

袁泽申, 程瑶, 武金坤, 等. 定量评估气候变化和人类活动对澜沧江流域植被动态的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 85-99. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.008

YUAN Zeshen, CHENG Yao, WU Jinkun, et al. Quantitatively assessing the impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Lancang River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 85-99. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.008

定量评估气候变化和人类活动对澜沧江流域植被动态的影响

袁泽申¹, 程瑶^{1,2}, 武金坤^{1,2}, 连曦¹

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 水资源智慧调控与综合管理省部共建协同创新中心, 河北 邯郸 056038)

摘要:【目的】植被对水沙平衡、生源要素交换、生态系统稳定等方面具有重要影响。澜沧江是中国西南地区重要的水利工程和水资源调节中心, 其植被动态事关流域防洪安全、供水安全和生态安全。【方法】以澜沧江流域为研究区域, 利用1998—2020年时间序列气象、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)等数据, 结合Mann-Kendall趋势检验和Sen's Slope斜率估计, 分析了澜沧江流域植被动态的时空变化差异, 并采用偏最小二乘法结构方程模型定量评估气候变化和人类活动对澜沧江流域植被动态的影响。【结果】1998—2020年期间, 澜沧江流域*NDVI*生长季年变化速率为0.004 2/a, 呈显著增长趋势, 其中青海和西藏段变化速率为0.002 0/a, 云南段为0.005 3/a。流域内植被明显改善的区域占比高于40%, 严重退化的区域占比低于5%, 春、夏、秋三季*NDVI*也均呈现显著增长, 其中春季增长最快, 夏季增长最慢。青海和西藏段增长速率最快的季节为夏季, 春季的增长速率最低; 云南段增长速率最快季节为春季与秋季, 夏季增长速率相对最低。地形因素对植被的平均影响量为-0.085, 人类活动对植被的平均影响量为0.009, 气候因素对植被的平均影响量为0.451。【结论】气温目前是影响研究区植被生长的主要气候因子, 人类活动对植被动态的影响较为微弱, 地形因素通过调节气候因素间接影响植被生长。

关键词: 降水; 气温; 人类活动; 归一化植被指数; 澜沧江流域; 偏最小二乘法结构方程模型; 时空变化



DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0085-15

Quantitatively assessing the impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Lancang River Basin

YUAN Zeshen¹, CHENG Yao^{1,2}, WU Jinkun^{1,2}, LIAN Xi¹

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-04-15; 录用日期: 2024-04-19; 网络出版日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(52209013); 河北省自然科学基金(E2024402142); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-202214)

作者简介: 袁泽申(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利工程生态环境研究。E-mail: yuanzeshen@sohu.com

通信作者: 程瑶(1982—), 男, 教授, 副院长, 博士, 主要从事水利工程生态环境研究。E-mail: chengyao@hebeu.edu.cn

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

2. Collaborative Innovation Center for Intelligent Regulation and Comprehensive Management of Water Resources,
Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: [Objective] The impact of vegetation on aspects such as water-sediment balance, exchange of biogenic elements, and ecosystem stability is considered important. The Lancang River is regarded as an important water conservancy project and water resources regulation center in southwest China, with its vegetation dynamics being deemed crucial for flood safety, water supply security, and ecological security in the basin. [Methods] The study area was focused on the Lancang River Basin. Utilizing time series meteorological data from 1998 to 2020, as well as Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) data, the spatial-temporal variations of vegetation dynamics in the Lancang River Basin were analyzed. The analysis included the utilization of the Mann-Kendall trend test and Sen's Slope estimation, and the impacts of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Lancang River Basin were quantitatively assessed using the Partial Least Squares Structural Equation Model. [Results] During the period from 1998 to 2020, it was observed that the annual growth rate of *NDVI* during the growing season in the Lancang River Basin was 0.004 2/year, indicating a significant increasing trend. The growth rates in the Qinghai and Tibet sections were 0.002 0/year and in the Yunnan section was 0.005 3/year. It was noted that the proportion of regions with significantly improved vegetation in the basin exceeded 40%, while regions with severe degradation were less than 5%. Furthermore, it was found that the *NDVI* in spring, summer, and autumn all exhibited significant growth, with the fastest growth being observed in spring and the slowest in summer. The fastest growth season in the Qinghai and Tibet sections was summer, with the slowest growth occurring in spring. In the Yunnan section, the fastest growth seasons were spring and autumn, with relatively slower growth in summer. The average impact of terrain factors on vegetation was -0.085, human activities were found to have an average impact of 0.009, and climate factors were noted to have an average impact of 0.451. [Conclusion] Currently, temperature is considered to be the main climate factor affecting vegetation growth in the study area, with human activities being identified as having a relatively weak impact on vegetation dynamics. It was also observed that terrain factors indirectly affect vegetation growth by regulating climate factors.

Keywords: precipitation; temperature; human activities; *NDVI*; Lancang River Basin; PLS-SEM; spatiotemporal variation

0 引言

植被是陆地生态系统的关键组成部分,是土壤、大气和水之间的纽带^[1]。植被对水沙平衡、能量动态、生源要素交换、生态系统稳定性和温室气体减排有重要影响^[2-6]。随着人类活动和全球气候变化的加剧,植被受气候变化和人类活动的影响受到了广泛的关注^[7]。全球变化环境下,气候因子具有显著季节性变化^[8]。因此,研究植被动态演变的驱动机制时需要同时考虑植被在不同季节对不同气候因子的季节变化^[9-11]以及人类活动的影响。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)是一种广泛用于评估植被健康的参数,是分析植被覆盖度变化及其与影响因子关系的基础,可以利用多光谱卫星影像在区域或全球尺度上进行动态监测^[12-13]。*NDVI*在分析生态系统和区域植被变化、水土保持、沙漠化过程、生态环境质量和气候变化等方面有着广泛的应用^[14-16]。

澜沧江发源于青藏高原,从云南省流出国境后称为湄公河。澜沧江是中国西南地区重要的水利工程和

水资源调节中心,其植被动态事关流域防洪安全、供水安全和生态安全^[17]。已有研究表明,澜沧江流域山地森林植被破碎带随时间推移显著增加^[18];气温是影响湄公河东部和沿海地区植被变化的主要因素,太阳辐射是影响澜沧江高海拔地区的主要因素^[19]。OUYANG等^[20]的研究表明,在澜沧江流域气候变化对草地和森林动态的影响主要由气温引起的。YUAN等^[8]在全球范围基于物候的季节尺度上研究了植被生长的时滞效应,利用分布式滞后回归模型得出植被返青期受温度和降水影响的滞后较短,植被成熟期和衰老期受影响的滞后较长。ZHU等^[21]利用特定的干旱生态模型探索多气候情景中亚旱地不同植物时空动态模式,得出降水主导了86%地区的蒸散发,77%地区的蒸腾和71%地区的蒸腾与蒸散发。GONG等^[22]采用多个生物气候指数研究其对中国西南地区植被的影响,得出在空间、时间和海拔三个维度,几乎所有与温度相关的生物气候指数都与不同类型植被的*NDVI*呈显著相关。XU等^[23]利用地理探测器技术探讨中国7个不同植被带*NDVI*变化的驱动因素和空间异质性,结果表明,2000—2021年期间,中国的

NDVI、预测 *NDVI* 和剩余 *NDVI* 呈显著上升趋势。LIU 等^[24]在北半球中高纬度地区植被生长季速率及其受气候因子影响研究中, 得出季前温度控制了 50°N—70°N 范围内地区的植被生长速率。

澜沧江流域覆盖范围广, 由于地形复杂和垂直高差悬殊等原因, 其气候立体特点显著, 此外人类活动程度差异较大且变化过程复杂, 导致植被变化存在明显的区域分异性, 响应机理模式多样。目前关于澜沧江植被变化及其响应机制的研究往往只针对整个流域或其中某一区域, 结果无法反映澜沧江流域内不同气候区域的差异性, 同时也少有针对性对流域内不同季节植被变化响应差异的分析研究。此外, 之前的研究尚未开展人类活动和气候变化对植被的定量影响分析。因此, 本研究的主要目的是: 在澜沧江流域内有针对性地进行植被动态变化研究, 确定不同时间尺度植被与气候的变化特征; 由于流域内存在明显的气候带差异, 定量解析气候变化和人类活动对于植被变化影响的贡献, 辨识澜沧江流域植被变化的驱动力及区域差异性。

综上, 本文采用线性回归和趋势拟合等方法分

别对澜沧江流域植被生长季(4—9月)及春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)不同时间段^[25]内植被与气候因子趋势变化进行分析; 采用 Pearson 相关分析确定植被对气候的响应关系, 利用偏最小二乘法定量分析人类活动和气候变化对植被变化的相对贡献。通过研究区域植被动态变化及其驱动因子, 探究气候变化下生态系统内在演化机制, 分析结果可揭示澜沧江地区植被动态变化的时空差异性, 为澜沧江流域水安全、生态建设与可持续发展提供重要参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

澜沧江全长 4 880 km, 流域总集水区面积 $8.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[26](见图 1)。流域内气候变化主要受到东南亚热带季风的影响, 云南部分最为严重^[27]。澜沧江流域地跨云南、青海和西藏三个省份, 青海和西藏段均处于高海拔地区, 海拔 4 500 m 以上, 主要的土地类型为草原、积雪和冰川覆盖; 云南段地形最为复杂, 海拔跨度达 5 000 m, 最高海拔在 5 500 m 左右,

