

朱伟明, 李涛辉, 杨祥磊, 等. 澜沧江—湄公河流域水库建设对植被干旱的影响及驱动机制[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 86-100. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.007

ZHU Weiming, LI Taohui, YANG Xianglei, et al. Effect of reservoir construction on vegetation drought and its driving mechanisms in Lancang-Mekong River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 86-100. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.007

澜沧江—湄公河流域水库建设对植被干旱的影响及驱动机制

朱伟明¹, 李涛辉², 杨祥磊¹, 张文翔¹

1. 云南师范大学 地理学部 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明 650500;
2. 云南大学 云南省大湄公河次区域气象灾害与气候资源重点实验室, 云南 昆明 650091

摘要:【目的】了解水库建设后气象-水文干旱对植被干旱的驱动过程, 有助于提升流域对于植被干旱的监测和预警。【方法】以澜沧江—湄公河(LM)流域为研究区, 基于三种干旱指数[标准化降水指数(SPI)、标准化径流指数(SRI)和植被状态指数(VCI)], 分析了1982—2016年流域内气象-水文-植被干旱的演变特征, 采用Pearson相关分析法和滞后性分析探讨了水库建设前后不同干旱指数之间的关系变化和响应时间(DRT)的变化, 最后探讨气象-水文干旱对植被干旱的影响及驱动机制。【结果】结果表明, 在1982—2016年期间, 流域内气象和水文干旱呈现出近似的变化趋势, 而植被干旱表现出显著的季节性变化及缓慢的年际增长趋势(0.02~0.37/a)。水库建设后, 流域下游植被干旱与气象干旱的相关性显著减小, 流域上游植被干旱与水文干旱的相关性显著增强且呈负相关。此外, 植被干旱对气象干旱和水文干旱的响应时间变化显著。旱季期间, 植被干旱对气象干旱的响应时间平均延长1.6个月, 对水文干旱的响应时间在万象—巴色段缩短0.2个月, 其余区域平均延长3.2个月; 雨季期间, 植被干旱对水文干旱的响应时间平均延长2.6个月; 同时, 植被干旱对气象干旱的响应时间在不同区域表现出不同的变化: 在中国—清盛、清盛—万象、巴色—河口段的响应时间平均缩短2.3个月, 而在万象—巴色段延长了3.8个月。【结论】研究结果表明流域内的水库建设缓解了澜沧江—湄公河流域的植被干旱现象。本文将有助于增强对水库建设的生态效益评估, 以及提高对气象-水文-植被干旱响应过程的理解。

关键词: 澜沧江—湄公河流域; 水库建设; 气象-水文干旱; 植被干旱; 响应关系; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.007

中图分类号: TV11

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

文章编号: 1000-0860(2025)05-0086-15



收稿日期: 2024-11-18; 修回日期: 2025-01-13; 录用日期: 2025-01-14; 网络出版日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000201)

作者简介: 朱伟明(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水资源与干旱传播研究。E-mail: zhuweiming1998@163.com

通信作者: 张文翔(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境变化与地球化学研究。E-mail: wenxiangzhang@ynnu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Effect of reservoir construction on vegetation drought and its driving mechanisms in Lancang-Mekong River Basin

ZHU Weiming¹, LI Taohui², YANG Xianglei¹, ZHANG Wenxiang¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographic Process and Environmental Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Meteorological Disasters and Climate Resources in the Greater Mekong Subregion, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] Understanding the driving processes of meteorological-hydrological droughts on vegetation drought after reservoir construction helps enhance monitoring and early warning systems for vegetation drought in river basins. [Methods] Focusing on the Lancang-Mekong (LM) River Basin, the evolution characteristics of meteorological, hydrological, and vegetation droughts from 1982 to 2016 were analyzed based on three drought indices: Standardized Precipitation Index (*SPI*), Standardized Runoff Index (*SRI*), and Vegetation Condition Index (*VCI*). Pearson correlation analysis and lag analysis were used to explore the variations in relationships between different drought indices and the variations in drought response time (*DRT*) before and after reservoir construction. Finally, the effects of meteorological-hydrological droughts on vegetation drought and their driving mechanisms were investigated. [Results] The result showed that during the period from 1982 to 2016, meteorological-hydrological droughts in the basin exhibited similar trends, while vegetation drought showed significant seasonal variations and a gradual inter-annual increasing trend (0.02~0.37/a). After reservoir construction, the correlation between vegetation drought and meteorological drought decreased significantly in the downstream areas, while the correlation between vegetation drought and hydrological drought increased significantly in the upstream areas, showing a negative relationship. Additionally, significant changes were observed in the response time of vegetation drought to meteorological and hydrological droughts. During the dry season, the response time of vegetation drought to meteorological drought extended by an average of 1.6 months, while the response time to hydrological drought shortened by 0.2 months in the Vientiane-Pakse region, and extended by an average of 3.2 months in other regions. During the wet season, the response time of vegetation drought to hydrological drought extended by an average of 2.6 months. Furthermore, the response time of vegetation drought to meteorological drought varied across different regions; it decreased by 2.3 months on average in the China-Chiang Saen, Chiang Saen-Vientiane, and Pakse-Mouth regions, but increased by 3.8 months in the Vientiane-Pakse region. [Conclusion] The result indicate that reservoir construction in the basin alleviates vegetation drought in the Lancang-Mekong River Basin. The findings can enhance the ecological benefit evaluation of reservoir construction and improve the understanding of the response processes of meteorological, hydrological, and vegetation droughts.

Keywords: Lancang-Mekong River Basin; reservoir construction; meteorological-hydrological droughts; vegetation drought; response relationship; influencing factors

0 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 全球气候变暖导致极端气候事件频繁发生, 干旱事件发生的频率和强度显著增加^[1]。作为一种复杂且多方面的自然灾害现象, 干旱通过破坏区域水资源平衡, 引发供水、农业生产和生态环境等一系列问题^[2-3]。气象干旱主要与降水不足有关, 是其他类型干旱事件发生的基本条件^[4], 常见的表征指标有标准降水指数 (*SPI*)、标准降水蒸发散指数 (*SPEI*) 和综合气象干旱指数 (*MCI*) 等^[5]。水文干旱通常发生在气象干旱之后, 当降水无法补充地表和地下水资源, 并且蒸发量大和人类活动消耗大量水资源时, 便会导致地表径流和地下水位低于正常水平, 从而引发水文干旱^[6], 常用的表征指标有标

准径流指数 (*SRI*)、径流干旱指数 (*SDI*) 和标准化径流量指数 (*SSI*) 等^[7]。植被干旱通常是由于植被根系不能够充分地汲取水源, 无法满足植物正常需要引起的^[8], 常用的表征指标包括归一化差异植被指数 (*NDVI*)、植被健康指数 (*VHI*)、温度植被指数 (*TCI*) 和植被状况指数 (*VCI*) 等^[9]。在水循环过程中, 大气、地表和植物之间的水分交换紧密相连, 人类活动会影响到水循环的过程, 使得气象干旱、水文干旱和植被干旱之间的关系更加复杂。因此加强对植被干旱的监测和预警, 并采取相关措施缓解其影响, 已成为区域水资源规划的迫切需求^[10-11]。

近年来, 有些研究者通过数据与模型结合的方法, 探讨了植被对气象干旱、水文干旱、土壤水分干旱的响应^[12-13]。研究发现, 季节性因素(如不同季节

的温度、降水量和蒸散发)对不同干旱类型之间的响应过程具有显著影响,导致干旱强度和严重程度的差异^[14]。不同气候类型也会影响干旱的响应时间(*DRT*),大陆性气候类型下干旱响应时间较慢,而热带气候类型中的响应则相对迅速^[15]。不同的植被类型对干旱的响应也存在差异,针叶林和阔叶林具有较强的抗旱能力,响应时间长,而草地抗旱能力较弱,对干旱的响应时间则较短^[16]。土壤类型(如砂土、粘土、壤土)对水分的保留能力不同,也会影响植被对干旱的敏感性^[17]。HUANG等^[18]研究表明,植被对气象干旱的滞后响应在夏季较快,而在秋季较慢,这主要受到土壤缓冲效应的影响。目前,大多数研究集中在气候、植被类型、地貌和土壤对植被干旱响应的影响,而对水库建设等人类活动对植被干旱响应的潜在影响仍较少涉及。

水库修建、跨流域调水等水利工程措施会改变流域的生态水文过程^[19-20],进而影响到干旱的演化^[21]。在水库蓄水期间,下游河道的径流量减少,加重了下游地区的干旱和缺水问题,导致干旱持续时间增加^[22]。然而,当下游地区出现干旱时,水库可以通过放水来缓解这一状况,从而降低水文干旱的发生频率并缩短持续时间^[23],表明水库蓄水对干旱的影响具有双重性。此外,水库蓄水还会对小气候产生一定影响,DEGU等^[24]对美国92个大型水库建成前后周围湿度变化的研究表明,水库蓄水后流域地区的湿润程度有所增加。水库的调节和蓄水也会影响干旱的传播,它能够延缓流域地区气象干旱向水文干旱的传播时间,从而增强区域的抗旱能力。然而,随着水文站与水库的距离增加,这种影响逐渐减弱^[25]。目前,尚不清楚水库蓄水是如何影响植被对气象-水文干旱的响应以及季节性响应特征的变化。进一步研究水库蓄水对植被干旱响应的影响,将有助于优化水库调节和蓄水管理,从而增强干旱管理的有效性。

