

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.018

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.018

郝成元, 曾秋强. 量化极端气候指数对秦巴山区植被净初级生产力动态的贡献[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 135-143, 154.

HAO Chengyuan, ZENG Qiuqiang. Quantifying the contribution of extreme climate indices to the dynamics of net primary productivity of vegetation in the Qinba mountain area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 135-143, 154.

量化极端气候指数对秦巴山区植被 净初级生产力动态的贡献

郝成元, 曾秋强

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: [目的] 为深入了解极端气候事件对秦巴山地植被净初级生产力的影响。[方法] 以秦巴山区为例证区, 使用 1960—2023 年 161 个气象站点观测数据与 2001—2020 年 MOD17A3 数据集, 应用拟合回归、岭回归等分析方法, 研究二者时空演变和量化极端气候指数对 NPP 变化趋势的贡献量。[结果] 1) 研究区 NPP 总体发展向好, 年平均增长率为 $5.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)。2) 1960—2023 年秦巴山区极端暖事件显著增加, 极端冷事件显著减少, 而极端降水事件变化不明显。3) 冷日持续日数、冰冻日数、冷夜日数、持续干期、中雨日数、大雨日数及热夜日数的变化对 NPP 变化趋势产生积极影响, 其中冷夜日数贡献量最大; 5 日最大降水量的变化对 NPP 变化趋势产生消极影响。[结论] 研究可为气候变暖背景下秦巴山区陆地生态保育及应对极端气候事件提供数据或理论支撑。

关键词: 秦巴山区; 岭回归分析; NPP; 极端气温指数; 极端降水指数

中图分类号: P942

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0135-09

Quantifying the Contribution of Extreme Climate Indices to the Dynamics of Net Primary Productivity of Vegetation in the Qinba Mountain Area

HAO Chengyuan, ZENG Qiuqiang

(College of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: [Objective] To thoroughly investigate the effects of extreme climate events on the net primary productivity (NPP) of vegetation in the Qinba Mountain area. [Methods] Using the Qinba Mountain area as an example area, 161 meteorological station observations from 1960 to 2023 and MOD17A3 dataset from 2001 to 2020 were used, and fitted regression, ridge regression and other analytical methods were applied to study the spatial and temporal evolution of the two and to quantify the contribution of extreme climate indices to the trend of NPP change. [Results] 1) the overall development of NPP in the study area was favourable, with an average annual growth rate of $5.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (calculated by C). 2) Extreme warm events significantly increased and extreme cold events significantly decreased in the Qinba Mountain area from 1960 to 2023, whereas the changes in extreme precipitation events were not obvious. 3) Changes in the CSDI, ID, TN10p, CDD, R10, R20 and TR had a positive impact on the NPP trends, with the greatest contribution from the TN10p; changes in the Rx5day negatively affected the NPP trends. [Conclusion] The study can provide data or theoretical support for the conservation of terrestrial ecosystems in the Qinba Mountain area under the background of climate warming and for coping with extreme climate events.

Keywords: Qinba Mountain area; ridge regression analysis; NPP; extreme temperature index; extreme precipitation index

Received: 2024-10-19

Revised: 2024-10-25

Accepted: 2024-10-31

Online(www.cnki.net): 2025-01-14

收稿日期: 2024-10-19

修回日期: 2024-10-25

录用日期: 2024-10-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(U22A20566)

第一作者: 郝成元(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事自然地理综合研究。E-mail: haocy@hpu.edu.cn

通信作者: 郝成元(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事自然地理综合研究。E-mail: haocy@hpu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

世界气象组织(WMO)发布的《2023年全球气候状况》^[1]报告显示,2023年是有气温记录以来最热的1 a,2013—2023年也是有气温记录以来最暖的10 a,在全球升温大趋势下,极端降水事件和极端暖事件的增加及极端冷事件的减少,突出极端气候比平均气候对气候变化更加敏感^[2-4]。极端气候事件可能在最初发生数年后对植物产生遗留影响,频发的极端气候事件对陆地生态系统造成严重和不可逆转的破坏^[5-6]。

植被是陆地生态系统中至关重要的组成部分,对于调节全球碳平衡、维护全球气候稳定具有不可替代的作用^[7]。植被净初级生产力是指植物呼吸后剩余的固碳量,代表生态系统的1个关键整合过程,是评估生态系统可持续性、区域生态系统功能和生态系统稳定性的关键指标^[8]。国内外已有学者^[9-10]证实气候因素是NPP变化的主要驱动因素,但随着区域气候变暖加剧和极端气候事件增加,造成不同时空尺度下NPP对极端气候的响应产生显著差异^[2,11]。其中我国学者已对国内众多地区如印江河流域^[9]、松花江流域^[12]、商洛地区^[13]、砭砂岩区^[14]、内蒙古地区^[15]、云南山地^[16]及黄河流域^[17]等不同时空尺度下NPP对极端气候的响应进行分析,均发现受区域环境不同的影响,NPP对极端气候的响应存在显著地域性差异。尽管我国极端气候事件变化显著,也有众多学者深入研究了我国不同地区植被对极端气候事件的响应机理,但对中部地区尤其是南北过渡带内植被对极端气候的响应还少有系统的研究。

秦巴山区作为我国南北过渡带主体,不仅是一个完整的地理、地貌单元,还是中国大陆上最重要的地理-生态过渡带^[18],特殊的地理位置造就该区域复杂多样且具有过渡性质的植被体系和气候类型,使气候对植被的影响更加复杂^[19]。以往研究秦巴山区NPP的影响因素多集中在经纬度、海拔、坡向、植被类型及平均气候等方面^[20-22],而关于极端气候对NPP影响的研究仍然有限。为此,本文使用MOD17A3数据集和基于秦巴山区161个站点气象资料计算得到的极端气候指数,运用拟合回归、岭回归等分析方法研究秦巴山区NPP和极端气候指数的时空演变特征及量化极端气候指数对NPP变化趋势的贡献,研究结果可为气候变暖背景下秦巴山区陆地生态系统保护及应对极端气候事件等方面提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

秦巴山区边界主要参考《中国秦岭大巴山地区地貌图》^[23]。该区域位于我国中部(30°~36°N,102°~114°E),东西跨度超过1 000 km,横跨甘、陕、豫、川、鄂

及渝5省1市。整体地势西高东低,高差悬殊,地貌以丘陵为主,间有盆地、河谷、平原等;植被以暖温带落叶阔叶林和北亚热带常绿-落叶阔叶混交林为主,灌木、草地和人工植被等均有分布。特殊的地理位置和复杂的地形地势,造就秦巴山区独特的过渡性气候(图1),不仅是我国人文、地理、气候、生物等的南北过渡区,也是气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区^[18]。

