

青海湖流域植被覆盖时空变化特征及驱动力分析

刘芙梅^{1,2,3}, 吴成永^{1,2,4}, 陈克龙^{2,3*}

(1. 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, 青海 西宁 810000; 2. 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, 青海 西宁 810000; 3. 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810000; 4. 天水师范学院资源与环境工程学院, 甘肃 天水 741001)

摘要:【目的】探索青海湖流域植被动态变化格局及其对气候变化和人类活动的响应。【方法】采用趋势分析、多元回归残差分析、偏相关分析等方法, 以MOD13Q1遥感数据和气象数据为基础, 分析2001—2019年流域植被覆盖时空变化特征及其驱动力。【结果】(1)2001—2019年青海湖流域植被覆盖度(FVC)增长率为2.1%/10 a, 呈显著波动上升趋势($P < 0.05$), FVC改善面积约为 $1.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的48.77%; (2)气候变化和人类活动对植被覆盖变化的贡献率分别为57.83%和41.52%; (3)降水和温度与FVC变化呈显著正相关的面积占比分别为7.93%和4.15%。【结论】近19 a年青海湖流域FVC整体改善显著, 显著改善区域主要分布于流域西部和青海湖北岸区域; 气候变化是流域FVC变化的主导因素, 但人类活动对局地FVC变化具有显著的抑制作用; 降水对流域FVC变化的影响力更高, 局地FVC变化对温度响应更强烈。

关键词: 植被覆盖度; 时空变化; 趋势分析; 残差分析; 偏相关分析

中图分类号: S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)01-0001-12

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2024.01.001



植被通过光合作用参与水、气、土壤物质、生物地球化学等循环, 促使自然地理圈层之间的物质和能量循环及信息传递^[1-3], 具有净化空气、水土保持、涵养水源和调节气候等众多生态功能及极其重要的“纽带”作用^[5-7]。植被对气候变化反应敏感, 植被与气候变化之间的动态耦合对陆地生态系统影响深远, 常被作为气候变化的重要“生物指示器”^[7-10]。植被覆盖度指植被垂直投影于地表的面积占统计区域总面积的百分比^[11-12], 可表征陆表植被覆盖情况, 通常作为定量描述气候变化对植被影响的重要植被特征参数^[13]。

因此, 在区域生态环境变化研究中对植被覆盖的动态变化及驱动因子进行监测和分析具有重要意义。植被覆盖度的测量方法一般分为遥感监测法和地面调查法, 地面调查法野外操作不便、人工成本高、难以大范围获取数据。而遥感反演监测法具有高时空分辨率等优点, 被越来越多的学者应用在植被覆盖度的监测中^[14-17]。植被覆盖度遥感监测反演方法大致可分为回归分析法、基于像元尺度分解法和机器学习方法3类^[18-19], 其中像元二分模型的应用较为广泛。

目前国内外越来越多的学者将像元二分模型、趋势分析、多元回归残差分析、偏相关分析等方法应用于植被覆盖度动态变化遥感监测及其驱动力分析中。例如 Gutman 等^[20]基于 NOAA/AVHRR 数据采用像元二分模型计算植被覆盖度并应用于数值天气预报模型。高鹏文等^[21]利用像元二分模型等方法探究哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力, 结果表明哈密绿洲植被覆盖的变化情况人为因素高于自然因素。田智慧等^[22]基于 NDVI 数据采用残差分析等方法研究

收稿日期: 2022-12-15; **修回日期:** 2023-03-02

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019 QZKK0405); 青海省科技计划项目(2022-QY-204); 青海省创新平台建设专项青海省自然地理与环境过程重点实验室(2020-ZJ-Y06)

作者简介: 刘芙梅(1996-), 女, 青海祁连人, 硕士研究生。

E-mail: lfm3445@qq.com

*通信作者。E-mail: ckl7813@163.com

了黄河流域植被时空演化及驱动机制,结果表明降水对植被的影响高于气温,人类活动对植被变化贡献率高于气候变化的贡献率。陶帅等^[23]基于MODIS NDVI数据分析长江上游NDVI时空变化及驱动力,结果表明自然环境因素与人类活动共同作用对宜宾市NDVI影响更加显著。综上所述,研究显示气候变化和人类活动因素对植被覆盖变化有着一定的影响。

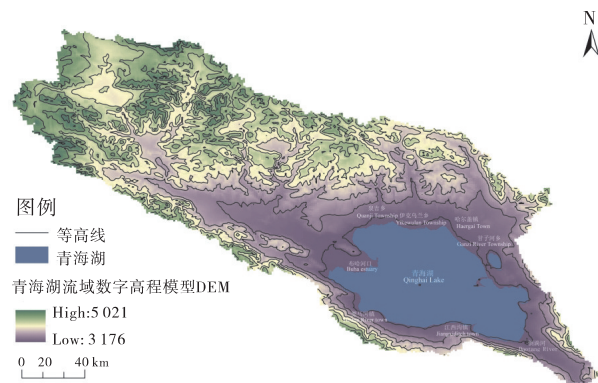
青藏高原是我国重要的生态屏障区和气候变化的敏感区^[24-25],对全球气候变化具有驱动和放大的作用^[26-28]。而地处青藏高原东北部的青海湖流域,不仅是维系青藏高原东北部生态安全的重要屏障,同时也是青海省高寒草地生态系统分布最广泛的区域,其地理位置具有一定的特殊性、重要性和敏感性^[29]。目前对青海湖流域的研究主要集中于增温对青海湖流域高寒草甸温室气通量的影响、景观格局变化、生态补偿机制、温度降水趋势分析等方面^[30-31],而定量分析气候变化和人类活动对流域植被覆盖时空变化特征的影响及贡献率方面的研究较欠缺,因此分析流域植被覆盖度变化、分异原因及驱动力对流域环境保护和经济社会发展具有重要的现实意义

