

DOI: 10.20103/j.stxb.202308191789

赵浩然, 曹生奎, 曹广超, 李文斌, 陈链璇, 侯瑶芳. 2000—2020 年青海湖流域植被降水利用效率时空变化. 生态学报, 2024, 44(8): 3423–3439.

Zhao H R, Cao S K, Cao G C, Li W B, Chen L X, Hou Y F. Spatial and temporal characteristics of annual vegetation precipitation use efficiency in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3423–3439.

2000—2020 年青海湖流域植被降水利用效率时空变化

赵浩然^{1,2}, 曹生奎^{1,2,3,*}, 曹广超^{1,2,3}, 李文斌^{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青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008

2 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008

3 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: 植被降水利用效率(PUE)是评价植被生产力对降水量时空动态响应特征的重要指标。以年净初级生产力(NPP)数据、年降水量数据为基础,利用地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术,计算并研究了 2000—2020 年青海湖流域植被降水利用效率时空分布格局及其地形效应,结合年均气温、年均地表温湿度、年生长季光合有效辐射吸收系数和年植被覆盖度等数据,探讨了 PUE 与各因子间的相关关系。结果表明:(1)青海湖流域单位像元(1 km²)PUE 平均值在 0.4—0.7 gC m⁻² mm⁻¹ 间变化,平均为 0.54 gC m⁻² mm⁻¹,且在年际间无显著变化趋势($R^2=0.05$, $P\geq 0.05$)。在空间上,青海湖流域多年 PUE 平均值环湖呈现不均匀分布,除青海湖东岸外,PUE 值随湖面距离增大呈减小趋势;其高值区主要集中分布在青海湖西岸和南岸的半环区;年 PUE 变化趋势的斜率值为-0.05—0.04 gC m⁻² mm⁻¹ a⁻¹,其中显著变化的区域占流域面积的 29.63%。(2)青海湖流域多年 PUE 平均值在海拔效应和坡度坡向两种不同微地形效应下表现出明显的差异。海拔每升高 50 m,PUE 值将减少 0.02 gC m⁻² mm⁻¹;随坡度增加,PUE 值呈降低趋势,平坡至险坡(>45°)的变化范围为 0.3—0.61 gC m⁻² mm⁻¹;不同坡向 PUE 值表现为由东北坡向西南坡递减,范围为 0.52—0.56 gC m⁻² mm⁻¹。(3)在空间上,青海湖流域 PUE 值与地表温度、光合有效辐射吸收系数、植被覆盖度和叶面积指数相关性较为明显。沿海拔梯度,空气温度和地表温度与 PUE 呈极显著正相关($R^2=0.94$, $P<0.01$; $R^2=0.98$, $P<0.01$),光合有效辐射吸收系数、植被覆盖度和叶面积指数与 PUE 显著正相关($R^2=0.89$, $P<0.05$; $R^2=0.90$, $P<0.05$; $R^2=0.86$, $P<0.05$),地表土壤湿度与 PUE 无显著相关性($R^2=0.16$, $P\geq 0.05$)。评估了青海湖流域植被降水利用效率的特征及其与各因子间的相关关系,明确了植被对降水的利用能力及其耗水特性,可为青海湖流域植被保护和国家公园建设提供理论参考。

关键词: 降水利用效率;时空特征;相关关系;青海湖流域

Spatial and temporal characteristics of annual vegetation precipitation use efficiency in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

ZHAO Haoran^{1,2}, CAO Shengkui^{1,2,3,*}, CAO Guangchao^{1,2,3}, LI Wenbin^{1,2}, CHEN Lianxuan^{1,2}, HOU Yaofang^{1,2}

1 Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environment Process, School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

2 Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), 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: Vegetation precipitation use efficiency (PUE) serves as a crucial indicator for evaluating the productivity of vegetation in response to spatial and temporal precipitation dynamics. Using annual net primary productivity (NPP) and precipitation, the spatial and temporal distribution of PUE and its topographic effect in the Qinghai Lake Basin from 2000 to

基金项目:国家自然科学基金项目(42061008)

收稿日期:2023-08-19; 网络出版日期:2024-01-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoshengkui@163.com

2020 was calculated. To examine the relationship between PUE and various factors, geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) were utilized by combining annual mean air temperature, annual mean land surface temperature, annual mean surface soil moisture, annual fraction of absorbed photosynthetically active radiation, and annual fractional vegetation cover. The results indicated that: (1) the mean unit pixel (1 km^2) PUE in the Qinghai Lake Basin ranged $0.4\text{--}0.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, with average about $0.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Moreover, there was no marked trend in PUE across the years assessed ($R^2 = 0.05$, $P \geq 0.05$). The average of multi-year PUE in the Qinghai Lake Basin was distributed unevenly around Qinghai Lake, except for the eastern shore, where PUE decreased with the increasing distance from the lake. High-value areas were mainly concentrated in semi-annular areas on the western and southern shores. The slope of the annual PUE trend ranged $-0.05\text{--}0.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$, with significant changes observed across 29.63% of the basin area. (2) The average PUE over several years was found to vary in the Qinghai Lake Basin depending on altitude and microtopography. A 50 m increase in altitudinal gradients led to a $0.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ decrease in PUE. Additionally, an upward trend in slope gradients resulted in a decline of PUE, with ranged $0.3\text{--}0.61 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ from flat slope to dangerous slope ($>45^\circ$); different slope aspects also resulted from the northeast to the southwest, which ranged $0.52\text{--}0.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. (3) There was spatial correlation between the PUE and land surface temperature, fraction of absorbed photosynthetically active radiation, fractional vegetation cover and leaf area index in the Qinghai Lake Basin in the last 21 years was correspondingly obvious. Along the altitudinal gradient, air temperature and land surface temperature showed highly significant positive correlations with the PUE ($R^2 = 0.94$, $P < 0.01$; $R^2 = 0.98$, $P < 0.01$), fraction of absorbed photosynthetically active radiation, fractional vegetation cover and leaf area index were significantly positively correlated with the PUE ($R^2 = 0.89$, $P < 0.05$; $R^2 = 0.90$, $P < 0.05$; $R^2 = 0.86$, $P < 0.05$), and surface soil moisture had no significant correlation ($R^2 = 0.16$, $P \geq 0.05$). This paper examined the PUE in the Qinghai Lake Basin and the correlation with different factors. It elucidated the precipitation use capacity and water consumption characteristics of vegetation, providing theoretical support for conservation practices in the Qinghai Lake Basin and the development of the National Parks.

Key Words: precipitation use efficiency; spatial and temporal characteristics; correlation; Qinghai Lake Basin

植被降水利用效率(PUE)是指植物光合作用生产的干物质与降水量的比值,反映了光合产物与耗水特征的相互关系^[1]及植被对降水的利用能力^[2]。同时,PUE可以体现出植被利用水分将营养物质转化为净生物量的能力^[3],还可以反映出植被光合生产过程的耗水特性^[4]。国内外学者对植被降水利用效率的研究主要集中于三个方面:一是聚焦于不同地区不同植被 PUE 的时空格局^[5–11]及其变化特征^[12–15];二是 PUE 的影响因素^[2–4, 16–23]和对环境要素变化的响应^[24–30];三是 PUE 在评估生态环境过程方面的应用^[31–32]。以上研究主要从空间和时间两个维度上,阐明了不同类型生态系统降水利用效率在时空上的差异,明晰其调控机理,并为深入理解全球变化背景下生态系统碳-水循环过程提供科学依据。然而以往 PUE 的研究中,各地区时空分布和影响因素差异较大,且较少有考虑地形效应的影响。

青藏高原是一个独立的地理单元,它拥有从湿润到干旱、从热带到寒带等多种不同的气候及生态系统类型,是对区域和全球气候变化响应最敏感的地区之一^[27]。高寒草原是青藏高原的主要植被类型,气候变化加剧会影响青藏草原生态系统的碳水循环过程^[33],因此开展青藏高原地区 PUE 时空演变及其影响因素的量化分析对区域生态有着重要意义。青藏高原 PUE 的研究主要集中于高原内局部地区 PUE 对气温、降水等要素变化的响应^[3–4, 30]和对 PUE 时空特征的描述^[6, 13, 15, 24, 27],其影响因素仍然存在较大的不确定性,并且因传统测量方法难以获取和数据精度的不足,导致缺乏微地形效应对 PUE 值驱动作用的定量探讨。随着空间分辨率的提高和遥感技术的发展,趋势分析、相关分析和地形分析等方法可以作为较精确评估区域尺度 PUE 值的可靠手段。

青海湖流域地处青藏高原东北部,位于中国西北干旱区、东部季风区和青藏高原的过渡地带^[34],是中国

著名的湖泊湿地及生态安全屏障^[35]。由于地形复杂^[36],气候条件恶劣^[37]和对该地区植被^[38]、气候变化的影响^[39–42]认识有限,有关青海湖流域植被降水利用效率的研究尚未见相关报道。和青藏高原其他地区相比,青海湖流域干燥少雨、降水变率大^[37, 43],不同的地理环境特征会对植被类型、生长环境、水文循环等方面产生影响,从而影响植被降水利用效率。为此,本文拟深入研究 2000—2020 年近 21 年青海湖流域 PUE 的时空变化特征,解决和回答以下科学问题:(1)2000—2020 年青海湖流域降水利用效率在年际尺度上表现出怎样的时空变化格局?其是否存在不同的地形效应?(2)近 21 年青海湖流域 PUE 的时空变化格局主要受哪些气象和植被因子驱动?上述科学问题的解决有利于深入理解青海湖流域植被对降水的利用能力及其耗水特性,评估高寒生态系统功能,分析气候变化对碳循环关键要素的影响,并可为青海湖流域植被保护和国家公园建设提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域(36°15′—38°20′N, 97°50′—101°20′E)是一个完全封闭的高原内陆流域,海拔高度在 3169—5268 m 之间,其面积约 $2.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[44–46]。该地区属高原半干旱高寒气候^[47],2000—2020 年年均气温在 -12.3—2.05 °C 变化;年降水量在 215.7—788.7 mm 变化,气候暖湿化趋势明显。在空间上近 21 年流域年均气温表现为东南高西北低;年降水量呈中部低北部高。青海湖流域内河流众多,共计 70 余条,流域内河网分布不均,西北部河网密布,且径流量较大;东南部河网稀疏,且径流量较小^[48]。流域内植被种类丰富,其中草甸和草地是主要的两种植被景观类型,占整个流域面积的 71.3%^[49]。近年来,流域植被株营养枝高度平均值为 11.50 cm,生殖枝为 22.90 cm;植被总覆盖度为 72%,其中优势种覆盖度占比为 38%;植被生物量平均值为 3196.22 kg/hm²,生物量的组成以莎草科和禾本科植物为主,占生物量比重的 59.67%^[50](图 1)。

