DOI: 10.20103/j.stxb.202408121902

候沂辰,王卫光,刘国帅.基于陆面模式的中国陆地蒸散发模拟及变化分析.生态学报,2025,45(12):5926-5940. Hou Y C, Wang W G, Liu G S.Simulation and variation analysis of terrestrial evapotranspiration in China based on the land surface model CLM5. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(12):5926-5940.

基于陆面模式的中国陆地蒸散发模拟及变化分析

候沂辰^{1,2,3},王卫光^{1,2,3,*},刘国帅^{1,2,3}

1河海大学水文水资源学院,南京 210098
 2河海大学长江保护与绿色发展研究院,南京 210098

3 河海大学水灾害防御全国重点实验室,南京 210098

摘要:蒸散发是水文循环和能量循环的重要组成部分,在陆气间水热交互过程中发挥着关键作用。蒸散发的模拟及归因研究对 气候变化、水资源管理、农业生产等具有重要意义。近几十年,中国区域气候和下垫面特征发生了显著变化,但这些变化对蒸散 发的耦合影响及相对贡献仍缺乏清晰的认识。本研究基于陆面模式 CLM5.0 模型,利用长序列气候强迫数据和连续的土地利 用数据集,构建了多情景控制试验,独立分离出气候变化与土地利用变化对蒸散发趋势变化的影响,分析了 1983—2018 年中国 陆地蒸散发的时空变化格局,量化了气候变化和土地利用变化对蒸散发趋势变化的相对贡献。结果表明:(1)中国区域多年平 均蒸散发为 350.62 mm,变化趋势为 1.59 mm/a,空间分布由东南向西北递减。(2)气候变化对蒸散发趋势的贡献超过 70%,达 到1.13 mm/a,占据主导地位;土地利用变化对蒸散发趋势的贡献为 0.44 mm/a。同时,气候变化在全国 67.6%的区域主导蒸散 发增加趋势,在 16.1%的区域主导减少趋势,而土地利用变化在 15.6%的区域主导蒸散发增加趋势,几乎没有地区由土地利用 变化主导蒸散发减少趋势。(3)全国 83.7%的区域蒸散发趋势变化由气候变化主导,主要包括湿润区和西北干旱区,而华北平 原蒸散发的剧烈增加由土地利用变化主导,该地区下垫面类型由草地向农田和森林转化。本研究揭示了中国陆地蒸散发的时 空演变特征,明确了不同流域蒸散发趋势变化的驱动因素,可为变化环境下中国水资源的差异化管理和规划提供参考。 关键词:数值模拟;社会陆面模式第五版(CLM5);蒸散发;气候变化;土地利用变化;归因分析

Simulation and variation analysis of terrestrial evapotranspiration in China based on the land surface model CLM5

HOU Yichen^{1,2,3}, WANG Weiguang^{1,2,3,*}, LIU Guoshuai^{1,2,3}

1 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China

3 The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: Evapotranspiration is a crucial component of the hydrological cycle and energy cycle, playing a key role in water and heat interactions between land and atmosphere. The simulation and attribution studies of evapotranspiration are of great significance for climate change, water resource management, and agricultural production. In recent decades, significant changes have occurred in the climate and surface characteristics of regions in China, but the coupled impacts and relative contributions of these changes on evapotranspiration remain poorly understood. In this study, a multi-scenario control experiment was conducted based on the Land Surface Model CLM5.0, using long-series forcing data and a continuous land use dataset to independently isolate the impacts of climate change and land use change in evapotranspiration trends. The

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240218,52479010)

收稿日期:2024-08-12; 网络出版日期:2025-05-21

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangweiguang2016@126.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

spatiotemporal patterns of terrestrial evapotranspiration in China from 1983 to 2018 were analyzed and the relative contributions of climate change and land use change to evapotranspiration variations were quantified. Results show that:(1) the multi-year average evapotranspiration in China was 350.62 mm, with a trend of 1.59 mm/a, and the spatial distribution was decreasing from south-east to north-west. (2) Climate change contributes more than 70% to the evapotranspiration trend, reaching 1.13 mm/a and dominating the trend; Land use contributes 0.44 mm/a to the evapotranspiration trend. Spatially, climate change drove evapotranspiration increases in 67.6% of the regions and decreases in 16.1%, while land use change dominated the increasing trend of evapotranspiration. (3) 83.7% of the evapotranspiration trends in China were dominated by climate change, mainly including humid areas and arid areas in Northwest China, while the dramatic increase of evapotranspiration in North China Plain was dominated by land use change, because of the land types of grassland in this region were transformed into farmland and forest. This study revealed the spatiotemporal distribution of terrestrial evapotranspiration in China, and identifies the driving factors of evapotranspiration trends in different basins, providing a reference for differentiated management and planning of water resources under changing environment.

Key Words: numerical simulation; Community Land Model version5(CLM5); evapotranspiration; climate change; land use change; attribution analysis

蒸散发是地表生态系统中一个重要的变量,是物质交换和能量循环的桥梁^[1-2]。通过土壤蒸发、植被蒸腾和冠层截留,水汽实现了从陆地到大气间的转移,大约有 60%的降水经蒸散发返回到大气^[3]。因此,蒸散发是理解和量化水循环变化特征的重要指标。然而,蒸散发也是水循环过程中最难以观测的变量,其变化会受到下垫面差异性、气候变化和人类活动等因素的影响^[4-5]。植被对蒸散发具有控制作用,会影响降水分配; 气候变化造成全球变暖,加速了全球水循环^[6];而人类活动通过生态建设工程和城市建设等改变了下垫面类型^[7]。这些因素相互作用,使得近几十年来观测到的蒸散发产生了显著的变化。在气候变化和人类活动影响下,准确认识蒸散发对环境因素的响应,了解其时空变化趋势对增强水资源管理、水旱灾害预防以及农业生产预估等具有重大意义^[8-10]。

由于输入数据、模型结构和参数估计的差异性,全球蒸散发的估算存在很大的不确定性^[11-12],但许多研究者利用不同的蒸散发数据集发现全球蒸散发在过去 40 年间呈现增加的趋势^[13-14]。Yang 等^[15]利用多源数据集估算了全球蒸散发变化趋势,发现在 1982—2011 年间变化达到(0.66±0.38) mm/a,2001—2020 年间变化达到(1.19±0.31) mm/a。同时,针对中国蒸散发变化规律的研究也发现,尽管变化的幅度各不相同,大部分遥感蒸散发产品和数据在中国区域都表现出增加的趋势^[16-17]。在空间分布上,大体呈现出由东南向西北逐渐减小的变化趋势,但是不同模型之间存在空间异质性^[18]。