为了更好地了解青海湖流域植被覆盖时空变化特征及气候变化和人类活动对青海湖流域植被覆盖变化的贡献率,本研究选取青海湖流域MOD13Q1遥感数据和高分辨率气象数据,采用像元二分模型、变化趋势分析、多元回归残差分析、偏相关分析等方法分析青海湖流域植被覆盖度的时空变化特征及气候变化和人类活动的贡献率,以期在气候变化背景下青海湖流域生态环境保护、青海湖国家公园建设和经济社会协同发展提供科学理论基础。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青藏高原东北部,北部大通山,南部青海南山、西部野牛脊山、东部日月山围绕在青海湖四周,形成一个完整的封闭型高原内陆盆地^[34]。流域内有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、黑马河、倒淌河等多条河流。流域主要植被类型为高寒灌丛、温性和高寒草原、高寒和沼泽草甸等,主要土壤类型有高山草甸土、草原土、寒漠土、沼泽土、风沙土等^[35]。



审图号: 青S(2022)073号

图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据来源及处理

遥感数据:MOD13Q1数据集提供了NDVI植被指数产品,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d。本研究从美国国家航天局NASA官网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)获取了研究区2001—2019年MOD13Q1,通过MODIS Reprojection Tool进行投影和拼接镶嵌处理。为消除太阳高度角、大气效应等因素的影响,利用最大值合成法(maximum value composites, MVC)获得年NDVI^[36],用于计算年植被覆盖度。

气象数据:2001—2017年的降水量与气温数据,数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn>),运用ArcGIS 10软件平台对气象数据进行重采样,获得250 m分辨率降水和气温栅格数据。

1.3 植被覆盖度计算及变化趋势

1.3.1 植被覆盖度计算 采用像元二分模型植被覆盖度:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

式中:FVC为植被覆盖度值,NDVI为归一化植被指数,NDVI_{min}为无植被覆盖的像元的NDVI的值,NDVI_{max}为完全植被覆盖像元的NDVI的值,提取置信度为2%对应的NDVI值为NDVI_{min},提取置信度为98%对应的NDVI值为NDVI_{max}。

1.3.2 植被覆盖变化趋势 采用一元线性回归方法计算每个像元的植被覆盖度变化趋势,其线性斜率K为:

$$K = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times F_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n F_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

式中: n 为植被覆盖度数据研究时间段。 F_i 为年份 i 的植被覆盖度; K 为斜率, $K > 0$ 表示植被覆盖度增加, $K < 0$ 则表示植被覆盖减小。

1.3.3 植被覆盖退化 采用植被覆盖度变化百分率 F 来衡量植被退化状况^[37]。

$$F = (FVC_{\text{yearn}} - FVC_{\text{yearn}}) / FVC_{\text{yearn}}$$

式中: FVC_{yearn} 和 FVC_{yearn} 为 2 个年份的植被覆盖度, 参照《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》^[18], 将植被覆盖度降低水平分成 5 个等级 (表 1)。

表 1 青海湖流域植被覆盖度变化百分率分级指标

Table 1 Classification index of percentage change of vegetation coverage in Qinghai Lake Basin

植被盖度级别	植被盖度变化率/%
显著改善	(10,)
基本不变	(-10,10]
轻度退化	(-20,-10]
中度退化	(-30,-20]
重度退化	(,-30]

1.4 气候变化和人类活动对 FVC 的影响及贡献率的量化方法

1.4.1 残差分析 采用多元回归残差分析法探究人类活动和气候变化对 FVC 变化的影响及相对贡献。以 FVC 为因变量, 气温、降水量为自变量构建二元一

次线性回归预测模型, 得到气候变化影响下的 FVC 预测值 (FVC_{cc})。FVC 真实值为基于遥感影像 NDVI 观测值计算的植被覆盖度值, 减去 FVC_{cc} , 就得到残差 (FVC_{ϵ})。计算公式如下:

$$FVC_{cc} = a \times T + b \times P + c$$

$$FVC_{\epsilon} = FVC - FVC_{cc}$$

式中: a 、 b 和 c 为模型回归系数; T 、 P 分别指气温和降水量, 单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 和 mm 。

1.4.2 气候变化和人类活动对植被覆盖的影响分级 将 FVC_{cc} 变化趋势率和 FVC_{ϵ} 变化趋势率的影响值分为 7 个等级 (表 2)。

表 2 气候变化和人类活动对植被覆盖的影响分级 ($10^{-3}/\text{a}$)

Table 2 Image classification of vegetation restoration by climate change and human activities ($10^{-3}/\text{a}$)

$K(FVC)_i$	影响程度
(, -2.0)	重度抑制
[-2.0, -1.0)	中度抑制
[-1.0, -0.2)	轻度抑制
[-0.2, 0.2)	基本无影响
[0.2, 1.0)	轻度促进
[1.0, 2.0)	中度促进
[2.0,)	重度促进

注: i 为在气候变化或人类活动影响下的生长季 FVC 变化趋势, 即 $K(FVC_{cc})$ 或 $K(FVC_{\epsilon})$ 。

1.4.3 植被覆盖变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法 对青海湖流域生长季 FVC 变化的主要驱动因素进行区分, 并计算了气候变化和人类活动对 FVC 年际变化的相对贡献率 (表 3)。

表 3 植被覆盖变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法

Table 3 Determination criteria and contribution rate calculation method of driving factors of vegetation cover change

$K(FVC)_a$	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率	
		$K(FVC_{cc})_b$	$K(FVC_{\epsilon})_c$	气候变化	人类活动
> 0	CC & HA	> 0	> 0	$K(FVC_{cc})/K(FVC)$	$K(FVC_{\epsilon})/K(FVC)$
	CC	> 0	< 0	100	0
	HA	< 0	> 0	0	100
< 0	CC & HA	< 0	< 0	$K(FVC_{cc})/K(FVC)$	$K(FVC_{\epsilon})/K(FVC)$
	CC	< 0	> 0	100	0
	HA	> 0	< 0	0	100

