

DOI: 10.20103/j.stxb.202410232585

俎千雪, 马傲格, 孙善磊, 柳艺博. 基于生态过程机理模型的长江流域蒸散发及其组分变化机理研究. 生态学报, 2025, 45(11): 5466-5480.

Zu Q X, Ma A G, Sun S L, Liu Y B. Causes for spatiotemporal changes in evapotranspiration and its components over the Yangtze River Basin based on the BEPS model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5466-5480.

基于生态过程机理模型的长江流域蒸散发及其组分变化机理研究

俎千雪¹, 马傲格¹, 孙善磊^{1,*}, 柳艺博²

1 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 气象灾害教育部重点实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044

摘要: 作为我国中部和北部的重要水资源供给区, 近年来长江流域水资源分配的不均匀性以及供给能力的不稳定性日益加剧。蒸散发 (ET) 是直接影响流域水资源供给能力的重要因子, 因此, 厘清 ET 及其组分土壤蒸发 (E)、蒸腾 (T) 和冠层截留蒸发 (E_i) 变化的相关物理机制, 可以为科学管理长江流域水资源提供重要理论参考和技术支撑。研究基于遥感驱动的生态过程机理模型 BEPS, 模拟分析了 2001—2020 年长江流域年 ET 及其组分的时空变化特征; 在此基础上, 采用多因子联立求解法剥离了气候、植被叶面积指数 (LAI) 和植被类型转变等对 ET 及其组分趋势的贡献, 开展了归因分析。结果表明: 1) 流域平均 ET 、 T 和 E_i 分别以 1.95 mm/a、1.12 mm/a 和 0.96 mm/a 的速率显著增加; 空间上, 超过 35% 的地区显示三者显著增加; 而流域平均及一半以上地区的 E 呈减小趋势。2) 对比各组分趋势, 流域平均和 64% 的地区显示 ET 趋势由 T 的变化决定, 而其余地区则由 E 和 E_i 的变化控制。3) 就流域平均而言, ET 、 T 和 E_i 的增加及 E 的减小均可归因于 LAI 的增大。4) ET 、 E 、 T 和 E_i 趋势的主控因子存在明显空间差异, 但主控因子 LAI 的面积占比始终最大, 分别为 49%、46%、48% 和 73%。

关键词: 生态过程机理模型 (BEPS); 长江流域; 蒸散发; 蒸散发组分; 气候变化; 叶面积指数; 植被类型转变

Causes for spatiotemporal changes in evapotranspiration and its components over the Yangtze River Basin based on the BEPS model

ZU Qianxue¹, MA Aoge¹, SUN Shanlei^{1,*}, LIU Yibo²

1 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Despite being an important water resource supply area for central and northern parts of China, the Yangtze River Basin (YRB) faces increasing inhomogeneity in water resource allocation and instability in water supply capacity. Recognizing that evapotranspiration (ET) is an essential component that directly affects the basin's water supply capacity, gaining a quantitative understanding of the physical mechanisms behind ET and its components—soil evaporation (E), transpiration (T), and vegetation interception evaporation (E_i)—offers theoretical and technological insights for the scientific management of water resources in the YRB. Thus, this study conducted a comprehensive investigation of the spatio-temporal variations in ET and its components from 2001 to 2020, utilizing simulations from the BEPS ecological-

基金项目: 国家自然科学基金 (42075189)

收稿日期: 2024-10-23; 网络出版日期: 2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sun.s@nuist.edu.cn

remote sensing coupled model. Subsequently, a combined approach involving multiple sensitivity numerical experiments was applied to discern the contributions of climate, vegetation leaf area index (LAI), and changes in vegetation types to the variations in ET and its components. Finally, attribution analyses were performed, and the findings indicated that: 1) Except for the annual E with a slight decrease, the annual ET , T , and Ei across the YRB significantly increased by 1.95 mm/a, 1.12 mm/a, and 0.96 mm/a, respectively. Spatially, the significant increases of these three variables were detected across more than 35% of areas. By contrast, the annual E decreased for the whole basin and more than one-half of the YRB. 2) Comparisons between the trends for E , T , and Ei suggested that the T changes for this study region and its 64% areas largely contributed to the ET changes, while the E and Ei changes controlled the ET changes in other areas, corresponding to area percentages of 10% and 24%, respectively. 3) On the regional mean level, the increases in precipitation, air temperature, and LAI positively contributed to the changes in ET and its components (excluding Ei), while the declined relative humidity and incoming solar radiation had negative contributions. As for impacts of the changes in vegetation types, ET and T (E and Ei) responded to increase (decrease). Comparisons between the contributions of these influential variables indicated the increases in ET , T , and Ei and the reductions of E could be attributed to increased LAI. 4) Despite spatial differences in the dominant factors affecting the changes in ET and its components, LAI consistently emerged as the dominant factor across the largest areas, with area percentages of 49%, 46%, 48%, and 73% for the changes in ET , E , T , and Ei , respectively. Over most of the remaining regions, the dominant factors were precipitation and changes in vegetation types for the changes in ET , precipitation, relative humidity, and changes in vegetation types for the changes in E , air temperature and changes in vegetation types for the changes in T , but precipitation for the changes in Ei . Moreover, the area percentages of these dominant factors were all higher than 10%.

Key Words: Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS); the Yangtze River Basin; evapotranspiration; evapotranspiration components; climate change; leaf area index; shifts in vegetation types

蒸散发(ET)主要包括土壤蒸发(E)、植被蒸腾(T)和冠层截留蒸发(Ei)三部分,是水圈、生物圈、大气圈能量和物质(如水和碳)交换的重要纽带^[1]。据统计, ET 可以消耗全球陆地降水的70%,这一比例在干旱区甚至可达90%以上^[2]。通过调控地表水体(如河流和湖泊)和地下水的可用水量以及陆面感热和潜热的分配, ET 可以影响气候系统^[3]。此外,作为连接地表植被气孔行为、水碳交换的纽带, ET (尤其是 T)在陆地植被生态系统的格局以及净初级生产力等关键生态过程也起着重要的作用^[1]。因此,探究 ET 及其组分的时空变化特征及相关物理机制一直是科学界关注的热点。

在气候变化和人类活动的共同影响下,近年来 ET 已发生了明显变化,但呈现出明显的区域性差异,如英国、中国、加拿大等增加,而中亚和阿根廷中部等减小^[1,4-9]。为深入理解 ET 变化的区域性差异及相关物理机制,学者们从气候变化角度在全球范围内开展了广泛研究,并取得了一系列成果。例如,Sun等指出降水主导了中国32%植被覆盖区的 ET 变化^[5];Fernandes等发现温度升高是加拿大南部 ET 增加的主要原因^[6];李修仓等发现珠江流域 ET 的减小可归因于气温日较差和日照时数的下降^[9]。此外,学者们还发现植被动态变化(如植被类型转变和植被叶面积指数(LAI)变化)可以通过改变植被生理和生态特征,调节陆面能量和水分分配,进而改变 ET ^[5];研究发现植被类型转变或植被LAI变化对部分地区 ET 的影响远大于气候变化的影响^[5,10-12]。目前,植被对 ET 的影响及相关物理机制已成为当前相关研究的热点。如Sun等发现植被类型转变和LAI变化主导了黄土高原一半以上地区的 ET 变化^[5]。刘冲等指出植被恢复对鄱阳湖流域 ET 的增加起到了主导作用^[10];陈厚兵等发现植被类型转变是澜湄流域热带地区 ET 减小的主要原因^[11]。以上均表明,准确认识和理解 ET 变化需要综合考虑气候变化和植被动态变化的影响。

长江流域是我国中部和北部的重要水资源供给区,且随着“南水北调”工程的建设,其重要性进一步凸显^[1]。然而,由于降水的时空分配不均,长江流域水资源的分配和供给能力均呈时空差异大和不稳定的特

点^[13-14]。此外,随着长江流域人口的迅速增长及经济和农业的快速发展,流域水资源分配的不均匀性以及供给能力的不稳定性进一步加剧^[15-16]。作为陆面水文循环的重要水分支出项,*ET* 直接影响着流域水资源的供给能力,因此,详细分析 *ET* 的时空变化特征及物理机制对于科学管理和调控长江流域水资源具有重要的实际意义。近年来,随着我国“退耕还林”工程和农业效率的提高,长江流域植被发生了明显变化,如土地利用/覆盖的快速转变和植被 LAI 的增大^[17-19]。与此同时,近年来长江流域气候变化进一步加剧,如气温的突增和地表净辐射的突降^[20-21]。尽管学者们针对长江流域 *ET* 的时空变化特征及相关物理机制已开展了大量研究,且取得了一定的成果^[1,22-25],但依然存在不足。如研究多关注 *ET*,而其组分(即 *E*、*T* 和 *E_i*) 在气候和植被变化的共同影响下究竟发生了怎样的变化、物理机制是什么却鲜有涉及。另外,多数研究采用相关分析^[24]、回归分析^[1]、敏感性系数^[25]、微分方程^[20]等方法量化不同因子对 *ET* 变化的影响;然而,这些方法并未充分考虑因子间相互作用,可能使得剥离的不同因子对 *ET* 变化的贡献出现偏差,进而对理解 *ET* 变化机理带来不确定性^[25-26]。