研究者们利用路径分析方法、Budyko 理论方程和数值模拟实验等方法^[19-21],分析了环境因素和人类活 动对蒸散发变化的影响。温姗姗等^[22]利用相关分析法研究气象因素对松花江流域蒸散发的影响,发现平均 气温是蒸散发变化的主要原因,在春冬季表现明显。Li 等^[23]基于多种长序列蒸散发产品,利用 Budyko 方程 量化了气候因子对蒸散发变化的贡献,发现降水主导了水分限制区域的蒸散发变化,而饱和水汽压则主导了 湿润地区的蒸散发变化;Yang 等^[24]通过 MEP 方程计算蒸散发,并使用两种归因方法分离了黄土高原植被绿 化对蒸散发组分的贡献,得出植被绿化增加了蒸腾,但减小了地表蒸发的结论。Zhang 等^[25]利用数值实验和 敏感性分析确定了中国南方湿润区气候变化和植被绿化对蒸散发变化的贡献,得出气候变化对蒸散发的贡献 超过 90%。然而以上的研究大多在区域/流域尺度评估单一驱动要素(降水、叶面积指数等)对蒸散发变化的 影响,忽略了气候和下垫面变化对蒸散发的耦合影响。同时,由于蒸散发计算涉及多个变量与参数,尽管 Penman-Montieh 模型和 Priestley-Taylor 模型被广泛用于蒸散发计算^[26-27],但上述模型中依然存在气孔导度 参数不确定性^[28]、植被敏感性参数取值^[29]等问题。因此,准确测量和计算蒸散发仍然是一个研究重点^[30]。 近几十年来,中国气候持续变暖,年降水量呈增加趋势。城市化和一系列生态工程导致中国的土地利用 和覆盖发生了巨大变化。这些气候和下垫面特征的变化,必然会改变中国蒸散发的时空变化格局。基于此, 本研究利用了最新一代的陆面模式 CLM5.0,模拟 1982—2018 年中国陆地蒸散发的时空变化格局。该模型包 含碳氮循环、水文过程、植被生理等过程,其中新引入的植被水力学框架明确了水分通过植被的传输过程,改 善了根系水分吸收曲线、植被光合作用在干旱地区的适用性,增强了对蒸散发的模拟效果^[31]。同时设置了多 情景控制试验,通过固定土地利用数据和气候强迫数据,以此来独立分离气候变化与土地利用变化对蒸散发 趋势变化的影响,并在不同流域之间量化各因素的相对贡献,以确定不同流域之间蒸散发趋势变化的主导因 素,在最后讨论了流域间各因素贡献差异的原因。本研究为气候变化背景下制定协同土地利用调控的区域水 资源管理策略提供了科学依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

中国区域位于亚洲东部,地势由西北向东南递减, 呈三级阶梯分布。西北部以高原和山地为主,东南部以 平原和丘陵为主,全国呈现出林地、灌丛、草原、耕地和 裸地的自然植被分布格局。受东南季风影响,中国年总 降水量和年平均气温也呈阶梯状分布。东南部为湿润 半湿润气候区,年降水量丰富,气温较高;西北部为半干 旱和干旱气候区,降水量稀少,气温较低。这种复杂的 地形和气候条件使得中国区域成为研究陆地蒸散发的 理想区域,能够比较全面的反映不同气候和下垫面条件 下的蒸散发变化特征。本研究根据水资源分布和地理 特征,将中国区域按照九大流域进行划分,分别是:松辽 河 Songhua and Liao River Basin(SLRB)、海河 Hai River Basin(HAIRB)、淮河 Huai River Basin(HUAIRB)、黄河 Yellow River Basin (YLRB)、长江 Yangtze River Basin (YTRB)、东南诸河 Southeast River Basin(SERB)、珠江 Pearl River Basin (PRB)、西南诸河 Southwest River Basin (SWRB) 以及内陆河 Northwest River Basin



图1 中国地形和九大流域分布图

Fig.1 Spatial distributions of DEM and nine river basins in China

SLRB:松辽河流域 Songhua and Liao River Basin;HAIRB:海河流域 Hai River Basin;HUAIRB:淮河流域 Huai River Basin;YLRB:黄河 流域 Yellow River Basin;YTRB:长江流域 Yangtze River Basin; SERB:东南诸河流域 Southeast River Basin;PRB:珠江流域 Pearl River Basin;SWRB:西南诸河流域 Southwest River Basin;NWRB: 内陆河流域 Northwest River Basin

(NWRB)(图1)。这种流域划分方法能够满足大区域尺度的水量平衡方程,便于分析蒸散发的空间分布规律。

1.2 研究数据

1.2.1 使用的数据及数据处理

(1)模型驱动数据:气象数据选用中国区域地面要素数据集 China Meteorological Forcing Dataset(CMFD), 可以从青藏高原数据中心下载获得(https://data.tpdc.ac.cn)^[32],包括降水、气温、气压、比湿、风速、向下短波 辐射和向下长波辐射 7 个气象要素。数据时间分辨率为 3h,空间分辨率为 0.1°,时间跨度从 1979 年至 2018 年。该驱动数据集作为气候强迫数据已被广泛用于中国区域陆地水文模拟研究中。驱动 CLM 模型的陆地表 面参数如土壤属性数据、反照率数据及土地利用类型数据都是从各种来源的国际合作计划获得的高分辨率输 入数据集汇总得到的,基础数据主要来自 2001—2015 年 MODIS 土地覆盖数据集(MCD12Q1 v5.1),叶面积指 数 LAI (MCD15A2 v5),和地表反照率 (MCD43B3 v5) 产品。

Table 1 Variation trend of meteorological elements over China and nine basins from 1985–2018									
区域 River basin	降水 Pr/(mm/a)	净辐射 R _n /(Wm ⁻² a ⁻¹)	风速 U/(m s ⁻¹ a ⁻¹)	比湿 q/(kg kg ⁻¹ a ⁻¹)	温度 T/(K/a)				
全国 China	2.16	-0.05	-0.01 *	0.08 *	0.04 *	_			
珠江 PRB	2.47	-0.07 *	0.00	-0.01	0.03 *				
东南诸河 SERB	7.45 *	0.03	-0.04 *	0.02	0.04 *				
西南诸河 SWRB	1.96 *	-0.04	-0.01 *	0.06	0.05 *				
长江 YTRB	1.50	-0.03	-0.01 *	0.07	0.04 *				
黄河 YERB	1.64 *	-0.06 *	-0.01 *	0.10 *	0.04 *				
淮河 HUAIRB	1.94	-0.10 *	-0.01 *	0.07	0.04 *				
海河 HAIRB	0.94	-0.15 *	-0.01 *	0.08	0.04 *				
松辽河 SLRB	0.61	-0.03	-0.02 *	0.08	0.03 *				
内陆河 NWRB	2.91 *	-0.01	0.00	0.06	0.04 *				

