

青海湖流域陆地生态系统NEP时空格局及驱动因素定量分离

胡云云,何学高,李国兴,闫鑫泽,魏江涛,刘欢,程炜,侯晓巍

(国家林业和草原局西北调查规划院 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710048)

摘要: [目的] 量化气候变化和人类活动对青海湖流域陆地生态系统固碳的影响,为评估区域植被固碳能力、制定气候变化应对措施及实施生态修复提供科学依据。[方法] 基于MODIS遥感数据估算净生态系统生产力(NEP),采用趋势分析、稳定性分析、Hurst指数和重心迁移等方法,探究青海湖流域2000—2021年NEP时空格局和演替规律,利用偏相关、复相关及残差分析定量分离气候变化和人类活动驱动NEP时空分异的影响。[结果] 1)青海湖流域2000—2021年NEP呈逐年上升趋势,增长速率为 $2.16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,表现为东南高西北低、以青海湖为中心辐散减弱的空间分布格局;近80%的区域NEP呈上升趋势,极显著上升、显著上升区域占比分别为61.50%、17.61%,NEP下降区域分布在环青海湖西、北沿岸和东北沿岸地区,零星分布在流域的北部;青海湖流域NEP极低波动和低波动变化区域面积占比77.32%;目前NEP增加的区域未来可能呈减少趋势,面积占比为89.19%;碳源的重心整体表现为由流域西北向东南青海湖沿岸迁移的趋势,迁移直线距离约为171.72 km;碳汇重心则由东向西迁移,迁移直线距离约为2.68 km。2)青海湖流域NEP年际变化与气温、降水、太阳辐射、地表温度的平均偏相关系数分别为0.141 3、0.124 7、-0.182 9和-0.002 2,气温和降水与NEP呈正相关,太阳辐射和地表温度与NEP呈负相关,显著性均不强。3)残差分析表明,气候变化和人类活动共同促进NEP提升的区域占95.10%。[结论] 气候和人类活动共同影响NEP变化,2000—2021年,青海湖流域陆地生态系统大部分地区碳汇能力显著提升。流域内暖湿化气候背景下,青海省近年来贯彻落实封山禁牧措施、大力实施固沙种草造林等生态综合治理工程共同促进NEP不断提升,而人为活动的增加和建设开发活动频繁及青海湖水位升高、面积扩张可能抑制NEP提升。

关键词: 净生态系统生产力; 气候变化; 时空格局; 人类活动; 青海湖流域

中图分类号: X87.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0254-13

Spatiotemporal Patterns and Quantitative Separation of Driving Factors for NEP in Terrestrial Ecosystem of Qinghai Lake Basin

HU Yunyun, HE Xuegao, LI Guoxing, YAN Xinze, WEI Jiangtao, LIU Huan, CHENG Wei, HOU Xiaowei

(Northwest Surveying and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an, 710048, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantify the effects of climate change and human activities on carbon sequestration in the terrestrial ecosystems of the Qinghai Lake basin, providing a scientific basis for assessing carbon sequestration capacity of regional vegetation, formulating climate change response measures, and implementing ecological restoration. [Methods] Based on MODIS remote sensing data, net ecosystem productivity (NEP) was estimated. Trend analysis, stability analysis, Hurst index, and center migration methods were employed to investigate the spatiotemporal patterns and evolution trends of NEP in the Qinghai Lake basin from 2000 to 2021. Partial correlation, multiple correlation, and residual analysis were used to quantitatively separate the

收稿日期: 2025-02-28

修回日期: 2025-03-31

录用日期: 2025-04-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-29

资助项目: 陕西省重点研发计划项目(2022ZDLSF06-01); 国家林业和草原局计划项目(LC-2-02)

第一作者: 胡云云(1985—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事林草资源调查监测与评价研究。E-mail: 63970165@qq.com

通信作者: 侯晓巍(1977—), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事林草资源调查监测与评价研究。E-mail: 49810563@qq.com

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

effects of human activities and climate change on spatiotemporal differentiation of NEP. **[Results]** 1) Over the 22-year period, NEP in the Qinghai Lake Basin showed an increasing trend at a rate of $2.16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, with a spatial distribution pattern of higher values in the southeast and lower in the northwest, radiating outward from Qinghai Lake with diminishing intensity. Nearly 80% of the area exhibited an upward NEP trend, with extremely significant and significant increases accounting for 61.50% and 17.61%, respectively. Areas with declining NEP trends were distributed along the western, northern, and northeastern shores of Qinghai Lake, with sporadic occurrences in the northern part of the basin. Approximately 77.32% of the basin exhibited low and extremely low volatility in NEP changes, while 89.19% of the areas with increasing NEP were projected to shift to a decreasing trend in the future. The center of carbon sources generally migrated from the northwest to the southeastern shore of Qinghai Lake, covering a straight-line distance of about 171.72 km, whereas the center of carbon sinks shifted westward by approximately 2.68 km. 2) The average partial correlation coefficients between interannual NEP changes and temperature, precipitation, solar radiation, and land surface temperature were 0.141 3, 0.124 7, -0.182 9 and -0.002 2, respectively. Temperature and precipitation showed positive correlations with NEP, while solar radiation and land surface temperature exhibited negative correlations. All correlations were statistically insignificant. 3) Residual analysis indicated that regions where both climate change and human activities jointly promoted NEP increases accounted for 95.10% of the study area. **[Conclusion]** Climate and human activities jointly affect NEP changes. Over the past two decades, most areas of the Qinghai Lake Basin's terrestrial ecosystem have seen a notable increase in carbon sink capacity. Under a warmer and wetter climate background, ecological measures in Qinghai Province-such as grazing prohibition, desertification control, and afforestation-have collectively boosted NEP growth. However, increasing human activities, frequent construction projects, and the rising water level and expanding area of Qinghai Lake may hinder further NEP improvement.

Keywords: net ecosystem productivity; climate change; spatiotemporal pattern; human activities; Qinghai Lake basin

Received: 2025-02-28

Revised: 2025-03-31

Accepted: 2025-04-30

Online(www.cnki.net): 2025-05-29

自工业革命以来,化石燃料燃烧、森林砍伐等人类活动使大气中 CO_2 的浓度急剧增加^[1-2],全球气温上升引发旱涝灾害、热带风暴、海平面上升等一系列气候与环境问题^[3-4]。陆地生态系统碳循环已成为区域可持续发展和气候变化等领域的研究热点^[4]。

陆地生态系统是大气 CO_2 重要的汇^[5],净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)是植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)与土壤异氧呼吸的差值,能够代表陆地生态系统与大气间净碳储量的变化,是评估生态系统是否构成碳汇及其碳汇能力的关键指标。通过对不同生态系统的研究^[6]发现,净生态系统生产力受多种因素影响,包括气候变化、土壤湿度、植被类型及人类活动等,对于预测未来生态系统的固碳能力至关重要^[7]。例如,气候变化可能导致生态系统的碳汇能力下降,特别是在干旱和半干旱地区^[8]。随着城市化进程加快,人类活动的增加,土地利用的变化,许多地区的碳汇能力受到威胁^[9]。因此,保护和修复生态系统

的碳汇功能是应对气候变化的重要策略之一^[10]。通过分析净生态系统生产力的动态变化及其影响因素,可为制定生态保护和修复治理相关政策提供科学依据,从而促进陆地生态系统可持续发展和生态平衡^[11]。

目前,估算NEP的方法包括清查法^[12]、生态系统模型模拟^[13]、大气反演^[14]等。其中,生态系统模型模拟通常结合气象数据、植被指数和土壤特性等输入,利用生物地球化学过程来预测生态系统的碳吸收和释放。例如, NASA-CASA 模型和 Boreal Ecosystem Productivity Simulator(BEPS)等模型被广泛应用于不同地区的NEP估算^[15-16]。一方面,生态系统模型考虑多种环境因素的影响,如温度、降水和土壤湿度等,从而更深入地分析生态系统碳动态的变化及其机理^[17];另一方面,生态系统模型通过引入遥感数据估算,在分析碳源/汇方面具有时效性强、覆盖范围广等优势,被广泛应用于生态系统碳汇研究^[18-19]。

现有研究^[20]表明,陆地生态系统碳汇的动态变化

主要受气候变化和人为生态修复工程的共同驱动。开展区域生态修复和综合治理工程对促进自然植被恢复与碳汇提升具有显著影响。气候变化与人为因素间的交互作用,使得陆地生态系统植被碳汇的演变呈现复杂化趋势。然而,现有研究主要聚焦于气候因子(如温度和降水)对NEP的影响,而对复杂的人为因素及其与其他因素的交互作用关注不足,且大多研究仍以林业碳汇为主,重点关注森林生态系统,缺乏对植被碳源/汇功能的整体性与系统性研究^[21]。