澜沧江—湄公河(LM)流域作为东南亚地区重要的跨国流域之一,承载着丰富的生态、经济和社会功能。随着气候变化和人类活动的影响,该流域的水资源管理面临着日益严峻的挑战^[26],其中包括植被干旱的加剧。尽管LM流域拥有众多水库,但是水库建设对流域内植被干旱的影响尚未得到充分关注和研究。在水库建设之前,植被干旱可能受到自然因素和人类活动的影响;而水库建设后,由于水文调控和生态改变,植被干旱的状况可能会发生显著变化。本文利用*SPI*、*SRI*和*VCI*三种干旱指数,系统分析了1982—2016年澜沧江—湄公河流域气象-水文-植被

干旱的演变特征。通过Pearson相关分析及滞后性分析,揭示了水库建设前后不同干旱指数间关系及其响应时间(*DRT*)的变化规律。最后,探讨了水库建设影响下,气象-水文干旱对植被干旱的影响及驱动机制。

1 研究数据和方法

1.1 研究区域

LM是亚洲地区重要的国际河流(8°N—34°N, 94°E—108°E),全长4 350 km,流域面积超过 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该流域位于西南季风气候区,有独特的旱雨两季,旱季(11月至次年4月)降水较少;雨季(5月至10月)降水丰富,约占全年降雨量的80%。LM流域水资源极其丰富,年径流量达到 $4.55 \times 10^{10} \text{ m}^3$,下游地区约7 000万人经济收入有65%以上依赖于湄公河流域的灌溉农业^[27]。随着沿线各国能源和农业灌溉需求的快速增长,该流域的水库建设近年来快速发展。截止至2016年年底,已有超过82个水库投入运营,总库容超过82.1 km³^[28]。基于流域的地理位置、干支流、高程以及水文站分布情况,本文将研究区划分为四个子流域:中国—清盛段、清盛—万象段、万象—巴色段和巴色—河口段。这一划分有助于揭示LM流域气象、水文以及植被变化的空间差异,从而便于定量评估流域植被对气象干旱和水文干旱的响应。在时间划分方面,本文将分析两个时期:自然期和人类影响期。自然期指的是未受水库影响的年份,而人类影响期则为水库蓄水后的时期。根据每个子流域的水库建设周期、蓄水起始年份以及库容大小,我们为各区域确定了时间节点:中国—清盛段(2008年)、清盛—万象段(2010年)、万象—巴色段(2000年)和巴色—河口段(2011年)。

1.2 数据来源

LM流域降水数据来源于英国东英格利亚大学气候研究中心(<https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit>),空间分辨率为0.5°,时间分辨率为1个月;水库数据及径流量数据来源于湄公河大坝监测平台和湄公河委员会(<https://www.stimson.org/project/mekong-dam-monitor/>、<https://www.mrcmekong.org/>),整理了澜沧江—湄公河流域泰国的清盛站,老挝的巴色站和万象站,以及柬埔寨的桔井站4个主要水文站径流量信息;NDVI数据来源于PKU GIMMS NDVI数据集(<https://essd.copernicus.org/articles/15/4181/2023/essd-15-4181-2023-assets.html>),空间分辨率为1/12°,时间分辨

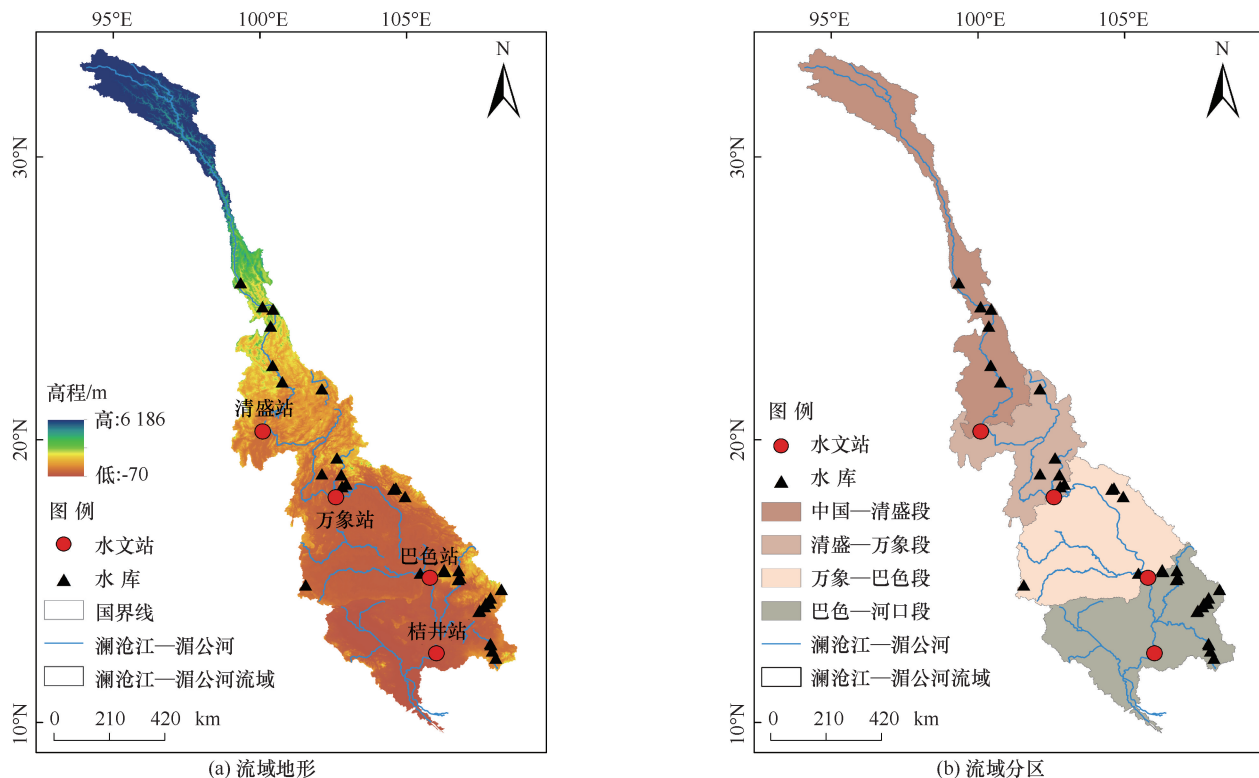


图1 澜沧江—湄公河流域

Fig. 1 Lancang-Mekong River Basin

率为16天。通过对收集的数据进行预处理, 选择研究时间序列范围为1982—2016年。

1.3 研究方法

1.3.1 植被指数的去趋势处理

受全球气候变暖和二氧化碳施肥效应的影响, 植被普遍显示出绿化的趋势^[29]。为了排除长期趋势带来的干扰, 参考BAI等^[30]的方法, 对原始植被指数序列进行去趋势处理。通过逐格点将月尺度NDVI序列累成年NDVI均值序列, 再利用最小二乘法拟合年NDVI序列(1), 最后将NDVI的长期趋势去除(2)。计算公式为

$$NDVI_{t,y_i} = ky_i + b \quad (1)$$

$$NDVI_{dt} = NDVI_{or} - NDVI_{t,y_i} \quad (2)$$

式中, $NDVI_{t,y_i}$ 为第 y_i 年的NDVI背景值; k 和 b 分别为趋势的斜率以及截距; y_i 为年份序列; $NDVI_{or}$ 和 $NDVI_{dt}$ 分别为原始NDVI序列和去除趋势后的NDVI序列。

1.3.2 干旱指数计算

标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI), 能表示不同时间尺度下的干旱, 具有计算简单, 多种时间尺度的特点。由VICENTE-SERRANO等^[31]在1993年提出, 被广泛应用于气象干旱评估, 计算公式为

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (3)$$

式中, x 为某一时间尺度下的降雨量, 假设其分布满足于Gamma分布, α 、 β 分别为它的尺度和形状参数 ($x > 0$ 、 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$), 参数可以通过极大似然法进行估算, 则该时间尺度下降雨量的累积概率为 $F(x)$ 。正态标准化其分布概率即得到相应的SPI, 水文干旱指数(Standardized Runoff Index, SRI)^[32]的计算与流域径流量有关, 与上述过程类似。

植被状况指数(Vegetation Condition Index, VCI)^[33]是一种基于归一化植被指数(NDVI)计算的指标, 近年来许多学者用于评估植被状况和监测植被干旱^[34-35]。VCI是通过某年某月的NDVI与研究时段内所有年份同月的NDVI最大和最小值归一化得到的植被指数, 单幅影像可分析地区内不同植被的相对生长状况, 多幅影像则可分析植被的生长变化趋势。计算公式为

$$VCI_i = \frac{(NDVI_i - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})} \quad (4)$$

式中, VCI_i 为某年第 i 月VCI; $NDVI_i$ 为某年第 i 月NDVI; $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别代表研究序列中所有年份中相同月份NDVI最大和最小值。

根据 SPI 、 SRI 、 VCI 指数的取值范围, 可将干旱划分等级^[31-33], 如表 1 所列。

表 1 干旱指数等级划分

Table 1 Classification of drought index levels

| SPI/SRI | VCI | 干旱等级 |
|------------------|----------|------|
| ≤ -2 | 0 ~ 10 | 特旱 |
| $-2 \sim -1.5$ | 10 ~ 20 | 重旱 |
| $-1.5 \sim -1.0$ | 20 ~ 30 | 中旱 |
| $-1 \sim -0.5$ | 30 ~ 40 | 轻旱 |
| > -0.5 | 40 ~ 100 | 无旱 |

1.3.3 Pearson 相关性检验法

Pearson 相关性检验法 (Pearson Correlation Test, PCT) 可用于研究满足正态分布的两个样本序列之间是否存在相关性。基于 PCT, 计算 SPI 、 SRI 与 VCI 的相关性, 表示气象干旱与植被干旱、水文干旱与植被干旱的相关性^[36]。计算公式为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right)} \quad (5)$$