综上,本研究将重点关注长江流域 2001—2020 年 *ET* 及其组分(即 *E*、*T* 和 *E_i*) 的时空变化特征,并采用考虑因子间相互作用的归因方法(如多控制因子联立求解方法^[26])和 BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) 模型,量化气候和植被动态变化对长江流域 *ET*、*E*、*T* 和 *E_i* 变化的贡献,最终甄别主控因子并揭示相关物理机制。本研究有助于从 *ET* 不同组分变化的视角加深理解长江流域 *ET* 的时空变化特征及物理机制,同时还可以为保障长江流域水资源合理利用、生态政策制定以及地区经济的可持续发展提供重要的科学依据和参考。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

长江流域面积 180 万 km², 占国土面积的 18.8%^[1], 是我国第一大流域。干流流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等 11 个省、自治区、直辖市, 支流展延至贵州、甘肃、陕西、河南、浙江、广西、广东、福建等 8 个省、自治区, 覆盖人口约 4 亿。流域内地形地貌复杂多样, 整体呈西北高、东南低的三级阶梯状分布态势。长江流域多年平均气温约为 15 °C, 呈东高西低、南高北低的分布特征。降水量在空间上分布极不均匀, 上游年降水约 200—800 mm, 而中下游年降水约 800—1600 mm^[23]; 同时, 降水量年内分配也不均匀, 主要集中在 4—10 月。

1.2 BEPS 模型

BEPS 模型是 Liu 等和 Chen 等在 FOREST-BGC 模型的基础上发展起来的生态遥感耦合模型^[27-28], 多用于生态系统碳水循环过程的模拟。该模型实现了遥感资料与生态机理模型的有机结合, 主要特点有: (1) 将叶片尺度的瞬时 Farquhar 光合作用模型进行了时空尺度转换, 解决了模型驱动数据在时间和空间上的兼容问题, 可以用于模拟以天为时间步长的冠层光合和蒸腾过程; (2) 根据冠层中光的传输过程和原理, 模型将冠层分为阳叶和阴叶两部分, 并分别模拟光合和蒸腾过程。尽管 BEPS 模型最初只是被用于模拟加拿大北方森林生态系统的生产力, 但经过几十年的改进与发展, 模型已被广泛应用于区域以及全球生态系统生产力和 *ET* 的模拟, 且表现出良好的可靠性^[4,28-30]。

BEPS 模型主要由能量传输子模型、碳循环子模型、水循环子模型和生理调节子模型 4 部分组成^[31]。在水循环子模型中, *ET* 过程主要包括植被蒸腾、冠层截留降水蒸发、土壤蒸发以及地表积雪和冠层截留降雪升华等分量, 具体公式如下:

$$ET = T_{\text{plant}} + T_{\text{under}} + E_{\text{plant}} + S_{\text{plant}} + E_{\text{soil}} + S_{\text{ground}} \quad (1)$$

式中, T_{plant} 为上层植被蒸腾; T_{under} 为下层植被蒸腾(对于非林区, 其值为 0); E_{soil} 和 S_{ground} 分别为土壤蒸发和地表积雪升华; E_{plant} 和 S_{plant} 分别为植被截留降水蒸发和植被截留降雪升华。模型采用 Penman-Monteith 公式估算 T_{plant} 、 T_{under} 和 E_{soil} ; 而其余三项则是降水、入射辐射和 LAI 的函数。各分量的具体公式和参数可见参考文献

献^[31]。本研究中的 T 为 T_{plant} 、 T_{under} 两者之和; E 为 E_{soil} 、 S_{ground} 两者之和; 而 E_i 为 E_{plant} 、 S_{plant} 两者之和。

1.3 数据及其处理

本研究使用的数据主要有常规气象观测、植被 LAI、土地利用/覆盖 (Land use/cover, LUC) 和土壤属性等。中国气象局提供了 2001—2020 年全国 2000 多站逐日气象资料, 包括降水、相对湿度、最高温度、最低温度、日照时数。由于全国仅 122 站有入射太阳辐射观测, 本研究基于 Ju 等的方法和逐日日照时数估算了全国各站的入射太阳辐射^[32]。为与 LAI 和 LUC 数据的空间分辨率相匹配, 本研究基于反距离权重法对逐日降水、相对湿度、最高温度、最低温度和入射太阳辐射进行了空间插值处理, 获得了空间分辨率为 500 m 的格点化气象数据。需要注意的是, 进行温度空间插值时, 考虑了地形的影响 (即每升高 100 m 温度下降 0.6 °C)^[33]。LAI 数据来自 GLOBMAP V3.0 LAI 产品 (<http://modis.cn/globalLAI/>)^[34], 时间跨度为 2001—2020 年, 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 d。LUC 数据采用了 2001—2020 年 MODIS 500 m 的 LUC 产品 (即 MCD12Q1 V6.1; <https://lpdaac.usgs.gov/products/MCD12q1v006/>)^[35]。本研究重点关注长江流域植被覆盖区, 若某一区域 2001—2020 年始终被植被覆盖, 则该区域被定义为植被覆盖区; 相应地, 若某一区域在 2001—2020 年至少发生过一次植被类型改变, 则认为该区域发生了植被类型转变 (图 1)。土壤属性数据来自 <http://globalchange.bnu.edu.cn/>, 该数据是由 Shangguan 等基于全国第二次土壤普查中约 9000 个土壤质地剖面数据和中国 1:1000000 土壤图为基础生成的约 1000 m 分辨率的土壤砂粒、粉粒和粘粒分布图^[36]; 为与其他数据空间分辨率一致, 该数据被重采样为 500 m。

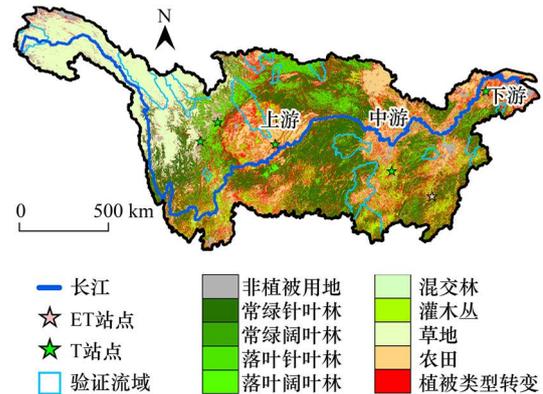


图 1 长江流域土地利用/覆盖、验证流域以及 ET 和 T 站点的分布

Fig.1 Spatial distribution of land use/cover, validation basins, and ET and T stations over the Yangtze River Basin

ET: 蒸散发; T: 蒸腾

为验证 BEPS 模型模拟能力, 还用到了径流观测、基于涡度通量观测的 ET 及来自文献的观测/模拟的 T。2001—2010 年 16 个水文站的逐年径流观测数据来自于水文年鉴; 基于水量平衡原理, 流域多年平均年 ET 等于流域多年平均年降水减去流域多年平均年径流深。涡度通量观测的逐月 ET 资料由千烟洲生态观测站提供, 时间跨度为 2003—2005 年。观测/模拟的年或生长季的 T 来自文献^[37—41]。

1.4 趋势分析

气候变量、LAI、ET 及其组分的线性趋势可用以下公式计算:

$$y_i = a x_i + b \quad (2)$$

式中, y_i 和 x_i ($i=1, 2, \dots, 20$) 分别代表目标变量和年份; a 、 b 和 n 分别为趋势系数、截距和样本量。 a 和 b 以最小二乘法进行估算。研究采用 Student- t 检验对趋势进行显著性检验, 显著性水平取为 0.05。

1.5 多因子联立求解法及主控因子的识别

为量化不同因子对 ET 及其组分趋势的贡献, 研究采用了 Sun 等^[26]发展的多控制因子联立求解法。较其他方法, 此方法可以有效剔除或减小因子间相互作用带来的不确定性, 已被成功地应用于归因分析各种水文 (如潜在 ET、径流、ET) 和生态变量 (如植被生产力) 的变化趋势及异常^[4, 12, 26, 42]。根据影响 ET 及其组分子因子的个数, 研究设计了多组数值试验, 包括 1 组控制试验 (exp_CRL) 和若干组敏感性试验 (exp_i, 其中, i 为影响因子), 具体如表 1。考虑影响 ET、E 和 T 的因子有降水、入射太阳辐射、温度、相对湿度、LAI 和植被类型, 共设计了 6 组敏感性试验; 而影响 E_i 的因子有降水、入射太阳辐射、LAI 和植被类型, 则设计了 4 组敏感性试验。就 exp_CRL 试验, BEPS 模型以各因子 2001—2020 年的原始数据驱动; 就 exp_i 试验, 模型将因子 i 保持在

2001 年(保留年内变化),而其他因子采用 2001—2020 年的原始数据。最后,根据多控制因子联立求解方法的算法,可以获得各因子对 ET 及其组分趋势的贡献。

表 1 数值试验设计

Table 1 Configurations for numerical experiments

数值试验 Numerical experiments	说明 Detailed information
控制试验 Control experiment	2001—2020 年逐日降水、相对湿度、入射太阳辐射和温度;2001—2020 年 8 d LAI 和逐年 LUC
降水试验 Experiment for precipitation	除了降水维持在 2001 年水平,其他要素均与控制性试验一致
相对湿度试验 Experiment for relative humidity	除了相对湿度维持在 2001 年水平,其他要素均与控制性试验一致
入射太阳辐射试验 Experiment for incoming solar radiation	除了入射太阳辐射维持在 2001 年水平,其他要素均与控制性试验一致
温度试验 Experiment for temperature	除了温度维持在 2001 年水平,其他要素均与控制性试验一致
LAI 试验 Experiment for LAI	除了 LAI 维持在 2001 年水平,其他要素均与控制性试验一致
植被类型试验 Experiment for vegetation types	除了 LUC 维持在 2001 年水平,其他要素均与控制性试验一致