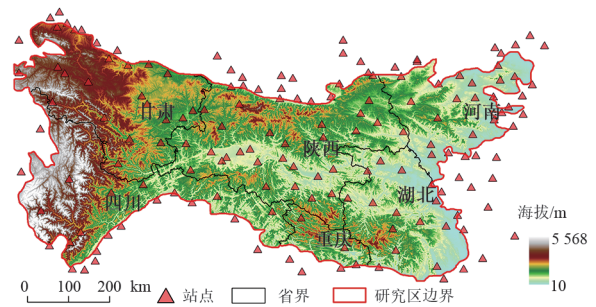


图1 秦巴山区地理位置及气象站点分布

Fig. 1 Geographic location and distribution of meteorological stations in Qinba Mountain area

1.2 数据来源

气象站点数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/metadata>),时间跨度为1960—2023年。按历年同日平均值完成对异常及缺失数据的插补,并使用Rclimdex软件计算得到逐站点极端气候指数信息。DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台发布的30 m分辨率ASTER GDEM V3数据产品(<http://www.gscloud.cn>)。NPP数据来源于美国国家航空航天局(NASA)发布的MOD17A3HGF数据产品(<https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/>),空间分辨率为500 m,时间分辨率为1 a,时间跨度为2001—2020年。本文选取8项最能体现气温和降水长时变化的事件来分析极端气候对秦巴山区植被NPP的影响(表1),同时为避免时间尺度过短造成极端气候事件存在偶然性,选取1960—2023年作为极端气候指数的研究时段。最后利用Anusplin软件完成相关数据的空间插值,并将所有数据统一采样至500 m。

2 主要研究方法

2.1 拟合回归分析

采用线性回归和滑动平均法分析变化趋势^[24]:

$$\text{slope} = \frac{\sum_{i=1}^n i \times x_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)}{\sum_{i=1}^n i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中:slope为数值变化倾向率; n 为研究总年数; x_i 为第*i*年对应的*x*。

表 1 8 项极端气候指数及定义
Table 1 Eight extreme climate indices and definitions

指数类别	缩写代码	单位	指数名称	指数定义
极端气温指数	CSDI	d	冷日持续日数	1 a 至少连续 6 d 最高气温<10% 分位数天数
	ID	d	冰冻日数	1 a 中日最高气温<0℃的天数
	TN10p	d	冷夜日数	1 a 中日最低气温<10% 分位数的天数
	TR	d	热夜日数	1 a 中日最低气温>20℃的天数
极端降水指数	CDD	d	持续干期	1 a 中最长连续无降水天数
	R10	d	中雨日数	1 a 中日降水量≥10 mm 的天数
	R20	d	大雨日数	1 a 中日降水量≥20 mm 的天数
	Rx5day	mm	5 日最大降水量	1 a 中连续 5 d 最大降水量

2.2 归因分析

多元线性回归可以用于分析气候因子对 NPP 变化的影响^[25],但由于各变量间存在交互作用和多重共线性问题,使最终结果不稳定。为有效缓解多重共线性问题,通过引入一个扰动 λI 来估计系数 b ,即使用岭回归法来分析各极端气候指数对 NPP 变化的影响^[26-27]:

$$\hat{\beta}_{ridge} = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T y \tag{2}$$

式中: $\hat{\beta}_{ridge}$ 为岭回归系数的估计值; λ 为岭参数; I 为单位矩阵; X 为极端气候指数构成的自变量矩阵; y 为 NPP 构成的因变量向量。

对每组数据做归一化处理:

$$X_m = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \tag{3}$$

式中: X_m 为各极端气候指数的归一化结果。

将 NPP 与极端气候指数数据输入岭回归模型:

$$Y_m = \sum_{i=1}^n a_i x_{im} + b \tag{4}$$

式中: Y_m 表示归一化后的 NPP 数据; x_{im} 为归一化后的极端气候指数; a_i 为回归系数。

根据岭回归系数和极端气候指数归一化趋势计

算极端气候指数对 NPP 变化趋势贡献量:

$$\eta_{c1} = a_1 \times X_{1s_trend} \tag{5}$$

$$\eta_{rc1} = \frac{|\eta_{c1}|}{|\eta_{c1}| + |\eta_{c2}| + |\eta_{c3}| + \dots} \tag{6}$$

$$\eta_{ac} = \frac{\eta_{c1}}{Y_{n_trend}} \times Y_{trend} \tag{7}$$

式中: η_{rc1} 为极端气候指数的相对贡献量; η_{ac} 为极端气候指数的绝对贡献量; X_{1s_trend} 为极端气候指数归一化后的变化趋势; Y_{n_trend} 为 NPP 归一化后的变化趋势; Y_{trend} 为岭回归预测的 NPP 变化趋势。

3 结果与分析

3.1 秦巴山区植被 NPP 时空变化特征

秦巴山区多年平均 NPP 为 29.49~1 307.77 g/m²,区域差异显著,表现为南高北低、中部高、东西低的空间分布特征。NPP 高值区主要分布在太白山、雪宝顶以东、神农架等区域,低值区主要分布在西部高原地区及伏牛山东北部等区域(图 2a)。年平均 NPP 以 5.02 g/(m²·a)(以 C 计)的变化率显著增加,NPP 变化率为-38.20~33.45 g/(m²·a)(以 C 计),整体呈北高南低、中部高、西部低的空间分布特征,尤其北部秦岭中段 NPP 增加明显(图 2b)。

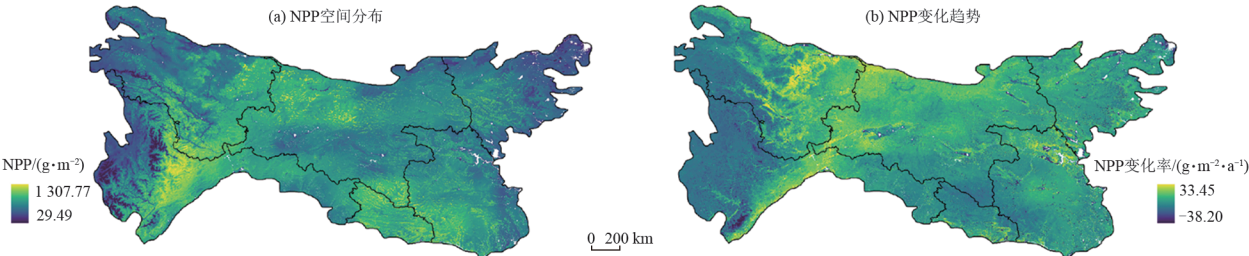


图 2 多年平均 NPP 空间分布和变化趋势

Fig. 2 Spatial distribution and trends in multi-year average NPP

3.2 秦巴山区极端气候指数时空变化特征

3.2.1 极端气温指数时空变化特征 由图 3 可知,1960—2023 年秦巴山区极端冷事件明显减少,极端暖事件明显增加。CSDI、ID 及 TN10p 平均每 10 a 减少 0.7、0.4、1.4 d,TR 平均每 10 a 增加 1.9 d。CSDI、ID 及 TN10p 在整个研究时段内均为下降趋势,且下