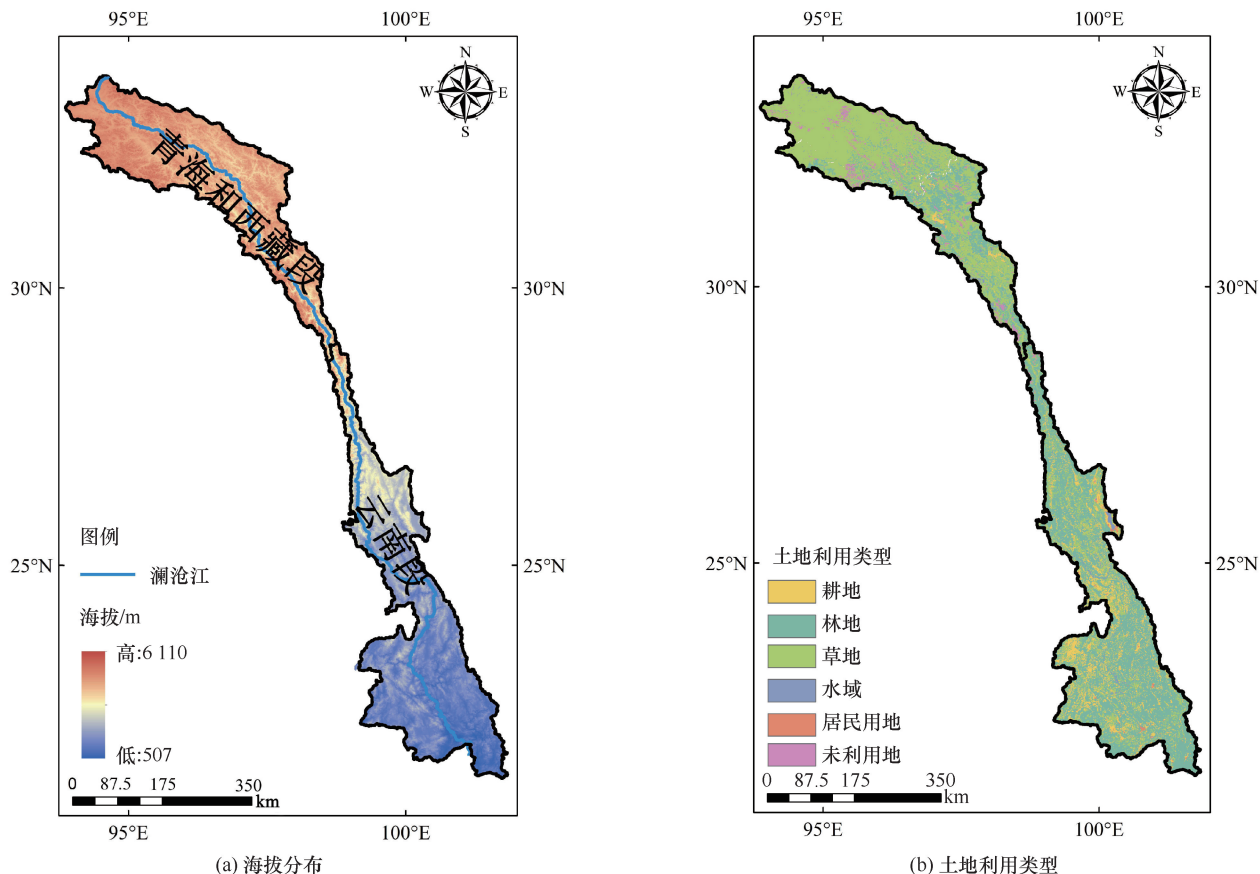


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation of study area

最低海拔仅为 507 m, 植被类型复杂, 主要植被类型有草地、灌丛、森林、沼泽等^[28]。澜沧江流域年平均降水量由北向南递增, 年平均降水量为(1 043.4±82 mm), 气温同样也是由北向南递增, 平均气温为(8.4±0.3) °C^[29]。

1.2 数据来源及预处理

归一化植被指数数据是在 SPOT/VEGETATION PROBA-V 1KM PRODUCTS (<http://www.vito-eodata.be>) 植被指数数据基础上, 采用最大值合成法生成的植被指数数据集。气象数据是空间插值数据集, 土地利用类型数据、高程数据、人口密度数据以及 GDP 数据均来自中科院资源与环境科学数据中心 (www.resdc.cn)。以上原始数据来自 1998—2020 年, 空间分辨率为 0.008 062 025 °×0.008 062 025 °(约为 1 km×1 km)。以上数据均通过 ArcGIS 预处理, 将空间分辨率调整至 1 km×1 km, 行列数、范围一致, 地理坐标系均为 D_WGS_1984, 投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_46N。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 是非参数检验统计, 用于评估时间序列变化的显著性^[30]。其统计检验统计量 Z 值计算公式如下

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}, & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

式中, n 为数据量; x_i 为第 i 个值, x_j 为第 j 个值 ($j > i$)。

本方法采用显著性水平 $\alpha = 0.05$, $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$ 。

1.3.2 Mann-Kendall 耦合 Sen's Slope 趋势检验

使用 Sen's Slope 斜率估计估算研究区域 $NDVI$ 的际年变化^[31]。Sen's Slope 斜率估计是估算多年 $NDVI$ 时间序列的所有连续数据组合的斜率的中位数, 公式如下

$$\text{Slope} = \text{median} \left(\frac{n \sum_{i=1}^n (i + A_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n A_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \right) \quad (3)$$

式中, $Slope$ 为像元回归方程的斜率, 如果 $Slope > 0$, 则 $NDVI$ 呈上升趋势, 否则, 呈下降趋势; A_i 为第 i 年的 $NDVI$ 的中位数; n 为研究的时间长度。

当 $Z \geq 1.96$ 且 $Slope > 0$ 时为明显改善趋势; 当 $0 < Z < 1.96$ 且 $Slope > 0$ 时为轻微改善趋势; 当 $Z \leq -1.96$ 且 $Slope < 0$ 时为严重退化趋势; 当 $-1.96 \leq Z < 0$ 且 $Slope < 0$ 时为轻微退化趋势。

1.3.3 Pearson 相关性分析

皮尔逊相关系数用来反映两个随机变量之间的线性相关程度^[32], 用于样本时记作 r , 计算公式如下

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中, r 为皮尔逊相关性系数; n 为样本数量; X_i 、 Y_i 分别为变量 X 、 Y 对应的 i 点观测值; \bar{X} 为 X 样本平均数; \bar{Y} 为 Y 样本平均数。

当 $r > 0$ 且 $P < 0.05$ 时为显著正相关; 当 $r > 0$ 且 $P > 0.05$ 时为弱正相关; 当 $r < 0$ 且 $P < 0.05$ 时为显著负相关; 当 $r < 0$ 且 $P > 0.05$ 时为弱负相关^[33]。

1.3.4 偏最小二乘法结构方程模型

偏最小二乘法结构方程模型 (PLS-SEM) 是一种先验结构方程模型, 可用于量化显性变量和潜在变量之间的相互关系和路径系数^[34]。PLS-SEM 由测量模型和结构模型组成。测量模型探讨了潜变量与显变量之间的线性关系, 可以将其描述如下

$$x_{pq} = \lambda_{pq} \xi_q + \epsilon_{pq} \quad (5)$$

式中, λ_{pq} 为与第 q 块中第 p 个显变量相关的载荷和误差项; ϵ_{pq} 为测量模型中的不精确度。

结构模型估计潜在变量之间的关系可以描述如下

$$\xi_j = \sum_{i \neq j} \beta_{ij} \xi_i + \zeta_j \quad (6)$$

式中, β_{ij} 为第 i 个外生变量与第 j 个内生变量相关的路径系数; ζ_j 为内在关系的误差。

为了评估本研究中路径系数的显著性, PLS-SEM 由 Smart PLS 4.0 软件利用自举法创建, 样本为 18 000。使用三个标准来评估模型拟合, 即决定系数 (R^2)、斯通-盖瑟斯系数 (Q^2) 和拟合优度 (GOF), 如表 1 所列。具体来说, R^2 评估整体模型拟合度,

Q^2 评估模型对内生潜变量的预测相关性, GOF 估计整体模型质量^[11]。

表 1 PLS-SEM 评价标准

Table 1 PLS-SEM evaluation criteria

判断标准	数值	意义
R^2	>0.67	变量的拟合强
	>0.33	变量的拟合适中
	>0.19	变量的拟合弱
Q^2	>0.00	值越大精度越高
GOF	<0.10	模型的整体拟合差
	>0.10	模型的整体拟合弱
	>0.25	模型的整体拟合中等
	>0.36	模型的整体拟合强

为了定量分析气候、地形和人类因素对植被动态的影响, 本文采用偏最小二乘法结构方程模型(PLS-SEM)进行分析, 模型主要考虑的变量有降水量、气温、海拔、坡度、人均 GDP、人口密度。许多人类活动都可能对植被变化产生影响, 例如农业生产活

动、工业活动、资源开发、环境污染等, 其中大多指标无法定量衡量。因此, 本文选用人口密度和 GDP 两个既可量化又能从一个侧面反映人类活动的指标, 对澜沧江流域植被变化进行分析与讨论。针对不同宏观地形尺度, 将研究区分为云南段与青海和西藏段两部分进行模拟, 计算 1998 年、2003 年、2008 年、2013 年和 2018 年云南段与青海和西藏段的 PLS-SEM 结果。具体来说, R^2 表明模型拟合在合理的范围内, 所有变量的 Q^2 值均为正, 这显示出内生潜在变量具有良好的预测相关性, GOF 指标证明模型的总体质量是可以接受的。