LAI:叶面积指数 Leaf area index;LUC:土地利用/覆盖 Land use/cover

对于 exp_i 试验的 ET 、 E 、 T 或 Ei 趋势,可以认为是除因子 i 以外其他因子共同引起的,故可表示为:

$$\sum_{j \neq i}^n C_{j,k} = a_{\text{exp}_i,k} \quad (3)$$

式中, j 为影响因子,如降水、入射太阳辐射、温度、相对湿度、LAI 和植被类型; n 为敏感性试验个数(对 ET 、 E 和 T 为 6,而对 Ei 为 4); k 表示 ET 、 E 、 T 和 Ei ; $\sum_{j \neq i}^n C_{j,k}$ 表示除因子 i 以外其他因子对 ET 、 E 、 T 或 Ei 趋势的贡献之和; $a_{\text{exp}_i,k}$ 表示试验 exp_i 的 ET 、 E 、 T 或 Ei 趋势。因此,联立以上方程,便可获得因子 j 的贡献,公式如下:

$$C_{j,k} = \frac{\sum_{j \neq i}^n a_{\text{exp}_i,k} - (n-2) \times a_{\text{exp}_i,k}}{n-1} \quad (4)$$

对比各因子贡献, ET 及其组分趋势的主控因子可根据以下准则甄别:若 ET 、 E 、 T 或 Ei 趋势为正,则贡献最大的因子为主控因子;若 ET 、 E 、 T 或 Ei 趋势为负,则贡献最小的因子为主控因子。

2 结果与分析

2.1 长江流域 ET 及其组分的时空变化特征

2.1.1 BEPS 模型的验证

为了验证 BEPS 模型在长江流域的模拟能力,利用基于水量平衡的多年平均年 ET 、站点观测的逐月 ET 及文献提供的站点观测/模拟的 T 与 BEPS 模拟结果进行了对比,并计算了相关系数(R)、均方根误差(RMSE)及趋势系数(a)等评估指标(图 2)。与多年平均年 ET 相比,BEPS 模型可以较好地再现 ET 的空间分布特征,其 R 、RMSE 和 a 分别为 0.94、40.5 mm 和 1.19;相对于观测的逐月 ET ,模型可以较好地模拟 ET 的年内变化特征,对应的 R 、RMSE 和 a 分别为 0.87、15.88 mm 和 0.84;相比站点观测/模拟的 T ,模型能够较好地刻画 T 的空间差异,其 R 、RMSE 和 a 分别为 0.75、57.02 mm 和 0.81。总体而言,BEPS 模型在长江流域具有较好的模拟能力。

2.1.2 长江流域 ET 及其组分的时空变化特征

就流域整体而言,多年平均年 ET 、 E 、 T 和 Ei 分别为 462.29 mm、104.30 mm、254.10 mm 和 103.89 mm(图 3)。空间上,多年平均年 ET 及其组分存在明显的差异; ET 、 E 和 T 的空间分布基本一致,表现为东部和四川盆地大而其他地区小;就 Ei ,大值区主要位于西部偏东地区及东南部。除 E 减小外,流域平均的年 ET 、 T 和 Ei 均显著增加,速率分别为 1.95 mm/a、1.12 mm/a 和 0.96 mm/a(图 4),故流域平均 ET 的增加可归咎于 T 的增加。由图 4,74%的地区显示 ET 增加,其中 41%的地区显著,主要集中在流域西部、中南偏西和中北部地

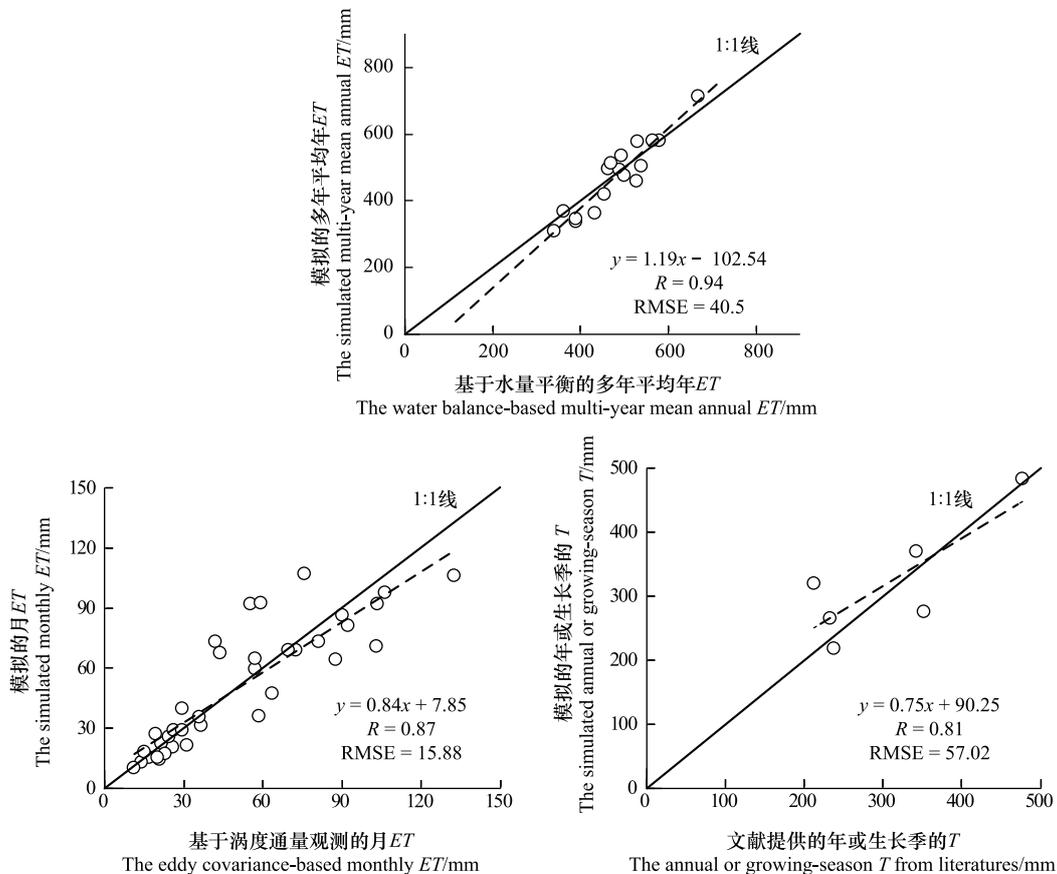


图2 BEPS模拟ET和T的验证

Fig.2 Validation for ET and T from BEPS

R:相关系数;RMSE:均方根误差

区;其余地区ET减小,且8%的地区显著,其中四川盆地和东部部分地区降幅较大(>4.00 mm/a)。45%和53%的地区分别显示E增加和减小,但速率基本小于 2.00 mm/a;其中,显著减小(增加)的区域位于中北部、中南部和东北部(西部),占流域面积的21%(13%)。T趋势的空间分布与ET相似,69%的地区增加,且35%的地区显著,以中南偏西和中北部增加明显(>2.50 mm/a);在T减小的区域中,10%的地区显著,且四川盆地和东北部部分地区降幅较大,超过了 4.00 mm/a。除东北部、西部和四川盆地部分地区外, E_i 均增加,且40%的地区显著,尤以中北部和中偏西地区增加明显(>2.00 mm/a)。对比ET组分趋势, $E(E_i)$ 的变化主导了流域最西部(除四川盆地外的中部及东南部)的ET趋势,占流域面积的10%(24%),而其余地区的ET趋势则由T的变化主导(图5)。

2.2 长江流域气候、植被LAI和植被类型转变的时空变化特征

就流域整体(图6),2001—2020年各气候因子和LAI均发生了不同程度的变化,但仅有平均温度的升高和LAI的增大显著,速率分别为 0.035 °C/a和 0.038 /a。由图6,流域中北偏东和西南地区的降水减小;而其他地区增加,且15%的地区显著,主要位于中北偏西和东北部分地区,增幅在 5.00 mm/a以上。除流域中南部、东部和西北部的相对湿度增大,其他地区均减小,其中西部(除西北部)和中北偏东地区显著,面积占比为16%,且速率大于 $0.05\%/a$ 。81%的地区显示入射太阳辐射减小,其中20%的地区显著,主要位于西北部、中北部和中南偏东地区,且速率大于 16.00 MJ $m^{-2} a^{-2}$ 。94%的地区显示平均温度升高,且34%的地区显著,主要集中在西部、中北偏东、中南偏东和东南地区,速率在 0.01 °C/a以上。除西部、四川盆地和东部部分地区,75%的地区显示LAI增大,且49%的地区显著,以流域中北部和中南部增大明显($>0.07/a$)。过去20年间,

