

DOI: 10.20103/j.stxb.202407081593

张沛凌, 曾思博, 蒋勇军, 吴泽, 刘芳, 程钰瑞, 李佳彬. 湿润气候抵消了植被恢复对西南岩溶区水资源的负面影响. 生态学报, 2025, 45(12): - .
Zhang P L, Zeng S B, Jiang Y J, Wu Z, Liu F, Cheng Y R, Li J B. A humid climate offsets the negative influences of vegetation restoration on the water resources in the karst catchments of Southwest China which are covered by ecological restoration projects. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - .

湿润气候抵消了植被恢复对西南岩溶区水资源的负面影响

张沛凌, 曾思博, 蒋勇军*, 吴泽, 刘芳, 程钰瑞, 李佳彬

西南大学地理科学学院岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 大规模生态工程的实施使得中国西南岩溶区成为全球变绿的热点区域, 然而目前缺乏这一区域植被恢复水文效应的综合评估。为此, 本文通过获取西南岩溶生态工程覆盖的 8 个典型流域 2002—2021 年间的气候、水文、植被遥感以及重力卫星数据, 分析了西南岩溶生态工程覆盖区内流域的水文过程及水资源变化趋势, 并利用水量平衡模型、偏相关以及广义线性混合效应模型定量评估了植被恢复与气候变化对流域主要水文参数和水资源的影响贡献。结果表明: (1) 2002—2021 年西南岩溶生态工程覆盖区流域的 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)、林地面积、降雨、径流、蒸散发、土壤湿度、径流系数以及陆地水储量皆呈上升趋势, 表明过去 20 年生态工程实施期间典型岩溶流域的 NDVI 增加显著且可利用水资源呈上升趋势, 而同期太阳辐射则呈现整体下降趋势; (2) 归因分析结果表明: 西南岩溶生态工程覆盖流域内 NDVI 对径流、蒸散发和土壤湿度的影响贡献占比分别为 2%、23% 和 11%, 降雨对径流、蒸散发和土壤湿度的影响贡献占比分别为 43%、2% 和 23%, 气温对径流、蒸散发和土壤湿度的影响贡献分别为 3%、13% 和 3%, 太阳辐射对径流、蒸散发和土壤湿度的影响贡献分别为 16%、34% 和 29%, 这些结果表明区域水文过程主要受控于气候变化而不是生态工程诱导下的植被恢复; (3) 在不同岩溶地貌类型中, 峰林平原和峰丛洼地的蒸散发和土壤湿度对植被恢复的响应相对岩溶槽谷更显著, 而未来岩溶地区实施生态工程应该充分考虑不同岩溶地貌类型对植被恢复的水文差异性响应。本研究结果表明岩溶区 2002—2021 年间生态工程主导的植被恢复以及气候变化虽然加剧了区域的蒸散发, 但同期湿润气候下降降雨增多抵消了这部分的水量损失。因此, 过去 20 年间西南岩溶区在植被恢复的条件下可利用的水资源量并未减少, 该发现将有助于评估未来岩溶地区生态工程的生态水文效应。

关键词: 气候变化; 生态工程; 植被恢复; 水文过程; 水资源; 西南岩溶区

A humid climate offsets the negative influences of vegetation restoration on the water resources in the karst catchments of Southwest China which are covered by ecological restoration projects

ZHANG Peiling, ZENG Sibao, JIANG Yongjun*, Wu Ze, LIU Fang, CHENG Yurui, Li Jiabin

Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715 China

Abstract: The implementing of large-scale ecological restoration projects (ERPs) has made Southwest China Karst a hotspot of global greening. However, there is still a lack of systematic studies to reveal the impacts of vegetation restoration on different hydrological processes in this area. Therefore, we obtained meteorological and hydrological parameters, remote sensing vegetation index, and GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) data from eight typical karst catchments covered by ecological restoration projects in Southwest China Karst from 2002 to 2021, and analyzed the long-term trends of

基金项目: 西南大学先导计划项目 (SWUXDZD22003); 国家自然科学基金 (42307070); 重庆市自然科学基金 (cstc2021yszx-jcyjX0005, 2022yszx-jcx0008estb)

收稿日期: 2024-07-08; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

hydrological processes and water resource. Meanwhile, the impacts of climate change and vegetation greening on hydrological processes and water resources in these catchments were evaluated using the water balance equation, partial correlation, and the generalized linear mixed effect model (GLMM). The results showed that: (1) the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), forest area, precipitation, runoff, evapotranspiration, soil moisture, runoff coefficient, and terrestrial water storage in the catchments covered by ERPs in Southwest China Karst showed increasing trends from 2002 to 2021, indicating that the ERPs implementation over the past 20 years have increased the NDVI and available water resources. However, the solar radiation showed a decreasing trend during the same period. (2) The results of the GLMM showed that the contributions of NDVI to runoff, evapotranspiration, and soil moisture variations in the catchments covered by ERPs were 2%, 23%, and 11%, respectively. The contributions of precipitation to runoff, evapotranspiration, and soil moisture changes were 43%, 2%, and 23%, respectively. The contributions of air temperature to runoff, evapotranspiration, and soil moisture changes were 3%, 13%, and 3%, respectively. The contributions of solar radiation to runoff, evapotranspiration, and soil moisture were 16%, 34%, and 29%, respectively. These results indicate that the major hydrological processes in Southwest China Karst are mainly controlled by climatic factors rather than the vegetation greening induced by ERPs; (3) among different karst landscapes, the hydrological responses of karst peak forest plains and karst peaked depressions to vegetation restoration were more remarkable than karst trough valleys. Hence, ERPs should consider the diverse hydrological responses of different karst landscapes to vegetation restoration in the future. In summary, our findings indicate that the vegetation greening induced by ERPs in Southwest China Karst during 2002—2021 has enhanced evapotranspiration, yet the increase in precipitation due to a humid climate in the same period offsets such water loss. Therefore, the available water resource in Southwest China Karst has not decreased during the past 20 years. These findings will help to evaluate the eco-hydrological effects of future ecological restoration projects in karst regions.

Key Words: climate change; ecological restoration projects; vegetation restoration; hydrological processes; water resource; Southwest China Karst

近年来生态修复与植树造林等生态工程被认为是治理生态退化、减缓气候变暖等全球环境问题的关键有效手段^[1-2]。中国西南岩溶地区面积约 75 万 km², 横跨 8 个省或自治区, 区域碳酸盐岩基岩坚硬质纯, 地形起伏较大, 同时水热条件较好, 碳酸盐岩溶蚀强烈, 成土速率慢, 导致该地区地表破碎, 生态系统异常脆弱^[3-4]。20 世纪以来, 不合理的人类活动使得水土流失剧烈, 生态系统脆弱性加剧, 产生了较为严重的石漠化问题^[5-6]。自 1998 年来, 中国在西南岩溶地区开展了“退耕还林”、“西南岩溶石漠化综合治理”等一系列生态工程, 以期治理由于人类活动导致的大规模植被退化问题^[7-11]。研究发现这些生态工程使得地区的森林面积占比由 34.3% 增加至 48.3%, 成为了全球变绿的热点地区, 这极大的逆转了西南岩溶地区的石漠化趋势^[12]。

由于植被恢复具有很高的水足迹, 大规模的生态工程导致的植被恢复必将对区域乃至全球的水循环过程和水资源带来深刻的影响^[13]。有研究发现, 大规模的植被恢复可能增加区域的降水量^[2], 例如 Li 等研究认为, 中国华北和东南地区过去 30 年来植被绿化带来的降水量足以抵消蒸散量的增加^[11]; Yan 等研究后寨流域发现植被恢复并未对区域产水量造成明显变化^[14]。而另一些研究表明植被恢复将导致一些干旱地区的蒸腾水量的快速增加, 进而导致土壤水含量和径流将降低^[10-11]。Zhao 等发现我国毛乌素沙地近 13 年来的生态恢复过程中消耗总水资源量的平均速率为 $(16.6 \pm 5.0) \text{ mm/a}$ ^[15]; Tong 等研究西南地区发现植被恢复导致 8% 的区域土壤水含量降低^[16]。虽然中国西南岩溶处于湿润地区, 但区域地形起伏较大, 同时水热条件较好, 碳酸盐岩溶蚀强烈, 作为成土母质的基岩中土壤形成物质含量低、成土速率慢, 导致该地区地表破碎、土层浅薄而不连续、异质性强^[4,6]。另外, 地区出露的碳酸盐岩与植被-土壤-水相互作用 ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$) 发育了由密集的裂隙、管道、落水洞等构成的非均质地下网络系统^[17]。这些条件都导致西南岩溶区地表的土壤与水资源

