

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.004.

李文斌, 曹生奎, 曹广超, 等. 2000—2020 年青海湖流域植被净初级生产力时空格局及驱动分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 327-336, 343.

Li Wenbin, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Spatiotemporal Patterns of Vegetation Net Primary Productivity and Their Drivers in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 327-336, 343.

2000—2020 年青海湖流域植被净初级生产力 时空格局及驱动分析

李文斌^{1,2}, 曹生奎^{1,2,3}, 曹广超^{1,2,3}, 赵浩然^{1,2}, 陈链璇^{1,2}, 侯瑶芳^{1,2}

(1. 青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008; 2. 青海省 自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;
3. 青海师范大学 青海省人民政府—北京师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

摘要: [目的] 明确 2000—2020 年青海湖流域植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 时空格局变化特征, 探究影响植被 NPP 的主要因素及驱动比例, 为青海湖流域基础科学研究提供参考。 [方法] 以青海湖流域为研究区域, 基于 2000—2020 年植被 NPP、气温、降水量、植被覆盖度、人类活动强度数据, 采用 ArcGIS 空间分析、地理探测器模型等方法, 分析植被 NPP 在子流域、海拔、微地形上的时空变化, 并对流域 NPP 与气温、降水量和植被覆盖度的相关性及其驱动要素进行研究。 [结果] (1) 21 年间青海湖流域年植被 NPP 逐年波动上升, 增速为 $2.22 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$, 空间上自西北向东南递增。 (2) 年植被 NPP 与年均气温、年降水量、年植被覆盖度的显著相关区域占流域面积比依次为 40%, 9%, 59%。年均气温和年降水量与年植被 NPP 的一级偏相关系数显著区域占流域面积比分别是 59.26% 和 33.39%。 (3) 驱动分析表明气温 ($q=0.58$)、海拔 ($q=0.54$)、人类活动 ($q=0.38$) 是流域 NPP 的主要驱动因子, 并且因子交互解释力强于单因子解释力。 [结论] 2000—2020 年青海湖流域植被 NPP 整体逐年增长, 在海拔、子流域和微地形格局上表现出显著的空间分异性, 气温、海拔、人类活动的交互驱动是流域 NPP 的主要驱动类型。

关键词: 青海湖流域; 植被净初级生产力; 时空格局; 地理探测器

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0327-10

Spatiotemporal Patterns of Vegetation Net Primary Productivity and Their Drivers in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

Li Wenbin^{1,2}, Cao Shengkui^{1,2,3}, Cao Guangchao^{1,2,3}, Zhao Haoran^{1,2}, Chen Lianxuan^{1,2}, Hou Yaofang^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical and Environmental Processes, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: [Objective] The primary objective of this study is to investigate the spatiotemporal variations in net primary productivity (NPP) of vegetation within Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020. Additionally, it aims to reveal the key factors and their contributive driver of changes in vegetation NPP. The research is designed to provide a baseline scientific investigation on dynamics of NPP within Qinghai Lake Basin. [Methods] We used data on vegetation NPP, temperature, precipitation, fractional vegetation cover and human activity intensity in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020 to analyze the spatiotemporal changes of vegetation NPP across sub-basins, elevations, and micro-terrain in Qinghai Lake Basin. We applied spatial analysis of ArcGIS, geographic detector model to conduct these analyses. Furthermore, We also investigated the correlations of vegetation NPP with temperature, precipitation, and fractional vegetation cover, as well

收稿日期: 2023-09-30

修回日期: 2023-11-09

资助项目: 国家自然科学基金“青海湖流域高寒湿地生态系统碳水收支变异特征及尺度扩展研究”(42061008)

第一作者: 李文斌 (1998—), 男, 青海海北人, 硕士, 研究方向为生态水文与水资源学。E-mail: 1907634648@qq.com

通信作者: 曹生奎 (1979—), 男, 青海西宁人, 博士, 教授, 研究方向为生态水文与水资源学。E-mail: caoshengkui@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

as the driving factors of vegetation NPP. [Results] (1) In the past 21 years, the annual vegetation NPP in the Qinghai Lake Basin exhibited fluctuating increase across temporal scale, with a growth rate of $2.22 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$, and spatially increased trend from northwest to southeast. (2) The study also revealed spatially significant correlations between annual vegetation NPP and mean annual temperature, annual precipitation, and annual fractional vegetation cover, with the ratios 40%, 9% and 59%, respectively. The primary partial correlation coefficients between mean annual temperature and annual precipitation with annual vegetation NPP encompassed 59.26% and 33.39% of the basin area. (3) The results of our study also revealed that temperature ($q=0.58$), elevations ($q=0.54$) and human activity intensity ($q=0.38$) were principal drivers of basin-scale NPP, also, interactive impact of factors were found to better explain these drives than any of single factor. [Conclusion] The NPP of vegetation in Qinghai Lake Basin increased over temporal scales from 2000 to 2020. Our study showed spatially significant differences in NPP across elevation, subwatershed and microtopographic pattern. The interactions of temperature, altitude and human activities were the main driving factors of NPP in the Qinghai Lake Basin.

Keywords: Qinghai Lake Basin; NPP; spatiotemporal patterns; geographic detector

植被净初级生产力 NPP(Net Primary Productivity)是植物通过光合作用积累的有机碳的量中扣除自养呼吸所消耗的有机质后的剩余部分,是生态系统碳循环研究的关键要素^[1],是探究生态系统碳收支和评价生态可持续性的重要因子^[2]。NPP 的变化可直观反映植被生态系统对环境气候条件的响应,因此 NPP 可作为陆地生态系统环境质量、生态调节过程、陆地碳汇的估算依据^[3]。

青藏高原是全世界最高的独立地貌单元,有“世界屋脊”和“世界第三极”之称,其独特的地理特征深刻影响着全球大气环流^[4]。其独特的地形及气候条件决定了青藏高原生态环境的脆弱性^[5],也因其独特的地理位置和气候条件成为植被净初级生产力研究的热点区域。当前对于青藏高原植被 NPP 的研究主要包括 NPP 模型估算、时空分布特征和 NPP 变动的归因研究。张懿铨就曾利用遥感生产力模型估算了青藏高原高寒草地净初级生产力^[6],周才平利用陆地生态系统模型估算了青藏高原主要生态系统净初级生产力^[7],以上学者研究结果均显示青藏高原自然地带内 NPP 总体呈现东南到西北波动增加的趋势,仅少部荒漠地带呈轻微减低趋势。

位于青藏高原东北部的青海湖流域(下文简称流域)是高原地区生物多样性最丰富的基因库之一^[8],是维系青藏高原东北部生态安全的重要屏障,同时也是典型的生态系统脆弱地区,是生物多样性保护和生态环境建设重点区域^[9]。乔凯等利用遥感和气象监测数据,选用改进后的 CASA 模型估算了 2001—2011 年青海湖流域 NPP,发现流域 NPP 空间分布上与青海湖地区草原植被类型和水热组合较为符合,并提出改进后的 CASA 模型在气象数据稀少的地区是

可行的^[10]。王琪等基于 MODIS NPP 数据对青海湖流域草地生产力进行了估算评价,得出影响青海湖流域草地生产力的主要因子是活动积温、气温与降水^[11]。用于植被 NPP 研究的理论和方法在不断完善,模型验证和遥感分析已成为植被 NPP 研究的重要媒介,并已得到广泛应用。