注: 表中 a 、 b 和 c 分别指基于遥感数据计算出的 FVC 趋势率、基于二元回归分析的生长季 FVC 预测值的趋势率以及生长季 FVC 残差的趋势率。其中, b 和 c 分别用于表示在气候变化和人类活动影响下的生长季 FVC 变化趋势, CC 和 HA 分别代表气候变化和人类活动。

1.4.4 温度、降水与 FVC 的相关性分析 采用偏相关系数作为定量化指标来探究 FVC 与气温和降水要

素的相关关系。在多要素地理中通常用偏相关来表示两要素之间的相关程度, 此时可以忽略其他要素的

影响^[39-42],首先计算相关系数,公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}}$$

式中: R_{xy} 表示 x 和 y 两个要素的相关系数,其值为 $[-1, 1]$, $R < 0$ 表示负相关, $R > 0$ 表示正相关;相关系数越大,该像元处两要素之间相关性越强; n 表示研究的总年数; x_i 与 y_i 分别表示 x 、 y 两变量第 i 年的值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别代表2个要素 n 年平均值。

偏相关系数:

$$R_{xy|z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}}$$

式中: $R_{xy|z}$ 为自变量 z 固定后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数。其中, R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别表示变量 x 与变量 y 、变量 x 与变量 z 和变量 y 与变量 z 的相关系数。

通过 t 检验方法完成偏相关系数的显著性检验,计算公式如下:

$$t = \frac{R_{xy|z}}{\sqrt{1 - R_{xy|z}^2}} \sqrt{n - m - 1}$$

式中: n 为研究年数, m 为自变量个数。

1.4.5 降水和气温与植被覆盖度偏相关系数显著性分级 按照 P 值及相关系数 R 值大小进行显著性检验分级显示(表4)。

表4 降水和气温与植被覆盖度偏相关系数显著性分级

Table 4 Precipitation and temperature and vegetation coverage partial correlation coefficient significant classification

显著性分级	判定标准
正相关	$R > 0$
显著正相关	$P < 0.05, R > 0$
不显著正相关	$P > 0.05, R > 0$
负相关	$R < 0$
显著负相关	$P < 0.05, R < 0$
不显著负相关	$P > 0.05, R < 0$

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度时空变化特征

2.1.1 时间变化特征 2001—2019年青海湖流域年被覆盖度总体呈现出波动上升的趋势,且上升趋势显著(图2)。平均植被盖度最低是2001年为50.98%,最高是2018年,为59.54%。

2005—2008年植被覆盖度持续下降,19 a年平均植被覆盖度最低值是2001年的50.98%,最高值是2018年的59.54%。

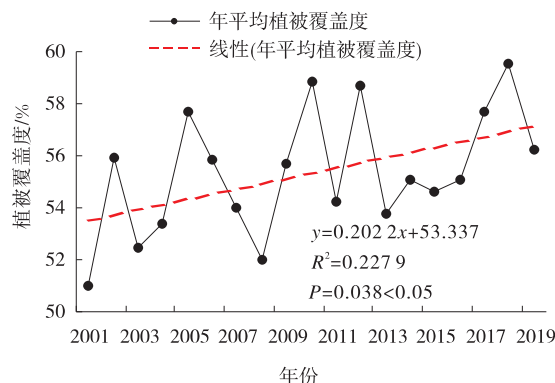


图2 2001—2019年青海湖流域植被覆盖变化趋势

Fig. 2 Change trend of vegetation cover in Qinghai Lake Basin from 2001 to 2019

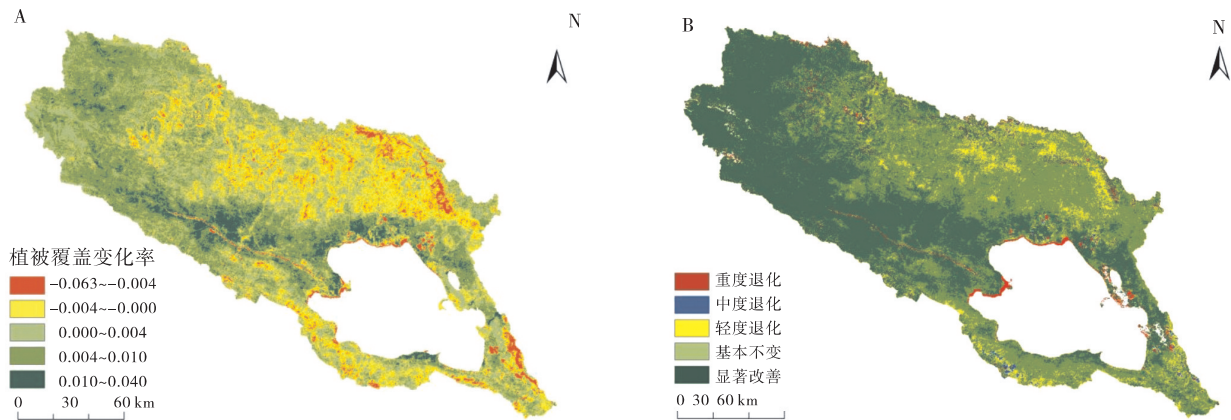
2.1.2 空间变化特征 青海湖流域2001—2019年的逐像元植被覆盖变化率(图3-A)可以看出流域西南部呈明显增大趋势,流域的北部和东部地区呈减小趋势。由统计数据可得,2001—2019年青海湖流域植被覆盖变化率的平均值为2.1%/10 a,说明近19 a流域植被覆盖度整体表现为增长的趋势。

为分析青海湖流域近19 a植被覆盖度时空动态变化过程,本文计算并分级显示了植被覆盖度变化百分率指标(图3-B)。2007—2019年,青海湖流域大部分地区植被覆盖变化显著改善,整个流域总体改善面积达到 $1.21 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占植被覆盖区总面积的48.77%,其中植被改善最为明显的区域主要分布在流域的西部和青海湖北岸。此外部分地区植被覆盖发生退化,其中重度退化、中度退化和轻度退化面积分别达到386.81、371.38和1689.75 km^2 ,分别占流域总面积的1.56%、1.49%和6.78%,主要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。