式中, n 为研究时间序列内的累计月数; r_{xy} 为 x 和 y 的相关系数; x_i 、 y_i 为第 i 月的 x 和 y 的值; \bar{x} 和 \bar{y} 为两个要素样本的均值; r_{xy} 的值在 -1 到 1 之间, $r_{xy} > 0$ 表示正相关, $r_{xy} < 0$ 表示负相关, 绝对值越大, 说明两者的相关性越强, 反之越弱。

1.3.4 滞后性分析

植被干旱对气象干旱和水文干旱的响应往往具有滞后性, 可用滞后性分析来量化干旱响应时间^[37]。本文采取滞后 1—12 个月时间尺度的 SPI 、 SRI 与 VCI 的滞后相关系数评价植被干旱对气象干旱、水文干旱的响应。选择相关系数绝对值 (R_{\max}) 最大值的 SPI/SRI 对应的时间尺度作为响应时间。计算公式为

$$R_i = \text{corr}(VCI, SPI_n/SRI_n), 1 \leq i \leq 12 \quad (6)$$

$$DRT = \max(R_i), 1 \leq i \leq 12 \quad (7)$$

式中, i 为干旱滞后月份; R_i 为干旱滞后第 i 月的相关系数; n 为不同的时间尺度; DRT 为所有 R_i 中的最大值对应的时间尺度, 为植被干旱对气象干旱或水文干旱的响应时间。

举个例子: 利用 $SPI-n$ 与 $VCI-1$ 或者 $SRI-n$ 与 $VCI-1$ 建立滞后关系, 指示前 n 个月累积降水不足或者前 n 个月累积径流量不足导致植被生长状况的改变。在 12 个月的时间尺度上, 与 $VCI-1$ 相关系数达到最大的 $SPI-n$, 那么 n 则表示植被干旱对气象干旱的响应时间, 它表示前 n 个月累积的降水不足所引发

的植被干旱。例如 1 月份的 $SPI-3$ 与 $VCI-1$ 相关性最高, $n=3$, 这意味着 1 月的植被干旱对应着近 3 个月的降水不足, 因此植被干旱对气象干旱响应时间即为 3 个月。

1.3.5 游程理论

游程理论由 YEVJEVICH 提出, 可用于干旱事件和干旱特征的识别^[38-39]。通过设定干旱指标的临界阈值, 采用阈值法识别干旱事件及其干旱特征, 如干旱的起始时间、结束时间和烈度等。干旱阈值由干旱指数度等级划分标准确定, 本文选取的干旱阈值为 -0.5 。时间序列中的干旱指数若持续高于某一阈值, 称为正游程 (未发生干旱事件), 反之, 则为负游程 (发生干旱事件)。干旱持续时间是从干旱时间开始到干旱事件结束, 用游程长度表示。该时间段内负游程出现的累计值代表干旱烈度, 干旱事件总烈度与历时的比值为干旱强度。

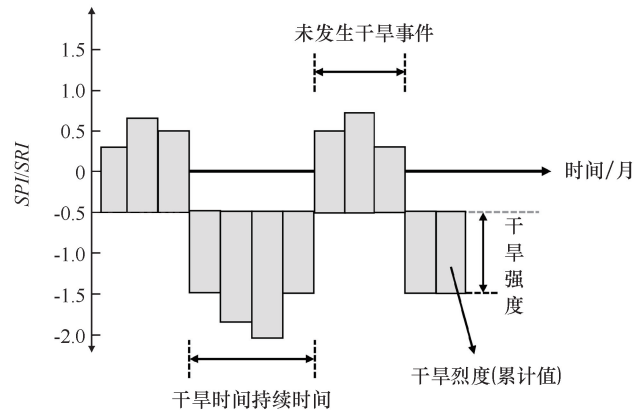


图 2 基于游程理论对干旱事件识别的概念示意

Fig. 2 Schematic diagram of drought event identification based on run theory

2 结果与分析

2.1 澜沧江—湄公河流域的干旱变化特征

基于 LM 流域 1982—2016 年逐月降水量和清盛站、万象站、巴色站及桔井站四个水文站点的逐日径流数据, 计算了四个子流域 1—12 个月尺度的 SPI 和 SRI , 以表征该流域气象干旱和水文干旱的变化过程。图 3 展示了研究期间不同区域和时间尺度下气象干旱和水文干旱的变化。可以看出, 气象干旱和水文干旱的时空格局大致相似。从 1982—1991 年, 所有子流域都表现出气象干旱或水文干旱的干湿交替变化特征, $SPI1-12$ 和 $SRI1-12$ 的变化幅度较小, 未出现显著的湿事件或干事件。1992 年和 1993 年, 整个流域出现了较明显的气象干旱, 同时在中国—清盛段、

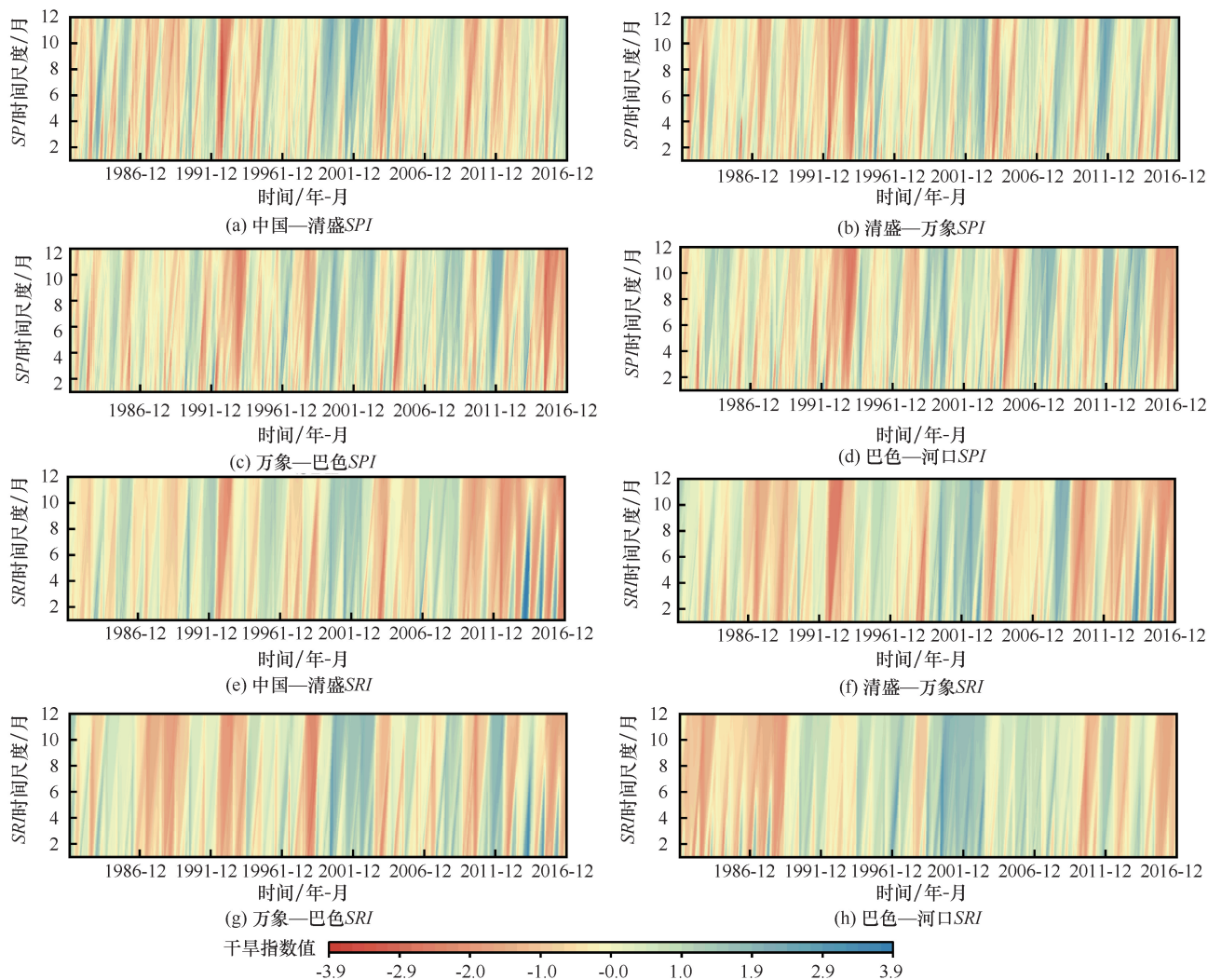


图3 1982—2016年LM流域每个子区域不同时间尺度的气象—水文干旱变化

Fig. 3 Variations in meteorological-hydrological droughts at different time scales in each sub-region of LM basin from 1982 to 2016

清盛—万象段和万象—巴色段观察到了程度较轻的水文干旱, 而巴色—河口段则未见水文干旱的发生。1994—2003年, 整个流域相对湿润。2004—2016年, 中国—清盛段、清盛—万象段干湿交替变化不明显, 而万象—巴色段和巴色—河口段则显示出显著的干湿交替现象。特别是在2009—2016年, 相较于2004—2008年, 水文干旱的发生频率明显增加, 尤其是在中国—清盛和清盛—万象段。通过比较SPI1—12和SRI1—12, 我们发现澜沧江—湄公河流域的气象干旱与水文干旱之间存在密切关联。一般而言, 水文干旱事件发生在气象干旱之后。然而, 自2009年起, 尤其是在中国—清盛段和清盛—万象段, 这种关系出现了显著变化: 即使未发生气象干旱的情况下, 水文干旱现象仍然出现, 这可能与上游地区水库蓄水导致下游地区径流量减少有关。此外, 图3也表明, 随着时