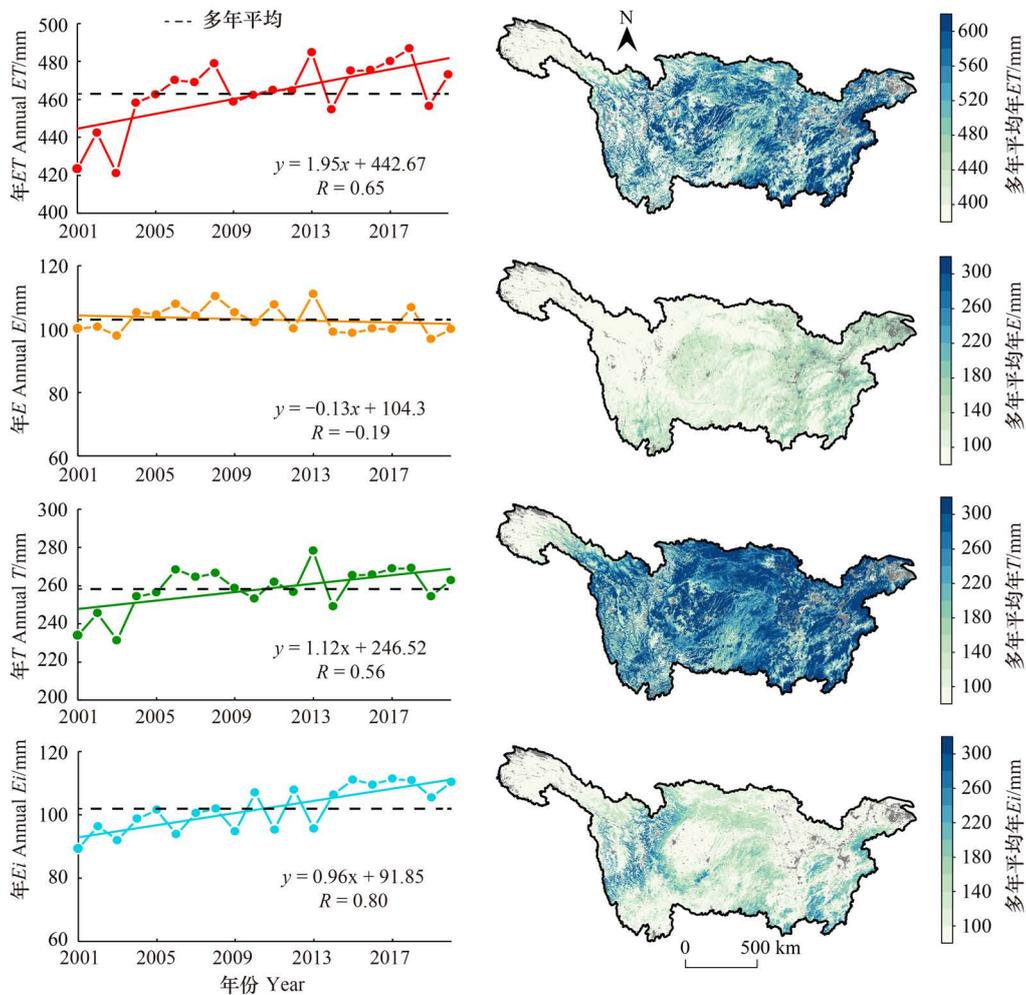


图3 年 ET 、 E 、 T 和 E_i 的时间序列及其气候态的空间分布

Fig.3 Time series of annual ET , E , T , and E_i , as well as spatial distribution of their multi-year means

E : 土壤蒸发; E_i : 植被冠层截留蒸发

23%的地区发生了植被类型转变,但存在明显的空间差异(图1)。

2.3 长江流域 ET 及其组分变化的归因分析

2.3.1 归因方法评估

基于敏感性试验和多控制因子联立求解方法,分离了不同因子对 ET 及其组分趋势的贡献;利用 R 、 $RMSE$ 和 a 等量化指标,对比分析了各因子贡献之和与 BEPS 模拟的 ET 及其组分的趋势,见图7。不难看出,各因子贡献之和与 BEPS 模拟的 ET 及其组分趋势均处在 1:1 线附近。由量化指标,各因子贡献之和与模型模拟的 ET 及其组分趋势的 R 均在 0.99 以上,而 $RMSE$ 均小于 0.50 mm/a,且 a 均接近于 1.00。以上分析表明,多控制因子联立求解法可以准确地剥离各因子对 ET 及其组分趋势的贡献。

2.3.2 长江流域 ET 及其组分变化的归因分析

对流域平均 ET 趋势而言,降水、相对湿度、入射太阳辐射、温度、LAI 和植被类型转变的贡献分别为 0.73 mm/a、-0.33 mm/a、-0.26 mm/a、0.47 mm/a、1.27 mm/a 和 0.12 mm/a(图8)。降水和温度使 E 增大,而其他因子使 E 减小,其中 LAI 的贡献率最大(0.25 mm/a)。相对湿度和入射太阳辐射对 T 趋势的贡献为负,而其余因子的贡献为正,且 LAI 的贡献最明显(0.87 mm/a)。在各因子对 E_i 趋势的影响中,入射太阳辐射和植被类型转变表现为负贡献,但贡献率小于 0.05 mm/a;降水和 LAI 的贡献为正,贡献大于 0.40 mm/a。对比各因

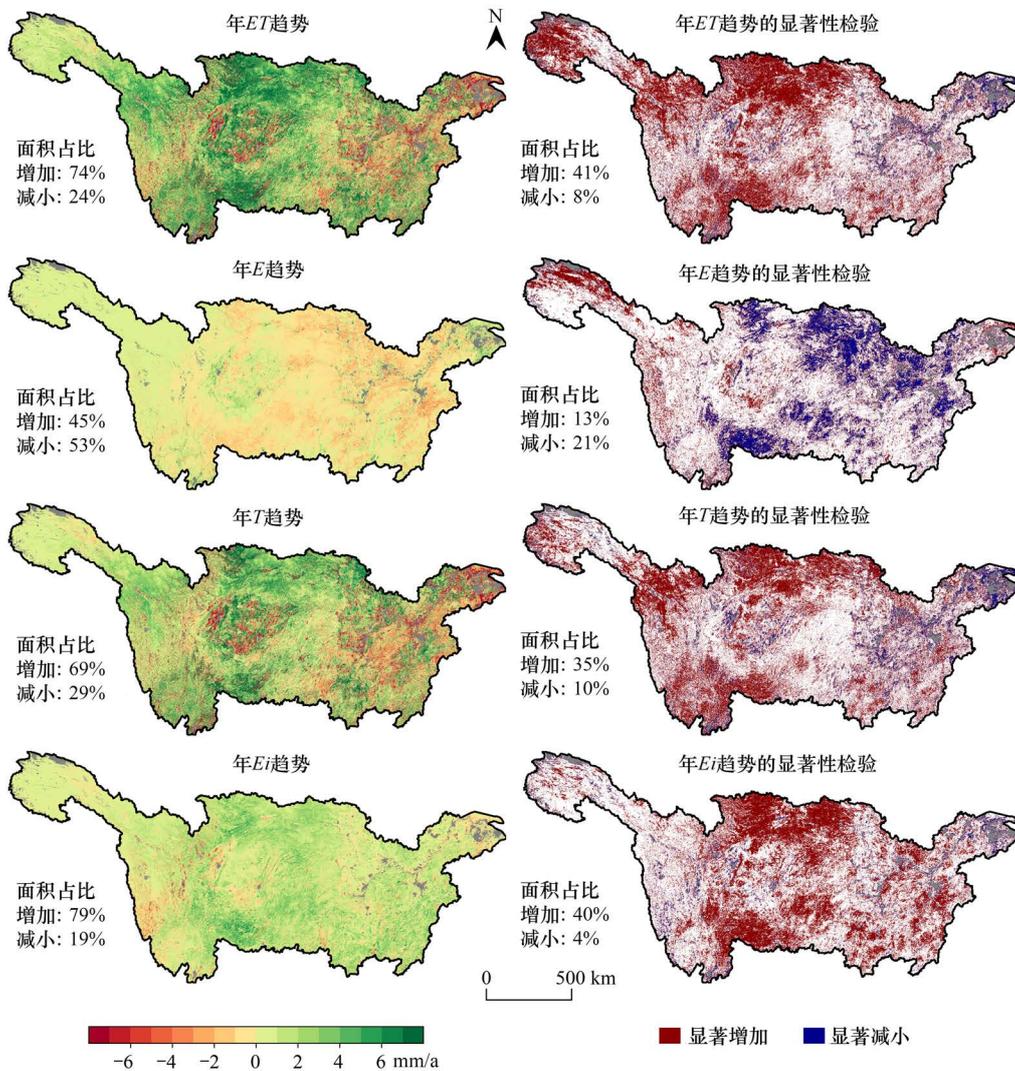


图4 年 ET、E、T 和 Ei 趋势及其显著性检验的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of annual ET, E, T, and Ei trends as well as corresponding significance test