降速率没有明显改变;TR 变化明显,由 2000 年之前的 0 d/10 a 变为 4.8 d/10 a。

由图 4 可知,1960—2023 年秦巴山区极端冷事件在大部分区域以减少为主,而极端暖事件在大部分区域以增加为主。研究区内 CSDI 和 TN10p 均减少,尤其在西南部雪宝顶区域明显减少(图 4a、图 4c);ID

在西南部雪宝顶和北部秦岭山脉区域明显减少,而在汉中盆地及东部区域稍有增加(图 4b);TN10p 与

TR 变化率空间分布情况相反,TN10p 在低海拔平原山地明显减少,而 TR 反之(图 4c、图 4b)。

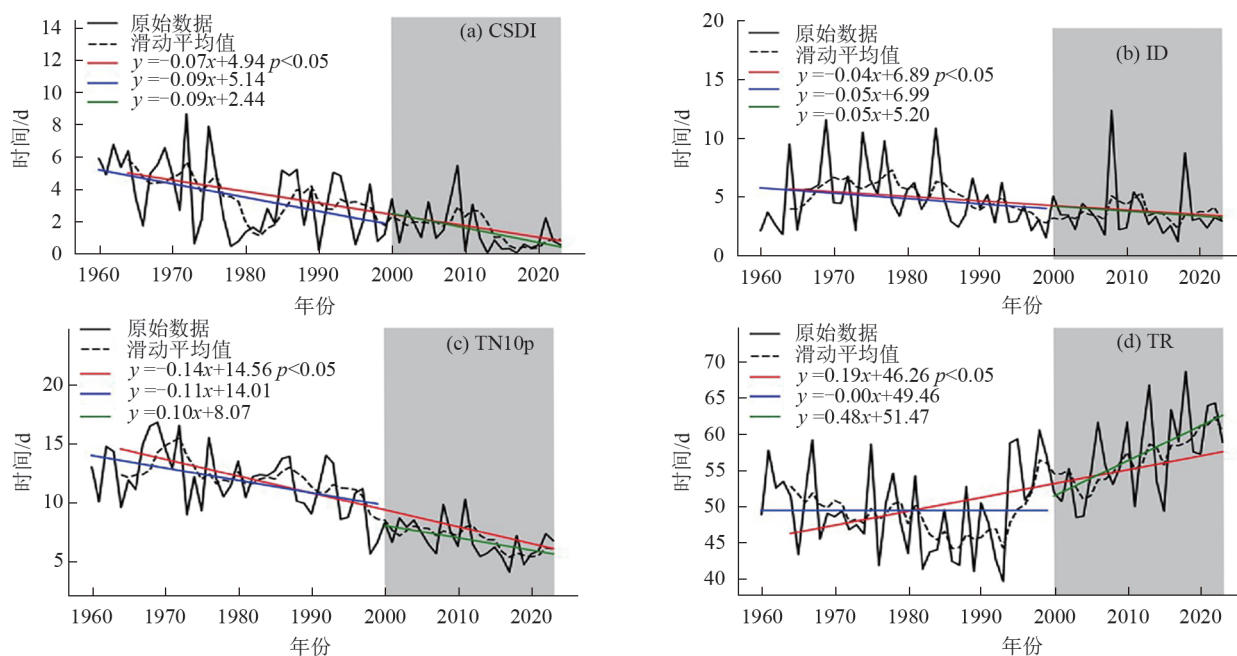


图 3 极端气温指数变化趋势

Fig. 3 Trends in extreme temperature indices

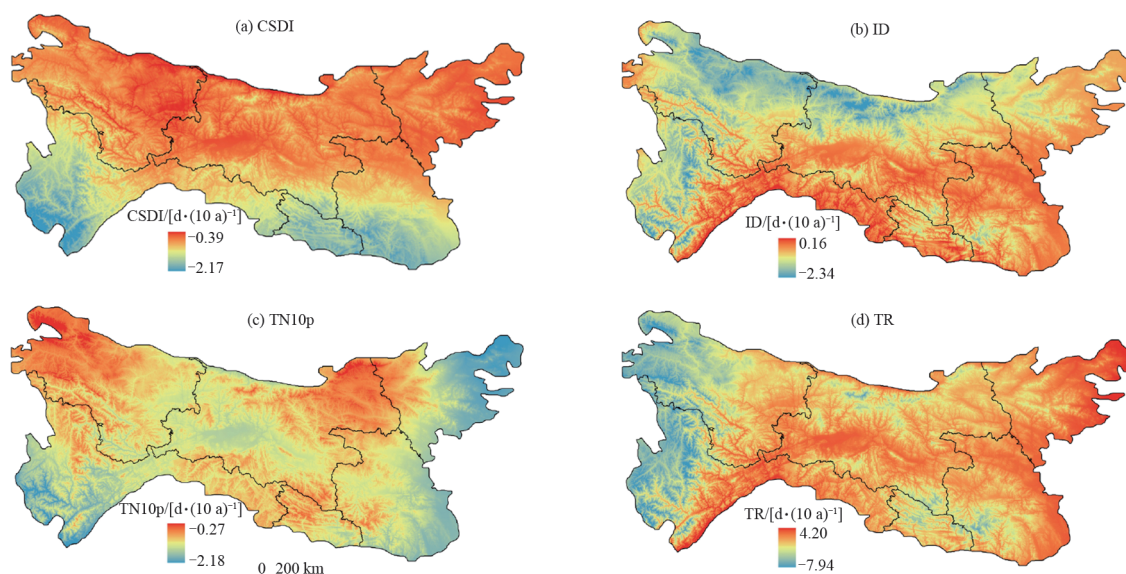


图 4 极端气温指数年际变化率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of interannual variability of extreme temperature indices