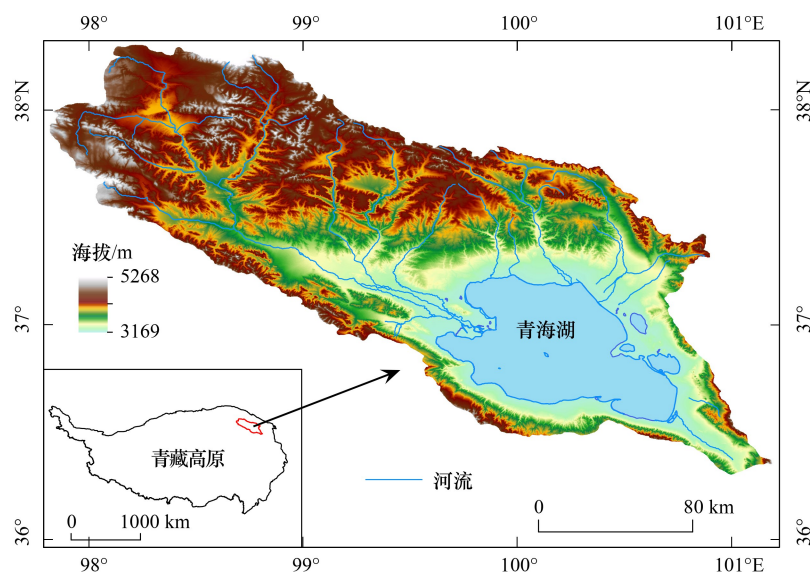


图 1 青海湖流域位置

Fig.1 Location of the Qinghai Lake Basin

1.2 数据来源

气象数据:年均气温和年降水量数据来自国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)发布的中国逐月平均气温数据集(1 km×1 km)和中国逐月降水量数据集(2000—2020 年, 1 km×1 km)。

生态环境数据:年植被净初级生产力(NPP)数据来自美国国家航空航天局网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov>).

gov/)提供的 MOD17A3H 数据产品,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m×500 m。年均地表温度数据来自资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/>)发布的中国地表温度年度数据集(1 km×1 km)。年均地表土壤湿度和生长季光合有效辐射吸收系数数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)发布的全球地表土壤水分数据集(2000—2020 年,1 km×1 km)、基于站点观测的中国土壤湿度日尺度数据集(2000—2020 年,1 km×1 km)和青藏高原光合有效辐射吸收系数(1987—2020 年,30 m×30 m)。

植被指数数据:2000—2019 年归一化植被指数(NDVI)数据来自资源环境科学数据注册与出版系统中国年度植被指数空间分布数据集(1 km×1 km)。2020 年 NDVI 数据来自于国家地球系统科学数据中心发布的中国逐月 NDVI 数据集(2001—2022 年,1 km×1 km)。叶面积指数数据来自于美国国家航空航天局网站提供的 MOD15A2H 数据产品,时间分辨率为 8 天,空间分辨率为 500 m×500 m。

1.3 研究方法

1.3.1 数据处理

由于中国年度植被指数空间分布数据集 2020 年 NDVI 只有 1—6 月的数据,因此 2020 年的年度 NDVI 数据是根据中国逐月 NDVI 数据集得到的 2020 年各月 NDVI,以最大值合成年度 NDVI 数据。2000—2020 年叶面积指数数据是根据 8 天数据以最大值合成各年叶面积指数数据。2000 年 1 月地表土壤湿度缺失数据采用基于站点观测的中国土壤湿度日尺度数据集利用算术平均得到同期数据,结合 2000 年其他月份数据求得当年平均地表土壤湿度。

研究区三种地形效应是利用 ArcGIS 中表面分析模块结合 30 m×30 m 分辨率数字高程模型(DEM)提取的青海湖流域海拔、坡度和坡向,参照国家标准并结合区域特点,将青海湖流域海拔划分为 34 个等级,坡度 6 个等级,坡向 8 个等级。在 ArcGIS 提取的属性表中,坡度为-1 表示地面平坦,坡向为 337—360°和 0—22°共同表示为北坡。

所有数据经过 ArcGIS 10.4.1 软件进行统计分析处理,运用 ArcGIS 软件中的投影栅格工具对其进行投影转换和分辨率统一,统一投影为 WGS_1984_Albers,空间分辨率为 1000 m×1000 m;使用掩膜提取工具,结合青海湖流域的矢量图,裁出 NPP、气温、降水、地表温湿度、光合有效辐射吸收系数、NDVI 和叶面积指数等所有数据的栅格图,并使用栅格计算器进行 PUE 值运算、趋势分析、相关性分析和植被覆盖度运算;使用空间分析工具,结合转换、数据管理等工具,对数据进行流域分析和三种地形效应分析;利用 Origin 2022 软件进行流域和三种地形特征等的属性分析。因地图分辨率不同,流域海拔与研究区概况图海拔略有差异。

1.3.2 植被年降水利用效率计算

青海湖流域植被年降水利用效率(PUE)计算如下^[51]:

$$PUE = NPP/P \quad (1)$$

式中,NPP 为年净初级生产力(gC/m²),P 为年降水量(mm)。

1.3.3 年植被覆盖度计算

按照像元二分模型原理,将每个像元的 NDVI 看作是由绿色植被对 NDVI 的贡献和非植被对 NDVI 的贡献相结合得到的数值^[7],并参照《全国生态状况调查评估技术规范—生态系统质量评估(HJ 1172—2021)》标准,用下式求出植被覆盖度^[52]:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (2)$$

式中,FVC 表示像元年植被覆盖度;NDVI 是混合像元的年 NDVI 值;NDVI_{veg}表示纯植被像元的年 NDVI 值;NDVI_{soil}是指纯裸土覆盖像元的年 NDVI 值。由于受土壤、植被类型等因素的影响,目前 NDVI_{soil}和 NDVI_{veg}主要通过对图像的统计分析确定,本文在实际计算过程中,拟设定 5%和 95%置信区间值,并将遥感 NDVI 数据的上、下界分别作为 NDVI_{soil}和 NDVI_{veg}的值^[53]。

1.3.4 植被年降水利用效率空间变化趋势分析

为直观反映近 21 年青海湖流域年 PUE 值的变化趋势,本文采用最小二乘回归方法估算 2000—2020 年

青海湖流域 PUE 值的空间线性变化趋势。基于趋势分析逐像元计算 PUE 值的年际变化趋势,并判断当 $\alpha = 0.05, Z = 1.96$ 时, PUE 值变化趋势的显著性^[54]。计算公式如下^[55]:

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

式中, S 为回归方程的斜率值 ($\text{gC m}^{-2} \text{mm}^{-1} \text{a}^{-1}$), 表示 21 年间流域年 PUE 值随时间的变化趋势; n 为年份数 21 a; j_i 代表第 i 年的 PUE 值 ($\text{gC m}^{-2} \text{mm}^{-1}$)。 $S > 0$, 表示年 PUE 值呈增大趋势; $S < 0$, 表示呈减小趋势。 S 值的大小表示 PUE 值增大或减小的速率。

变化趋势斜率值的显著性用 F 检验方法中统计量 P 进行检验, 可知变化趋势斜率值可信程度高低。计算公式为^[27]:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (4)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6)$$

式中, U 为误差平方和, Q 为回归平方和, $\hat{y}_i$ 为其回归值, $\bar{y}$ 代表 21 年 PUE 平均值 ($\text{gC m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), y_i 表示第 i 年的 PUE 值 ($\text{gC m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), n 表示研究年数 21 a。在给定置信水平 α 下, 如果 $|F| \geq P_{n-m-1}$, 表示 PUE 值时间序列在 α 水平下变化趋势显著; 本文选择 $\alpha = 0.05, P_{n-m-1} = 4.381$ ^[54]。

1.3.5 相关分析

为了分析 2000—2020 年青海湖流域 PUE 值的时空动态, 揭示 PUE 与环境 and 植被因子之间的空间关系, 本文使用相关系数和显著性检验进行要素间的相关性分析。在相关分析中, 相关系数能真实反映 x 和 y 变量之间的相关关系, 其计算公式为^[54]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中, $\bar{x}$ 表示多年年均气温 ($^{\circ}\text{C}$)、年均地表温度 ($^{\circ}\text{C}$)、年均地表土壤湿度 (m^3/m^3)、生长季光合有效辐射吸收系数、植被覆盖度 (%) 和叶面积指数 (m^2/m^2) 的平均值, $\bar{y}$ 表示多年 PUE 的平均值 ($\text{gC m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), i 表示年数, 例如, $i = 1, 2, \dots, 21$, n 表示年份数 21 a, x_i 表示第 i 年的年均气温、年均地表温度、年均地表土壤湿度、生长季光合有效辐射吸收系数、植被覆盖度和叶面积指数, y_i 表示第 i 年的 PUE 值。 $r > 0$ 表示两者正相关, $r < 0$ 表示负相关。绝对值越接近 1, 相关性越强, 越接近 0, 相关性越弱。

本文的相关性分析采用 t 检验来检验相关系数的显著性, 其计算公式如下^[54]:

$$t = \sqrt{n-m-1} \times \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (8)$$

式中, n 为 21 a (周期序列为 2000—2020 年), m 为自变量个数 1, r 为相关系数。本文 t 检验结果的显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。