2 结果分析

2.1 NDVI 时空变化

对澜沧江流域及不同区域上的 NDVI 做趋势分析, 结果如图 2 所示。依据研究区 1998—2020 年植被的逐月变化过程及我国的气候变化特点, 将研究

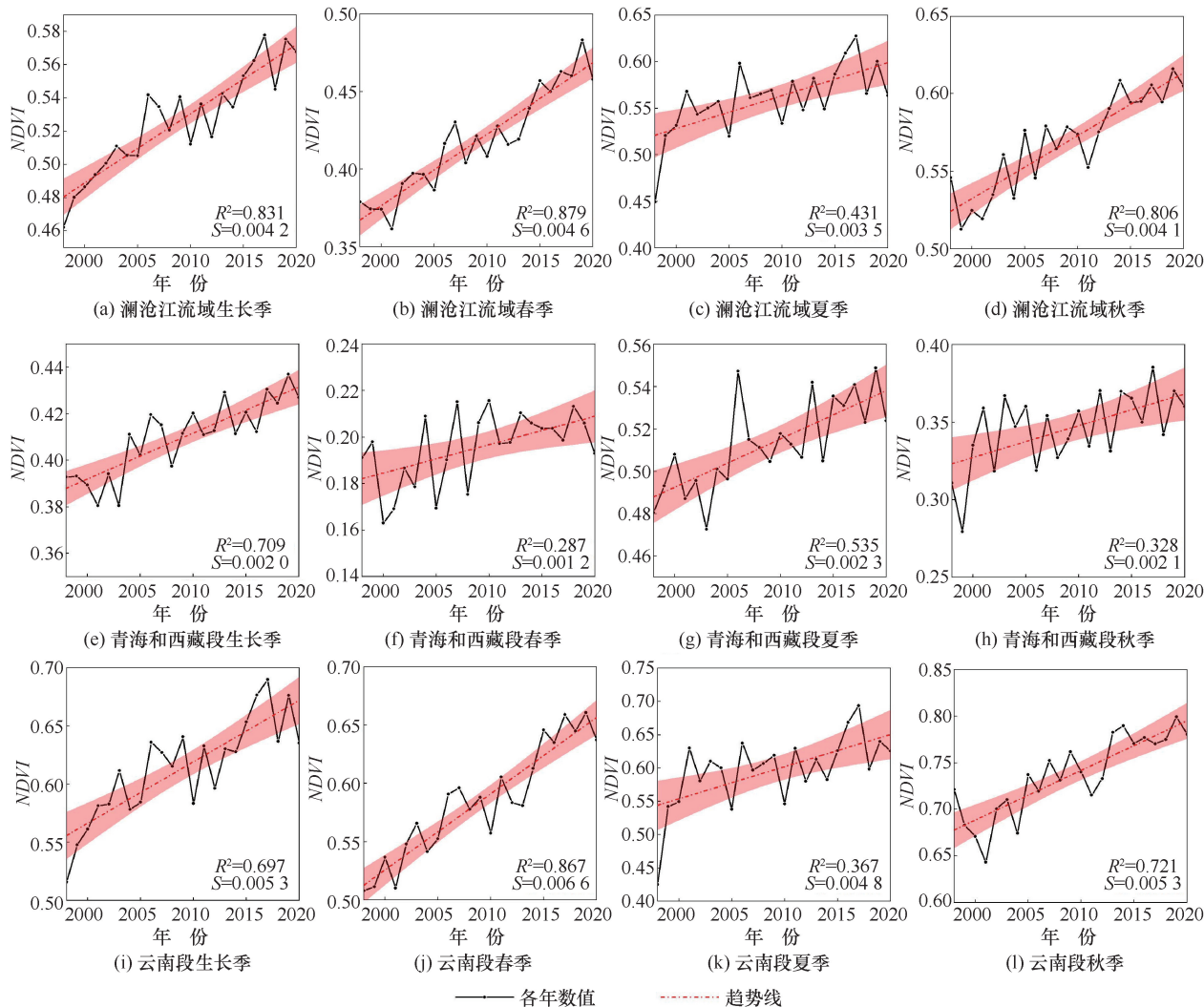


图 2 1998—2020 年澜沧江流域 NDVI 变化趋势

Fig. 2 Change trend of NDVI in Lancang River Basin from 1998 to 2020

区内植被变化划分为四个不同的季节, 具体为生长季(4—9月)及春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)。不同季节 *NDVI* 的变化趋势存在显著差异。根据线性趋势, 澜沧江流域植被生长季呈显著增长趋势($Z = 194.97$), 年变化速率为 $0.0042/a$, 春、夏、秋三季 *NDVI* 也均呈现显著增长(Z 值分别为 194.97 、 126.97 和 182.97), 年变化速率分别为 $0.0046/a$ 、 $0.0035/a$ 、 $0.0041/a$, 变化速率最快季节为春季, 夏季的变化速率最低。由于生长季(4—9月)并没有全部覆盖春季(3—5月)和秋季(9—11月)的所有时间段, 所以对于生长季 *NDVI* 增长的贡献, 主要考虑春季和夏季中变化速率最大的季节, 因此, 澜沧江流域生长季 *NDVI* 的增长可能来源于春季的 *NDVI* 增长。

由于澜沧江流域地形复杂和垂直高差悬殊, 因此, 本文针对不同宏观地形尺度(青海和西藏段与云南段)分别进行了 *NDVI* 的趋势分析。青海和西藏段生长季年变化速率为 $0.0020/a$, 春、夏、秋三季 *NDVI* 变化速率分别为 $0.0012/a$ 、 $0.0023/a$ 、

$0.0021/a$, 变化速率最快的季节为夏季, 春季的变化速率最低。青海和西藏段生长季 *NDVI* 的增长可能来源于夏季的 *NDVI* 增长; 而云南段生长季年变化速率为 $0.0053/a$, 三季变化速率分别为 $0.0066/a$ 、 $0.0048/a$ 、 $0.0053/a$, 变化速率最快季节为春季和秋季, 夏季变化速率相对最低, 云南段生长季 *NDVI* 的增长可能来源于春季的 *NDVI* 增长。整体上看, 云南段的变化趋势与澜沧江流域一致, 而青海和西藏段与澜沧江流域略有差别。

通过 Mann-Kendall 耦合 Sen's Slope 趋势检验, 分析了澜沧江流域 1998—2020 年不同季节 *NDVI* 变化趋势, 结果如图 3 所示, 其变化统计如表 2 所列。生长季、春季、夏季和秋季的改善占比分别为 88.51% 、 80.90% 、 86.41% 和 88.43% , 总体上显示出以改善为主的趋势。澜沧江流域生长季 *NDVI* 空间趋势以明显改善为主。在春季, 澜沧江流域以显著改善趋势为主, 少部分轻微退化区域集中在青海和西藏段。而到了夏季, 澜沧江流域主要以轻微改善趋势为主, 退化区域散乱分布。秋季的澜沧江流域以显著改

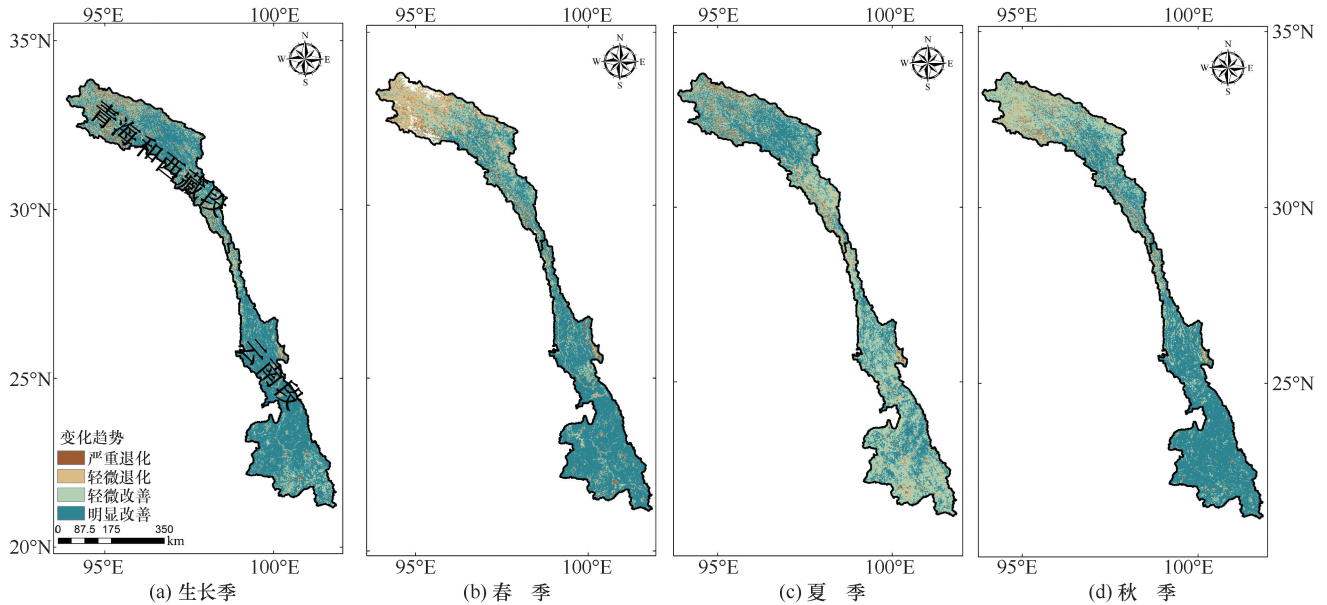


图 3 澜沧江流域 *NDVI* 时空变化趋势

Fig. 3 Temporal and spatial variation trend of *NDVI* in Lancang River Basin

表 2 澜沧江流域 *NDVI* 空间趋势变化统计

Table 2 Statistics of spatial trend change of *NDVI* in Lancang River Basin

时段	区域改善占比			区域退化占比		
	明显改善	轻微改善	合计	严重退化	轻微退化	合计
生长季	69.56	18.95	88.51	3.01	8.49	11.49
春季	62.14	18.76	80.90	3.41	15.68	19.10
夏季	43.12	43.29	86.41	2.38	11.21	13.59
秋季	62.89	25.54	88.43	1.69	9.88	11.57