表 1 各气象要素 1983—2018 年间变化趋势 Fable 1 Variation trend of meteorological elements over China and nine basins from 1983—20

Pr:降水 Precipitation; Ra:净辐射 Net radiation; U:风速 Wind; RH:比湿 Specific humidity; T:温度 Temperature; *表示 P<0.05

(2)验证数据:本研究使用了 MODIS、GLEAM 和 MTE 数据产品,主要用于验证模型的输出。这些数据集包括 MOD16A2 蒸散发数据^[33](http://files.ntsg.umt.edu)、MTE 蒸散发数据^[34](https://www.bgc-jena.mpg.de/geodb/projects)和 GLEAM 蒸散发数据^[35](https://www.gleam.eu),数据空间分辨率分别为 0.05°、0.5°和 0.25°,时间跨度分别为 2000—2014 年、2000—2015 年和 1980—2022 年。为了保证验证结果的一致性和精度,所有数据通过重采样处理,空间分辨率统一为 0.25°。这些数据集的制作分别来源于涡度通量站实测值以及 PML 蒸散发模型等,覆盖不同的时空范围和多源数据,可以为模型结果提供多角度的验证支持,确保结果的稳健性和可靠性。本研究主要选用 GLEAM 数据对蒸散发进行对比验证,Yang 等^[36]使用 GLEAM 对其在中国区域的适用性做出了评价,可以作为参考蒸散发的真实值。

1.3 研究方法

1.3.1 Community Land Model(CLM5)模型

CLM 是一个基于过程的陆面模型,由生物地球物理、生物地球化学、水文、人类活动和生态系统动力学相关的组件或子模块组成^[31],能够模拟地表能量、水和碳循环。CLM 将每个网格单元划分为多个陆地单元。每个单元由多个雪/土柱组成,这些柱由不同的植物功能类型所覆盖。CLM 模型利用潜热通量估算蒸散发,主要分为植被蒸腾和蒸发,其中蒸发又分为冠层蒸发和地表蒸发,模型计算的蒸散发等于地表蒸发、冠层蒸发和 植被蒸腾之和。水汽通量计算如下:

$$E = E_g + E_v \tag{1}$$

$$E_v = E_v^w + E_v^t \tag{2}$$

$$E_g = (1 - f_{\text{sno}} - f_{\text{h2osfc}}) E_{\text{soil}} + f_{\text{snow}} E_{\text{snow}} + f_{\text{h2osfc}} E_{\text{h2osfc}}$$
(3)

$$E_v = -\rho_{\rm atm} \frac{(q_s - q_{\rm sat}^T)}{r_{\rm total}}$$
(4)

式中:E是水汽通量(kg m⁻² s⁻¹), E_g 是地表到大气的水汽通量, E_v 是植被到大气的水汽通量, E_v^w 表示冠层截留的水汽通量, E'_v 表示植被蒸腾水汽通量; f_{sno} , f_{h2osfe} 分别表示格点内覆盖雪和地表水的系数, E_{soi} , E_{snow} , E_{h2osfe} 分别表示从土壤、雪和地表水扩散到大气的水汽通量(kg m⁻² s⁻¹); ρ_{atm} 是大气密度(kg/m³), q_s 和 $q_{sat}^{T_v}$ 分别是冠层 比湿和植被温度下的饱和水汽压比湿(kg/kg), r_{total} 是由冠层传递至冠层空气的阻抗(s/m)。

本研究采用 CLM5 陆面模型,相比于之前的版本 CLM4.5,CLM5 对模型物理过程进行了改进,引入了修正 的冠层截留参数、空间上可变的土壤厚度以及根系剖面模块,同时改进了 Richard 方程的计算步长方法,提高 算法的精度和准确性^[31]。在土壤蒸发过程中,CLM5 更新了一个修正的土壤蒸发参数化方案,该参数化方案 考虑了水蒸气通过干燥表面层扩散的速率。将原来计算地表蒸发的土壤水分经验函数进行替换,考虑了不同 干表层土层厚度的计算过程,改善了蒸散发季节性模拟效果^[37]。相比于其他陆面模式,CLM5在对水文循环 过程中的变量具有较好的模拟效果。

1.3.2 模拟方法

本研究中 CLM5 模型的水平分辨率为 0.25°, 覆盖范围从东经 70 度至东经 140 度, 北纬 15 度至北纬 55 度,涵盖整个中国区域。本研究设计了 3 种情景模拟实验(表 2),用于分离气候变化和土地利用变化对蒸散发的影响。在情景模拟 S1 中,使用 1983—2018 年间变化的大气强迫和土地利用数据,即仿真情景。其中土地利用数据由 MODIS 植被连续场(VCF)、MODIS 土地覆盖产品和 AVHRR 数据利用 CLM 内置的地表数据合成工具进行合成,合成方法由 Lawerence 等^[38]提出。在情景模拟 S2 中,使用 1983—2018 年间变化的大气强迫,而土地利用数据保持在 1983 年不变。在情景模拟 S3 中,使用 1980 至 1985 年的强迫数据平均值作为输入数据,土地利用数据保持在 1983 年不变。因此,模拟 S1 和 S2 的差异代表了土地利用变化的影响,S2 和 S3 的差值代表了气候变化的影响,S1 和 S3 的差值代表了气候和土地利用数据采用 1983 年

Table 2 Simulation protocol in this study							
情景 Simulation protocol	大气强迫数据 Forcing data	土地利用数据 Land use data					
控制实验 S1 Control experiment S1	1983—2018	1983—2018					
控制实验 S2 Control experiment S2	1983—2018	1983					
控制实验 S3 Control experiment S3	1980—1985年强迫数据平均值	1983					