3.2.2 极端降水指数时空变化特征 由图 5 可知, 1960—2023 年秦巴山区极端降水事件整体变化不明显。其中 CDD 平均每 10 a 减少 0.2 d, 而 R10、R20 及 Rx5day 平均每 10 a 分别增加 0.1、0.2、0.5 mm。但在 2000 年之前 CDD 为上升趋势, 而其余 3 个极端降水指数为下降趋势; 2000 年以后, CDD 由平均每 10 a 增加 1.1 d 变为减少 0.5 d, R10 由减少 0.5 d 变为增加 1.5 d, R20 由减少 0.1 d 变为增加 1.2 d, Rx5day 由减

少 3.3 mm 变为增加 9.4 mm。

由图 6 可知, 除 CDD 外, 1960—2023 年秦巴山区极端降水事件在海拔较高的山区及西部地区以增加为主, 而在低海拔平原地区以减少为主, 总体变化均不明显。CDD 在高海拔山区有所减少, 而在汉中盆地等低海拔地区稍有增加, 但总体上 CDD 还是以减少为主(图 6a); R10、R20 及 Rx5day 变化率空间分布情况基本一致, 与 CDD 变化率分布情况相反(图 6b、图 6c、图 6d)。

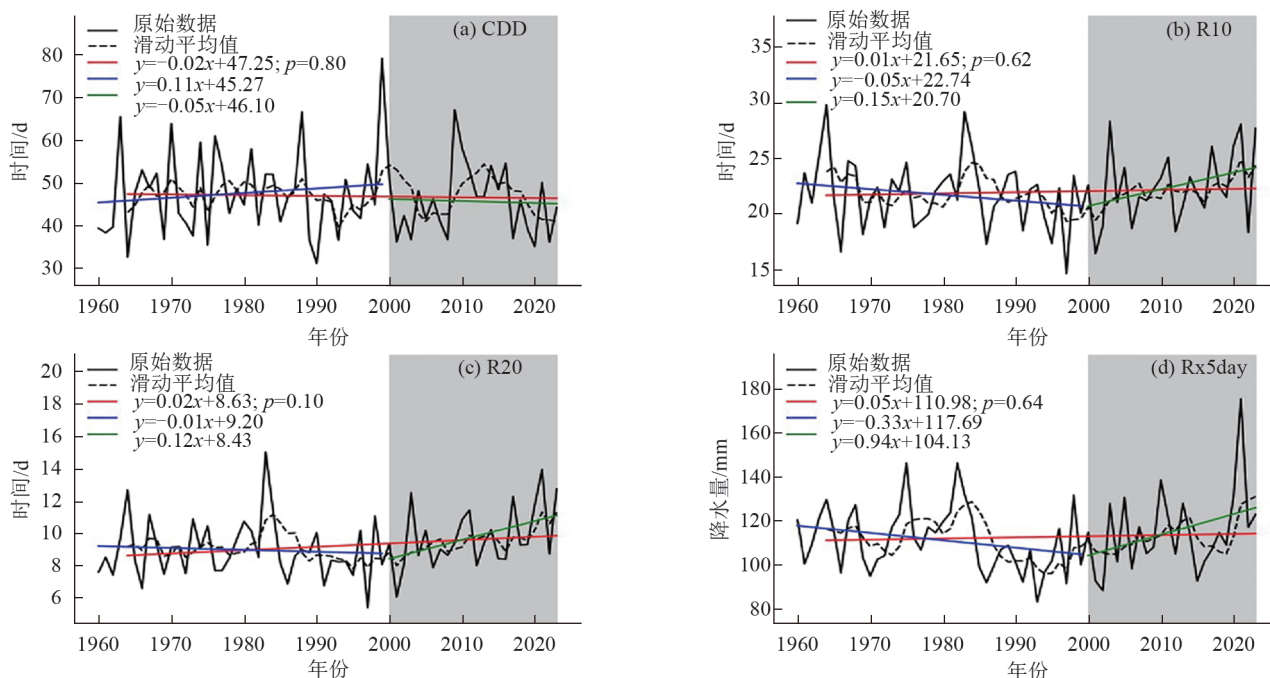


图5 极端降水指数变化趋势

Fig. 5 Trends in extreme precipitation indices

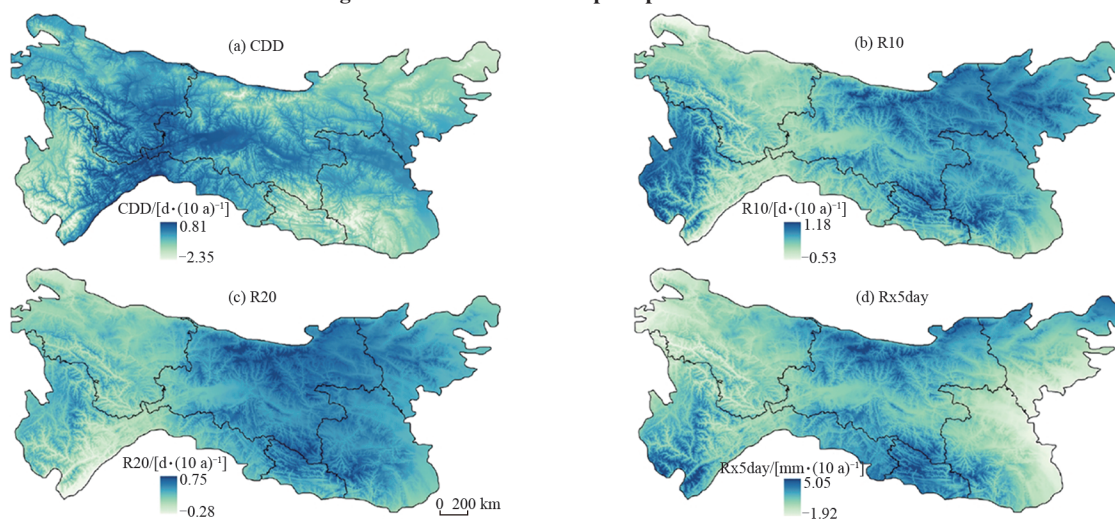


图6 极端降水指数年际变化率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of interannual variability of extreme precipitation indices