1.3.6 地形特征划分方法

本文探讨的地形效应选择较为常用的三类, 包括海拔效应和坡度坡向两种微地形效应。流域坡度参照

《全国生态状况调查评估技术规范—森林生态系统野外观测 (HJ1168—2021)》标准^[56],将青海湖流域坡度分为平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡、险坡共 6 个等级,相对应坡度分别为 $0—5^{\circ}$ 、 $5—15^{\circ}$ 、 $15—25^{\circ}$ 、 $25—35^{\circ}$ 、 $35—45^{\circ}$ 和 $>45^{\circ}$;流域坡向分成 8 个方向,分别为北坡(N)方位角 $337—360^{\circ}$ 、 $0—22^{\circ}$ 、东北坡(NE)方位角 $22—67^{\circ}$ 、东坡(E)方位角 $67—112^{\circ}$ 、东南坡(SE)方位角 $112—157^{\circ}$ 、南坡(S)方位角 $157—202^{\circ}$ 、西南坡(SW)方位角 $202—247^{\circ}$ 、西坡(W)方位角 $247—292^{\circ}$ 、西北坡(NW)方位角 $292—337^{\circ}$ 。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年青海湖流域多年植被降水利用效率的时间变化

2000—2020 年,青海湖流域多年单位像元(1 km^2 ,下同)PUE 平均值的年际变化范围为 $0.4—0.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$;平均为 $0.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (图 2)。21 年单位像元 PUE 最大值在 2013 年为 $0.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$,最小值在 2007 年为 $0.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (图 2)。2000—2020 年青海湖流域单位像元 PUE 平均值存在波动,且无显著变化趋势($R^2=0.05$, $P>0.05$)。

2.2 2000—2020 青海湖流域多年植被降水利用效率的空间变化

2000—2020 年青海湖流域多年平均 PUE 空间分布结果显示(图 3),其空间变化范围为 $0—1.49 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$,平均值为 $0.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。近 21 年青海湖流域 PUE 平均值在空间上存在差异,高值主要分布在青海湖西岸、南岸和北岸的半环区,青海湖东岸及远湖地区为低值区,除青海湖东岸外,PUE 值随青海湖距离增大

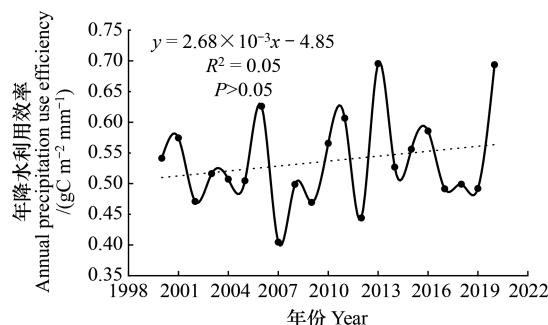


图 2 2000—2020 年青海湖流域单位像元植被降水利用效率平均值变化

Fig.2 Change of mean unit pixel vegetation precipitation use efficiency in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

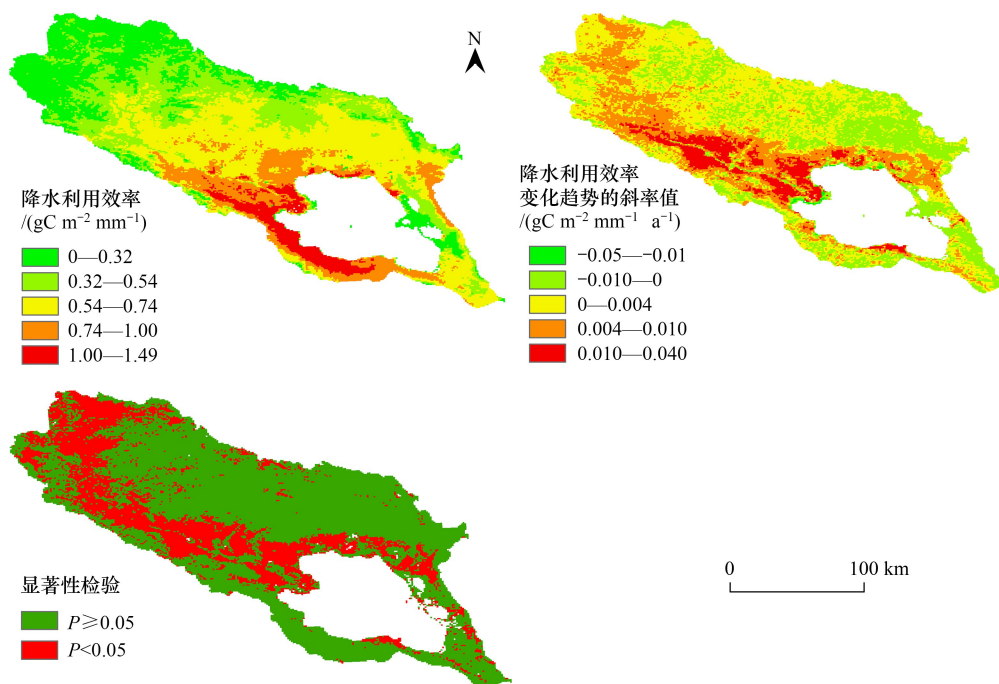


图 3 2000—2020 年青海湖流域多年平均植被降水利用效率空间分布和空间变化趋势的斜率值及其显著性检验

Fig.3 The spatial distribution of mean annual vegetation precipitation use efficiency and the slope of spatial change trend and its significance test in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

呈减小趋势。近 21 年青海湖流域 PUE 变化趋势的斜率值为 $-0.05 \sim 0.04 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (图 3)。PUE 值增加面积主要分布在流域西部、青海湖北岸和布哈河沿岸地区,占流域面积的 78.19%。PUE 值的减少区域零星分布于流域北部、青海湖东岸和南岸的少部分地区,占流域面积的 21.81%。由图 3 可见,通过显著性检验的区域占流域面积的 29.63%,显著性检验结果与变化趋势的空间分布相似。

2.3 2000—2020 年青海湖流域多年平均植被降水利用效率的地形效应

2.3.1 近 21 年植被降水利用效率平均值的海拔效应

2000—2020 年青海湖流域多年 PUE 平均值 ($R^2 = 0.97$, $P < 0.01$) 及其变化趋势的斜率值 ($R^2 = 0.75$, $P < 0.01$) 随海拔升高呈极显著下降趋势 (图 4) (表 1)。即当海拔升高 50 m 时, PUE 降低 $0.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; 其变化趋势的斜率值降低了 $1.21 \times 10^{-4} \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (图 4) (表 1)。其中, PUE 平均值在 3086—3550 m 范围内变化幅度较小, 最大值出现在 3500—3550 m, 达到 $0.75 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$; 自 3500—3550 m 开始, 全域 PUE 平均值下降趋势加剧, 下降速率是整个研究时段的 1.14 倍, 最小值出现在海拔 4800 m 以上, 为 $0.05 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。PUE 变化趋势的斜率值则在 3086—3400 m 范围内波动上升, 在 3350—3650 m 呈迅速下降趋势, 在 3600—5141 m 缓慢下降, 其最大值出现在 3350—3400 m, 达到 $5.08 \times 10^{-3} \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 最小值同样出现在海拔 4800 m 以上, 为 $-2.17 \times 10^{-4} \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。

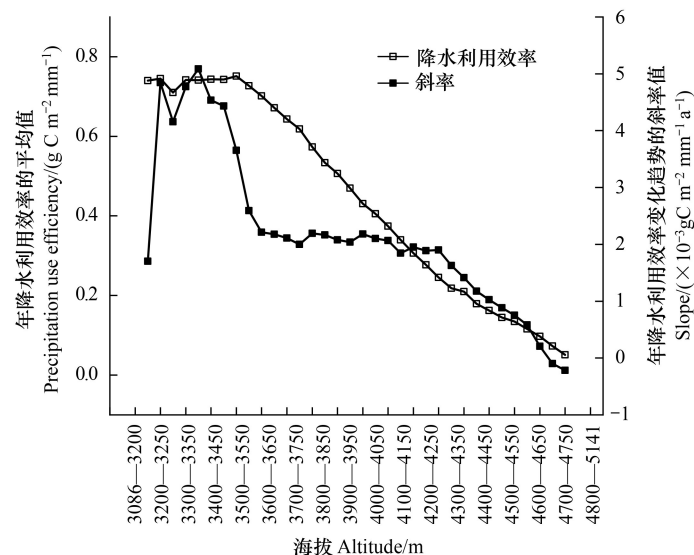


图 4 2000—2020 年青海湖流域多年平均植被降水利用效率及其斜率值的海拔效应

Fig.4 Altitude effect of the average of annual vegetation precipitation use efficiency and its slope in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

2.3.2 近 21 年植被降水利用效率平均值的坡度和坡向效应

青海湖流域不同坡度及坡向近 21 年 PUE 平均值及其变化趋势斜率值的特征有较大差异。随坡度增加, PUE 值及其变化趋势的斜率值呈显著降低趋势。平坡至险坡 PUE 值的变化范围为 $0.3 \sim 0.61 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, 变化趋势斜率值范围为 $1.19 \times 10^{-3} \sim 3.57 \times 10^{-3} \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (图 5)。坡度较大的地区 PUE 值与其变化趋势的斜率值较低, 坡度较小的地区则相对较高。不同坡向 PUE 值表现为由东北坡向西南坡递减, 其变化范围为 $0.52 \sim 0.56 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, 变化趋势斜率值由东坡向西坡递减, 范围为 $2.46 \times 10^{-3} \sim 2.88 \times 10^{-3} \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 近 21 年青海湖流域 PUE 平均值及其变化趋势斜率值随坡向的分布情况如图 5 所示。其中, 西南坡 PUE 值最小, 东北坡值最大, 坡向对 PUE 的影响较为明显。

表 1 2000—2020 年青海湖流域年植被降水利用效率与各要素(y)和海拔梯度(x)的线性关系

Table 1 Linear relationship between annual vegetation precipitation use efficiency and various factors(y) with altitudinal gradient (x) in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

要素 Factors	拟合方程 Fitting Equation	调整后的拟合系数 Adjusted fitting coefficient	显著性检验 Significant Test
年降水利用效率 Annual precipitation use efficiency	$y = -0.02x + 0.85$	0.96	$P < 0.01$
年平均气温 Annual mean air temperature	$y = -0.36x + 0.77$	0.99	$P < 0.01$
年平均地表温度 Annual mean land surface temperature	$y = -0.49x + 19.54$	0.96	$P < 0.01$
年平均地表土壤湿度 Annual mean surface soil moisture	$y = -4.09 \times 10^{-4}x + 0.18$	0.10	$P < 0.05$
年生长季光合有效辐射吸收系数 Annual fraction of absorbed photosynthetically active radiation	$y = -0.01x + 0.27$	0.80	$P < 0.01$
年植被覆盖度 Annual fractional vegetation cover	$y = -2.66x + 95.13$	0.79	$P < 0.01$
年叶面积指数 Annual leaf area index	$y = -0.09x + 3.14$	0.71	$P < 0.01$
年降水利用效率的变化趋势 Slope of annual precipitation use efficiency	$y = -1.21 \times 10^{-4}x + 4.30 \times 10^{-3}$	0.74	$P < 0.01$