间尺度的增加(从1个月至12个月), 气象干旱和水文干旱的强度和持续时间也相应增加。

图4展示了1982—2016年LM流域不同子流域的月VCI值和年均VCI值变化曲线, 并通过线性拟合揭示了各子流域植被干旱的时空变化特征。在过去34年中, LM流域的植被干旱指数总体呈现波动上升趋势, 并显示出明显的季节性变化: 雨季植被指数较高, 而旱季植被指数较低。具体而言, 中国—清盛段在1983年、1992年、2004年和2005年出现了较轻的植被干旱; 清盛—万象段在1983—1984年、1991年、2004年、2007年和2010年经历了较严重的植被干旱。万象—巴色段在1982—1984年、1991年、2004年和2005年发生了较严重的植被干旱现象; 巴色—河口段则在1983—1984年和2005年出现了较轻的植被干旱。通过对植被干旱指数进行线性拟

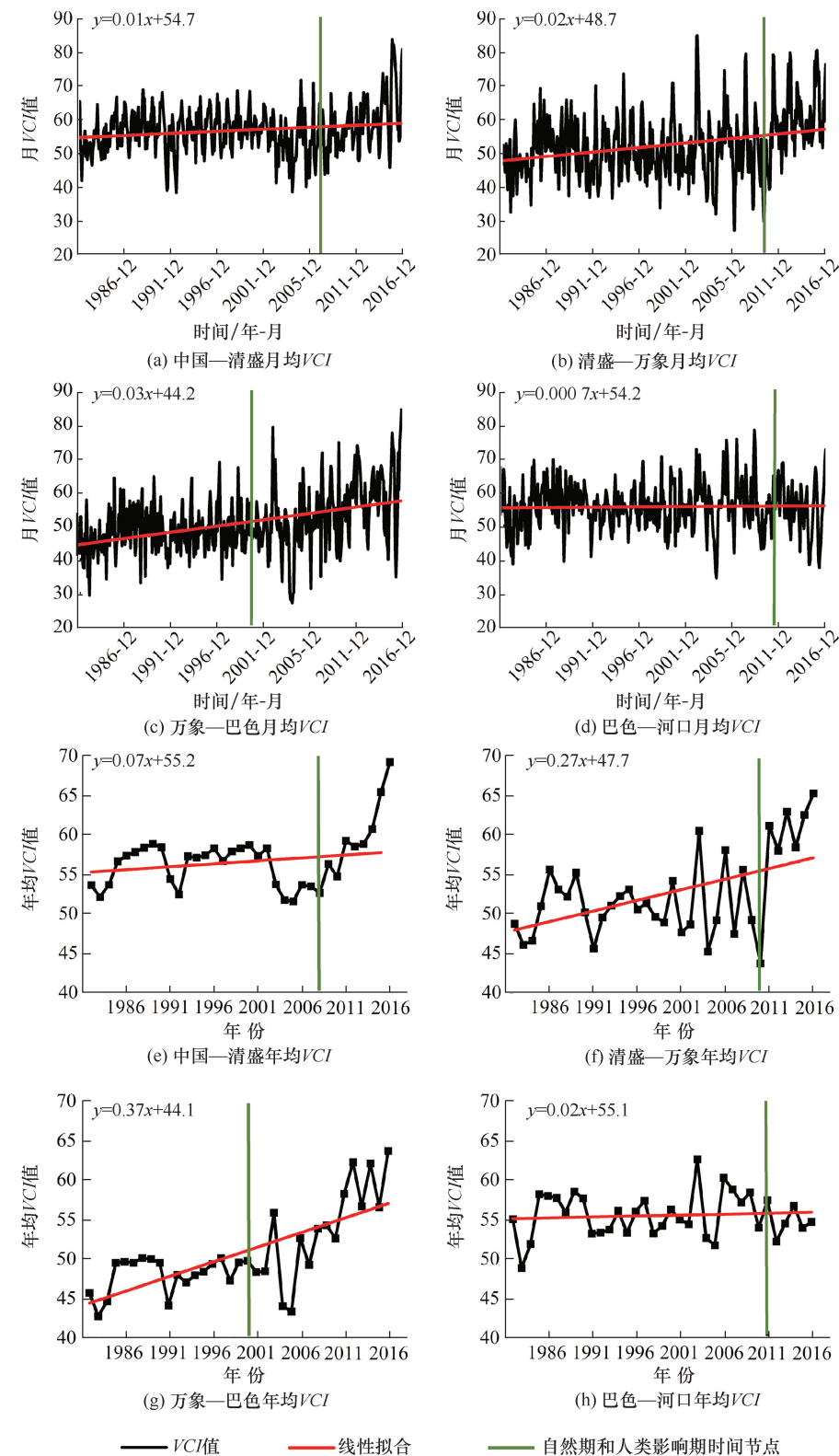


图4 1982—2016年LM流域每个子区域植被干旱变化

Fig. 4 Variations in vegetation drought in each sub-region of LM basin from 1982 to 2016

合, 可以观察到整个流域植被干旱指数呈上升趋势, 但不同子流域的增幅有所不同, 表明植被干旱现象在某些地区逐渐缓解。其中, 清盛—万象段的年增长率为

为 0.27/a, 万象—巴色段为 0.37/a, 增加幅度相对较大; 而中国—清盛段的年增长率为 0.07/a, 巴色—河口段为 0.02/a, 增加幅度相对较小。

2.2 水库建设前后植被干旱与气象-水文干旱的关系变化

为分析水库建设前后植被干旱与气象-水文干旱的关系变化, 本文基于 Pearson 相关分析法对两个时期(即自然期和人类影响期)的气象干旱-植被干旱和水文干旱-植被干旱的关系进行分析。图 5(a)展示了 LM 流域每个子区域在水库建设前后植被干旱与气象干旱最大相关系数的变化。结果显示, 中国—清盛段在水库建设后, 植被干旱与气象干旱的相关性增强, 从自然期的 0.129 提高到人类活动期的 0.392。相比之下, 清盛—万象段、万象—巴色段和巴色—河口段的相关性则有所减弱。具体而言, 清盛—万象段的相关系数从自然期的 0.390 降至人类影响期的 0.285; 万象—巴色段的相关系数从自然期的 0.230 降至人类影响期的 0.143; 巴色—河口段的相关系数从自然期的 0.293 降至人类影响期的 0.235。这表明, 水库建设加剧了上游地区(中国—清盛段)气象干旱对植被干旱的影响, 而对下游地区(清盛—万象、万象—巴色、巴色—河口段)的影响则有所减缓。

图 5(b)展示了 LM 流域不同区域在水库建设前后植被干旱与水文干旱最大相关系数的变化。结果显示, 中国—清盛段和清盛—万象段的相关性在水库建设后增强, 并呈现出负相关趋势; 相比之下, 万象—巴色段的相关性在两个时期均较低, 而巴色—河口段的相关性变化不大。具体而言, 中国—清盛段的相关系数在自然期为 0.111, 在人类影

响之下, 万象—巴色段的相关性在两个时期均较低, 而巴色—河口段的相关性变化不大。具体而言, 中国—清盛段的相关系数在自然期为 0.111, 在人类影

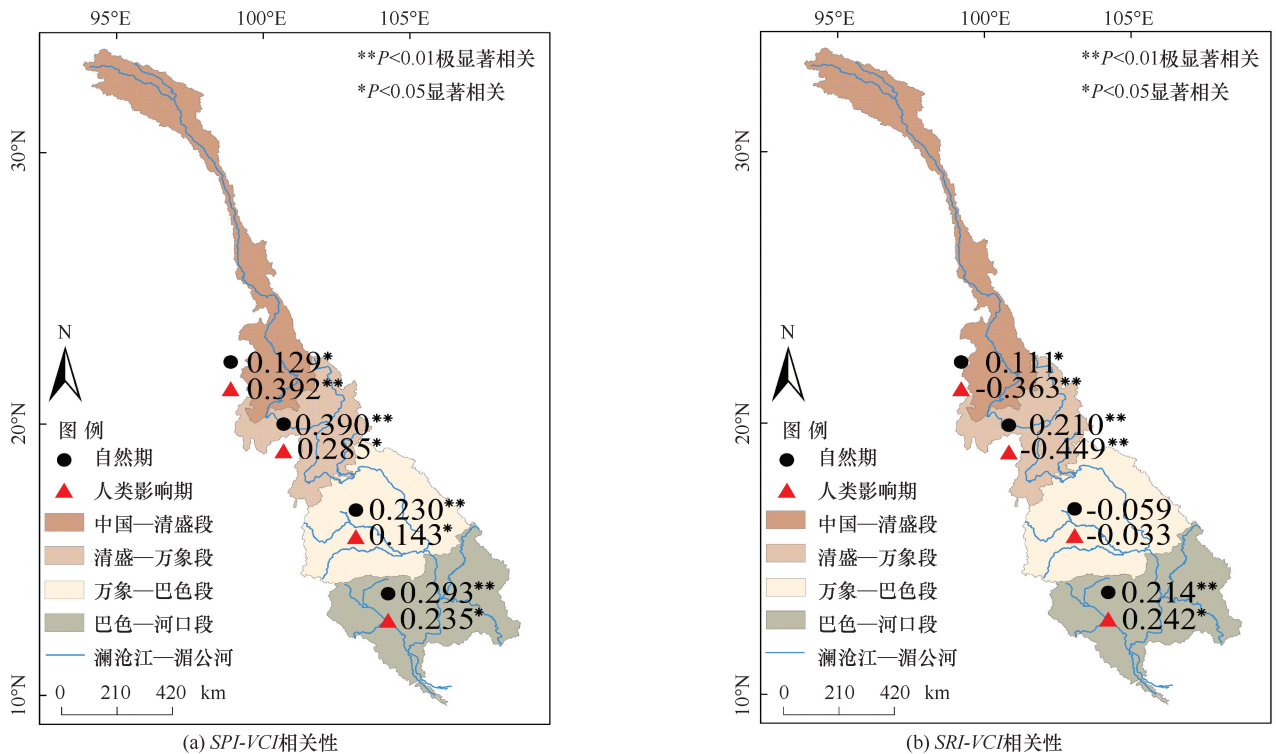


图5 水库建设前后植被干旱与气象-水文干旱的关系变化

Fig. 5 Variations in relationships between vegetation drought and meteorological-hydrological droughts before and after reservoir construction