3.3 极端气候指数对秦巴山区 NPP 变化趋势贡献量分析

3.3.1 极端气候指数相对贡献量分析 极端气候指数对 2001—2020 年秦巴山区 NPP 变化趋势的贡献可以用岭回归法分析结果来解释(图 7)。平均相对贡献量由高到低排序为 $TN10p > R10 > R20 > TR > CSDI > Rx5day > CDD > ID$ 。平均相对贡献量 $> 15\%$ 的极端气候指数为 $TN10p$ 、 $R10$ 及 $R20$, 表明这 3 个极端气候指数是 2001—2020 年秦巴山区 NPP 变化的主要驱动因子, 其中 $TN10p$ (30.96%) 平均相对贡献量最大, 尤其对河南段和湖北段的 NPP 变化趋势有较明显的贡献; 而 ID (2.24%) 平均相对贡献量最小, 对秦巴山区 NPP 变化没有明显贡献。极端气温指数平均相对贡

献量总和为 51.62%, 极端降水指数平均相对贡献量总和为 48.38%, 说明 2001—2020 年秦巴山区 NPP 变化趋势对极端气温的变化更敏感。

通过统计各极端气候指数对秦巴山区 NPP 变化趋势的相对贡献量, 确定各像元上贡献量最大的主导因子(图 8)。结果表明, $TN10p$ 对秦巴山区 NPP 变化趋势贡献最大, 研究区内除重庆段 NPP 变化受 $R20$ 主导外, 其余区域 NPP 变化均受 $TN10p$ 主导, 其中河南段和湖北段受 $TN10p$ 的影响尤为显著。总体而言, 研究区西部和南部地区的 NPP 变化趋势主要受极端降水指数的影响, 而中部和东部地区的 NPP 变化趋势主要受极端气温指数的影响。

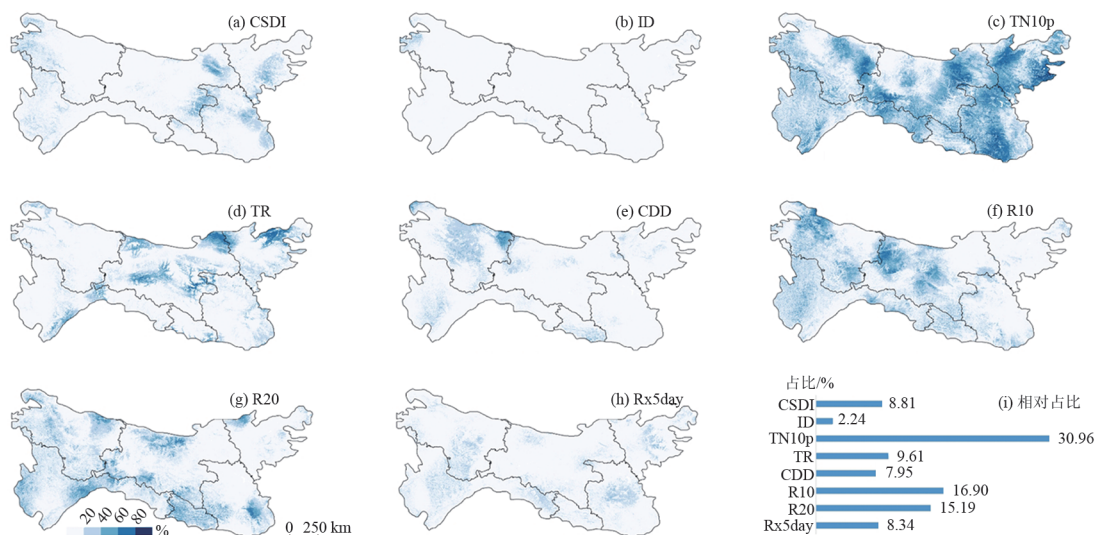


图 7 极端气候指数对 NPP 变化趋势相对贡献量空间分布及平均占比

Fig. 7 Spatial distribution and average share of the relative contribution of extreme climate indices to NPP trends

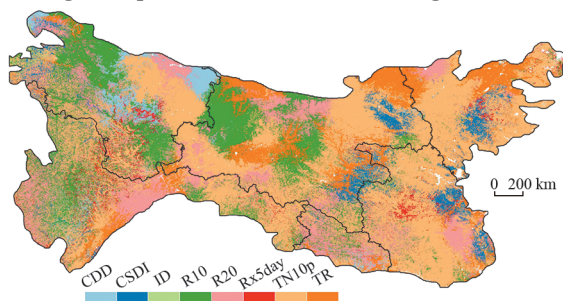


图 8 NPP 变化贡献最大的主导因子空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of dominant factors contributing most to NPP change

3.3.2 极端气候指数绝对贡献量分析 通过量化各极端气候指数对秦巴山区 NPP 变化趋势的个体绝对贡献量(图 9)。总体来看, CSDI、ID、TN10p、CDD、R10、R20 及 TR 7 个极端气候指数对秦巴山区 NPP 变化趋势产生积极影响, 而 Rx5day 对秦巴山区 NPP 变化趋势产生消极影响。极端气温指数主要对陕、豫、鄂、渝 4 个子区域的 NPP 变化趋势贡献量较大, 其中 TN10p [$2.90 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] 是极端气温指数中正向平均绝对贡献量最大的因子; 极端降水指数主要对甘、川 2 个子区域的 NPP 变化趋势贡献量较大, 其中 R10 [$1.67 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] 是极端降水指数中正向平均绝对贡献量最大的因子, 而 Rx5day [$-0.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] 是负向平均绝对贡献量最大的因子, 反映气温对秦巴山区 NPP 的正向贡献高于降水, 而过多的降水抑制秦巴山区 NPP 的增长。

4 讨论

通过分析秦巴山区 NPP 和极端气候事件的时空演变特征和量化极端气候事件对植被 NPP 的贡献, 可以确定极端气候事件对秦巴山区植被 NPP 造成的

影响。同时, 在地形地貌、植被类型及气候环境^[20-22]等因素影响下, 秦巴山区 NPP 对极端气温事件和极端降水事件的响应在东西方向上存在显著差异。

在本研究中, 秦巴山区多年平均 NPP 呈显著波动上升趋势, 已有研究成果^[7, 13, 21-22]也表现出类似变化趋势。NPP 高值区主要集中在太白山、雪宝顶以东、神农架等植被覆盖以森林为主的区域, 而低值区主要集中在西部高原地区及伏牛山东北部等区域。已有研究^[28]证实, 海拔在 3 300 m 以上地区, 气温和降水量随着海拔的升高而下降, 植物生长所需积温和水分得不到足量补充, 导致植物生长发育受阻。因此, 高原地区 NPP 相对较低, 而汉中盆地、伏牛山东北部地区城市化水平较高、人口较为密集, NPP 也相对较低。研究时段内研究区整体 NPP 以增加为主(图 2b), 得益于生态环境保护的大规模实施^[29-30], 在水市、礼县、西和县及陇南市一线 NPP 增幅尤为显著; 但城市化进程加快使得建设用地增加, 生态用地被挤占, 故导致研究区内洛阳、郑州等城市地区植被面积显著减少^[31]。由于自然环境变化、过度放牧等影响^[28], 研究区西南部高原地区 NPP 减少显著。