综上,以往在青海湖流域开展的 NPP 相关研究多集中于探讨流域面上植被 NPP 变化趋势和空间分布,对驱动因子未做主次划分,对地形特征变化未做细化描述。本文利用 DEM、气温、降水量和人类活动强度数据,采用相关分析、变异系数、地理探测器模型等方法,从海拔、子流域、坡度、坡向等角度对 2000—2020 年青海湖流域 NPP 时空格局进行探究。分析流域植被 NPP 与气温、降水量和植被覆盖度的相关性,并分析流域 NPP 稳定性。并对流域 NPP 的驱动因素进行深入分析,以期对青海湖流域生态保护和基础科学研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青藏高原东北部($36^{\circ}15'—38^{\circ}20'N$, $97^{\circ}50'—101^{\circ}20'E$),全流域位于季风湿润区与内陆干旱区共同控制的过渡区^[12](图 1)。海拔介于 3 169~5 268 m,总面积约 2.96 万 km^2 ^[13]。流域地势由东南到西北逐步攀升,四周高山矗立,形成群山环抱式的封闭型高原内陆盆地^[14]。

流域内共有 8 个子流域,其中布哈河流域面积最大,约占青海湖流域总面积的 1/2。布哈河和沙柳河是青海湖流域最大的两条河流,两条河的径流量占据流域总径流量的 64%^[15]。流域内植被类型包括灌丛

植被、草原植被、高山流石植被、草甸和沼泽植被以及栽培植被和沙生植被等^[16]。青海湖流域气候干旱,风力强劲,昼夜温差大,植被生长季短,光照充足,太阳辐射强烈,春季多风和沙暴天气,夏凉冬寒^[17]。

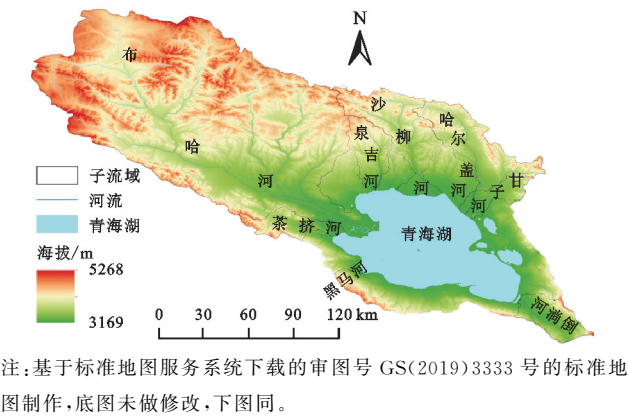


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Qinghai Lake Basin diagram

1.2 数据来源

2000—2020 年植被净初级生产力(NPP)数据来自美国国家航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)(NASA)的 MOD17A3 HGF 数据集,时间分辨率 1 a,空间分辨率 500 m×500 m;2000—2020 年气温和降水量数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)的中国区域逐月气温和降水量数据集,空间分辨率 1 km×1 km;数字高程数据(DEM)来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)的 SRTM DEM 原始高程数据,空间分辨率 90 m×90 m;2000—2019 年归一化植被指数(NDVI)数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)的中国年度植被指数空间分布数据集,空间分辨率 1 km×1 km;2020 年归一化植被指数(NDVI)数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)中国逐月 NDVI 数据集,空间分辨率 1 km×1 km。

人类活动强度数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn/>)的 2000—2020 年青藏高原人类活动强度数据集^[18],时间分辨率 1 a,空间分辨率 1 km×1 km。

1.3 研究方法

(1) 数据处理。数据处理使用 ArcGIS 10.2 软件进行。NPP 栅格数据经拼接、投影转换、重采样、裁剪、剔除无效值、比例缩放后,得到青海湖流域 2000—2020 年逐年 NPP 数据。文中年 NPP 值以年像元均值表述。多年平均 NPP(下文简称 NPP_m)由栅格计算器工具计算得出,文中 NPP_m 以多年平均 NPP 栅格数据的均值表述;降水量和气温数据经投

影转换、重采样、统计处理获得年均数据,最后通过栅格计算器计算获得多年平均降水量和多年平均气温(简称 P_m , T_m);NDVI 数据处理首先使用最大值合成法将 2020 年 NDVI 月度数据合成为 NDVI 年度数据,然后进行投影栅格、裁剪后,利用像元二分模型参数估算流域年植被覆盖度,最后使用栅格计算器获得多年平均植被覆盖度(下文简称 FVC_m);DEM 数据通过镶嵌、掩膜提取、重采样处理后使用空间分析工具箱提取得到坡度、坡向数据;人类活动强度数据通过投影转换、重采样、掩膜提取、栅格运算后得到多年均值用于驱动分析。

(2) 流域微地形分析。为探究微地形对流域植被 NPP 的影响,参照《全国生态状况调查评估技术规范—草地生态系统野外观测(HJ1168-2021)》标准^[19]和《全国生态状况调查评估技术规范—森林生态系统野外观测(HJ1167-2021)》标准^[20]对流域坡度和坡向进行划分。坡度分平坡(0°~5°)、缓坡(5°~15°)、斜坡(15°~25°)、陡坡(25°~35°)、急坡(35°~45°)、险坡(>45°)。坡向分北坡(337°~22°)、东北坡(22°~67°)、东坡(67°~112°)、东南坡(112°~157°)、南坡(157°~202°)、西南坡(202°~247°)、西坡(247°~292°)、西北坡(292°~337°)。

(3) 趋势分析。为直观表达流域年 NPP($\text{g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$)的变化趋势,采用一元线性回归分析法求流域植被年 NPP 的变化率(slope),其计算公式如下^[21]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:slope 为方程斜率($\text{g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$),表示 NPP 随年份的变化趋势; i 为时间序列; n 为年份数 21 a; NPP_i 为第 i 年的 NPP 像元值。Slope>0 时表明 2000—2020 年单位像元年 NPP 值呈增大趋势;slope<0 时则相反,即呈减小趋势。slope 值的大小表示 NPP 值增大或减小的速率。slope 显著性使用 F 检验来验证($\alpha=0.05$),用公式(2—4)计算^[22]:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y}) \quad (4)$$

式中: F 为显著性检验值; U 为误差平方和; Q 为回归平方和; n 为年份数 21; y_i 为第 i 年的年 NPP 像元值; \bar{y} 为 21 年多年 NPP 像元平均值; \hat{y} 为其拟合回归值。

(4) 相关性分析。为研究青海湖流域年 NPP 与

年均气温($^{\circ}\text{C}$)、年降水量(mm)和年植被覆盖度($\%$)是否存在显著的相关性,本研究引入单相关系数和显著性检验($\alpha=0.05$)^[23],公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2 \times \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \quad (5)$$

