

基于 RegCM 4.7 的中国土地利用变化对区域气候的影响

胡曼莉^{1,2}, 赵子龙^{1,2}, 李鑫^{1,2}

(1. 中国矿业大学应急管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏贾汪资源枯竭矿区土地修复与生态演替教育部野外科学观测研究站, 江苏 徐州 221116)

摘要: [目的] 土地利用是人类活动影响气候变化的重要路径, 探究土地利用变化对区域气候的影响机理与效应是全球可持续发展调控的关键科学问题。[方法] 基于 RegCM 4.7 区域气候模型, 输出分辨率为 50 km, 模拟 2009—2018 年中国地区土地利用变化背景下的区域气候演变过程, 并从地表热量平衡和低层环流场探讨气温和降水的变化机理。[结果] 1) 研究区土地利用变化对气温影响更为显著; 2) 不同土地类型变化的气候效应不同, 农用地转为林地后引起夏季气温的升高和降水增加, 而林地转为农用地则引起降温, 农用地转为建设用地引起气温升高, 但降水量有所下降; 3) 土地利用变化对气候的影响存在显著的空间分异(东部响应强于西部)和季节差异, 夏季气温和降水响应较强; 4) 不同土地利用转型对气温和降水具有不同调控机制, 华东农用地转建设用地驱动夏季增温 0.14 °C, 而华南林地扩张促进降水的增加。[结论] 研究验证 RegCM 4.7 模型的实用性, 结果可为编制气候韧性导向的国土空间规划提供科学依据。

关键词: 土地利用变化; 气候效应; RegCM 4.7 区域气候模式; 数值模拟; 变化机理

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0300-09

Effects of China's Land Use Changes on Regional Climate Based on RegCM 4.7

HU Manli^{1,2}, ZHAO Zilong^{1,2}, LI Xin^{1,2}

(1. School of Emergency Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Jiangsu Jiawang Resource Exhausted Mining Area Land Restoration and Ecological Succession, Ministry of Education Field Scientific Observation and Research Station, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: [Objective] Land use is an important pathway through which human activities impact climate change. Exploring the mechanisms and effects of land use changes on regional climate is a key scientific issue for regulating global sustainable development. [Methods] Based on the RegCM 4.7 regional climate model with an output resolution of 50 km, the evolution of regional climate in China under land use changes from 2009 to 2018 was simulated, and the mechanisms of temperature and precipitation changes were explored from the perspectives of surface heat balance and low-level circulation field. [Results] 1) Land use changes had a more significant effect on temperature in the study area. 2) Different types of land use changes had different climatic effects: converting agricultural land to forest land led to an increase in summer temperature and precipitation, converting forest land to agricultural land decreased temperature, and converting agricultural land to construction land resulted in increased temperature but reduced precipitation. 3) The effects of land use changes on climate exhibited significant spatial heterogeneity (stronger response in the east than in the west) and seasonal differences, with stronger responses in summer temperature and precipitation. 4) Different land use type conversions regulated temperature and precipitation through different mechanisms. The conversion of agricultural land to construction land in East China increased summer temperature by 0.14 °C, while forest expansion in South China increased precipitation. [Conclusion] The study verifies the applicability of the RegCM 4.7 model. The results offer a scientific basis for developing climate-resilient land spatial planning strategies.

收稿日期: 2025-04-01

修回日期: 2025-04-24

录用日期: 2025-05-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42171248, 42371273); 江苏省自然资源科研课题项目 (2024005)

第一作者: 胡曼莉 (1998—), 女, 博士研究生, 主要从事土地利用变化相关研究。E-mail: 731297043@qq.com

通信作者: 李鑫 (1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事地理大数据与土地信息研究。E-mail: topzcg@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Keywords: land use change; climatic effects; RegCM 4.7 regional climate model; numerical simulation; change mechanisms

Received: 2025-04-01

Revised: 2025-04-24

Accepted: 2025-05-20

Online(www.cnki.net): 2025-07-27

随着全球气候变暖问题的日益严峻,人类社会高度重视全球气候变化问题^[1]。气候是人类生存环境的重要因素,也是生产生活的重要资源。然而当前全球气候变化却成为自然生态系统、世界经济可持续发展和人类社会面临的严峻挑战^[2-3]。相关研究^[4]表明,人类活动对气候系统有显著影响。其中,人类活动引起的土地利用变化是人类活动影响气候系统的主要途径之一^[5]。当前土地不合理利用带来的全球气候变暖问题日益加剧,给局部或更大范围内的气候造成影响,甚至给全球气候带来干扰。因此,土地利用变化对气候变化的影响研究在全球气候变化的研究领域占有重要地位,对人类社会可持续发展具有重要意义^[6-7]。随着中国社会经济的快速发展,资源需求量不断增大,导致资源环境开发强度加大,土地利用变化剧烈,深刻改变陆地表层的物理生物属性,通过地表反射率与地面粗糙度等地表通量变化影响大气环流,对区域气候产生重要影响。

早期有关土地利用变化对气候影响的研究主要集中在理论分析方面^[8-9],主要运用气象观测法^[10]和理论推导法^[11],研究重心集中在全球大尺度土地利用与气候变化的关系上^[12-13]。例如,FOLEY等^[14]的研究显示,森林减少导致碳循环和水循环的显著变化,而BONAN^[15]关于农业扩张的研究则展示了土地利用变化对气温和降水的长远影响。然而,全球尺度的研究受限于气候自然变率的掩盖,土地利用变化带来的局地效应常难以识别^[16]。随着21世纪区域气候模式的发展,数值模拟逐渐成为研究土地利用变化与气候相互作用的重要手段。区域气候模式不仅可进行长时间序列模拟,还可通过敏感性试验控制单一变量,获得土地利用变化的直接效应和反馈机制^[17],如RegCM和WRF能够有效模拟不同土地类型变化对气候的差异性影响^[18-19]。研究方法和数据分辨率的进步使得土地利用变化对气候影响的研究对象从全球扩展至区域和局地尺度,尤其是生态系统脆弱^[20]和气候变化敏感地区^[21]。有研究^[22]证实土地利用变化对气候影响显著,且不同土地类型变化对区域气候影响不同^[23-24]。然而目前对不同时期、不同区域和不同气候背景下土地利用变化对气候的影响仍缺乏系统深入的研究。

