

# 黄河上游碳储存动态归因及阈值分析

武磊, 张琨伟, 曹锦佳, 贺正, 刘雪瑛

(山西师范大学 地理科学学院, 山西 太原 030031)

**摘要:** [目的] 探讨碳储动态变化及其驱动机制, 为区域可持续发展和水土资源保护提供科学依据和方法借鉴。[方法] 以青藏高原的洮河流域和黄土高原的祖厉河流域为研究区, 探究了气候、植被和水沙对净初级生产力(NPP)的直接和间接效应, 采用弹性系数、密度分析等方法量化了不同因素对NPP的影响阈值。[结果] ①洮河和祖厉河流域NPP均值(以C计)分别为276.47, 136.86 g/m<sup>2</sup>, 空间分布差异显著。②洮河NPP受水分参量影响较大, 其次为归一化植被指数(NDVI), 气温( $T$ )和土壤侵蚀( $A$ )均呈现负效应且相对较小; 祖厉河流域NPP受NDVI和水源涵养量( $W_R$ )影响最大,  $T$ 和 $A$ 对NPP同样为负效应, 但绝对值大于洮河流域。空间上, 两个流域 $T$ 和NDVI交互后对NPP分布的解释力最强。③不同方法的阈值量化结果有所差异, 总体上洮河流域 $T$ 和 $A$ 对NPP的影响阈值更先达到, 祖厉河 $P$ , NDVI和 $W_R$ 对NPP的影响阈值率先到达。[结论] 不同生态—地理分异下的碳储动态变化驱动及阈值差异显著, 在达到“可持续”的阈值之前, 并不需要过多的人为干预, 主要通过气候方面的监测即可; 但在达到“限制性”阈值时, 有目的合理分配水资源、控制土壤侵蚀减缓河道输沙需要给予更多关注。

**关键词:** 气候; 植被; 水沙; 净初级生产力(NPP); 阈值; 洮河和祖厉河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0283-12

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 武磊, 张琨伟, 曹锦佳, 等. 黄河上游碳储存动态归因及阈值分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 283-294. Wu Lei, Zhang Kunwei, Cao Jinjia, et al. Dynamic attribution and threshold analysis of carbon storage in upper reaches of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 283-294. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.029; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.029.

## Dynamic attribution and threshold analysis of carbon storage in upper reaches of Yellow River

Wu Lei, Zhang Kunwei, Cao Jinjia, He Zheng, Liu Xueying

(School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

**Abstract:** [Objective] Carbon storage dynamics and its driving mechanism were explored aims to provide scientific basis and methodological reference for regional sustainable development as well as soil and water resource conservation. [Methods] Taking Taohe River basin in the Tibetan Plateau and Zuli River basin in the Loess Plateau as study areas, the direct and indirect effects of climate, vegetation, water and sediment on net primary productivity (NPP) were investigated. The influence threshold of different factors on NPP was quantified by means of elastic coefficient and density analysis. [Results] ① The mean NPP values (calculated by carbon) in the Taohe River and Zuli River basins were 276.47 and 136.86 g/m<sup>2</sup>, respectively, with significant spatial variations. ② In the Taohe River basin, NPP was predominantly influenced by moisture parameters ( $P$ ), followed by the normalized vegetation index (NDVI). In contrast, temperature ( $T$ ) and soil erosion ( $A$ ) had negative but relatively minor effects. In the Zuli River basin, NPP was primarily affected by NDVI and water retention ( $W_R$ ), while  $T$  and  $A$  exhibited similar negative effects, though with a greater absolute value compared to the Taohe River basin. Spatially, the strongest explanatory power for NPP distribution was observed when  $T$  and NDVI interacted in both watersheds. ③ The threshold

收稿日期: 2024-11-21

修回日期: 2024-12-23

采用日期: 2024-12-23

资助项目: 山西省自然科学基金青年基金项目“基于水沙—生态响应模式的水土流失治理优化: 以汾河中游为例”(202403021222245)

第一作者: 武磊(1994—), 男(汉族), 山西省太原市人, 博士, 讲师, 主要从事生态水文方面的研究。Email: wulei@sxnu.edu.cn.

quantification results varied across methods. In the Taohe River basin, the thresholds for  $T$  and  $A$  effects on NPP were reached earlier, whereas in the Zuli River basin, the thresholds for  $P$ , NDVI, and  $W_R$  effects on NPP were attained first. [Conclusion] The dynamics of carbon storage exhibit distinct driving forces and threshold variations under different ecological and geographical conditions. Before reaching the “sustainable” threshold, excessive human intervention is unnecessary, with climate monitoring being the primary focus. However, upon reaching the “restrictive” threshold, proactive measures such as strategic water resources allocation, soil erosion control, and mitigation of river sediment transport become essential.

**Keywords:** climate; vegetation; runoff and sediment; net primary productivity (NPP); thresholds; Taohe River and Zuli River basins

为了有效控制水土流失和恢复生态系统,中国政府在过去几十年中实施了诸多水土保持措施,取得了显著成效<sup>[1]</sup>。水沙治理的深层次目的在于生态环境保护,流域水沙问题归根结底也是生态问题,由水沙过程变化的相关研究转向区域植被和生态环境效应研究是指导黄河流域可持续发展的关键<sup>[2]</sup>。自实行退耕还林还草以来,黄河中下游植被得到有效恢复,输沙量减少的同时生态问题也得到了进一步的缓解,但与此同时区域耗水量急剧增加以至于接近水分承载力阈值<sup>[3]</sup>。因此,水沙治理与生态系统变化的互馈机制、典型生态系统的水沙、植被和生态响应等问题成为实现黄河流域生态保护和高质量发展的重要内容<sup>[4]</sup>。

碳储量作为生态系统服务的关键指标,与全球气候变化和人类活动密切相关。净初级生产力(NPP)是评估碳储存动态的基本指标,因为它不仅反映了自然环境条件下植被群落的生产能力,还可以作为陆地生态系统健康的指示器。目前,利用 NPP 探讨区域碳储存动态的研究已较为成熟, Li Wenwen 等<sup>[5]</sup>研究了黄土高原 NPP 的时空分布,发现气候对植被 NPP 的影响更强,而人类干预,特别是在退耕还林计划实施后,起到了积极作用。A. Zarei 等<sup>[6]</sup>评估了气候变化对坦桑尼亚稀树草原 NPP 的影响,认为温度和蒸散的增加是该地区 NPP 增长的主要驱动因素。类似地, Jia Lu 等<sup>[7]</sup>研究了长江经济带 NPP 的时空格局,认为温度对该区域的 NPP 影响最显著。众多研究结果显示,气候、植被以及水沙变化交互作用下的生态效应在不同流域内差异显著,是水热条件和下垫面状态共同作用的结果<sup>[8-9]</sup>。

另一个重要的问题是碳储动态的阈值识别。阈值是生态系统服务非线性变化的重要指标,阈值状态下影响因素的小幅变化可能引发研究对象出现明显改变。明确阈值存在与否并进一步进行识别是科学研究和管理实践的共同需求<sup>[10]</sup>。例如, Jia Lu 等<sup>[7]</sup>发现地形因子对长江经济带 NPP 变化具有阈值效

应。Hao Ruifang 等<sup>[11]</sup>建立了气候、土壤和植被与 NPP 之间的约束线,提出了一种可指导生态恢复的 NPP 稳定阈值范围。类似地,李雪等<sup>[12]</sup>分析了黄河流域中上游 NPP 的空间特征和驱动因素,发现干旱指数对 NPP 存在阈值效应,特别是当干旱指数超过 8 时, NPP 水平趋于稳定。

当前,黄河流域面临经济转型、乡村振兴和区域协调发展等新机遇,探究碳储动态驱动机制是“碳达峰”和“碳中和”目标背景下流域管理科学、健康和可持续的前提。黄河上游地跨青藏高原和黄土高原,地质构造发育,地层岩性复杂,水热条件和土壤基质的地带性差异明显,是研究碳储动态良好的对比平台。本文以青藏片区洮河流域和黄土片区祖厉河流域为研究区,以净初级生产力(NPP)作为碳储动态功能指标,以降水( $P$ )和气温( $T$ )指示气候变化,水源涵养(WR)和土壤侵蚀( $A$ )作为水沙指标,NDVI 作为植被指标,结合区域气候变化探究了气候/植被和水沙对碳储动态的直接和间接效应,采用弹性系数、密度分析等方法量化了不同因素对碳储动态的影响阈值。通过阐明洮河流域和祖厉河流域气候、植被、水沙等因素对碳储动态变化的时空驱动机制,展现区域生态系统响应气候变化的复杂性,为黄河流域水沙治理的生态效应提出了科学建议,为流域科学管理和实现“双碳”目标提供了支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