响期为-0.363；清盛—万象段的相关系数在自然期为0.210，在人类影响期为-0.449；万象—巴色段的相关系数在两个时期变化不大，分别为-0.059和-0.033；巴色—河口段的相关系数在自然期和人类影响期分别为0.214和0.242。这表明，水库建设在一定程度上缓解了上游地区（中国—清盛、清盛—万象段）由水文干旱导致的植被干旱，而对下游地区（万象—巴色、巴色—河口段）的缓解能力相对较小。

2.3 水库建设前后植被干旱对气象-水文干旱的响应

当气象干旱和水文干旱发生时，并不会立即对植被产生影响，而是存在一定时间的滞后^[40]。因此，我们进一步分析了四个子流域在自然期和人类影响期的植被干旱对气象和水文干旱的滞后响应。具体来说，我们通过对每个月的VCI与滞后1个月、滞后2个月，一直到滞后12个月的SPI和SRI进行滞后性分析，量化了这一滞后效应。最终，我们选取滞后相关系数最大值所对应的时间尺度作为植被干旱对气象和水文干旱的响应时间，并进一步计算了雨季和旱季的平均响应时间。图6展示了四个子流域在两个时期的每月VCI与不同滞后时间（滞后1至滞后12个月）的SPI和SRI的相关系数。具体而言，气象干旱与植被干旱在2—8月份的滞后相关性较高，水文干旱和植被干旱在4—8月份的滞后相关性较高。此外，人

类影响期的滞后相关性整体上高于自然期，这一现象表明水库建设在一定程度上改变了植被干旱对气象-水文干旱的响应模式。

图7(a)—(d)展示了LM流域植被对气象干旱的响应。中国—清盛段[图7(a)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为6个月和3.8个月，旱季为3.8个月和4.5个月；人类影响期雨季响应时间比自然期缩短约2.2个月，而旱季响应时间延长约0.7个月。清盛—万象段[图7(b)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为7.3个月和6.2个月，旱季响应时间保持在6.2个月；人类影响期雨季响应时间比自然期缩短约1.1个月。万象—巴色段[图7(c)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为5.2个月和9个月，旱季为4.7个月和5个月；人类影响期雨旱两季的响应时间分别比自然期延长约3.8个月和0.3个月。巴色—河口段[图7(d)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为10.5个月和6.7个月，旱季为4.3个月和9.7个月；人类影响期雨季响应时间比自然期缩短约3.8个月，旱季延长约5.3个月。

图7(e)—(h)展示了LM流域植被对水文干旱的响应。中国—清盛段[图7(e)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为3.2个月和5.2个月，旱季

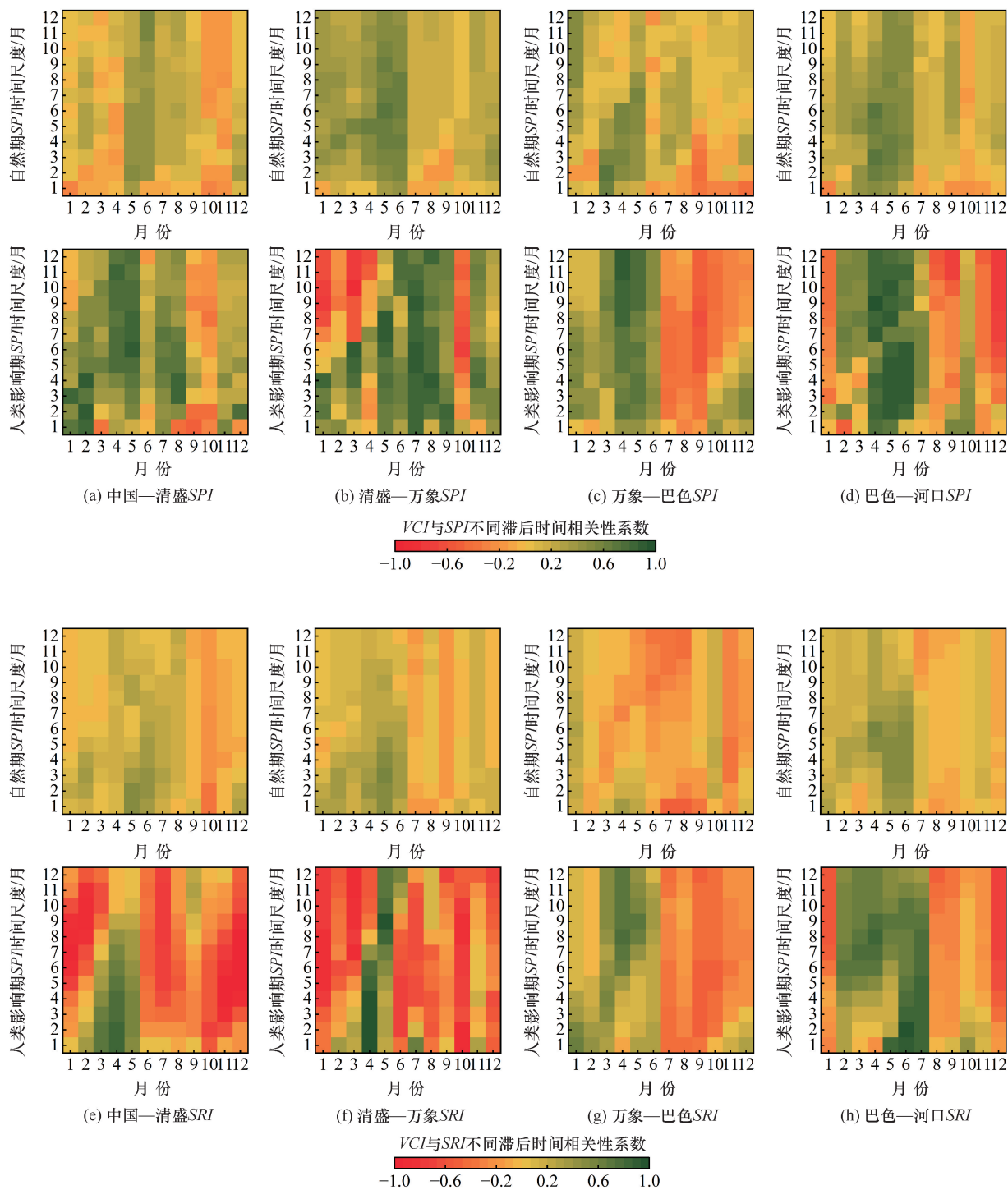


图6 水库建设前后每个子区域植被干旱对气象-水文干旱的不同滞后时间的相关性

Fig. 6 Correlation of vegetation drought with meteorological-hydrological droughts at different lag times in each sub-region before and after reservoir construction

为3.5个月和5个月；人类影响期雨季响应时间比自然期延长2个月，旱季延长约1.5个月。清盛—万象段[图7(f)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为2个月和6.7个月，旱季为3.5个月和6.8个月；人类影响期雨旱两季的响应时间比自然期分别延

长约4.7个月和4.8个月。万象—巴色段[图7(g)]的雨季响应时间在自然期和人类影响期分别为2.5个月和5.2个月，旱季为3.7个月和3.5个月；人类影响期雨季响应时间比自然期延长约2.7个月，旱季缩短约0.2个月。巴色—河口段[图7(h)]的雨季响应