保持能力差,漏失速度快,地表经常处于“缺水”的类似干旱环境,因此西南岩溶地区植被恢复和水资源安全对区域的可持续发展都非常重要。近年来陆续有学者探讨了西南岩溶地区水文以及水资源的变化以及其潜在影响因子,但目前研究对该地区植被恢复所产生的水文与水资源影响存在较大的争议。这些前人的研究大多关注个别水文参数对植被恢复的响应,或跨越的空间尺度有限,因此对西南岩溶区生态水文相互作用的整体理解存在一定局限。此外,西南岩溶地区在生态工程实施期间的水文变化也受到同期剧烈的气候变化影响,然而目前的研究鲜少能定量区分植被与气候动态对这一地区水文过程与水资源变化的影响贡献^[18-20]。另外,岩溶区植被除利用土壤水外,还需要利用大量的地下水来维持生存和生长^[17],且当土壤含水量降低时,植物将利用更多的地下水^[21]。因此,岩溶区植被恢复带来的水文效应将更加复杂,而目前岩溶区植被恢复的水文效应评估十分仍然缺乏。对这些问题的深入研究将有助于解决目前存在的争议并能更好地回答西南岩溶地区水文与水资源如何响应植被恢复或气候变化这一关键问题。

因此,本文选取位于中国西南岩溶生态工程覆盖区内的 8 个受到不同岩溶地貌控制的大型流域(乌江、沅江、湘江、资水、酃水、柳江、红水河、郁江)作为研究对象,获取这些由不同岩溶地貌控制的流域 2002—2021 年的水文、气候和植被遥感以及重力卫星数据,开展区域长时间尺度的水文过程及水资源变化特征研究,并在此基础上量化流域内植被恢复与气候变化对水文参数及区域水资源的贡献占比,最终揭示在气候变化下西南岩溶区生态工程实施所产生的水文与水资源效应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

20 世纪由于不合理的人类活动,中国西南岩溶地区产生了严重的石漠化问题。为修复脆弱的生态环境,该地区自 1998 年来大规模开展“退耕还林”、“西南岩溶石漠化综合治理”等生态工程。研究区位于中国西南岩溶地区生态恢复工程实施区域内的 8 个岩溶流域(102°25′—114°25′E, 21°59′—30°25′N),包括 5 个长江支流:乌江、沅江、湘江、资水、酃水,以及 3 个珠江支流:柳江、红水河、郁江,总面积为 59.25 万 km²(图 1、表 1),跨四川、重庆、湖北、湖南、贵州、广西、云南等省份以及自治区。研究区主要位于亚热带季风区内,多年平均气温约为 16.6℃,多年平均降水为 1338.4mm。研究区 8 个流域岩溶地貌类型丰富,包括岩溶槽谷、峰林平原、峰丛洼地、断陷盆地及岩溶高原等^[1]。

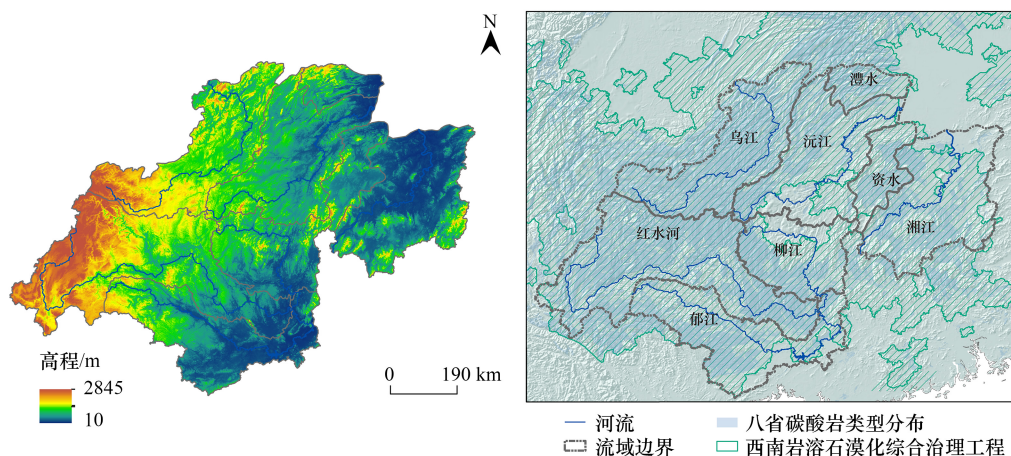


图 1 西南岩溶生态工程实施区域内典型岩溶流域分布和地形,所选择的流域包括 5 个长江支流(乌江、沅江、湘江、酃水、资水)以及三个珠江支流(红水河、柳江、郁江)

Fig.1 Distribution of karst catchments, and topography in the implementation areas of ecological restoration projects in Southwest China. The study areas include five tributaries of Yangtze River (Wu River, Yuan River, Xiang River, Feng River, and Zi River) and three tributaries of Pearl River (Hong River, Liu River, and Yu River)

表 1 西南岩溶生态工程覆盖流域 2002—2021 年气候植被参数以及地貌类型统计

Table 1 Statistics of meteorological parameters, vegetation index and geomorphic types in the karst catchments which are covered by ecological restoration projects in Southwest China

流域 Catchment	温度 Temperature/ (℃/a)	降雨 Precipitation/ (mm/a)	蒸散发 Evaporation/ (mm/a)	径流 Runoff/ (mm/a)	流域面积 Area/ (×10 ⁴ km ²)	岩溶地貌类型 Karst geomorphic types
红水河	16.63	1191.59	686.73	414.14	13.74	岩溶高原、峰丛洼地
郁江	20.54	1404.13	804.13	786.23	8.47	峰林平原、峰丛洼地
柳江	17.44	1479.43	727.60	731.92	5.46	峰丛洼地
乌江	14.18	1181.64	609.61	525.73	8.78	岩溶高原、岩溶槽谷
湘江	17.30	1453.75	689.68	701.73	9.41	峰林平原
澧水	15.27	1364.96	679.95	817.84	1.79	岩溶槽谷
沅江	15.69	1315.78	665.01	733.51	9.03	岩溶槽谷、峰丛洼地
资水	16.06	1396.07	669.88	862.98	2.57	峰林平原

1.2 数据来源

1.2.1 研究区边界

本研究使用的西南地区岩溶分布数据来自德国联邦地球科学和自然资源研究所产品中心提供的全球岩溶分布电子地图 WOKAM(图 1),西南岩溶区生态工程实施边界下载自国家科技基础条件平台-国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>)^[22]。西南地区 8 个典型岩溶流域的边界数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)^[23]。本论文的研究时段为 2002—2021 年,为了确保数据一致性,研究所使用的气象、水文、植被遥感年际变化数据都为此期间各流域边界内部的栅格均值。

1.2.2 气候与植被

本研究中地区长时间尺度的平均气温($T, ^\circ\text{C}$)和年降雨(P, mm)栅格数据源自中国科学院西北生态环境资源研究院时空三极环境大数据平台(<http://poles.tpdc.ac.cn>)提供的中国 1km 分辨率逐月降水量与平均气温数据集^[24]。此外,中国地区太阳净辐射(Radiation, W/m^2)数据来源于国家生态数据中心资源共享服务平台(<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>)提供的 ERA5 数据集,分辨率为 $0.05^\circ\times 0.05^\circ$ 。地表归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)被用于表示植被的生长与活力,即“绿化程度”的代表。本研究中,NDVI 数据源自美国海洋及大气管理局(NOAA)提供的 MOD13Q1.006 数据集(<https://www.ncei.noaa.gov/>),空间分辨率为 $0.05^\circ\times 0.05^\circ$ 。森林土地利用类型面积占比数据来源于国家生态数据中心资源共享服务平台([nesdc.org.cn](http://www.nesdc.org.cn))提供的中国 1980—2021 年土地利用覆盖和变化数据集。该数据融合森林资源清查数据、20 种遥感土地利用产品以及 CLCD 土地利用覆盖数据集生成,空间分辨率为 10km^[25]。

1.2.3 水文与水资源

本研究中地表蒸散发(ET, mm)和土壤湿度($SM, \text{m}^3/\text{m}^3$)数据采用 GLEAM(Global Land Evaporation Amsterdam Model)提供的逐月实际蒸散发与根部土壤湿度数据集(<https://www.gleam.eu/>),空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ 。该模型提供蒸散发的不同组成部分,包括蒸腾、裸土蒸发、截留损失、开放水域蒸发和升华。此外,还提供土壤湿度(表层和根部)、潜在蒸散发和蒸发胁迫条件。植被根部土壤湿度主要采用多层水平衡方法并根据不同覆被类型进行计算,高植被类型考虑 0—10cm、10—100cm 和 100—250cm 三个模型层;低植被类型考虑 0—10cm、10—100cm 两个模型层;裸地类型考虑 0—10cm 的一个模型层^[26]。该模型中的实际蒸散发的计算原理为根据表面净辐射、近地表气温、风速、遥感叶面积指数和蒸汽压差,通过 Penman 方程计算出潜在蒸散发,并使用乘法蒸发应力因子将裸土、高冠层和短冠层的土地部分潜在蒸散发转化为实际蒸散发,乘法蒸发应力因子源自基于全局涡度相关和 SAPFLOW 数据训练的深度神经网络。为验证不同遥感反演蒸散发在中国地区的真实性,Shi 等将六种全球遥感蒸散发产品(AVHRR、GLASS、GLEAM、IDAHO、MODIS 和