表 2 本研究的模拟情景

1.3.3 水量平衡方法

本研究选取了中国水资源公报9个流域区 2000—2018 年间的降水和径流数据,利用水量平衡原理计算得到流域尺度的年蒸散发,用于评估模型模拟的蒸散发值在流域尺度的精度,水量平衡公式^[39]:

$$ET = P - R - \Delta W$$

式中,P为年降水量(mm);R为年径流量(mm); ΔW 为时段内流域蓄水量变化(mm),当研究时段为多年时, ΔW 可以忽略;ET为计算得到的蒸散发(mm)。

1.3.4 统计方法

本研究使用了 Theil-Sen Median 趋势分析^[40]和 Mann-Kendall 趋势检验^[41]来分析蒸散发的变化趋势,并 评估模拟和参考数据集之间的偏差以及不同模拟情景之间偏差的统计学显著性(在 5% 显著性水平下)。

$$\beta = \operatorname{median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - 1}\right) \qquad (\forall j > i) \tag{6}$$

式中, median 代表取中位数; j、i分别代表对应时间; X_j 和 X_i 为时间序列数据; β 为斜率, β 大于0表示时间序列为上升趋势, β 小于0表示时间序列为下降趋势。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S>0) \\ 0 & (S=0) \end{cases}$$
(7)

$$\frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} \quad (S<0)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sign}(X_j - X_i)$$
(8)

$$\operatorname{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases}$$
(9)

http://www.ecologica.cn

式中, *S* 是统计量; Var 是方差函数; *X_i*和*X_i*是时间序列数据; *n* 为时间序列长度; sign 为符号函数。通过 *Z* 值可以判断趋势的显著性,在给定置信水平 α 下, 当 *Z* 的绝对值大于 1.96 时, 表示趋势通过了置信度为 95% 的显著性检验。

1.3.5 评价指标

为了评估模拟结果的准确性,本研究使用了 3 个评价指标,包括均方根误差 RMSE(Root Mean Square Error)^[42]、拟合优度 R^2 (Coefficient of determination)^[43]、相对偏差 PBIAS(Percent Bias)^[44]和皮尔逊相关系数 r (Pearson correlation coefficient)^[45]。这些评价指标估计了模拟的误差,可以确定模拟结果与实际蒸散发的差异,其中 RMSE 和 PBIAS 最优值为 0,正值表示模拟比实测偏大,负值表示模拟比实测偏小, R^2 最优值为 1。

$$r = \frac{\sum_{i=n}^{n} (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=n}^{n} (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=n}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2}}$$
(10)

式中,i表示第i个数据格点; X_i 、 Y_i 表示两个不同的变量; \overline{X} 、 \overline{Y} 分表表示两个变量的平均值。

RMSE =
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - X_i)^2}{n}}$$
 (11)

$$R^{2} = 1 - \frac{(O_{i} - X_{i})^{2}}{(O_{i} - \overline{O})^{2}}$$
(12)

PBIAS =
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - O_i)}{\sum_{i=n}^{n} O_i} \times 100\%$$
 (13)

式中,*i*表示第*i*个数据格点;*n*表示数据格点总数; O_i 和 X_i 分别是观测值和模拟值; \overline{O} 是观测值的平均值。

2 结果

2.1 蒸散发模拟结果评估

1983 至 2018 年间 S1 情景下模拟的多年平均蒸散发与 GLEAM 蒸散发的散点图(图 2)表明, CLM 模拟的 蒸散发基本分布在 1:1 参考线周围, R²达到 0.84, PBIAS 和 RMSE 分别达到-8.37%和 105.11 mm, PBIAS 接近 0 且 RMSE 较低通常表明模型预测较为准确。当区域蒸散发量较高时, CLM 模型模拟结果相较于 GLEAM 蒸 散发呈现低估特征, 蒸散发模拟值位于 1:1 参考线上方, 表明模型在高蒸散发情景下存在模拟偏差。由于各 个蒸散发产品的时间序列不同, 选择 2000—2014 年作为对比值, 多种蒸散发产品和模拟蒸散发从 2000—2014 年间的年内变化趋势显示 CLM 模型在冬季和春季模拟的蒸散发值相比于多种蒸散发产品偏小, 但是在夏季 和秋季模拟结果较好, 能较好地捕捉蒸散发在月份间的变化趋势(图 2)。GLEAM 蒸散发和模拟蒸散发在 1983—2018 年间的距平趋势较为一致, 呈现出逐渐上升的趋势, 相关系数 r 达到 0.89, 对蒸散发年际间的变化 也能较好地拟合(图 2)。

根据中国水资源公报公布的降水量和地表径流深数据,利用水量平衡原理计算得到的中国及九大流域 2000—2018年间流域多年平均蒸散发与GLEAM和模拟蒸散发进行对比发现,相比于GLEAM蒸散发,基于水 量平衡原理的流域蒸散发与模拟结果较为接近,全国区域偏差为-0.41%,RMSE为15.26 mm,各流域相对误 差和RMSE也略小于GLEAM蒸散发(表3)。在淮河、长江、珠江、东南诸河这些湿润半湿润区,模拟结果存在 偏小的问题。总的来看,CLM模拟蒸散发能较好的符合遥感产品数据变化规律和区域水量平衡结果,但是在 多年平均值的模拟和区域模拟验证上存在偏小的问题。



图 2 CLM 模拟蒸散发与遥感产品蒸散发的验证对比图

Fig.2 Comparison of simulated evapotranspiration by CLM and remote sensing product evapotranspiration

表 3 2000—2018 年全国及流域多年平均蒸散发、GLEAM 蒸散发与模拟值对比

 Table 3
 Comparison of averaged annual value of GLEAM, basin scale and simulated evapotranspiration over China and nine river basins for

 2000—2018

区域	模拟结果 _ Simulation _ results/mm	流域蒸散发 Basin evapotranspiration			GLEAM 蒸散发 GLEAM evapotranspiration		
River basin		流域蒸散发 ET/mm	相对偏差 PBIAS/%	均方根误差 RMSE/mm	GLEAM 蒸散发 ET/mm	相对偏差 PBIAS/%	均方根误差 RMSE/mm
全国 China	365.20	366.72	-0.41%	15.26	392.84	-7.04%	29.04
松辽 SLRB	387.16	382.95	1.10%	39.82	439.76	-11.96%	54.11
海河 HAIRB	450.77	471.23	-4.34%	55.22	461.06	-2.23%	27.75
黄河 YLRB	379.99	391.93	-3.05%	34.77	380.25	-0.07%	11.58
淮河 HUAIRB	565.00	654.10	-15.77%	104.57	561.17	0.91%	132.75
长江 YTRB	490.12	520.91	-5.91%	82.80	572.66	-14.41%	83.43
珠江 PRB	677.15	726.75	-6.83%	137.19	820.37	-17.46%	145.02
东南诸河 SERB	617.03	741.15	-16.75%	142.19	859.1	-28.18%	243.07
西南诸河 SWRB	454.21	405.08	12.13%	56.15	444.77	2.12%	22.38
内陆河 NWRB	169.35	137.20	23.43%	33.99	165.03	2.62%	12.62