善为主, 少量的退化区域分布在青海和西藏段, 其空间分布格局特征与生长季相似。总体来看, 严重退化的占比在所有季节均未超过 5%, 明显改善的占比均未低于 40%。

2.2 降水量和气温时空变化趋势

澜沧江流域 1998—2020 年各季降水量变化趋势如图 4 所示。不同季节降水量的变化趋势存在显著差异。根据线性趋势, 澜沧江流域降水量在生长季 ($Z=-72.97$) 呈现显著下降趋势, 年平均降水量为 780.93 mm, 年变化速率为 -3.676 mm/a , 春、夏 (Z 值分别为 -102.97 和 -14.97) 两季降水量呈现显著降低趋势, 秋季 ($Z=-0.94$) 降水量呈现微弱降低趋势, 年平均降水量分别为 163.15 mm、522.42 mm、253.1 mm, 年变化速率分别为 -3.029 8 mm/a 、 -0.845 8 mm/a 、 -0.247 mm/a , 其降低速率最快的

季节是春季, 最慢的是秋季。由此可知生长季的降水量来源为夏季, 降水量的减少可能来自春季的减少。

在不同宏观地形尺度的降水量趋势分析中, 青海和西藏段生长季年平均降水量为 526.66 mm, 年变化速率为 -1.205 mm/a 。春、夏、秋三季年平均降水量分别为 100.93 mm、351.07 mm、135.13 mm, 年变化速率分别为 -0.192 mm/a 、 -3.148 5 mm/a 、 1.532 5 mm/a , 降水量最多为夏季, 春秋两季降水量都低, 降水量变化速率最快为夏季, 最慢为春季。青海和西藏段生长季降水量可能来源为夏季, 降水量的降低可能是夏季造成的; 而云南段生长季年平均降水量为 970.13 mm, 年变化速率为 -1.205 mm/a , 三季年平均降水量分别为 209.78 mm、645.81 mm、309.42 mm, 年变化速率分别为 -5.062 3 mm/a 、 -0.212 4 mm/a 、 -1.740 7 mm/a , 年平均降水量最多的是夏季、最

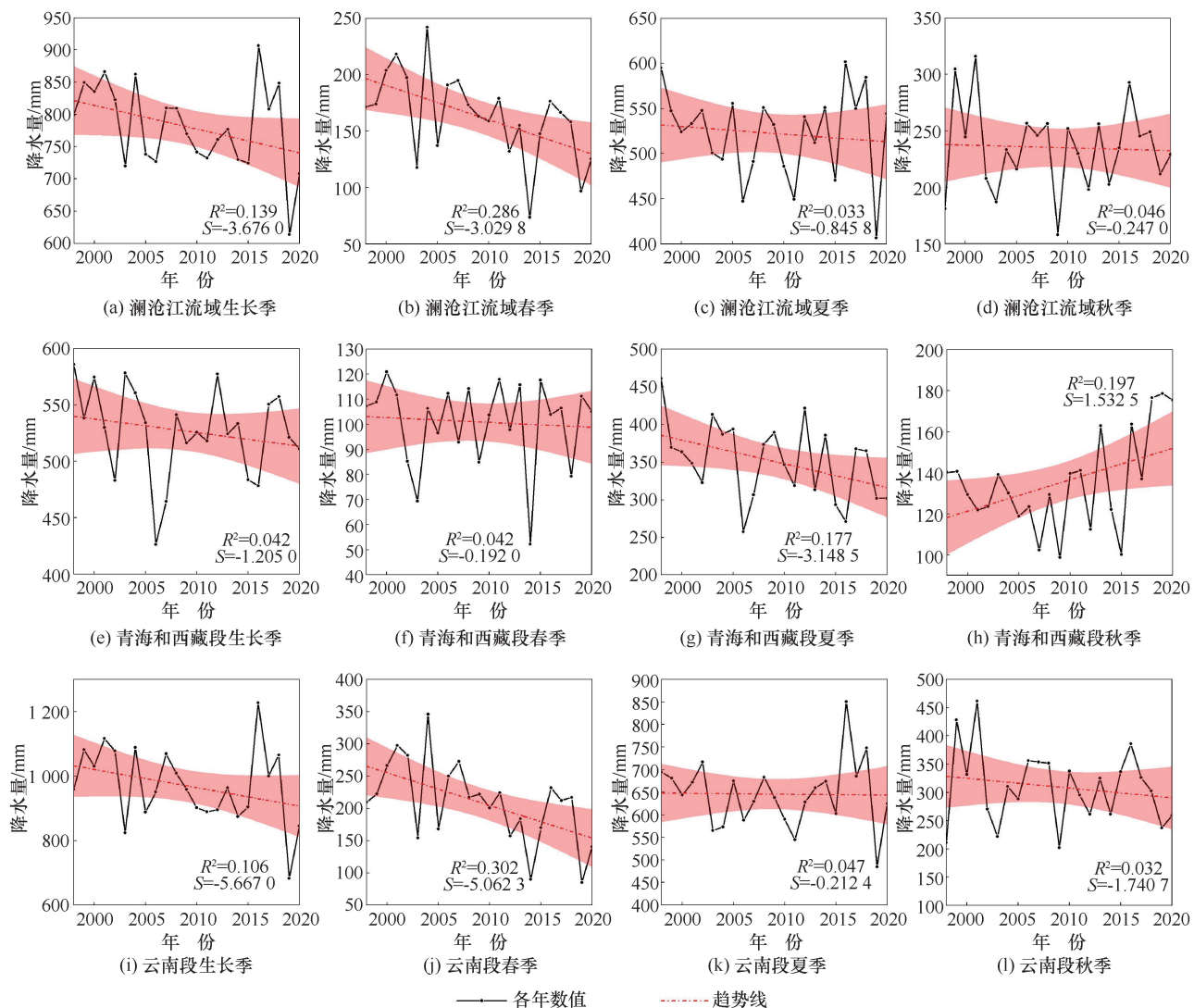


图 4 澜沧江流域年降水量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of annual precipitation in Lancang River Basin

少的是春季, 变化速率最低的是春季、最快的是夏季, 云南段生长季降水量主要来源为夏季, 生长季降水量的减少可能是春季的降低。整体上看, 云南段的变化趋势与澜沧江流域一致, 而青海和西藏段与澜沧江流域区别较大。

澜沧江流域 1998—2020 年各季节气温变化趋势如图 5 所示。各季节气温变化趋势存在显著差异。根据线性趋势, 澜沧江流域气温生长季 ($Z = 74.97$) 呈现显著增长趋势, 年变化速率为 $0.0188\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 春、夏、秋 (Z 值分别为 28.97 、 64.97 和 62.97) 三季气温也均呈现显著增长趋势, 年变化速率分别为 $0.0106\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.0154\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.0224\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 变化速率最快季节为秋季, 春季的增长速率最低。

青海和西藏段生长季气温年增长速率为 $0.0179\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 春、夏、秋三季 $NDVI$ 变化速率分别为 $-0.0001\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.0223\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.0331\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 变化

速率最快的是秋季, 春季的变化速率最低, 青海和西藏段生长季气温的增长可能来源于夏季的气温增长。整体上看, 青海和西藏段的变化趋势与澜沧江流域更为相似, 云南段与澜沧江流域区别更大。

云南段生长季气温年变化速率为 $0.0087\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 三季变化速率分别为 $0.0210\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.0201\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 、 $0.0154\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 变化速率最快季节为春季, 秋季变化速率相对较低, 云南段生长季气温的增长可能来源为春季的气温增长。整体上看, 青海和西藏段气温的变化趋势与澜沧江流域更为相似, 云南段与澜沧江流域区别更大。

2.3 NDVI 与降水量和气温的相关分析

为了进一步分析澜沧江流域生长季 $NDVI$ 与降水量和气温的关系, 本文利用 Pearson 相关性分析, 得到澜沧江流域 $NDVI$ 与降水量和气温的空间相关关系 (见图 6 和图 7), 区域平均值相关系数如表 3 所列。