表中 x 的值每增加 1,表示海拔梯度增加 50 m

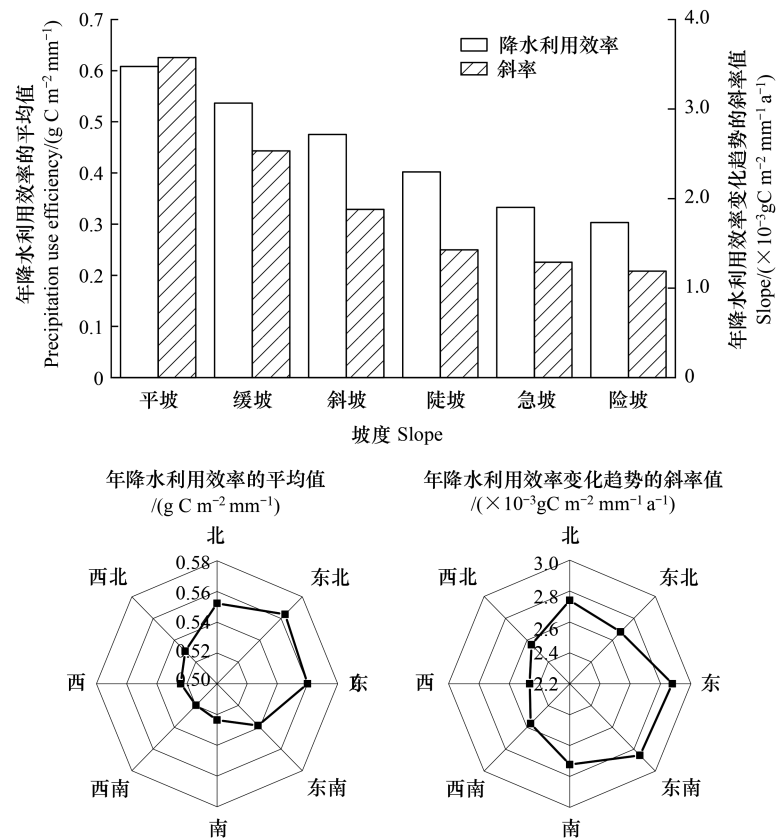


图 5 2000—2020 年青海湖流域多年植被降水利用效率平均值及变化趋势斜率值的坡度和坡向特征

Fig.5 Slope and aspect characteristics of annual average vegetation precipitation use efficiency and its S in the Qinghai Lake Basin from 2000 to 2020

3 讨论

研究区 2000—2020 年 PUE 平均值在 $0.4\text{--}0.7\text{ gC m}^{-2}\text{ mm}^{-1}$ 之间波动,呈不显著上升趋势,这与同琳静等^[27]利用光能利用率模型(CASA)模拟并推算 2000—2013 年青藏高原草地 PUE 呈波动增加趋势的结论一致。研究范围内的大部分都位于高海拔地区,植被生产力较低且降水稀少,而研究时段内的植被净初级生产力和降水量均呈上升趋势,对植被降水利用能力存在一定促进作用。但由于 2007 和 2012 年研究区降水量偏高,加之主要受到植被覆盖度和气温变化的影响(表 2)导致 NPP 偏低,由此造成该年份研究区 PUE 值偏低;而 2013 和 2020 年降水量偏少,同时多要素共同影响(表 2)导致 NPP 偏高,造成 PUE 值偏高。

表 2 典型年份 PUE 与各要素的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between PUE and each factor in typical years

要素 Factors	2007 年	2012 年	2013 年	2020 年
气温 Air temperature	0.73 *	0.74 *	0.67 *	0.69 *
地表温度 Land surface temperature	0.60 *	0.64 *	0.65 *	0.66 *
地表土壤湿度 Surface soil moisture	0.20	0.15	0.20	0.05
生长季光合有效辐射吸收系数 Fraction of absorbed photosynthetically active radiation	0.56	0.32	0.55	0.68 *
植被覆盖度 Fractional vegetation cover	0.78 *	0.77 *	0.76 *	0.71 *
叶面积指数 Leaf area index	0.65 *	0.65 *	0.62 *	0.66 *

* 表示通过显著性水平检验

3.1 环境因子对青海湖流域多年植被降水利用效率的影响

以年为时间单位,计算 2000—2020 年青海湖流域多年 PUE 值与多年年均气温、多年年均地表温湿度和多年生长季光合有效辐射吸收系数的相关系数,分析 PUE 值的年际变化与环境因子的关系。多年年均气温(AT)与 PUE 值的相关系数为 $-0.54\text{--}0.67$ (图 6)。AT 与 PUE 值的正相关区域主要分布在流域西部和青海湖南北岸,负相关区域主要分布在流域西北部 and 东部,分别占流域面积的 97.43% 和 2.57%。海拔较低的地区温度较高,且有丰富的水源补给植被长势良好,呈正相关关系;而少数较高海拔地区植被稀疏,难以进行有效光合作用,温度升高反而造成植被失水枯萎故呈现负相关关系。AT 对 PUE 影响不显著相关,显著面积仅占流域面积的 5.15% ($P<0.05$) (图 6)。这也与潘焕焕等^[11]对中国干旱区自然植被降水利用效率的研究和 Zhang 等^[10]对欧洲草原大陆尺度上的研究结果相一致。其原因可能是多维度的,一方面温度的升高促进了植被的最佳光合作用,提升植被的净初级生产力,并促进了低温地区 PUE 的提升^[57];另一方面气温的升高也会加速土壤水分流失,导致对 NPP 和 PUE 产生负面影响^[58]。

2000—2020 年青海湖流域多年 AT 平均值随海拔升高呈极显著下降趋势($R^2=0.99$, $P<0.01$),当海拔升高 50 m 时,AT 会降低 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 6) (表 1)。沿海拔梯度,AT 与 PUE 呈极显著正相关,AT 增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,PUE 增加 $0.07\text{ gC m}^{-2}\text{ mm}^{-1}$ (图 6)。PUE 没有随 AT 在 3086—3500 m 发生显著变化,在 3500—5141 m,两要素呈现极显著正相关($R^2=0.99$, $P<0.01$)说明该海拔范围内 PUE 值随海拔升高、气温降低而极显著减小。这是因为 AT 和 PUE 在海拔上均呈现显著递减趋势(图 6),使两要素在海拔梯度上表现出较强的相关性。

多年年均地表土壤温度(LST)和多年年均地表土壤湿度(SSM)与 PUE 的相关性分析表明,LST 与 PUE 的相关系数为 $-0.7\text{--}0.91$ (图 7),正相关区域主要分布在流域北部和青海湖南岸,负相关区域主要分布在流域西北部和东部,分别占流域面积的 72.93% 和 27.07%,显著性检验合格面积占 12.42% ($P<0.05$),特别是流域中部和南部地区,呈显著正相关(图 7)。SSM 与 PUE 值的相关系数为 $-0.7\text{--}0.85$ (图 8),正相关区域主要分布在流域中部、西北部和青海湖北岸,负相关区域主要分布在流域北部,分别占流域面积的 38.15% 和 61.85%,其中仅有 4.34% 的区域通过显著性检验($P<0.05$, 图 8)。说明地表温度与青海湖流域植被降水利用率有一定的相关性,地表土壤湿度与其相关性不明显。地表温湿度正负相关关系基本呈相反的空间分布。通

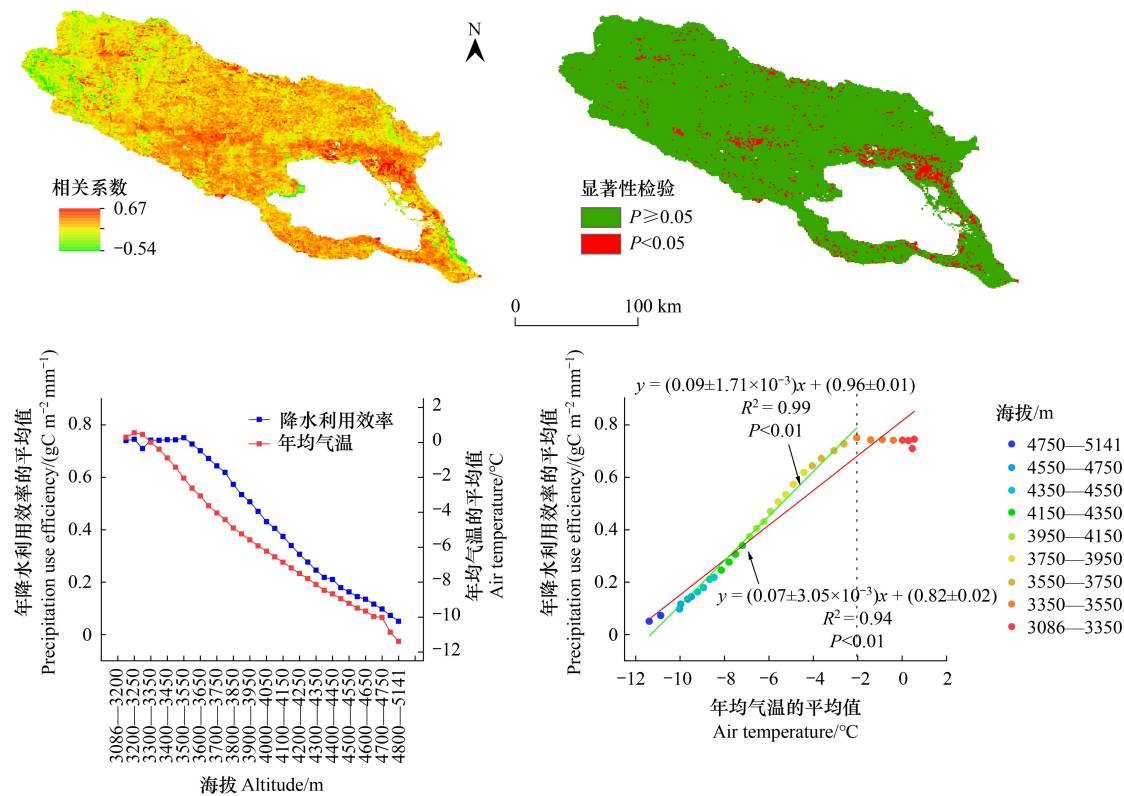


图6 青海湖流域近21年植被降水利用效率与年均气温的空间相关性、显著性检验、海拔效应及其沿海拔梯度的线性关系
Fig.6 Spatial correlation, significance test, altitude effect and linear relationship along the altitudinal gradient between annual vegetation precipitation use efficiency and annual mean air temperature in the Qinghai Lake Basin in the last 21 years