洮河是黄河上游第二大支流,地处青藏高原东北边缘,洮河流域面积 25,527 km<sup>2</sup>,海拔高度 3 500~4 000 m(图 1)。洮河流域虽属大陆性气候,但因受青藏高原和蒙古高原气候交替的影响,降水量高,但气温相对较低,年均降雨量为 598.08 mm,年均气温为 2.26 °C。洮河流域自上游至下游呈现高寒半湿润到温带半干旱的气候分布特征,域内植被具有明显的地带性分异规律。流域上游以高寒草甸、草地等覆被为主;中游林地

广布;下游以旱作农田和中、低覆草地为主。祖厉河为黄河右岸一级支流,地处黄土高原,属于半干旱区,降水量低但温度较高,年均降雨量为 389.06 mm,年均气温为 6.4 °C。降水是祖厉河地表径流的主要来源,主要集中在汛期,易形成洪水,且携带大量泥沙。祖

厉河流域自然植被以草本植物为主,人工林地以抗旱类灌木和乔木为主。流域内旱作农业发达,农田占地广,土壤类型主要为黄绵土、灰钙土和黑垆土等,地貌以黄土丘陵为主,也包括少量川原、台塬和起伏较小的山地<sup>[13]</sup>。

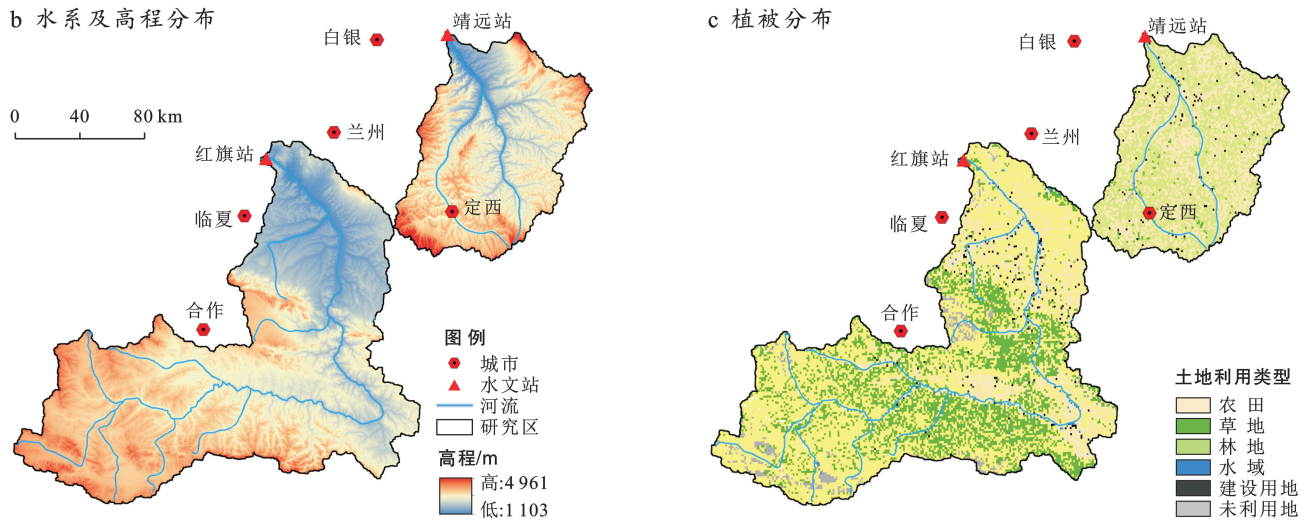


图 1 洮河和祖厉河流域的水系、高程和植被分布

Fig.1 Water system, elevation and vegetation distribution of Taohe River and Zuli River basins

## 1.2 数据

气温、降水等遥感数据采用国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)发布的中国 1 km 分辨率逐月降水量、气温数据集(1901—2023),该数据集在干旱半干旱区应用广泛,精度较高<sup>[14]</sup>。高程数据采用中国科学院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)发布的数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据,分辨率为 30 m;土壤数据采用世界土壤数据库(HWSD)1:1 000 000 的土壤空间分布以及属性数据(<http://www.ncdc.ac.cn/portal>);土地利用数据采用了中国科学院地理科学与资源研究所发布的中国土地利用现状遥感监测数据(CNLUCC)数据(<https://www.resdc.cn>),每隔 10 a 1 期,空间分辨率为 1 km;NDVI 数据采用了 NASA 发布的 MOD13Q1 产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)和 NOAA 发布的 GIMMS NDVI 产品(<http://data.tpdc.ac.cn/>),经过偏差校正进行空间分辨率的统一(1 km)和时间序列的延长(1980—2020 年)。

## 1.3 方法

1.3.1 CASA 模型 CASA 模型是光能利用率模型中计算 NPP 比较成熟的一种方法,吸收光合有效辐射(APAR)和实际光合利用效率( $\epsilon$ )是模型中决定植被 NPP 的两个因素,CASA 模型将 APAR 和  $\epsilon$  的计

算转化为对植被 NDVI 指数、降水、气温、太阳辐射以及实际蒸散发等变量的计算,为 NPP 的获取提供了便利<sup>[15]</sup>。CASA 模型的表达式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中: $NPP(x, t)$ 表示植被种类  $x$  在  $t$  月的净初级生产力; $APAR(x, t)$ 表示植被种类  $x$  在  $t$  月的光合有效辐射; $\epsilon(x, t)$ 表示植被种类  $x$  在  $t$  月的实际光能利用效率。

1.3.2 土壤侵蚀模数(A) 修订后的通用土壤流失方程(RUSLE)是经验方程 USLE 的升级版,它由美国农业部开发,作为保护规划和评估区域水土流失的工具<sup>[16]</sup>。该方程基于地球物理和土地覆盖因子的组合来估计单位地表可能的土壤流失量,公式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

式中: $A$ 为年平均水土流失量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$ ;  $R$ 为降雨和径流侵蚀因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ;  $K$ 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$ ;  $LS$ 为地形因子,其中  $L$  为坡长因子;  $S$  为坡度因子;  $C$  为植被覆盖和管理因子,范围为 0~1;  $P$  为水土保持措施因子,范围为 0~1;  $L, S, C$  和  $P$  因子均为无量纲因子。

1.3.3 水源涵养量(WR) InVEST 模型由美国资本项目组开发,主要用于模拟、预测以及权衡生态系统服务功能。InVEST 模型中的 Water Yield 模块通过

输入降水、地表蒸散发、植物蒸腾量以及根系深度等参数可以计算流域产水量,进而通过如下公式计算水源涵养量:

$$W_R = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times I_T}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{\text{sat}}}{300}\right) \times Y_i \quad (3)$$

式中:  $W_R$  为水源涵养量 (mm);  $I_T$  为地形指数;  $V$  为流速系数 (无量纲);  $K_{\text{sat}}$  为土壤饱和导水率 (cm/d);  $Y_i$  为产水量 (mm)。各参数的具体计算方法见参考文献[17]。

**1.3.4 通径分析** 通径分析是一种量化多个变量之间动态关系的有效方法,它以多元线性回归方程为基础,可以分离解释变量对响应变量的直接和间接影响,也可在自变量关系分析基础上勾画针对因变量的最佳影响路径,具有较好的辅助决策意义[18]。通过比较通径系数的绝对值大小,直接比较各个自变量对因变量的作用。本文利用通径分析在不同流域尺度下量化了降水( $P$ )、气温( $T$ )、植被(NDVI)、水源涵养(WR)和土壤侵蚀( $A$ )对碳储动态(NPP)的直接和间接效应。路径分析框架基于 SPSS Amos 软件进行构建。