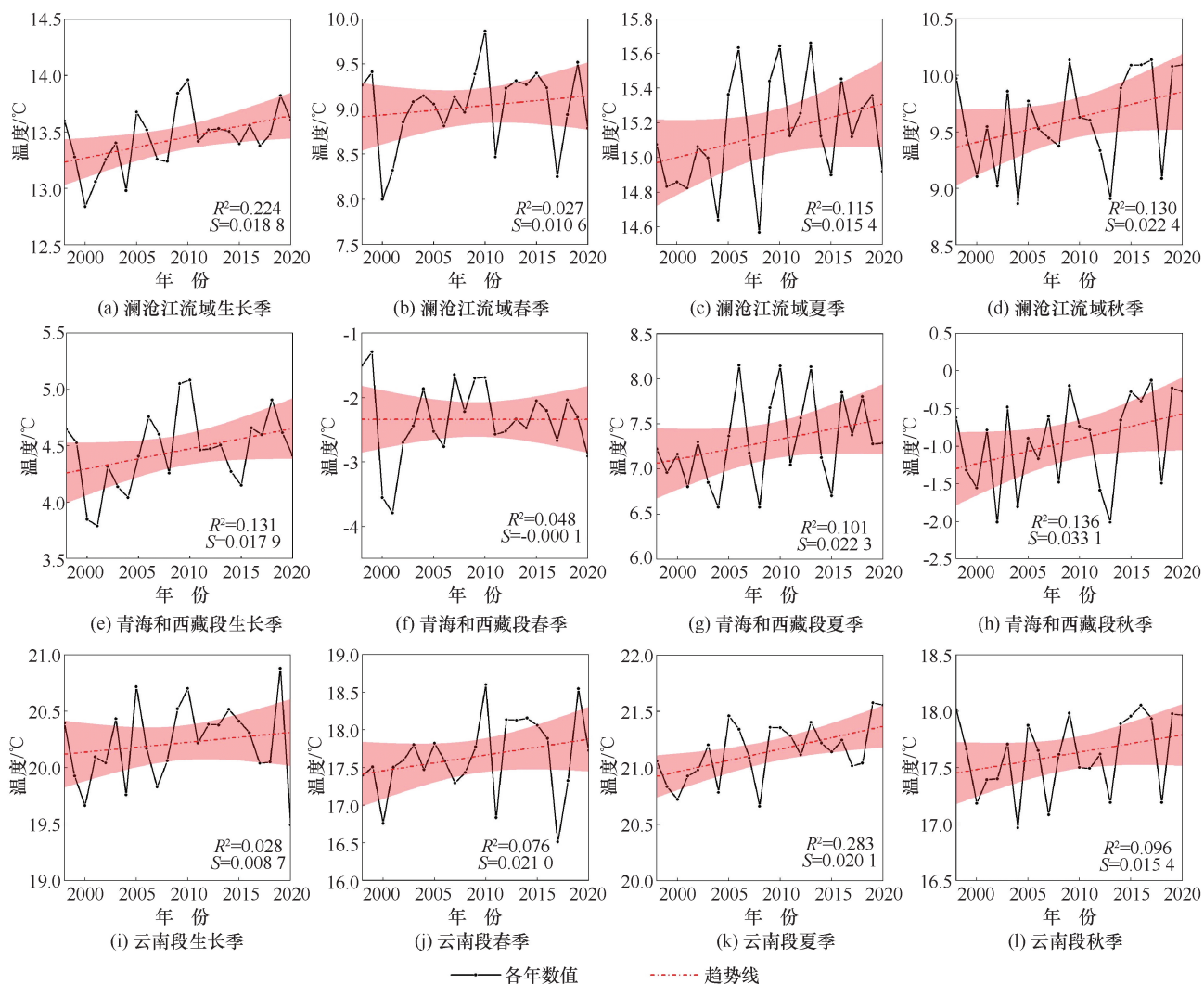


图 5 澜沧江流域年平均气温趋势变化

Fig. 5 Trend change of annual average temperature in Lancang River Basin

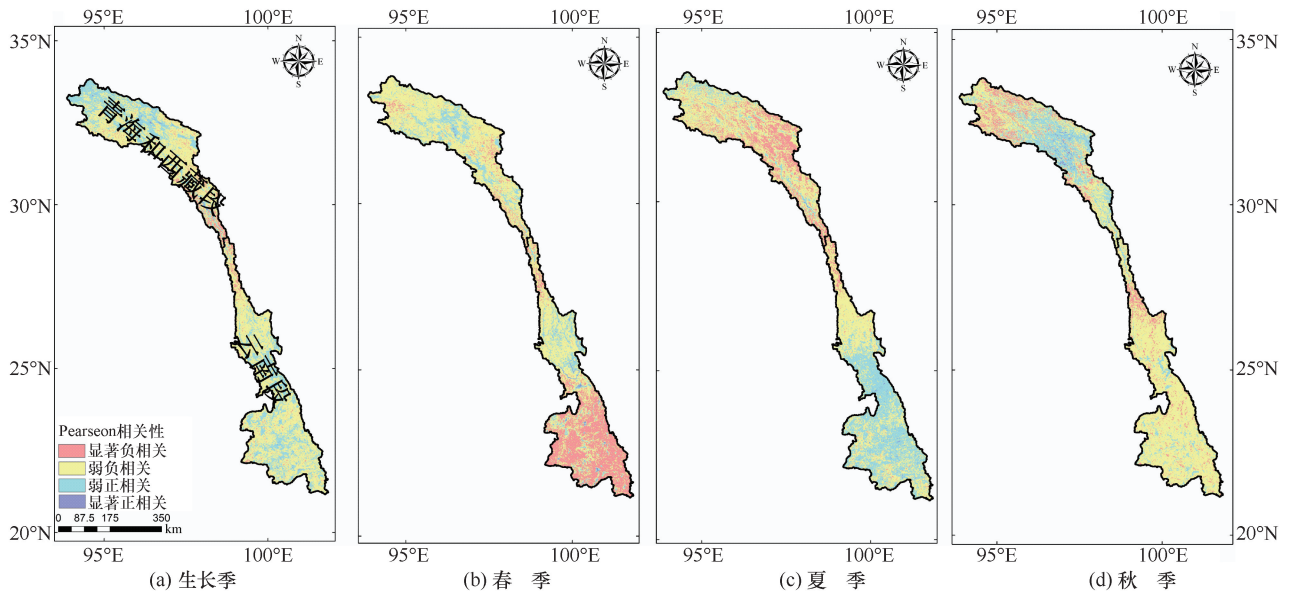


图 6 降水量和 NDVI 的 Pearson 相关性空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of Pearson correlation between precipitation and NDVI

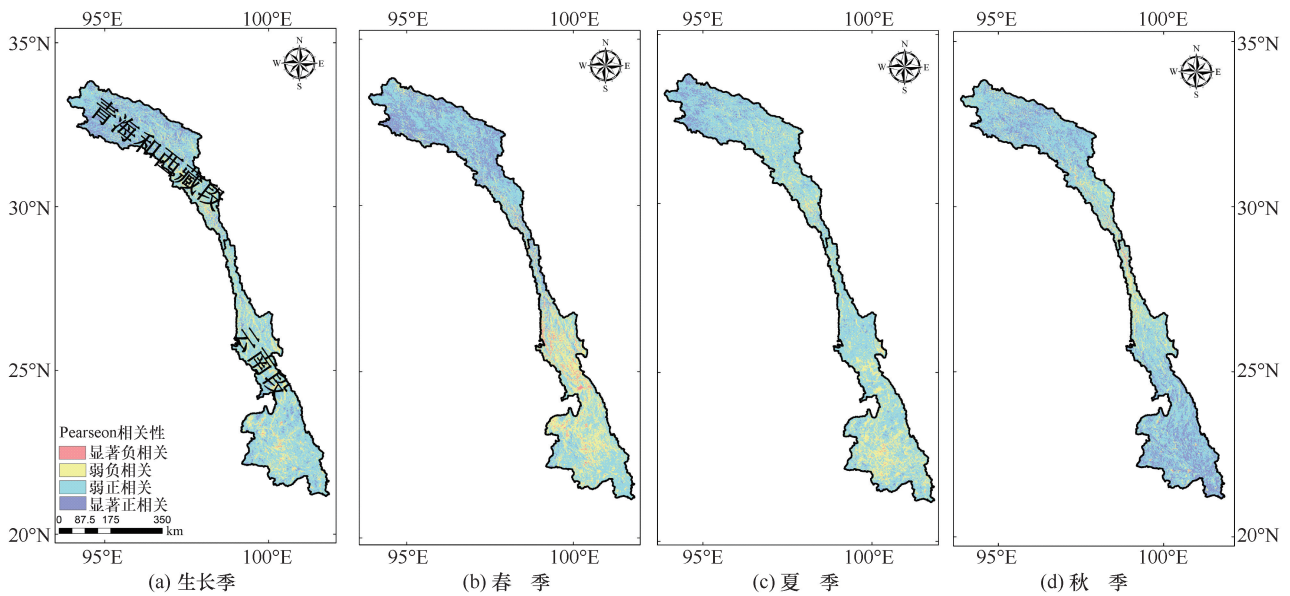


图 7 气温与 NDVI 的 Pearson 相关性空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of Pearson correlation between air temperature and NDVI

表 3 澜沧江流域 NDVI 与降水、气温的皮尔逊相关系数值

Table 3 Pearson correlation coefficient between NDVI and precipitation and temperature in Lancang River Basin

区域	相关系数	生长季	春季	夏季	秋季
澜沧江流域	R_{NDVI-P}	-0.371	-0.501*	-0.362	-0.274
	R_{NDVI-T}	0.382	0.184	0.209	0.504*
青海和西藏段	R_{NDVI-P}	-0.330	-0.183	-0.719**	-0.034
	R_{NDVI-T}	0.544**	0.651**	0.478*	0.490*
云南段	R_{NDVI-P}	-0.185	-0.486*	-0.068	-0.384
	R_{NDVI-T}	0.163	0.104	0.193	0.463*

注: R 为皮尔逊相关系数; * 代表 $P \leq 0.05$, ** 代表 $P \leq 0.01$ 。

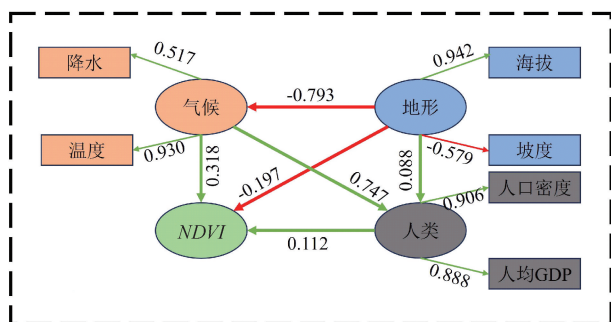
结果显示, NDVI 与降水量主要呈现出弱负相关关系, 而 NDVI 与气温则呈现弱正相关关系。生长季 NDVI 与降水量以弱负相关为主, 其区域占比为 65.54%, 显著正负相关区域占比为 5.49%; NDVI 与气温以弱正相关为主, 其区域占比为 63.55%, 显著正负相关区域占比为 17.13%。生长季的 NDVI 变化受气温影响程度更大。春季 NDVI 与降水量以弱负相关为主, 其区域占比为 56.42%, 显著正负区域占比为 28.91%, 显著区域占比远高于生长季; NDVI 与气温