子贡献,流域平均 ET、T 和 Ei 的增加和 E 的减小均可归因于 LAI 的增大。

由图 9,降水对 ET 趋势的贡献在西南和中北偏东地区为负,且贡献率在西南地区较大(>1.00 mm/a),而其它地区的贡献为正,大值区位于中北偏西地区(>2.50 mm/a);除西部大部分地区外,相对湿度和入射太阳辐射对 ET 趋势的贡献基本为负,贡献率介于 -2.00 mm/a 到 1.00 mm/a 之间;温度使得绝大部分地区的 ET 增加,其中西部大部分地区的贡献大于 1.00 mm/a;就流域中西部、四川盆地和东北部,LAI 使 ET 减小,贡献率基本在 3.00 mm/a 以上,而其他地区 LAI 的贡献为正,且中北部和中南偏西地区贡献最大(>3.00 mm/a);除少数地区的植被类型转变使 ET 减小,其他地区的贡献均为正,且大于 3.00 mm/a。就各气候因子对 E 趋势的贡献,其空间分布与各气候因子对 ET 趋势贡献的空间分布相似;与 LAI 对 ET 趋势贡献的

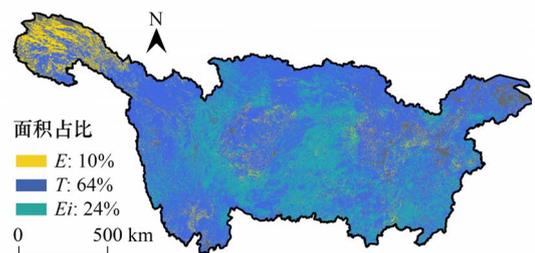


图5 主导年 ET 趋势组分的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of components dominating ET trends

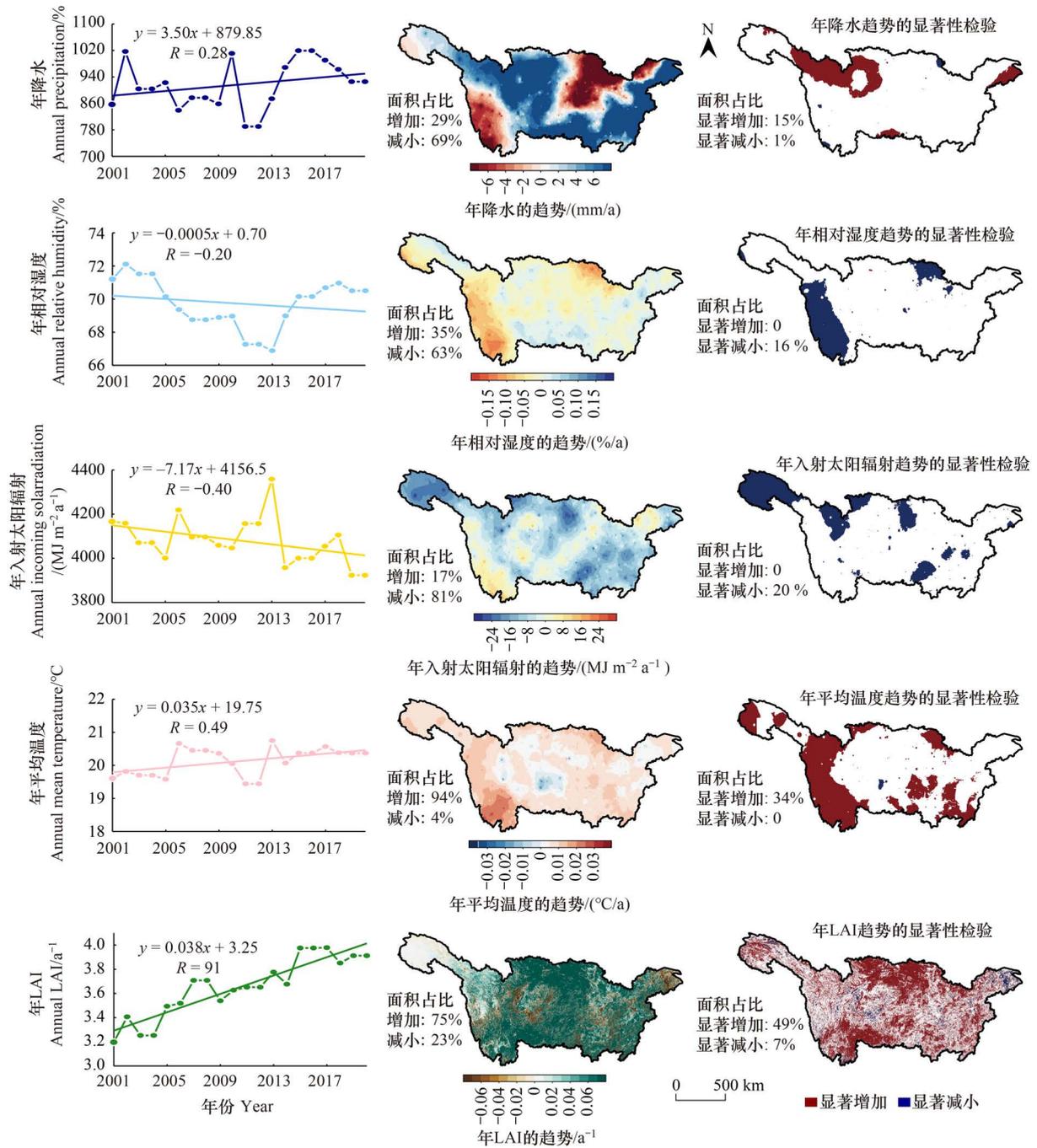


图 6 年降水、相对湿度、入射太阳辐射、平均温度和 LAI 的时间序列及其趋势的空间分布和显著性检验

Fig.6 Time series of the annual precipitation, relative humidity, incoming solar radiation, mean temperature, and LAI, as well as spatial distributions of these trends and their significance tests

LAI: 叶面积指数

空间分布相反, LAI对E趋势的贡献以负主, 且以中北部、中南偏西和东南部的贡献率最大(>1.00 mm/a); 绝大部分地区植被类型转变使E减小, 贡献率大于1.50 mm/a。就降水对T趋势的贡献, 正值主要位于流域北部(除西北部)、四川盆地和东南部, 尤以中北部贡献最大(>1.00 mm/a), 而其他地区贡献为负, 且大值(<-0.50 mm/a)位于西南部和东部偏北地区; 虽然其他气候因子对T趋势的贡献与它们对ET和E趋势的贡献在大小上存在差异, 但三者的空间分布基本一致; LAI对T趋势贡献的空间分布与LAI对ET趋势贡献的空