**1.3.5 地理探测器** 地理探测器模型假设自变量  $X$  对因变量  $Y$  具有本质的影响,则它们之间存在类似的空间分布。相较于偏相关分析等空间驱动力分析方法,地理探测器既可以分析时变(序)因子对因变量的驱动作用,还可以分析时不变因子(相对静态如地形、土壤等)对因变量的影响[19]。因子探测器基于因变量的空间分异考察自变量对其空间分布的解释能力,用  $q$  值来度量,交互探测器用于识别不同因子之间的交互作用:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N^2 \sigma^2} \quad (4)$$

式中:  $h=1, 2, 3 \dots L$  为变量的层次;  $N_h$  和  $\sigma_h^2$  分别为  $h$  层样本的单位数和方差;  $N$  和  $\sigma^2$  表示所有样本的总单位数和方差;  $q$  为影响因子对 NPP 空间差异的解释能力,  $q \in [0, 1]$ ,  $q$  越大表示某因子的解释力越强。研究采用地理探测器对各因素对 NPP 的空间分布耦合驱动力进行了量化。

**1.3.6 弹性系数** 本文基于弹性系数分析气候( $P$  和  $T$ )、植被(NDVI)以及水沙(WR 和  $A$ )对碳储动态的影响阈值,该方法数据需求量少,计算成本低,应用广泛[20]。弹性系数为各因素变化 1 个单位带来的 NPP 变化,表征各因素对 NPP 影响的强度。通过文献过滤吸收前人分析成果[17],认为碳储动态与自变量之间的关系呈三次多项式关系,即弹性系数公式为二项

式,其顶点即为阈值。弹性系数是表征自变量的变化强度对 NPP 变化的影响,拟合函数进行求导获取。计算公式为:

$$EC = \frac{d[f(x)]}{d(x)} \quad (5)$$

式中:  $f(x)$  表示 NPP 与影响因子之间的表达函数; EC 表示  $x$  因子对 NPP 的弹性系数;  $x$  为影响因子。

**1.3.7 密度分析** 弹性系数中阈值的出现代表了自变量的变化对 NPP 变化的影响效果发生转变的值,这也是生态阈值寻找的比较常见处理方式[21]。但从对应关系来看,并非一定要出现拐点才意味着阈值的出现[22]。当样本量较大时,对应关系发生变化或者分布密度出现突变时,可能有其他因素对 NPP 的变化产生了更大影响,或是该因素对于 NPP 的效应本身发生了变化。因此本文通过散点分布密度、分布方向以及分布的形状构建了一种探究阈值的思路,与弹性系数法所计算的阈值进行了对比。密度分析的阈值评判方法为:首先通过 ArcGIS 对影响因素和 NPP 进行像元统计,获取每个像元对应数值,随后采用 Origin 进行散点密度计算并绘制密度图,将密度分布范围当作椭圆来看待,分析密度分布范围的大小;以其长轴作为密度分布的方向,分析散点拟合方向发生突变的地方;将密度的短轴与长轴的比值(轴比)作为拟合效果好坏的依据,比值越大拟合效果越差,反之则越好。结合显著性分析得到密度分布、方向和形状等出现突变的对应值即为阈值。

## 2 结果与分析

### 2.1 各要素时空分布特征

**2.1.1 各要素空间分布** 总体上,洮河流域降水明显高于祖厉河流域(图 2a),尤其是在洮河上游山区,两流域的平均降水量分别为 598.08 和 389.06 mm。降水是水源涵养的主要驱动,因此二者的空间分布较为接近(图 2d),洮河上游水源涵养较大,中下游较小;祖厉河流域水源涵养的高值区主要分布在流域中游,这可能与土壤质地有关,两流域的水源涵养均值分别为 23.65 和 10.32 mm。祖厉河流域气温明显高于洮河流域,全域平均温度大致为 2.26 °C,洮河流域内气温分异明显,全域平均温度大致为 6.87 °C。NDVI 的空间分布高值多位于洮河上游,与区域水热条件相关,洮河全域 NDVI 均值为 0.67,祖厉河流域仅为 0.38。土壤侵蚀方面洮河明显较祖厉河流域小,土壤差异可能是最主要的因素,两流域的土壤侵蚀量均值分别为 11.45, 38.13 t/hm<sup>2</sup>。洮河和祖厉河流域 NPP 的均值分别为 276.47, 136.86 g/m<sup>2</sup>,洮河 NPP 高值

区多位于流域中上游地区,这些区域多为山区,植被以林地、高覆盖草地为主;低值区多位于流域北岸和下游区域,以低覆盖草地和农田居多。祖厉河流域

NPP 的空间分异较小,流域中部大部分区域 NPP 较高,分水岭处 NPP 值相对较小,但 NPP 明显小于洮河流域。

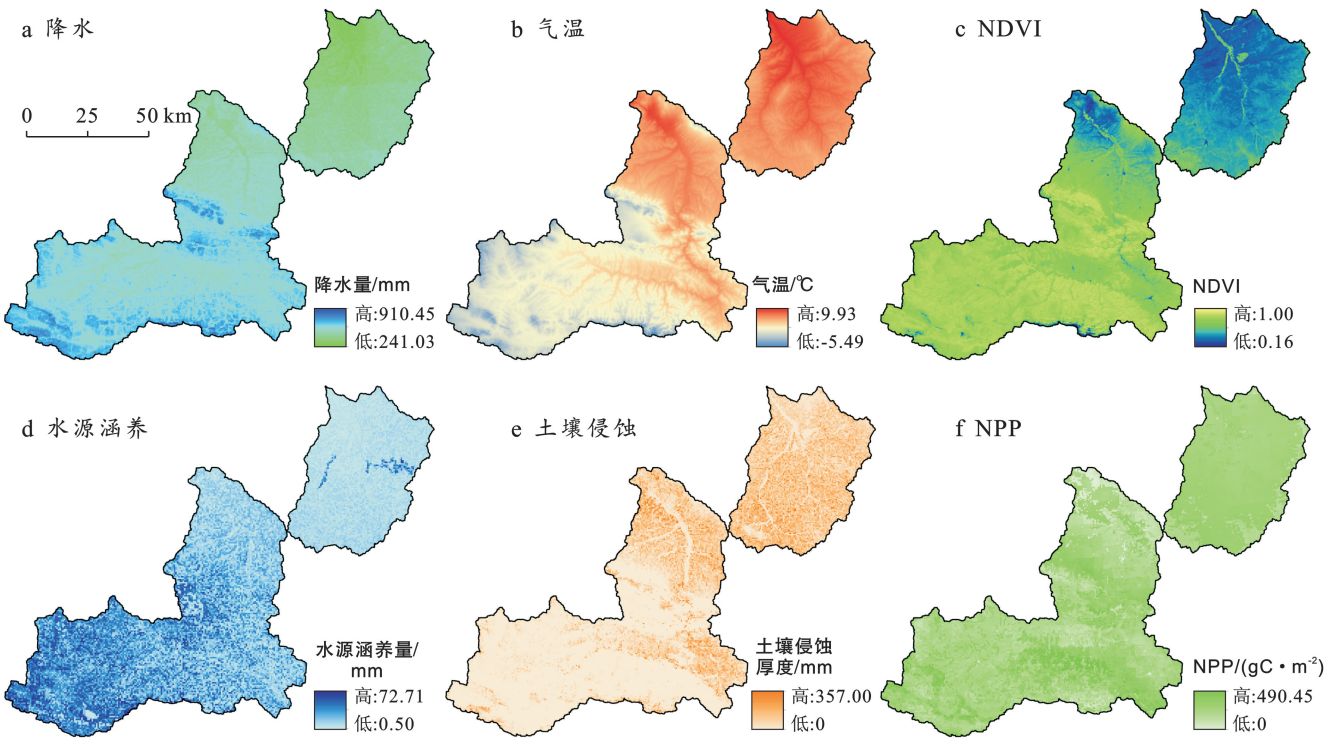


图 2 两个典型流域降水(a)、气温(b)、NDVI(c)、水源涵养(d)、土壤侵蚀(e)和 NPP(f)的空间分布特征

Fig.2 Characteristics of spatial distribution of precipitation (a), temperature (b), NDVI (c), water retention (d), soil erosion (e) and NPP (f) in two typical basins