以弱正相关为主, 其区域占比为 50.60%, 显著正负区域占比为 23.86%, 略高于生长季。春季 *NDVI* 的变化受降水量和气温的显著影响程度相似, 降水量略高。夏季 *NDVI* 与降水量以弱负相关为主, 其区域占比为 54.31%, 显著正负区域占比为 14.86%; *NDVI* 与气温以弱正相关为主, 其区域占比为 68.12%, 显著正负区域占比为 10.19%。夏季 *NDVI* 的变化受降水量和气温的显著影响程度相似, 降水量略高。秋季 *NDVI* 与降水量以弱负相关为主, 其区域占比为 67.78%, 显著正负区域占比为 13.21%; *NDVI* 与气温以弱正相关为主, 其区域占比为 59.98%, 显著正负区域占比为 29.99%。秋季 *NDVI* 的变化主要受气温的影响。综上所述, 气温是影响澜沧江流域植被 *NDVI* 更主要的气候因子。

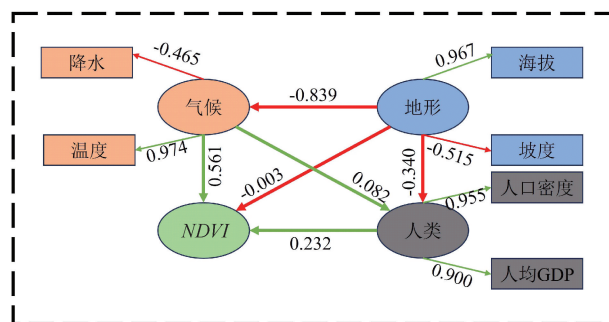
2.4 偏最小二乘法结构方程模型分析

利用偏最小二乘法结构方程模型分析澜沧江流域

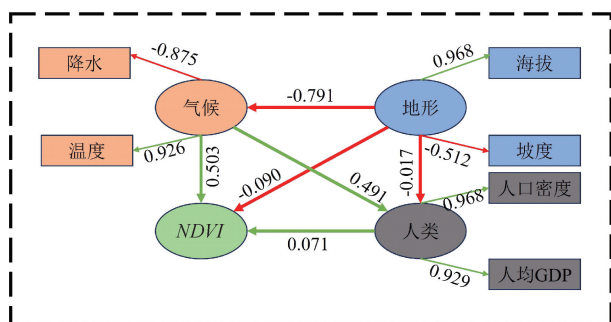
气候因子、地形因子、人类活动因子与植被 *NDVI* 的因果关系, 模型路径系数如图 8 所示, 其余关键指标如表 4 所列。在青海和西藏段, 气候因子和人类活动因子对植被的生长均为正面影响, 路径系数范围分别为 0.276~0.712 和 0.071~0.260; 而地形因素的影响则是正负相间, 路径系数范围在 -0.250~0.104, 影响程度最大的年份为 2019 年, 路径系数为 -0.250, 影响程度最小的年份为 2003 年, 路径系数为 0.024。气候对青海和西藏段植被生长的影响呈波动状, 路径系数从 1998 年开始增长到 2002 年达到峰值(路径系数为 0.712), 然后下降到 2011 年为低值(路径系数为 0.303), 之后又呈现波动状, 到 2019 年为最低值(路径系数为 0.276)。而地形对植被生长的影响恰好与气候相反, 在气候对 *NDVI* 的路径系数为高值时, 地形对 *NDVI* 的路径系数为低值, 气候对 *NDVI* 的路径系数为低值时, 地形对 *NDVI* 的路径系



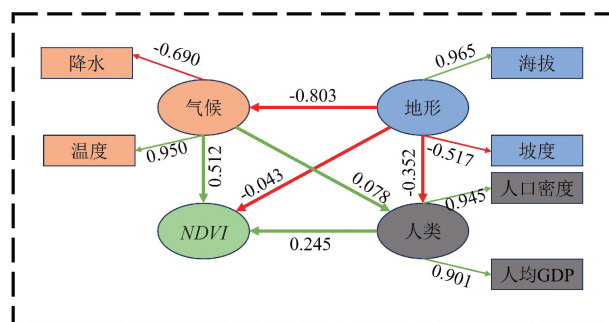
(a) 青海和西藏段1998年



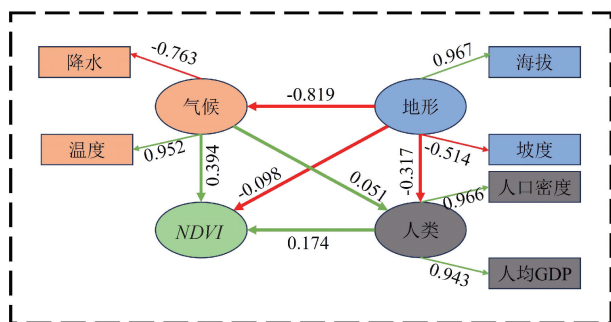
(b) 青海和西藏段2003年



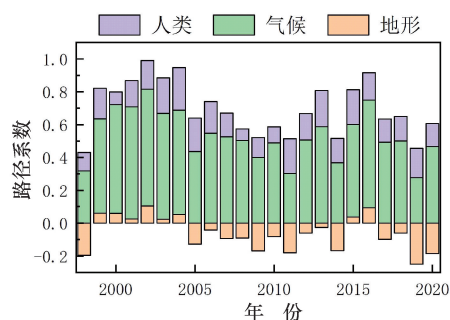
(c) 青海和西藏段2008年



(d) 青海和西藏段2013年



(e) 青海和西藏段2018年



(f) 青海和西藏段路径系数汇总

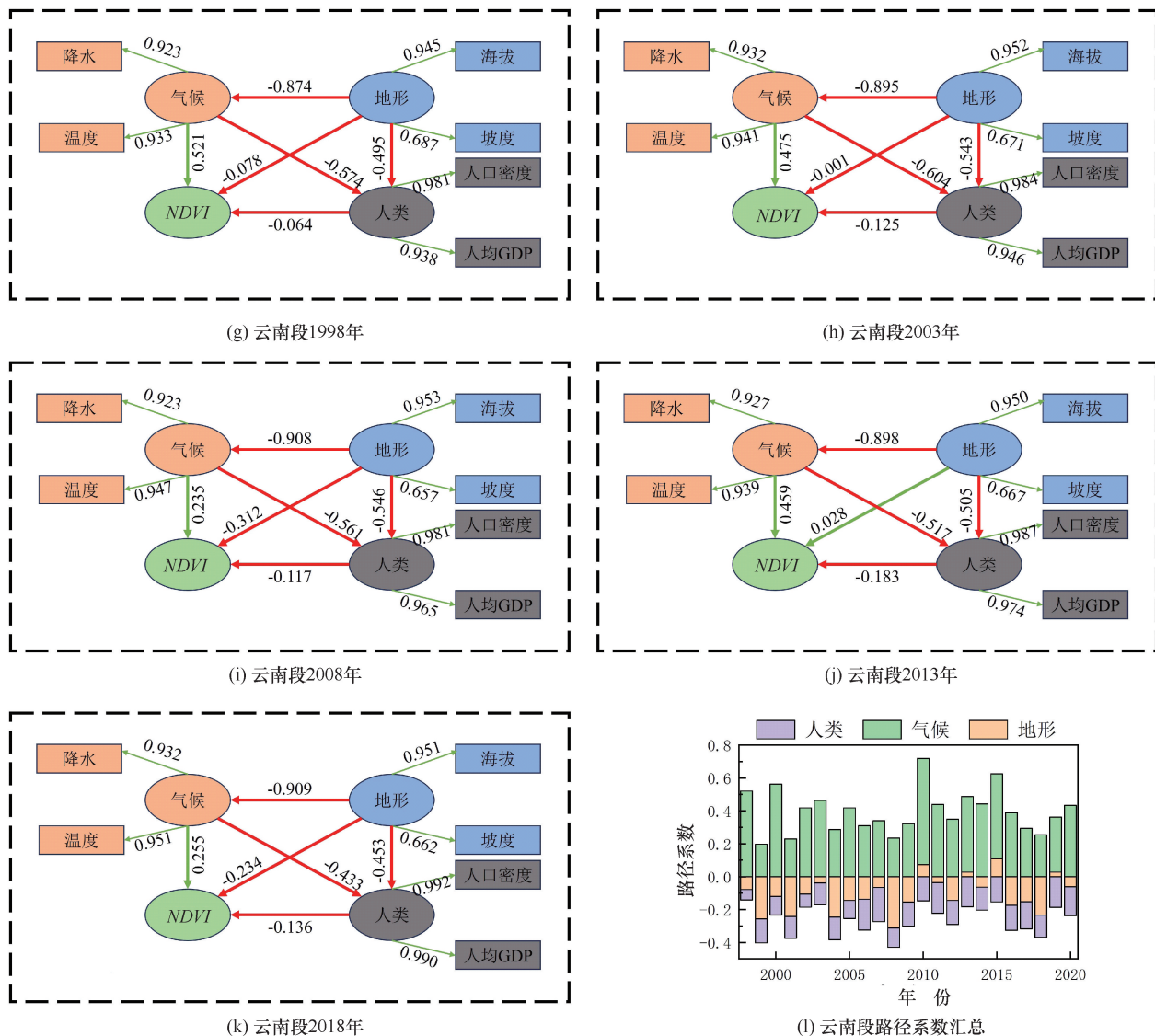


图 8 澜沧江流域各段气候、地形和人类因素对植被动态的 PLS-SEM 分析结果

Fig. 8 PLS-SEM analysis results of vegetation dynamics caused by climate, topography and human factors in different sections of Lancang River Basin