PML-V2) 在中国大陆 2001—2018 年的表现进行对比,以通量站点的 ET 实测值和流域空间尺度上的水平衡模型估算的 ET 作为站点和流域空间尺度上的参考值,结果表明 GLEAM-ET 与通量站点实测值的相关系数(R^2) 为 0.571,相对偏差($Rbias$) 为 10.63%^[27]。Zuo 等对比包括 GLEAM 在内的六种蒸散发产品在中国大陆 2005—2020 年的表现,同样以通量站点和流域水平衡估算 ET 作为参考,结果表明 GLEAM-ET 展示了最好的相关系数($r=0.85$)和最低的均方根偏差($RMSD=17.7$),并在此基础上用三顶帽方法量化在流域尺度上的不确定性,结果表明 GLEAM 蒸散发产品的不确定性较低(7.71mm/month)^[28]。这些研究都表明 GLEAM 蒸散发数据在中国应用较为准确可靠,但也表明其仍然存在一定的不确定性。前人研究发现在 Penman 方程计算蒸散发时,作物表面辐射是重要的输入数据之一,为提高精度需要进行地区辐射矫正。而全球尺度模型缺少精细的地区实测数据进行净辐射矫正,一般通常用估算值代替,从而造成反演的蒸散发有一定偏差^[29—30],这可能是 GLEAM 蒸散发数据不确定性的主要原因。

为了进一步验证 GLEAM 数据在地区水资源趋势评估中的有效性,本研究同样获取了 2003—2021 年期间空间研究中心(CSR)最新发布的 CSR GRACE/GRACE-FO RL06.2 Mascon 陆地水储量异常数据进行对比(https://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html)。该数据集由重力恢复与气候试验卫星(GRACE)及其后续卫星(GRACE-FO)监测,为地球重力变化提供了详细的测量数据。由于在陆地上,重力变化主要由陆地水储量的变化驱动,包括地下水、土壤湿度、地表水和冠层水,故 GRACE 数据集被广泛应用于水文学研究。研究区内部各流域的年径流深度(RF, mm)数据利用中国水利部信息中心提供的中华人民共和国水文年鉴(<http://xxzx.mwr.gov.cn/xxgk/gbjb/zghlmsgb/>)中流域出口水文站实测年径流量除各流域面积获得。由于郁江流域出口处未设立水文站,且郁江与红水河、柳江一同汇入下游河流,故而郁江流域径流量通过下游汇水口水文站(大湟江口站)减红水河、柳江出口水文站(分别为迁江站和柳州站)的实测径流值反算得出。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势变化与归因分析

基于最小二乘法的一元线性回归方法是常用的线性趋势分析法,可以逐像元计算时序范围内的空间分异特性来反映植被的整体空间变化规律,被广泛用于长时间序列水文、气象数据变化趋势分析,表示单位时间内的变化幅度,本论文采用该方法确定研究区水文参数、气候、植被时间序列变化趋势^[31]。

另外,本研究的重点之一是以流域内径流、蒸散发和土壤湿度分别作为响应过程,研究不同水文参数变化的环境驱动因素及贡献占比,具体的方法流程为先利用偏相关分析确定不同环境驱动因子对不同水文参数的影响特征,随后应用广义线性混合效应模型方法(Generalized linear mixed model, GLMM)定量分析不同环境因子对水文参数变化的贡献率。偏相关和广义线性混合效应模型统计分析在 R 3.6.0 环境中分别采用“ppcor”和“glmm.hp”程序包中进行,其中偏相关分析具体原理如下:

当有 $k(k>2)$ 个自变量存在时 $x_1, x_2 \cdots x_k$, 任意两个变量的 $g(g \leq k-2)$ 阶样本偏相关系数计算公式如下^[32]:

$$r_{ij \cdot l_1 l_2 \cdots l_g} = \frac{r_{ij \cdot l_1 l_2 \cdots l_{g-1}} - r_{il_g \cdot l_1 l_2 \cdots l_{g-1}} \times r_{jl_g \cdot l_1 l_2 \cdots l_{g-1}}}{\sqrt{(1 - r_{il_g \cdot l_1 l_2 \cdots l_{g-1}}^2)(1 - r_{jl_g \cdot l_1 l_2 \cdots l_{g-1}}^2)}} \quad (1)$$

式中右侧均为 $g-1$ 阶的偏相关系数,其中 $l_1 l_2 \cdots l_g$ 为自然数从 1 到 k 、除去 i 和 j 的不同组合。此外,广义线性混合效应模型是基于适用于多元分析的“平均共享方差”的算法,根据涉及到的预测因子数量将共享方差分解为相等的分量,则任何单个预测因子的相对重要性可以简单地估计为其对总模型 R^2 的独特贡献加上与其他预测因子的平均共享贡献,即任何预测因子 i 的个体贡献(I_{Xi})可以计算为^[33]:

$$I_{Xi} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^c \frac{R_{SXi,j,k}^2}{k} \quad (2)$$

式中, p 表示预测因子的个数, $R_{SXi,j,k}^2$ 是 X_i 与其他 k 个预测因子与其他共享的第 j 个分数共享的半偏 R^2 (单个

预测因子唯一解释的方差比例), c 是 X_i 与其他 k 个预测因子共享的组合个数, 其中, $c = (\frac{k-1}{p-1})$ 。

近期, 广义线性混合效应模型已被广泛用于水文以及生态学研究。例如, Ma 等利用分层划分方法确定气候(净太阳辐射、年均温和年降雨)和植被因子对蒸散发空间变化的直接贡献, 结果表明植被对蒸散的影响占比(34%)大于各气候因子(26%、17%和 31%)^[34]; Luo 等利用线性混合效应模型探究径流特征的影响因素发现自然因素对径流特征的贡献率达到 70%以上, 而地质因素对径流特征的贡献率在 27%—56%之间^[35]。

1.3.2 可利用水资源分析

为深入揭示植被恢复下的水资源变化特征, 本文引入径流系数(Runoff Coefficient, RC)和陆地水储量净变化(the net change in terrestrial water storage, ΔTWS)指标评价西南生态工程实施期间的生态系统可利用水资源情况。 RC 为径流和降雨的比值^[36], 是量化下垫面潜在径流量的重要过程, 也是代表流域产水率的主要定量指标, 其计算公式为:

$$RC = \frac{RF}{P} \quad (3)$$

陆地水储量净变化的估算主要基于水量平衡方程, 即根据不同水文参数在流域尺度上计算流域剩余储水量净变化^[37]:

$$\Delta TWS = P - RF - ET \quad (4)$$

此处, ΔTWS (mm) 为陆地水储量净变化, P (mm) 为区域年降雨量, RF (mm) 为年径流量深度, ET (mm) 为年蒸散发量。由于本论文选定的子流域上下游均在西南岩溶生态工程覆盖区内, 且各流域在水文上不相连, 因此流域的降雨、蒸散发皆可以使用矢量边界内的网格均值, 而径流深度则可使用流域出口处水文站实测年径流量除以流域面积获得。此外, 本研究也将使用 GRACE/GRACE-FO 陆地水储量异常数据与上述水量平衡方程计算所得的陆地水储存净变化进行对比, 探讨两个数据趋势的相似性, 以验证使用 GLEAM 蒸散发计算陆地水储量净变化数据的真实性。由于重力恢复与气候试验卫星 (GRACE) 及其后续卫星 (GRACE-FO) 部分监测存在间断期, 采用 Scikit-learn 迭代插补器 (iterativeimputer) 方法分别将缺失的 GRACE 以及 GRACE-FO 数据插值补全, 具体采用 ExtraTreesRegressor 作为估计器进行插补, ExtraTreesRegressor 是基于 Extra Trees 算法 (随机森林算法的变种) 的回归模型。

2 结果

2.1 西南岩溶生态工程覆盖流域气候与植被变化特征

图 2 辐射、气温、降雨展示了 2002—2021 年岩溶生态工程实施期间, 8 个典型岩溶流域气候的长期以及总体变化趋势。结果表明, 20 年来研究区年降雨量 (+6.38 mm/a)、气温稳步升高 (+0.02 °C/a), 辐射 ($-5.46 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 呈下降趋势。在不同地貌控制的子流域中, 乌江的年降雨量增长速率为 +11.75 mm/a, 上升趋势最为显著, 而澧水的年降雨量变化表现出微弱下降趋势。柳江的升温趋势最高 (0.03 °C/a), 资水最低 (0.015 °C/a)。同期太阳辐射在 8 个子流域中普遍降低, 澧水的辐射降幅最大 ($-6.11 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 红水河降幅最小 ($-2.77 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。研究区 2002—2021 年 NDVI 和森林面积土地利用类型变化如图 2 所示, 研究区整体及 8 个岩溶子流域的 NDVI 和林地面积占比在西南生态工程实施的近 20 年间呈同步增加趋势。20 年来 NDVI 的整体增幅达到了 +15.89%, 绿化趋势非常显著。其中乌江 NDVI 增幅最为明显, 达到了 +18.84%。地区整体林地面积占比增加了近 38.04%。乌江的林地增加趋势最为显著, 达到了近 +126.43%。本研究中 NDVI 和林地面积占比变化与前人发现的西南地区 NDVI 与造林趋势相似^[18, 36], 此外本研究选取的目标流域 NDVI 和林地面积占比变化呈显著的正相关 ($R=0.85, P<0.01$), 这也与前人发现生态工程如植树造林是西南地区呈现绿化趋势的关键性因素的观点一致^[1, 38]。