气温和降水是区域生态系统平衡和区域农业可持续发展的重要因素^[32-33]。全球变暖导致高温热浪事件增多, 水文循环放大, 预计将引起更加极端的气候状况^[34-35], 其特点为暖事件增多, 冷事件减少, 降水量更大, 持续和间隔时间更长。本研究所得结果与上述特点保持一致, 暖事件 TR 在研究时段内显著增加, 冷事件 CSDI、ID、TN10p 显著减少(图 3); 降水事件 CDD 减少, R10、R20、Rx5day 增加(图 5)。CSDI、ID 与已有研究^[36]结果相符, 变化幅度较大区域主要分布在西部地区, 造成该结果的原因和城市热岛、二氧化碳排放增加

有关。极端降水指数总体变化较弱,但空间异质性显著,CDD以下降趋势为主,但在甘、陕、川交界处CDD存在0.81 d/10 a上升趋势,造成原因与地形有关,该区

域西部为高原,北部为秦岭、南部为大巴山,阻隔水汽输送^[37]。Rx5day、R10和R20的空间分布情况(图6)也证实地形因素是秦巴山区极端降水指数的影响之一。

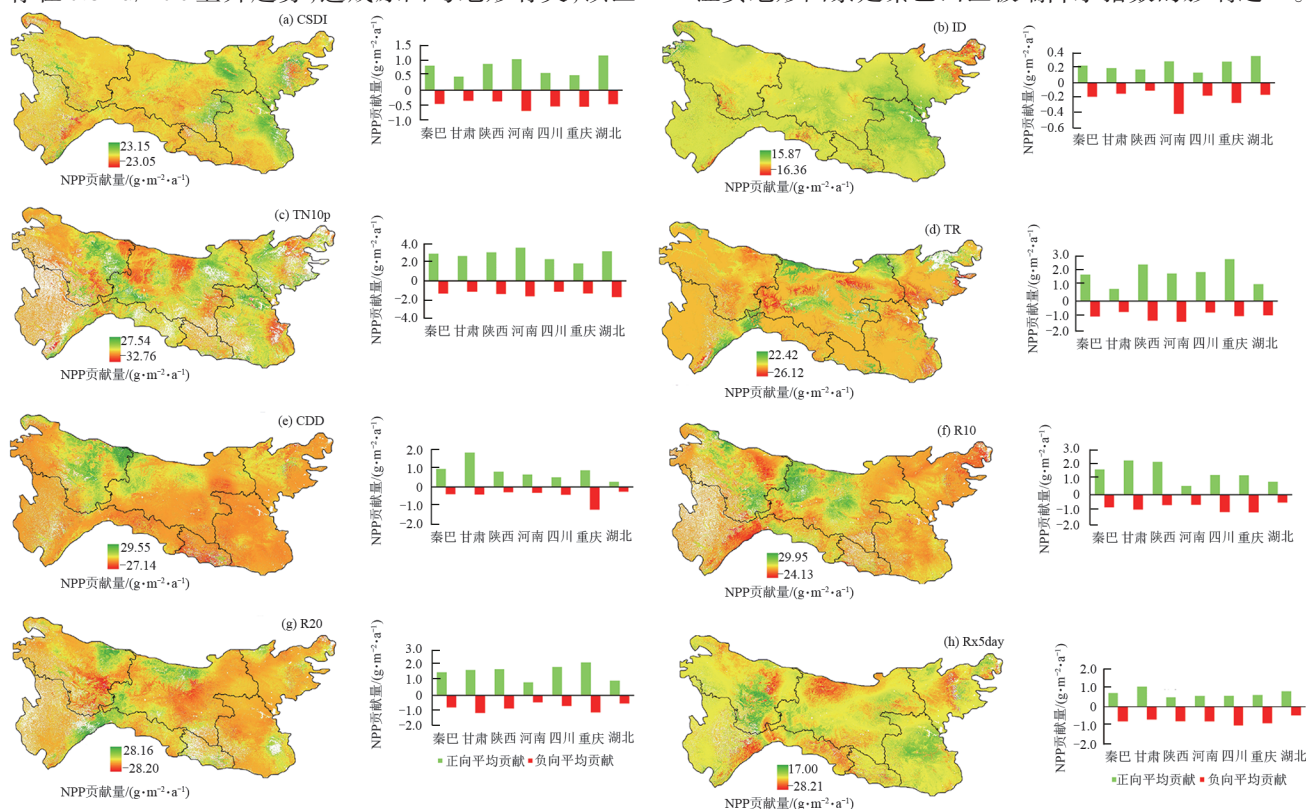


图9 极端气候指数对NPP变化绝对贡献量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the absolute contribution of extreme climate indices to NPP change

气候因素被认为是影响NPP动态和分布的主要驱动因素^[9-10]。本研究使用岭回归法系统分析极端气候指数对秦巴山区NPP的相对贡献(图7),还量化这些指数对秦巴山区NPP的个体绝对贡献(图9)。研究发现,极端气温指数是中部和东部地区NPP变化的主要贡献因子,其中TN10p贡献最突出,而极端降水指数是西部地区NPP变化的主要贡献因子,其中R10贡献最突出(图8)。原因在于冷夜日数的减少,给植被提供更长时间的满足生长条件的热量环境,同时中部和东部地区降水较为充足,且植被覆盖类型以森林为主,储水能力强,并且有研究^[38]表明,森林对气温的响应更加明显;而西部地区降水相对较少,植被覆盖类型以草地、灌木为主,整体植被扎根浅,储水能力较弱^[6]。从绝对贡献量来看,极端气温指数对陕、豫、鄂及渝4个子区域NPP变化趋势贡献量较大;极端降水指数对甘、川2个子区域NPP变化趋势贡献量较大(图9),进一步证实秦巴山区NPP对极端气温事件和极端降水事件的响应在东西方向存在显著差异。

为避免由于时间尺度过短而使极端气候事件出现偶然性,本文选取不同时间尺度的数据研究极端气候指数和NPP的时空变化特征,故一些区域NPP

与极端气候指数间的联系无法从已知结果中提取并解释。在归因分析中所使用的岭回归法,本质上是一个有偏估计模型,通过舍弃部分信息以降低精度为代价换取较为合理的拟合结果,可能导致最终结果存在一定误差。通过岭回归法缓解各因子间共线性问题,能够保证所得结果高度可信。未来研究中,应结合更多的极端气候因子研究不同时空尺度下NPP对极端气候的响应,并对响应过程和机理做全面细致的探讨。