综上所述,2001—2019年青海湖流域植被覆盖变化显著增加趋势,青海湖流域近19 a整体植被恢复效果较明显。从空间分布来看,流域西北部易产生退化,该地区海拔较高,生态环境比较敏感,同时也是布哈河水源地,是青海湖入水量最大的一条支流。

2.2 植被覆盖时空变化的驱动力分析

2.2.1 气候变化和人类活动对FVC变化的影响 气候变化和人类活动共同作用是青海湖流域植被覆盖



审图号：青S(2022)073号

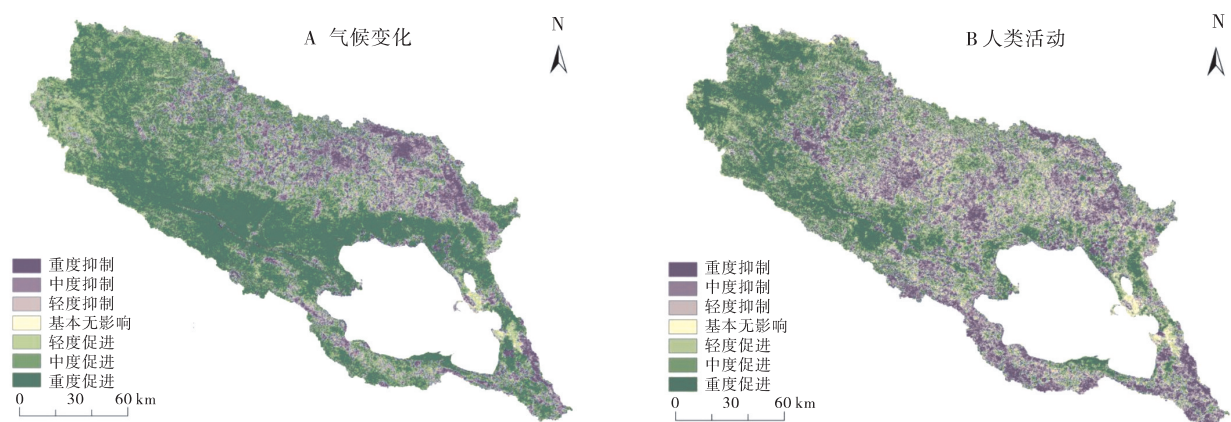
图 3 青海湖流域 2001~2019 年植被覆盖变化率和植被覆盖变化空间格局

Fig. 3 Vegetation cover change rate and spatial pattern of Qinghai Lake Basin from 2001 to 2019

度发生变化的主要驱动力,为了更准确地分析气候变化和人类活动对植被年际变化的影响,本研究计算出 2001—2017 年逐像元 FVC_{cc} 和 FVC_c ,并计算出二者的线性趋势率分析气候变化和人类活动对植被覆盖变化的影响,趋势率值为正则表示该因素对 FVC 变化具有促进作用,若值为负则表示该因素对 FVC 变化具有抑制作用^[39-40]。

气候变化和人类活动对青海湖流域 FVC 变化的影响具有较大的空间异质性,就同一地区(如青海湖南岸)两种因素对植被覆盖度变化有很大差异(图 4)。约 58.63% 的区域显示气候变化对生长季 FVC 的增加起促进作用,其中显著促进作用的区域面积约占

35.04%,主要分布于流域中部,少量分布于流域西北部、环湖北岸的甘子河乡、哈尔盖镇、伊克乌兰乡、泉吉乡等区域;约占 23.59% 的区域显示轻度和中度促进作用,主要分布于流域西北部和环湖南岸黑马河镇地区及环湖东岸沙岛地区,约 20.07% 的区域显示气候变化对生长季 FVC 的变化基本无影响。相反,气候变化对生长季 FVC 的增加起抑制作用的区域面积约占 21.3%,其中起中度和重度抑制作用的区域面积占比约 13.46%,主要分布于流域的北部地区,零星分布于环湖周边地区,其中以环湖南岸黑马河镇地区、环湖东岸倒淌河东南部及环湖东岸沙岛地区分布较明显(图 4-A,表 5)。



审图号：青S(2022)073号

图 4 气候变化和人类活动对青海湖流域植被恢复的影响

Fig. 4 Impact of climate change and human activities on vegetation restoration in Qinghai Lake Basin

人类活动对生长季 FVC 恢复起促进作用的区域面积约占 44.34%(图 4-B,表 5)。其中重度促进占比 19.10%,主要分布于流域的西北部地区、环湖西岸布

哈河入湖口、措琼湿地(哈达滩)、泉吉河入湖口地区、哈尔盖河入湖口地区、环湖南岸江西沟镇等地,原因是该地区较多为入湖口地区,湿地分布增多,部分地

表5 气候变化和人类活动对青海湖流域植被恢复的影响面积占比统计
Table 5 Proportion of areas affected by climate change and human activities on vegetation restoration in Qinghai Lake Basin