世界第三极青藏高原是中国气候变化和生态环境变化的脆弱带与敏感区,植被生长状况对气候变化和人类活动响应明显^[22]。青海湖流域是青藏高原东北部重要的自然地理区域,是阻挡西部荒漠向东蔓延的天然屏障^[23]。以往青海湖流域研究主要集中在植被生长状况及其覆盖度变化方面,NEP时空分布特征及其驱动机制尚缺乏深入的研究。开展青海湖流域NEP时空分布格局特征及其驱动因子的分析研究,不仅能有效评估该区域生态系统的健康状况,更能当地研究制定碳汇管理策略和探索可持续发展路径指明方向。本研究选取青海湖流域为研究区,利用遥感技术在像元尺度分析其2000—2021年NEP的时空分布格局和变化规律,利用重心迁移、偏相关分析、复相关分析和多元回归残差分析揭示气候因素和人类活动对青海湖流域植被碳源/汇时空格局的影响,进一步量化气候变化和人类活动对生态系统固碳的影响,以期评估区域植被固碳能力、制定气候变化应对措施、实施生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域(36°10′12″~38°25′12″,97°31′12″~101°27′00″)位于青海省东北部,四周被日月山、青海南山、天峻山、大通山所环绕。地处柴达木盆地、湟水谷地、江河源头与祁连山地的过渡地带,是连通甘肃河西走廊、西藏、新疆的通道,境内的青海湖是中

国最大的内陆咸水湖。流域内草地、水域及水利设施用地面积占比近90%,景观基质单一,生态连通度高,物能流动便利,生物扩散便捷,生态过程完整,是我国西部完整的陆域和水域生态系统集成,同时也是青藏高原生境最丰富的地段之一(图1)。

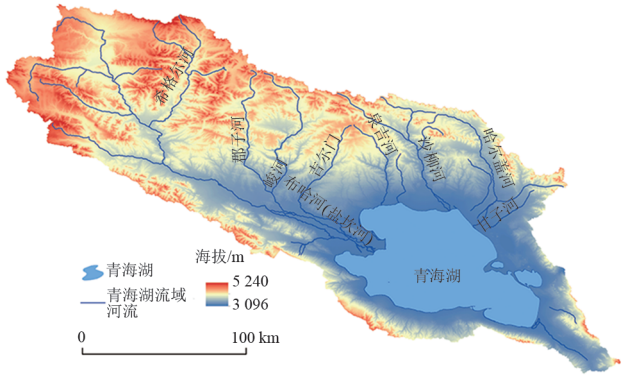


图1 青海湖流域
Fig. 1 Scope of Qinghai Lake basin

1.2 数据来源及NPP数据精度验证

1.2.1 数据来源 青海湖流域行政边界分布数据集来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn/portal/>)。土地利用数据来自武汉大学发布的30 m空间分辨率中国土地利用数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo.8176941>)。NPP、降水、气温、地表温度、太阳辐射遥感数据均基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台获取(表1)。其中,NPP数据来源于MOD17A3 HGF V6产品提供的500 m空间分辨率的年度NPP数据;气温、地表温度和太阳辐射数据采用ERA5-Land Hourly-ECMWF Climate Reanalysis 逐小时数据集,空间分辨率为0.1°;降水数据来自气候危害组红外降水与站点数据(Climat Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, CHIRPS),空间分辨率为0.05°;用于验证Modis NPP数据可靠性的CASA NPP来源于国家科技图书文献中心国家生态屏障1 km分辨率植被净初级生产力数据集(2000—2015年)^[24]。

表1 基于GEE平台获取的数据

Table 1 Data obtained based on GEE platform

数据	数据集	波段	分辨率	单位	来源
NPP	MOD17A3HGF V6	Npp	500 m	kg/m ²	NASA LP DAAC at the USGS EROS Center
降水	CHIRPS	precipitation	0.05°	mm	UCSB-CHG
气温	ERA5-land	temperature_2 m	0.1°	℃	Climate Data Store
太阳辐射	ERA5-land	surface_net_solar_radiation	0.1°	J/m ²	Climate Data Store
地表温度	ERA5-land	skin_temperature	0.1°	℃	Climate Data Store

1.2.2 NPP数据精度验证 依托GEE云平台获取MODIS传感器MOD17A3HGF v061 NPP数据集,为验证其精度,选择2000—2015年青海湖流域范围CASA模型计算的NPP数据与本研究相应时间段MODIS NPP进行对比,函数表达式为 $y=1.0447x$, $R^2=0.9525$, $p<0.01$,结果表明,本研究所使用的MODIS NPP数据具备较高的可靠性(图2)。

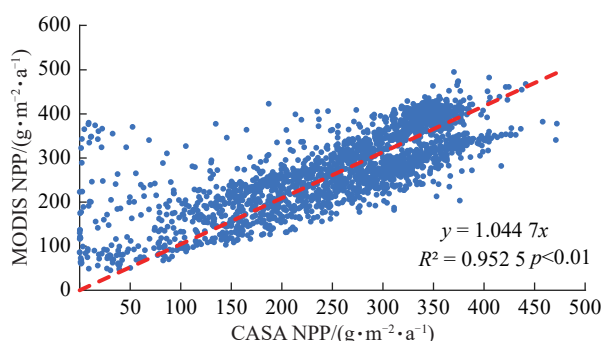


图2 研究区MODIS NPP数据与CASA计算NPP数据对比
Fig. 2 Comparison of MODIS NPP data and CASA NPP data for study area

1.3 NEP估算模型

NEP指生态净初级生产力NPP与土壤微生物呼吸碳排放(R_H)的差值^[25],即:

$$NEP = NPP - R_H \quad (1)$$

$$R_H = 0.22 \times [\text{Exp}(0.0913T) + \ln(0.3145R + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中: R_H 为年土壤微生物呼吸碳排放量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计),采用PEI等^[26]建立的模型估算,该模型在中国西北干旱区与青藏高原均通过验证^[27-28];T为年平均气温, $^{\circ}\text{C}$;R为年平均降水量,mm。

1.4 时间序列趋势分析

采用趋势分析法对随时间变化的序列数据进行回归分析,研究陆地生态系统2000—2021年碳汇/源的时空演变特征,从而预测其长期变化态势。趋势斜率公式^[23]为:

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

式中: n 为总年份数;Slope为NEP在 n 年间的变化趋势值; NEP_i 为第 i 年的NEP值。当 $\text{Slope} > 0$ 时,NEP值在研究时段内增加,反之则减少,并对NEP变化趋势进行显著性检验, $0.01 \leq p < 0.05$ 表示变化显著, $p < 0.01$ 表示变化极显著。

1.5 稳定性分析

变异系数(coefficient of variation, CV)是衡量数

据离散程度的统计量,本研究通过计算像元的CV评估NEP在时间序列上的稳定性。计算公式参考文献[29]。

1.6 未来演变趋势分析

Hurst指数用于量化时间序列的长程依赖性,通常通过重标度极差法计算。利用Hurst指数预测研究区NEP未来演变趋势。当Hurst指数 >0.5 时,序列具有正持续性,未来趋势与过去一致;反之序列具有反持续性,未来趋势与过去相反;当Hurst指数 $=0.5$ 时,序列无记忆性,未来趋势与历史无关。Hurst指数越接近1,持续性越强;越接近0,反持续性越强。Hurst指数计算方法参考文献[29]。

1.7 碳源/汇重心迁移分析

采用重心迁移模型可以揭示某一要素在迁移距离、迁移角度和迁移方向上的空间变化特征^[6]。基于ArcGIS软件分析研究区内2000—2021年碳源/碳汇重心迁移轨迹,并对重心迁移轨迹制图。

1.8 偏相关分析

本研究利用偏相关分析法,在控制降水、气温、太阳辐射、地表温度4个要素中任意3个要素的条件下,分析青海湖流域时间序列上的NEP与某一要素的偏相关性^[30]。计算公式为:

$$r_{xy, z_1, z_2, \dots, z_i} = \frac{r_{xy, z_1, z_2, \dots, z_i} - r_{xz_1, z_1, z_2, \dots, z_i} r_{yz_1, z_1, z_2, \dots, z_i}}{\sqrt{(1 - r_{xz_1, z_1, z_2, \dots, z_i}^2)} \sqrt{(1 - r_{yz_1, z_1, z_2, \dots, z_i}^2)}} \quad (4)$$