2.2 西南岩溶生态工程覆盖流域水文与水资源变化特征

对研究区域不同水文过程参数趋势 (图 2 径流、蒸散发、土壤湿度) 进行分析, 结果表明 20 年来研究区整

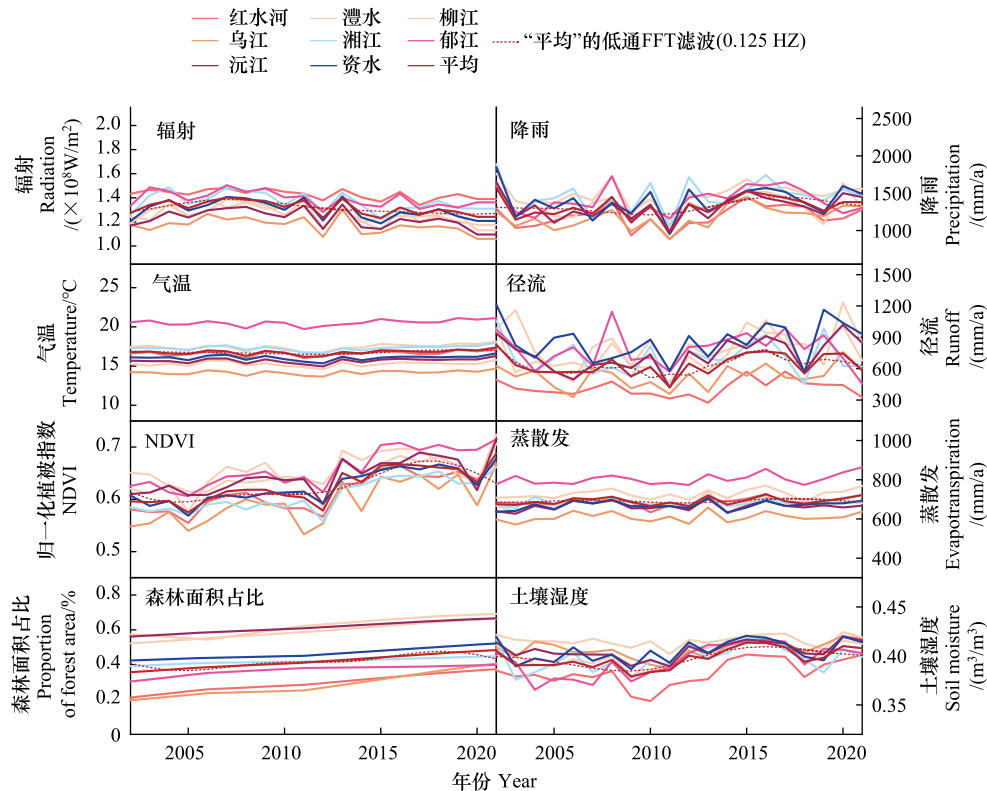


图2 2002—2021年西南岩溶生态工程覆盖流域(全区域以及8个子流域)气候、植被以及水文参数变化特征,包括辐射、气温、NDVI、林地面积占比、降雨、径流、蒸散发以及土壤湿度

Fig.2 Variations of meteorological parameters, vegetation index and hydrological variables in the karst catchments which are covered by ecological restoration projects (whole region and 8 karst sub-catchments) in Southwest China from 2002 to 2021, including radiation, air temperature, NDVI, forest fraction, precipitation, runoff, evapotranspiration, and soil moisture

NDVI: 归一化植被指数

体(8个子流域区域内平均)径流深度(+3.47mm/a)、蒸散发(+1.18mm/a)和土壤湿度(+4.82%)变化呈增加趋势,但不同水文参数变化趋势在不同时段表现出一定的差异性(表2)。研究区整体年径流量和土壤湿度在2002—2011年呈下降趋势,而在2011年之后表现出上升趋势,蒸散发变化过程在研究期间呈持续上升趋势。此外,水文参数的变化趋势在8个子流域之间及各流域不同时期也表现出一定的差异性,大部分的子流域20年总体的土壤湿度、蒸散发和年径流量呈上升趋势。年径流量除在湘江和郁江呈现出微弱的降低趋势,其余流域均表现为上升趋势,其中在沅江上升最显著,增长速率为+9.33mm/a。此外,郁江流域在2011年前后两个时期都呈下降趋势,其他流域在2002—2011年皆呈上升趋势,2011—2020年呈下降趋势,这与研究区整体变化一致。所有子流域年蒸散发和土壤湿度变化在全时期皆呈上升趋势,郁江蒸散发上升趋势最显著,增长速率达+2.1mm/a,沅江上升趋势最微弱。柳江、郁江和资水土壤湿度上升趋势最为显著,澧水流域上升最微弱。同时,各流域不同时期(2011年前后)年蒸散发和土壤湿度变化趋势也有一定的差异。大部分流域全时期与研究区整体一致,土壤湿度2002—2011年表现为降低趋势,2011—2020年呈增长趋势,仅湘江流域的土壤湿度在2011年前后都呈不同程度的降低趋势。蒸散发除红水河流域在2011年前后分别呈下降和上升趋势外,其余流域在两个时期都呈上升趋势,与整体保持一致。

同时,本研究的结果还表明研究区RC和 Δ TWS在2002—2021年间也呈上升趋势(图3和图4),RC整体增加了1.56%, Δ TWS增加速率为+1.73mm/a。而 Δ TWS在研究期间不同时段表现出一定的差异性,即2011年之前表现出一定的降低趋势,而2011年之后呈上升趋势。RC的变化趋势与 Δ TWS类似,但区域整体的变

化幅度远小于 ΔTWS 。此外,为验证 GLEAM 模型 ET 结果的真实性与可靠性,本研究将基于水量平衡方程计算所得的 ΔTWS 与同期 GRACE 陆地水储量异常数据进行了对比,结果如图 4 所示。基于水量平衡方程计算所得的 ΔTWS 与同期 GRACE 陆地水储量异常数据呈现出同步的增加趋势。由于 GRACE 数据集在 2017 年前后分别由重力恢复与气候试验卫星 (GRACE) 及其后续卫星 (GRACE-FO) 监测所得,以 2017 年为界线划分 2003—2021 年时间段,则 2003—2017 年基于水量平衡方程计算所得的 ΔTWS 与同期 GRACE 陆地水储量异常增长速率分别为 +5.77mm/a 和 +6.61mm/a;2018—2021 年 ΔTWS 与同期 GRACE 陆地水储量异常增长速率分别为 -12.15mm/a 和 -12.58mm/a,这表明基于径流深度数据和 GLEAM 的蒸散发数据集反算的陆地水储量与重力卫星观测的陆地水储量具有高度相似性,这结果也表明通过研究区域的水平衡收支(降雨-蒸散发-径流深)来示踪研究区水资源变化是有效的。

表 2 西南岩溶生态工程覆盖流域植被以及水文参数在不同时期的线性变化趋势对比

Table 2 Comparison of the trends of vegetation and hydrological parameters in different periods in the karst catchments which are covered by ecological restoration projects in Southwest China

流域 Catchment	时期 Period	归一化 植被指数 NDVI/%	森林面积占比 Proportion of forest area/%	降雨 Precipitation/ (mm/a)	径流 Runoff/ (mm/a)	蒸散发 Evaporation/ (mm/a)	土壤湿度 Soil moisture/%
全区域 The whole region	2002—2011	+4.21	+17.23	-23.96	-21.95	+0.89	-4.19
	2011—2021	+11.85	+19.85	+18.27	+13.33	+2.42	+3.17
	2002—2021	+15.89	+38.04	+6.38	+3.47	+1.18	+4.82
红水河	2002—2011	+3.36	+37.85	-15.94	-10.27	-1.98	-6.13
	2011—2021	+13.70	+36.21	+20.50	+8.92	+3.32	+6.63
	2002—2021	+18.08	+79.08	+7.49	+2.15	+1.21	+6.39
澧水	2002—2011	+5.17	+14.10	-30.93	-30.00	+2.64	-3.20
	2011—2021	+4.87	+14.76	+13.14	+25.33	+0.76	+2.23
	2002—2021	+11.43	+29.67	-1.29	+4.92	+1.19	+0.70
柳江	2002—2011	+2.94	+10.69	-28.53	-23.07	+1.42	-4.45
	2011—2021	+7.01	+12.62	+20.28	+22.17	+2.65	+1.66
	2002—2021	+9.96	+31.22	+5.15	+8.72	+1.44	+5.00
乌江	2002—2011	+4.44	+30.90	-15.73	-18.01	+2.12	-5.01
	2011—2021	+16.65	+72.75	+27.35	+19.83	+1.34	+5.97
	2002—2021	+18.84	+126.43	+11.75	+5.08	+0.94	+3.01
湘江	2002—2011	+2.83	+7.15	-33.25	-33.20	+1.12	-2.21
	2011—2021	+11.82	+8.30	+15.12	+6.98	+2.71	-1.09
	2002—2021	+15.74	+14.02	+4.10	-1.19	+0.90	+3.53
郁江	2002—2011	+4.73	+28.23	-16.40	-15.97	+0.18	-1.87
	2011—2021	+13.08	+5.00	-2.53	-7.65	+4.81	+0.91
	2002—2021	+17.60	+26.67	+4.72	-1.25	+2.14	+9.17
沅江	2002—2011	+6.23	+9.40	-32.61	-31.33	+3.18	-5.05
	2011—2021	+9.12	+10.66	+26.26	+28.29	-0.08	+3.64
	2002—2021	+13.56	+20.01	+6.34	+9.33	+0.66	+2.95
资水	2002—2011	+4.42	+7.01	-39.46	-35.72	+3.02	-2.57
	2011—2021	+9.21	+17.69	+24.19	+27.64	+2.29	+1.69
	2002—2021	+15.42	+24.97	+3.91	+4.98	+1.23	+3.78