ET:蒸散发 Evapotranspiration; PBIAS: 相对偏差 Percent Bias; RMSE: 均方根误差 Root Mean Square Error

2.2 1983—2018 年蒸散发的时空变化

中国区域 1983—2018 年间模拟多年平均蒸散发为 350.62 mm, 空间分布由东南沿海向西北内陆呈现减小的趋势(图3), 蒸散发较小的区域主要位于内陆河流域, 由于地处大陆深处, 植被覆盖较为稀疏, 降水量较

http://www.ecologica.cn

少,可蒸发水量也较少。而蒸散发数值较高的区域集中在珠江流域、长江中下游以及东南诸河流域这些降水量较高的地区。1983—2018年中国平均蒸散发在时间上呈增加趋势,增幅为1.59 mm/a。



图 3 1983—2018年中国区域多年平均蒸散发和蒸散发趋势变化空间分布

Fig.3 The spatial distribution of average annual evapotranspiration and evapotranspiration trend during 1983—2018 黑点标记区域表示 P<0.05

中国 83.7%的区域蒸散发呈上升趋势,其中华北平原和青藏高原地区的蒸散发显著增加(P<0.05),而剩 余 16.3%蒸散发减少的地区主要分布在松辽河流域(图 3)。九大流域蒸散发变化的趋势在 0.23 mm/a 至 4.21 mm/a之间,其中黄河流域、淮河流域和海河流域的变化趋势都超过了 2 mm/a,表现出显著增长的趋势, 仅在珠江流域和松辽河流域蒸散发趋势较为平缓,分别为 0.23 mm/a 和 0.34 mm/a(图 4)。

2.3 气候变化和土地利用变化对蒸散发的贡献

利用不同情景之间的差值可以确定气候变化和土地利用变化对蒸散发趋势的贡献。情景控制试验结果 表明气候变化主导了蒸散发的变化趋势,在中国大部分区域都导致蒸散发增加,变化范围集中在-2 mm/a 至 4 mm/a之间,对蒸散发趋势贡献的平均值为1.13 mm/a,仅在松辽河流域的西南方,蒸散发出现下降(图5)。 土地利用变化对蒸散发趋势的平均贡献为0.44 mm/a,对局地蒸散发有较为强烈的影响。在华北平原,蒸散 发呈现显著的增加趋势(图5)。

本研究计算了九大流域气候变化和土地利用变化对蒸散发趋势的贡献,以探究蒸散发趋势变化在流域间 的差异性。两种要素对蒸散发的影响在不同的区域存在显著差异(图6),气候变化在内陆河、长江、东南诸河 和西南诸河流域占据主导地位,而土地利用变化在松辽河、海河和淮河流域占据主导地位,黄河流域气候变化 和土地利用变化对蒸散发的影响相当。将蒸散发进一步划分为蒸腾和直接蒸发,直接蒸发表示为地表蒸发和 冠层截留之和^[46]。气候变化和土地利用变化对蒸腾的平均贡献与蒸散发相似,但是在淮河和海河流域土地 利用变化影响占比更高(图6)。除了西南诸河和内陆河流域以外,直接蒸发都呈现减小的趋势,这是因为土 壤蒸发和冠层截留在减小,但内陆河流域直接蒸发增加趋势达到1.11mm/a,主要是由土壤蒸发增加造成 (图6)。综合所有流域,气候变化是蒸散发变化的第一大贡献因素,基本上在所有流域都有较大的正贡献值, 土地利用变化是第二大贡献因素,对华北平原有极大的正增长趋势。

3 讨论

3.1 蒸散发变化的时空分析

基于 GLEAM 数据集和水量平衡方程的蒸散发验证结果表明, CLM5 能够有效地模拟中国区域蒸散发时 空变化格局。以往的研究显示,基于遥感蒸散发模型、陆地表面能量平衡算法以及其他陆面模式计算得到的 中国区域平均蒸散发值为 350 至 500 mm 之间^[47-48]。其他陆面模式 CLM4.0、DLM、VIC 以及其集合平均的模





Fig.4 The temporal trends of annual average evapotranspiration in nine basins during 1983-2018





拟平均值分别为381.63、350.98、348.49、351.24 mm^[49], 与本研究结果较为接近, 但还是存在对冬季和春季气 温较低时蒸散发模拟偏小的问题。这可能由于秋冬季植被覆盖会对地表产生保温效应^[50], 这种效果使得地 表温度比无植被覆盖时偏高, 进而导致蒸散发增加, 但在现有的模型参数化方案中并没有很好的描述这一过





程。同时,蒸散发模拟偏低的问题也可能与模型物候模拟有关,CLM 模拟叶面积指数偏低会改变地表能量的 分配,使得显热通量较高,潜热通量较低^[51],从而导致蒸散发模拟偏低。许多研究表明蒸散发在全球范围内 都呈现增加的趋势,尤其是 2000 年以后增加趋势更加明显^[15],但是由于研究时段和研究方法的不同,蒸散发 变化趋势的差异性较大,而 CLM5 模型可以较好地模拟出气候变化和下垫面改变下蒸散发在中国呈现增加的 趋势。

3.2 气候变化和土地利用变化对蒸散发的作用

利用 CLM5 模型模拟分离了气候变化和土地利用变化对中国区域蒸散发的影响。1983—2018 年,气候 变化与土地利用变化对蒸散发趋势贡献之和为 1.57 mm/a,与模拟得到趋势 1.59 mm/a 较一致,83.7% 的区域 蒸散发变化趋势由气候变化主导,其中大部分区域都导致了蒸散发的增加,仅在松辽河流域和南方部分区域 造成蒸散发减小(图 7)。在华北平原,土地利用变化造成局地蒸散发剧烈增加。此外,还有 0.02 mm/a 的蒸 散发变化没有归因到上述影响因素中,这一部分可能是由于氮沉降等其他环境因素对蒸散发的影响导 致的^[52]。