式中: $r_{xy, z_1, z_2, \dots, z_i}$ 为偏相关系数,若该值 >0 则表示NEP与气象要素呈正相关;相反,则为负相关。

采用 t 检验进行偏相关系数的显著性检验,本文 t 检验结果的显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

1.9 复相关分析

通常一个变量 y (NEPcc)往往要受到多种变量的综合影响,采用复相关分析法探究降水、气温、太阳辐射和地表温度对NEP的综合影响,计算公式为:

$$\hat{y} = NEP_{cc} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \lambda \quad (5)$$

式中: $\hat{y}$ 为NEP预测值NEPcc; x_1, x_2, x_3 和 x_4 分别为降水、气温、太阳辐射和地表温度; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 和 β_4 为NEP与气候因子回归系数; λ 为回归截距。

复相关系数(R)^[31]为:

$$R = \frac{\text{cor}(y, \hat{y})}{\hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_{\hat{y}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中: y_i 为第 i 年NEP的实际值; $\hat{y}_i$ 为第 i 年NEP的预测值; $\bar{y}$ 为2000—2021年NEP平均值; n 为研究年份序列。

利用 F 检验对复相关系数进行显著性检验。

1.10 残差分析

参考 XU 等^[6]和 QU 等^[21]研究,考虑土壤性质等因素对 NEP 影响较小,假设残差反映的 NEP 变化由非自然因素影响导致,且主要为人类活动带来的土地利用类型变化等影响,故本研究用残差分析法分离气候变化和人类活动对 NEP 的影响。通过对降水、气温、太阳辐射、地表温度和 NEP 进行逐像元多元线性回归分析,拟合得到 NEP 预测值,将其视为气候因素对 NEP 的影响;利用 NEP 实际值与预测值的差值来分析人类活动对 NEP 变化的影响。计算公式为:

$$\epsilon = \text{NEP}_{\text{obs}} - \text{NEP}_{\text{cc}} \tag{7}$$

式中: ϵ 为残差值, $\epsilon > 0$ 和 $\epsilon < 0$ 的时候分别为人类活

动对 NEP 起促进和抑制作用,当 $\epsilon = 0$ 时,表示人类活动对 NEP 无影响; NEP_{obs} 和 NEP_{cc} 分别为 NEP 的实际值和预测值; $\text{Slope}(\text{NEP}_{\text{obs}})$ 为实际 NEP 变化趋势; $\text{Slope}(\epsilon)$ 为人类活动影响下 NEP 变化趋势; $\text{Slope}(\text{NEP}_{\text{cc}})$ 为 NEP 预测值变化趋势;通过趋势分析,得出 NEP_{cc} 、 NEP_{obs} 和 ϵ 的时间序列斜率,即人类活动作用下的预测 NEP、实际 NEP、残差(ϵ)的平均变化斜率,若斜率 $\text{Slope} < 0$,表明研究时期内呈下降趋势,反之呈增加趋势。 Slope 绝对值大小反映其变化程度,绝对值越大,表示变化越强烈,反之变化较小。

采用上述 3 种 NEP 斜率进行组合,形成 6 种情景^[19](表 2),以此定量分析青海湖流域气候变化和人类活动对 NEP 变化的影响程度。

表 2 各种可能情景下气候变化和人类活动在 NEP 变化中的相对作用评价

Table 2 Evaluation of relative effects of climate change and human activities on NEP changes under different scenarios

改变方向	情景	$\text{Slope}(\text{NEP}_{\text{cc}})$	$\text{Slope}(\epsilon)$	说明
促进 $\text{Slope}(\text{NEP}_{\text{obs}}) > 0$	1	> 0	> 0	气候变化和人类活动共同促进 NEP 提升
	2	> 0	< 0	气候变化单独促进 NEP 提升
	3	< 0	> 0	人类活动单独促进 NEP 提升
抑制 $\text{Slope}(\text{NEP}_{\text{obs}}) < 0$	4	< 0	< 0	气候变化和人类活动共同抑制 NEP 提升
	5	< 0	> 0	气候变化单独抑制 NEP 提升
	6	> 0	< 0	人类活动单独抑制 NEP 提升

2 结果与分析

2.1 NEP 时间序列变化特征

由图 3 可知,2000—2021 年青海湖流域年平均 NEP 整体呈波动上升趋势,上升速率为 $2.16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年平均 NEP 为 $182.89 \sim 254.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2001 年 NEP 值最低,2018 年 NEP 值最高。2000—2021 年 NEP 平均值为 $218.27 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2000—2010 年 NEP 平均值为 $208.06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2011—2021 年 NEP 平均值为 $228.48 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

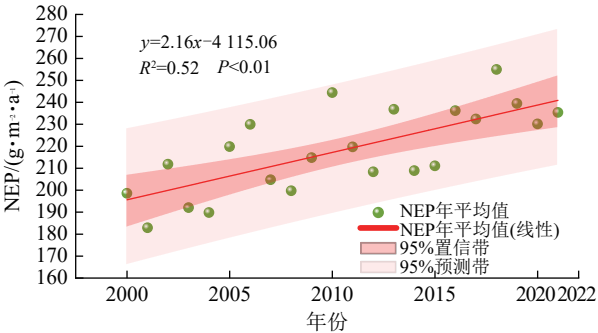


图 3 青海湖流域 2000—2021 年 NEP 年际变化

Fig. 3 Interannual changes of NEP in Qinghai Lake basin from 2000 to 2021

2.2 NEP 空间分布格局

由图 4 可知,青海湖流域 2000—2021 年平均 NEP

值整体呈“东南高西北低、青海湖为中心辐射减弱”的空间分布格局,最大值为 $576.63 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最低值为 $9.17 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,总体呈碳汇作用,青海湖流域内天峻县的 NEP 值较低,海晏县、刚察县和共和县平均 NEP 值较高。

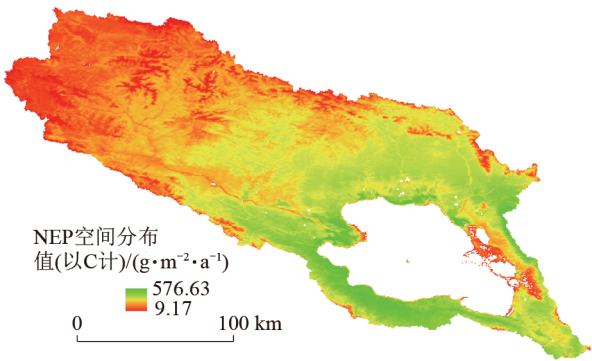


图 4 青海湖流域 2000—2021 年 NEP 平均值空间分布格局

Fig. 4 Average spatial distribution pattern of NEP in Qinghai Lake basin from 2000 to 2021

2.3 NEP 稳定性分析

逐像元计算 2000—2021 年青海湖流域 NEP 变异系数(CV),并参照自然间断法(Jenks)进行划分(图 5)。极低波动($0.03 < CV \leq 0.10$),占流域面积比为 36.67%;低波动($0.10 < CV \leq 0.15$),占 40.65%;中等波

动($0.15 < CV \leq 0.28$),占 22.22%;高波动($0.28 < CV \leq 0.92$),占 0.39%;极高波动($CV > 0.92$),占 0.07%。2000—2021 年,青海湖流域 NEP 变化整体呈现低波动和中等波动变化态势,高波动区域主要位于布哈河流域上游、中游主河道周边及各子流域河流入湖口。

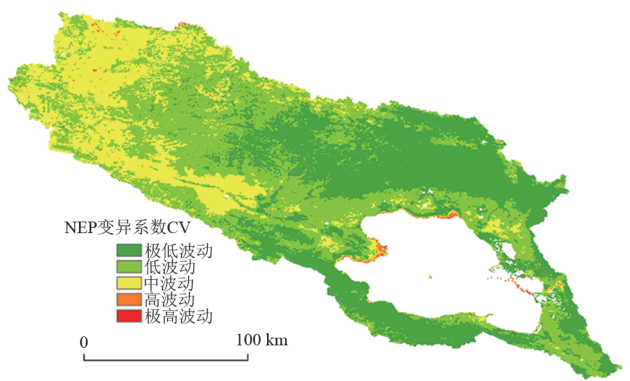


图 5 青海湖流域 2000—2021 年 NEP 变异系数空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of NEP coefficients of variation in Qinghai Lake basin from 2000 to 2021

