shen Runping. 2013. Vegetation cover change effects on climate in the loess plateau region based on CLM model [J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 13(20): 5754−5760. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2013.20.004

Wang X J, Zhang B Q, Xu X F, et al. 2020. Regional water-energy cycle response to land use/cover change in the agro-pastoral ecotone, Northwest China [J]. J. Hydrol., 580: 124246. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124246

Wang Y L, Feng J M, Gao H. 2014. Numerical simulation of the impact of land cover change on regional climate in China [J]. Theor. Appl. Climatol., 115(1−2): 141−152. doi:10.1007/s00704-013-0879-z

Xiao L, Xue S, Liu G B, et al. 2014. Soil moisture variability under different land uses in the Zhifanggou catchment of the Loess Plateau, China [J]. Arid Land Research and Management, 28(3): 274−290. doi:10.1080/15324982.2013.860500

Yang L, Wei W, Chen L D, et al. 2012. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. J. Hydrol., 475: 111−122. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.09.041

杨永可, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 2014. 大尺度土地覆盖数据集在中国及周边区域的精度评价 [J]. 遥感学报, 18(2): 453−475. Yang Yongke, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, et al. 2014. Comparison and assessment of large-scale land cover datasets in China and adjacent regions [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 18(2): 453−475. doi:10.11834/jrs.20143055

Yu Y, Xie Z H. 2013. A simulation study on climatic effects of land cover change in China [J]. Advances in Climate Change Research, 4(2): 117−126. doi:10.3724/SP.J.1248.2013.117

Zha J L, Zhao D M, Wu J, et al. 2019. Numerical simulation of the effects of land use and cover change on the near-surface wind speed over Eastern China [J]. Climate Dyn., 53(3−4): 1783−1803. doi:10.1007/s00382-019-04737-w

张华, 张勃. 2005. 国际土地利用/覆盖变化模型研究综述 [J]. 自然资源学报, 20(3): 422−431. Zhang Hua, Zhang Bo. 2005. Review on Land Use and Land Cover Change Models [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 20(3): 422−431. doi:10.3321/j.issn:1000-3037.2005.03.015

张宏, 胡波, 刘广仁, 等. 2012. 中国土壤热通量的时空分布特征研究 [J]. 气候与环境研究, 17(5): 515−522. Zhang Hong, Hu Bo, Liu Guangren, et al. 2012. Temporal and spatial characteristics of soil heat flux in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(5): 515−522. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10124

张强. 1998. 简评陆面过程模式 [J]. 气象科学, 18(3): 295−304. Zhang Qiang. 1998. Simple review of land surface process model [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 18(3): 295−304.

张强, 黄菁, 张良, 等. 2013. 黄土高原区域气候暖干化对地表能量交换特征的影响 [J]. 物理学报, 62(13): 139202. Zhang Qiang, Huang Jing, Zhang Liang, et al. 2013. Warming and drying climate over Loess Plateau area in China and its effect on land surface energy exchange [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62(13): 139202. doi:10.7498/aps.62.139202

张强, 张良, 黄菁, 等. 2014. 我国黄土高原地区陆面能量的空间分布规律及其与气候环境的关系 [J]. 中国科学: 地球科学, 44(9): 2062−2147. Zhang Qiang, Zhang Liang, Huang Jing, et al. 2014. Spatial distribution of surface energy fluxes over the Loess Plateau in China and its relationship with climate and the environment [J]. Science China Earth Sciences, 44(9): 2062−2147. doi:10.1007/s11430-014-4881-9

Zhang Q, Barnes M, Benson M, et al. 2020. Reforestation and surface cooling in temperate zones: Mechanisms and implications [J]. Global Change Biology, 26(6): 3384−3401. doi:10.1111/gcb.15069

Zhao H F, He H M, Wang J J, et al. 2018. Vegetation restoration and its environmental effects on the Loess Plateau [J]. Sustainability, 10(12): 4676. doi:10.3390/su10124676

Zhao M, Zeng X M. 2002. A theoretical analysis on the local climate change induced by the change of landuse [J]. Adv. Atmos. Sci., 19(1): 45−63. doi:10.1007/s00376-002-0033-9

Zheng Y Q, Yu G, Qian Y F, et al. 2002. Simulations of regional climatic effects of vegetation change in China [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 128(584): 2089−2114. doi:10.1256/003590002320603557