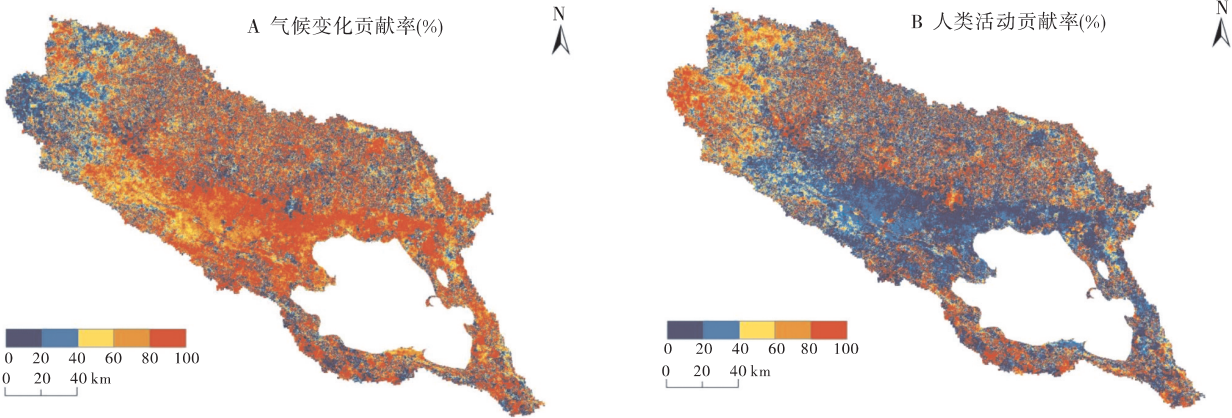
对植被恢复的影响	像元占比/%						
	重度抑制	中度抑制	轻度抑制	基本无影响	轻度促进	中度促进	重度促进
气候变化	6.81	6.65	7.84	20.07	10.91	12.68	35.04
人类活动	9.84	11.09	12.56	22.17	12.88	12.36	19.10

区实施(如江西沟等)建立自然保护区、禁止放牧等一系列对植被覆盖变化具有促进作用的人类活动。人类活动对生长季FVC增加起抑制作用的区域面积约占33.49%,其中重度抑制占比达到9.84%,主要分布于流域的中部、西南部、环湖南岸黑马河地区、环湖东岸下谢麻地区、种羊场等地区。综合而言,人类活动对生长季FVC增加起促进作用的区域面积占比更小(约为14.29%),气候变化是流域植被覆盖度变化的主导因素。

2.2.2 气候变化和人类活动对FVC变化的贡献率
气候变化和人类活动对青海湖流域植被覆盖变化的贡献率具有较强的差异性。就气候变化对FVC年际变化的贡献而言,平均贡献率达到57.83%(表6),贡献率大于60%的区域贡献率平均值为86.74%,约占总面积的51.44%,贡献率大于80%的区域面积约占总面积的33.52%,主要分布在流域的中部以及环青海湖北岸地区包括(布哈河、甘子河、沙柳河、泉吉河等河流入湖口地区),气候变化贡献率介于0~60%的

区域贡献率平均值为12.40%,约占总面积的48.56%;其中贡献率为0~20%的区域约占总面积的20.33%,主要区域分布于流域的西北部及环湖南岸地区(图5-A)。

就人类活动对FVC变化的贡献率而言,平均贡献率达到41.52%,贡献率大于60%的区域贡献率平均值为87.37%,占总面积的29.92%(表6);其中人类活动贡献率大于80%的区域面积约占总面积的19.45%,主要分布于流域北部、西北部以及环湖南部,其中黑马河、江西沟普氏原羚保护区分布面积较集中。人类活动贡献率介于0~60%的区域贡献率平均值为17.5%,占总面积的70.08%,其中人类活动的贡献率为0~20%范围的区域占总面积的35.12%。主要分布于流域中部和北部,中部为大面积片状分布明显,而北部则呈现分散分布,无明显特征,值得注意的是青海湖北岸农业种植区及农牧区人类贡献率为0~20%的分布较为集中(图5-B)。



审图号: 青S(2022)073号

图5 气候变化和人类活动对青海湖流域植被覆盖变化的贡献率空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of contribution rate of climate change and human activities to vegetation cover change in Qinghai Lake Basin

表 6 气候变化和人类活动对青海湖流域植被覆盖变化的贡献率像元占比统计

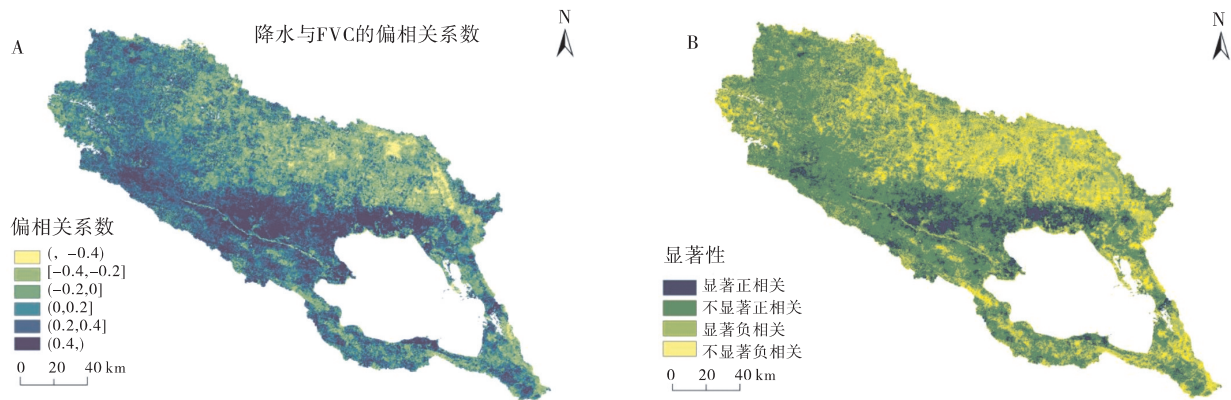
Table6 Pixel proportion statistics of contribution rate of climate change and human activities to vegetation cover change in Qinghai Lake Basin

贡献率/%	像元占比/%				
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
气候变化	20.23	11.07	17.26	17.92	33.52
人类活动	35.12	18.22	16.74	10.47	19.45

2.2.3 降水和气温对FVC变化影响 青海湖流域FVC年际变化与降水和温度的平均偏相关系数为0.105 6和0.096 8,降水因子的平均偏相关系数略高于温度因子的平均偏相关系数,降水对FVC的影响大于气温(图6-A)。

