

2000—2020 年四川省泸沽湖湿地自然保护区 陆地植被覆盖动态变化

刘伟¹, 向莹¹, 李景吉^{1,2}, 高榆¹, 刘延国³

(1.成都理工大学 生态环境学院, 四川 成都 610059; 2.成都理工大学 地质灾害防治与
地质环境保护国家重点实验室 四川 成都 610059; 3.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: [目的] 探究四川省泸沽湖湿地自然保护区 2000—2020 年陆地植被覆盖度的时空变化规律, 为保护区的建设和治理提供参考。[方法] 选用四川泸沽湖湿地自然保护区 2000—2020 年植被生长旺盛月份 (6—9 月) 的 MODIS 数据为数据源, 结合像元二分法、Theil-SenMedian 趋势分析法等相关分析法探究植被覆盖度时空变化特征及其对气候的响应。[结果] ①在时间变化上, 四川省泸沽湖湿地自然保护区陆地植被覆盖度呈略微上升趋势, 整体以 0.09/10 a 速率波动上升。②保护区植被覆盖度在空间分布上呈现湖区及其周边区域低, 南北高的特征, 呈现整体上升, 局部下降的特点。③保护区气候 (6—9 月) 趋向“暖干化”发展, 植被覆盖度与气温和降水量以正相关为主, 且受气温影响大于降水, 其影响因素具有空间差异性。[结论] 2000—2020 年, 泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖良好, 植被覆盖度总体呈略微上升趋势, 其中, 气温是影响植被覆盖度的主要气候因子, 同时地形、人类活动对保护区植被覆盖度均有一定的影响。

关键词: 陆地植被; 像元二分模型; 偏相关分析; 时空变化; 四川省泸沽湖湿地自然保护区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0203-09

中图分类号: Q948

文献参数: 刘伟, 向莹, 李景吉, 等. 2000—2020 年四川省泸沽湖湿地自然保护区陆地植被覆盖动态变化 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 203-211. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.024; Liu Wei, Xiang Ying, Li Jingji, et al. Dynamic changes of terrestrial vegetation cover in Lugu Lake Wetland Nature Reserve, Sichuan Province from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 203-211.

Dynamic Changes of Terrestrial Vegetation Cover in Lugu Lake Wetland Nature Reserve, Sichuan Province from 2000 to 2020

Liu Wei¹, Xiang Ying¹, Li Jingji^{1,2}, Gao Yu¹, Liu Yanguo³

(1.College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu,

Sichuan 610059, China; 2.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3.School of

Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: [Objective] The spatial-temporal variation of terrestrial vegetation coverage in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province during 2000—2020 was analyzed in order to provide a reference for the construction and management of the reserve. [Methods] MODIS data from June to September of 2000—2020 for the Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province was the data source. Correlation analysis methods such as pixel dichotomy and Theil-SenMedian trend analysis were combined to determine the spatial-temporal variation characteristics of vegetation coverage and their response to climate. [Results] ① The overall terrestrial vegetation coverage of Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province slightly increased from 2000 to 2020, and increased at a rate of 0.09/10 yr. ② Vegetation coverage of the protected area was low in the lake area and the surrounding areas, and higher in the north and south areas. The spatial variation of vegetation coverage of the protected area increased overall but decreased locally. ③ The climate of the reserve (from June to September) tended to be “warmer and drier”, and fractional vegetation coverage

收稿日期: 2022-10-21

修回日期: 2023-02-03

资助项目: 国家重点研发项目“第二次青藏高原综合科学考察研究” (2019QZKK0307)

第一作者: 刘伟 (1995—), 男 (汉族), 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境监测与评价。Email: 2020050985@stu.cdut.edu.cn.

通信作者: 李景吉 (1983—), 男 (汉族), 江苏省徐州市人, 博士, 副教授, 主要从事植物多样性与生态保护研究。Email: lijingji2014@cdut.edu.cn.

was mainly positively correlated with temperature and precipitation. The influence of temperature was greater than that of precipitation. The specific influencing factors had spatial differences. [Conclusion] From 2000 to 2020, the vegetation coverage of the Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province was good, and the vegetation coverage slightly increased over time. Temperature was the main climate factor affecting vegetation coverage. Topography and human activities, meanwhile, had some effects on the vegetation coverage of the reserve to a certain extent.