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

2.3 西南岩溶生态工程覆盖区内水文变化归因分析

为揭示 20 年西南岩溶地区气候影响因素与水文过程变化的相互关系,本研究首先运用偏相关分析方法对中国西南岩溶生态工程实施期间的不同水文参数(径流、蒸散发、土壤湿度)长期变化的控制因子进行定性分析。本文选取降雨、温度、太阳辐射和 NDVI 作为影响上述水文参数变化的驱动因子,并且在分析模型中也加入了不同水文参数以探讨其相互之间的影响,结果如图 5 所示。结果表明,研究区径流量的变化主要受降

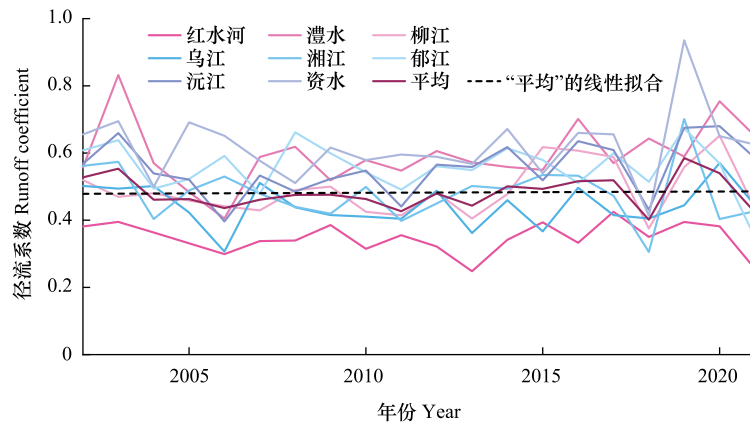


图3 2002—2021年西南岩溶生态工程覆盖流域入渗系数变化趋势

Fig.3 The long-term trend of runoff coefficient in the karst catchments which are covered by ecological restoration projects in Southwest China from 2002 to 2021

雨控制,蒸散发和土壤湿度变化主要受辐射控制。因此,西南岩溶生态工程实施期间,流域水文过程变化更大程度受控于气候过程,尤其降雨和辐射是径流、蒸散发以及土壤湿度长期变化最重要的影响因素。

此外,在偏相关定性分析相关系数的基础上,继续采用广义线性混合效应模型进一步定量分析环境因子对不同水文过程变化的贡献占比(图6)。结果显示影响径流变化的贡献因素主要为降雨、土壤湿度和辐射,贡献率分别为43.4%、34.1%、15.6%。影响蒸散发变化的主要贡献因素为辐射、土壤湿度和NDVI,贡献率分别为34.0%、24.9%、23.5%;影响土壤湿度的主要贡献因素为辐射、径流和降雨,贡献率分别为29.0%、23%、22.8%。在排除不同水文过程相互间的影响后可以发现气候变化,如降雨、辐射是控制研究区水文过程的主要影响因素,而NDVI变化对西南岩溶流域水文过程的影响主要体现在增强了蒸散发,但总体而言,NDVI变化对水文参数整体的影响要小于气候变化的贡献。

利用广义线性混合效应模型对研究区8个岩溶流域水文参数变化归因分析,结果表明降雨对8个岩溶流域的径流变化贡献占比在27%—65%之间,对径流的变化起主导作用。太阳辐射对澧水、乌江、湘江、资水和沅江流域的蒸散发和土壤湿度变化起主导作用,贡献占比分别在29%—54%和22%—33%之间;而郁江、柳江流域(峰林平原、峰丛洼地)与其他流域地貌类型(岩溶高原、岩溶槽谷)相比,其蒸散发和土壤湿度更大程度上受控于NDVI变化。NDVI在柳江流域对蒸散发和土壤湿度变化的贡献占比分别为28%和11%,在郁江流域对蒸散发和土壤湿度变化的贡献占比分别为28%和19%。

3 讨论

3.1 气候变化以及植被恢复对西南岩溶生态工程覆盖流域水文参数的影响

为修复脆弱的生态环境,中国西南岩溶地区自1998年来大规模开展“退耕还林”、“西南岩溶石漠化综合

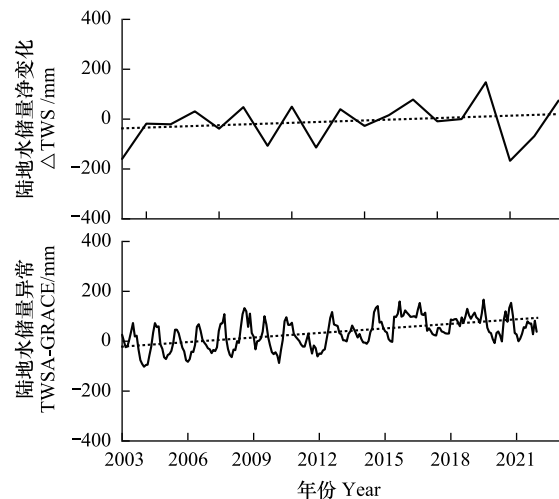


图4 2002—2021年西南岩溶生态工程覆盖流域陆地水储量变化趋势图

Fig.4 The long-term trends of the net change in terrestrial water storage (ΔTWS) and the terrestrial water storage anomaly (TWSA) in the catchments which are covered by karst ecological restoration projects in Southwest China from 2002 to 2021

ΔTWS : 陆地水储存净变化; TWSA-GRACE: 基于GRACE数据的陆地水储存异常

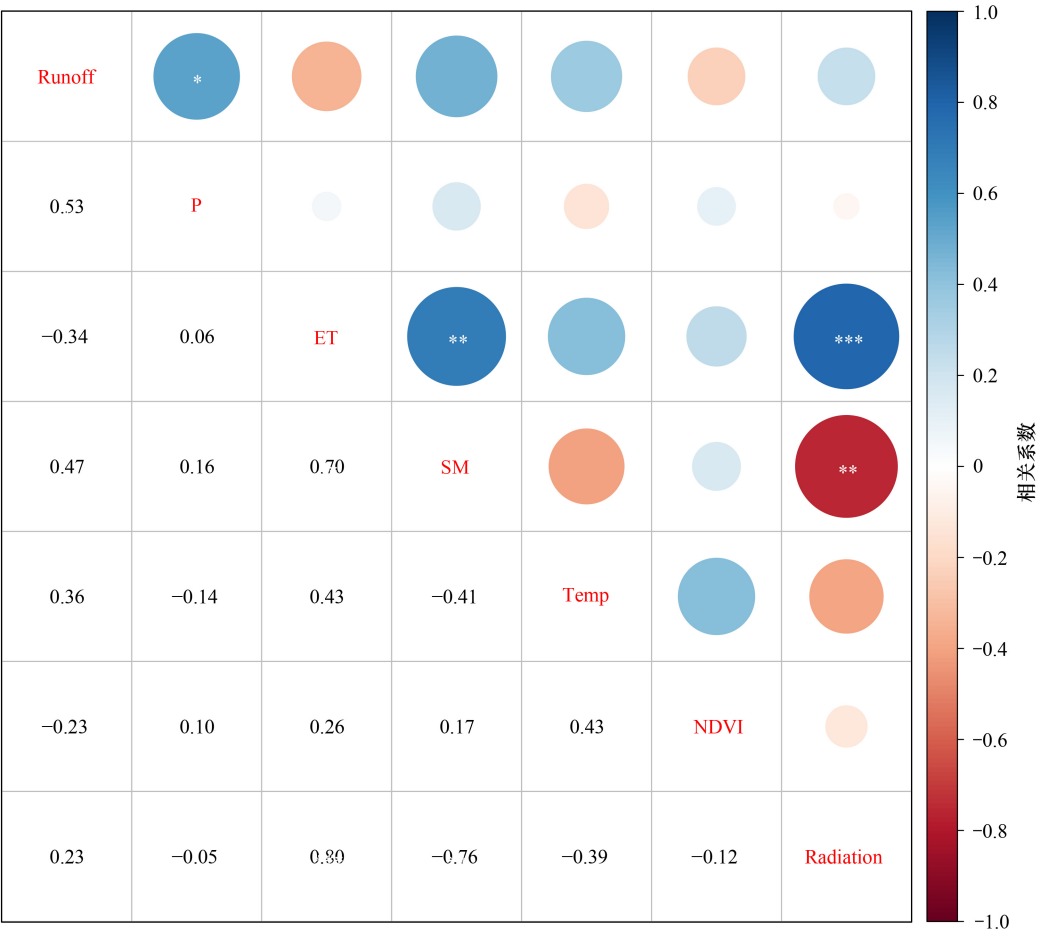


图 5 2002—2021 年西南岩溶生态工程覆盖流域的气候、植被与水文参数变化偏相关分析结果

Fig.5 Partial correlation result of climate, vegetation and hydrological parameters in the catchments which are covered by karst ecological restoration projects in Southwest China from 2002 to 2021