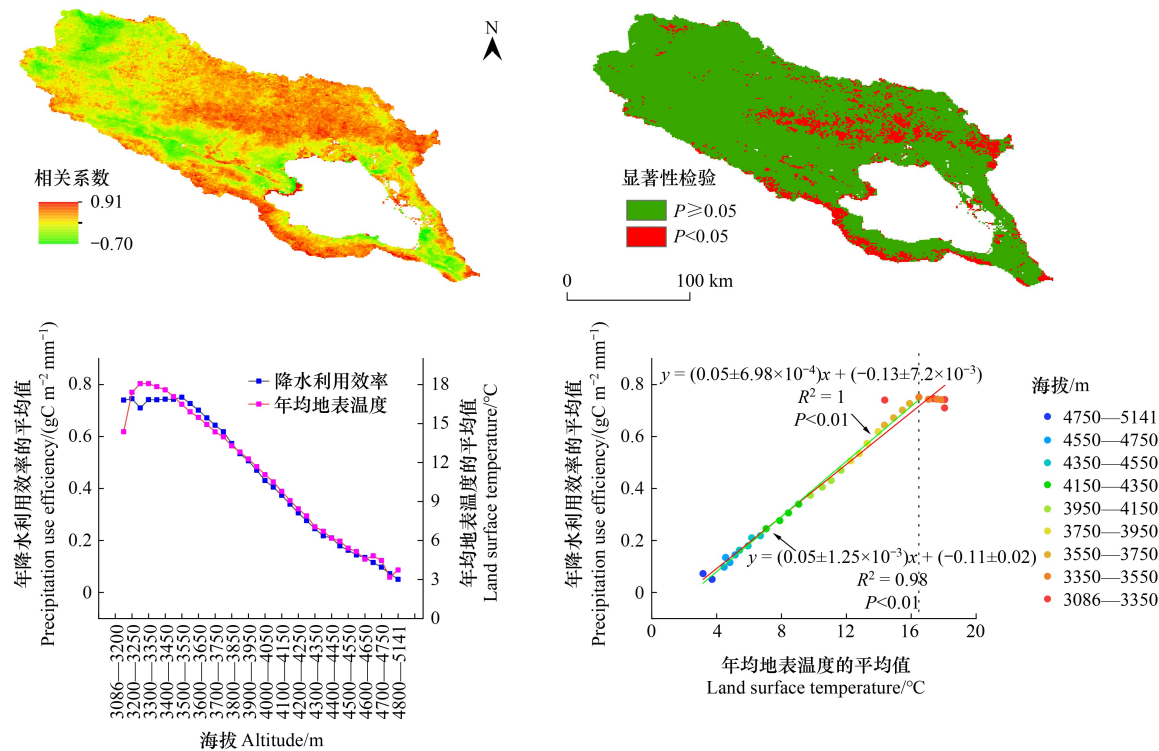


图7 青海湖流域近21年植被降水利用效率与年均土地表面温度空间相关性、显著性检验、海拔效应及其沿海拔梯度的线性关系
Fig.7 Spatial correlation, significance test, altitude effect and linear relationship along the altitudinal gradient between annual mean vegetation precipitation use efficiency and annual mean land surface temperature in the Qinghai Lake Basin in the last 21 years

常而言地表温度越高则表明植被可利用温度越高,高海拔地区植被脆弱,LST 增加可以促进植被生产力提升,但低海拔地区水热条件较好,且阳坡地表温度升温幅度更大,高 LST 会加速土壤水分蒸发,导致低 PUE;地表湿度与降水量有高度相关性^[59],且坡度较陡的地区,增加的降水容易以径流的形式流失,这可能会增加土壤养分的流失,限制植被生产力,从而导致 PUE 的下降,故大部分地区 PUE 与 SSM 呈负相关关系,坡度较缓地区植被长势良好,可被植被吸收和利用的降水(有效降水)比例增加,故为正相关关系。

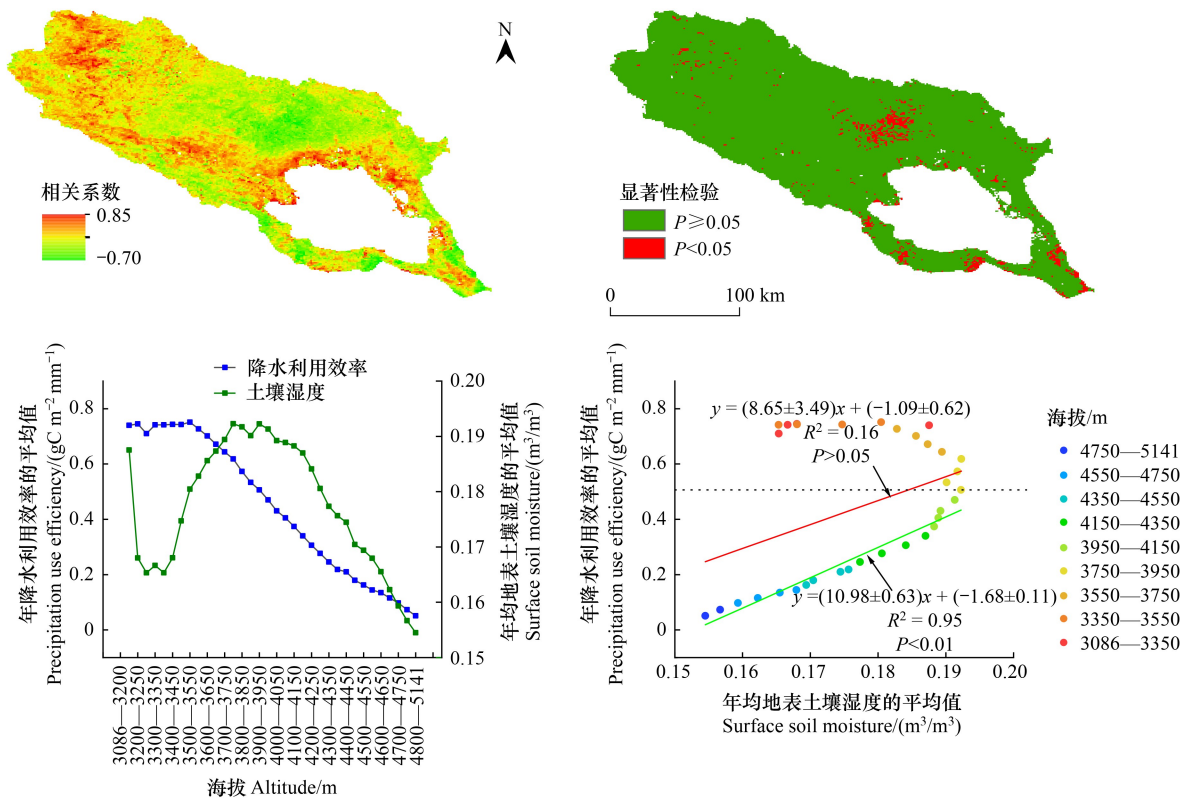


图8 青海湖流域近 21 年植被降水利用效率与年均地表土壤湿度空间相关性、显著性检验、海拔效应及与其沿海拔梯度的线性关系

Fig.8 Spatial correlation, significance test, altitude effect and linear relationship along the altitudinal gradient between annual vegetation precipitation use efficiency and annual mean surface soil moisture in the Qinghai Lake Basin in the last 21 years

2000—2020 年青海湖流域的 LST 平均值随海拔升高呈极显著下降趋势($R^2 = 0.96$, $P < 0.01$),当海拔升高 50 m 时,LST 会降低 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$,SSM 平均值随海拔高度上升呈显著下降趋势($R^2 = 0.12$, $P < 0.05$, 图 7, 8, 表 1),这可能与局地降水差异有关。沿海拔梯度,LST 与 PUE 呈极显著正相关,而 SSM 与 PUE 无显著相关性(图 7, 8)。LST 增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,PUE 增加 $0.05\text{ gC m}^{-2}\text{ mm}^{-1}$,SSM 增加 $1\text{ m}^3/\text{m}^3$,PUE 将增加 $8.65\text{ gC m}^{-2}\text{ mm}^{-1}$ 。LST 与 PUE 在 3086—3500 m 无显著变化,在 3500—5141 m,两要素极显著正相关($R^2 = 1$, $P < 0.01$);PUE 没有随 SSM 在 3086—3900 m 显著变化,3900—5141 m,两要素呈现极显著正相关($R^2 = 0.95$, $P < 0.01$)说明该海拔范围内 PUE 值随海拔升高、地表温湿度降低而极显著减小。在上述海拔范围内地表温湿度呈现出显著递减趋势,与 PUE 在此范围内的变化趋势相一致(图 7, 8),所以表现出显著的相关关系。

青海湖流域近 21 年 PUE 值与生长季光合有效辐射吸收系数(光合有效辐射吸收比,FPAR)在年际变化趋势上的响应不是特别强烈(图 9),FPAR 在一定程度上影响研究区 PUE 值的波动。FPAR 与 PUE 的相关系数为 $-0.79\sim 0.85$ (图 9),正相关区域主要分布在流域中部、南部和青海湖北岸等水源丰富的地区,占流域面积的 72.15%,这些地区自然条件好太阳辐射强,植物可以更有效地利用光能进行光合作用;负相关区域主要分布在流域西部和青海湖东岸地区,占流域面积的 27.84%,这些地区远离水源或土地盐渍化现象严重,植被生长环境较差。研究区中部和青海湖北岸地区两要素显著相关,其中 10.1%的区域通过显著性检验($P < 0.05$,