就降水而言,整个研究区内FVC变化与降水因子的偏相关系数为-0.91~0.91,降水与FVC呈正相关的区域占总面积的65.56%,其中有7.93%通过显著

性检验($P<0.05$),主要分布于流域的中南部地区、环湖北岸地区,部分零星分布于环湖南岸的沙岛、江西沟等地区(图6-B),原因可能是该地区沙地荒漠分布广泛,土壤类型主要为壤质沙土,海拔较低,气温较高,降水增加有利于该地植被生长发育;降水与FVC变化呈负相关的面积占总面积的33.44%,其中只有2.41%通过了显著性检验($P<0.05$),主要分布在青海湖流域的北部和东北部分地区,少量分布于流域南部。



审图号: 青S(2022)073号

图 6 青海湖流域降水与植被盖度偏相关系数极显著性检验

Fig. 6 Extreme significance test of partial correlation coefficient between precipitation and vegetation coverage in Qinghai Lake Basin

就温度而言,青海湖流域植被覆盖度变化与温度因子的偏相关系数范围为-0.83~0.94(图7-A),温度与FVC呈正相关的区域占总面积的66.06%,其中有4.15%通过了显著性检验($P<0.05$),主要分布于流域的西北部、中部,少量分布在及哈尔盖镇地区,该地区海拔较高,常年低温,气温升高有利于植被生长;

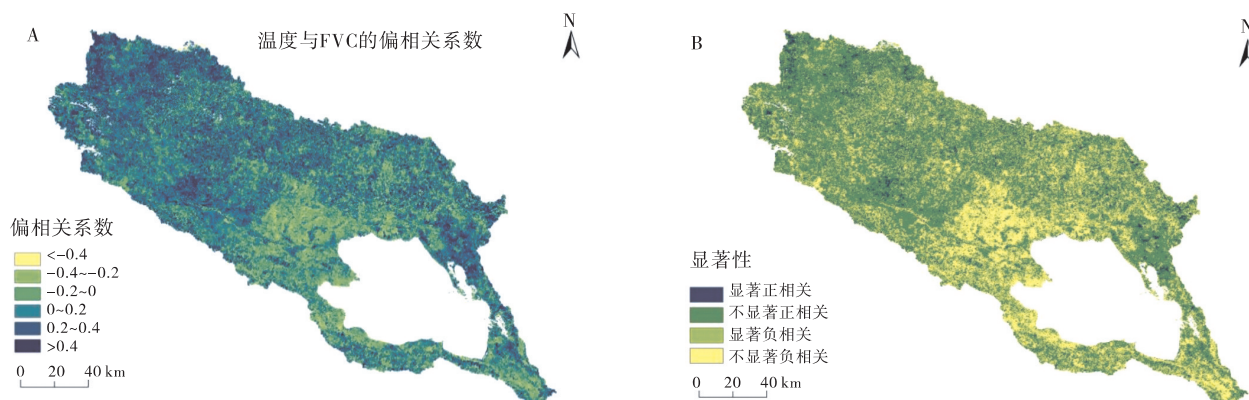
温度与FVC呈负相关的区域占总面积的33.94%,其中仅0.65%通过了显著性检验($P<0.05$),主要分布在流域的中部、南部地区,零星分布于北部地区(图7-B)。

总之,青海湖流域植被覆盖时空变化同时受降水和温度协同影响,青海湖流域不同空间区域植被覆盖

表 7 青海湖流域降水、气温与植被覆盖度偏相关系数及其显著性面积占比统计

Table 7 Partial correlation coefficient of precipitation, temperature and vegetation coverage in Qinghai Lake Basin and its significant area proportion statistics

气候因子	偏相关系数范围	偏相关系数均值	像元占比/%					
			正相关	显著正相关	不显著正相关	负相关	显著负相关	不显著负相关
降水	-0.91~0.91	0.105 6	65.56	7.93	57.63	34.44	2.41	32.03
气温	-0.83~0.94	0.096 8	66.06	4.15	61.91	33.94	0.65	33.29



审图号：青S(2022)073号

图7 青海湖流域温度与植被盖度偏相关系数极显著性检验

Fig. 7 Extreme significance test of partial correlation coefficient between air temperature and vegetation coverage in Qinghai Lake Basin

变化对降水和温度的响应有显著的空间分布差异性。局部地区(海拔较高的西北部、中部等地区)植被变化对温度的响应更强烈,但就整个流域而言,青海湖流域植被覆盖年际变化与降水的相关性更高,降水因子是青海湖流域植被覆盖时空变化的主要驱动力。

3 讨论

本研究表明,2001—2019年青海湖流域植被覆盖变化整体呈显著增加趋势,但存在明显的空间异质性。本研究结果与前人在青海湖流域的研究结果一致,陈昀琳^[43]、方建梅等^[44]研究发现近年来,青海湖流域植被NDVI均呈现出上升的趋势。主要原因可能有以下几个方面:一是流域内气温和降水显著增加,呈现暖湿化的趋势^[45],水热条件显著变好有利于植被生长发育,研究表明青藏高原气候暖湿化对高原植被覆盖产生了正面影响,干旱半干旱区植被NDVI主要受降水的影响,而湿润区对气温的影响更明显^[46]。二是近几十年青藏高原温度上升导致冰冻圈消融引起土壤含水量上升,促进植被生长动态发生快速变化^[47]。

人类活动对植被生长状况产生两种不同的影响:一方面是城市扩张等土地利用不合理、草原过度放牧等造成植被生态环境的破坏^[48-49];另一方面,人类在气候变化的大背景下,实施了大量的生态保护工程措施,如退耕还林、封山育林、禁牧等,对地表植被恢复具有积极的作用^[50-51]。本研究结果显示,2001—2019年青海湖流域植被覆盖大部分区域呈现显著改善格局,主要分布在流域的西部和青海湖北岸,而部分地

区呈现显著退化的趋势,主要分布在流域的北部和环青海湖西北部和东北部的沿岸地区,该结果与高黎明等^[37]研究结果基本一致。改善的主要原因除了气候变化外,还有可能是流域内实施的退耕还林、退耕还草、禁牧等一系列生态补偿政策和工程对流域内植被覆盖的变化带来了较好的改善作用^[52]。鲍文楷等^[53]研究发现2008—2016年青海湖流域植被覆盖表现出明显增加趋势,主导原因是2008年启动了青海湖流域综合治理项目。而显著退化主要分布在环青海湖西北部和东北部的沿岸地区可能与青海湖水体面积不断增长产生大量淹没区有关,研究表明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,沙区植被覆盖偏低淹没区易产生植被退化^[54]。