P: 降雨;ET: 蒸散发;SM: 土壤湿度;Temp: 气温

治理”等生态工程,森林面积占比显著提升。Chen 等的研究表明,造林工程使得中国绿化趋势增加,这种趋势在中国西南尤为明显^[39]。利用广义线性混合效应模型对研究时段内 NDVI 变化进行归因分析显示,林地面积占比对 NDVI 变化贡献高达 45.90%(表 3),说明大规模生态工程实施即植树造林对这些流域内“绿化”趋势有直接影响,这与前人研究的观点一致^[1,38]。在选取了目标流域以及全面的探讨了不同水文参数变化特征及归因分析之后,本研究结果表明在 20 年较为集中开展生态工程的过程中,NDVI 对研究区径流、蒸散发的影响占比分别为 2%和 23%,说明生态工程驱动下的植被恢复仅对流域蒸散发过程起较强的促进作用。

表 3 2002—2021 年西南岩溶生态工程覆盖流域 NDVI、ΔTWS 变化驱动归因分析结果

Table 3 Contributions of the environmental factors to the variations of NDVI and ΔTWS in the karst catchments which are covered by ecological restoration projects in Southwest China from 2002 to 2021

	降雨 Precipitation/%	蒸散发 Evaporation/%	径流 Runoff/ (mm/a)	土壤湿度 Soil moisture/%	林地面积占比 Proportion of forest area/%	太阳辐射 Radiation/%	气温 Temperature/%
归一化植被指数 NDVI	3.90%	14.07%	1.33%	10.38%	45.90%	5.92%	18.43%
陆地水储存净变化 ΔTWS	64.97%	0.92%	24.56%	5.42%	0.42%	3.22%	0.49%

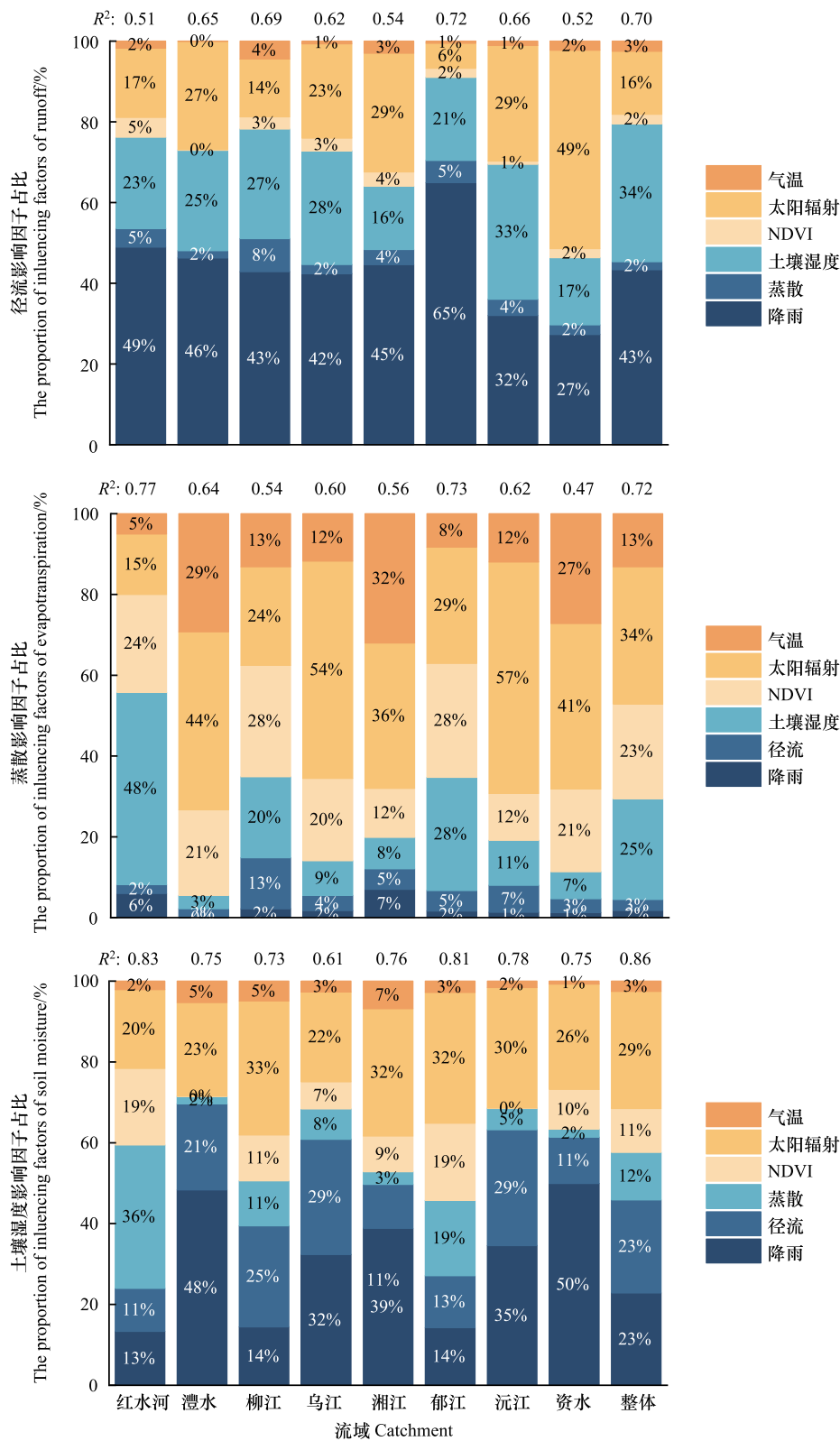


图 6 2002—2021 年西南岩溶生态工程覆盖流域不同水文参数变化的驱动因子归因分析结果

Fig.6 Contributions of the environmental factors to the annual variations in different hydrological variables in the karst catchments which are covered by ecological restoration projects in Southwest China from 2002 to 2021

前人研究表明西南岩溶地区地处湿润气候区,地下管道广泛发育,地表土壤薄且异质性强,因此不同的土壤厚度和水力传导率会使降水在局部地区产生快速下渗^[40],这导致了降雨后地表水漏失快速,因此水文过程对环境变化的响应更为复杂。本文选取了西南地区 2002—2021 年的气温、降水及太阳辐射作为气候因子,与水文过程进行偏相关和广义线性混合效应模型归因分析,讨论气候因子对水文过程的影响。归因分析结果表明,西南岩溶生态工程覆盖流域内 NDVI 对径流、蒸散和土壤湿度的影响贡献占比分别为 2%、23% 和 11%,降雨对径流、蒸散和土壤湿度的影响贡献占比分别为 43%、2% 和 23%,气温对径流、蒸散和土壤湿度的影响贡献分别为 3%、13% 和 3%,太阳辐射对径流、蒸散和土壤湿度的影响贡献分别为 16%、34% 和 29%。对比 NDVI 对水文过程的影响贡献可说明,生态工程覆盖的 8 个岩溶流域的主要水文过程受到了气候因子更为突出的控制。因此,蒸散发虽受到植被恢复影响有一定的增加,但是径流与土壤湿度并没有随之降低,反而呈现了增强的趋势。前人的案例研究也认为在整体降雨未显著减弱的情况下,岩溶地区水文变化或主要受控于气候主导下的能量变化而不是植被恢复^[36,18],本研究在大尺度的评估也证实了在 2002—2021 年间这一现象或广泛地存在于整个西南岩溶流域中。

此外,西南岩溶地区受亚热带季风的强烈影响,前人发现 1982—2011 年间西南岩溶地区由于夏季季风的减弱,降雨偏少,这样的条件下土壤湿度由于植被恢复显著降低^[11],可见在季风带来的水汽偏少的时期,植被恢复增强的蒸散发无疑会导致地区水资源的显著消耗。本研究也发现在 2011 年前地区的降雨呈现下降趋势,同期土壤湿度也呈现减弱趋势。但是 2011—2021 年间气候发生了较为显著的转变,西南地区季风显著增强^[41],因此研究区降雨的升高趋势非常显著。图 7 为降雨增强与植被恢复条件下西南岩溶地区水文与水资源变化特征概念图。虽然在 2011 年后的 NDVI 增幅大于 2011 年前(表 2),但是径流和土壤湿度在降雨增强的条件下呈现出升高的趋势,这表明在这一时期湿润的条件下很大程度补偿蒸散发增加造成的水分损失,当然降雨在增强的同时也部分减弱了太阳辐射,造成了蒸散发的增幅小于降雨的增多(图 7)。上述的现象在近