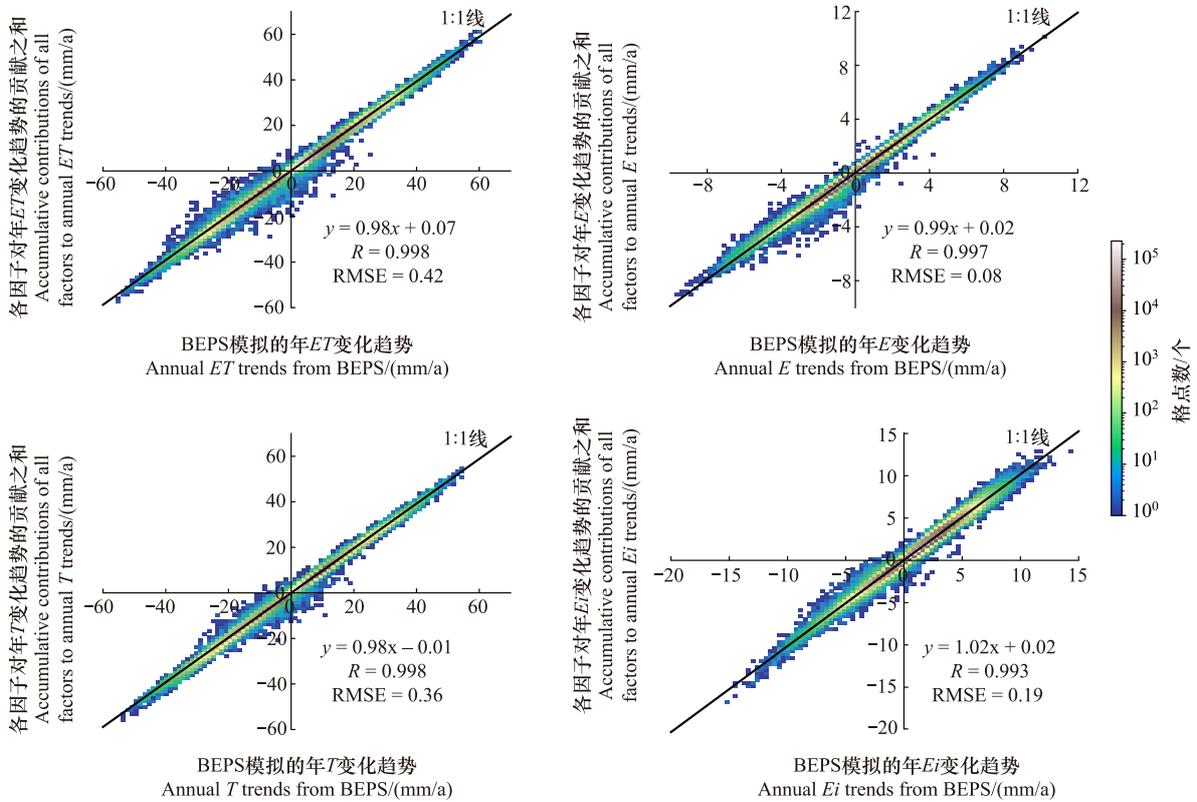


图7 归因方法评估

Fig.7 Validation for the selected attribution method

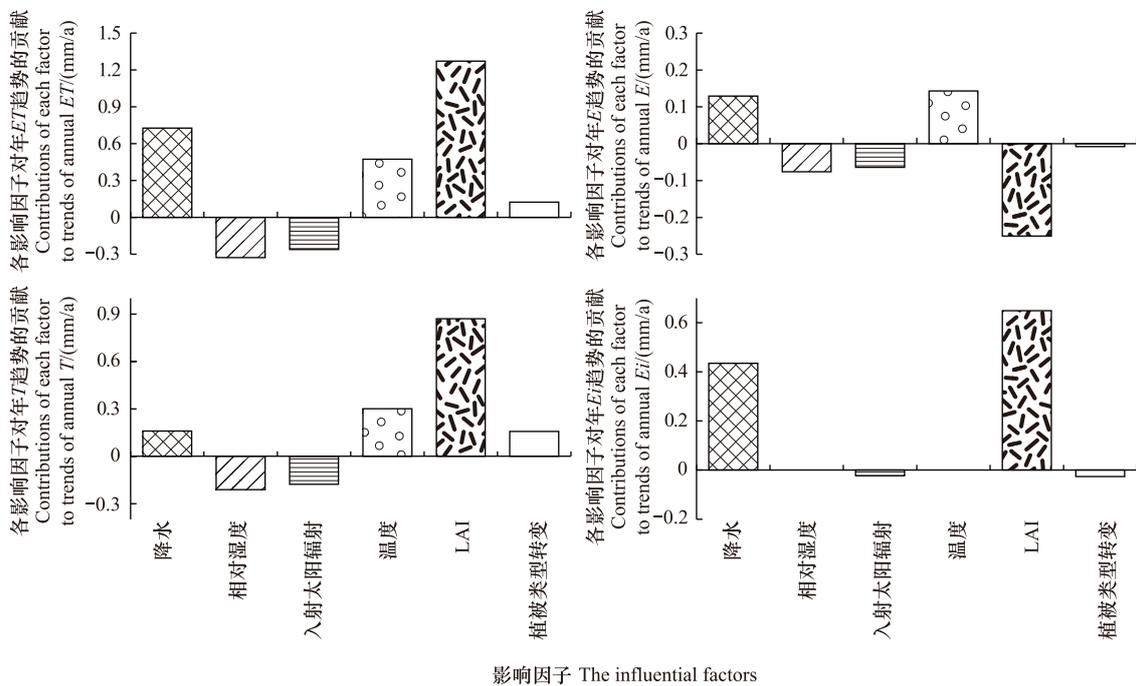


图8 降水、相对湿度、入射太阳辐射、温度、LAI和植被类型转变对长江流域平均年ET、E、T和Ei趋势的贡献

Fig.8 Contributions of precipitation, relative humidity, incoming solar radiation, temperature, LAI, and LUCC to changes in the regional mean ET, E, T, and Ei

间分布一致,贡献率大值区(>1.50 mm/a)位于流域中北部、中南偏西部、四川盆地和东北部;大部分地区的植被类型转变对 T 趋势的贡献为正,且大于 1.50 mm/a。除流域西南和中北偏东地区外,降水对 E_i 趋势的贡献均为正,且中部偏西和东南部贡献较大(>1.25 mm/a);入射太阳辐射对 E_i 趋势的贡献基本在 -0.25 mm/a 和 0.25 mm/a 之间;LAI 使得中西部、四川盆地和东北部的 E_i 减小,而使得其他地区的 E_i 增大,尤以中北部、中南偏西部的贡献较大(>1.50 mm/a);植被类型转变对 E_i 趋势的贡献在空间上一致为负,且贡献率基本在 1.50 mm/a 以上。

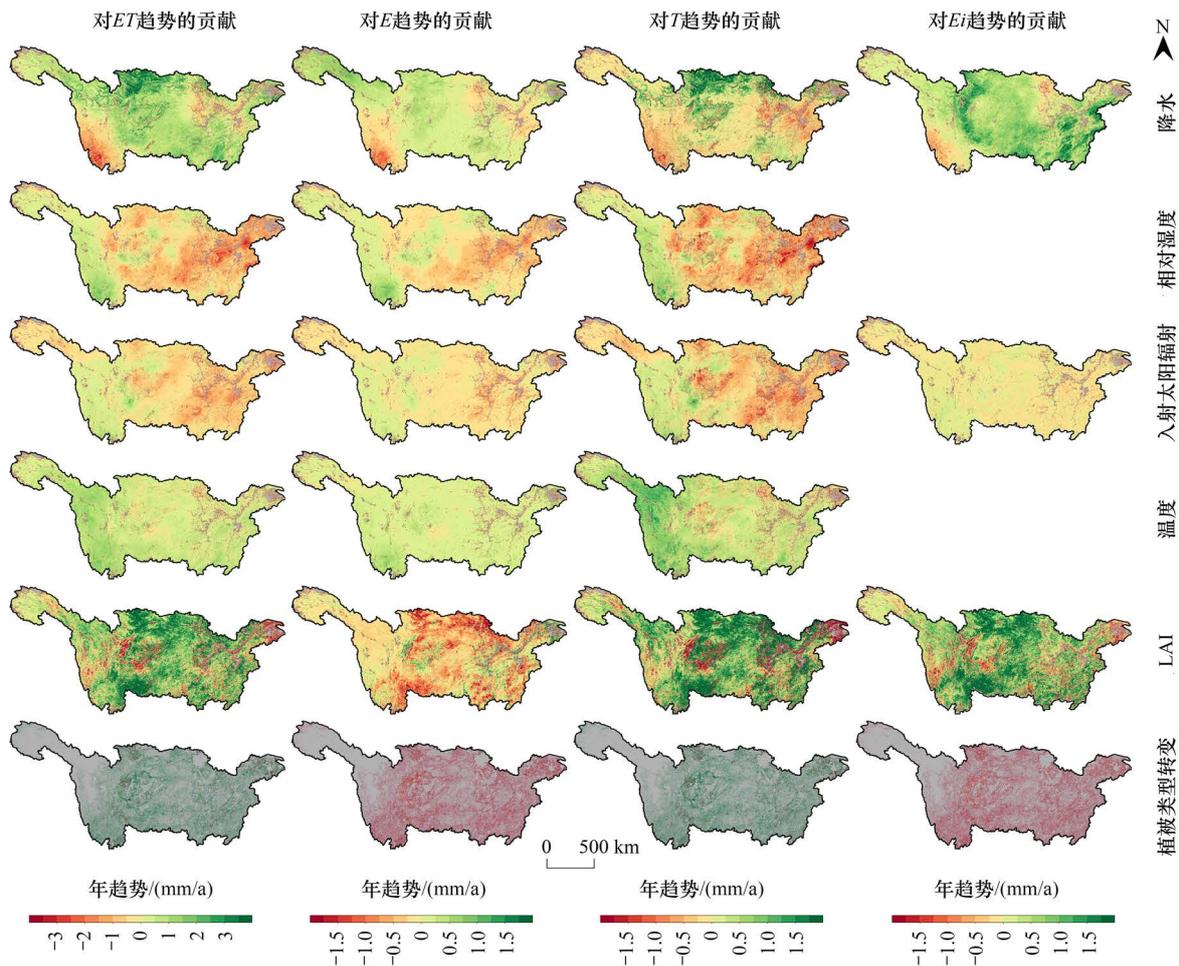


图9 降水、相对湿度、入射太阳辐射、温度、LAI 和植被类型转变对年 ET 及其组分趋势贡献的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of contributions of precipitation, relative humidity, incoming solar radiation, temperature, LAI, and shifts in vegetation types to changes in ET and its components

年 ET 及其组分趋势的主控因子表现出明显的空间差异(图 10)。对于 ET 趋势的主控因子,降水和温度的面积占比分别为 15% 和 8%,主要分布于西部和中北偏西地区;相对湿度和入射太阳辐射主要出现在中部偏东和东部偏中地区,分别占流域面积的 6% 和 2%;18% 的地区显示主控因子为植被类型转变;其余地区的主控因子为 LAI。21% 的地区显示降水主导了 E 的趋势,主要集中在西北部、西南部和中部偏东地区;主控因子相对湿度和入射太阳辐射的面积占比分别为 14% 和 1%,主要位于西南部、中部偏东和东部偏中地区;主控因子温度占流域面积的 6%,主要出现在西部偏中地区;主控因子植被类型转变占流域面积的 10%;其余地区的主控因子为 LAI。作为 T 趋势的主控因子,降水的面积占比为 6%,主要出现在中北偏西部;中部偏东和东部偏中地区的主控因子多为相对湿度,面积占比为 7%;主控因子入射太阳辐射零星分布于中部和东南部,面积占比仅为 3%;流域西部的主控因子多为温度,面积占比为 14%;20% 的地区显示主控因子为植被类型转变;主

控因子 LAI 的面积占比最大,为 48%。 E_i 趋势的主控因子降水和 LAI,分别占流域面积的 22%和 73%,其中降水主要位于最西部、中部偏西和东南部;其余地区的主控因子均为植被类型转变。