鉴于此,本研究运用最新的区域气候模式RegCM 4.7,结合数值模拟,聚焦中国大陆区域,模拟2009—2018年土地利用变化的气候效应,旨在揭示中国土地利用变化对区域气候的影响机制,并通过地表能量平衡和低层环流场的变化,探讨气温和降水的响应规律。本研究不仅可为中国区域土地利用变化气候效应研究提供案例,同时为构建以气候韧性为导向的国土空间规划提供依据,有助于制定应对气候变化的国土用途管理策略。

1 材料与方法

1.1 数据来源

研究数据包括:1)区域边界矢量图。来源于中华人民共和国自然资源部,审图号为GS(2020)4632。2)土地利用数据。来源于IGBP(国际地圈生物圈计划)全球GLCC土地覆盖数据库(edcdaac.usgs.gov),结合中国土地利用动态遥感监测数据集(CLOUD)进行逐年更新与校正,生成2009—2018年土地利用序列。3)大气边界强迫数据。使用2009—2018年区域尺度初始和侧边界条件、海温(SST)等大气边界强迫数据来源于ERA-interim气候再分析数据集。本研究选择处理后的EIN15(ERA-interim with the resolution of 1.5°)对模型进行初始条件设置,时间分辨率为6 h,空间分辨率为1.5°×1.5°,以此为基础合成逐月数据。4)气象观测数据。用于进行敏感性分析、与模型模拟结果进行对比的气象观测数据来源于英国东英格利亚大学气候研究所(CRU)高分辨率全球数据(www.cru.uea.ac.uk),分辨率为0.5°。

1.2 RegCM 4.7 区域气候模式

RegCM(regional climate model)是基于MM5发展的静力平衡区域气候模式^[25],也是本文采用的模型。该动力学模型是一个可压缩的有限差分模型,并带有流体静应力平衡和垂向 σ 坐标^[26]。垂直方向分为18层,地形追随坐标用于底层模拟。RegCM 4.7旨在提供对局部气候变化的高分辨率模拟,其物理过程是一个复杂而系统的体系,涉及大气、海洋和陆地表面等多个方面。本研究主要涉及辐射方案、陆面模式、行星边界层方案、积云对流方案、大尺度降水方案、海洋通量参数、海温预报等参数方案,默认情况下,根据内插的每周或每月SST(海面温度)产品,每6 h规定1次SST。

1.3 模型预处理

本研究中 RegCM 4.7 区域气候模式主要以土地利用数据为驱动模拟研究区气候变化情况。将模型的中心纬度设为 $30^{\circ}21'N$, 中心经度设为 $104^{\circ}21'E$ 。输出数据分辨率设为 50 km, 将网格设为 110×110 个单元; 垂直方向压力层数目设为 18, 最高压力为 60 hPa。地图投影选择兰伯特投影。大气模型步长设为 150 s, 辐射模型步长设为 30 min, 陆面模型被调用时间间隔为 450 s, 各模型输出的时间频率均设为 6 h。模型预处理中, 土地利用数据采用 BATS 土地覆被分类方案进行分类, 输出的土地利用文件包含被分配到每个格点的土地类型。边界条件上的横向缓冲区宽度设为 12 个格点, 边界层方案设为 Holtslag PBL 行星边界层; 大尺度降水方案选择次网格显示水汽方案 (SUBEX); 积云对流方案选择 MIT-Emanuel 方案以适配东亚季风区水汽输送特征。模型运行前进行为期 2 a 的 Spin-up 模拟, 以消除初始场的不平衡状态, 确保各物理变量 (如土壤湿度、地表温度等) 达到动态平衡。

2 结果与分析

2.1 RegCM 4.7 模拟能力检验

模型采用连续动态模拟设计, 输入 2009—2018 年逐年更新的土地利用数据。通过连续 10 a 的动态积分, 模型逐日输出气温、降水等气候变量, 完整捕捉土地利用变化的累积效应及气候响应的时空演变。同时, 外部强迫 (温室气体浓度、气溶胶排放) 基于 ERA-interim 再分析数据集保持一致, 以凸显土地利用变化的独立影响。对逐日输出的气候数据取平均值, 在 ArcGIS 中, 基于格点化的中国气候观测数据, 在时间和空间尺度上对模拟值和观测值进行相关性分析, 以检验研究区气温、降水变化对土地利用变化的敏感性。图 1 为研究区 10 a 空间尺度上平均气温和降水的模拟、观测值分布情况。结果表明, RegCM 4.7 模型能够基于土地利用变化较好地模拟研究区平均气温和降水的空间分布, 符合中国气温“东南地区高, 西南、东北地区低”、降水量“南多北少、由东南到西北逐渐递减”的空间分布特征。利用 ArcGIS 多元分析工具分析栅格尺度气温模拟值与观测值的空间点序列相关性, 气温模拟值与观测值的决定系数 (R^2) 为 0.9, 降水 R^2 为 0.5, 且通过 95% 置信水平检验。因此, 该区域气候模式对气温的模拟性能优于对降水的模拟性能。主要是因为该模式对气候的模拟主要基于能量平衡, 而非辐射对流; 同时, 气温变动有一定规律性, 而降水变化缺乏连续性。同时, 由图 1e 和图 1f 可以看出, 该区域气候模式对青藏高原及周边的气温和降水模拟误差相对较大, 模拟的气温