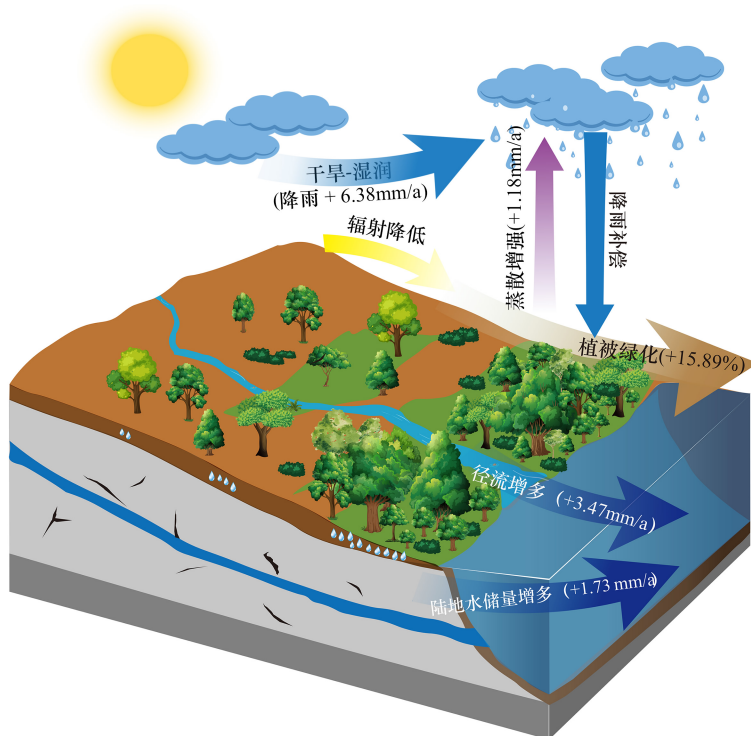


图 7 降雨增强与植被恢复条件下西南岩溶地区水文与水资源变化特征概念图

Fig.7 The conceptual graph of the hydrological and water resources changes in the karst areas of Southwest China under the enhanced precipitation and vegetation restoration

期贵州陈旗流域的案例研究中也得到了验证,该研究表明湿润的西南岩溶地区在正常气候条件下(未经历较强烈干旱)蒸散发远小于降雨量,可利用水资源主要受能量控制而未受到生态工程的影响^[18]。此外,一些研究也认为植被恢复增强的蒸散发返回大气后,进入大气环流增加水分供应,再次增强降雨^[42],这部分的影响需要在未来的研究中进行更为深入的探索。总之,20 年来的降雨增多是西南岩溶流域的主要水文参数未受到植被恢复显著影响的另一个关键原因,即植被恢复对水量的负面影响被降雨增强所抵消。

3.2 气候变化以及植被恢复对西南岩溶生态工程覆盖流域入渗系数以及陆地水储量影响

为了进一步分析植被恢复对区域可利用水资源造成潜在影响,本研究继续利用径流系数(RC)以及基于水平衡方程的陆地水储量净变化数据(ΔTWS)两个指标进行更为深入的可利用水资源变化评估。2002—2021 年研究期间,NDVI 和林地面积占比显著提升,假定生态工程的开展会对区域地表径流可持续性造成影响,则径流系数将会随植被恢复或是林地面积的增多显著降低,但结果表明研究区的径流系数只有微弱的波动,在 20 年内变化的幅度远不如 NDVI 以及林地面积的增加幅度。此外,稳定的径流系数似乎在地区显著的气候变化下也并没有发生较大变化,这说明研究区水文过程在这个时期对气候变化以及植被恢复的响应都不显著。其原因可能与西南岩溶地区地下部分广泛发育的孔隙、裂缝和洞穴形成的非均质空间有关,降水在区域通过破碎的基岩快速垂直下渗进入地下水系统,因此使得径流系数能在地表环境剧烈变化下保持相对稳定(图 7)。此外,本研究发现研究区不仅径流未受到植被恢复的显著影响,同时由陆地水储量也在 20 年偏湿润的条件下增强。本研究中利用水量平衡方程计算所得的 2002—2021 年陆地水储量净变化(ΔTWS)分别与 GRACE/GRACE-FO 的陆地水储量异常($TWSA$)都呈上升趋势。当然,本研究也发现在 2011 年前,偏干的气候条件下两个陆地水储量都有一定降低趋势,表明植被恢复在此时期造成了陆地水储量的损失。但 2011 年降雨增强后,虽然 NDVI 的增幅更为显著,但不同的陆地水储量数据都表明水量在此期间显著升高。利用 GLMM 模型对 2002—2021 年期间整体陆地水储存变化进行归因分析,结果显示影响陆地水储存变化最显著的潜在因子仍为年降雨量和径流,贡献占比分别为 64.97% 和 24.56%,而植被恢复的影响较小(表 3)。总之, RC 与不同陆地水储量数据的变化进一步说明了研究区水资源在西南岩溶生态工程实施期间由于降雨的增强而升高。

3.3 气候变化与植被恢复下不同岩溶地貌类型的水资源差异性变化

虽然此前已有研究对西南岩溶不同地区的水文参数以及水资源变化驱动因素进行了分析,但这些研究往往将流域划分为一个整体或以省份为界线,然而西南岩溶生态工程实施区域内存在不同岩溶地貌类型,具有不同的地质特征。降雨后的土壤水和岩石水是大部分植被水分利用的重要来源,岩溶山地地区地势陡峭,垂直管道发育,土层薄,持水能力差,降水通过地下通道快速下渗^[43],地表植被在这一条件下难以快速吸收水资源以供生长。与岩溶山地地形相比,岩溶平原地区地势低平、土层厚,降雨可长时间储存在土壤中被地表植被利用。因此在不同岩溶地貌类型对 20 年气候变化以及植被恢复的响应是否会产生一定差异是本研究关注的另一个问题。

不同流域植被及水文参数在不同时期的变化线性趋势有一定差异,如表 2 所示,这些差异可能是由于流域的区域地质背景差异导致其水文过程对环境变化的响应不同。在对不同岩溶地貌类型控制的子流域进行水文参数变化的驱动因子贡献占比进行定量分析后发现(图 6),八个流域径流变化与研究区整体一致,主要受控于降雨。同时 NDVI 普遍在各个子流域影响蒸散发,其中峰林平原、峰丛洼地(郁江、柳江流域)与其他流域地貌类型相比,其蒸散发和土壤湿度更大程度上受控于 NDVI 变化,这或可表明峰林平原和峰丛洼地的水文变化对于生态工程的响应最为明显。该岩溶地貌地势低平、坡度低、土层厚、降水丰富,使得土壤水可储存空间大且大气降水降至地面后在土层中下渗速度较慢,地表植被有更充足的时间利用水资源,因此相对其他岩溶地貌类型而言具有更适合植被生长的下垫面条件^[44],故该岩溶地貌类型的水文变化对生态工程驱动的 NDVI 升高响应最为显著。相较峰林平原和峰丛洼地,岩溶槽谷区(乌江流域)的海拔高、地形落差大、土壤薄,谷地垂直裂隙的发育或导致降雨渗漏速度更快,因此植被利用水资源情况弱于峰林平原与峰丛洼地,因此

槽谷区蒸散发和土壤湿度对植被恢复的响应较弱。本文的结果表明 20 年 NDVI 的增加或更为强烈地影响峰林平原以及峰丛洼地的蒸散发和土壤湿度,而槽谷地区的影响则相对较小。总之,上述的发现表明在未来岩溶地区持续实施生态工程应该充分考虑不同岩溶地貌类型对植被恢复的水文差异性响应。

3.4 中国西南岩溶地区生态-水文管理未来展望

生态工程在实现生态退化治理的同时又会对区域水循环带来巨大的影响,探明植被恢复是否会通过影响植物用水的可持续性而引起生态退化是中国生态工程未来持续开展面临的重要挑战^[45]。但是西南岩溶地貌特殊的地质背景与人类活动影响导致地区生态退化、水安全一直是限制地区可持续发展的难题,两者同等重要。因此进一步在此地区持续开展自然恢复以及植树造林等生态工程需要进行更为慎重的考虑,尤其是植被恢复与水资源之间的平衡关系。本研究的结果表明在过去的 20 年间(2002—2021 年),作为全球岩溶“绿化”趋势最为显著的中国西南地区,蒸散发毫无疑问在植被恢复的影响下显著增强。但是同期在偏湿润的气候下,降雨的增强以及辐射的减弱很大程度造成蒸散发的变化幅度远小于降雨。因此,西南岩溶流域的水资源(径流量、土壤水分、陆地水储量)变化在过去 20 年间主要受控于气候(降雨、辐射),呈现出升高趋势。但是,本研究的结果也同样表明在降雨减弱或干旱期(2011 年以前)植被恢复带来的水资源负面效应非常显著,必须得到应有的重视。本研究的发现对未来协调岩溶地区生态环境综合治理和水资源安全间的平衡有重要意义,同时也将为未来制定更为合理的岩溶地区人为调控策略提供支撑。