2.1.2 各要素时间变化特征 两河流域气象因子(降水和气温)的时间变化特征较为相近,其中降水均表现为增加趋势,洮河流域略大,增幅分别为 2.21 和 1.02 mm/a(图 3);气温的增幅则以祖厉河流域略大,两流域分别为 0.04 和 0.06 °C/a;洮河流域 NDVI 的变化较为平缓,而祖厉河流域则差异显著,两流域 NDVI 的线性增长率均为 0.003/a;水源涵养在两流域的时间变化趋同,高低值对应较为一致,且线性增长率均为 0.05 mm/a;土壤侵蚀在祖厉河流域浮动较为明显,总体呈增长趋势[0.13 t/(hm<sup>2</sup>·a)],洮河流域土壤侵蚀则呈微弱的减小趋势[-0.02 t/(hm<sup>2</sup>·a)];两流域 NPP 均为增长趋势,且起伏变化较为温和,但总体上祖厉河流域增幅更为显著,两流域 NPP 的线性增长率分别为 0.86 和 0.20 g/(m<sup>2</sup>·a)。

## 2.2 气候—植被—水沙的生态效应

2.2.1 相关性分析 洮河流域 NPP 与降水、NDVI 和水源涵养为正相关关系,且均较为显著(表 1);但与气温和土壤侵蚀均呈现不显著的负相关关系。祖厉河流域 NPP 与各因子的关系与洮河流域类似,但与降水的正相关性并不显著,与其余变量的相关性均较为显著。

表 1 NPP 与影响因子之间的相关系数(1980—2020)

Table 1 Correlation coefficients between NPP and impact factors (1980—2020)

项目	<i>P</i>	<i>T</i>	NDVI	<i>W<sub>R</sub></i>	<i>A</i>	
NPP	洮河	0.36*	-0.19	0.41*	0.48**	-0.28
	祖厉河	0.24	-0.37*	0.51**	0.57**	-0.39*

注:①*P*, *T*, NDVI, *W<sub>R</sub>*, *A* 分别表示降水、气温、归一化植被指数、水源涵养和土壤侵蚀;②\* 和 \*\* 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验。下同。

2.2.2 通径分析 以洮河流域为例(图 4),气温和降水对于 NPP 的直接通径系数分别为 -0.23, 0.52, 即气温对 NPP 为反向作用,且相较于降水的直接作用较小;NDVI 和水源涵养对于 NPP 的直接作用都为正向效应,直接通径系数分别为 0.38, 0.71, 土壤侵蚀对 NPP 的作用相对较小,直接通径系数仅 -0.14。从间接影响来看,降水通过 NDVI, 水源涵养和土壤侵蚀分别影响 NPP 的间接效应为 0.14, 0.42 和 -0.06;气温通过 NDVI, 水源涵养和土壤侵蚀对 NPP 的间接效应分别为 0.08, -0.13, 0.12;植被通过水源涵养和土壤侵蚀影响 NPP 的间接效应为 0.15, 0.04。*P*, *T*, NDVI, *W<sub>R</sub>* 和 *A* 对 NPP 的总效应分别为 1.09, -0.20, 0.57, 0.71 和 -0.14, 水分参量对

NPP 的作用最为显著,与洮河流域气候湿润,水量丰富且变化较大有关<sup>[23]</sup>。祖厉河流域  $T$  和  $P$  对于 NPP 的直接途径系数分别为  $-0.08, 0.31$ ;  $W_R$  和 NDVI 对 NPP 的直接作用都很大,直接途径系数均为  $0.68$ ;  $A$  对于 NPP 的直接作用依旧为负向作用 ( $-0.40$ )。  $P$  通过 NDVI,  $W_R$  以及  $A$  对于 NPP 的间接影响分别为  $0.29, 0.31$  和  $-0.22$ ;  $T$  通过 NDVI,  $W_R$  以及  $A$  对于 NPP 的间接影响分别为  $-0.04,$

$0.00$  和  $-0.10$ ; NDVI 通过水源涵养以及土壤侵蚀影响 NPP 的间接效应为  $0.06, 0.08$ 。总体来看,祖厉河流域 NPP 受  $P, NDVI$  和  $W_R$  影响较大,效应分别为  $0.82, 0.83, 0.68$ ;  $T$  和  $A$  对于 NPP 的总效应较洮河更大,分别为  $-0.43$  和  $-0.40$ ,值得注意的是各因素通过侵蚀的间接作用则有所增大,主要原因在于祖厉河流域地处黄土高原,下垫面受外界因素影响容易形成侵蚀,进而对区域碳储动态产生影响。

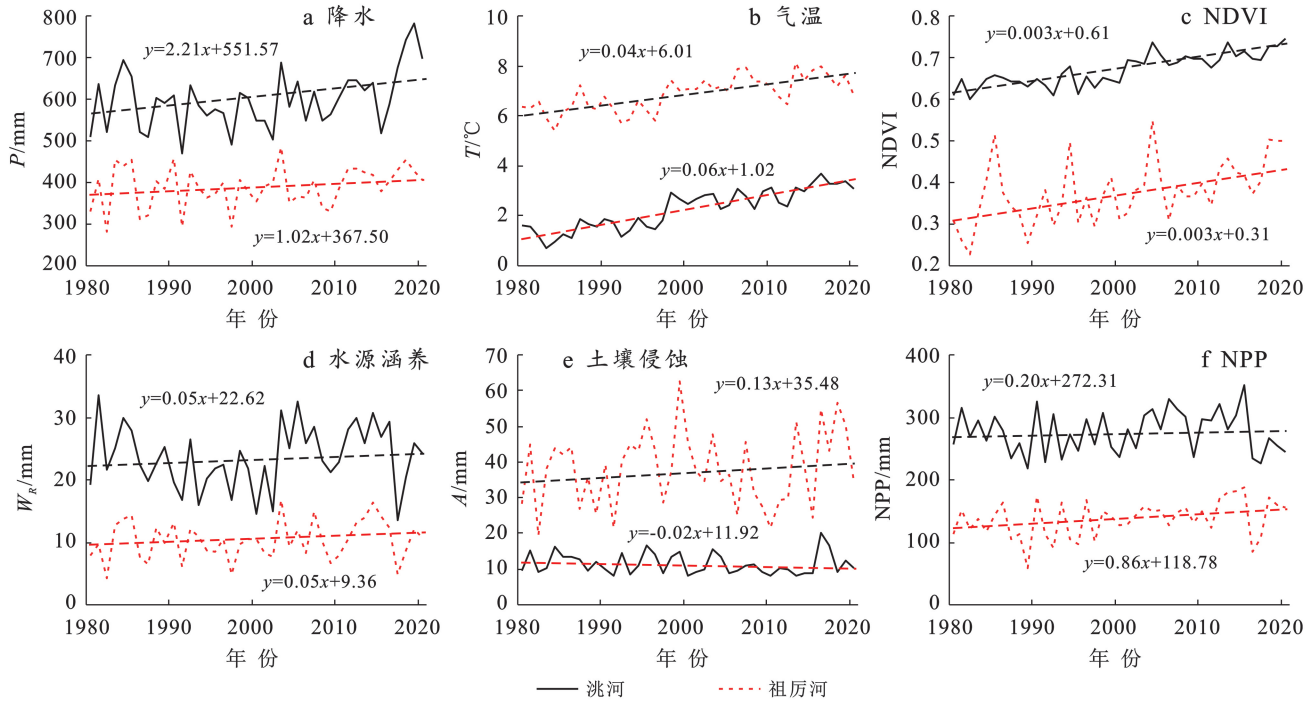
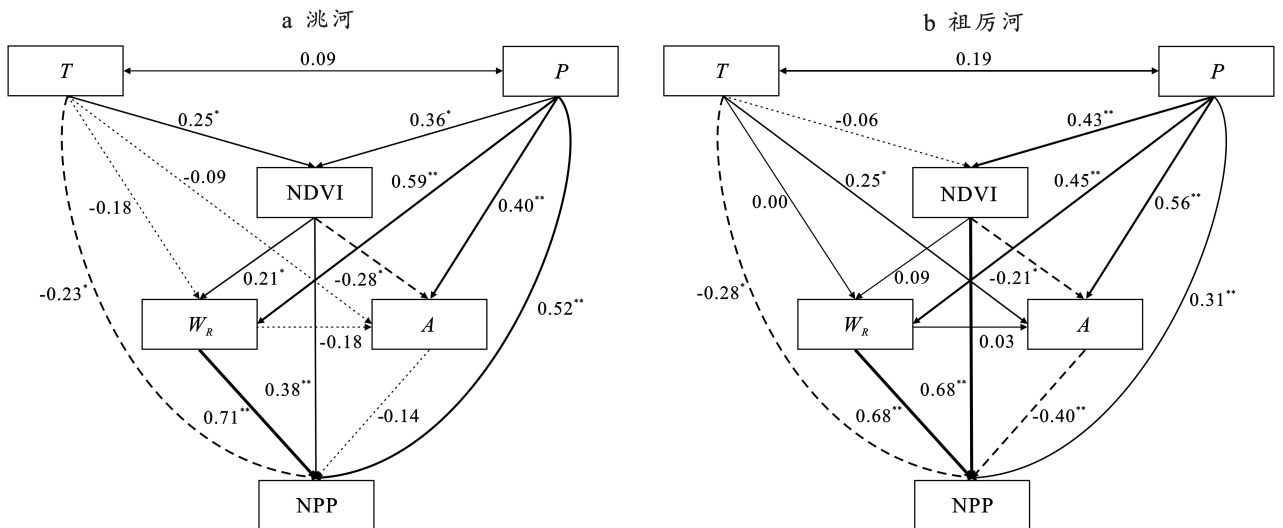