5 结论

1) 2001—2020年秦巴山区NPP总体发展向好,年平均增长率以 $5.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 显著上升。多年平均NPP为 $29.49 \sim 1\,307.77 \text{ g}/\text{m}^2$,呈南高北低、中部高、东西低的空间分布特征,地域差异显著。

2) 1960—2023年秦巴山区极端暖事件显著增加,极端冷事件显著减少,而极端降水事件变化不明显。极端暖事件在低海拔地区增幅较大,极端冷事件在西南部及高海拔等地区减幅较大;极端降水事件在东部地区频率增加但强度减少,在西部地区频率和强度均有所增加。

3) TN10p对秦巴山区NPP变化趋势贡献量最

大。极端气温指数中平均绝对贡献量最大的因子为 TN10p [2.90 g/(m²·a)], 极端降水指数中平均绝对贡献量最大的因子为 R10 [1.67 g/(m²·a)]。CSDI、ID、TN10p、CDD、R10、R20 及 TR 对秦巴山区 NPP 变化趋势产生积极影响, 而 Rx5day 对秦巴山区 NPP 变化趋势产生消极影响。

参考文献:

- [1] 王喆, 王留群. 2023 年多项气候变化指标创下新高[J]. 生态经济, 2024, 40(5): 5-8.
WANG Z, WANG L Q. In 2023, many climate change indicators hit new highs[J]. Ecological Economy, 2024, 40(5): 5-8.
- [2] SHIOGAMA H, HAYASHI M, HIROTA N, et al. Emergent constraints on future changes in several climate variables and extreme indices from global to regional scales[J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 2024, 20: 122-129.
- [3] 郎咸梅, 隋月. 全球变暖 2℃ 情景下中国平均气候和极端气候事件变化预估[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 734-742.
LANG X M, SUI Y. Changes in mean and extreme climates over China with a 2℃ global warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 734-742.
- [4] 朱连华, 祝颖琦, 姚壹壹, 等. 全球增暖 1.5/2℃ 下中国区域极端降水的风险变化及其影响因子[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 97-109.
ZHU L H, ZHU Y Q, YAO Y Y, et al. Risk and impact analysis of extreme precipitation over China under 1.5 and 2℃ global warming levels[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(1): 97-109.
- [5] DE BOECK H J, HILTBRUNNER E, JENTSCH A, et al. Editorial: Responses to climate change in the cold biomes[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: e347.
- [6] 陈超男, 王丽园, 朱文博, 等. 秦巴山地极端气候变化特征及其对植被动态的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 276-287.
CHEN C N, WANG L Y, ZHU W B, et al. Characteristics of extreme climate change in the Qinling-Daba Mountains and its impact on vegetation dynamics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 276-287.
- [7] GE W Y, DENG L Q, WANG F, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: e145648.
- [8] MELILLO J M, MCGUIRE A D, KICKLIGHTER D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. Nature, 1993, 363: 234-240.
- [9] 吴路华, 王世杰, 白晓永, 等. 近 60 年来印江河流域极端气候演变及其对净初级生产力和归一化植被指数的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 960-981.
WU L H, WANG S J, BAI X Y, et al. Extreme climate evolution and its impact on NPP and NDVI in Yinjiang River basin in recent 60 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 960-981.
- [10] JAHELNABI A E, ZHAO J, LI C H, et al. Assessment of the contribution of climate change and human activities to desertification in Northern Kordofan Province, Sudan using net primary productivity as an indicator[J]. Contemporary Problems of Ecology, 2016, 9(6): 674-683.
- [11] PAN S F, TIAN H Q, DANGAL S, et al. Impacts of climate variability and extremes on global net primary production in the first decade of the 21st century[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(9): 1027-1044.
- [12] 贾朝阳, 郭亮, 崔嵩, 等. 松花江流域 NPP 时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 131-147.
JIA Z Y, GUO L, CUI S, et al. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2024, 22(1): 131-147.
- [13] 张善红, 李宏印, 屈妍, 等. 商洛地区植被 NPP 时空变化及其对极端气候的响应[J]. 价值工程, 2024, 43(1): 150-153.
ZHANG S H, LI H Y, QU Y, et al. Spatial-temporal variation of NPP and its response to extreme climate in Shangluo[J]. Value Engineering, 2024, 43(1): 150-153.
- [14] 王怡恩, 饶良懿. 气候因素和人类活动对砭砂岩区植被净初级生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 1982-1995.
WANG Y E, RAO L Y. Impact of climatic factors and human activities on the net primary productivity of the vegetation in the Pisha sandstone area[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 1982-1995.
- [15] 任晋媛, 佟斯琴, 包玉海, 等. 内蒙古地区极端气候变化及其对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2410-2420.
REN J Y, TONG S Q, BAO Y H, et al. Changes of extreme climate and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(8): 2410-2420.
- [16] HE Y L, YAN W B, CAI Y, et al. How does the net primary productivity respond to the extreme climate under elevation constraints in mountainous areas of Yunnan, China? [J]. Ecological Indicators, 2022, 138: e108817.