2.4 NEP 变化趋势及显著性分区

由图 6 可知,2000—2021 年,青海湖流域 NEP 变化趋势具有明显空间异质性,总体呈上升趋势($Slope > 0$),主要分布在流域的西部和青海湖南岸和北岸。NEP 极显著上升($p < 0.01$)占流域面积比为 61.50%,显著上升($0.01 \leq p < 0.05$)占比为 17.61%,不显著上升($p \geq 0.05$)占比为 19.19%;NEP 下降区域主要分布在环青海湖西、北沿岸和东北沿岸地区,NEP 极显著下降($p < 0.01$)占流域面积比为 0.33%,显著下降($0.01 \leq p < 0.05$)占比为 0.21%,不显著下降($p \geq 0.05$)占比为 1.16%(表 3)。

2.5 NEP 未来可持续性

青海湖流域 Hurst 指数为 0.15~0.85(图 7a),其中,Hurst 指数 > 0.5 的区域面积占研究区域总面积

9.79%,该区域 NEP 未来变化趋势与当前保持一致的可能性较高;Hurst 指数 < 0.5 的区域面积占比 90.21%,该区域 NEP 未来的变化趋势可能发生改变。

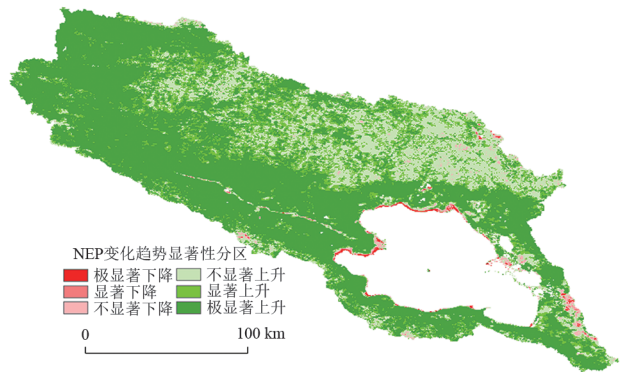


图 6 青海湖流域 2000—2021 年 NEP 变化趋势及显著性分区
Fig. 6 NEP change trends and significant zoning in Qinghai Lake basin from 2000 to 2021

表 3 青海湖流域 2000—2021 年 NEP 变化趋势及显著性分区
Table 3 NEP change trends and significant zoning in Qinghai Lake basin from 2000 to 2021

Slope	p 值分类	显著性分区	像元个数	占比/%
> 0	$p < 0.01$	极显著上升	78 155	61.50
	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	22 386	17.61
	$p \geq 0.05$	不显著上升	24 384	19.19
< 0	$p \geq 0.05$	不显著下降	1 474	1.16
	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	261	0.21
	$p < 0.01$	极显著下降	428	0.33

将 NEP 变化趋势与 Hurst 指数进行耦合,得到青海湖流域 2000—2021 年 NEP 的未来变化趋势(图 7b),增加转为减少、持续增加、减少转为增加和持续减少 4 种变化特征,分别占总面积的 89.19%、9.11%、1.02% 和 0.68%。表明青海湖流域目前 NEP 呈增加趋势的大部分区域未来趋于减少,土地利用类型主要为草地。

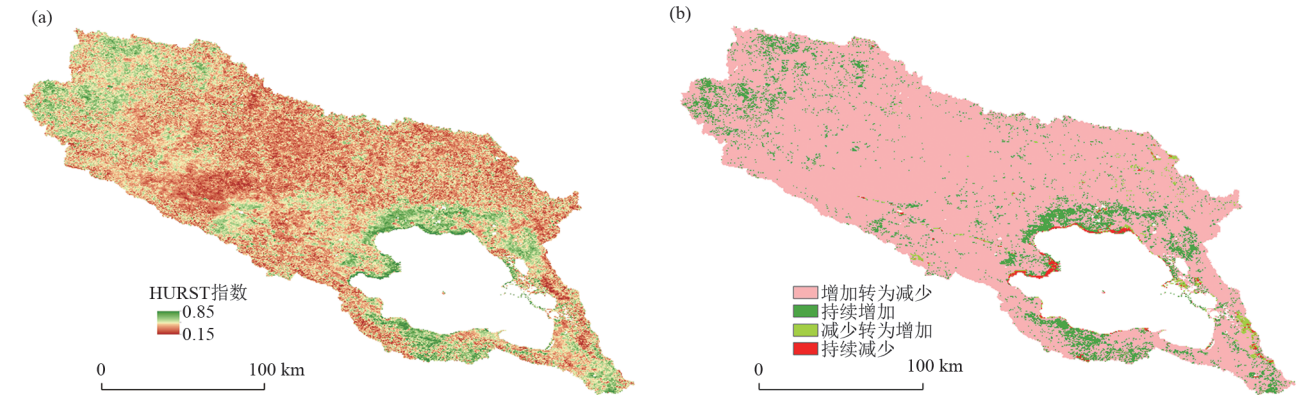


图 7 青海湖流域 2000—2021 年 NEP 未来可持续性
Fig. 7 Future sustainability of NEP in Qinghai Lake basin from 2000 to 2021
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

2.6 NEP重心迁移规律

负值NEP表示生态系统向大气排放CO₂,为碳源作用。将研究时间分为2个阶段,2000—2012年碳源重心迁移轨迹集中在38°13′~38°15′N,98°39′~98°51′E,主要在天峻县龙门乡内移动,其中,2009—2012年轨迹跨越较大,由(38°14′N,98°39′E)移动到(38°14′N,98°51′E),直线距离约为17.30 km;2013—2020年主要在刚察县境内移动,碳源重心迁移轨迹集中在(36°59′~37°19′N,99°36′~100°10′E)内,由2013年(37°19′N,99°36′E)移动到2020年(36°59′N,99°53′E),直线距离约为44.18 km,2021年无碳源作用;2000—2020年碳源由天峻县龙门乡(38°14′N,98°44′E)移动到刚察县境西南部泉吉乡(36°59′N,99°53′E),直线距离约为171.72 km(图8)。表明青海湖流域碳源的重心整体表现为由流域西北向东南青海湖沿岸迁移的趋势。

正值NEP表示生态系统从大气吸收CO₂,表现为碳汇作用。由图8可知,2000—2021年碳汇重心迁移轨迹大体在37°16′~37°18′N,99°37′~99°43′E,主要集中在刚察县西部的泉吉乡和吉尔孟乡,变化轨迹主要为由东向西变化,2000年(37°18′N,99°41′E)移动到2021年(37°17′N,99°39′E)直线距离约为2.68 km。

表4 NEP与气候因素的偏相关系数及显著性分区

Table 4 Partial correlation coefficients and significance zoning of NEP and climate factors

气候因子	偏相关系数	偏相关系数平均值	正相关		显著正相关		负相关		显著负相关	
			像元数量	占比/%	像元数量	占比/%	像元数量	占比/%	像元数量	占比/%
气温	-0.678 1~0.820 4	0.141 3	94 785	74.58	13 318	10.48	32 303	25.42	514	0.40
降水	-0.662 3~0.802 4	0.124 7	95 049	74.79	10 326	8.13	32 039	25.21	783	0.62
太阳辐射	-0.793 2~0.843 9	-0.182 9	19 482	15.33	960	0.76	107 606	84.67	16 513	12.99
地表温度	-0.786 5~0.700 1	-0.002 2	63 807	50.21	1 951	1.54	63 281	49.79	2 785	2.19

2.7.1 气温影响的NEP空间分布 青海湖流域NEP与气温的偏相关系数为-0.68~0.82,气温与NEP正相关的区域占总面积的74.58%,其中有10.48%通过显著性检验($p<0.05$),主要分布于流域共和县、天峻县的北部、西部;与NEP负相关的区域占总面积的25.42%,其中,仅0.40%通过显著性检验($p<0.05$),主要分布在流域北部刚察县伊克乌兰乡、沙柳河镇、青海湖农场、三角城种羊场和海晏县青海湖乡(图9)。

2.7.2 降水影响的NEP空间分布 青海湖流域NEP与降水的偏相关系数为-0.66~0.80,降水与NEP正相关的区域占总面积的74.79%,其中有8.13%通过显著性检验($p<0.05$),主要分布于流域的西北部地区、环湖岸地区,即天峻县西北部(生格乡、阳