整体偏低于观测结果, 而降水模拟值则高于观测结果。可能是因为青藏高原的气候条件特殊、地形复杂, 且气象观测站点稀少, 已有多位学者^[27-28]对 RegCM 在该区域模拟性能不足的原因进行系统分析, 因此, 本文不再对青藏高原区域的模拟性能展开详细讨论。由检验结果可知, 气候变化在一定程度上受到土地利用变化的影响, 且 RegCM 4.7 区域气候模式能够基于研究区土地利用变化背景较好地模拟出平均气温和降水量在空间尺度上的分布特征和时间尺度上的变化趋势^[29]。因此, 该模式模拟结果可用于探索研究区 2009—2018 年土地利用变化对气候变化的影响。

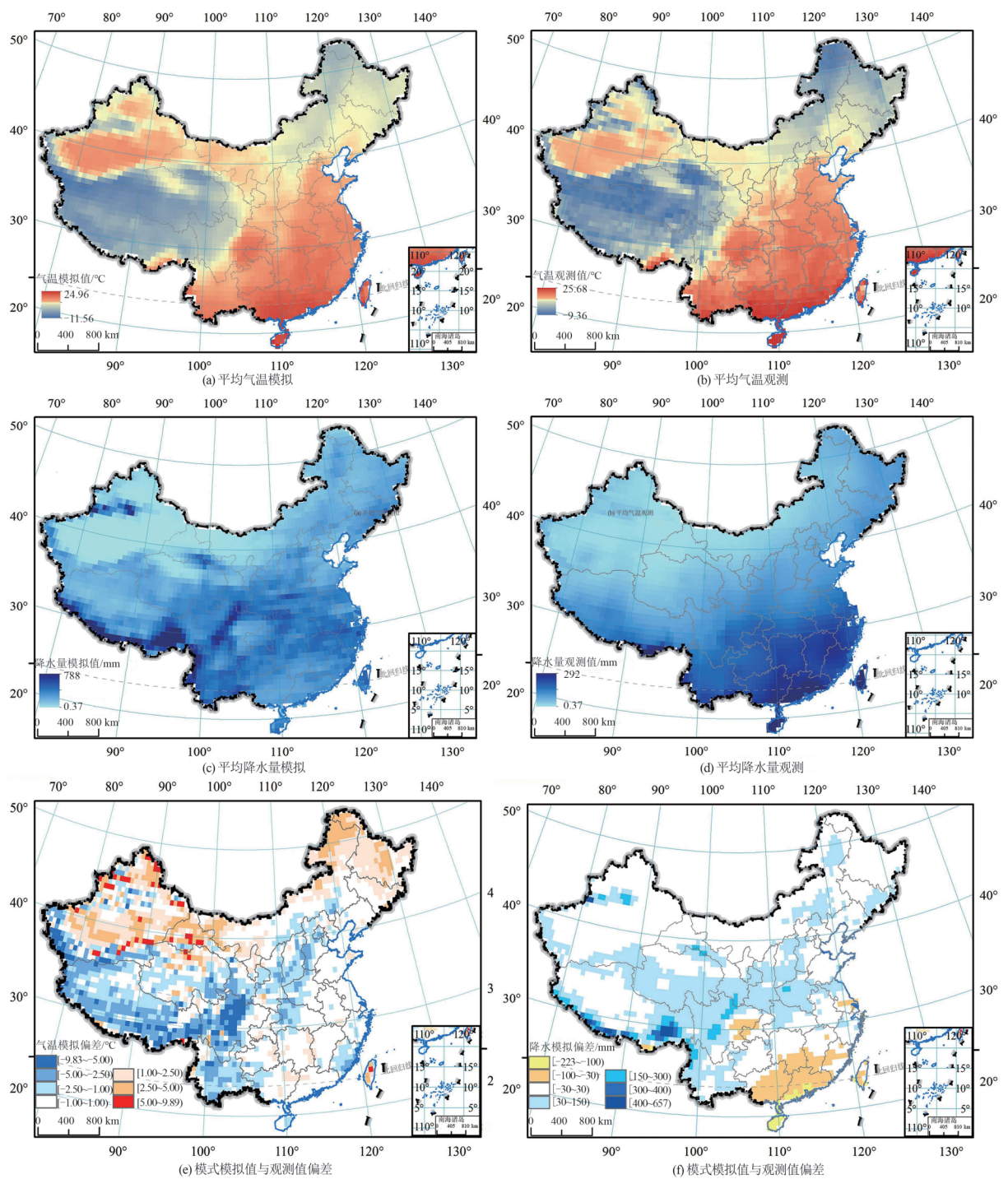
2.2 土地利用变化特征

结合研究目的, 将研究区土地利用重分类为 7 种类型, 分别为冰川、草地、林地、水域、裸地、农用地和建设用地, 对 2009 年和 2018 年土地利用数据开展统计分析, 得到土地利用数量及空间变化情况。由表 1 可知, 研究区 2009—2018 年土地资源置换规模较大, 用途转变方式较为复杂。其中, 农用地转出规模最大, 高达 47 759.89 km², 占转出总面积的 32.7%, 建设用地占用面积最大, 占农用地流出总面积的 67.9%; 同时, 裸地与草地、草地与林地、林地与农用地的置换规模也较大。

图 2 为研究区土地利用的空间总体变化情况, 在空间上呈“东部变动较为剧烈、西部变动较为缓和”的特征。其中华东和华中地区, 特别是山东、江苏、河南等省份农用地流失最为严重, 且多转化为建设用地, 主要原因是这些省份近年来城市化发展迅速, 部分农用地因城市化、工业化需求被占用。西部地区裸地、草地流失较为严重, 多被农用地、草地侵占; 而西南地区草地、水域流失较为严重。新增裸地多集中分布在新疆、西藏、内蒙古、青海等省份的边缘地区, 主要由该区域不利的自然环境要素导致。