气候变化主要由降水、净辐射、风速、相对湿度和温度影响。1983—2018年间气象因素的趋势变化显示, 净辐射在所有流域中都呈现显著下降的趋势,温度则呈现显著上升的趋势,降水在部分流域显著增加(表1)。 研究者们利用 Budyko 理论分析气候变化中降水和潜在蒸散发的影响,发现降水主导了大部分区域的蒸散发 变化,但是在中国南方区域潜在蒸散发主导了蒸散发的变化^[53-54]。也有学者通过设置控制实验的方式,分离 不同气象因素对蒸散发变化的贡献,白鹏等^[55]利用 PML 模型发现降水和饱和水汽压对蒸散发变化贡献最 大,分别达到 29%和 44%;Zhang 等^[25]发现在南方湿润区温度对蒸散发的贡献最大,在大部分区域起主导作 用,Li 等^[56]利用 PT-JPT 模型区分了不同气候因子对蒸散发的贡献,指出气温和净辐射是蒸散发变化的主要 贡献因素,降水在不同流域间贡献有所差异。本研究将各气象因素的共同作用表示为气候变化的影响,未来 的研究可以考虑不同气象因素对蒸散发趋势变化的贡献,因为不同流域的下垫面特征可能会导致蒸散发和气 象因素表现出不同的相关性^[57],例如在长江流域、珠江流域等南方地区,气候变化主导了这些地区的蒸散发(图7),可以利用情景控制实验可以更好的确定每种气象因子在这些流域中对蒸散发影响的主导性作用。



图 7 蒸散发变化趋势主导因素空间分布

Fig.7 Spatial patterns of dominant factors in evapotranspiration trend

CLI+:气候变化主导蒸散发增加;CLI-:气候变化主导蒸散发减少;LUC+:土地利用变化主导蒸散发增加;LUC-:土地利用变化主导蒸散发 减少



图 8 流域土地利用变化面积及主要土地利用类型空间分布 Fig.8 Area of changed land use types in basins and spatial distribution of major land use types in China

土地利用变化也是造成蒸散发变化的重要原因,分析 1983—2018 年间土地利用的变化过程,大部分流域 草地面积减少,转化为耕地和森林的面积(图 8)。对于华北平原,土地利用变化贡献了蒸散发增长趋势的 70%以上,主要是农田面积和森林面积的增加。虽然在 2000 年以后中国实行了退耕还林政策,但部分耕地的 面积会通过挤占草地面积来扩充,在草地向森林转化的过程中会导致蒸散发的增加,加大蒸散发的增长趋 势^[7,58]。同时本研究还发现土地利用变化对蒸散发趋势变化的贡献在珠江流域和东南诸河流域达到 30%以 上,仅次于在华北平原对蒸散发趋势的贡献,这可能与这些地方的森林面积增加,导致植被叶面积指数显著增 加有关^[59],而森林具有更高的冠层结构以及更大的叶面积和更深的根系,将对蒸散发变化产生显著影响^[60]。 对于松辽河流域,由于农田扩张取代了部分针叶林,可能导致蒸散发增加^[61]。考虑到未来水资源限制条件加 剧,在实施大规模生态措施工程时,应当考虑不同植被类型转化对蒸散发的影响^[62],以满足区域水资源可利 用量。

3.3 不确定性来源

模拟结果可能存在以下不确定性。第一,陆面模式虽然经过了多阶段的发展,其生物物理化学过程已经 较为完备,但是蒸散发模拟过程仍然存在简化的问题,特别是模型的蒸腾占蒸散发比例偏小^[63],导致模拟结 果出现偏差。同时,尽管大部分陆面模型在描述光合作用、气孔导度采用相似的模型,但是不同模式的子过程 仍然存在一些差异,对蒸散发计算结果产生影响^[64]。考虑到各种陆面模式固有的不确定性,未来可以采用多 模式集合结果增强归因分析的可信度。第二,CO₂作为影响气候变化最重要的温室气体之一,其浓度增加也 会对蒸散发造成影响。一方面,CO₂增加会促使植被气孔关闭从而减小蒸腾,另一方面 CO₂浓度上升加快光合 作用,增大叶面积,从而提高植被生产力和增加蒸散发^[65—66]。在本研究中,将 CO₂浓度作为了背景因素,没有 将 CO₂作为单独的环境因素考虑其对蒸散发变化的贡献,这可能会影响蒸散发趋势的归因结果。第三,蒸散 发趋势变化不仅独立受到两种环境因素影响,这两种因素之间还存在着反馈机制。土地利用变化会影响地表 能量分布造成辐射通量变化^[59],而气候变化可以通过改变植被物候过程从而影响土地覆盖类型^[67],这也会 对蒸散发趋势归因带来不确定性,未来可以考虑这两者之间的反馈机制,进一步深化研究。

4 结论

(1)1983—2018年,中国年平均蒸散发为350.62 mm,以1.59 mm/a的速率增加。空间上,从东南沿海到 西北内陆,蒸散发逐渐减少,所有流域蒸散发都呈现增长趋势。蒸散发的显著增加主要集中在华北平原和青 藏高原部分区域。

(2)中国区域蒸散发趋势变化主要受到气候变化的影响,对蒸散发趋势变化的贡献超过 70%,其次是土地利用变化,两种因素的影响占比分别是 1.16 mm/a 和 0.45 mm/a。气候变化在全国 67.6%的区域主导蒸散发增加趋势,在 16.1%的区域主导减少趋势,而土地利用变化在 15.6%区域主导蒸散发增加趋势,几乎没有地区由土地利用变化主导蒸散发减少趋势。

(3)不同因素对蒸散发的贡献存在区域差异。气候变化主导了全国 83.7%区域的蒸散发变化趋势,集中 在西北内陆区和南方地区,而土地利用变化主导了华北平原地区蒸散发的变化趋势。

参考文献(References):

- Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratane S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, Jeu R D, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Roupsard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [2] Joshua B F, Forrest M, Elizabeth M, Hain C, Anderson M, Allen R, McCabe M F, Hook S, Baldocchi D, Townsend P A, Kilic A, Tu K, Miralles D D, Perret J, Lagouarde J P, Waliser D, Purdy A J, French A, Schimel D, Famiglietti J S, Stephens G, Wood E F. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. Water Resources Research, 2017, 53(4): 2618-2626.
- [3] Taikan O, Shinjiro K. Global hydrological cycles and world water resources. Science, 2010, 313(5790): 1068-1072.
- [4] Bai P, Liu X M Zhang Y Q, Liu C M. Incorporating vegetation dynamics noticeably improved performance of hydrological model under vegetation greening. Science of The Total Environment, 2018, 643: 610-622.
- [5] Zhang M, Yuan X. Crucial role of natural processes in detecting human influence on evapotranspiration by multisource data analysis. Journal of Hydrology, 2020, 580, 124530.
- [6] Zhang W X, Furtado K, Zhou T J, Chadwick R, Marzin C, Rostron J, Sexton D. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time

scales in a warmer world. Science Advances, 2021, 7(31); eabf8021.