4 结论

本研究以西南岩溶生态工程边界内 8 个典型流域为对象,基于 2002—2021 年间的水文、气候、植被遥感以及重力卫星数据,开展了流域水文与水资源变化特征以及归因研究,发现西南岩溶流域过去 20 年间降雨总体增强(+6.38mm/a)、辐射下降($-5.46 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),气候呈现先干旱后湿润的趋势(以 2011 年为分割点)。由于西南岩溶生态工程的实施,地区 NDVI 和森林面积占比分别增加 15.98% 和 37.76%,植被恢复显著。20 年间区域径流量、蒸散发与土壤湿度呈升高趋势,趋势分别为+3.47mm/a、+1.18mm/a 以及+4.82%,地区的入渗系数与陆地水储量也呈升高趋势,分别为+1.56%及+1.73mm/a。利用偏相关和广义线性混合效应模型探究不同水文变化驱动因素及贡献占比后发现在 2002—2021 年间区域气候整体偏湿润的条件下,西南岩溶流域的水文以及可利用水资源主要受到降雨、辐射的突出控制,生态工程驱动的植被绿化主要导致蒸散发有一定程度的增加。不同岩溶地貌类型中,峰林平原和峰丛洼地地势低平、土层厚,降雨下渗速度慢、土壤储水空间大,地表植被得以充分利用水资源,20 年 NDVI 的增加或更为强烈地影响峰林平原以及峰丛洼地的蒸散发和土壤湿度,而槽谷地区的影响则相对较小。本研究指出西南岩溶地区近年来季风的增强导致降雨增多与辐射降低,减弱了蒸散发的增幅以及补偿了蒸散发带来的水量损失,使得西南岩溶生态工程覆盖流域水文以及可利用水资源并未明显受到植被恢复的显著影响,这些发现对该地区未来制定合理的水资源管理策略具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Zhang X M, Yue Y M, Tong X W, Wang K L, Qi X K, Qi X K, Deng C X, Brandt M. Eco-engineering controls vegetation trends in southwest China karst. *Science of The Total Environment*, 2021, 770: 145160.
- [2] Hoek van Dijke A J, Herold M, Mallick K, Benedict I, Machwitz M, Schlerf M, Pranindita A, Theeuwes J J E, Bastin J F, Teuling A J. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 363-368.
- [3] 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 龙健. 岩溶生态系统脆弱性剖析. *热带地理*, 2006, 26(4): 303-307.
- [4] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, Luo W, Wang K L. Why do karst catchments exhibit higher sensitivity to climate change? Evidence from a modified Budyko model. *Advances in Water Resources*, 2018, 122: 238-250.
- [5] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 何丙辉, 谢建平, 罗维均, 白晓水, 肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发. *生态学报*, 2016, 36(22): 7092-7097.
- [6] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132:

1-12.

- [7] Xi Y, Peng S S, Liu G, Ducharme A, Ciais P, Prigent C, Li X Y, Tang X T. Trade-off between tree planting and wetland conservation in China. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1967.
- [8] Hua F Y, Bruijnzeel L A, Meli P, Martin P A, Zhang J, Nakagawa S, Miao X R, Wang W Y, McEvoy C, Peña-Arancibia J L, Brancalion P H S, Smith P, Edwards D P, Balmford A. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science*, 2022, 376(6595): 839-844.
- [9] Gong S H, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Wu L H, Chen F, Qian Q H, Xiao J Y, Zeng C. Response of the weathering carbon sink in terrestrial rocks to climate variables and ecological restoration in China. *Science of The Total Environment*, 2021, 750: 141525.
- [10] Jiang C, Guo H W, Wei Y P, Yang Z Y, Wang X C, Wen M L, Yang L, Zhao L L, Zhang H Y, Zhou P. Ecological restoration is not sufficient for reconciling the trade-off between soil retention and water yield: A contrasting study from catchment governance perspective. *Science of The Total Environment*, 2021, 754: 142139.
- [11] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [12] Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, Tong X W, Tian F, Jepsen M R, Xiao X M, Verger A, Mialon A, Al-Yaari A, Wang K L, Fensholt R. Satellite-Observed Major Greening and Biomass Increase in South China Karst During Recent Decade. *Earth's Future*, 2018, 6(7): 1017-1028.
- [13] Douville H, John A. Fast adjustment versus slow SST-mediated response of daily precipitation statistics to abrupt 4xCO₂. *Climate Dynamics*, 2021, 56(3): 1083-1104.
- [14] Yan J H, Wang W T, Zhou C Y, Li K, Wang S J. Responses of water yield and dissolved inorganic carbon export to forest recovery in the Houzhai karst basin, southwest China. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2082-2090.
- [15] Zhao M, A G, Zhang J E, Velicogna I, Liang C Z, Li Z Y. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 56-62.
- [16] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Rudbeck Jepsen M, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [17] Wu Z, Behzad H M, He Q F, Wu C, Bai Y, Jiang Y J. Seasonal transpiration dynamics of evergreen *Ligustrum lucidum* linked with water source and water-use strategy in a limestone karst area, southwest China. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126199.
- [18] Yi R Z, Xu X L, Zhang Y H, Ye Z D, Wang K L. Grain for Green Project May Not Threaten Ecosystem Sustainability by Degrading Water Availability in Humid Karst Landscapes. *Water Resources Research*, 2023, 59(3): e2022WR032415.
- [19] Rusjan S, Sapač K, Petrič M, Lojen S, Bezak N. Identifying the hydrological behavior of a complex karst system using stable isotopes. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123956.
- [20] 陈喜, 张志才. 喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 356-364.
- [21] Liu J C, Shen L C, Wang Z X, Duan S H, Wu W, Peng X Y, Wu C, Jiang Y J. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 485-493.
- [22] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [23] 张国平, 赵琳娜, 许凤雯, 徐新良. 基于流域结构分析的中国流域划分方案. *北京师范大学学报, 自然科学版*, 2010, 46(3): 417-423.
- [24] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [25] Xia X S, Xia J Z, Chen X Z, Fan L, Liu S G, Qin Y W, Qin Y W, Qin Z C, Xiao X M, Xu W F, Yue C, Yue X, Yuan W P. Reconstructing Long-Term Forest Cover in China by Fusing National Forest Inventory and 20 Land Use and Land Cover Data Sets. *Journal Of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, 128(4): e2022JG007101.
- [26] Martens B, Miralles D G, Lievens H, Van der Schalie R, De Jeu R A M, Fernández-Prieto D, Beck H E, Dorigo W A, Verhoest N E C. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925.
- [27] Shi X R, She D X, Xia J, Liu R L, Wang T Y. The intercomparison of six 0.1°×0.1° spatial resolution evapotranspiration products across mainland China. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 130949.
- [28] Zuo L F, Zou L, Xia J, Zhang L P, Cao H, She D X. Multi-scale analysis of six evapotranspiration products across China: Accuracy, uncertainty and spatiotemporal pattern. *Journal of Hydrology*, 2025, 650: 132516.
- [29] Xia Y L, Hobbins M T, Mu Q Z, Ek M B. Evaluation of NLDAS-2 evapotranspiration against tower flux site observations. *Hydrological Processes*, 2015, 29(7): 1757-1771.

- [30] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, Yang Q Y. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 77-84.
- [31] 罗爽, 刘会玉, 龚海波. 1982—2018 年中国植被覆盖变化非线性趋势及其格局分析. *生态学报*, 2022, 42(20): 8331-8342.
- [32] van Aert R C M, Goos C. A critical reflection on computing the sampling variance of the partial correlation coefficient. *Research Synthesis Methods*, 2023, 14(3): 520-525.
- [33] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, Peres-Neto P R. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(4): 782-788.
- [34] Ma L X, Yu G R, Chen Z, Yang M, Hao T X, Zhu X J, Zhang W K, Lin Q H, Liu Z G, Han L, Dou X J, Sun M Y, Lin Y, Luo W X, Zhou W N. Cascade effects of climate and vegetation influencing the spatial variation of evapotranspiration in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 344: 109826.
- [35] Luo Y Z, Zhou Q W, Peng D W, Yan W H, Zhao M T. Key influence of hydrogeological, geochemical, and geological structure factors on runoff characteristics in karst catchments. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129852.
- [36] Gao X R, Sun M, Zhao Q, Wu P T, Zhao X N, Pan W X, Wang Y B. Actual ET modelling based on the Budyko framework and the sustainability of vegetation water use in the loess plateau. *Science of The Total Environment*, 2017, 579: 1550-1559.
- [37] Pascolini-Campbell M, Reager J T, Chandanpurkar H A, Rodell M. RETRACTED ARTICLE: A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature*, 2021, 593: 543-547.
- [38] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [39] Chen Y Z, Chen L Y, Cheng Y, Ju W M, Chen H Y H, Ruan H H. Afforestation promotes the enhancement of forest LAI and NPP in China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 462: 117990.
- [40] Scanlon B R, Keese K E, Flint A L, Flint L E, Gaye C B, Edmunds W M, Simmers I. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3335-3370.
- [41] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [42] Zhang B Q, Tian L, Yang Y T, He X G. Revegetation Does Not Decrease Water Yield in the Loess Plateau of China. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): e2022GL098025.
- [43] Hartmann A, Gleeson T, Wada Y, Wagener T. Enhanced groundwater recharge rates and altered recharge sensitivity to climate variability through subsurface heterogeneity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(11): 2842-2847.
- [44] 梁任刚. 基于遥感的中国西南喀斯特地区干旱时空变化特征及影响因素分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- [45] Cao Y P, Xie Z Y, Woodgate W, Ma X L, Cleverly J, Pang Y J, Qin F, Huete A. Ecohydrological decoupling of water storage and vegetation attributed to China's large-scale ecological restoration programs. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128651.