式中: R_{xy} 为年 NPP 与年均气温、年降水量、年植被覆盖度的相关系数; N_i 为第 i 年 NPP 像元值($\text{g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$); \bar{N} 为 21 年的 NPP 像元均值($\text{g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$); M_i 为第 i 年年均气温($^{\circ}\text{C}$)、年降水量(mm)、年植被覆盖度($\%$)像元值; \bar{M} 为 21 年间年均气温、年降水量、年植被覆盖度像元均值。 R_{xy} 取值范围为 $-1 \sim 1$,其绝对值越大,表示该因子与对应像元上的年 NPP 值相关性越高。

$$t = \sqrt{N-M-1} \times \frac{R}{\sqrt{1-R^2}} \quad (6)$$

式中: N 代表年份数 21; M 代表参与相关分析的影响因子个数; R 代表相关系数值。

其次,为排除变量影响,探究年均气温($^{\circ}\text{C}$)、年降水量(mm)中一个变量固定后单一未固定变量对青海湖流域年 NPP($\text{g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$)的影响,引入一级偏相关系数,计算公式如下^[23]:

$$R_{NP,T} = \frac{R_{NP} - R_{NT}R_{PT}}{\sqrt{(1-R_{NT}^2)(1-R_{PT}^2)}} \quad (7)$$

再次,为探究年均气温($^{\circ}\text{C}$)、年降水量(mm)、年植被覆盖度($\%$)中两个变量固定后单一未固定变量对青海湖流域年 NPP 的影响,引入二级偏相关系数,计算公式如下^[23]:

$$R_{NP,TF} = \frac{R_{NP,T} - R_{NF,T}R_{PF,T}}{\sqrt{(1-R_{NF,T}^2)(1-R_{PF,T}^2)}} \quad (8)$$

式中: $R_{NP,T}$ 为年均气温固定后年降水量与年 NPP 像元值的一级偏相关系数。 $R_{NP,TF}$ 为年均气温和年植被覆盖度固定后年 NPP 与年降水量的二级偏相关系数。偏相关系数的显著性用 t 检验计算,公式见式(6)。

(5) 稳定性分析。为评估青海湖流域 2000—2020 年植被 NPP 在时间序列上的波动程度,使用变异系数 C_v 做稳定性分析,计算公式如下^[23]:

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{\text{mean}})^2 / X_{\text{mean}}} \quad (9)$$

式中: C_v 表示变异系数, C_v 值越大表示植被年 NPP 变化越不稳定; n 代表年份数 21; X_i 表示第 i 年的年 NPP 像元值; X_{mean} 为流域 21 年间植被 NPP 像元平均值。本文依据自然间断法将稳定性分为 3 类,低波动变化: $C_v < 0.11$,中波动变化 $0.11 < C_v < 0.16$,高波动变化 $C_v > 0.16$ 。

(6) 地理探测器模型。为分析各因子对流域植

被 NPP 的驱动影响力,本文采用地理探测器单因子探测和交互探测进行流域植被 NPP 的驱动分析。公式如下。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (10)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad \text{SST} = N \sigma^2 \quad (11)$$

式中: q 为影响因子解释力, q 值在 $0 \sim 10$ 之间, q 越大表示驱动因子对植被 NPP 影响力越强^[24]; $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 分层; N 和 N_h 分别是全区和层 h 的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值方差; SSW 与 SST 分别为层内方差之和与区域总方差。

2 结果与分析

2.1 流域植被 NPP 变化特征

2000—2020 年青海湖流域年 NPP 值在 $182.74 \sim 254.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 变化,于 2018 年达到最高值,2001 年出现最小值。21 年间 NPP 均值为 $217.29 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$,流域年 NPP 总体呈波动增加趋势,其线性递增率为 $2.22 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$,但显著性不强($R^2=0.51$ $p < 0.01$)。2004—2005 年出现多年来最大增长值($30 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$),2013—2014 年出现历年来最大幅度减少($-27.45 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$)(图 2)。

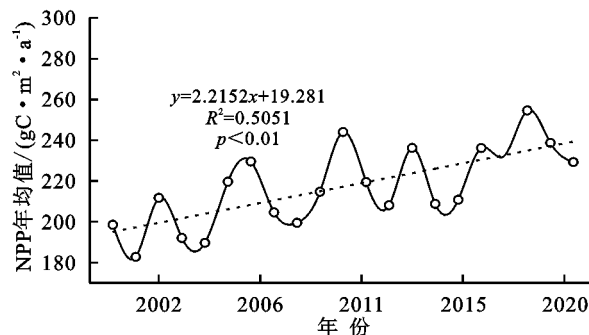


图 2 2000—2020 年青海湖流域植被年 NPP 线性变化趋势

Fig. 2 Linear variation trend of annual NPP in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

21 年间,青海湖流域植被多年平均植被净初级生产力(NPP_m)具有显著的空间异质性,表现自流域西北向东南方向逐步增大的趋势。在青海湖南岸、布哈河下游及入湖口、甘子河下游、哈尔盖河下游形成 NPP_m 最大值连片区(图 3A)。2000—2020 年青海湖流域 NPP_m 斜率在 $-16.79 \sim 24.74$ (图 3C),其中通过显著性检验的区域面积占比 78.29% (图 3D)。流域内除青海湖周边沙漠区域和部分高山和荒漠地区外其他区域 NPP_m 均呈显著增长趋势,其中增长速率最快($\text{Slope} > 5$)的区域分布于布哈河下游干支流交汇的河道周边、各流域河流干支流交汇及入湖口处及江西沟等地,占据流域面积的 6% 。出现负增长的区域

主要是青海湖沙岛和布哈河、沙柳河流入湖口及湖口三角洲,占据流域面积的 3.2%。

青海湖流域近 21 年 NPP 变异系数 C_v 介于 0.11~0.87,平均值为 0.12。表明流域年 NPP 变化以中低波动为主。低波动区域($C_v<0.11$)占流域面

积比为 42%,中波动区域($0.11<C_v<0.16$)占比 41%,高波动区域($C_v>0.16$)占比 17%。流域植被年 NPP 高波动区域主要位于多年平均植被 NPP 像元值小于 $250\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$ 的布哈河流域上游、中游主河道周边以及各子流域河流入湖口(图 3B)。