本研究发现,青海湖流域植被覆盖时空变化受降水和温度共同影响,覆盖度变化与降水量的相关性更高,表明青海湖流域植被覆盖变化主要受降水驱动。该结果进一步验证了前人在青藏高原和青海湖流域的相关研究结果,不同空间区域对植被对降雨量和温度的响应有显著的空间分布差异,丁佳等^[55]研究发现近35年青藏高原植被覆盖整体趋于好转,植被NDVI变化与年平均降水和气温量呈正相关,植被覆盖变化对降水变化的敏感更高。马昊翔等^[56]、潘虹等^[57]研究发现青海湖流域NDVI与降雨量的相关性远大于其与温度的相关性。

青藏高原植被覆盖变化的主要驱动力是气候变化和人类活动共同作用^[58],总体来说,复杂的气候变

化和人类活动等因素协同作用是青海湖流域植被覆盖变化的主要驱动力,青海湖流域植被覆盖的增加离不开整个青藏高原气候暖湿化的原因,同时也得益于流域内实行的各项生态治理工程比如建立自然保护区、禁牧区、实施退耕还林等正向影响的人类活动。应该高度警惕水源地区生态保护。青海湖东岸植被覆盖较为稀疏退化较明显,该地区为典型荒漠区域,应考虑未来生态恢复工程面向该区域重点实施,此外近年来青海湖湖水面积持续上涨,湖周围淹没区持续扩大,导致湖水周围草地面积持续缩小,应考虑牧民草场补贴生态保护政策的调整。最后,本研究仅分析了气候变化和人类活动对植被覆盖度变化的影响,未将植被类型、海拔、土壤湿度、土壤类型等自然地理环境等因素纳入研究范围,在以后的研究中将结合更长时间序列数据及更多的相关材料进一步探究青海湖流域不同高程等级、不同植被类型、不同土壤湿度的植被覆盖度变化。

4 结论

基于 MODIS NDVI 数据 MOD13Q1 和气象数据,采用趋势分析、偏相关分析、多元回归分析及残差分析等方法,本文对 2001—2019 年青海湖流域植被覆盖度的时空变化特征、驱动因素及相应贡献进行了多尺度分析。主要结论如下:

(1) 近 19 a 青海湖流域的植被覆盖度总体呈显著波动上升的趋势,2001—2019 年年平均植被覆盖度为 50.98%~59.54%,逐像元植被覆盖变化率的平均值为 2.1%/10 a。从空间分布来看流域植被覆盖整体改善显著,总体改善面积达到 $1.21 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占总面积的 48.77%,显著改善主要分布于流域的西部和青海湖北岸。

(2) 气候变化和人类活动共同作用成为青海湖流域植被覆盖度变化呈现增大趋势和空间异质性的主要驱动力,气候变化和人类活动对青海湖流域植被覆盖变化的平均贡献率分别是 57.83% 和 41.52%。气候变化是流域植被覆盖度变化的主导因素,其中气候变化贡献率大于 80% 的区域约占总面积的 33.52%,而人类活动贡献率大于 80% 的区域约占总面积的 19.45%,主要集中在流域的西北部和南部,人类活动对流域植被变化的作用也不可忽视。

(3) 降水和气温共同影响青海湖流域植被覆盖度时空变化,相较而言,整个流域植被覆盖变化与降水的相关性更高,通过显著性检验 ($P < 0.05$) 的正相关面积达到了 7.93%,主要分布于流域的中南部、环青海湖北岸、南岸等地区,但局部地区(海拔较高的西北部、中部等地区)植被变化对温度的响应更强烈。

参考文献:

- [1] 陈效述,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84—94.
- [2] 沈斌,房世波,余卫国. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异[J]. 遥感学报,2016,20(3):481—490.
- [3] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 生态学报,2019,39(5):1583—1594.
- [4] Wang Q, Zhang Q P, Zhou W. Grassland Coverage Changes and Analysis of the Driving Forces in Maqu County[J]. Physics Procedia,2010,33(1):1292—1297.
- [5] Kong D, Zhang Q, Singh V P, *et al.* Seasonal vegetation response to climate change in the northern hemisphere (1982—2013)[J]. Global & Planetary Change,2017,148(1):1—8.
- [6] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系—基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报,1998,1(3):204—210.
- [7] 杨元合,朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报,2006,1(1):1—8.
- [8] Wang J, Meng J J, Cai Y L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series[J]. Environmental Geology,2008,54(6):1185—1195.
- [9] Keeling C D, China J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements[J]. Nature,1996,382(6587):146—149.
- [10] Piao S. Effect of climate and CO₂ changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades[J]. Geophysical Research Letters,2006,33(1):1—6.
- [11] Gitelson A A, aufman Y J, Stark R, *et al.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote Sensing of Environment,2002,80(1):76—87.
- [12] 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进