2.3 土地利用变化对气温的影响

把研究区划分为东北地区、华北地区、华东地区等 7 大区域, 根据模型模拟结果, 在表 1 与图 2 的基础上对比分析 7 个区域主要的土地利用变化在不同季节引起的气候变化情况。图 3 为研究区 2009—2018 年土地利用变化对夏季、冬季及全年气温影响的空间分布情况。由图 3 可知, 2009—2018 年研究区气温变化呈显著空间分异与季节差异。夏季大部分地区气温上升, 其中华东地区平均增幅达 0.5~2.0 °C, 局部区域 (如山东半岛) 最高升温 4.0 °C; 冬季则以降温为主, 降幅介于 0.50~5.45 °C。该趋势与大多数区域气候模拟研究中的结论相符。该现象主要源于土地利用变化引起的地表物理属性 (如反照率、粗糙度等) 和水热平衡的调整, 进一步影响低层大气的环流模式。



注: 审图号为 GS(2020)4632, 底图无修改。下同。

图 1 研究区 2009—2018 年平均气温、降水量的模拟值、观测值及差值空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of simulated and observed average temperature and precipitation in study area from 2009 to 2018

表 1 研究区土地利用数量变化情况

Table 1 Land use quantity changes in the study area								km ²
地类名称	冰川	草地	建设用地	林地	裸地	农用地	水域	转出面积
冰川	—	20.97	0	0.09	7.00	0	0	28.06
草地	18.53	—	3 614.61	12 430.12	5 370.34	8 437.63	1 085.74	30 956.97
建设用地	0	57.60	—	69.47	4.25	1 978.67	26.99	2 136.98
林地	0.61	12 506.98	2 087.03	—	1 133.04	14 799.13	782.75	31 309.55
裸地	10.54	17 338.21	193.57	7 004.37	—	5 619.52	868.71	31 034.93
农用地	0.26	4 649.65	32 411.40	8 867.15	367.73	—	1 463.70	47 759.89
水域		703.45	346.67	662.46	298.04	648.75	—	2 659.38
转入面积	29.95	35 276.85	38 653.28	29 033.67	7 180.40	31 483.70	4 227.90	145 885.76

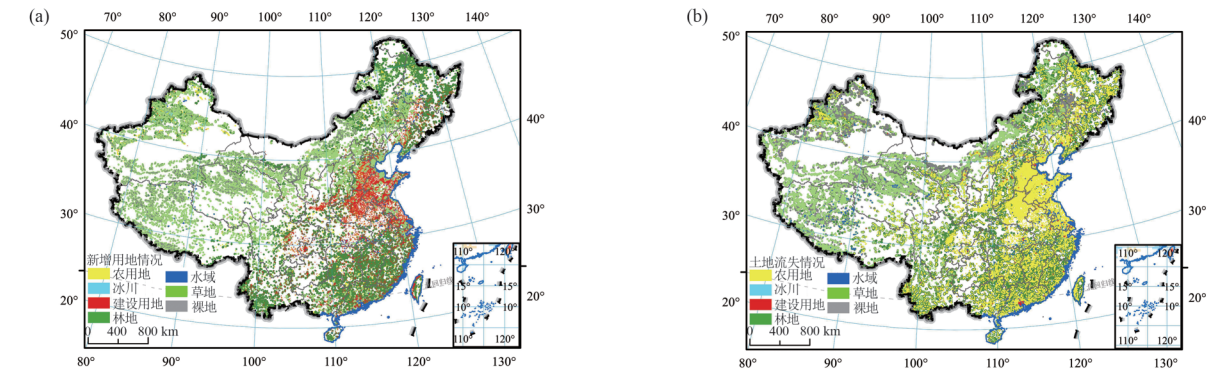


图 2 研究区土地利用变化的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use changes in the study area