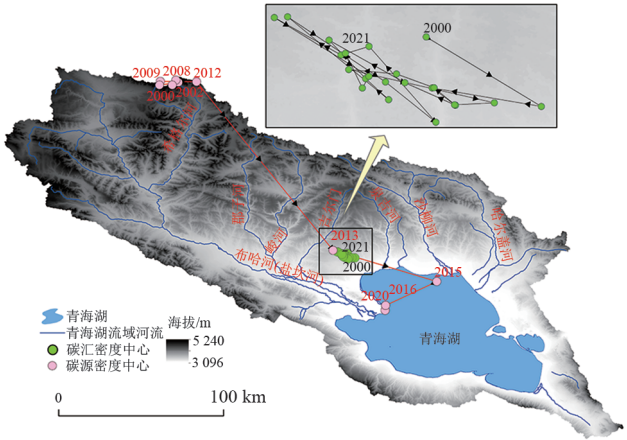


图8 碳汇/源重心迁移轨迹

Fig. 8 Migration trajectories of carbon sink/source centers

2.7 NEP与气象因子的偏相关性

采用四要素偏相关分析法,对气温、降水、太阳辐射、地表温度4种气候因子对青海湖流域NEP变化的影响进行分析,并进行显著性检验。

由表4可知,青海湖流域NEP年际变化与气温、降水、太阳辐射、地表温度的平均偏相关系数分别为0.141 3、0.124 7、-0.182 9和-0.002 2,正向作用偏相关系数气温>降水,负向作用偏相关系数绝对值太阳辐射>地表温度,说明气温对NEP正向促进作用较大,太阳辐射对NEP抑制作用较大。

康乡、龙门乡、舟群乡、织合玛乡、江河镇)、刚察县南部(吉尔孟乡、泉吉乡、青海湖农场)、海晏县(甘子河乡)、共和县(石乃亥乡、黑马河镇、江西沟镇和倒淌河镇);与NEP负相关的区域面积占总面积的25.21%,其中0.62%通过显著性检验($p<0.05$),主要分布在青海湖流域的东北部分地区,位于刚察县境内的沙柳河镇与哈尔盖镇(图10)。

2.7.3 太阳辐射影响的NEP空间分布 青海湖流域NEP与太阳辐射呈负相关(偏相关系数为-0.79~0)的区域所占面积比例为84.67%,其中,有12.99%通过显著性检验($p<0.05$)。环青海湖沿岸少部分地区NEP与太阳辐射呈正相关(偏相关系数为0~0.84),面积占比15.33%,0.76%通过显著性检验($p<0.05$)(图11)。

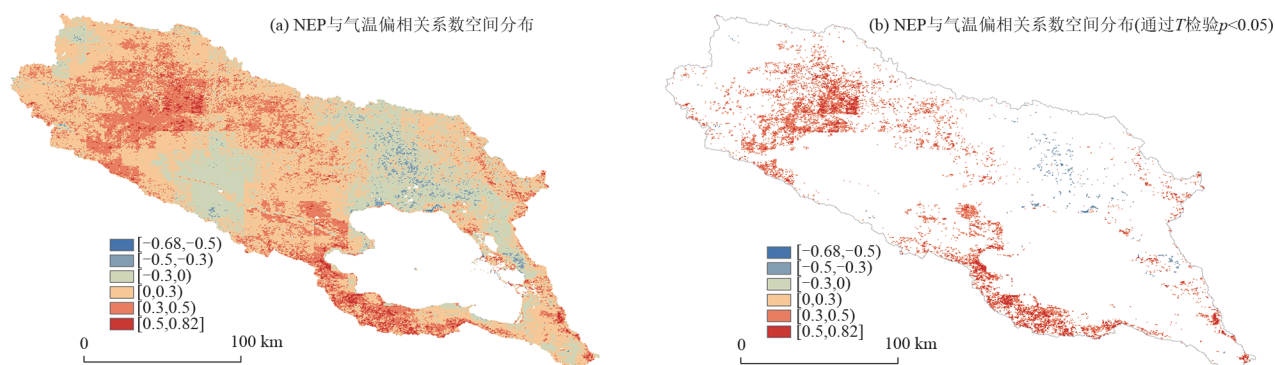


图9 NEP与气温偏相关系数空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NEP and temperature

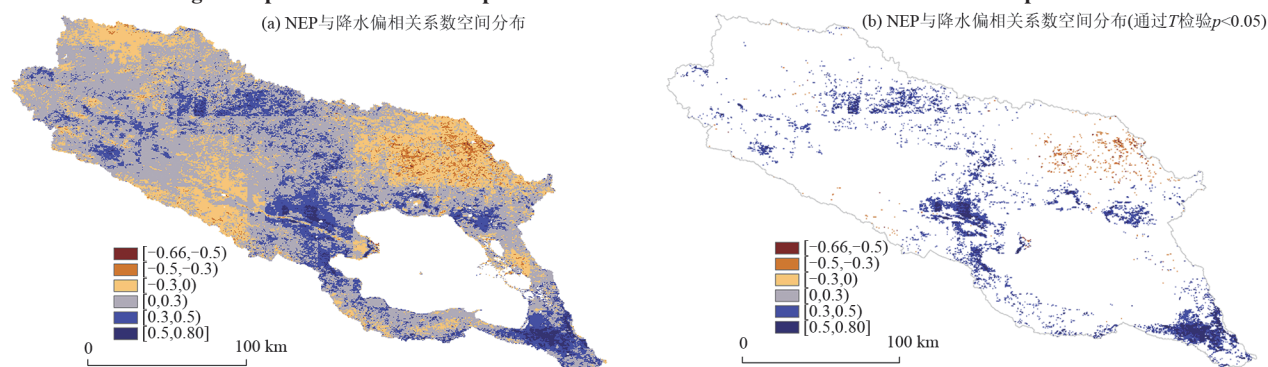


图10 NEP与降水偏相关系数空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NEP and precipitation

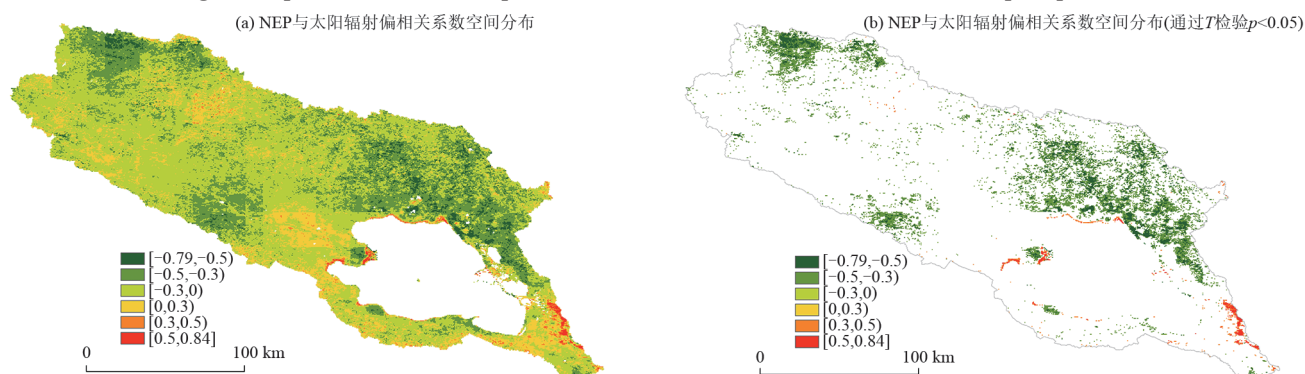


图11 NEP与太阳辐射偏相关系数空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NEP and solar radiation

2.7.4 地表温度影响的NEP空间分布 青海湖流域NEP与地表温度平均偏相关系数为负值,49.79%的区域NEP与地表温度呈负相关,NEP随地表温度升高而降低,其中有2.19%通过显著性检验($p < 0.05$),主要分布在流域西部和南部(图12);50.21%的区域NEP与地表温度呈正相关,其中有1.54%通过显著性检验($p < 0.05$),主要分布在流域北部。

2.8 NEP与气象因子、人类活动的定量关系

采用复相关分析法计算得出NEP与气象因子的复相关系数为0~0.91(图13),环青海湖沿岸及西部系数较高,西南部及北部复相关系数较低。 F 检验结果得出,其他因素驱动区域面积约占总面积的

95.49%;气温、降水、太阳辐射和地表温度4因子共同驱动区域占比为4.51%,主要分布在刚察县北部、天峻县东部及青海湖东岸。说明气象因子与其他因素共同对青海湖流域NEP的变化起主导作用。

根据残差分析结果(图14),促进NEP提升的区域面积占比98.30%,表明研究区NEP整体呈增长趋势。其中,气候变化和人类活动共同促进NEP提升的区域占95.10%,人类活动单独促进NEP提升区域面积占比为1.11%,主要分布在青海湖沿岸、哈尔盖河流域和沙柳河流域;气候变化单独促进NEP提升的面积占比2.09%,主要分布于青海湖以北地区。抑制NEP提升区域面积占比1.70%,主要分布在环青海