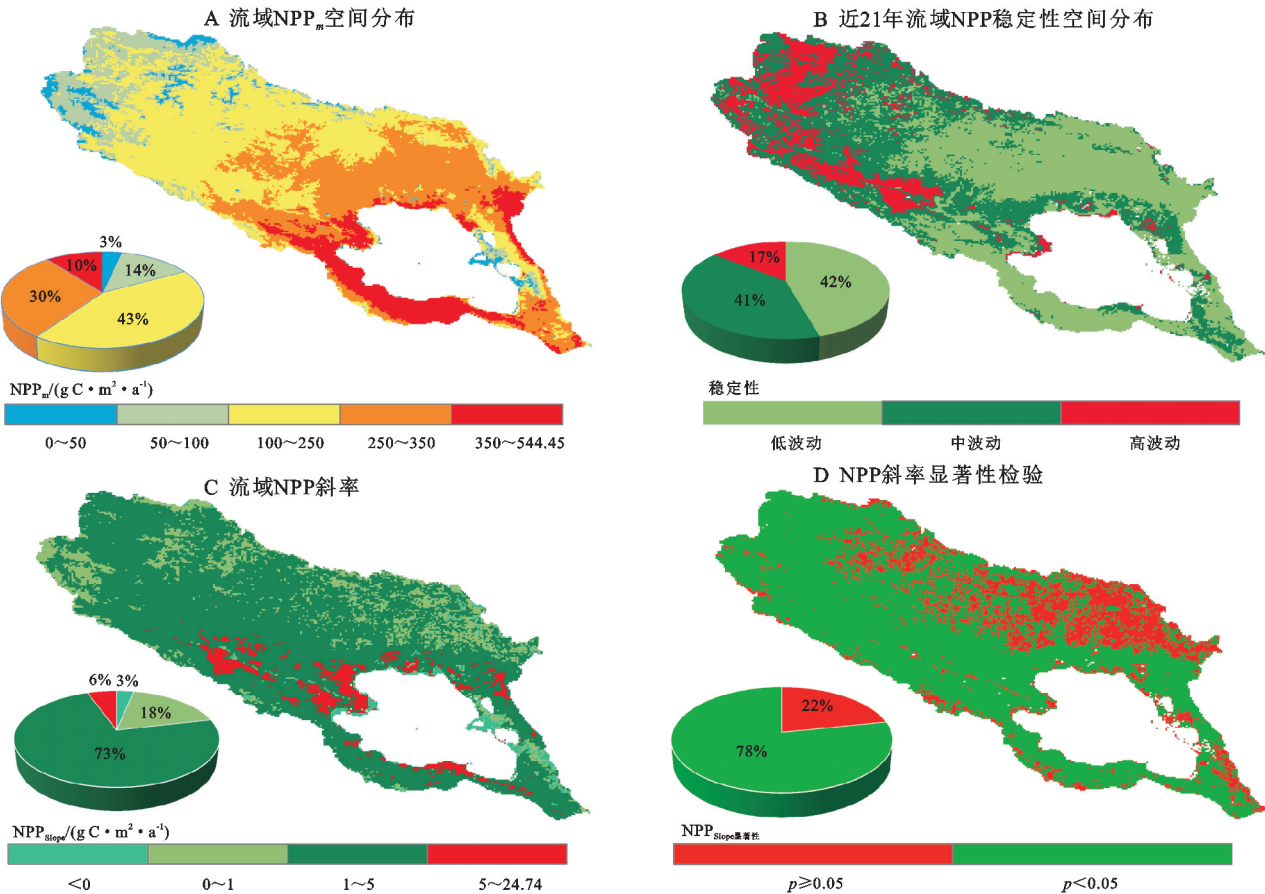


图 3 2000—2020 年青海湖流域植被 NPP 空间格局

Fig. 3 NPP spatial pattern in Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

2000—2020 年子流域像元分析表明,NPP_m最大值为 $345.58\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$,出现在黑马河流域,最小值为 $168.45\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$,出现在布哈河流域。多年来,黑马河流域年 NPP 像元值均高于同年其他流域(图 4)。流域 NPP_m 像元均值排序依次是黑马河流域>甘子河流域>茶挤河流域>倒淌河流域>流域外区域>泉吉河流域>哈尔盖河流域>沙柳河流域>布哈河流域。

各子流域年 NPP 增长值由高至低依次是甘子河流域($4.2\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、茶挤河流域($2.95\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、黑马河流域($2.83\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、其他区域($2.77\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、倒淌河流域($2.7\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、布哈河流域($2.18\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、泉吉河流域($1.83\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、沙柳河流域($1.32\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)、哈尔盖河流域($1.26\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$)。

2.2 流域植被 NPP 的海拔梯度效应

青海湖流域地势自西北到东南呈现出 2 099 m 的垂直落差,通过对 2000—2020 年不同海拔梯度植被 NPP 分布及变化趋势进行分析,发现随海拔的增

加流域多年平均植被净初级生产力(NPP_m) ($R^2=0.9\text{ }p<0.05$)、多年平均气温(T_m) ($R^2=0.98\text{ }p<0.05$)、多年平均植被覆盖度(FVC_m) ($R^2=0.71\text{ }p<0.05$)均呈现出显著下降趋势。每上升 100 m 海拔,NPP_m 减少 $18.035\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$, T_m 降低 $0.695\text{ }^\circ\text{C}$ 、FVC_m 减少 3.5%。与此不同的是流域多年平均降水量(P_m) ($R^2=0.15\text{ }p>0.05$)表现出随海拔上升而增加的趋势,海拔每上升 100 m, P_m 增加 0.97 mm (表 1)。

在过去 21 年间,流域植被 NPP_m 随海拔上升呈现增大—平稳—减小的变化特点,在海拔 3 200~3 300 m,植被 NPP_m 值处于上升阶段,海拔每上升 100 m, NPP_m 增加 $78.52\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$;在海拔 3 300~3 600 m, NPP_m 处于相对稳定状态,此阶段 NPP_m 像元均值为 $299.43\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$,在全海拔段属于高值区;海拔 3 600 m 以上,NPP_m 出现快速降低,平均海拔每升高 100 m, NPP_m 减少 $21.87\text{ g C}\cdot\text{m}^2/\text{a}$ (图 5)。

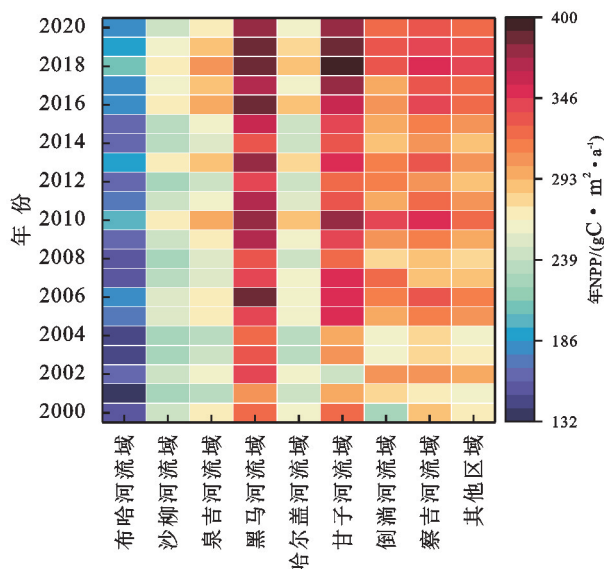


图 4 2000—2020 年青海湖流域子流域年 NPP 热图

Fig. 4 NPP heat maps of sub-basins in Qinghai

Lake Basin from 2000 to 2020

表 1 海拔上各因子线性拟合

Table 1 Linear fitting table of each factor at elevations

影响因子	拟合方程	拟合系数	显著性检验
NPP_m	$y = -18.04x + 347.3$	$R^2 = 0.90$	$p < 0.01$
P_m	$y = 0.97x + 407.57$	$R^2 = 0.15$	$p > 0.10$
T_m	$y = -0.69x + 1.15$	$R^2 = 0.98$	$p < 0.01$
FVC_m	$y = -0.03x + 0.79$	$R^2 = 0.71$	$p < 0.01$