图 3 两个典型流域降水(a)、气温(b)、NDVI(c)、水源涵养(d)、土壤侵蚀(e)和 NPP(f)的时间变化特征  
Fig.3 Temporal characteristics of precipitation (a), temperature (b), NDVI (c), water retention (d), soil erosion (e) and NPP (f) in two typical basins



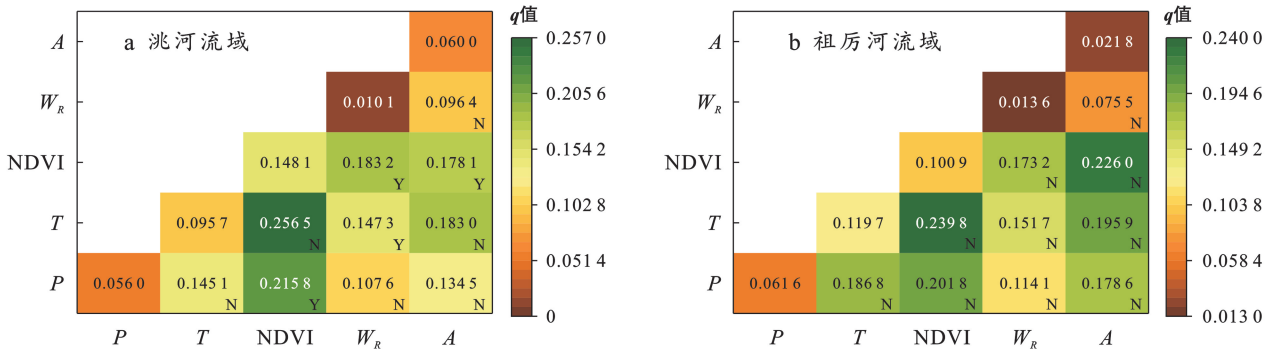
注: ①实线和虚线分别表示途径系数的正负;线条粗细则表示数值的大小。② \* 表示通过 0.05 显著性检验; \*\* 表示通过 0.01 显著性检验。

图 4 两个典型流域气候、植被以及水沙因素与 NPP 的通路分析

Fig.4 Pathway analysis of climate, vegetation and water-sand factors and NPP in two typical watersheds

2.2.3 空间效应 在单因子条件下,NDVI 对洮河和祖厉河 NPP 的空间分布具有最大的驱动力,NDVI 与 NPP 均与植被关联,因此二者在空间分布上具有一定的相似性。所有成对因素对 NPP 的交互效应采用交互探测器进行计算(图 5)。如果因素交互的  $q$  统计量超过  $x_1$  和  $x_2$  之和,则表明两个因素是非线性

增强的,两流域中各因素对 NPP 的交互效应均属此类,即任意两因子交互后对 NPP 的空间解释能力均强于单因子。成对因素的交互  $q$  统计量高于对应单因素,这表明当个别因素与其他因素交互时,其解释力可能会增强。两流域中 NPP 的空间解释力在气温和 NDVI 交互后最强。



注:“Y”表示两因素对 NPP 空间分布的影响在显著性水平为 0.05 时存在显著差异;“N”表示无显著差异。

图 5 单因素及两种不同影响因素对 NPP 的交互效应的  $q$  值

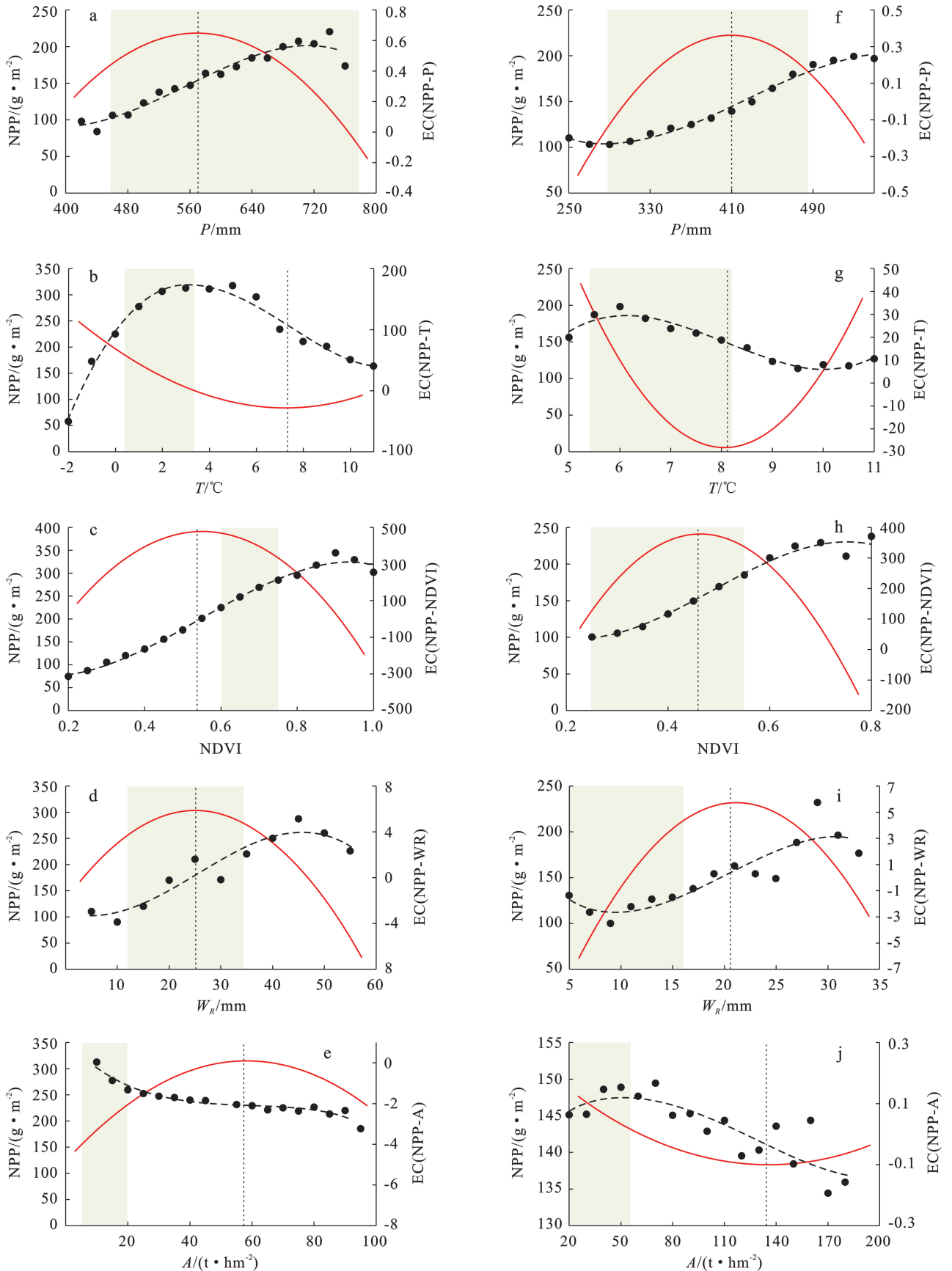
Fig.5  $q$ -values of interaction effects of a single factor and two different influencing factors on NPP