湖西、北、东沿岸地区,气候变化和人类活动共同抑制 NEP 提升、气候变化单独抑制 NEP 提升、人类活

动单独抑制 NEP 提升区域分别占青海湖流域陆地生态系统面积的 0.99%、0.27% 和 0.44%。

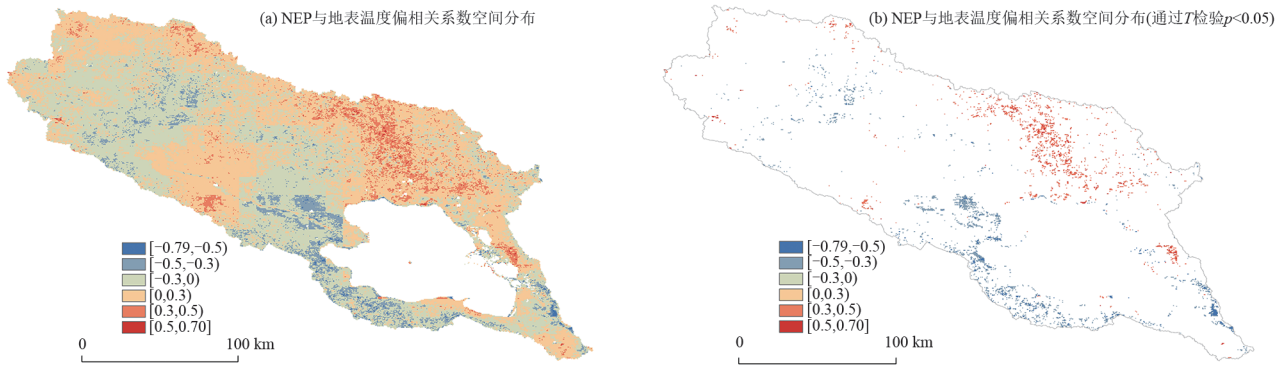


图 12 NEP 与地表温度偏相关系数空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NEP and land surface temperature

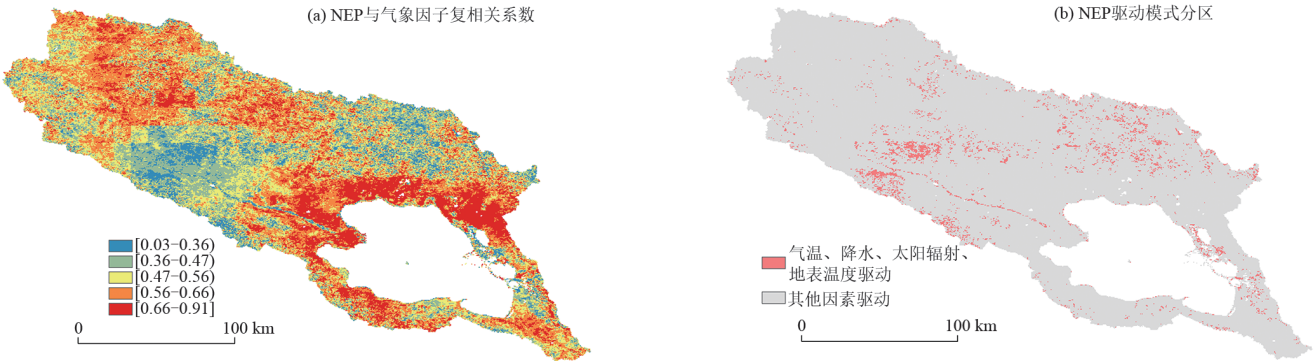


图 13 NEP 与气象因子的复相关关系

Fig. 13 Multiple correlation between NEP and meteorological factors

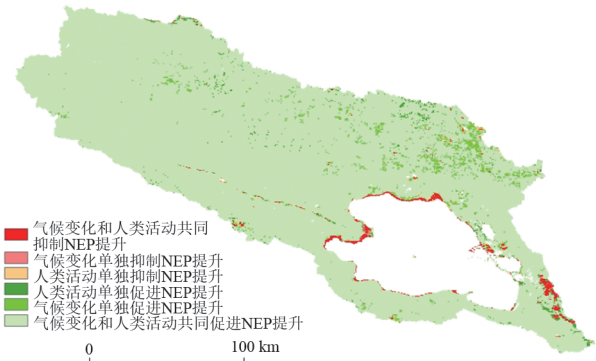


图 14 人类活动和气候改变对青海湖流域 NEP 变化的贡献模式

Fig. 14 Contribution patterns of human activities and climate change to NEP changes in Qinghai Lake basin

分析可知,人类活动在改善区域中的促进作用较为明显,得益于我国长期实施各项生态保护修复和综合治理工程,有效改善生态环境,促进植被恢复生长,推进生态系统正向演替。

3 讨论

3.1 时空分异格局分析

青海湖流域在生态安全、生物多样性保护、气候调节和水资源调节等方面具有极其重要的战略意

义,是维护我国西部生态平衡和保障全球生态安全的关键区域。我国坚持科学管护与项目治理并重,依托“三北”工程、青海湖流域生态环境综合治理和林业科技推广沙区造林项目,积极推进国家防沙治沙综合示范区建设、沙化土地封禁保护区试点项目和规模化防沙治沙等重点治沙造林项目,持续开展国土绿化行动,青海湖流域生态文明建设取得显著成效^[32]。本研究显示,青海湖流域自 2000 年以来呈暖湿化趋势,太阳辐射减少(图 15),有效促进植被生长发育,大部分地区 NEP 呈上升趋势,生态改善区域面积占比达到 98.30%。

青海湖流域 NEP 空间异质性显著,表现为由东南到西北逐渐减少和以青海湖为中心辐散减弱的分布格局,与李文斌等^[23]研究青海湖流域植被净初级生产力 NPP 时空格局结果一致。流域内 89.19% 区域 NEP 未来可能由增加转为减少,未来需长期关注气候变化与人类活动对植被生长的影响。

2000—2021 年碳汇重心迁移轨迹为由东向西变化,碳源中心从流域西北迁移到青海湖沿岸。青海湖流域近年来贯彻落实禁牧政策,大力实施固沙种草、人工造林、封山(沙)育林等工程措施^[33],为

NEP 碳汇重心向流域西部转移做出重要贡献。碳源重心迁移可能与流域内降雨量增加引起河流冲积岸与沉积岸、湖泊水体范围扩大,以及植被退化等综合因素影响相关。本研究对淹没区植被 NEP 与水位变化进行关联分析发现,2000—2021 年沿青海湖西岸、北岸 NEP 下降区域基本位于淹没区

(图 16)。有研究^[23,32]指出,2017 年以来青海湖水面积持续扩张,布哈河入湖口、沙柳河入湖口、沙岛、鸟岛、泉湾等地区水体扩张明显,产生大量淹没区,植被覆盖度降低导致光合作用和呼吸作用等生理过程受到影响,可能改变该区域的碳吸收和释放情况。