- [7] Tian L, Zhang B Q, Chen S Y, Wang X J, Ma X G, Pan B T. Large-scale afforestation enhances precipitation by intensifying the atmospheric water cycle over the Chinese Loess Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2022, 127(16): e2022JD036738.
- [8] Raupach M R. Combination theory and equilibrium evaporation. Journal of Royal Meteorological Society, 2001, 127(574): 1149-1181.
- [9] Duethmann D, Blöschl G. Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria. Hydrological and Earth System Sciences, 2018, 22(10): 5143-5158.
- [10] Sheffield J, Wood E, Roderick M. Little change in global drought over the past 60 years. Nature, 2012, 491(7424): 435-438.
- [11] 李晓媛,于德永. 蒸散发估算方法及其驱动力研究进展. 干旱区研究, 2020, 37(1): 26-36.
- [12] Long D, Longuevergne L, Scanlon B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites.
 Water Resources Research, 2014, 50(2): 1131-1151.
- [13] Ma N, Szilagyi J, Zhang Y Q. Calibration-free complementary relationship estimates terrestrial evapotranspiration globally. Water Resources Research, 2021, 57(9): e2021WR029691.
- [14] Pan S, Pan N, Tian H, Friedlingstein P, Sitch S, Shi H, Arora V K, Haverd V, Jain A K, Kato E, Lienert S, Lombardozzi D, Nable J E S, Ottlé C, Poulter B, Zaehle S, Runing S W. Evaluation of global terrestrial evapotranspiration using state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning and land surface modeling. Hydrological and Earth System Sciences, 2019, 24(3): 1485-1509.
- [15] Yang Y, Roderick M L, Guo H, Miralles D G, Zhang L, Fatichi S, Luo X Z, Zhang Y Q, McVicar T R, Tu Z Y, Keenan T F, Fisher J B, Gan R, Zhang X Z, Piao S L, Zhang B Q, Yang D W. Evapotranspiration on a greening Earth. Nature Reviews earth & Environment, 2023, 4(9): 626-641.
- [16] Li F P, Kusche J, Chao N F, Wang Z T, Löcher A. Long-term (1979-Present) total water storage anomalies over the global land derived by reconstructing GRACE data. Geophysical Research Letters, 2021, 48(8): e2021GL093492.
- [17] Fu J, Gong Y Q, Zheng W W, Zou J, Zhang M, Zhang Z B, Qin J X, Liu J X, Quan B. Spatial-temporal variations of terrestrial evapotranspiration across China from 2000 to 2019. Science of The Total Environment, 2022, 825: 153951.
- [18] Ma N, Szilagyi J, Zhang Y S, Liu W B. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982— 2012: validations and spatiotemporal analyses. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2019, 124(8): 4326-4351.
- [19] Cheng M H, Jiao X Y, Jin X L, Li B B, Liu K H, Shi L. Satellite time series data reveal interannual and seasonal spatiotemporal evapotranspiration patterns in China in response to effect factors. Agricultural Water Management, 2021, 225: 107046.
- [20] He G H, Zhao Y, Wang J H, Gao X R, He F, Li H H, Zhai J Q, Wang Q M, Zhu Y N. Attribution analysis based on Budyko hypothesis for land evapotranspiration change in Loess Plateau, China. Journal of Arid Land, 2019, 11(6): 939-953.
- [21] Yang W J, Zhao Y, Guan H D, Tang Y F, Yang M M, Wang Q M, Zhao J S. Estimating spatiotemporal dynamics of evapotranspiration and assessing the cause for its increase in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 333(15): 109394.
- [22] 温姗姗,姜彤,李修仓,王腾飞,王艳君, Thomas Fischer. 1961—2010年松花江流域实际蒸散发时空变化及影响要素分析. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 79-86.
- [23] Li S J, Wang G J, Sun S L, Hagan D F T, Chen T X, Dolman H, Liu Y. Long-term changes in evapotranspiration over China and attribution to climatic drivers during 1980—2010. Journal of Hydrology, 2021, 595: 126037.
- [24] Yang Z L, Bai P, Li Y Z. Quantifying the effect of vegetation greening on evapotranspiration and its components on the Loess Plateau. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128446.
- [25] Zhang D, Liu X M, Zhang L, Zhang Q, Gan R, Li X H. Attribution of evapotranspiration changes in humid regions of China from 1982—2016. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(13): e2020JD032404.
- [26] Shao R, Zhang B Q, He X G, Su T X, Li Y, Long B, Wang X J, Yang W J, He C S. Historical water storage changes over China's Loess Plateau. Water Resources Research, 2021, 57(3); e2020WR028661.
- [27] Zhang Y Q, Peña-Arancibia J L, McVicar T R, Chiew F H S, Vaze J, Liu C M, Lu X J, Zheng H X, Wang Y P, Liu Y Y, Miralles D G, Pan M. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. Scientific Reports, 2016, 6(1): 19124.
- [28] Niu Z E, He H L, Zhu G F, Ren X L, Zhang L, Zhang K, Yu G R, Ge R, Li P, Zeng N. An increasing trend in the ratio of transpiration to total terrestrial evapotranspiration in China from 1982 to 2015 caused by greening and warming. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279: 107701.
- [29] Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3):901-919.
- [30] Wang F Y, Xia J, Zou L, Zhan C S, Liang W. Estimation of time-varying parameter in Budyko framework using long short-term memory network over the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127571.