- [17] 夏冰,马鹏宇,徐聪,等.近20年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对极端天气变化的时空响应[J].水土保持研究,2023,30(2):256-266.
XIA B, MA P Y, XU C, et al. Spatiotemporal variation of NPP and its response to extreme climate indices in Yellow River basin in recent 20 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 256-266.
- [18] 张百平.中国南北过渡带研究的十大科学问题[J].地理科学进展,2019,38(3):305-311.
ZHANG B P. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone [J]. Progress in Geography, 2019, 38(3): 305-311.
- [19] 陈超男,朱连奇,田莉,等.秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].生态学报,2019,39(9):3257-3266.
CHEN C N, ZHU L Q, TIAN L, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3257-3266.
- [20] 赵芳,张久阳,刘思远,等.秦巴山地NPP及对气候变化响应的多维地带性与暖温带-亚热带界线[J].生态学报,2021,41(1):57-68.
ZHAO F, ZHANG J Y, LIU S Y, et al. Assessing the dividing line between warm temperate and subtropical zones based on the zonality discussion on multi-dimensional response of Net Primary Productivity to climate change in the Qinling-Daba Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 57-68.
- [21] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近15年植被NPP时空演变特征及自然与人为因子解析[J].生态学报,2019,39(22):8504-8515.
LI J K, YANG Y T, ZHANG H R, et al. Spatio-temporal variations of net primary productivity and its natural and human factors analysis in Qinling-Daba Mountains in the past 15 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [22] HE T, DAI X A, LI W Y, et al. Response of net primary productivity of vegetation to drought: A case study of Qinba Mountainous area, China (2001—2018) [J]. Ecological Indicators, 2023, 149: e110148.
- [23] 李佳宇,姚永慧,刘俊杰,等.秦巴山地典型垂直带带幅变化分析[J].自然保护地,2023,3(2):12-25.
LI J Y, YAO Y H, LIU J J, et al. Variation analysis of the typical altitudinal belt width in the Qinling-Daba Mountains [J]. Natural Protected Areas, 2023, 3(2): 12-25.
- [24] 申子傲,吴静,李纯斌.2000—2020年河西内陆河流域植被覆盖时空变化特征及其驱动力[J].中国沙漠,2024,44(3):119-127.
SHEN Z A, WU J, LI C B. Temporal and spatial changes of vegetation cover and its driving forces in the Hexi inland river basin from 2000 to 2020 [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 119-127.
- [25] 徐勇,郑志威,孟禹弛,等.西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究[J].环境科学,2024,45(1):262-274.
XU Y, ZHENG Z W, MENG Y C, et al. Spatio-temporal variation in net primary productivity of different vegetation types and its influencing factors exploration in Southwest China [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 262-274.
- [26] WALKER E, BIRCH J B. Influence measures in ridge regression [J]. Technometrics, 1988, 30(2): 221-227.
- [27] ZHAO Y, CHEN Y N, WU C Y, et al. Exploring the contribution of environmental factors to evapotranspiration dynamics in the Three-River-Source region, China [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: e130222.
- [28] DAI T R, DAI X A, LU H, et al. The impact of climate change and human activities on the change in the net primary productivity of vegetation-taking Sichuan Province as an example [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(5): 7514-7532.
- [29] 安乐平,蔡玖镠,白娜.天水渭河流域生态环境问题及高质量发展对策[J].中国水土保持,2022(8):10-13.
AN L P, CAI J Z, BAI N. Ecological environment issues and countermeasures for high-quality development in the Weihe River Basin in Tianshui [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(8): 10-13.
- [30] 王芳莉.基于FLUS模型的陇南市土地利用变化与模拟[D].兰州:西北师范大学,2020.
WANG F L. Land use change and simulation in Longnan City based on FLUS model [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [31] 刘忠阳,李梦夏,李军玲,等.河南省植被净初级生产力变化特征及其对气候变化的响应[J].河南农业大学学报,2021,55(1):141-151.
LIU Z Y, LI M X, LI J L, et al. Spatial-temporal changes of vegetation net primary productivity and its response to climate change in Henan Province [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(1): 141-151.
- [32] BRASWELL B H, SCHIMEL D S, LINDER E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. Science, 1997, 278: e870.
- [33] TAVOSI M, VAFAKHAH M, SHEKOHIDEH H, et al. Rainfall extreme indicators trend and meteorological drought changes under climate change scenarios [J]. Water Resources Management, 2024, 38(11): 4393-4413.
- [34] LI L, WANG L, FENG T, et al. Multi-index analysis of spatiotemporal variations of dry heat waves and humid heat waves in China [J]. Atmosphere, 2023, 14(11): e1660.

(下转第154页)

- DU S G, GE J R. The new measuring method of joint roughness coefficients[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 1999, 19(2): 10-13.
- [23] 王迪, 钱嘉鑫, 朱妮, 等. 高原鼠兔洞穴对土壤入渗的影响及机制[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 243-249.
- WANG D, QIAN J X, ZHU N, et al. Effect of plateau pika caves on soil infiltration and mechanism[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 243-249.
- [24] 董天富. 喀斯特不同土地利用方式下出露岩石对岩周土壤水分再分配的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- DONG T F. Effects of exposed rocks on soil moisture redistribution around karst under different land use patterns[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [25] 国家林业和草原局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- National Forestry and Grassland Administration. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [26] 刘畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 101-107.
- LIU C, ZHANG J J, ZHANG H B, et al. Characteristics of soil infiltration and soil quality evaluation after conversion of farmland to forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 101-107.
- [27] 舒方瑜, 董勤各, 冯浩, 等. 不同有机物料对黄土高原治沟造地土壤水分运移的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 74-79.
- SHU F Y, DONG Q G, FENG H, et al. Effects of different organic materials on water movement in gully land consolidation soil on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 74-79.
- [28] 甘凤玲, 何丙辉, 覃自阳. 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 825-837.
- GAN F L, HE B H, QIN Z Y. Effect of bedding slope on hydrodynamic parameters in typical karst valley[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 825-837.
- [29] 彭旭东. 喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土漏失过程及特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- PENG X D. Study on the process and characteristics of soil and water loss in shallow holes (cracks) on sloping land in karst plateau[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [30] LIU M X, XU X L, SUN A Y, et al. Why do karst catchments exhibit higher sensitivity to climate change? Evidence from a modified Budyko model[J]. Advances in Water Resources, 2018, 122: 238-250.
- [31] WANG F, CHEN H S, LIAN J J, et al. Preferential flow in different soil architectures of a small karst catchment[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-10.
- [32] ZHANG J, WANG S, FU Z Y, et al. Soil thickness controls the rainfall-runoff relationship at the karst hillslope critical zone in southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: e127779.
- [33] 赖坡, 程圣国, 陈勇, 等. 降雨入渗模型的研究方法综述[J]. 山西建筑, 2016, 42(26): 71-73.
- LAI P, CHENG S G, CHEN Y, et al. Review on research methods of rainfall infiltration model[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(26): 71-73.
- (上接第 143 页)
- [35] KNAPP A K, BEIER C, BRISKE D D, et al. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems[J]. BioScience, 2008, 58(9): 811-821.
- [36] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响: 解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 654-657.
- SUN Y. Impact of human activities on climate system: An interpretation of Chapter III of WG I report of IPCC AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 654-657.
- [37] WANG L Y, CHEN S F, ZHU W B, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation and its potential driving factors in China's North-South Transition Zone during 1960—2017 [J]. Atmospheric Research, 2021, 252: e105429.
- [38] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 等. 1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 823-832.
- LI M H, DU J K, LI W T, et al. Global vegetation change and its relationship with precipitation and temperature based on GLASS-LAI in 1982—2015 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 823-832.