数为高值。

在云南段, 气候因子对植被生长产生的影响都是正面影响, 路径系数范围为 0.198~0.644, 最高值出现在 2010 年, 最低值出现在 1999 年, 与青海和西藏段相比, 气候对植被的影响略低; 地形因子对植被生长的影响大部分为负面影响, 路径系数范围为 -0.312~0.109, 影响程度最大的年份为 2008 年, 路径系数为 -0.312, 影响程度最小的年份为 2013 年和 2019 年, 路径系数均为 0.028; 人类活动的影响均为负面影响, 路径系数范围为 -0.209~-0.064, 最高值出现在 2007 年, 路径系数为 -0.209, 最低值出现在 1998 年, 路径系数为 -0.064。

3 结果分析与讨论

3.1 气候因子对 NDVI 的影响

澜沧江流域因其地域广大, 跨越多个气候带, 南北气候差异大, 导致青海和西藏段以及云南段 NDVI 在不同季节的变化趋势与气候响应存在差异。春季 NDVI 与降水量和气温的空间相关性表现出明显的空间异质性。青海和西藏段的 NDVI 与降水量体现为弱相关关系, 云南段北部表现为弱负相关关系, 而云南段南部则显示出显著的负相关关系。与此相反, NDVI 与气温在大部分区域呈现出正相关关系, 特别是在青海和西藏段以及云南段北部, 存在大面积的显著正相关区域。这种现象可能是由于春季青海和西

表 4 PLS-SEM 的评估

Table 4 Assessment of the PLS-SEM

青海和西藏段						
评估指标	类型	1998	2003	2008	2013	2018
R^2	气候因子	0.629	0.704	0.626	0.645	0.671
	人类活动	0.446	0.269	0.254	0.174	0.129
	NDVI	0.384	0.467	0.379	0.458	0.312
Q^2		0.245	0.379	0.322	0.360	0.285
p	气候因子 NDVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	人类活动 NDVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	地形因子 NDVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GOF		0.312	0.176	0.249	0.199	0.225
云南段						
评估指标	类型	1998	2003	2008	2013	2018
R^2	气候因子	0.764	0.801	0.824	0.807	0.828
	人类活动	0.177	0.173	0.228	0.153	0.136
	NDVI	0.357	0.356	0.401	0.333	0.345
Q^2		0.282	0.202	0.272	0.142	0.210
p	气候因子 NDVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	人类活动 NDVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	地形因子 NDVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
GOF		0.408	0.444	0.413	0.439	0.400

藏段的降水量以降雪形式出现, 虽然降水增加, 但植被无法充分吸收水分, 而雪融化过程会吸收大量热量, 导致季节更替带来的气温增高不明显, 甚至可能下降, 从而延缓该地区的植被复苏^[35]。同时, 云南南部受到气候模式改变的影响, 表现为气温增高和降水量减少, 而 NDVI 增加。这是因为春季气温回升, 持续的变暖会促进植被生长^[18]。澜沧江流域水量充沛, 现状情况下土壤含水量完全能够支撑植被生长的需水要求, 降水的少量减少尚未阻碍植被的生长, 因此呈现降水的减少植被增加的现象^[19-37]。

夏季 NDVI 与降水量和气温的显著相关关系主要分布在青海和西藏段。此时, NDVI 与降水量呈弱负相关, 与气温呈弱正相关。这种气候变化对处于寒带气候的青海和西藏段的植被生长产生了更明显的影响。由于这些地区原本的气候条件就较为严苛, 任何微小的气候变量变化都可能对植被生长产生显著效应。因此, 夏季降水量的减少和气温的升高在这种特殊地理环境下, 对植被生长的影响尤为突出^[38]。在云南段出现这种现象的原因与春季相同。

秋季 NDVI 与降水量以弱负相关关系为主, NDVI 与气温呈现大面积的显著正相关关系。整体来看, 澜沧江秋季流域气温的升高有利于植被的生长。虽然云南段降水量有微弱的减少, 但是相对较为充沛的降水量并未对植被的生长产生抑制作用。

植被生长趋势及其对气候因子的响应关系在不同的时空尺度存在差异^[39]。从降水和气温对植被的影

响来看, 降水对植被的生长有直接的影响, 如果降水不足, 水分蒸发大于降水, 便会导致当地整体水量降低, 对植物的生长极为不利^[40]。然而, 目前澜沧江流域呈现出降水量减少的情况, 但是植被并未减少, 这说明降水的减少尚未影响到植物生理层面。其次, 温度也对植被的生长有显著影响。适当增温一般会促进植物的生长, 因为较高的温度能够促进植物对矿质元素的吸收, 增加植物体对养分含量的积累, 进而促进植物的生长和发育。然而气温的升高还可能影响植被的水分条件^[41]。如果气温过高, 会导致蒸发量增大, 使得植物生长所需的水分无法得到满足, 对植被的生长产生不利影响。目前澜沧江流域气温显著增长, 在一定程度上为区域内植被的增长提供强大动力。但同时也需要加大澜沧江流域下垫面保护, 防止由于气温升高导致土壤蒸发增强, 无法满足植物生长所需的水分, 因此导致植被生长减缓或退化现象。

3.2 气候、地形和人类因素对植被动态的定量影响

青海和西藏段气候因素和人类因素对植被的生长均为正面影响, 而地形因素的影响则是正负相间。值得注意的是, 在该地区的气候因素中, 降水的径流系数明显较低且出现负值, 这表明降水在青海和西藏段对植被的影响力较低。出现这种结果的原因可能是, 青海和西藏段海拔高、气温低, 降水主要以降雪的形式出现, 其对植被的生长没有帮助^[42]。由于人口稀少, 人类活动对植被的负面影响较小, 且人类活动的大方向以保护环境为主, 因此出现人类活动对植被生

长的正面影响。而气候因素对植被生长的正面影响可能是由于适应恶劣气候条件的植被种类较多^[31]。另外,地形因素的影响可能是由于该地区地形复杂,不同地形对植被生长的影响不同,导致地形因素的权重出现正负相间的情况。

云南段气候因素对植被生长产生的都是正面影响,地形因素的影响大部分为负面影响,人类因素的影响均为负,这是一个合理的模拟结果。在植被生长过程中,气温的升高和降水量的增加会加快光合作用速率和蒸腾作用,从而促进植被快速增长^[21]。地形因素的影响主要体现在海拔越高,气温越低,降水量越少,这会抑制植被生长;同时,坡度大的地方也不适宜植被的生长^[32]。在云南段偶有地形因素对植被的直接影响大于气候因素对植被的直接影响的情况,这可能是因为当年气候变化情况与地形的变化几乎一致,导致地形因素与 *NDVI* 之间的路径系数更为显著。至于人类因素对植被生长带来的微弱负面影响,可能归因于云南省大力发展旅游业所引发的环境压力。

总体来看,在澜沧江流域,气候因素是直接影响植被生长的主要因素,青海和西藏段以及云南段气候因素对 *NDVI* 的多年影响路径系数分别为 0.515 和 0.385。而地形因素则通过调节气候因素间接影响植被生长,地形因素对植被生长的直接影响力几乎可以忽略不计,青海和西藏段以及云南段地形因素对 *NDVI* 的多年影响路径系数分别为-0.060 和-0.109。人类因素对植被生长的直接影响较低,青海和西藏段以及云南段人类因素对 *NDVI* 的多年影响路径系数分别为 0.163 和-0.145。目前人类活动对澜沧江流域植被生长的影响较小,但是未来潜在的人类活动可能会对澜沧江流域植被动态有严重的影响,因此需要密切关注农业生产、城市化、工业活动、资源开发等人类活动^[43]。

3.3 结果讨论

Mann-Kendall 耦合 Sen's Slope 趋势检验采用非参数检验,不受异常值影响,不适用时间序列较短的数据分析,对周期性数据分析也可能出现结果偏差;PLS-SEM 模型适用于复杂模型和高维度数据,可评估变量之间的因果效应大小,其局限性存在于模型拟合度评估无法直接优化。

本研究采用 Pearson 相关分析确定植被对气候的响应关系,认为与降水相比,气温是影响澜沧江流域植被动态的主要影响因子,这与李亚飞等^[44]的研究结果一致;利用 Mann-Kendall 耦合 Sen's Slope 趋势

检验分析了澜沧江流域不同区域不同季节植被和气候因子的时空变化特征;利用 PLS-SEM 定量识别了气候因子、人类活动和地形因子对植被动态的定量影响。本研究尚未开展不同类型植被动态的分析研究,未来将进一步结合高精度数据对不同植被类型受气候、地形和人类活动的影响进行细致分析,得出一些更具针对性的结果。

4 结论

本文利用遥感数据结合气象数据与地形、社会经济数据来分析澜沧江流域 *NDVI* 的变化差异,得出以下结论。

(1)澜沧江流域生长季 *NDVI* 在时间上呈显著增长趋势,在空间上 88.51% 的地区表现为增长;春季增长最快,夏季增长最低。青海和西藏段与云南段在生长季、春季、夏季和秋季均呈现增长趋势。

(2)澜沧江流域生长季年均降水量在时间上呈降低趋势,有明显空间异质性;生长季年平均气温在时间上呈现显著增长趋势,无明显空间异质性。

(3)降水和气温对植被的作用具有显著的空间异质性且作用关系复杂,气温是影响澜沧江流域青海和西藏段的主要因素,降水是影响澜沧江流域云南段的主要因素。综合来看,气温是影响研究区的主要因素。

(4)地形因素通过调节气候因素间接影响植被生长,其平均影响量为-0.085;人类活动对植被动态的影响微弱,其平均影响量为 0.009;气候因子是影响研究区植被动态的主要因素,其平均影响量为 0.451。

参考文献(References):

- [1] CAMPS-VALLS G, CAMPOS-TABERNER M, MORENOMARTÍNEZ Á, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere [J]. *Science Advances*, 2021, 7(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc7447>.
- [2] HUANG S, HUANG Q, LENG G, et al. Variations in annual water-energy balance and their correlations with vegetation and soil moisture dynamics: A case study in the Wei River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 515-525.
- [3] HE L, GUO J B, XIONG W, et al. Sand-fixing vegetation regulates deep percolation and soil water dynamics in semiarid sandy land: Evidence from a deep percolation recorder and in-situ test [J]. *Catena*, 2023, 232: 107467.
- [4] HAO C K, DU P, REN J, et al. Halophyte *elymus dahuricus* colonization regulates microbial community succession by mediating saline-alkaline and biogenic organic matter in bauxite residue [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167140.