图 9), 因此 FPAR 也是影响 PUE 值的重要因素。这也与若尔盖高原湿地等临近地区 FPAR 和植被生产力的研究结果基本一致^[60]。

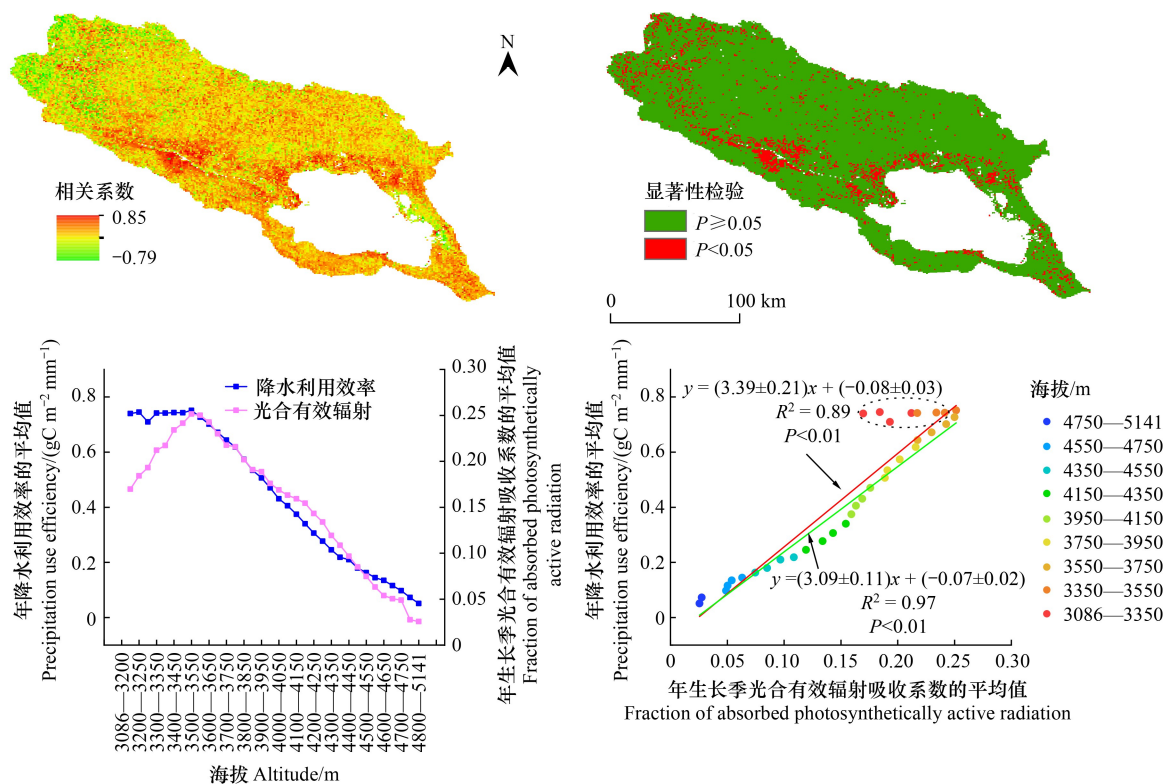


图 9 青海湖流域近 21 年植被降水利用效率与生长季光合有效辐射吸收系数空间相关性、显著性检验、海拔效应及与其沿海拔梯度的线性关系

Fig.9 Spatial correlation, significance test, altitude effect and linear relationship along the altitudinal gradient between annual vegetation precipitation use efficiency and annual fraction of absorbed photosynthetically active radiation in the Qinghai Lake Basin in the last 21 years

2000—2020 年青海湖流域 FPAR 平均值随海拔升高呈极显著下降趋势 ($R^2 = 0.80$, $P < 0.01$), 当海拔升高 50 m 时, FPAR 会降低 0.01 (图 9) (表 1)。沿海拔梯度, FPAR 与 PUE 呈极显著正相关 ($R^2 = 0.89$, $P < 0.01$), FPAR 增加 0.1, PUE 增加 $0.34 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (图 9)。PUE 没有随 FPAR 在 3086—3500 m 发生显著变化, 在 3500—5141 m, 两要素也呈现极显著正相关 ($R^2 = 0.99$, $P < 0.01$) 说明该范围内 PUE 随海拔升高、生长季光合有效辐射吸收系数降低而极显著减小。这可能是 FPAR 在海拔梯度上与 PUE 呈相同的下降趋势 (图 9)。

3.2 植被生物学特征对青海湖流域多年植被降水利用效率的影响

2000—2020 年青海湖流域 PUE 值与年植被覆盖度 (FVC) 的相关关系结果显示 (图 10), PUE 与 FVC 之间存在相关关系, 系数变化范围为 -0.66 — 0.91 。PUE 与 FVC 呈正相关的区域主要分布在流域中西部、青海湖东岸和南岸, 占流域面积的 70.76%, 呈负相关的区域主要分布在流域西北部和北部, 占流域面积的 29.24% (图 10)。植被覆盖度越高的地区往往植被长势良好, 生产力高, 而部分高海拔及坡度较陡和阴坡地区, 自然环境较差, 植被覆盖高导致植物间抢夺养分, 使植被转化营养物质的能力下降。可见, 2000—2020 年青海湖流域 PUE 值的空间变化亦受 FVC 的影响, 植被覆盖度的增加可以提高一些地区的降水利用效率。

FVC 与 PUE 在空间上呈显著相关 ($P < 0.05$) 的区域分布在流域中部和东南部, 其面积约占整个流域的 11.03% (图 10), 故 FVC 对流域 PUE 的空间影响部分显著相关。这与类似研究的结果有所差异^[17,25], 可能是由于青海湖流域深处高原腹地, 常年干旱少雨, 但较低海拔地区与河流、湖泊相邻, 降水并非该地区植物生长获取水分的唯一途径, 地表水含量也是重要的影响因子^[61], 故 NPP 稍高于周围其他区域, 表现出较高的降水

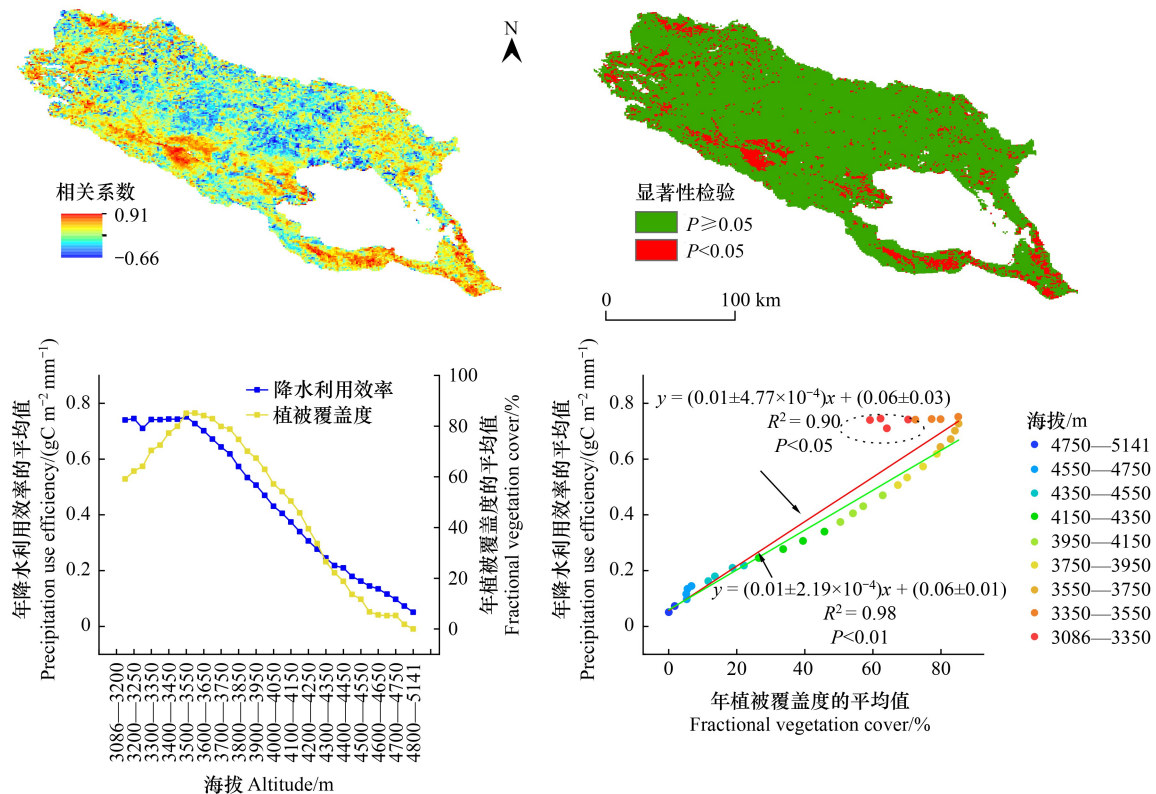


图 10 青海湖流域近 21 年平均植被降水利用效率与植被覆盖度空间相关性、显著性检验、海拔效应及与其沿海拔梯度的线性关系

Fig.10 Spatial correlation, significance test, altitude effect and linear relationship along the altitudinal gradient between annual vegetation precipitation use efficiency and annual fractional vegetation cover in the Qinghai Lake Basin in the last 21 years

利用效率。

2000—2020 年青海湖流域 FVC 平均值随海拔升高呈极显著下降趋势,当海拔升高 50 m 时, FVC 会降低 3% (图 10) (表 1)。沿海拔梯度, FVC 与 PUE 呈显著正相关 ($R^2=0.90$, $P<0.05$), FVC 增加 1%, PUE 值增加 $0.01 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (图 10)。PUE 未随 FVC 在 3086—3500 m 发生显著变化,在 3500—5141 m,两要素极显著正相关 ($R^2=0.98$, $P<0.01$) 说明该海拔范围内 PUE 值随海拔升高、植被覆盖度降低而极显著减少。

2000—2020 年青海湖流域 PUE 值与年叶面积指数 (LAI) 的相关关系结果显示 (图 11), PUE 值与 LAI 之间存在相关关系,系数变化范围为 $-0.66—1$ 。正相关区域主要分布在流域中西部、青海湖东岸和北岸,占流域面积的 76.59%,呈负相关的区域主要分布在流域中北部和南部,占流域面积的 23.41% (图 11)。在水热组合条件良好的低海拔缓坡地区,叶面积指数越高则植被可固定的碳越多,植被生产力越高,而较高海拔地区,植物会争夺土壤水分及养分,对 PUE 产生相反的抑制作用。青海湖流域 PUE 值的空间变化受 LAI 影响,叶面积指数增加可以提高部分地区的降水利用效率。