Keywords: terrestrial vegetation; pixel binary model; partial correlation analysis; spatial-temporal change; Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

植被是生态系统的重要组成部分之一,是连接水、土壤、大气的纽带^[1]。对植被生长开展长时间序列动态评价能够一定程度上反映其所处生态环境的变化^[2]。植被覆盖度(FVC)是指植被垂直投影的面积占研究区总面积的百分比^[3],是评价区域生态环境质量的重要指标之一^[4],研究植被覆盖度变化对于分析评价区域生态变化具有重要意义^[5]。植被覆盖度主要通过实测或遥感技术获取,地面实测法耗时费力,测算结果受人为影响较大且难以在大尺度范围展开测量,具有一定的局限性^[6]。遥感技术克服了传统地面实测的一些不足且具有很好的时间和空间连续性^[7],可满足大范围及长时间序列植被覆盖度监测的需求。

目前,基于遥感信息估算植被覆盖度主要有经验模型法和植被指数转换法^[8]。其中像元二分法是基于归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对植被覆盖度进行提取的一种方法,具有削弱大气、土壤背景值和植被类型影响的优点^[9],有较好的普适性,得到广泛应用^[10]。已有研究证明植被覆盖度变化受自然因素、人为因素及共同的影响^[11-12],在气候因素中,降水和气温对植被覆盖度的影响受到许多学者的关注^[13],而在地理因素中,学者大多关注坡度、坡向、海拔与植被覆盖度的关系^[14-15]。在区域尺度上,有研究表明 2000—2020 年四川省植被覆盖度整体呈稳定趋势,植被覆盖有所改善的区域大于退化的区域^[5, 16],在川西植被主要受降水影响,而在川东气温对植被生长影响更大^[5]。

四川省泸沽湖湿地保护区地处川西高原,始建于 1999 年 12 月,保护区内的泸沽湖湿地在 2000 年被《中国湿地保护行动计划》列入中国重要湿地名录,是众多候鸟越冬的重要栖息地。保护区位于中国国家级重点生态功能区“岷山—邛崃山—凉山生物多样性保护与水源涵养重要区”,具有极高的保护价值和科研价值,但由于其独特自然风光,近几年旅游业的发展导致人类活动增加,给保护区的生态环境带来一定负面影响。因此,探究保护区植被覆盖时空变化规律及成因十分必要。目前,有学者^[17-18]对长时间序列植被覆盖度的研究提及保护区,但空间尺度都较大,未

能对保护区植被覆盖度具体变化规律及成因进行阐明。因此,本文以 MODIS 为数据源,利用像元二分法模型反演保护区 2000—2020 年植被覆盖度,并采用趋势分析法等相关分析法对研究区陆地植被覆盖度的时空变化规律进行分析,其结果对四川省泸沽湖自然保护区建设成效评价具有一定参考意义,可为该自然保护区后期建设和治理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

四川省泸沽湖湿地自然保护区位于青藏高原东南缘,地处横断山脉中段东侧。地理坐标介于东经 100°46′27″—100°55′50″,北纬 27°40′45″—27°44′57″。北与盐源县前所乡接壤,东南与盐源县沙沟林场毗邻,西与云南泸沽湖湿地自然保护区相连(图 1)。保护区总面积约为 16 867 hm²,属低纬高原季风气候区,具有暖温带山地季风气候的特点。常年平均气温 12.4 ℃,区内干湿季分明,多年平均降雨量约 1 000 mm,降水集中于 6—9 月,占全年降水量的 88.3%,11 月至次年 4 月为旱季。保护区地形四周高,中间低,受断裂影响,北部可见清晰的断层地貌,坡度多在 30°~50°之间,地势陡峭。土壤类型以山地棕壤为主。植被类型以云南松林为主,其次为云冷杉林和高山栎类林,植被生长始期多集中在 4 月初到 5 月中旬,生长末期多集中在 9 月中旬到 11 月中旬。