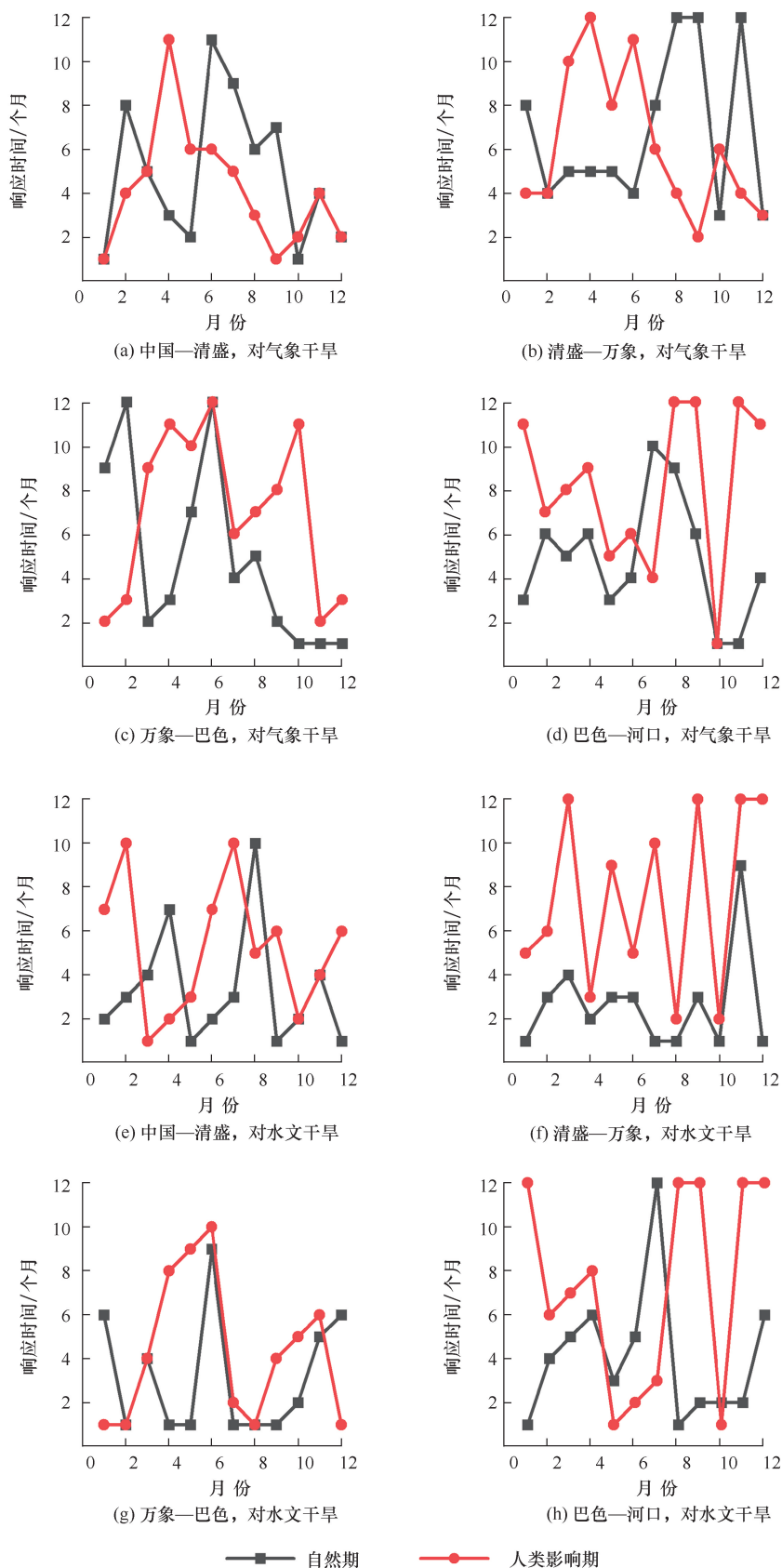


图7 水库建设前后每个子区域植被干旱对气象-水文干旱的响应时间
Fig. 7 Response time of vegetation drought to meteorological and hydrological droughts in each sub-region before and after reservoir construction

时间在自然期和人类影响期分别为 4.2 个月和 5.2 个月, 旱季为 4 个月和 9.5 个月; 人类影响期雨旱两季的响应时间比自然期分别延长约 1 个月和 5.5 个月。

综上所述, 植被干旱对气象干旱的响应时间在水库建设之后发生了显著变化。中国—清盛段、清盛—万象段和巴色—河口段的雨季响应时间缩短了 1.1 个月至 3.8 个月, 而万象—巴色段则延长了 3.8 个月; 在旱季, 中国—清盛段、万象—巴色段和巴色—河口段的响应时间延长了 0.3 个月至 5.3 个月, 而清盛—万象段的旱季响应时间保持不变。此外, 植被干旱对水文干旱的响应时间在自然期和人类影响期之间也存在差异, 雨季期间, 四个子区域的响应时间普遍延长了 1 个月至 4.7 个月; 而在旱季, 中国—清盛段、清盛—万象段和巴色—河口段的响应时间延长了 1.5 个月至 5.5 个月, 而万象—巴色段则缩短了 0.2 个月。

3 讨论

3.1 气象和水文干旱事件对流域植被干旱的影响

基于游程理论, 我们识别了每个子流域的气象干旱和水文干旱事件。在 1982—2016 年期间, 中国—清盛段共发生气象干旱事件 29 次, 水文干旱事件 22 次; 清盛—万象段发生气象干旱事件 27 次, 水文干旱事件 23 次; 万象—巴色段发生气象干旱事件 27 次, 水文干旱事件 20 次; 巴色—河口段发生气象干旱事件 24 次, 水文干旱事件 16 次。为便于对比分析, 我们将干旱事件的统计结果划分为自然期和人类影响期。统计结果如图 8 所示, 可以发现, 同一区域内气象干旱事件的数量通常多于水文干旱事件。这表明水文干旱不仅受到气象干旱的影响, 还可能受到水资源管理和人类活

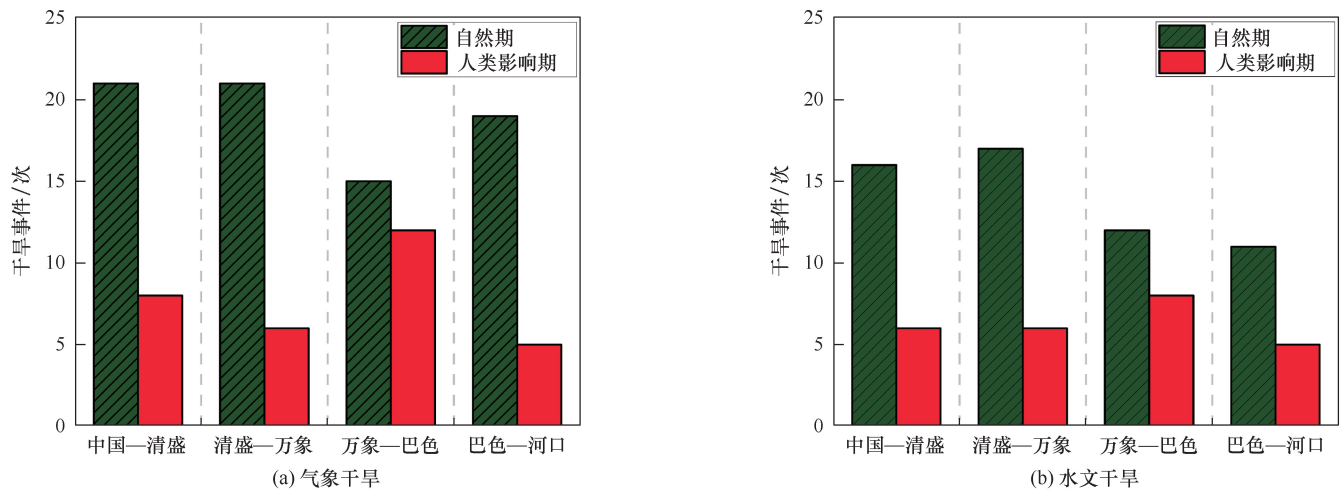


图 8 水库建设前后每个子流域气象干旱和水文干旱发生次数

Fig. 8 Frequency of meteorological and hydrological drought events in each sub-basin before and after reservoir construction

表 2 选取的流域气象干旱和水文干旱事件

Table 2 Selected meteorological and hydrological drought events in basin

| 区域 | 时期 | 气象干旱 | | | 水文干旱 | | |
|-------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | | 开始时间 | 结束时间 | 持续时间/月 | 开始时间 | 结束时间 | 持续时间/月 |
| 中国—清盛 | 自然期 | 1990-08 | 1990-10 | 3 | 1990-08 | 1990-09 | 2 |
| | | 1992-04 | 1992-10 | 7 | 1992-06 | 1993-01 | 8 |
| | 人类影响期 | 2014-10 | 2014-12 | 3 | 2014-06 | 2014-11 | 5 |
| | | 2015-06 | 2015-08 | 3 | 2015-07 | 2015-12 | 6 |
| 清盛—万象 | 自然期 | 1991-07 | 1991-12 | 6 | 1991-02 | 1991-03 | 2 |
| | | 1992-04 | 1992-08 | 5 | 1992-06 | 1993-08 | 15 |
| | 人类影响期 | 2014-03 | 2014-06 | 4 | 2014-07 | 2014-12 | 6 |
| | | 2015-05 | 2015-08 | 4 | 2015-07 | 2016-02 | 8 |
| 万象—巴色 | 自然期 | 1991-2 | 1991-07 | 6 | 1991-04 | 1991-06 | 3 |
| | | 1992-04 | 1992-06 | 3 | 1992-05 | 1993-06 | 14 |
| | 人类影响期 | 2015-05 | 2015-10 | 6 | 2015-07 | 2016-01 | 7 |
| | | 2016-04 | 2016-10 | 7 | 2016-07 | 2016-11 | 5 |
| 巴色—河口 | 自然期 | 1991-2 | 1991-07 | 6 | 1991-05 | 1991-06 | 2 |
| | | 1992-04 | 1993-01 | 10 | 1993-02 | 1993-04 | 3 |
| | 人类影响期 | 2011-01 | 2011-03 | 3 | 2011-01 | 2011-03 | 3 |
| | | 2012-06 | 2012-10 | 5 | 2012-10 | 2013-02 | 5 |

动的调控。

为了进一步探究水库建设前后植被干旱指数在干旱事件中的变化,我们针对每个子流域筛选了持续时间较长的干旱事件(见表 2)来分析干旱对植被的影响。结合图 9 观察到,LM 流域的植被干旱指数呈现出显著的季节性变化。然而,在气象干旱和水文干旱发生期间,植被干旱指数有所下降,这表明干旱事件确实对植被状况产生了一定的影响。对比自然期和人类影响期的干旱事件对植被干旱指数的影响发现,上游地区(中国—清盛段和清盛—万象段)在进入人类影响期后,干旱对植被的影响有所减弱,而下游地区(万象—巴色段和巴色—河口段)也出现了一定程度的缓解,但减弱效应不及上游地区明显。

3.2 水库建设对流域植被干旱驱动的机制

在 LM 流域,水库在调节河流径流模式方面发挥了重要作用。雨季期间,水库通过有效蓄积降水,显著减少了下游地区的洪峰流量,从而降低了洪水对下游的威胁,这一调节过程虽然减轻了洪水带来的风险,但也可能导致下游的径流量相较于自然流态有所减少^[41],给当地农业生产带来一定的影响。进入旱季后,水库通过储存雨季的水量来补充干旱期间的水源,能够持续提供稳定的水源,保障农业灌溉、工业用水和居民生活用水,有效缓解了干旱对流域及下游水资源的压力。