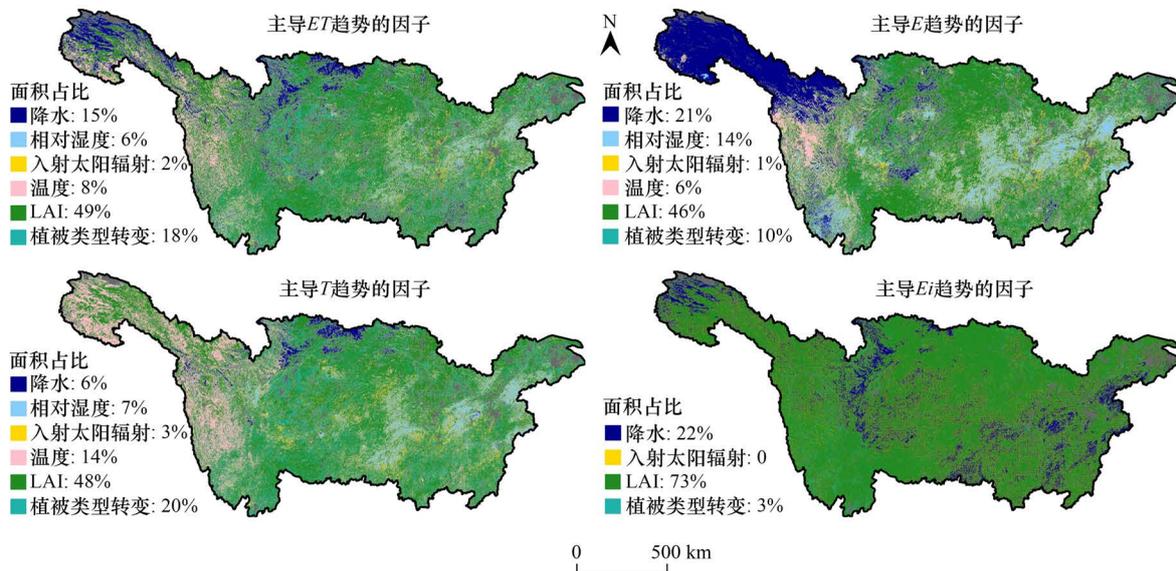


图 10 ET 及其组分趋势的主控因子的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of dominant factors for changes in ET and its components

3 讨论

3.1 植被动态变化对 ET 及其组分趋势的影响

研究发现过去 20 年植被 LAI 变化和植被类型转变对长江流域 ET 及其组分趋势具有重要影响。LAI 变化和植被类型转变对 ET 及其组分的影响可归因于植被动态变化引起的陆面生物物理和生物化学特征的变化,进而改变陆面与大气间水分、能量的交换^[43]。LAI 增大使得 ET 增大,可能与 LAI 增大引起的植被覆盖度增大和地表反照率下降有关^[44]。一般而言,LAI 增大使得植被覆盖度增大,从而增大植被冠层截留,进而增加 E_i 和 ET 。与此同时,随着 LAI 的增大,地表反照率将下降,植被将截获更多的能量用于植被光合作用,因此,植被为了维持增强的光合作用将通过 T 消耗更多的土壤水分。此外,LAI 的增大还会促进植被根系的进一步发展,这将有利于植被获得更多的土壤水分用于 T ^[45]。植被类型转变对 ET 及其组分趋势的影响(包括大小和符号)存在明显的空间差异,这主要取决于植被类型改变前后的陆面生物物理和生物地球化学特征究竟发生了怎样的改变。

研究还发现随着 LAI 的增大(减小), E 减小(增加)而 T 增加(减小),即 LAI 变化对 E 和 T 趋势的影响是相反的,这与前人研究一致^[3,43,45]。LAI 变化对 E 的影响主要通过控制地面接收到的能量和陆地存储的水分来实现。首先,LAI 增大使得植被冠层截获更多的太阳辐射,相反,地面接收到的太阳辐射则减少,意味着用于 E 的能量减小^[46]。此外,LAI 增大不仅使得植被冠层截获更多的降水,还会促进植被根系发展,进而使得植被从土壤中获取更多的水分^[45];因此,在这两个过程的共同影响下,土壤水分减少, E 减小。总而言之,这些发现强调了 LAI 变化对 E 和 T 具有相反的影响。

3.2 不确定性分析

研究依然存在不确定性,其可能来自于 BEPS 模型本身(如模型结构和参数)、输入资料及多控制因子联立求解法。BEPS 模型集成了一个 Jarvis 经验公式用以反映环境变量(如温度、饱和水汽压差、太阳辐射和土壤水分)对植物气孔导度的影响^[31]。尽管该 Jarvis 经验公式已在全球得到了广泛应用,但由于该公式的参数

依赖于历史时期的率定资料,因此该公式的表现因地而异^[47-48]。另外, Jarvis 公式假设不同环境变量对气孔导度的影响是相互独立的,并将所有环境变量的影响表示为“连乘”形式^[47];很显然,这种假设与实际情况并不相符,意味着该公式无法反映环境变量间相互作用对气孔导度的影响^[4]。许多研究表明,随着 CO₂ 浓度的增加,气孔导度减小^[49],进而减小 T 和 ET ,甚至可以引起区域乃至全球尺度水循环的改变^[50];但 BEPS 模型使用的 Jarvis 公式目前并未考虑这一影响。总而言之, Jarvis 公式的这些不足势必会造成气孔导度的估算存在偏差,从而影响 BEPS 模型模拟的 ET 及其组分。此外, BEPS 模型未考虑土壤水的侧向流动和人为用水扰动(如农业灌溉、地下水开采和流域间调水)。土壤水的侧向流动对于土壤水分沿地形和土壤水分梯度的再分配具有重要作用^[51],通常会使得地势低洼且土壤水分未饱和地区的 ET 增加。作为一种基本的农业活动,灌溉可以通过补充土壤水分改变地表水平衡,进而加强当地水循环^[52]。同样地,地下水开采和跨流域调水也可以改变土壤水分,从而改变地表水平衡^[53]。因此,忽视土壤水的侧向流动和人为用水扰动也可能造成研究结果的不确定性。

研究结果的可靠性还与 BEPS 模型输入数据(如气象数据、LAI 和土地利用/覆盖)的质量有关。由于观测仪器自身的缺陷或不足、观测仪器的更换、气象站点位置的迁移以及观测章程的改变等,气象数据本身可能存在一定的不确定性。另外,稀疏和分布不均的气象站点可能会对气象要素的空间插值造成不确定性,尤其是对空间变异性较大的气象要素(如降水)^[54]。相对于其他高分辨率 LAI 数据, GLOBMAP LAI 低估了 LAI^[55],可能造成 BEPS 模型模拟的 ET 及其组分存在偏差。由于本研究重点关注 ET 及其组分趋势的归因,而 GLOBMAP 能够较好地再现 LAI 的长期趋势^[56],因此, GLOBMAP LAI 产品对研究结果的影响可能较为有限。尽管 MCD12Q1 V6.1 土地利用/覆盖产品具有较高的准确性^[28],但该产品在一些地区仍然存在土地利用/覆盖分类错误的问题;因此,基于该土地利用/覆盖产品甄别植被类型转变可能会带来一定的不确定性。本研究采用多因子联立求解法分离了气候、LAI 和植被类型转变对 ET 及其组分趋势的贡献,且评估结果令人满意,但该方法假设不同因子的贡献是线性叠加的,这可能会给研究结果带来不确定性。

4 结论

(1)除 E 减小外,2001—2020 年长江流域平均 ET 、 T 和 E_i 分别以 1.95 mm/a、1.12 mm/a 和 0.96 mm/a 的速率显著增加。70%左右的地区显示 ET 、 T 和 E_i 增加,且 35%以上的地区显著;相反地,一半以上地区的 E 减小。对比各组分趋势,流域平均和 64%的地区显示 ET 的趋势可归咎于 T 的变化,而其余地区则归咎于 E 和 E_i 的变化,面积占比分别为 10%和 24%。

(2)就流域平均而言,降水增加、温度升高和 LAI 增大对 ET 及其组分(除 E_i 外)趋势的贡献为正,而相对湿度减小和入射太阳辐射下降的贡献则为负;植被类型转变使 ET 和 T 增加而使 E 和 E_i 减小。总体而言,流域平均 ET 、 T 和 E_i 增加以及 E 减小均可归因于 LAI 的增大。

(3) ET 及其组分趋势的主控因子存在明显的空间差异性。在 ET 、 E 、 T 和 E_i 趋势的主控因子中, LAI 面积占比最大,分别为 49%、46%、48%和 73%;其余地区, ET 趋势的主控因子多为降水和植被类型转变, E 趋势的主控因子多为降水、相对湿度和植被类型转变, T 趋势的主控因子多为温度和植被类型转变,而 E_i 趋势的主控因子多为降水,且这些主控因子的面积占比均在 10%以上。

参考文献(References):

- [1] 詹云军, 章文, 严岩, 王辰星, 荣月静, 朱捷缘, 卢慧婷, 郑天晨. 长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素. 生态学报, 2021, 41(17): 6924-6935.
- [2] Wang K C, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): 2011RG000373.
- [3] Jin Z, Liang W, Yang Y T, Zhang W B, Yan J W, Chen X J, Li S, Mo X G. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8191.
- [4] Blyth E M, Martínez-de la Torre A, Robinson E L. Trends in evapotranspiration and its drivers in Great Britain: 1961 to 2015. *Progress in Physical*