- 展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774—782.
- [13] 赵燕红, 侯鹏, 蒋金豹, 等. 植被生态遥感参数定量反演研究方法进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(11): 2173—2197.
- [14] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849—858.
- [15] 苗正红, 刘志明, 王宗明, 等. 基于MODIS NDVI的吉林省植被覆盖度动态遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(3): 387—393.
- [16] 吴昌广, 周志翔, 肖文发, 等. 基于MODIS NDVI的三峡库区植被覆盖度动态监测[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 22—28.
- [17] 吴云, 曾源, 吴炳方, 等. 基于MODIS数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1712—1718.
- [18] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618—671.
- [19] 王君, 杨晓梅, 隋立春, 等. 西安市1995—2016年植被覆盖度动态变化监测及景观格局分析[J]. 生态科学, 2019, 38(6): 81—91.
- [20] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533—1543.
- [21] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 赵永玉, 等. 1988—2018年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 273—280+287.
- [22] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000—2020年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 743—751.
- [23] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000—2015年长江上游NDVI时空变化及驱动力—以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5029—5043.
- [24] 王春燕, 杨冲, 宋成刚, 等. 三江源区高寒草地根系—土壤C、N、P生态化学计量特征[J]. 草原与草坪, 2022, 42(5): 8—20.
- [25] 崔茜琳, 何云玲, 李宗善. 青藏高原植被水分利用效率时空变化及与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1525—1532.
- [26] 满文婧, 徐元进. 基于NPP与EVI的三江源生态状况评估[J]. 草原与草坪, 2021, 41(5): 1—8.
- [27] 刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 897—908.
- [28] 韩炳宏, 周秉荣, 颜玉倩, 等. 2000—2018年间青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1651—1658.
- [29] 李广泳, 李小雁, 赵国琴, 等. 青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 3038—3047.
- [30] 吴恒飞, 陈克龙, 张乐乐, 等. 增温对青海湖流域高寒沼泽草甸主要温室气体通量的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(4): 1—9.
- [31] 陈克龙, 李双成, 周巧富, 等. 近25年来青海湖流域景观结构动态变化及其对生态系统服务功能的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(2): 274—280.
- [32] 宋晓谕, 徐中民, 祁元, 等. 青海湖流域生态补偿空间选择与补偿标准研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 496—503.
- [33] 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.
- [34] 方健梅, 蒋丽伟, 余新晓, 等. 青海湖流域潜在蒸散发的气候敏感性及其归因分析[J]. 湖南林业科技, 2022, 49(5): 13—20.
- [35] 陈桂琛, 彭敏. 青海湖地区植被及其分布规律[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(1): 73—83.
- [36] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 青藏高原植被生长季NDVI时空变化与影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1361—1372.
- [37] 高黎明, 张乐乐. 青海湖流域植被盖度时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1318—1329.
- [38] 中华人民共和国农业部. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标: GB 19377—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [39] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992年中国陆地NDVI变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716—720.
- [40] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961—974.
- [41] Sun W, Song X, Mu X, *et al.* Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2015, 209(1): 87—99.
- [42] 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区NDVI变化及其与

- 温度和降水的关系[J]. 遥感学报, 2005, 6(3): 308—313.
- [43] 陈昀琳. 基于 Landsat 和 MODIS NDVI 时序数据的青海湖流域植被覆盖度提取及其变化分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [44] 方健梅, 马国青, 余新晓, 等. 青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 105—112.
- [45] 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.
- [46] 曹晓云, 周秉荣, 周华坤, 等. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展[J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 1068—1080.
- [47] 杨亮, 刘丽男, 孙少波. 1982—2015 年青藏高原植被变化的主导环境因子[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 1—12.
- [48] Chi D, Wang H, Li X, *et al.* Assessing the effects of grazing on variations of vegetation NPP in the Xilingol Grassland, China, using a grazing pressure index[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88(5): 372—383.
- [49] 杜凯, 康宇坤, 张德罡, 等. 放牧模式对祁连山东缘高寒草甸植被特征的影响[J]. 草原与草坪, 2021, 41(3): 9—18+25.
- [50] 李玉辰, 李宗省, 张小平, 等. 祁连山国家公园植被时空变化及其对人类活动的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 219—233.
- [51] 李焱, 巩杰, 戴睿, 等. 藏西南高原植被覆盖时空变化及其与气候因素和人类活动的关系[J]. 地理科学, 2022, 42(5): 761—771.
- [52] 刘凤, 曾永年. 近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1528—1540.
- [53] 鲍文楷, 张研, 代李彝, 等. 基于 LSMM 的青海湖流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(20): 44—48.
- [54] 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.
- [55] 丁佳, 刘星雨, 郭玉超, 等. 1980—2015 年青藏高原植被变化研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 288—296.
- [56] 马昊翔, 陈长成, 宋英强, 等. 青海省近 10 年草地植被覆盖动态变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 137—145.
- [57] 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.
- [58] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报, 2013, 31(2): 234—242.

Spatio-temporal variation characteristics of vegetation coverage and its driving forces in Qinghai Lake Basin

LIU Fu-mei^{1,2,3}, WU Cheng-yong^{1,2,4}, CHEN Ke-long^{2,3*}

(1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810000, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810000, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810000, China; 4. School of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

Abstract: [Objective] The study was carried out to explore the dynamic change pattern of vegetation in Qinghai Lake Basin and its response to climate change and human activities. [Method] Based on MOD13Q1 remote sensing data and meteorological data, this paper analyzed the spatial and temporal variation characteristics and driving forces

of vegetation coverage in the basin from 2001 to 2019 by means of trend analysis, multiple regression residual analysis and partial correlation analysis. 【Result】 The results showed that: (1) The growth rate of fractional vegetation cover (FVC) in Qinghai Lake Basin from 2001 to 2019 was $2.1\%/10\text{ a}$, showing a significant upward trend ($P < 0.05$). The improved area of FVC was about $1.21 \times 10^4\text{ km}^2$, accounting for 48.77% of the total area. (2) The contribution rates of climate change and human activities to vegetation cover change were 57.83% and 41.52%, respectively. (3) The area ratios of precipitation and temperature significantly positively correlated with FVC changes were 7.93% and 4.15%, respectively. 【Conclusion】 The analysis shows that the overall improvement of FVC in the Qinghai Lake Basin in the past 19 a is significant, and the significant improvement areas are mainly distributed in the western part of the basin and the northern bank of Qinghai Lake. Climate change is the dominant factor of FVC change in the basin, but human activities have a significant inhibitory effect on the local area. Precipitation has a higher influence on FVC changes in the basin, and local FVC changes respond more strongly to temperature.

Key words: vegetation coverage; temporal and spatial changes; trend analysis; residual analysis; partial correlation analysis

(责任编辑 刘建荣)