## 2.3 阈值分析

2.3.1 弹性系数法 两河流域 NPP 随降水呈增长趋势,但弹性系数(EC)均为正值,且呈先增后减的趋势,表明一定范围内降水对 NPP 的影响有所提高,后续降水的增多又抑制了 NPP 增长,洮河和祖厉河流域降水对 NPP 影响的阈值分别为 590.00 和 410.00 mm(图 6)。洮河流域气温对 NPP 的影响表现为先增后减的趋势,但其 EC 则呈先减后增的趋势,在 7.42 °C 达到阈值;祖厉河流域气温增加均伴随 NPP 的减小,而 EC 同样呈现先减后增的趋势,在 8.07 °C 达到阈值。NPP 随 NDVI 的变化在两河流域均表现为同增趋势,但在洮河流域 EC 以减小为主,表明 NDVI 对 NPP 的效应开始减弱,阈值为 0.55,而在祖厉河流域则呈先增后减的趋势,在 NDVI 为 0.49 时发生转折。水源涵养对 NPP 的影响在两河流域较为相近。NPP 随水源涵养逐渐增加,且 EC 总体表现为先增后减。但由于两河流域的水分差异,导致其对 NPP 的效应有所不同,在洮河流域 EC 开始由增转变为减小,阈值为 25.61 mm,而在祖厉河流域 EC 以同增为主,阈值在 20.07 mm 才达到,并不在祖厉河流域  $W_R$  值域范围内。土壤侵蚀量对两流域 NPP 的影响差异明显,在洮河流域 NPP 随土壤侵蚀的增加而减少,且 EC 呈先增后减的趋势,阈值在 59.89 t/hm<sup>2</sup>,而在祖厉河流域 NPP 随土壤侵蚀先增后减,且 EC 呈先减后增的趋势,阈值在 130.00 t/hm<sup>2</sup>。总体上,不同因素对 NPP 的效应以及阈值与流域本身差异有关,该方法基本可以找到不同因素对 NPP 效应的突

变点并以此作为阈值,但找到的阈值可能不在值域范围内。

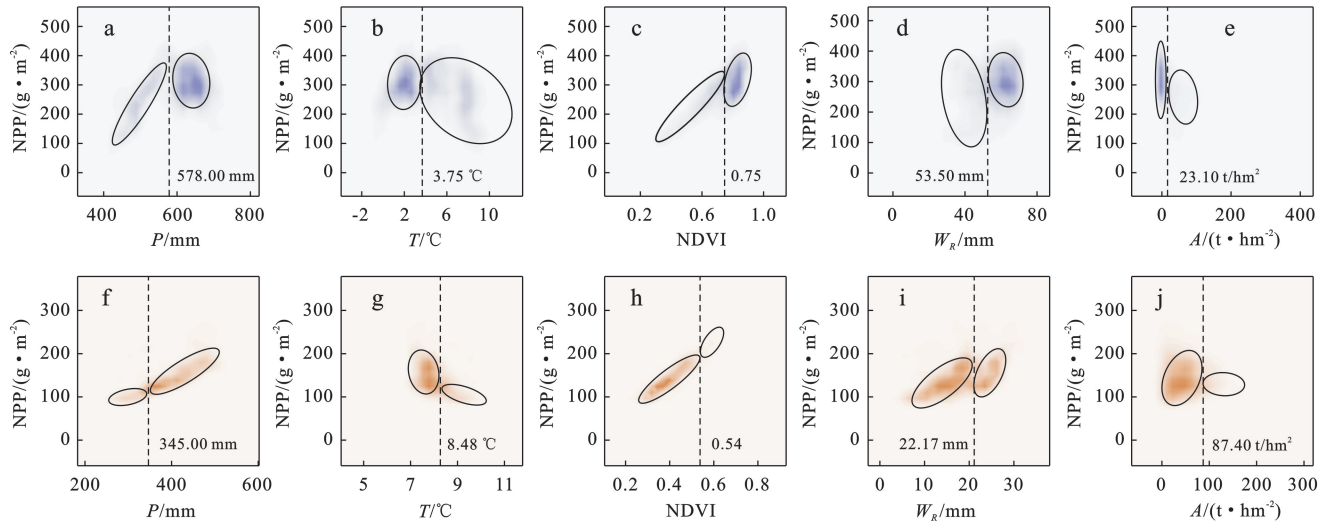
2.3.2 密度分析 洮河流域 NPP 与降水对应分布的密度在 578.00 mm 左右两侧出现明显差异,密度增加,分布方向发生变化,拟合效果变差(图 7);祖厉河 NPP 与降水的散点密度在 345.00 mm 前后发生变化,密度显著增加,分布走向略有偏移,且拟合效果较好。洮河流域 NPP 随气温的散点密度分布的拟合效果始终较差,但在 3.75 °C 之前的轴比、密度相对较大,表明气温与 NPP 对应点聚集在这一区间较多;祖厉河流域 NPP 与气温的散点在 8.48 °C 之前密度很大,但分布面积较大是由于短轴较大所致,因此其拟合效果相对较差,椭圆方向更偏向 y 负半轴方向,之后密度有所减小,方向趋于平缓。洮河流域 NPP 与 NDVI 协同增加,NDVI 小于 0.75 的区间内散点分布较平缓且密度较小,随后 NDVI 对应的 NPP 增长速率加快,密度变大;祖厉河流域 NPP 与 NDVI 的散点密度图斜率变化不明显,而密度差异较大,以 0.54 为阈值。洮河 NPP 与水源涵养的散点密度分布相反,在阈值(53.50 mm)前后拟合效果均相对较差,但阈值之后的密度明显增大;在祖厉河流域二者的拟合效果相对较好,在 22.17 mm 之前斜率较小但分布范围较广,之后分布较小但斜率有所增大。洮河和祖厉河土壤侵蚀与 NPP 的密度分布情况差异显著,洮河流域多分布在 23.10 t/hm<sup>2</sup> 之前,且分布方向接近垂直,而在祖厉河流域分布的范围较广,拟合效果较差,在 87.40 t/hm<sup>2</sup> 处发生变化。



注：a—e 和 f—j 分别表示洮河和祖厉河流域 NPP 与降水(a, f)；气温(b, g)；NDVI(c, h)；水源涵养(d, i)和土壤侵蚀量(e, j)的关系。

图 6 两河流域 NPP(以 C 计)与影响因素的对应关系及弹性系数

Fig.6 Correspondence and elasticity coefficients between NPP (calculated by carbon) and influencing factors in two typical watersheds



注: a-e 和 f-j 分别表示洮河和祖厉河流域 NPP 与降水(a, f); 气温(b, g); NDVI(c, h); 水源涵养(d, i)和土壤侵蚀量(e, j)的关系。

图 7 两河流域 NPP (以 C 计) 与影响因素的散点密度分布

Fig. 7 Scatter density distribution of NPP (calculated by carbon) and influencing factors in two typical watersheds

2.3.3 结果与方法的对比 不同区域水热条件的差异导致 NPP 对于气候、植被以及水沙阈值存在一定的差异,祖厉河降水、NDVI 和水源涵养对 NPP 的影响阈值先达到,而洮河流域气温和土壤侵蚀对 NPP 的影响阈值更先达到(表 2)。从方法的差异上来看,弹性系数法的目的为找到 NPP 受自变量影响效应(作用)发生转变的值作为阈值;而密度分析所得的阈值则代表了 NPP 与自变量的关系发生转变的值。密度分析考虑了流域当地各要素值域的实际情况,而弹性系数得到的阈值不一定是实际存在的。研究认为弹性系数法所得阈值则为过渡性的阈值,而密度分析所得阈值为边界性的阈值。前者主要依赖于构建函数所得,样本量较少,结果并不一定具有代表性,且可能存在无法在流域值域范围内找到阈值的情况,但通过导数的拐点寻求阈值更为明确和清晰;后者则具有更多的统计样本量,但在阈值确定过程中所定义的密度范围的形状、大小以及方向所考虑到的要素更多,需结合显著性进行界定。

表 2 两个典型流域 NPP 对不同变量的阈值结果统计

Table 2 Statistics on results of NPP thresholds for different variables in two typical watersheds