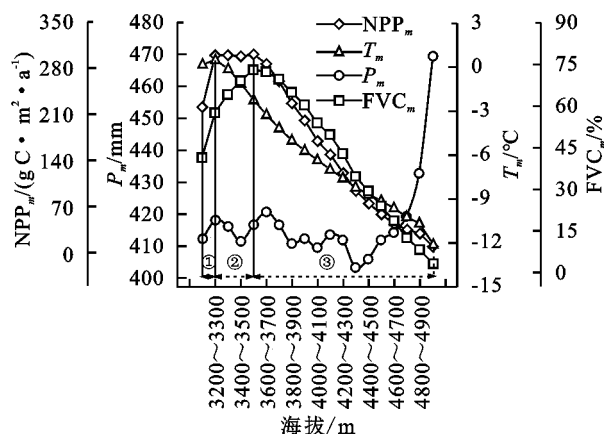


图 5 不同海拔各研究要素变化趋势

Fig. 5 Variation trend of research factors at different elevations

2.3 流域植被 NPP 的微地形效应

青海湖流域 NPP_m 在坡度上的变化范围在 $126.08 \sim 240.34 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 。由图 6 可知,坡度对 NPP_m 的分布产生了一定的影响。具体看来,平坡地区 NPP_m 最高,险坡最低。流域植被 NPP_m 总体呈现随坡度增加而逐步减少的变化趋势。平均每上升一级坡度, NPP_m 降低 $24.03 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 。

此外,流域内多年平均气温 (T_m) 与多年平均植被覆盖度 (FVC_m) 在坡度上的变化趋势同样表现为

随坡度上升而递减。 T_m 表现出持续下降的趋势, FVC_m 在平坡到缓坡间有明显上升,随后持续下降。流域多年平均降水量 (P_m) 随坡度增加表现为先增后减的趋势,在陡坡达到最大值(图 6)。

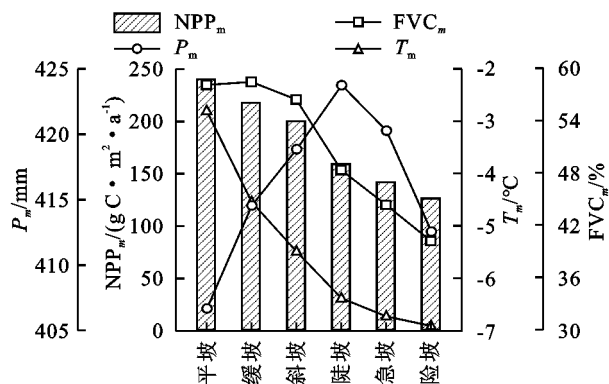


图 6 不同坡度上的各研究要素变化趋势

Fig. 6 Variation trend of each research factors on different slopes

流域内 NPP_m 在坡向上具有明显但少量的“V 字型”变化特征(图 7)。 NPP_m 均值在 $209.89 \sim 227.28 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$,最大变化幅度为 $17.39 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 。流域内植被 NPP_m 在坡向上的分布表现为由北坡下降,然后在南坡到达转折点逐渐上升。这种变化趋势与多年平均气温 (T_m) 和多年平均植被覆盖度 (FVC_m) 分布基本一致。然而流域多年平均降水量 (P_m) 的分布趋势仅在北坡到东北坡、南坡到西坡与 NPP_m 相符。

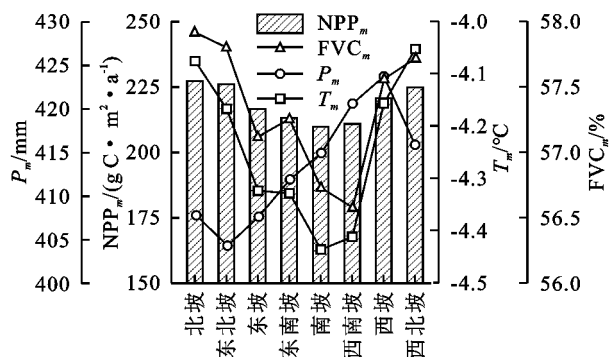


图 7 不同坡向上各研究要素变化趋势

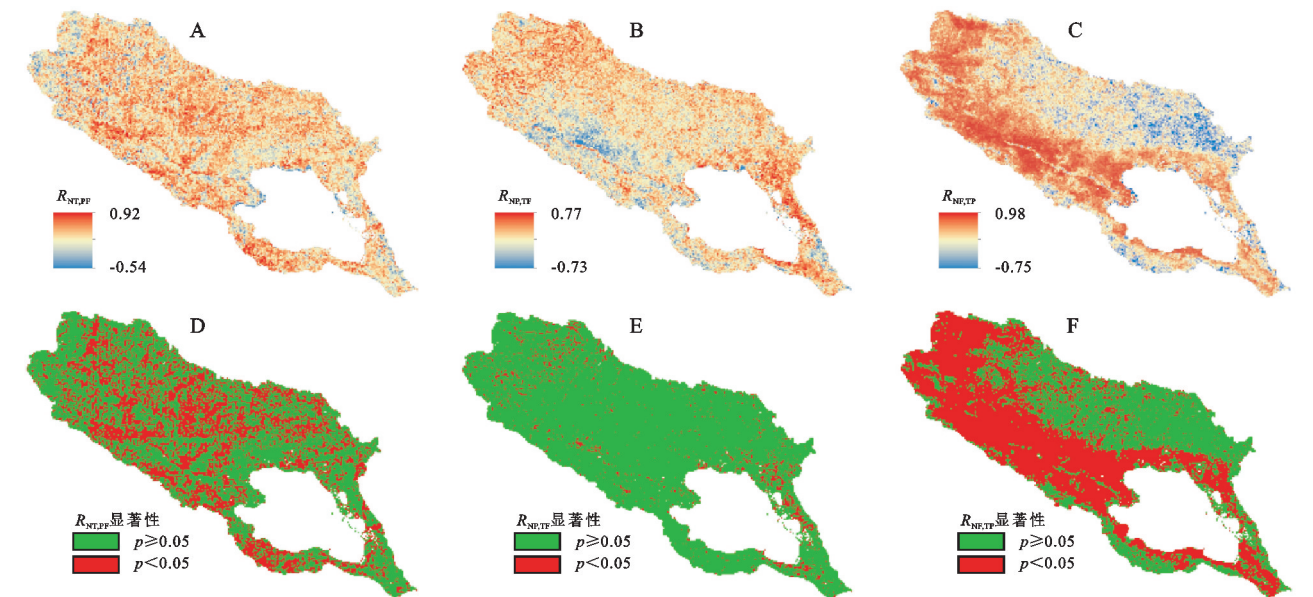
Fig. 7 Variation trend of each research factors on different aspects

2.4 气候及植被覆盖度对流域 NPP 的影响

为探究气候要素及 FVC 变化对流域 NPP 的影响,本研究对 2000—2020 年 NPP 与年降水量、年均气温、年植被覆盖度的栅格数据进行逐像元偏相关分析,并进行显著性检验。分析结果表明,植被 NPP 与气温的偏相关系数在 $-0.54 \sim 0.92$,其中显著正相关 ($p < 0.05$) 的区域占据流域面积的 40%; NPP 与降水量的偏相关系数在 $-0.73 \sim 0.77$,其中仅 9% 的区域通过显著性检验,显著正相关区域占比 7.86%; NPP 与植被覆盖度的偏相关系数介于 $-0.75 \sim 0.98$,通过检验