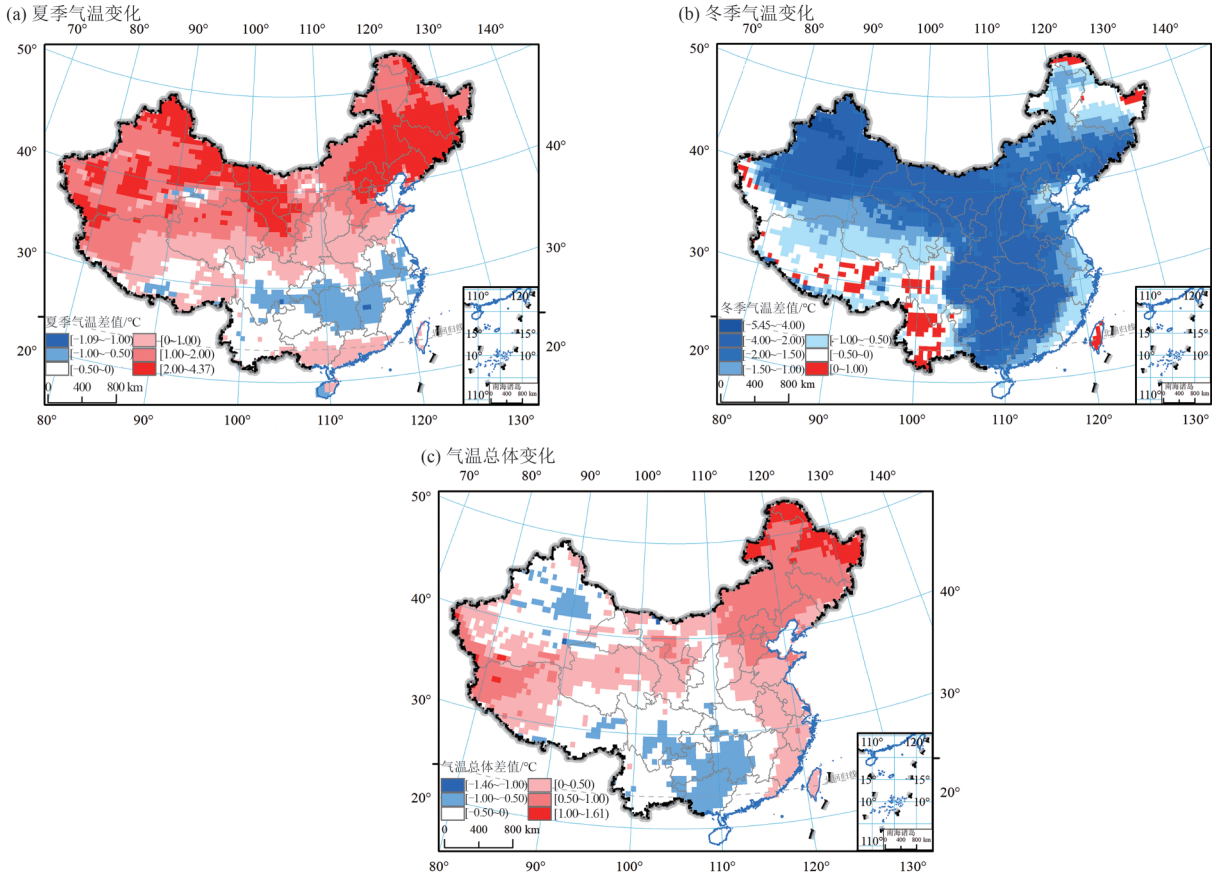


图 3 研究区土地利用变化对夏季、冬季及全年气温影响的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of effects of land use changes on summer, winter, and annual temperature in the study area

模拟结果显示,2009—2018年研究区气温变化呈显著的区域分异。东北地区夏季气温升高显著,是因为该区域农用地与林地的置换规模较大,导致区域地表蒸散发减少,地表反照率上升,从而造成增温效应,与华文剑等^[6]的模拟结果一致。东北地区的纬度更高,植被覆盖对土壤湿度的调节作用较为显著。华东地区(如山东、江苏等)大量农用地转为建设用地,驱动气温升高。西北地区由于林地和裸地被草地大量侵占,夏季存在明显增温,增幅最高为4.37℃,但干旱区水汽限制潜热释放,夜间长波辐射损失增加,冬季降温幅度可达1.00~5.45℃。西南地

区气候变动较为复杂,特别是西藏、云南的部分地区在夏、冬季气温的变化完全相反。其中,西藏部分地区夏季气温降低,冬季气温升高。2处变动区基本位于同一位置,该区域存在水域和草地面积的增加,夏季蒸发增强抑制增温,冬季地表反照率下降吸收更多辐射,导致气温夏降冬升;而云南气温变动相反区域,也存在不同程度草地、农用地的增加。华中地区不同省份在夏季和全年尺度上气候变化存在差异,其中,以河南省和湖南省差异性最为显著。河南农用地转建设用地驱动夏季升温,气温增幅为0~2℃;而湖南省农用地面积显著增加,多为林地转入,引起

该省份夏季气温的下降。冬季华中地区整体降温显著,最大下降4.26℃。华南地区林地面积的增加,使得区域冬季气温显著降低,降幅为0.5~4.0℃。华北地区林地和草地虽有大面积增加,但草地、农用地也有大面积流失,使得该区域整体气温在研究期内无明显变化。

2.4 土地利用变化对降水的影响

从图4可以看出,2009—2018年中国降水变化呈显著的空间异质性与季节性。东部与南部地区的降水变化显著高于西部地区,且夏季降水量变化更为显著。降水变化受土地利用类型转换的直接影响,城市化通过降低地表动力属性来抑制水汽输送,而植被扩张通过潜热释放增强局地对流,与CAO等^[30]的东亚季风区降水调控机制一致。

从不同区域来看,2009—2018年研究区降水变化呈现显著的区域分异:东北地区的多种土地利用变化方式,导致该区域降水量存在两极分化,辽宁中部局部减少30~165 mm,而吉林东部局部增加30~165 mm,表明土地利用变化会对局地气候的水热平衡产生重要影响。华东地区和华南地区冬季降水量变化不明显,大部分省份主要土地变化类型为农用地转为建设用地,驱动夏季降水减少50~389 mm(如河南

省和湖北省)。但湖南、江西、福建三省在大量林地转农用地后,夏季与冬季降水量增加显著,增幅为5~280 mm。华南地区林地转入较多,促进对流降水,夏季和冬季降水均有显著增加,全年尺度平均降水量变化基本与夏季降水量变化情况一致。青藏高原西部受裸地转草地影响,驱动夏季降水量增加10%~15%;云南地区在草地转林地的大部分区域,夏季、冬季及全年平均降水量均有所增加。降水量的变化不仅与土地利用变化有关,而且与地表能量通量、区域蒸散发情况和水汽辐合通量等也密切相关。

2.5 气温、降水的变化机理分析

2.5.1 地表能量平衡分析 为进一步分析模拟结果,从地表能量平衡差异与近地面风场差值来研究气温与降水的变化机理,以探究土地利用变化对区域气候变化的影响方式。土地利用变化引起的区域变量差异变化见表2。东北地区与华北地区土地资源置换情况相似,2个区域农用地与林地的置换规模较大。该土地利用方式的转变使得区域内植被面积与密度减少,地面粗糙度下降261 μm ,导致地表反照率下降1.6%,地面吸收太阳辐射增加1.84 W/m^2 ,植被蒸腾作用增强,使对流层大气直接增温并形成逆辐射,引起区域年平均气温升高。