参数	弹性系数法		密度分析法	
	洮河	祖厉河	洮河	祖厉河
降雨/mm	590.00	410.00	578.00	345.00
气温/°C	7.42	8.07	3.75	8.48
NDVI	0.55	0.49	0.75	0.54
水源涵养/mm	25.61	20.07	53.50	22.17
土壤侵蚀/(t·hm <sup>-2</sup> )	59.89	130.00	23.10	87.40

### 3 讨论

论文以青藏高原和黄土高原两个流域进行对比,分析了水文气象和下垫面要素对 NPP 的效应及阈值差异,发现流域间差异显著,且主要是水热条件和下垫面状态共同作用的结果<sup>[24]</sup>。NPP 与降水的对应关系基本为正相关,与前人的研究结果基本一致<sup>[25]</sup>,降水多的地方水分充足,支撑了植被生长,也增加了水源涵养的来源,但在某些地类如人工灌溉农田对于降水的依赖相对较小,因此在祖厉河流域 NPP 与降水的相关性较弱。NPP 与气温的相关性在洮河和祖厉河流域均为负相关,这与王丽霞等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。一方面,不同植被类型对于气温的响应有所差异。另一方面则是由于降水对于各指标的作用较气温更为显著,在一定程度上掩盖了温度对于各指标的影响,导致 NPP 与气温相关性及通径系数的显著性并不强<sup>[6]</sup>。此外,NPP 与气候存在一定的时滞效应和累积效应,但这些效应的体现实际上受下垫面条件的作用而有所差异<sup>[27]</sup>。

从植被的角度来看,两河流域 NPP 与植被(NDVI)的相关性都比较高,主要是由于 NDVI 作为计算 NPP 的一部分,与 NPP 有直接关系,且植被决定了区域内对于气温、降水以及太阳辐射等的响应关系<sup>[28]</sup>。研究表明荒漠地区植被稀疏,气候炎热干燥,蒸散发迅速,降水是生态服务功能主要的气候原因;而农业发达的地区以及城镇等受气温和降水效应差异较小,是人为因素干扰过大所致<sup>[29]</sup>。植被覆盖的好转有效地减少了细沟和沟道的侵蚀作用,降低了坡面输沙能力,即缓解了土壤侵蚀的情况又减少了生态系统碳损失,加

强了碳的封存,对于区域水源涵养也具有重要的意义,尤其是林、草在这一方面的作用较为突出。

阈值分析表明,降水、水源涵养为代表的水分参量对 NPP 的效应呈先增后减的趋势,即水量无论是否缺水的流域都并非越大越好,这与众多研究结果保持一致<sup>[12,20]</sup>,水分支撑一定程度上加剧了植被的生长和碳的累积,但过多的水分可能导致植被根系缺氧死亡;但总体上洮河流域降水和水源涵养对 NPP 的影响阈值仍旧大于祖厉河流域,可能与当地植被类型对水分的耐受性以及当地的气温有关。NPP 与 NDVI 的弹性系数在两河流域同样为呈先增后减的趋势,表明植被恢复在一定程度上可以增加其对于生态的影响,但效果随着植被覆盖的增加而逐渐减弱,并受到区域水热条件的制约<sup>[30]</sup>。研究以土壤侵蚀作为泥沙的代表参数,发现 NPP 在祖厉河流域对其响应更为剧烈,且阈值也明显更大,这也与两地的土壤侵蚀和河道泥沙量相对应。

研究发现,气温和降水通过植被或者水沙对 NPP 的调节路径复杂,滞后严重且效应相对较小,气候变化对于水沙的贡献率也较人类活动明显更小。结合通径分析和阈值分析,发现在气候对 NPP 的影响阈值达到之前,NPP 依赖于气候变化直接效应可能更为显著,气候自身的调节即可致使 NPP 的变化,因此 NPP 对应气候阈值更像是“可持续”的阈值;但达到植被或水沙阈值的时候,气候作用较弱,需要人为因素的介入才能满足生态恢复,因此对应到植被和水沙的阈值则是“限制性”阈值。在达到“可持续”的阈值之前,并不需要过多的人为干预,主要通过气候方面的监测即可;但在达到“限制性”阈值时,有目的的合理分配水资源、控制土壤侵蚀减缓河道输沙需要给予更多关注。

生态服务指标受生态修复工程影响显著,受限于数据的原因本文暂时未对该部分内容进行研究。其次,NPP 响应气候以及植被变化的季节效应相对较大,且存在一定的滞后效应,但本文并未做相关的分析。相关分析、通径分析等手段为理解复杂的生态系统碳储动态变化的归因提供了重要的依据,但阈值的识别多依赖于统计分析,未来应采用更科学有效的方法来解释气候、植被、水沙以及生态过程之间的关联,探究不同空间尺度存在的机制和过程的差异性,在准确环境胁迫因子识别下提出因地制宜的生态保护方案,促进区域可持续发展。

## 4 结论

本文以生态—地理分异明显的两个流域洮河和祖

厉河流域为研究区,通过分析气候、植被、水沙等因素对碳储动态变化的时空驱动机制及响应阈值,厘清区域生态系统响应气候变化的复杂性,为黄河流域科学管理和实现“双碳”目标提供了支撑,并取得以下结论。

(1) 洮河和祖厉河流域 NPP 均值(以 C 计)分别为 276.47,136.86 g/m<sup>2</sup>,且均为增长趋势,线性增率分别为 0.86 和 0.20 g/(m<sup>2</sup>·a)。

(2) 洮河 NPP 受降水和  $W_R$  影响较大,总效应分别为 1.09,0.71,其次为 NDVI,总效应为 0.57, $T$  和  $A$  均呈现负效应且相对较小,效应分别为 -0.20 和 -0.14;祖厉河流域 NPP 受 NDVI 和  $WR$  影响较大,效应分别为 0.83,0.68, $T$  和  $A$  对 NPP 同样为负效应,但绝对值大于洮河流域。空间上,两个流域气温与土地利用交互后对 NPP 的空间分布解释力最强。

(3) 不同方法的阈值量化结果有所差异,但总体上洮河流域  $T$  和  $A$  对 NPP 的影响阈值较祖厉河流域更小, $P$ ,NDVI 和  $W_R$  对 NPP 的影响阈值较祖厉河更大。

## 参考文献 (References)

- [1] 李小平,田勇,张翠萍,等.黄河下游高效输沙指标及输沙水量研究[J].泥沙研究,2024,49(4):34-41.  
Li Xiaoping, Tian Yong, Zhang Cuiping, et al. Study on high-efficient sediment transport index and water volume for sediment transport in the lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2024,49(4):34-41.
- [2] 张楚汉,王光谦.关于黄河流域生态保护和高质量发展的思考[J].人民黄河,2024,46(9):1-7.  
Zhang Chuhan, Wang Guangqian. Thoughts on ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2024,46(9):1-7.
- [3] 张晨凤,贺丽,董廷发,等.基于 Biome-BGC 模型的若尔盖不同沙地类型土壤水分植被承载力对气候变化的响应[J].生态学杂志,2024,43(6):1833-1840.  
Zhang Chenfeng, He Li, Dong Tingfa, et al. Responses of soil water carrying capacity for vegetation in different sandy land types in Zoigê to climate change based on the Biome-BGC model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(6):1833-1840.
- [4] 衣鹏慧,吴会峰,胡保安,等.黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素[J].生态学报,2023,43(24):10054-10064.  
Yi Penghui, Wu Huifeng, Hu Baoan, et al. Variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage after returning farmland to forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(24):10054-10064.
- [5] Li Wenwen, Zhou Jinlu, Xu Zhongyang, et al. Climate