的区域占比 59%，显著正相关区域占 58.5%（图 8）。
综上，青海湖流域植被 NPP 与植被覆盖度具有极强的线性关系，这可能与植被覆盖度本身受降水量

和气温影响较大有关^[25]，因此本研究将继续对气温和降水量对流域植被 NPP 的影响利用一级偏相关分析进行分析。



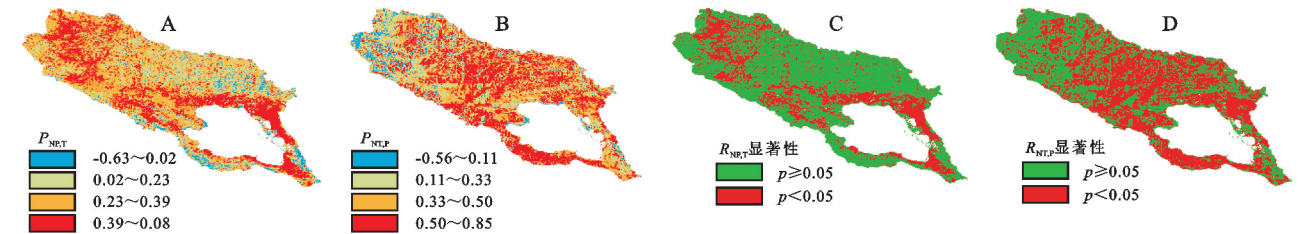
注：图中 NPP 与气温 A、降水量 B 和植被覆盖度 C 的空间相关性图依次对应显著性检验图 D、E、F。

图 8 青海湖流域植被 NPP 与气温、降水量和植被覆盖度的空间相关性 & t 检验结果
Fig. 8 Spatial correlation of NPP with temperature, precipitation, vegetation coverage and the T-test results in Qinghai Lake Basin

上述二级偏相关分析结果表明，流域植被 NPP 与植被覆盖度之间具有显著的相关性。而在考虑植被覆盖度不变的情况下，NPP 与降水量和气温之间相关性较弱，这种结果可能暗示着气温和降水量对流域 NPP 的影响较为复杂。因此，本研究进一步采用了逐像元一级偏相关分析，以探讨年均气温和年降水量与流域年 NPP 之间的关系。

分析表明气温和降水量与流域 NPP 呈显著偏相关关系。显著相关区域分别达到 59.26% 和 33.39%（图 9）。植被 NPP 与降水量的显著相关区域主要分布于青海湖北岸和东北岸耕地区域，以及布哈河上、下游山地。植被 NPP 与气温显著相关的区域则主要

位于青海湖南岸、茶挤河流域、沙流河流域、哈尔盖河下游、甘子河流域及布哈河流域中下游地区。且在流域局部年均气温和年降水量与植被 NPP 的相关性呈现相反的表现，即与降水量相关性大的区域与气温相关性小，反之亦然，这一现象在青海湖南北两岸表现尤为明显。综上，在青海湖流域，气温与植被 NPP 的相关性高于降水量。这可能是因为植物生长季期间，高海拔区域降水的增加会导致温度下降，进而引起低温胁迫^[26]，导致植物叶肉内部酶活性降低，植被叶片气孔开度减小，从而导致光合速率降低，最终限制植物生长，进而影响植被植物生产力的积累。



注：图中 NPP 与气温 A、降水量 B 的空间相关性图依次对应显著性检验图 C、D。

图 9 青海湖流域植被 NPP 与降水、气温的空间相关性 & t 检验结果

Fig. 9 Spatial correlation of NPP with precipitation, temperature and T-test results in Qinghai Lake Basin

2.5 流域植被 NPP 驱动分析

前文分析了植被 NPP 与气温、降水和植被覆盖度等 3 类不稳定环境因子在空间上与流域 NPP 的相关性。为深入探讨各因子对流域 NPP 的驱动机制，

本研究使用地理探测器模型，将海拔、坡度、坡向、气温、降水量、人类活动强度作为影响因子，进一步对流域 NPP 的驱动机制进行分析。

因子探测器结果如表 2 所示,各影响因子对流域 NPP 的解释力排序依次是气温>海拔>人类活动强度>坡度>降水>坡向。由表 2 可知,气温、海拔、人

表 2 因子探测结果

Table 2 The result of factor detection

影响因子	海拔	坡度	坡向	气温	降水量	人类活动强度
q 值	0.5444	0.064	0.0044	0.5773	0.04244	0.3746

因子交互作用探测显示(图 10),双因子交互对流域 NPP 变化的解释力均大于单因子,各因子交互类型表现为双因子增强和非线性增强。其中,交互作用解释力最强的是海拔、气温和降水量的交互,解释力分别达到 67% 和 74%;交互作用最弱的是坡度和坡向的交互,解释力为 12%。以上分析结果进一步说明了植被 NPP 在自然环境下的时空分布特征受到多因子共同驱动,但总体而言自然因素的影响力大于人类活动。

3 讨论

分析得到 2000—2020 年青海湖流域植被 NPP 整体呈现上升趋势。21 年间的 NPP 均值为 $217.29 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$,其中 2018 年达到年 NPP 最高值,而 2001 年记录了最低值。最低值的出现可能与 2001 年经历了 21 年来最严重的干旱年有关,当年的降水量降至历史最低水平(图 11),由此带来的干旱胁迫严重抑制了流域植被生长及光合作用^[27]。随着 2018 年降水量回升和水热条件趋于平衡,随即该年成为 21 年来植被年 NPP 最高年份。因此,降水量的增加为植被生长提供了其所需水分,而温度的降低则会减

少了水分蒸发。这也符合乔凯等^[10]的研究结果,即青海湖流域年内 NPP 变化受到气温、降水在季节韵律上的变化。同时这一变化特征也表明气候要素的平衡最有利于植被生长,当平衡被打破,单一气候要素将对植被生长及生产力积累产生作用,这种单一要素作用下的植物生长将受到抑制^[28]。这也势必将对植被 NPP 的积累产生消极影响。

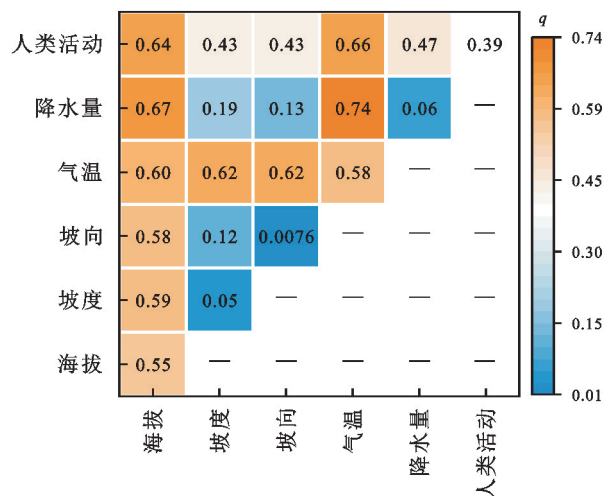


图 10 因子交互探测图

Fig. 10 Factor interaction probe diagram

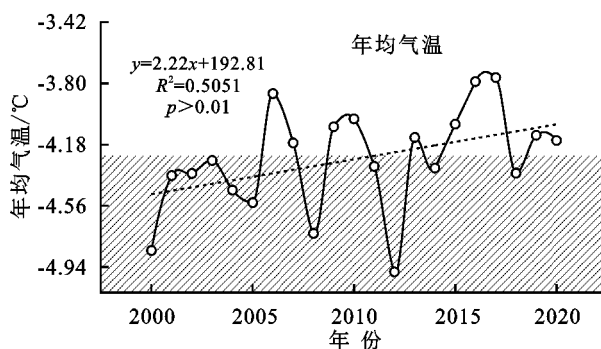
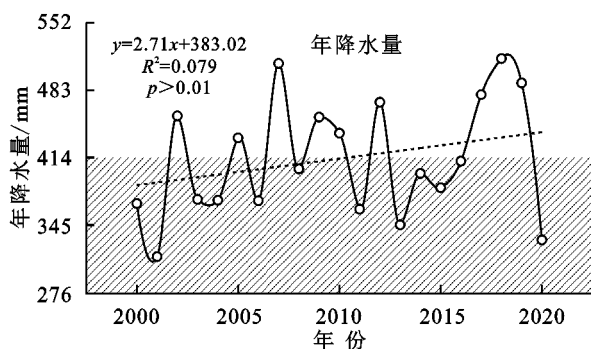