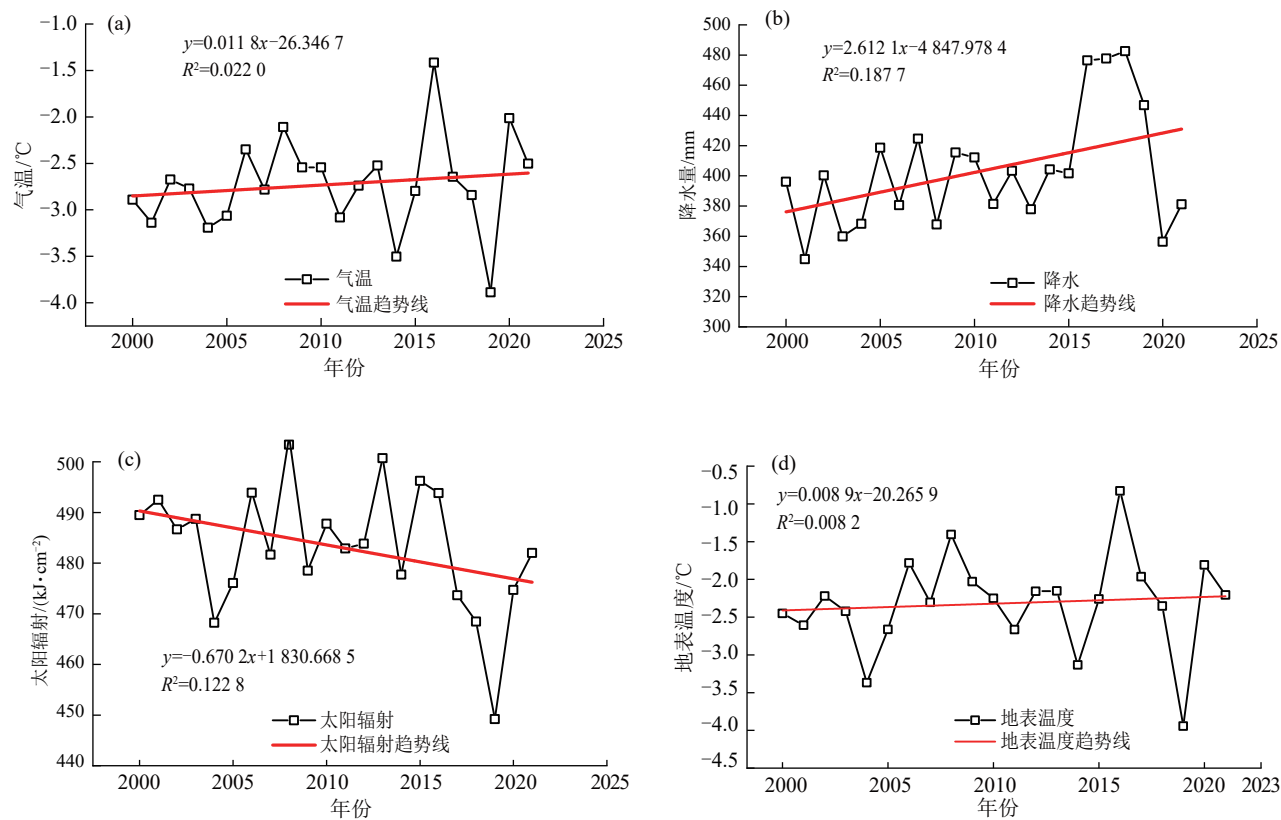


图 15 青海湖流域气温、降水、太阳辐射、地表温度年际变化

Fig. 15 Interannual variations of temperature, precipitation, solar radiation and land surface temperature in Qinghai Lake basin

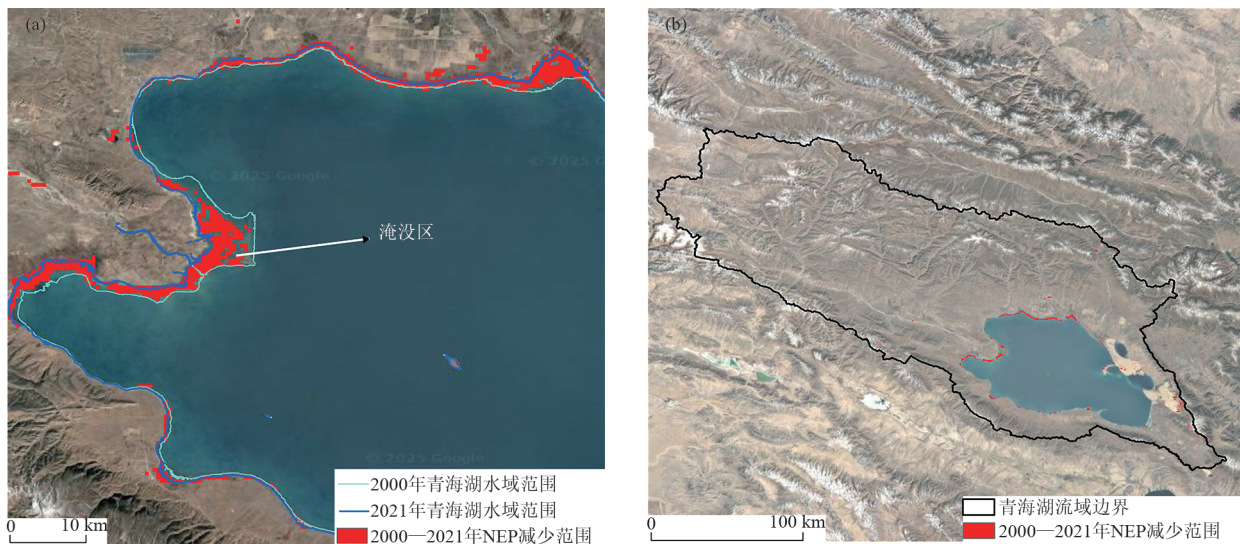


图 16 淹没区植被 NEP 与水位变化关联分析

Fig. 16 Analysis of correlation between vegetation NEP and water level changes in inundation area

3.2 驱动机制分析

青海湖流域 2000—2021 年的 NEP 平均值为 $218.27 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中 NEP 最低值与最高值出现在 2001 年和 2018 年, 其值分别为 182.88 、 $254.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

2001 年经历 22 年来最严重的干旱,当年降水量降至历史最低水平(2001 年平均降水量为 344.82 mm, 2000—2021 年的降水量平均值为 403.56 mm)(图 15),严重抑制流域植被生长及光合作用^[23],进而影响碳汇的积累。2018 年 NEP 最高值与当年降水量增加和太阳辐射持续降低有密切的关系,降水的增加与辐射的减少有效促进流域内 NEP 正向变化。

研究^[34]表明,温度和降水是影响 NEP 年际变化的主要因素,温度的升高通常导致生长季节的延长,从而促进植物的光合作用和 NEP 的增加。降水的变化,尤其是干旱事件的频发,可能对植被的生长产生负面影响,导致 NPP 的下降,进而 NEP 下降^[23]。当土壤水分充足时,温度对 NEP 影响更加显著;而在干旱条件下,降水的不足则限制植物的生长,进而影响碳的固定^[35]。

本研究结果显示,青海湖流域 NEP 年际变化与气温、降水呈正相关,偏相关系数气温>降水,与周美林等^[36]研究的气候变暖背景下气温仍是青海湖流域植被生长的主控因素的结论一致。NEP 年际变化与太阳辐射、地表温度呈负相关,偏相关系数绝对值太阳辐射>地表温度。2000—2021 年研究区超过 70% 区域的 NEP 与年平均气温和年累计降水呈正相关,主要集中分布在降水相对充沛的青海湖流域东南地区,水热条件优越,植被生长较为繁茂。本研究 NEP 与太阳辐射的偏相关系数为 -0.79~0 的区域所占面积为 84.67%,说明青海湖流域 NEP 与太阳辐射间的正相关整体较弱,该地区海拔较高,太阳辐射过强,增加水分蒸发,不利于植被生长,从而使得该地区 NEP 降低^[18]。青海湖流域地处于旱-半干旱地区,水热条件在时间和空间上存在不匹配的现象^[37],因此,本研究结果显示流域气候因子与 NEP 的偏相关系数显著性均不强。

本研究得出,气候变化和人类活动共同促进 NEP 提升的区域占 95.10%,退化区中气候变化和人类活动共同抑制 NEP 提升>人类活动单独抑制 NEP 提升面积>气候变化单独抑制 NEP 提升,说明气候因素和人类活动因素共同影响环青海湖沿岸植被的生长变化。在气候又暖又湿的条件下,积雪融水增加、降水量增加、河流流量增加、地下冰融化地下水增加及湖面蒸发减少,上述不同时段综合因素的共同作用导致青海湖水位抬升、面积扩张、水量增多,环湖沿岸植被负增长^[38]。青海湖周边地区人为活动的增加和建设开发活动频繁,引起植被退化、湿地区域缩小等问题^[39],导致固碳能力下降。区域暖湿化气候环境为干旱区生态修复创造有利条件,需继续加大沙区植被保护修复和综合治理,遏制土地沙化

面积扩张,实现“绿进沙退”^[32]。

本研究分析气候因素(气温、降水、太阳辐射、地表温度)和人类活动对 NEP 产生的不同影响,但暂未考虑冻土融化、CO₂施肥效应等其他因子对固碳效应的作用,未来研究将进一步完善驱动因子分析体系,全面分析各因素对陆地生态系统 NEP 的影响,为研究制定区域生态系统减排增汇能力相关政策措施提供基础支撑,助力我国“双碳”目标的实现。

4 结 论

1)采用趋势分析法对青海湖流域 2000—2021 年 NEP 变化特征进行分析,NEP 整体呈波动上升趋势,上升速率为 2.16 g/(m²·a),呈“东南高西北低、青海湖为中心辐射减弱”空间分布格局,总体呈碳汇作用,近 80% 的地区碳汇能力显著提升,碳源零星分布。青海湖流域 NEP 变化高波动区域主要位于布哈河流域上游、中游主河道周边及各子流域河流入湖口。碳源的重心由流域西北地区向东南青海湖沿岸迁移,碳汇重心则由东向西迁移。

2)将 NEP 时间序列变化趋势与 Hurst 指数进行耦合得出,青海湖流域 2000—2021 年 NEP 的未来变化趋势由增加转为减少、持续增加、减少转为增加和持续减少 4 种变化特征,分别占总面积的 89.19%、9.11%、1.02% 和 0.68%,表明目前 NEP 增加的大部分区域未来可能呈减少趋势。