- impact greater on vegetation NPP but human enhance benefits after the Grain for Green Program in Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2023,157:111201.
- [6] Zarei A, Chemura A, Gleixner S, et al. Evaluating the grassland NPP dynamics in response to climate change in Tanzania [J]. *Ecological Indicators*, 2021,125:107600.
- [7] Jia Lu, Yu Kunxia, Li Zhanbin, et al. Spatiotemporal pattern of NPP and its response to climatic factors in the Yangtze River economic belt [J]. *Ecological Indicators*, 2024,162:112017.
- [8] 徐勇,郑志威,戴强玉,等.顾及时滞效应的西南地区植被 NPP 变化归因分析[J].*农业工程学报*,2022,38(9):297-305.  
Xu Yong, Zheng Zhiwei, Dai Qiangyu, et al. Attribution analysis of vegetation NPP variation in Southwest China considering time-lag effects [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(9):297-305.
- [9] 李登科,王钊.气候变化和人类活动对陕西省植被 NPP 影响的定量分析[J].*生态环境学报*,2022,31(6):1071-1079.  
Li Dengke, Wang Zhao. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on vegetation NPP in Shaanxi Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022,31(6):1071-1079.
- [10] 王钰,张翔,闫少锋,等.基于水—经济社会—生态环境协同演变的生态流量阈值适宜性研究[J].*水资源与水工程学报*,2024,35(4):47-55.  
Wang Yu, Zhang Xiang, Yan Shaofeng, et al. Suitability of ecological flow thresholds based on the simulation of coordinated development of water-economic society-ecological environment [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024,35(4):47-55.
- [11] Hao Ruifang, Yu Deyong, Huang Ting, et al. NPP plays a constraining role on water-related ecosystem services in an alpine ecosystem of Qinghai, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,138:108846.
- [12] 李雪,于坤霞,徐国策,等.黄河上中游流域植被净初级生产力空间特征及驱动因素分析[J].*环境科学*,2024, 45(11):6448-6457.  
Li Xue, Yu Kunxia, Xu Guoce, et al. Spatial characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in the upper and middle Yellow River basin [J]. *Environmental Science*, 2024,45(11):6448-6457.
- [13] 武兰珍,赵霞,成艺,等.黄河流域甘肃段水资源承载力与水资源安全评价[J].*排灌机械工程学报*,2021,39(9):897-903.  
Wu Lanzhen, Zhao Xia, Cheng Yi, et al. Evaluation of water resources carrying capacity and water resources security in Gansu section of Yellow River basin [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021,39(9):897-903.
- [14] Peng Shouzhang, Ding Yongxia, Wen Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017,233:183-194.
- [15] 黄强,陈田田,王强,等.喀斯特山区生态系统服务权衡关系分异特征及生态安全格局识别:以贵州省为例[J].*地理科学*,2024,44(6):1080-1091.  
Huang Qiang, Chen Tiantian, Wang Qiang, et al. Differentiation characteristics of trade-off on ecosystem services and identification of ecological security pattern in karst mountainous areas: A case study of Guizhou Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(6):1080-1091.
- [16] 孙智杰,王艺霖,梁川,等.基于 RUSLE 模型的利川市水土流失敏感性时空特征分析[J].*资源环境与工程*, 2024,38(5):586-593.  
Sun Zhijie, Wang Yilin, Liang Chuan, et al. Spatio-temporal characteristics of soil erosion sensitivity in Lichuan City based on the RUSLE model [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2024,38(5):586-593.
- [17] 张媛.黑白河流域下垫面变化及其水源涵养功能研究[D].甘肃 兰州:兰州大学,2020.  
Zhang Yuan. Study on the change of underlying surface and its water conservation function in Heibai River basin [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2020.
- [18] Wakiyama T, Zusman E. The impact of electricity market reform and subnational climate policy on carbon dioxide emissions across the United States: A path analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021,149:111337.
- [19] 廖洪圣,卫伟,石宇.黄土丘陵区典型流域土壤侵蚀时空演变特征及其驱动机制:以祖厉河为例[J].*生态环境学报*,2024,33(6):908-918.  
Liao Hongsheng, Wei Wei, Shi Yu. Characteristics of spatial and temporal evolution of soil erosion in typical watersheds in loess hilly areas and its driving mechanisms: A case study of Zuli River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024,33(6):908-918.
- [20] 张琨,吕一河,傅伯杰等,等.地理学报,2020,75(9): 949-960.  
Zhang Kun, Lv Yihe, Fu Bojie, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(9):949-960.
- [21] Ma Shuai, Wang Liangjie, Jiang Jiang, et al. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-

- Tibet Plateau ecological shelter [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,318:128592.
- [22] Chen Jia, Xiao Haibing, Li Zhongwu, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China [J]. *Ecological Engineering*, 2019,132:109-114.
- [23] 袁腾港,张英,钱继坤,等.甘肃洮河流域水文气象动态及径流和水质驱动机制[J].*冰川冻土*,2024,46(4):1329-1340.
- Yuan Tenggang, Zhang Ying, Qian Jikun, et al. Hydrometeorological dynamics and driving mechanism of runoff and water quality in the Taohe River basin, Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024,46(4):1329-1340.
- [24] 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 Yong, Zheng Zhiwei, Meng Yuchi, 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.
- [25] Liu Chunyu, Dong Xiaofeng, Liu Yingying. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China [J]. *Catena*, 2015,125:190-199.
- [26] 王丽霞,丁慧兰,刘招,等.基于 CASA 模型探究泾河流域植被 NPP 时空动态及其对气候变化的响应[J].*水土保持研究*,2022,29(1):190-196.
- Wang Lixia, Ding Huilan, Liu Zhao, et al. Spatiotemporal change of NPP based on CASA model and its response to climate change in Jing River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):190-196.
- [27] Pan Daili, Gao Xiaodong, Dyck M, et al. Dynamics of runoff and sediment trapping performance of vegetative filter strips: Run-on experiments and modeling [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,593:54-64.
- [28] Chi Dengkai, Wang Hong, Li Xiaobing, et al. Assessing the effects of grazing on variations of vegetation NPP in the Xilingol Grassland, China, using a grazing pressure index [J]. *Ecological Indicators*, 2018,88:372-383.
- [29] 张发,祝小梅,张红,等.伊犁河谷草地水分利用效率时空变化及其对气候因子的响应[J].*环境生态学*,2024,6(4):57-64.
- Zhang Fa, Zhu Xiaomei, Zhang Hong, et al. Spatial-temporal variation of water use efficiency and its response with climate factors in Ili River valley, China [J]. *Environmental Ecology*, 2024,6(4):57-64.
- [30] 赵彦博,赵广举,穆兴民,等.渭河流域植被变化调控输沙的覆盖度阈值[J].*水土保持研究*,2024,31(6):96-102.
- Zhao Yanbo, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Influence and threshold of vegetation change on sediment load in the Weihe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(6):96-102.

(上接第 222 页)

- [19] 蒋俊霞,高晓清.光伏系统气候效应及影响机理研究进展[J].*高原气象*,2022,41(4):953-962.
- Jiang Junxia, Gao Xiaoqing. Research progress on climate effect and influence mechanism of photovoltaic systems [J]. *Plateau Meteorology*, 2022,41(4):953-962.
- [20] 张克存,奥银焕,屈建军,等.巴丹吉林沙漠湖泊一沙山地貌格局对局地小气候的影响[J].*水土保持通报*,2014,34(5):104-108.
- Zhang Kecun, Ao Yinhan, Qu Jianjun, et al. Influences of lake-sand dune landscape on local microclimate in Badain Jaran Desert [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(5):104-108.
- [21] Doran J C, Shaw W J, Hubbe J M. Boundary layer characteristics over areas of inhomogeneous surface fluxes [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995,34(2):559-571.
- [22] 卢霞.荒漠戈壁区光伏电站建设的环境效应分析:以酒泉市东洞滩百万千瓦光伏示范基地为例[D].兰州:兰州大学,2013.
- Lu Xia. The environmental effect analysis of PV power plant construction in desert Gobbi: Jiuquan City Dongdongtan million kilowatt photovoltaic demonstration base as an example [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2013.
- [23] Zhang Xunhe, Xu Ming. Assessing the effects of photovoltaic powerplants on surface temperature using remote sensing techniques [J]. *Remote Sensing*, 2020,12(11):1825.
- [24] 唐远程,卢小龙,孙志云,等.光伏支架成本及选型分析[J].*太阳能*,2023(10):81-87.
- Tang Yuancheng, Lu Xiaolong, Sun Zhiyun, et al. Cost and type selection analysis of PV brackets [J]. *Solar Energy*, 2023(10):81-87.
- [25] 刘永博.某光伏电站光伏支架选型研究[J].*光源与照明*,2023(5):122-125.
- Liu Yongbo. Study on photovoltaic bracket selection of a photovoltaic power station [J]. *Lamps & Lighting*, 2023(5):122-125.