此外,水库有助于提高库区及其周围地区的地下水水位,增加土壤含水量,且在建库后 10~20 a 之

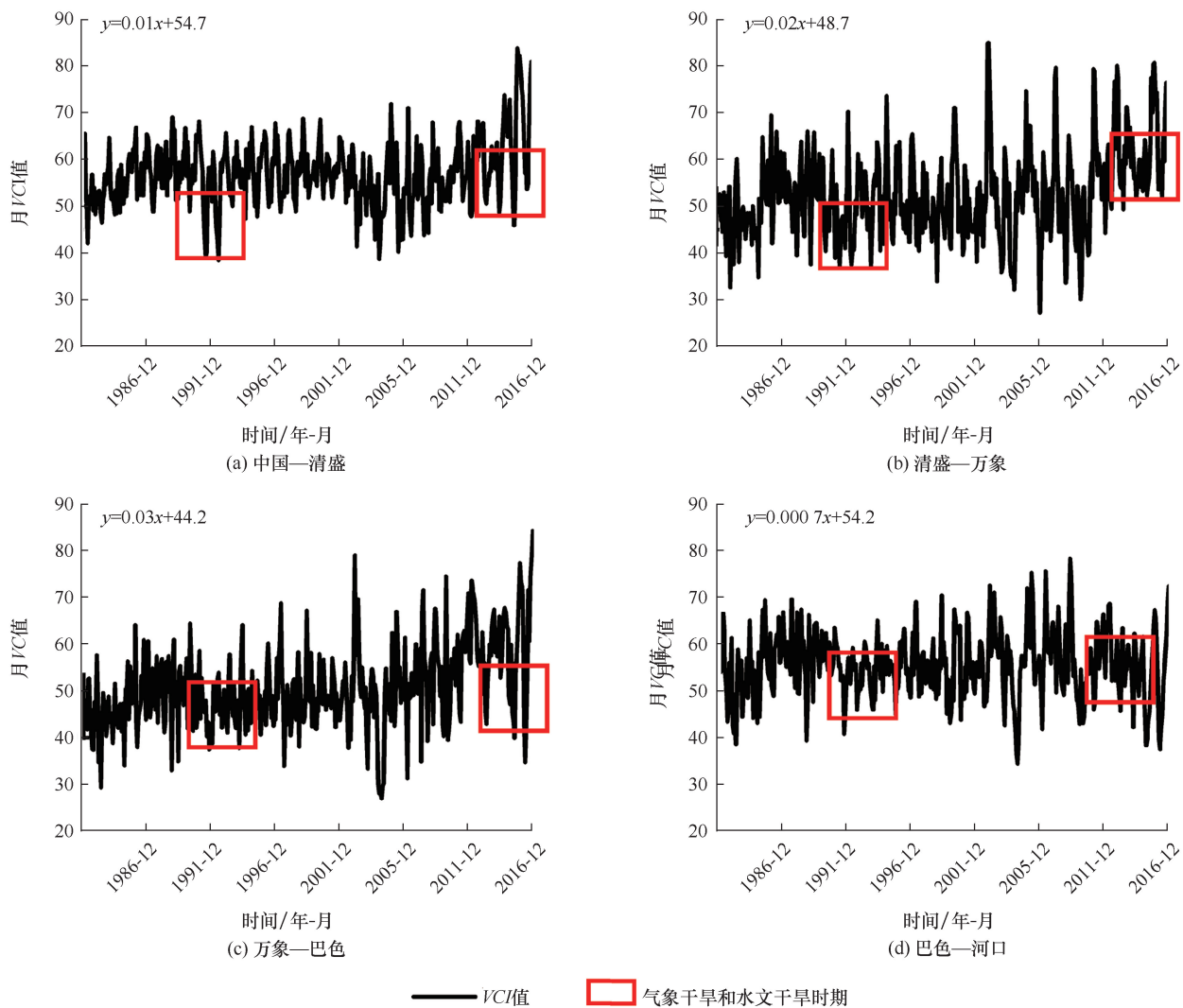


图9 每个子区域干旱事件持续时间内植被状况指数变化

Fig. 9 Variations in vegetation condition index during drought event duration in each sub-region

内库底原来的包气带才能达到饱和^[42]。有研究表明, 库区周边的地下水水位升高的范围随当地的水文地质条件而异, 可扩散到库区周围 10~20 km^[19]。这在一定程度确保了库区周边流域植被在干旱时期获得必要的水分, 也间接地维持了农业生产的可持续发展(见图 10)。水库通过调节旱季和雨季的径流量这种机制, 有效减少了极端气候事件对澜沧江—湄公河流域水文环境的影响, 为区域生态系统和人类活动提供了可靠的水资源保障^[43]。同时, 水库蓄水在一定程度上会对库区及其周边地区的空气湿度和降雨量产生显著影响^[44]。即水库通过蓄水使水位上升, 显著扩大了水域面积, 从而增加了水面的蒸发量(见图 10)。这些蒸发释放的水汽可以提高局部的空气湿度, 从而调节区域气候, 并促进植物的生长发育^[45-46]。不仅如此, 由于水库对水量的调节以及对上游来沙的拦蓄和排放, 水库下游水温以及下游河道的冲淤规律也随之改变,

从而影响到下游河流的流域生态系统变化^[22,24,26]。

本文研究结果表明, 水库建设有效缓解了 LM 流域植被干旱的现象, 其中对上游地区的影响大于下游地区。在旱季和雨季, 植被干旱对气象干旱和水文干旱的响应时间上存在显著的变化, 旱季期间, 植被干旱对气象干旱的响应时间平均延长 1.6 个月, 对水文干旱的响应时间在万象—巴色段缩短 0.2 个月, 其余区域平均延长 3.2 个月。这表明在旱季期间, 水库的建设通过改变流域的水文条件, 对植被干旱的响应时间产生了复杂的影响; 雨季期间, 植被干旱对水文干旱的响应时间平均延长 2.6 个月, 中国—清盛、清盛—万象、巴色—河口段植被干旱对气象干旱的响应时间平均缩短 2.3 个月, 万象—巴色段延长了 0.3 个月。这种变化主要得益于水库的调节作用, 水库在雨季蓄水通常导致河流汛期流量降低, 可能会引发下游地区水文干旱, 这种干旱对下游植被造成影响, 导致

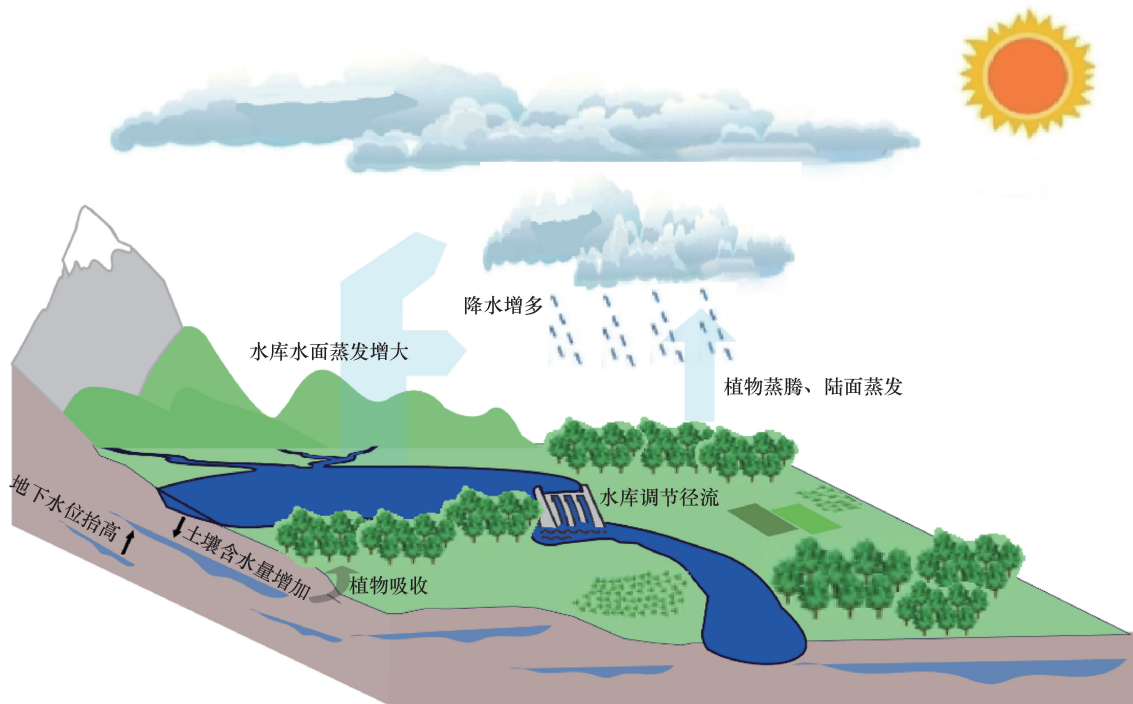


图 10 水库建设后区域生态系统的水文效应

Fig. 10 Hydrological effects on regional ecosystems after reservoir construction

植被缺水和生长缓慢, 缩短植被对干旱的响应时间^[47]。相反, 水库放水时使得下游河流径流量较自然流态要高, 这有助于缓解下游河段的水文干旱, 并改善植被的水分供应, 从而减轻植被干旱的程度, 延长植被对干旱的响应时间^[48]。

3.3 研究不足与展望

澜沧江—湄公河(LM)流域作为跨境流域, 拥有密集的水库, 其水库建设在区域生态和水资源管理中扮演着重要角色。本文聚焦于 LM 流域水库建设对干旱响应的影响, 我们的研究表明水库建设对下游地区的干旱缓解具有积极影响, 改善了植被的生长状况, 并减少了干旱对植被的负面影响。研究结果为揭示水库建设对区域干旱的潜在影响提供了重要参考, 也为区域植被干旱的监测和预防提供了一定的理论基础。然而, 干旱作为一个复杂的气候-生态现象, 受到区域内多因素的影响。