3)气温和降水与青海湖流域 NEP 呈正相关,太阳辐射和地表温度与 NEP 呈负相关,显著性均不强。复相关分析表明,气候和人类活动共同影响 NEP 的变化。

4)气候变化和人类活动共同促进 NEP 提升区域占 95.10%。流域内暖湿化气候背景下,青海省近年来贯彻落实封山禁牧措施、大力实施固沙种草造林等生态综合治理工程共同促进 NEP 不断提升,而人为活动的增加和建设开发活动频繁及青海湖水位升高、面积扩张可能抑制 NEP 提升。

参考文献:

- [1] 张梅,黄贤金,揣小伟,等.中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究[J].地理与地理信息科学,2020,36(2):69-74.
ZHANG M, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Spatial distribution and changing trends of net ecosystem productivity in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(2): 69-74.
- [2] WILLIAMS R G, KATAVOUTA A, GOODWIN P. Carbon-cycle feedbacks operating in the climate system[J]. Current Climate Change Reports, 2019, 5: 282-295.
- [3] 黄强,郭怿,江建华,等.“双碳”目标下中国清洁电力发展

- 路径[J].上海交通大学学报,2021,55(12):1499-1509.
- HUANG Q, GUO Y, JIANG J H, et al. Development pathway of China's clean electricity under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1499-1509.
- [4] HIGGINS P A T, HARTE J. Carbon cycle uncertainty increases climate change risks and mitigation challenges[J]. Journal of Climate, 2012, 25: 7660-7668.
- [5] PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 65(4): 641-651.
- [6] XU M, GUO B, ZHANG R. Variations of terrestrial net ecosystem productivity in China driven by climate change and human activity from 2010 to 2020[J]. Forests, 2024, 15: e1484.
- [7] LUO Q, BAI X Y, ZHAO C W, et al. Unexpected response of terrestrial carbon sink to rural depopulation in China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 948: e174595.
- [8] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1075-1081.
- WANG Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1075-1081.
- [9] HAVERD V, SMITH B, CANADELL J G, et al. Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4): 2390-2402.
- [10] FEI X H, SONG Q H, ZHANG Y P, et al. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 824-840.
- [11] CHEN S P, WANG W T, XU W T, et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4027-4032.
- [12] XU L, YU G R, HE N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29: 49-66.
- [13] REN W, TIAN H Q, LIU M L, et al. Effects of tropospheric ozone pollution on net primary productivity and carbon storage in terrestrial ecosystems of China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D22): D22S09.
- [14] WHITE E D, RIGBY M, LUNT M F, et al. Quantifying the UK's carbon dioxide flux: An atmospheric inverse modelling approach using a regional measurement network[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: 4345-4365.
- [15] POTTER C, KLOOSTER S, GENOVESE V. Alaska ecosystem carbon fluxes estimated from MODIS satellite data inputs from 2000 to 2010[J]. Carbon Balance and Management, 2013, 8(1): e12.
- [16] ZHOU W, HUANG L, YANG H, et al. Interannual variation in grassland net ecosystem productivity and its coupling relation to climatic factors in China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(3): 1583-1597.
- [17] 李颖池, 刘帆, 王传宽, 等. CO₂ 储存通量估算方法对森林生态系统碳收支估测的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3665-3673.
- LI Y C, LIU F, WANG C K, et al. Carbon budget estimation based on different methods of CO₂ storage flux in forest ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3665-3673.
- [18] 张祯祺, 蔡惠文, 张平平, 等. 基于GEE遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 231-242.
- ZHANG Z Q, CAI H W, ZHANG P P, et al. A GEE-based study on the temporal and spatial variations in the carbon source/sink function of vegetation in the Three-River Headwaters region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 231-242.
- [19] 庞娇, 单婧, 闫愉悦, 等. 京津冀生态系统固碳效益时空格局及驱动因素定量分离[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1666-1678.
- PANG J, SHAN J, YAN Y Y, et al. Quantitative separation of spatiotemporal patterns and driving factors of carbon sequestration benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1666-1678.
- [20] LI W W, ZHOU J L, XU Z Y, 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: e111201.
- [21] QU Q, JIAN S, CHEN A, et al. Investigating the dynamic change and driving force of vegetation carbon sink in Taihang Mountain, China[J]. Land, 2024, 13(9): 1348.
- [22] 何学高, 刘欢, 张婧, 等. 基于优化的MaxEnt模型预测青海省祁连山圆柏潜在分布区[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 19-31.
- HE X G, LIU H, ZHANG J, et al. Predicting potential suitable distribution areas for *Juniperus przewalskii* in Qinghai Province of northwestern China based on the optimized MaxEnt model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 19-31.
- [23] 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.
- LI W B, CAO S K, CAO G C, 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.
- [24] 王晓峰, 王怡, 尹礼唱. 国家生态屏障区 1-km 分辨率植被净初级生产力数据集 (2000—2015) [J]. *全球变化数据学报 (中英文)*, 2020, 4(2): 125-130.
- WANG X F, Wang Y, Yin L C. 1-km grid NPP dataset covering ecological barrier zone of China (2000—2015) [J]. *Journal of Global Change Data and Discovery*, 2020, 4(2): 125-130.
- [25] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(4): 414-419.
- FANG J Y, KE J H, TANG Z Y, et al. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4): 414-419.
- [26] PEI Z Y, OUYANG H, ZHOU C P, et al. Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(5): 521-526.
- [27] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区域碳估测 [J]. *地理研究*, 2010, 29(1): 102-110.
- PEI Z Y, ZHOU C P, OUYANG H, et al. A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 102-110.
- [28] 潘竞虎, 文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局 [J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7718-7728.
- PAN J H, WEN Y. Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7718-7728.
- [29] 文妙霞, 何学高, 刘欢, 等. 基于地理探测器的宁夏草地植被覆被时空分异及驱动因子 [J]. *干旱区研究*, 2023, 40(8): 1322-1332.
- WEN M X, HE X G, LIU H, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(8): 1322-1332.
- [30] HE L, GUO J B, YANG W B, et al. Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: e159942.
- [31] 王斌会. 计量经济学模型及 R 语言应用 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2015: 60.
- WANG B H. Econometric models and the application of R Language [M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2015: 60.
- [32] 祝存兄, 史飞飞, 乔斌, 等. 基于高分 1 号卫星数据的青海湖扩张及湖滨沙地变化特征分析 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1076-1089.
- ZHU C X, SHI F F, QIAO B, et al. Analysis of Qinghai Lake expansion and lakeside sandy land change characteristics based on GF-1 satellite [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(4): 1076-1089.
- [33] 刘芙梅, 吴成永, 陈克龙. 青海湖流域植被覆盖时空变化特征及驱动力分析 [J]. *草原与草坪*, 2024, 44(1): 1-12.
- LIU F M, WU C Y, CHEN K L. Spatio-temporal variation characteristics of vegetation coverage and its driving forces in Qinghai Lake basin [J]. *Grassland and Turf*, 2024, 44(1): 1-12.
- [34] LIU P, BARR A G, ZHA T S, et al. Re-assessment of the climatic controls on the carbon and water fluxes of a boreal aspen forest over 1996—2016: Changing sensitivity to long-term climatic conditions [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(15): 4605-4619.
- [35] ZHANG T, SHAN B X, XU M J, et al. Soil moisture alters the responses of alpine ecosystem productivity to environmental factors, especially VPD, on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: e174518.
- [36] 周美林, 刘家宏, 刘希胜, 等. 青海湖流域植被动态变化驱动力及空间粒度效应 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1497-1506.
- ZHOU M L, LIU J H, LIU X S, et al. Analysis of driving forces and spatial scale effects on vegetation dynamics in the Qinghai Lake basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(3): 1497-1506.
- [37] 韩艳莉, 于德永, 陈克龙, 等. 2000—2018 年青海湖流域气温和降水量变化趋势空间分布特征 [J]. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 999-1009.
- HAN Y L, YU D Y, CHEN K L, et al. Spatial distribution characteristics of temperature and precipitation trend in Qinghai Lake basin from 2000 to 2018 [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(4): 999-1009.
- [38] 李晓东. 青海湖水体对流域气候和生态环境变化的响应 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- LI X D. Response of the water body to changing climate and ecological environment in the Qinghai Lake watershed [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [39] 李广东, 方创琳, 杜云艳, 等. 青海湖自然保护区管理中亟待解决的紧迫问题及理顺体制的建议 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(7): 814-817.
- LI G D, FANG C L, DU Y Y, et al. Urgent issues to be addressed in management of Qinghai Lake national natural reserve and recommedeations for rationalizing system [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(7): 814-817.