LAI 与 PUE 值在空间上呈显著相关 ($P<0.05$) 的区域分布在流域中部、西北部和东南部,其面积约占整个流域的 16.42% (图 11)。通过上述分析, LAI 对 PUE 的空间影响在部分地区显著相关,这也与内蒙古草地植被^[17]和欧亚草原^[10]的研究结果较为相近。LAI 的增加有利于植物光合作用,同时通过阻断土壤水分蒸发减少水分耗散,提高降水转化为生物量的效率,因此 LAI 与 PUE 的年际波动有较为密切的关系。

2000—2020 年青海湖流域 LAI 平均值随海拔升高呈极显著下降趋势。当海拔升高 50 m 时, LAI 会降低 $0.09 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (图 11) (表 1)。沿海拔梯度, LAI 与 PUE 呈显著正相关 ($R^2=0.86$, $P<0.05$), LAI 增加 $1 \text{ m}^2/\text{m}^2$, PUE 值增加 $0.23 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ (图 11)。PUE 未同 LAI 在 3086—3500 m 显著变化,在 3500—5141 m,两要素呈极显著正相关 ($R^2=0.99$, $P<0.01$) 说明该海拔范围内 PUE 值随海拔升高、叶面积指数降低而极显著减少。

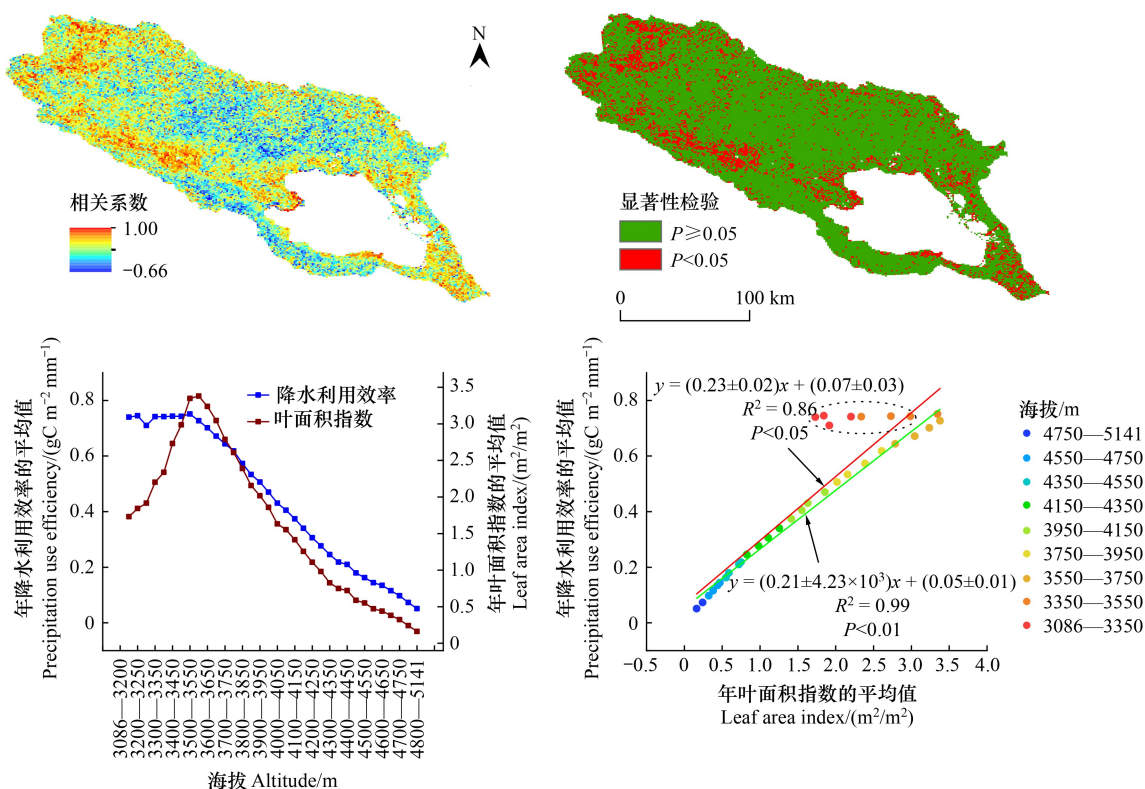


图 11 青海湖流域近 21 年平均植被降水利用效率与叶面积指数空间相关性、显著性检验、海拔效应及与其沿海拔梯度的线性关系

Fig.11 Spatial correlation, significance test, altitude effect and linear relationship along the altitudinal gradient between annual vegetation precipitation use efficiency and annual leaf area index in Qinghai Lake Basin in the last 21 years

3.3 总结与展望

综上,在空间上,不同影响因素显著性区域的面积不同,因此影响 PUE 空间格局的因素依次是叶面积指数>地表温度>植被覆盖度>光合有效辐射吸收系数>气温>地表土壤湿度;在海拔梯度上,不同影响因素的 R^2 值为 0.16—0.98,因此影响 PUE 海拔效应的因子依次为地表温度>气温>植被覆盖度>光合有效辐射吸收系数>叶面积指数>地表土壤湿度。这些因素影响了青海湖流域植被光合作用强弱和获取降水多少的空间、垂直分异,导致植被降水利用效率的差异。

PUE 与碳吸收和多个水循环过程密切相关,这些过程具有复杂的调节机制,同时,水热条件是影响 PUE 时间变化的最重要因素^[10]。本文的结果发现,气温对 PUE 没有显著的空间相关性,而是通过海拔对 LAI 和 FVC 等要素产生正向影响,进而间接影响 NPP。在高寒草原,温度和养分是限制植被生产力的因素^[62—63],而由气候模式塑造的 LAI 作为重要的生态系统特征直接影响 PUE^[64—65],所以温度对 LAI 和 NPP 的间接影响决定了青海湖流域 PUE 的时间变化。在全球气候变暖的大背景下,联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告指出到 2050 年全球温升可能达到 1.5 °C^[66],青藏高原尤其是青海湖流域是气候变化响应的敏感地带,暖湿化现象仍将持续^[67],因此未来青海湖流域植被生产力也将持续增加,固碳能力将持续增强,青海湖流域植被降水利用效率仍将处于波动上升趋势。

4 结论

本文基于 2000—2020 年青海湖流域植被净初级生产力数据和年降水量栅格数据,计算了近 21 年青海湖流域的 PUE 值,采用趋势分析的方法,明确了研究区过去 21 年 PUE 值的时空格局及变化情况,分析了地形效应和影响 PUE 值的因素。结论如下:

(1) 近 21 年青海湖流域单位像元 PUE 平均值呈波动变化,且无显著变化趋势;近 21 年 PUE 平均值环湖呈现不均匀分布,高值主要分布在青海湖西岸、南岸和北岸的半环区,青海湖东岸及远湖地区为低值区;PUE 值增加区域主要分布在流域西部、青海湖北岸和布哈河沿岸地区,减少区域零星分布于流域的北部、青海湖东岸和南岸的少部分地区。

(2) 三种地形因子对近 21 年青海湖流域 PUE 平均值的空间变异影响较为显著。其中海拔越高 PUE 值越低;坡度愈平缓则 PUE 值愈高;且由西南坡向东北坡递增。其变化趋势的斜率值也表现出相似的特征。

(3) 在空间上,2000—2020 年青海湖流域 PUE 主要受叶面积指数、地表温度、光合有效辐射吸收系数和植被覆盖度的综合影响;在海拔梯度上,PUE 主要受气温、地表温度、光合有效辐射吸收系数、植被覆盖度和叶面积指数的影响。海拔高度影响气温、地表温湿度、光合有效辐射吸收系数、植被覆盖度和叶面积指数的变化,这些因素的变化也显著影响青海湖流域的 PUE。

本文结果表明远湖地区及青海湖东岸植被用水能力较弱,因此应重点加强这些地区生态修复及水文水资源保护。基于地形分析和相关分析可以较好地揭示青海湖流域 PUE 的影响因素,根据其变化特点加以利用,可为青藏高原其他类似流域生态系统研究提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 仇洁. 青藏高原植被降水利用效率时空特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [2] 滑永春, 马秀枝, 斯钦毕力格. 内蒙古荒漠草原植被降水利用效率的时空特征. 中国沙漠, 2021, 41(4): 51-58.
- [3] 王志鹏, 张宪洲, 何永涛, 石培礼, 俎佳星, 牛犇, 李猛. 降水变化对藏北高寒草原化草甸降水利用效率及地上生产力的影响. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1822-1828.
- [4] 黄小涛, 姚步青, 马真, 周华坤. 青海高原草地净初级生产力和降水利用效率时空特征. 草地学报, 2021, 29(S1): 19-26.
- [5] Vermeire L T, Heitschmidt R K, Rinella M J. Primary productivity and precipitation-use efficiency in mixed-grass prairie: a comparison of northern and southern US sites. Rangeland Ecology & Management, 2009, 62(4): 230-239.
- [6] Liu Z J, Huang M. Assessing spatio-temporal variations of precipitation-use efficiency over Tibetan grasslands using MODIS and in-situ observations. Frontiers of Earth Science, 2016, 10: 784-793.
- [7] 穆少杰, 游永亮, 朱超, 周可新. 中国西北部草地植被降水利用效率的时空格局. 生态学报, 2017, 37(5): 1458-1471.
- [8] Qin X J, Hong J T, Ma X X, Wang X D. Global patterns in above-ground net primary production and precipitation-use efficiency in grasslands. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8): 1682-1692.
- [9] 童珊, 曹广超, 陈真, 张卓, 刁二龙. 近 30 年祁连山南坡生长季植被降水利用效率时空变化. 生态科学, 2020, 39(5): 124-133.
- [10] Zhang T Y, Chen Z, Zhang W K, Jiao C C, Yang M, Wang Q F, Han L, Fu Z, Sun Z Y, Li W H, Yu G R. Long-term trend and interannual variability of precipitation-use efficiency in Eurasian grasslands. Ecological Indicators, 2021, 130: 108091.
- [11] 潘换换, 刘雪佳, 杜自强, 武志涛, 张红. 中国干旱区自然植被降水利用效率的时空格局. 山西大学学报: 自然科学版, 2021, 44(1): 184-193.
- [12] Paruelo J M, Lauenroth W K, Burke I C, Sala O E. Grassland Precipitation-Use Efficiency Varies Across a Resource Gradient. Ecosystems, 1999, 2(1): 64-68.
- [13] 仇洁, 张慧, 沈渭寿. 青藏高原 1982—2007 年植被降水利用效率空间格局特征分析. 复旦学报: 自然科学版, 2014, 53(1): 126-133.
- [14] 王刘明, 张媛, 武磊, 魏健美, 王帅兵, 王万瑞, 李常斌. 区域尺度植被降水利用效率的时空变化特征——以洮河流域为例. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(5): 604-611.
- [15] Zhou T C, Liu M, Sun J, Li Y R, Shi P L, Tsunekawa A, Zhou H K, Yi S H, Xue X. The patterns and mechanisms of precipitation use efficiency in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292: 106833.
- [16] Lauenroth W K, Burke I C, Paruelo J M. Patterns of production and precipitation-use efficiency of winter wheat and native grasslands in the central great Plains of the United States. Ecosystems, 2000, 3(4): 344-351.
- [17] 穆少杰, 周可新, 齐杨, 陈奕兆, 方颖, 朱超. 内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素. 植物生态学报, 2014, 38(1): 1-16.
- [18] Heras M M D L, Bochet E, Monleón V, Espigares T, Nicolau J M, Molina M J, García-Fayos P. Aridity induces nonlinear effects of human disturbance on precipitation-use efficiency of Iberian woodlands. Ecosystems, 2018, 21(7): 1295-1305.
- [19] 王满堂, 卢宏典, 程栋梁, 郑媛, 钟全林, 郭炳桥, 马玉珠, 靳冰洁. 降水和气温对中国森林降水利用效率的影响. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 718-722.