- Geography: Earth and Environment, 2019, 43(5): 666-693.
- [5] Sun S L, Liu Y B, Chen H S, Ju W M, Xu C Y, Liu Y, Zhou B T, Zhou Y, Zhou Y L, Yu M. Causes for the increases in both evapotranspiration and water yield over vegetated mainland China during the last two decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 324: 109118.
- [6] Fernandes R, Korolevych V, Wang S S. Trends in land evapotranspiration over Canada for the period 1960—2000 based on *in situ* climate observations and a land surface model. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(5): 1016-1030.
- [7] Hao X M, Fan X, Zhao Z Y, Zhang J J. Spatiotemporal patterns of evapotranspiration in central Asia from 2000 to 2020. *Remote Sensing*, 2023, 15(4): 1150.
- [8] Pal S, Dominguez F, Bollatti P, Oncley S P, Yang Y, Alvarez J, Garcia C M. Investigating the effects of land use change on subsurface, surface, and atmospheric branches of the hydrologic cycle in central *Argentina*. *Water Resources Research*, 2021, 57(11): e2021WR029704.
- [9] 李修仓, 姜彤, 温姗姗, 王艳君, 邱新法. 珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析. *热带气象学报*, 2014, 30(3): 483-494.
- [10] 刘冲, 齐述华, 汤林玲, 何蕾. 植被恢复与气候变化影响下的鄱阳湖流域蒸散发时空特征. *地理研究*, 2016, 35(12): 2373-2383.
- [11] 陈厚兵, 陈耀亮, 宋清海, Montri Sanwangsri, Nuttapon Khongdee, 张晶. 2001—2020 年澜湄流域热带地区土地覆被变化对蒸散发的影响. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 113-122.
- [12] 孙善磊, 王嘉志, 周舒佳, 王洁, 闫桂霞, 王宏宙, 毕早莹. 气候和流域特征变化对淮河流域地表水文过程的影响. *生态学报*, 2022, 42(10): 3933-3946.
- [13] 许继军, 陈桂亚, 杨明智, 袁喆. 长江流域干旱灾害应对的主要难点及其科技需求. *人民长江*, 2023, 54(8): 25-31.
- [14] 王世新, 王利双, 周艺, 王福涛, 刘雄飞, 徐晨娜, 吴亮. 长江流域水资源空间分配. *测绘科学*, 2017, 42(8): 33-39.
- [15] 鲍超, 方创琳. 长江流域耕地-粮食-人口复合系统的动态分析及调控途径. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(2): 115-120.
- [16] 马建华. 长江流域水资源面临的形势与可持续利用对策. *人民长江*, 2010, 41(12): 1-6, 19.
- [17] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [18] 袁晓蕾, 王超, 李柏延, 王伟, 陈能成. 长江流域土地利用/盖变化驱动力及影响综述. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2023, 48(8): 1241-1255.
- [19] Guo R J, Cai A N, Chen X. The quantitative effects of climate change and human activity on the vegetation growth in the Yangtze River Basin. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1168384.
- [20] 叶林媛, 鲁汉, 秦淑静, 张橹, 熊立华, 刘攀, 夏军, 程磊. 长江流域 1960—2019 年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律. *水科学进展*, 2022, 33(5): 718-729.
- [21] 王艳君, 姜彤, 刘波. 长江流域实际蒸发量的变化趋势. *地理学报*, 2010, 65(9): 1079-1088.
- [22] Tian X J, Jin S G. Evapotranspiration variations in the Yangtze River Basin from multi-satellite remote sensing data. *Journal of Water and Climate Change*, 2020, 11(2): 451-467.
- [23] 季永月, 陈吉龙, 唐青青, 吴胜军, 晏黎明, 谭大明. 基于知识图谱的长江流域内地表蒸散发研究进展. *水资源保护*, 2022, 38(2): 128-138.
- [24] 韩丽, 宋克超, 张文江, 刘俐, 蒋蕙如. 长江源头流域水文要素时空变化及对气候因子的响应. *山地学报*, 2017, 35(2): 129-141.
- [25] Zhang D, Liu X M, Hong H Y. Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(8): 1871-1881.
- [26] Sun S L, Chen H S, Sun G, Ju W M, Wang G J, Li X, Yan G X, Gao C J, Huang J, Zhang F M, Zhu S G, Hua W J. Attributing the changes in reference evapotranspiration in southwestern China using a new separation method. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(3): 777-798.
- [27] Liu J, Chen J M, Cihlar J, Park W M. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2): 158-175.
- [28] Chen J M, Liu J, Cihlar J, Goulden M L. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [29] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Zhu G L, Wu X C, Fan W L, Li D Q, Zhou Y L. Satellite-derived LAI products exhibit large discrepancies and can lead to substantial uncertainty in simulated carbon and water fluxes. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 174-188.
- [30] 周艳莲, 居为民, 柳艺博. 1981—2019 年全球陆地生态系统碳通量变化特征及其驱动因子. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 332-344.
- [31] Liu J, Chen J M, Cihlar J. Mapping evapotranspiration based on remote sensing: an application to Canada's landmass. *Water Resources Research*, 2003, 39(7): 2002WR001680.
- [32] Ju W M, Gao P, Wang J, Zhou Y L, Zhang X H. Combining an ecological model with remote sensing and GIS techniques to monitor soil water content of croplands with a monsoon climate. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1221-1231.
- [33] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Zhou Y L, Wang S Q, Wu X C. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13799.
- [34] Liu Y, Liu R G, Chen J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981—2011) from combined AVHRR and MODIS data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G4): 2012JG002084.
- [35] Sulla-Menashe D, Gray J M, Abercrombie S P, Friedl M A. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 183-194.

- [36] Shangguan W, Dai Y J, Liu B Y, Ye A Z, Yuan H. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China. *Geoderma*, 2012, 171: 85-91.
- [37] 刘鑫, 张金池, 谢德晋, 庄家尧, 邵永昌, 张水锋. 南京近郊麻栎林冠层蒸腾时间变化及降温效应. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(4): 529-536.
- [38] 戴军杰, 章新平, 罗紫东, 刘仲黎, 黎祖贤. 长沙地区典型树木蒸腾对环境因子的响应及模拟. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 699-711.
- [39] Zhao P, Kang S Z, Li S E, Ding R S, Tong L, Du T S. Seasonal variations in vineyard ET partitioning and dual crop coefficients correlate with canopy development and surface soil moisture. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 19-33.
- [40] 沈竞, 张弥, 肖薇, 温学发, 刘寿东, 李旭辉. 基于改进 SW 模型的千烟洲人工林蒸散组分拆分及其特征. *生态学报*, 2016, 36(8): 2164-2174.
- [41] 张雷, 孙鹏森, 刘世荣. 川西亚高山森林不同恢复阶段生长季蒸腾特征. *林业科学*, 2020, 56(1): 1-9.
- [42] 蒋宁萱, 张涵奇, 孙善磊, 魏丹淇, 周艳莲, 肖薇, 柳艺博. 21 世纪以来黄土高原水分利用效率时空变化及归因. *生态学报*, 2024, 44(14): 6020-6036.
- [43] 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: 19124.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Magliano P N, Giménez R, Houspanosian J, Páez R A, Nosetto M D, Fernández R J, Jobbágy E G. Litter is more effective than forest canopy reducing soil evaporation in Dry *Chaco* rangelands. *Ecohydrology*, 2017, 10(7): e1879.
- [47] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences*, 1976, 273(927): 593-610.
- [48] Lhomme J P. Stomatal control of transpiration: Examination of the Jarvis-type representation of canopy resistance in relation to humidity. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 689-699.
- [49] Norby R J, Delucia E H, Gielen B, Calfapietra C, Giardina C P, King J S, Ledford J, McCarthy H R, Moore D J P, Ceulemans R, De Angelis P, Finzi A C, Karnosky D F, Kubiske M E, Lukac M, Pregitzer K S, Scarascia-Mugnozza G E, Schlesinger W H, Oren R. Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(50): 18052-18056.
- [50] Gedney N, Cox P M, Betts R A, Boucher O, Huntingford C, Stott P A. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, 2006, 439(7078): 835-838.
- [51] Senatore A, Mendicino G, Gochis D J, Yu W, Yates D N, Kunstmann H. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7(4): 1693-1715.
- [52] Li X, Cheng G D, Ge Y C, Li H Y, Han F, Hu X L, Tian W, Tian Y, Pan X D, Nian Y Y, Zhang Y L, Ran Y H, Zheng Y, Gao B, Yang D W, Zheng C M, Wang X S, Liu S M, Cai X M. Hydrological cycle in the Heihe river basin and its implication for water resource management in endorheic basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(2): 890-914.
- [53] Zhang Z Y, Arnault J, Wagner S, Laux P, Kunstmann H. Impact of lateral terrestrial water flow on land-atmosphere interactions in the Heihe river basin in China: fully coupled modeling and precipitation recycling analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(15): 8401-8423.
- [54] Sun S L, Shi W R, Zhou S J, Chai R F, Chen H S, Wang G J, Zhou Y, Shen H Y. Capacity of satellite-based and reanalysis precipitation products in detecting long-term trends across mainland China. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2902.
- [55] Xiao Z Q, Liang S L, Jiang B. Evaluation of four long time-series global leaf area index products. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 218-230.
- [56] Chen J M, Ju W M, Ciais P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4259.