- [31] Lawrence D M, Fisher R A, Koven C D, Olesen K W, Swenson S C, Bonan G, Collier N, Ghimire B, Kampenhout L V, Kennedy D, Kluzek E, Lawrence P K, Li F, Li H Y, Lombardozzi D, Riley W J, Sacks W J, Shi M J, Vertenstein M, Wieder W R, Xu C G, Ali A A, Badger A M, Bisht G, Broeke M V D, Brunke M A, Burns S P, Buzan J, Clark M, Craig A, Dahlin K, Drewniak B, Fisher J B, Flanner M, Fox A M, Gentine P, Hoffman F, Keppel-Aleks G, Knox R, Kumar S, Lenaerts J, Leung L R, Lipscomb W H, Lu Y Q, Pandey A, Pelletier J D, Perket J, Randerson J T, Ricciuto D M, Sanderson B M, Slater A, Subin Z M, Tang J Y, Thomas R Q, Martin M V, Zeng X B. The Community Land Model Version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, 11(12): 4245-4287..
- [32] He J, Yang K, Tang W J, Liu H, Qin J, Chen Y Y, Li X. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. Scientific Data, 2020, 7(1):25.
- [33] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [34] Jung M, Koirala S, Weber U, Ichii K, Gans F, Gamps-Valls G, Papale D, Schwalm C, Tramontana G, Reichstein M. The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes. Scientific Data, 2019, 6(1): 74.
- [35] Martens B, Miralles D G, Lievens. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. Geoscientific Model Development, 2017, 10(5): 1903-1925.
- [36] Yang X Q, Yong B, Ren L. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via China FLUXET measurements. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(20): 5688-5709.
- [37] Swenson S C, Lawrence D M. Assessing a dry surface layer-based soil resistance parameterization for the Community Land Model using GRACE and FLUXNET-MTE data. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2014, 119(17): 10299-10312.
- [38] Lawerence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0). Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2007, 112(G1): G01023.
- [39] Zhang L, Potter N, Hickel K, Zhang Y Q, Shao Q X. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-Model development and testing. Journal of Hydrology, 2008, 360(1): 117-131.
- [40] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.
- [41] Mann H B. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [42] Willmott C J, Kenji M. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 2005, 30(1): 79-82.
- [43] Nagelkerke N J D. A note on a general definition of the coefficient of determination. Biometrika, 1991, 78(3): 691-692.
- [44] Krause P, Boyle D P, Bäse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 2005, 5: 89-97.
- [45] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106 (D7): 7183-7192.
- [46] Tang R L, Peng Z, Liu M, Li Z L, Jiang Y Z, Hu Y X, Huang L X, Wang Y Z, Wang J R, Jia L, Zheng C L, Zhang Y Q, Zhang K, Yao Y J, Chen X L, Xiong Y J, Zeng Z Z, Fisher J B. Spatial-temporal patterns of land surface evapotranspiration from global products. Remote Sensing of Environment, 2024, 304: 114066.
- [47] Cheng M H, Jiao X Y, Li B B, Yu X, Shao M C, Jin X L. Long time series of daily evapotranspiration in China based on the SEBAL model and multisource images and validation. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3995-4017.
- [48] Liang J J, Yang Z L, Lin P R. Systematic hydrological evaluation of the Noah-MP Land Surface Model over China. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(11): 1171-1187.
- [49] Sun S B, Chen B Z, Shao Q Q, Chen J, Liu J Y, Zhang X J, Zhang H F, Lin X F. Modeling evapotranspiration over China's landmass from 1979 to 2012 using multiple land surface models: evaluations and analyses. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(4): 1185-1203.
- [50] 赵东升,王珂,崔耀平. 植被变化对气候的反馈机制及调节效应. 生态学报, 2023, 43(19): 7830-7840.
- [51] Cheng Y, Huang M, Zhu B, Bisht G, Zhou T, Liu Y, Song F F, He X G. Validation of the Community Land Model version 5 over the contiguous United States (CONUS) using in situ and remote sensing data sets. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126 (5): e2020JD033539.
- [52] Zaehle S, Medlyn B E, Kauwe M G D, Walker A P, Dietze M C, Hickler T, Luo Y Q, Wang Y P, El-Masri B, Thornton P, Jain A, Wang S S, Warlind D, Weng E S, Parton W, Iversen C M, Gallet-Budynek A, McCarthy H, Finzi A, Hanson P J, Prentice I C, Oren R, Norby R J. Evaluation of 11 terrestrial carbon-nitrogen cycle models against observations from two temperate free-air CO2 enrichment studies. New Phytologist,

2014, 202(3): 803-822.

- [53] Su T, Feng T C, Huang B C, Han Z X, Qian Z H, Feng G L, Hou W, Dong W J. Long-term mean changes in actual evapotranspiration over China under climate warming and the attribution analysis within the Budyko framework. International Journal of Climatology, 2021, 42(2): 1136-1147.
- [54] Liu J Y, You Y Y, Li J F, Sitch S, Gu X H, Nable J E M S, Lombardozzi D, Luo M, Feng X Y, Arneth A, Jain A K, Friedlingstein P, Tian H Q, Poulter B, Kong D D. Response of global land evapotranspiration to climate change, elevated CO₂, and land use change. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 311: 108663.
- [55] 白鹏, 蔡常鑫. 1982—2019 年中国陆地蒸散发变化的归因分析. 地理学报, 2023, 78(11): 2750-2762.
- [56] Li X Y, Zou L, Xia J, Dou M, Li H W, Song Z H. Untangling the effects of climate change and land use/cover change on spatiotemporal variation of evapotranspiration over China. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128189.
- [57] Lian R X, Zeng Q C. Existence of a strong solution and trajectory attractor for a climate dynamics model with topography effects. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2018, 458(1): 628-675.
- [58] Tian L, Zhang B Q, Wang X J, Chen S Y, Pan B T. Large-scale afforestation over the Loess Plateau in China contributes to the local warming trend. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127: e2021JD035730.
- [59] Lan X, Li Y, Chen X H, Lin K R, Cheng L Y, Gao H K, Liu Z Y. Vegetation controls on surface energy partitioning and water budget over China. Journal of Hydrology, 2021, 600: 125646.
- [60] Ye L Y, Cheng L, Liu P, Zhang L, Qin S J, Xia J. Management of vegetative land for more water yield under future climate conditions in the overutilized water resources regions: A case study in the Xiong'an New area. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126563.
- [61] Ye Y, Fang X Q, Ren Y Y, Zhang X Z, Chen L. Cropland cover change in Northeast China during the past 300 years. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(8): 1172-1182.
- [62] Zhang B Q, AghaKouchak A, Yang Y T, Wei J H, Wang G Q. A water-energy balance approach for multi-category drought assessment across globally diverse hydrological basins. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 264: 247-265.
- [63] Schlesinger W H, Jasechko S. Transpiration in the global water cycle. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 115-117.
- [64] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Penuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the Earth and its drivers. Nature Climate Change, 2016, 6(8): 791-795.
- [65] Lemordant L, Gentine P, Swann A S, Cook B I, Scheff J. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrological cycle in response to increasing CO₂. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4093-4098.
- [66] Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, Wang T, Ciais P, Lian X, Yang Y T, Mao J F, Shi X Y, Myneni R B. Impact of earth greening on the terrestrial water cycle. Journal of Climate, 2018, 31(7): 2633-2650.
- [67] Yang Y T, Donohue R J, McVicar T R. Global estimation of effective plant rooting depth: Implications for hydrological modeling. Water Resources Research, 2016, 52(10): 8260-8276.