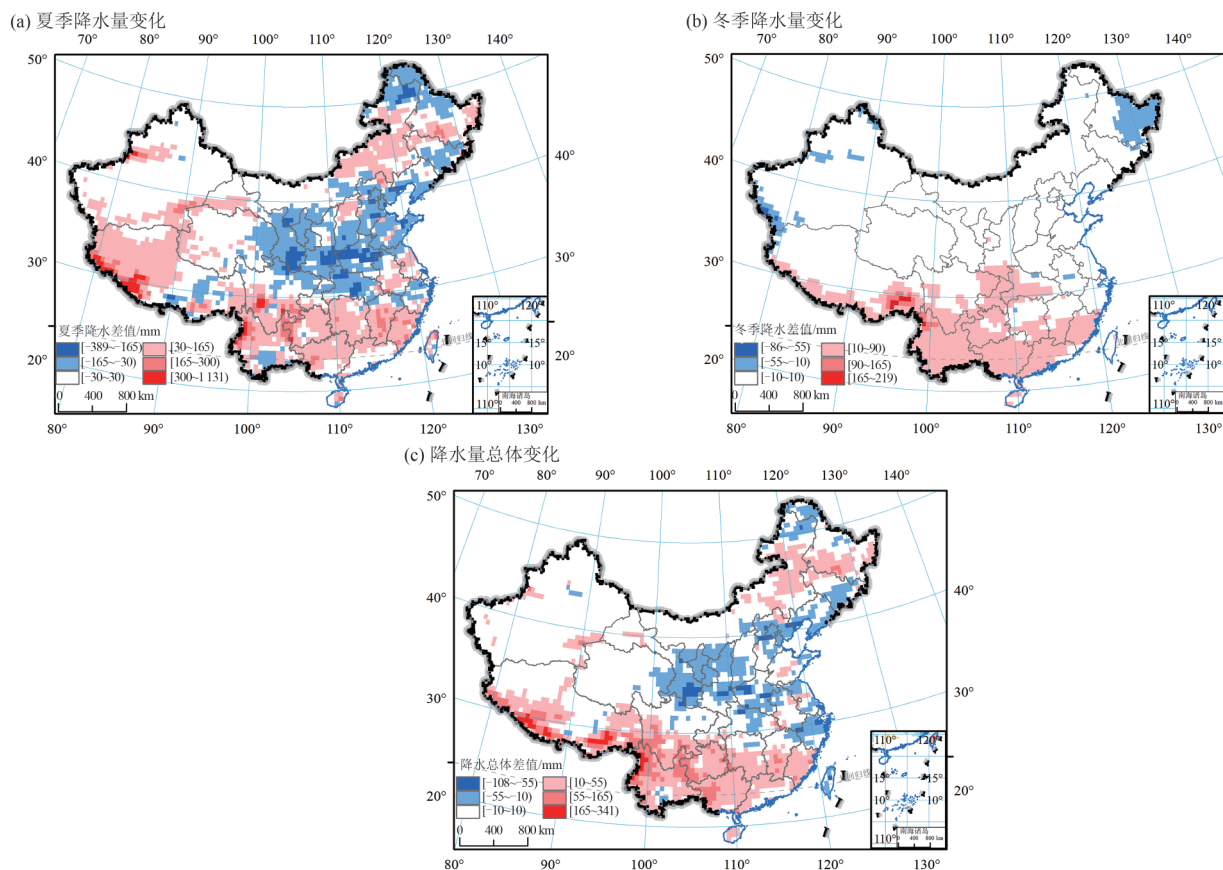


图4 研究区土地利用变化对夏季、冬季及全年降水影响的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of effects of land use changes on summer, winter, and annual precipitation in the study area

表 2 土地利用变化引起的区域变量差异
Table 2 Regional variable differences caused by land use changes

变量	东北地区	华北地区	华中地区	华东地区	华南地区	西北地区	西南地区
平均气温/℃	0.90	0.55	-0.33	0.14	-0.43	-0.06	-0.10
平均降水量/mm	-1.46	-2.92	-3.02	1.10	33.22	-1.86	31.28
地表反照率/%	-1.60	-0.51	0.49	-0.03	-0.30	-0.16	-0.10
地面粗糙度/ μm	-261.00	-127.00	167.00	-46.00	-71.00	-6.00	-41.00
净向下短波辐射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	2.57	-1.50	-2.85	-3.15	-5.71	1.03	-8.12
净向上长波辐射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	1.64	-1.83	-2.28	-2.31	-6.11	-1.00	-5.12
地面吸收短波辐射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	1.84	0.24	-2.71	0.03	0.78	0.30	0.08
地面向下行长波辐射/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	3.30	5.33	0.83	3.35	3.09	1.58	4.40
地表感热通量/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	0.96	1.24	0.31	0.39	-4.47	-0.50	-3.26
表面潜热通量/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	-2.35	-2.95	0.29	-0.12	6.66	2.14	0.72
蒸发量/mm	69.71	2.74	-128.11	-61.69	-222.65	10.59	11.50
土壤湿度/mm	-1.07	-0.74	2.13	1.64	1.54	0.74	1.25

华中地区是 7 个区域中地表反照率唯一增加的区域。区域内大面积农用地被建设用地侵占,大量林地又转为农用地,使得地面粗糙度增加 167 μm ,地表反照率平均增加 0.5%,地面吸收的太阳辐射减少 2.71 W/m^2 ,植被蒸腾作用减弱,蒸发通量减少 128.11 mm,导致区域平均气温 10 a 内降低 0.33 $^{\circ}\text{C}$ 。华东地区建设用地大面积占用农用地后,区域地表反照率与地面粗糙度有所下降,但下降幅度不显著,气温增加幅度也相对较小。因此,建设用地侵占农用地所引起的增温效应并不显著。西北地区与西南地区裸地大面积转为草地后,区域地面粗糙度和地表反照率均有不同程度下

降,地面吸收太阳辐射增加,但平均气温略有下降。因此,裸地转为草地后引起地表反照率、地面粗糙度的下降,但所引起的降温效应不及华中地区显著。

2.5.2 低层环流场分析 图 5 为冬季和夏季的近地面 10 m 的风场差值空间分布情况。模拟结果表明,土地利用变化显著改变研究区低层环流场的空间格局,且季节性差异显著。冬季,西南地区北部近地面东南风增强,西北地区(青海、新疆)西风增强 0.8~1.6 m/s;夏季,华南地区西南风减弱,西藏高原北风减弱。环流变化的季节性差异显著,表明夏季风场扰动强度高于冬季。