因此, 本文的研究存在一定的局限性, 例如水库蓄水对区域小气候影响的量化, 以及由此对植被动态的潜在作用, 我们尚未展开深入研究。此外, 有研究表明干旱影响植被还与干旱事件本身的特性有关, 例如干旱的强度、持续时间和烈度等^[17,41]。在未来研究中, 我们将基于干旱事件的特征, 构建植被干旱对气象干旱与水文干旱事件及其特征的响应关系模型。

通过这一方法, 我们期望可以更全面地揭示水库建设前后植被对干旱事件的响应规律及水库建设对干旱特征的影响。

4 结论

基于三种干旱指数, 本文分析了 1982—2016 年 LM 流域气象-水文-植被干旱的演变特征, 并探讨了水库建设前后不同干旱指数之间的响应关系以及气象-水文干旱对植被干旱的驱动机制。主要结论如下。

(1) 在 1982—2016 年期间, LM 流域气象-水文干旱时空变化特征基本相似。然而自 2009 年起, 上游地区水文干旱发生频率明显增加。而植被干旱呈现明显的季节性变化, 植被干旱指数整体上升(0.02~0.37/a), 但各子流域增幅不同。

(2) 水库建设后, LM 流域中国—清盛段的植被干旱与气象干旱的相关性增强, 而清盛—万象段、万象—巴色段和巴色—河口段则有所减弱。与此同时, 上游地区(中国—清盛段、清盛—万象段)植被干旱与水文干旱的相关性增强且呈现负相关, 而下游地区(万象—巴色段、巴色—河口段)相关性变化较小。这表明水库建设缓解了 LM 流域的植被干旱现象。

(3) 水库建设后, LM 流域植被干旱对气象-水文

干旱的响应时间发生了变化。对气象干旱的响应中, 上游区域的雨季响应时间缩短, 而下游区域的雨季响应时间延长。对水文干旱的响应中, 雨季的响应时间普遍延长, 而旱季响应时间表现出空间异质性(上游地区延长幅度更大, 下游地区则有所缩短)。

参考文献 (References):

- [1] TRENBERTH K, DAI A, VAN DER SCHRIER G, et al. Global warming and changes in drought[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 17-22.
- [2] VICENTE-SERRANO M S, QUIRING M S, PEÑA-GALLARDO M, et al. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 102953.
- [3] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(1): 1-10.
- LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.
- [4] WILHITE A D, GLANTZ H M. Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions[J]. *Water International*, 2009, 10(3): 111-120.
- [5] 李伟光, 刘少军, 侯美亭, 等. 气象与农业干旱指数研究进展[J]. *气象与环境科学*, 2021, 44(3): 76-82.
- LI W G, LIU S J, HOU M T, et al. Advance in the study on meteorological and agricultural drought indices [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2021, 44(3): 76-82.
- [6] HAIYUN S, ZHAOQIANG Z, LIN L, et al. A global perspective on propagation from meteorological drought to hydrological drought during 1902—2014[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 280: 106441.
- [7] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展[J]. *应用气象学报*, 2022, 33(5): 513-526.
- SONG Y L. Global research progress of drought indices[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(5): 513-526.
- [8] JUAN C, ZHIYONG L, PING Z. Anomalies in precipitation rather than temperature as the dominant driver of drought stress on vegetation in the Northern Hemisphere[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 40: e02311.
- [9] 孙灏, 高金华, 闫亭廷, 等. 植被干旱遥感监测方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2024, 28(6): 1395-1411.
- SUN H, GAO J H, YAN T T, et al. Remote sensing of vegetation drought: Research progress[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(6): 1395-1411.
- [10] DING Y, WANG F, MU Q, et al. Estimating land use/land cover change impacts on vegetation response to drought under 'Grain for Green' in the Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(17): 5083-5098.
- [11] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(1): 1-11.
- LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
- [12] MA F, LUO L, YE A, et al. Drought characteristics and propagation in the semiarid Heihe River Basin in Northwestern China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(1): 59-77.
- [13] 靖娟利, 孙佳荟, 赵婷, 等. 西南地区植被 NPP 对多尺度气象干旱的响应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 335-344.
- JING J L, SUN J H, ZHAO T, et al. Response of vegetation NPP to multiscale meteorological drought in southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 335-344.
- [14] ZHEN W, JUN N, GUAN H, et al. Three-dimensional linkage between meteorological drought and vegetation drought across China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 859: 160300.
- [15] VICENTE-SERRANO S M, GOVVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 52-57.
- [16] 赵乾佐, 张璇, 费俊源, 等. 长江流域不同植被对 2022 年极端气象干旱事件的响应[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(9): 5134-5144.
- ZHAO Q Z, ZHANG X, FEI J Y, et al. Vegetation responses to extreme meteorological drought event of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(9): 5134-5144.
- [17] JEHANZAIB M, KIM T. Exploring the influence of climate change-induced drought propagation on wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 149: 105799.
- [18] HUANG S, HUANG Q, CHANG J, et al. The response of agricultural drought to meteorological drought and the influencing factors: A case study in the Wei River Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 45-54.
- [19] 张洪敏. 安康水库建设对库区水生生态环境的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- ZHANG H M. Influence of Ankang Reservoir Construction on Reservoir Aquatic Ecological Environment [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [20] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(12): 1-8.
- WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(12): 1-8.
- [21] WU J, CHEN X, YAO H, et al. Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 495-507.
- [22] BRUNNER M I. Reservoir regulation affects droughts and floods at local and regional scales[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(12): 124016.
- [23] LÓPEZ-MORENO I J, VICENTE-SERRANO M S, BEGUERÍA S,

- et al. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(2): 70-82.
- [24] DEGU M A, HOSSAIN F, NIYOI D, et al. The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(4): L04405.
- [25] YI G, QIANG H, SHENGZHI H, et al. Elucidating the effects of mega reservoir on watershed drought tolerance based on a drought propagation analytical method[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 598: 125738.
- [26] LIU J, CHEN D, MAO G, et al. Past and future changes in climate and water resources in the Lancang-Mekong River Basin: Current understanding and future research directions[J]. *Engineering*, 2022, 13(6): 144-152.
- [27] PECH S, SUNADA K. Population growth and natural-resources pressures in the Mekong River Basin [J]. *AMBIO*, 2008, 37(3): 207-212.
- [28] BAO P N, MITRA B K, KUYAMA T. Integrated approach for sustainable hydropower development in the Mekong River Basin[J]. *Environmental and Natural Resources Research*, 2017, 7(1): 60-74.
- [29] PIAO S, WANG X, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(1): 14-27.
- [30] BAI P, LIU X, ZHANG Y, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2019WR027019.
- [31] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [32] SHUKLA S, WOOD W A. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 2405.
- [33] ZENG L, WARDLOW B D, XIANG D, et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111511.
- [34] GE C X H, SUN P, YAO R, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to ecological drought in China: Lag and cumulative effects[J]. *Atmospheric Research*, 2024, 304: 107405.
- [35] ZHONG S, SUN Z, DI L. Characteristics of vegetation response to drought in the CONUS based on long-term remote sensing and meteorological data[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107767.
- [36] WU J, MIAO C, ZHENG H, et al. Meteorological and hydrological drought on the Loess Plateau, China: Evolutionary characteristics, impact, and propagation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(20): 569-584.
- [37] GUO Y, HUANG Q, HUANG S, et al. Elucidating the effects of mega reservoir on watershed drought tolerance based on a drought propagation analytical method[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 125738.
- [38] YEVEJEVICH V M. Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts [D]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [39] 李焯, 江伟, 陈晓俊, 等. 基于降水量距平百分率的 1961—2020 年鄂尔多斯气象干旱趋势 [J]. *干旱区研究*, 2024, 41(7): 1099-1111.
- LI Y, JIANG W, CHEN X J, et al. Drought trends in Ordos from 1961 to 2020 based on meteorological precipitation anomaly percentage[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(7): 1099-1111.
- [40] SUN P, LIU R, YAO R, et al. Responses of agricultural drought to meteorological drought under different climatic zones and vegetation types[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129305.
- [41] 张攀全, 管镇, 李红刚, 等. 变化环境下澜沧江梯级电站运行对湄公河枯水期的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2024, 42(1): 1-9.
- ZHANG P Q, GUAN Z, LI H G, The impact of cascade hydropower stations on the Lancang river during the dry season of Mekong River in the context of environment change [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, 42(1): 1-9.
- [42] ZHOU T, NIJSSEN B, GAO H, et al. The contribution of reservoirs to global land surface water storage variations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(1): 309-325.
- [43] YU Y, BO Y, CASTELLETTI A, et al. Transboundary cooperation in infrastructure operation generates economic and environmental co-benefits in the Lancang-Mekong River Basin [J]. *Nature Water*, 2024, 2(6): 589-601.
- [44] AFZAL J, YIHONG Z, QAYUM M, et al. Effects of dam on temperature, humidity and precipitation of surrounding area: A case study of Gomal Zam Dam in Pakistan[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(6): 14592-14603.
- [45] DENG H, SHAO J. Evapotranspiration and humidity variations in response to land cover conversions in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(3): 590-605.
- [46] LYU A, LI T, ZHU W, et al. The neglect of the change in inundation area leads to overestimation of carbon emission in cascade reservoirs [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 955: 176927.
- [47] ANANDHARUBAN P, ELANGO L. Spatio-temporal analysis of rainfall, meteorological drought and response from a water supply reservoir in the megacity of Chennai, India [J]. *Journal of Earth System Science*, 2021, 130: 1-20.
- [48] FU J, WANG W, HUNTER P D, et al. Trends in normalized difference vegetation index time series in differently regulated cascade reservoirs in Wujiang catchment, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109831.

(责任编辑 王海锋)