- [20] 史晓亮, 张娜, 陈冲, 尚雨, 吴梦月. 淮河流域植被降水利用效率时空格局分析. 人民长江, 2019, 50(4): 124-129.
- [21] Zhang X K, Du X D, Zhu Z M. Effects of precipitation and temperature on precipitation use efficiency of alpine grassland in Northern Tibet, China. Scientific Reports, 2020, 10(1): 20309.
- [22] Zhang T Y, Yu G R, Chen Z, Hu Z M, Jiao C C, Yang M, Fu Z, Zhang W K, Han L, Fan M M, Zhang R Y, Sun Z Y, Gao Y N, Li W H. Patterns and controls of vegetation productivity and precipitation-use efficiency across Eurasian grasslands. Science of The Total Environment, 2020, 741: 140204.
- [23] 刘辉, 宋孝玉, 贾琰, 祝德名. 近 20 年内蒙古鄂托克旗草地降水利用效率时空演变的驱动力量化. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3253-3262.
- [24] 叶辉, 王军邦, 黄玫, 齐述华. 青藏高原植被降水利用效率的空间格局及其对降水和气温的响应. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1237-1247.
- [25] 张艳芳, 王姝. 黄土高原植被降水利用效率对植被恢复/退化的响应. 干旱区地理, 2017, 40(1): 138-146.
- [26] Sun J, Zhou T C, Du W P, Wei Y Q. Precipitation mediates the temporal dynamics of net primary productivity and precipitation use efficiency in China's northern and southern forests. Annals of Forest Science, 2019, 76: 1-12.
- [27] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 李晓宇, 李建龙. 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. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 226-234.
- [28] 王静, 姚顺波, 刘天军. 退耕还林(草)工程实施以来降水利用效率演变格局及归因——以宝鸡地区为例. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1233-1245.
- [29] Lai X F, Shen Y Y, Wang Z K, Ma J Y, Yang X L, Ma L S. Impact of precipitation variation on summer forage crop productivity and precipitation use efficiency in a semi-arid environment. European Journal of Agronomy, 2022, 141: 126616.
- [30] 孙维, 齐虎啸, 付刚. 藏北高寒草地植被降水利用效率对增温的响应. 草业科学, 2022, 39(6): 1069-1079.
- [31] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究. 生态学报, 2012, 32(11): 3404-3413.
- [32] Wang Y, Sun J, Liu M, Zeng T, Tsunekawa A, Mubarak A A, Zhou H K. Precipitation-use efficiency may explain net primary productivity allocation under different precipitation conditions across global grassland ecosystems. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: e00713.
- [33] Tao J, Zhang Y J, Zhu J T, Jiang Y B, Zhang X Z, Zhang T, Xi Y. Elevation-dependent temperature change in the Qinghai-Xizang Plateau grassland during the past decade. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(1): 61-71.
- [34] 刘扬, 王竹, 王芳. 青海湖流域气温降水特征分析. 水文, 2022, 42(5): 82-88.
- [35] 刘扬. 基于流域水循环的微生物驱动氮素迁移转化机理研究——以青海湖流域为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [36] 王琪, 吴成永, 陈克龙, 巴丁求英, 赵爽凯, 魏亚兰, 刘娟, 苏小艺, 张肖. 基于多光谱遥感图像的青海湖流域土壤有机质估算初探. 土壤, 2019, 51(1): 160-167.
- [37] 方健梅, 马国青, 余新晓, 贾国栋, 吴秀芹. 青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系. 水土保持学报, 2020, 34(3): 105-112.
- [38] 鲍文楷, 张研, 代李桦, 赵光政, 江康. 基于 LSM 的青海湖流域植被覆盖度时空变化分析. 湖北农业科学, 2018, 57(20): 44-48.
- [39] 张晶, 鄂崇毅, 许乃军, 吴成永, 张兆康. 青海湖流域气候变化对湖泊水位变化的影响. 青海环境, 2021, 31(2): 71-75, 81.
- [40] 张令振, 文霞, 祁小娟. 青海湖流域气候变化特征及其影响. 青海科技, 2019, 26(3): 84-91.
- [41] 苏芬, 刘宝康, 张翠花, 胡德奎. 气候变化对青海湖流域牧草产量的影响. 草学, 2019(3): 41-49.
- [42] 苏芬, 张翠花, 胡德奎. 青海湖流域气候变化及其对干旱的影响. 青海科技, 2018, 25(5): 68-74.
- [43] 李海焯, 李育, 张宇欣. 青藏高原东北部不同地理单元全新世湖泊演化与模拟. 兰州大学学报: 自然科学版, 2023, 59(2): 173-181, 189.
- [44] Cui B L, Li X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2015, 527/528: 26-37.
- [45] 潘虹, 顾海敏, 史建桥, 魏楚京. 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. 资源开发与市场, 2016, 32(7): 827-831, 768.
- [46] 孙永亮, 李小雁, 汤佳, 许何也. 青海湖流域气候变化及其水文效应. 资源科学, 2008, 30(3): 354-362.
- [47] 康利刚, 曹生奎, 曹广超, 严莉, 陈链璇, 李文斌, 赵浩然. 青海湖流域地表温度时空变化特征研究. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1084-1097.
- [48] 方健梅, 张家琦, 王贺年, 余新晓, 周金星. 青海湖主要入湖河流 57 年径流变化及其对气候变化的响应. 西部林业科学, 2022, 51(4): 19-25, 33.
- [49] 高黎明, 张乐乐. 青海湖流域植被覆盖度时空变化研究. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1318-1329.
- [50] 陈治荣, 侯元生, 陈克龙, 马元希, 王欣焯. 青海湖流域 31 样地植被监测数据集(2018)的组成. 全球变化数据学报: 中英文, 2022, 6

(1): 73-77, 232.

- [51] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, Pan Q M, Huang J H, Yang D L, Han X G. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau. *Ecology*, 2008, 89(8): 2140-2153.
- [52] 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—生态问题评估. HJ 1174—2021. 北京, 中国标准出版社, 2021-08-01.
- [53] 陈新明, 盘钰春, 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉. 西南地区植被覆盖度时空演变及其与气候和地形的相关性. *西南农业学报*, 2023, 36(6): 1307-1317.
- [54] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [55] Gang C C, Zhang Y, Guo L, Gao X R, Peng S Z, Chen M X, Wen Z M. Drought-Induced Carbon and Water Use Efficiency Responses in Dryland Vegetation of Northern China. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 224.
- [56] 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. 北京, 中国标准出版社, 2021-08-01.
- [57] Xu X, Niu S L, Sherry R A, Zhou X H, Zhou J Z, Luo Y Q. Interannual variability in responses of belowground net primary productivity (NPP) and NPP partitioning to long-term warming and clipping in a tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2012, 18(5): 1648-1656.
- [58] Liu R, Pan L P, Jenerette G D, Wang Q X, Cieraad E, Li Y. High efficiency in water use and carbon gain in a wet year for a desert halophyte community. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162/163: 127-135.
- [59] 黄勇, 邱旭敏, 黄国贵. 淮河流域表层土壤湿度时空特征及其与地面降水的关系. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 561-569.
- [60] 袁艺溶, 王继燕, 杨嘉葳, 熊俊楠. 基于植被指数的若尔盖高原湿地光合有效辐射吸收比例估算研究. *遥感技术与应用*, 2022, 37(5): 1267-1276.
- [61] Prince S D, Colstoun E B D, Kravitz L L. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 1998, 4(4): 359-374.
- [62] Yamori W, Hikosaka K, Way D A. Temperature response of photosynthesis in C-3, C-4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research*, 2014, 119(1): 101-117.
- [63] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, Knapp A K, Shaw M R, Loik M E, Smith S D, Tissue D T, Zak J C, Weltzin J F, Pockman W T, Sala O E, Haddad B M, Harte J, Koch G W, Schwinning S, Small E E, Williams D G. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 2004, 429(6992): 651-654.
- [64] Niu S L, Xing X R, Zhang Z, Xia J Y, Zhou X H, Song B, Li L H, Wan S Q. Water-use efficiency in response to climate change: from leaf to ecosystem in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1073-1082.
- [65] Konings A G, Williams A P, Gentile P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation. *Nature Geoscience*, 2017, 10(4): 284-288.
- [66] Change Intergovernmental Panel on Climate. *Climate Change 2021—The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [67] 韩艳莉, 于德永, 陈克龙, 杨海镇. 2000—2018 年青海湖流域气温和降水量变化趋势空间分布特征. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 999-1009.