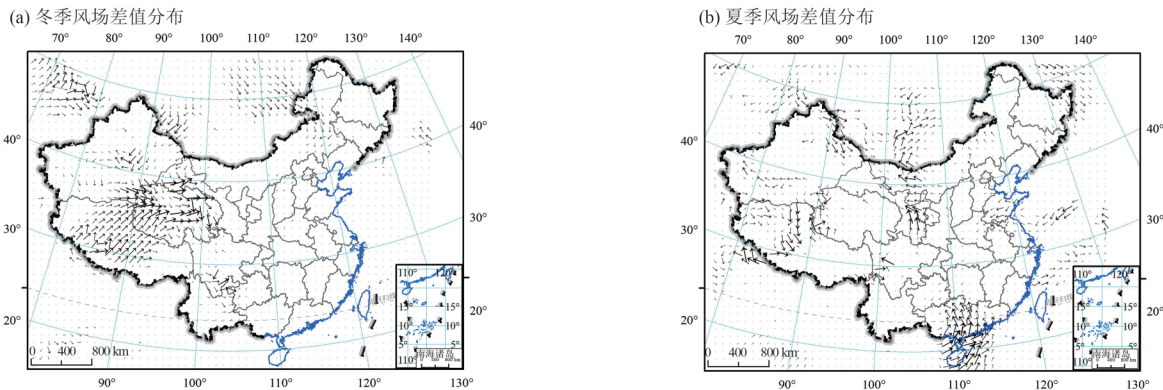


图 5 研究区土地利用变化引起的冬季、夏季近地面 10 m 风场差值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of near-surface (10 m) wind field differences in winter and summer caused by land use changes in the study area

低层环流场调整与土地利用转型的地表动力属性变化密切相关。就研究区冬季而言,西南地区及西北地区低层环流场对土地利用变化的响应较强。西南地区东南风增强,该区域草地转农用地导致地面粗糙度下降,地表摩擦阻力减小,加速东南风向内陆输送,导致北部降水减少,而喜马拉雅山脉附近受海风影响降水增多。西北地区青海省风力差值较大,主要以西风和西北风的增强为主,使得上空气流向东部及南部运

动,导致东南部地区冬季降水量增多。同时,该地区以新疆为中心形成一个反气旋环流,该省份土地利用变化使得近地面气流辐散,空气以下沉运动为主,抑制云雨生成,导致冬季平均降水量下降。就研究区夏季具体而言,华南地区和西藏地区大气环流对土地利用变化的响应相对较强,东北、华东、华中地区响应较弱。西北地区仍以新疆为中心,地面土地利用变化导致该区域形成较小的反气旋,夏季降水量减少。西藏地区

夏季盛行西北风和北风,但该区域近地面风向受山脉地形影响严重,季风被阻挡后风力减弱,气流被抬升,增加了区域降水量。土地利用变化通过改变近地面风场动力结构,影响水汽输送与辐合强度。建设用地扩张导致粗糙度下降,从而加速干冷空气入侵,而植被扩张会阻碍季风水汽输送。

3 结论

1)RegCM 4.7区域气候模式能根据研究区土地利用变化情况较好地模拟气候变化情况,气温模拟值与观测值相关系数为0.9,而降水模拟值与观测值相关系数为0.5。因此,该区域气候模式对气温的模拟性能优于对降水的模拟性能,模式模拟结果可用于探索土地利用变化对气候变化的影响研究。

2)土地利用变化对气候的影响存在明显的季节差异。夏季大部分地区增温显著,冬季降温显著,且南北方降水量差异较大,有明显的空间分异。

3)不同土地利用类型变化所引起的气候效应不同。研究区农用地转为林地后引起夏季气温的升高和降水量增加,而林地转为农用地则引起降温效应,农用地转为建设用地也引起气温的升高,但降水量有所下降,裸地转为草地也带来降水量大幅的增加及降温效应,但所引起的降温效应不及林地转农用地所带来的降温效应强。

4)土地利用变化主要通过改变下垫面等方式影响地面粗糙度、地表反照率等物理通量的变化,从而影响地表水热状况。华东地区农用地转建设用地通过地表反照率降低驱动增温,而华南地区林地扩张通过潜热通量增强促进降水增加,揭示土地利用类型转换对水热平衡的差异化调控路径。

5)土地利用变化会对大气环流场造成一定程度的影响,进而导致区域降水量增多。华东地区建设用地扩张导致粗糙度下降,从而加速干冷空气入侵,抑制水汽辐合,减少降水;而西藏草地转农用地则通过增强东南风促进冬季降水增加,表明土地利用变化对环流的扰动具有显著的区域与季节依赖性。

4 不足与展望

由于时间与条件限制,本文无法尝试模型中的每种降水参数化方案,且降水过程复杂,不确定性较大。今后研究,应对降水方案的参数进行优化,以提高该模式对降水的模拟性能,使研究结果更加精确。本文研究的重点是区域土地利用变化对气候的影响分析,未针对相关影响提出针对性对策。今后应对研究区未来土地利用变化产生的气候效应进行模拟研究,并根据具体结果,基于研究区不同区域的经

济、生态及土地利用实际情况,从土地利用的角度提出应对未来气候变化的具体对策。本研究通过固定外部强迫来减少干扰,但自然气候变率(如年际振荡)的影响仍需通过多模式集合模拟进一步分离。

参考文献:

- [1] 戴铁军,周宏春.构建人类命运共同体、应对气候变化与生态文明建设[J].中国人口·资源与环境,2022,32(1):1-8.
DAI T J, ZHOU H C. Building a community with a shared future for mankind, coping with climate change and ecological civilization construction[J].China Population, Resources and Environment, 2022, 32(1):1-8.
- [2] 叶笃正,季劲钧,严中伟,等.简论人类圈(Anthroposphere)在地球系统中的作用[J].大气科学,2009,33(3):409-415.
YE D Z, JI J J, YAN Z W, et al. Anthroposphere: An interactive component in the earth system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(3):409-415.
- [3] 叶笃正,符淙斌.全球变化科学领域的若干研究进展[J].中国科学院院刊,2004,19(5):336-341.
YE D Z, FU C B. Some advance in global change science study[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2004, 19(5):336-341.
- [4] PINAULT J L. Anthropogenic and natural radiative forcing: Positive feedbacks[J].Journal of Marine Science and Engineering, 2018, 6(4):e146.
- [5] 毛慧琴,延晓冬,熊喆.土地利用变化对气候影响的研究进展[J].气候与环境研究,2011,16(4):513-524.
MAO H Q, YAN X D, XIONG Z. An overview of impacts of land use change on climate [J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(4):513-524.
- [6] 华文剑,陈海山,李兴.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,2014,29(9):1025-1036.
HUA W J, CHEN H S, LI X. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9):1025-1036.
- [7] 张宇硕,吴殿廷,吕晓.土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响:空间尺度视角的研究综述[J].自然资源学报,2020,35(5):1172-1189.
ZHANG Y S, WU D T, LYU X. A review on the impact of land use/land cover change on ecosystem services from a spatial scale perspective[J].Journal of Natural Resources, 2020, 35(5):1172-1189.
- [8] DALE V H. The relationship between land-use change and climate change [J]. Ecological Applications, 1997, 7(3):753-769.
- [9] 周广胜,王玉辉.土地利用/覆盖变化对气候的反馈作用[J].自然资源学报,1999,14(4):318-322.
ZHOU G S, WANG Y H. The feedback of land use/cover change on climate[J].Journal of Natural Resources, 1999, 14(4):318-322.

- [10] 徐新良, 张亚庆, 王世宽. 基于气象站观测数据的京津冀城市扩展对气温变化的影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1086-1096.
XU X L, ZHANG Y Q, WANG S K. Effects of urban expansion on air temperature change based on meteorological stations data in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(7): 1086-1096.
- [11] 董茜. 呼和浩特市土地覆被变化对城市热岛影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
DONG Q. Study on the impact of land cover change on urban heat island in Hohhot[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [12] RIEBSAME W E, MEYER W B, TURNER B L. Modeling land use and cover as part of global environmental change[J]. Climatic Change, 1994, 28(1): 45-64.
- [13] 高吉喜, 王家骥, 张林波, 等. 对全球气候变化原因及发展趋势之浅见[J]. 农村生态环境, 1997, 13(4): 43-47.
GAO J X, WANG J J, ZHANG L B, et al. My humble opinion on the causes and development trend of global climate change[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1997, 13(4): 43-47.
- [14] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [15] BONAN G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [16] DIRMEYER P A, NIYOGI D, DE NOBLET-DUCOUDRÉ N, et al. Impacts of land use change on climate[J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(13): 1905-1907.
- [17] 苟娇娇. 基于 RegCM-CLM 模式的植被覆盖变化对中国区域气候的影响[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
GOU J J. The impact of vegetation cover change on regional climate over China based on RegCM-CLM model[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [18] GIORGI F, GUTOWSKI W J J. Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2015, 40: 467-490.
- [19] GAO Y, FU J S, DRAKE J B, et al. Projected changes of extreme weather events in the eastern United States based on a high resolution climate modeling system[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(4): e044025.
- [20] 张克新, 赵莉, 汪田归, 等. 1978—2016 年青藏高原湖泊物候时空变化特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(5): 1089-1098.
ZHANG K X, ZHAO L, WANG T G, et al. Lake ice phenology variations and influencing factors in the Qinghai-Xizang Plateau during 1978—2016[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(5): 1089-1098.
- [21] 曹茜, 于德永, 孙云, 等. 土地利用/覆盖变化与气候变化定量关系研究进展[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 880-890.
CAO Q, YU D Y, SUN Y, et al. Research progress on the quantitative relationship between land-use/land-cover change and climate change [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 880-890.
- [22] 徐勇, 黄雯婷, 卢梦缘, 等. 气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化相对作用[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 292-299.
XU Y, HUANG W T, LU M Y, et al. Vegetation cover change and the relative role of climate change and human activities in southwest karst areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 292-299.
- [23] 乔治, 贺瞳, 卢应爽, 等. 全球气候变化背景下基于土地利用的人类活动对城市热环境变化归因分析: 以京津冀城市群为例[J]. 地理研究, 2022, 41(7): 1932-1947.
QIAO Z, HE T, LU Y S, et al. Quantifying the contribution of land use change based on the effects of global climate change and human activities on urban thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Geographical Research, 2022, 41(7): 1932-1947.
- [24] 王德旺, 何萍, 张馨予, 等. 苏干湖流域冰川、湿地对气候变化的响应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(8): 107-116.
WANG D W, HE P, ZHANG X Y, et al. Response of glaciers and wetlands to climate change in Sugan Lake Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(8): 107-116.
- [25] MIHAILOVIC D T, LALIC B. Coupled land-air parameterization scheme (LAPS) and non-hydrostatic meso-scale model (NMM) for use in agricultural planning [J]. Idojaras, 2009, 113(1/2): 13-22.
- [26] 秦佩华, 陈锋, 谢正辉. 作物生长对流域水文过程与区域气候的影响[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(6): 417-425.
QIN P H, CHEN F, XIE Z H. Effects of crop growth on hydrological processes over river basins and regional climate [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climates, 2012, 8(6): 417-425.
- [27] GAO X, SHI Y, GIORGI F. A high resolution simulation of climate change over China [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54: 462-472.
- [28] ZHUO H, ZHANG M, LI X. Evaluation of snow cover simulation in a regional climate model (RegCM) over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(3): 435-445.
- [29] 隆永平. 土地利用变化对中国区域气候影响的 RegCM 数值模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
LONG Y P. Numerical simulation of land-use change's impacts on Chinese regional climate with RegCM4 [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [30] CAO Q, YU D, GEORGESCU M, et al. Impacts of land use and land cover change on regional climate: A case study in the agro-pastoral transitional zone of China [J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(12): e124025.