- [5] GENG S, SHI P, SONG M, et al. Diversity of vegetation composition enhances ecosystem stability along elevational gradients in the Taihang Mountains, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 594-603.
- [6] XU J, LIU J, GAO J. Quantitative assessment of vegetation suitability in China based on carbon-water balance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 387: 135735.
- [7] MA Y, ZUO L, GAO J, et al. The karst *NDVI* correlation with climate and its BAS-BP prediction based on multiple factors [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 1321: 108254.
- [8] YUAN Y, BAO A, JIAPAER G, et al. Phenology-based seasonal terrestrial vegetation growth response to climate variability with consideration of cumulative effect and biological carryover [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 817: 152805.
- [9] SUN L, ZHAO D, ZHANG G, et al. Using SPOT VEGETATION for analyzing dynamic changes and influencing factors on vegetation restoration in the Three-River Headwaters Region in the last 20 years (2000—2019), China [J]. *Ecological Engineering*, 2022, 183: 106742.
- [10] WANG J, ZHOU W, GUAN Y. Optimization of management by analyzing ecosystem service value variations in different watersheds in the Three-River Headwaters Basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115956.
- [11] XU B, LI J, PEI X, et al. Decoupling the response of vegetation dynamics to asymmetric warming over the Qinghai-Tibet plateau from 2001 to 2020 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119131.
- [12] FOKENG R M, FOGWE Z N. Landsat *NDVI*-based vegetation degradation dynamics and its response to rainfall variability and anthropogenic stressors in Southern Bui Plateau, Cameroon [J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, 1(3): 100075.
- [13] PRĂVĂLIE R, SÎRODOEV I, NITA I A, et al. *NDVI*-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987—2018 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108629.
- [14] CHENG H, ZHOU X, DONG R, et al. Natural vegetation regeneration facilitated soil organic carbon sequestration and microbial community stability in the degraded karst ecosystem [J]. *Catena*, 2023, 222: 106856.
- [15] HU J, LONG Y, ZHOU W, et al. Influence of different land use types on hydrochemistry and heavy metals in surface water in the lakeshore zone of the Caohai wetland, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267: 115454.
- [16] 陈晨晨, 武谦, 张占友, 等. 澜沧江中下游流域土壤侵蚀时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 11-17.
CHEN Chenchen, WU Qian, ZHANG Zhanyou, et al. Spatiotemporal change of soil erosion in the middle and lower reaches of Lancangjiang River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 11-17.
- [17] SHU G, YUAN X. Study on remote sensing monitoring forest cover by *NDVI* technique in mountain area of Lancang River basin [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 134-136.
- [18] ZHANG Z, VAN COILLIE F, DE CLERCQ E M, et al. Mountain vegetation change quantification using surface landscape metrics in Lancang watershed, China[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 31: 49-58.
- [19] HAN Z, SONG W. Interannual trends of vegetation and responses to climate change and human activities in the Great Mekong Subregion [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 38: e02215.
- [20] OUYANG W, WAN X, XU Y, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134782.
- [21] ZHU S, FANG X, CAO L, et al. Multivariate drives and their interactive effects on the ratio of transpiration to evapotranspiration over Central Asia ecosystems[J]. *Ecological Modelling*, 2023, 478: 110294.
- [22] GONG H, CHENG Q, JIN H, et al. Effects of temporal, spatial, and elevational variation in bioclimatic indices on the *NDVI* of different vegetation types in Southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110499.
- [23] XU Y, DAI Q Y, ZOU B, et al. Tracing climatic and human disturbance in diverse vegetation zones in China: Over 20 years of *NDVI* observations[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111170.
- [24] LIU X G, CHEN Y N, LI Z, et al. Greening in the middle and high latitudes in the Northern Hemisphere is determined by changes in the growth rate of natural vegetation during the growing season [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111025.
- [25] TAN J, PIAO S, CHEN A, et al. Seasonally different response of photosynthetic activity to daytime and night-time warming in the Northern Hemisphere [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 377-387.
- [26] CHENG Y, ZHAO F, WU J, et al. Migration characteristics of arsenic in sediments under the influence of cascade reservoirs in Lancang River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127424.
- [27] BIBI S, SONG Q, ZHANG Y, et al. Effects of climate change on terrestrial water storage and basin discharge in the Lancang River Basin [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 37: 100896.
- [28] 甘淑, 何大明, 袁希平. *NDVI* 在澜沧江流域山区林地覆盖遥感监测中的应用研究[J]. *林业科学*, 2001(4): 134-136.
GAN Shu, HE Daming, YUAN Xiping. Study on remote sensing monitoring forest cover by *ndvi* technique in mountain area of Lancang River Basin[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001(4): 134-136.
- [29] 袁泽申, 陈晨晨, 李伯根, 等. 澜沧江中下游流域植被 *NDVI* 时空演变特征[J]. *人民珠江*, 2022, 43(10): 104-112.
YUAN Zeshen, CHEN Chenchen, LI Bogen, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of *NDVI* in middle and lower reaches of Lancang River Basin[J]. *Pearl River*, 2022, 43(10): 104-112.
- [30] 陈四宾, 汪宏星, 1984—2021年渭河流域气温和降水时空分布特征分析[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(10): 96-105.
CHEN Sibin, WANG Hongxing. Analysis of temporal and spatial distribution of temperature and precipitation in Weihe River Basin from 1984 to 2021 [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(10): 96-105.

- [31] ZHOU Z, JIN J, YONG B, et al. Quantifying the influences of climate change and human activities on the grassland in the Southwest Transboundary Basin, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115612.
- [32] CHENG Y, YUAN Z, LI Y, et al. The influence of different climate and terrain factors on vegetation dynamics in the Lancang River Basin [J]. *Water*, 2022, 15 (1). <https://doi.org/10.3390/w15010019>.
- [33] LIANG Z, SUN R, DUAN Q. Spatiotemporal variation of *NDVI* in the Yellow River water conservation zone and its driving factors [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(9): 1717-1732.
- [34] HAIR J F JR, HULT G T M, RINGLE C M, et al. A Primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) [M]. Hongkong: Sage Publications, 2014.
- [35] 许海英, 杨超, 李清泉. 三江源国家公园生态系统服务价值的时空演变[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1881-1890.
XU Haiying, YANG Chao, LI Qingquan. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value in Sanjiangyuan National Park [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1881-1890.
- [36] 张梦雅, 马育军, 谢婷. 青海湖流域生长季土壤水分空间分布特征研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 85-95.
ZHANG Mengya, MA Yujun, XIE Ting. Spatial distribution characteristics of soil moisture during growing season in Qinghai Lake Basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(3): 85-95.
- [37] PIAO S, FANG J, JI W, ET A L. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 15: 219-226.
- [38] 狄广礼, 李新萍, 蔡铁刚, 等. 东亚五国气象干旱时空变化特征及其对植被的影响[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(11): 124-134.
DI Guangli, LI Xinping, CAI Tiegang, et al. Temporal and spatial variation of drought and the effect of drought on vegetation in East Asia [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(11): 124-134.
- [39] 梁守真, 王猛, 韩冬锐, 等. TVDI 与土壤湿度关系的多时间尺度分析与旱情监测[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 149-157.
- LIANG Shouzhen, WANG Meng, HAN Dongrui, et al. Analysis of relationship between temperature vegetation dryness index and soil moisture at multiple temporal scales and drought monitoring [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2): 149-157.
- [40] 屈柳燕, 贾绍凤, 李润杰, 等. 三江源区典型植被蒸散及水量平衡分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(3): 42-50.
QU Liuyan, JIA Shaofeng, LI Runjie, et al. Analysis of evapotranspiration and water balance of typical vegetation in the Sanjiangyuan Area [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(3): 42-50.
- [41] ZHENG Y, HAN J, HUANG Y, et al. Vegetation response to climate conditions based on *NDVI* simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 18-29.
- [42] 周雪彤, 孙文义, 穆兴民, 等. 1990—2020年三江源水源涵养能力时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(23): 9844-9855.
ZHOU Xuetong, SUN Wenyi, MU Xingmin, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of water conservation capacity in Three-River Headwaters region from 1990 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9844-9855.
- [43] 邱华, 舒皓, 高红梅, 等. 贵州省 NPP 时空动态特征及其对人类活动和气候变化的响应研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(9): 108-120.
QIU Hua, SHU Hao, GAO Hongmei, et al. Spatio-temporal dynamics of NPP and its response to human activities and climate change in Guizhou province [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(9): 108-120.
- [44] 李亚飞, 刘高焕. 澜沧江流域植被覆盖变化特征及其与气候因子的关系[J]. *资源科学*, 2012, 34(7): 1214-1221.
LI Yafei, LIU Gaohuan. Characteristics of vegetation cover changes in Lancang basin based on MODIS vegetation index products (MOD13) [J]. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1214-1221.

(责任编辑 王璐)