图 11 青海湖流域年均气温和年降水量时间变化趋势

Fig. 11 Temporal variation trend of mean annual temperature and annual precipitation in Qinghai Lake Basin

流域内年植被 NPP 空间上呈现由西北到东南逐步增长、以青海湖为中心辐散减弱的趋势。相关研究也表明青藏高原地区,植被 NPP 呈现从东南向西北逐渐递增的分布格局^[29]。海拔分析显示,在青海湖流域 3 169~3 300 m 海拔段,多年平均气温(T_m)呈现上升趋势,在海拔 3 300 m 达到最大值,这一趋势与多年平均植被覆盖度(FVC_m)变化基本一致。在 3 300~3 600 m 海

拔范围内由于水热组合较好,NPP_m 也出现最大值。因此,在青海湖流域伴随着海拔上升,气温降水的组合从暖而湿向冷且干过渡,进而导致了植被 NPP 的海拔分级现象。坡度分析显示,随坡度增加植被 NPP_m 呈下降趋势。这与王莉娜^[29]在祁连山公园的研究结果相同,主要原因可能是随坡度增加,植被所需水分和营养物质开始流失,进而导致植被 NPP_m 降

低。坡向分析显示,21年间,流域 NPP_m 最大变化幅度为 $17.39 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 。出现这种变化的原因可能是气温等环境因子在坡向上的空间异质性导致。

在全流域看来, NPP_m 增长最为明显($\text{Slope} > 5$)的区域分布于布哈河下游干支流交汇的河道周边、各流域河流干支流交汇及入湖口处及江西沟等地。出现负增长的区域主要是青海湖沙岛和布哈河、沙柳河河流入湖口及湖口三角洲区域。结合地理探测器结果、野外实践经验及相关政策信息, NPP_m 在不同流域位置表现出来不同变化状况受到地形、水热条件及人类活动共同影响。青海湖流域早期由于过度放牧、草原鼠虫害、土地荒漠化等自然和人为原因,植被发育持续受到伤害,生态环境日趋恶化。随着生态环境建设工程、退耕还林还草工程等生态防护建设工程实施,青海湖流域生态才开始逐步恢复,植被生产率开始有效提升^[30]。实现了由沙逼人退到绿进沙退的重大转变。

4 结论

(1) 2000—2020年青海湖流域年 NPP 在 $182.74 \sim 254.6 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 变化,线性递增率为 $2.22 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$,整体呈现波动上升趋势。空间上呈现由西北到东南逐步增长,以青海湖为中心辐散减弱的分布格局。

(2) 青海湖流域植被 NPP 随海拔上升表现出增大—平稳—减小的变化特征,在 $3\,300 \sim 3\,600 \text{ m}$ 海拔段达到最大值,海拔每上升 100 m , NPP_m 减少 $18.035 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 。随坡度增加 NPP_m 逐步减少,在平坡达到最大值,平均每上升一级坡度, NPP_m 降低 $24.03 \text{ g C} \cdot \text{m}^2/\text{a}$ 。在坡向上 NPP_m 变化不大。在子流域面上黑马河流域 NPP_m 最高。

(3) 相关分析表明流域植被 NPP 与植被覆盖度具有极强的相关性,二级偏相关分析中显著相关区域占比 59% 。气温和降水量与流域 NPP 的一级偏相关分析中显著相关区域分别达到 59.26% 和 33.39% 。

(4) 探测结果显示:单因子驱动力强度依次是气温 $>$ 海拔 $>$ 人类活动强度 $>$ 坡度 $>$ 降水 $>$ 坡向。气温是流域 NPP 主要驱动因子,因子交互影响力强于单一因子,气温、海拔、人类活动、降水量的交互作用成为影响青海湖流域植被 NPP 的主要驱动类型。

参考文献(References):

- [1] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production[J]. *Bioscience*, 2004,54(6):547-560.
- [2] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998,281(5374):237-240.
- [3] 刘芳,迟耀斌,王智勇,等. NPP 列入生态统计指标体系的潜力分析:以北京地区 NPP 测算与空间分析为例[J]. *生态环境学报*, 2009,18(3):960-966.
Liu F, Chi Y B, Wang Z Y, et al. Potential analysis on NPP included as ecological statistical indicators: Taking Beijing vegetation net primary productivity measurement and spatial analysis as an example[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009,18(3):960-966.
- [4] 姚檀栋,朱立平.青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. *地球科学进展*, 2006,21(5):459-464.
Yao T D, Zhu L P. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy[J]. *Advances in Earth Science*, 2006,21(5):459-464.
- [5] 刘飞,刘峰贵,周强,等.青藏高原生态风险及区域分异[J]. *自然资源学报*, 2021,36(12):3232-3246.
Liu F, Liu F G, Zhou Q, et al. Ecological risk and regional differentiation in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021,36(12):3232-3246.
- [6] 张德铨,祁威,周才平,等.青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. *地理学报*, 2013,68(9):1197-1211.
Zhang Y L, Qi W, Zhou C P, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013,68(9):1197-1211.
- [7] 周才平,欧阳华,王勤学,等.青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. *地理学报*, 2004,59(1):74-79.
Zhou C P, Ouyang H, Wang Q X, et al. Estimation of net primary productivity of major ecosystems in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2004,59(1):74-79.
- [8] 曹生奎,曹广超,陈克龙,等.青海湖高寒湿地土壤有机碳含量变化特征分析[J]. *土壤*, 2013,45(3):392-398.
Cao S K, Cao G C, Chen K L, et al. Characteristics of alpine wetland soil organic carbon variations around Qinghai Lake[J]. *Soils*, 2013,45(3):392-398.
- [9] 李小雁,许何也,马育军,等.青海湖流域土地利用/覆被变化研究[J]. *自然资源学报*, 2008,23(2):285-296.
Li X Y, Xu H Y, Ma Y J, et al. Land use/cover change in the Qinghai Lake watershed[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008,23(2):285-296.
- [10] 乔凯,郭伟.青海湖流域植被的净初级生产力估算[J]. *水土保持通报*, 2016,36(6):204-209.
Qiao K, Guo W. Estimating net primary productivity of alpine grassland in Qinghai Lake basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(6):204-209.
- [11] 王琪,吴成永,陈克龙,等.基于 MODIS NPP 数据的青海湖流域产草量与载畜量估算研究[J]. *生态科学*,

- 2019,38(4):178-185.
- Wang Q, Wu C Y, Chen K L, et al. Estimating grassland yield and carrying capacity in Qinghai Lake Basin based on MODIS NPP data[J]. *Ecological Science*, 2019,38(4):178-185.
- [12] 王志刚,曹生奎,曹广超.近 15 年来青海湖流域气温、降水变化对植被物候驱动分析[J].*水土保持研究*, 2022,29(1):249-255.
- Wang Z G, Cao S K, Cao G C. Analysis on the drive of temperature and precipitation changes to vegetation phenology of the Qinghai Lake basin in the past 15 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):249-255.
- [13] 张乐乐,高黎明,陈克龙.高分辨率遥感降水资料在青海湖流域及周边区域的适用性评价[J].*水文*, 2020,40(5):15-21.
- Zhang L L, Gao L M, Chen K L. Evaluation of high-resolution remote sensing precipitation data in and near Qinghai Lake basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020,40(5):15-21.
- [14] 潘虹,顾海敏,史建桥,等.基于 RS 和 GIS 的青海湖流域植被覆盖度变化与驱动因子研究[J].*资源开发与市场*, 2016,32(7):827-831,768.
- Pan H, Gu H M, Shi J Q, et al. Study on changes of vegetation fraction and its driving factors in Qinghai Lake basin based on RS and GIS[J]. *Resource Development & Market*, 2016,32(7):827-831,768.
- [15] 李岳坦,李小雁,崔步礼,等.青海湖流域 50 年来(1956—2007 年)河川径流量变化趋势:以布哈河和沙柳河为例[J].*湖泊科学*, 2010,22(5):757-766.
- Li Y T, Li X Y, Cui B L, et al. Trend of stream flow in Lake Qinghai Basin during the past 50 years (1956—2007)—Take Buha River and Shaliu River for examples[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010,22(5):757-766.
- [16] 俞文政,曲福田,张和平,等.青海湖地区草地资源生产潜力及可持续利用分析[J].*中国草地学报*, 2007,29(3):78-83.
- Yu W Z, Qu F T, Zhang H P, et al. The analysis on the productive potential and sustainable utilization of grassland resources in Qinghai Lake Region [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2007,29(3):78-83.
- [17] 拓进宝.2000-2016 年青海湖流域 NDVI 时空变化及其与环境因子的关系[D].西宁:青海师范大学,2019.
- Tuo J B. Temporal and spatial evolution of NDVI in Qinghai lake basin and its relationship with environmental factors[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2019.
- [18] Liu H M, Cheng Y, Liu Z F, et al. Conflict or coordination: The spatiotemporal relationship between humans and nature on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth's Future*, 2023,11(9):2022EF003452.
- [19] 中华人民共和国生态环境部.全国生态状况调查评估技术规范:草地生态系统野外观测 HJ1168—2021[S].北京:中国环境科学出版社,2021-08-01.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specification for investigation and assessment of national ecological status: Field observation of grassland ecosystem HJ1168—2021[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021-08-01.
- [20] 中华人民共和国生态环境部.全国生态状况调查评估技术规范:森林生态系统野外观测 HJ1167—2021[S].北京:中国环境科学出版社,2021-08-01.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical Specification for Investigation and Assessment of National Ecological Status—Field Observation of Forest Ecosystem HJ1167—2021[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021-08-01.
- [21] 康利刚,曹生奎,曹广超,等.青海湖流域地表温度时空变化特征研究[J].*干旱区地理*, 2023,46(7):1084-1097.
- Kang L G, Cao S K, Cao G C, et al. Spatiotemporal variation of land surface temperature in Qinghai Lake Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2023,46(7):1084-1097.
- [22] 同琳静,刘洋洋,王倩,等.青藏高原草地降水利用效率时空动态及对气候变化的响应[J].*干旱地区农业研究*, 2019,37(5):226-234.
- Tong L J, Liu Y Y, Wang Q, et al. Spatial-temporal dynamics of precipitation use efficiency in grassland and its relationship with climate changes on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019,37(5):226-234.
- [23] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社,2017.
- Xu J H. Mathematical methods in contemporary geography[M]. 3rd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*, 2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [25] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].*生态学报*, 2018,38(9):3208-3218.
- Zhuoga, Chen S R, Zhou B. Spatio-temporal variation of vegetation coverage over the Tibetan Plateau and its responses to climatic factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(9):3208-3218.

- ince based on land-use change[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2023, 47(4): 200-208.
- [18] 姚文艺, 焦鹏. 黄河流域水土保持综合治理空间均衡性分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 1-7, 22.
Yao W Y, Jiao P. Spatial equilibrium analysis of comprehensive control of soil and water conservation in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 1-7, 22.
- [19] 张攀, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(1): 109-116.
Zhang P, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Interactive superposition effect of multi-dynamic erosion in the Pisha sandstone area of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(1): 109-116.
- [20] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018, 40(6): 1-7, 65.
Yao W Y, Li C M, Zhang P, et al. Prospect and research on the erosion mechanism of pisha sandstone [J]. *Yellow River*, 2018, 40(6): 1-7, 65.
- [21] 王宗明, 张树清, 张柏. 土地利用变化对三江平原生态系统服务价值的影响[J]. *中国环境科学*, 2004(1): 126-129.
Wang Z M, Zhang S Q, Zhang B. Effects of land use change on values of ecosystem services of Sanjiang Plain, China [J]. *China Environmental Science*, 2004(1): 126-129.
- [22] 张天海, 田野, 徐舒, 等. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.
Zhang T H, Tian Y, Xu S, et al. The evolvement of land use patterns in coastal cities and its influence on ecosystem service values [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7572-7581.
- [23] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1280-1290.
Zhang J, Lei G, Qi L H, et al. The landscape pattern and ecological service value in Danjiangkou City under land use change from 2003 to 2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1280-1290.
- [24] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13.
Xie G D, Xiao Y, Zhen L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10-13.
- [25] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 373-381.
Li X S, Zhu Y M, Zhao L, et al. Ecosystem services value change in Qinglong County from dynamically adjusted value coefficients [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3): 373-381.
- ~~~~~
- (上接第 336 页)
- [26] 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等. 2000—2014 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 592-601.
Xu J, Chen H L, Shang S S, et al. Response of net primary productivity of Tibetan Plateau vegetation to climate change based on CEVSA model [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 592-601.
- [27] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1533-1538.
Liu J, Ji Y H, Zhou G S, et al. Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [28] 徐兴奎, 陈红, Levy Jason K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析[J]. *科学通*
报, 2008, 53(4): 456-462.
Xu X K, Chen H, LEVY Jason K. Temporal and spatial changes of vegetation coverage characteristics in Qinghai-Tibet Plateau under the background of climate warming and its causes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(4): 456-462.
- [29] 王莉娜, 宋伟宏, 张金龙, 等. 祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析[J]. *草业科学*, 2020, 37(8): 1458-1474.
Wang L N, Song W H, Zhang J L, et al. Spatio-temporal evolution of vegetation net primary productivity in Qilian Mountain National Park and its driving factors [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1458-1474.
- [30] 朱华. 青海湖流域生态治理模式与对策研究[J]. *青海社会科学*, 2012(6): 94-98.
Zhu H. Study on ecological management model and countermeasures in Qinghai Lake Basin [J]. *Qinghai Social Sciences*, 2012(6): 94-98.