1.2 数据来源及预处理

本研究计算植被覆盖度的数据来源于美国国家航空航天局(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提供的 MOD13Q1(H26V6)陆地 3 级标准数据产品,数据格式为 EOS-HDF,其空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d。为更准确反映植被覆盖状况,选取植被生长较为旺盛季(6—9 月)作为研究阶段,时间范围为 2000—2020 年。使用 NASA 提供的 MRT(MODIS Reprojection Tools)批处理软件对 MODIS 数据进行重投影、格式转化等操作。为消除云、大气、太阳高度角等的干扰,采用国际上惯用的最大合成法(maximum value composites)合成月 NDVI

数据,进而将月 NDVI 数据合成年度最大 NDVI 数据,用研究区边界裁剪,得到研究区逐年生长季最大 NDVI 值,用于植被覆盖度估算,以上操作借助 ArcGIS 软件实现。

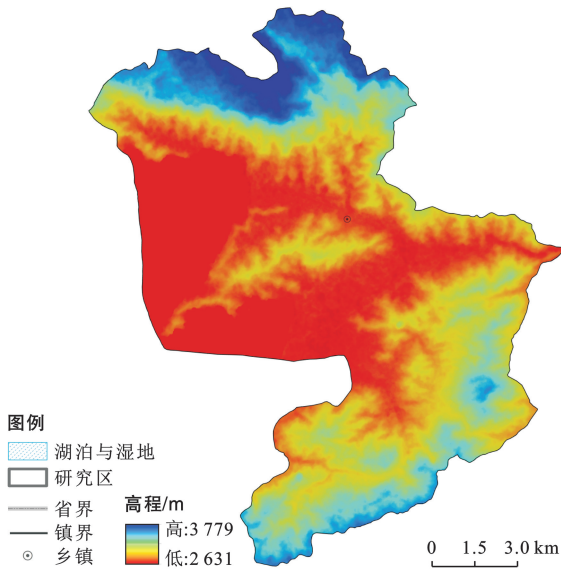


图 1 四川省泸沽湖湿地地形

Fig.1 Topography of Lugu Lake Wetland Nature Reserve, Sichuan Province

气象数据为 2000—2020 年研究区周边 15 个气象站点的逐月(6—9 月)数据(包括:平均气温、月累积降水量),主要来源于中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。借助 ArcGIS 软件对植物生长旺盛季月平均气温和累积降水数据进行克里金插值,得到研究区气温和降水量的栅格数据。

2 研究方法

2.1 像元二分模型

像元二分模型的原理是假设遥感传感器观测到的图像光谱信息是由纯植被和纯裸土两部分一元线性加权合成,其权重就是各自的面积在像元中所占的比例^[19]。假设某一像元中植被的面积所占比例即为植被覆盖度,计算公式为^[20]:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中:FVC 表示植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 表示裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 表示完全由植被所覆盖的纯植被像元值。本研究选取累积频率为 5% 的 NDVI 作为 $NDVI_{soil}$, 累积频率 95% 的 NDVI 值为 $NDVI_{veg}$ 。

2.2 差值法

采用差值法^[21]以 5 a 为尺度对植被覆盖度变化

情况进行分析,其表达式为:

$$\Delta FVC = FVC_b - FVC_a \quad (2)$$

式中: ΔFVC 表示植被覆盖度差值; FVC_a , FVC_b 分别表示前后两个不同时期的植被覆盖度值。

2.3 趋势分析法

采用 Theil-SenMedian 趋势分析法,在像元尺度上,以时间为自变量、植被覆盖度为因变量,模拟多年植被覆盖度变化,公式为^[22]:

$$\beta = \text{median} \frac{FVC_i - FVC_j}{i - j} \quad (3)$$

式中: β 为线性趋势; i 和 j 为时间序列数; FVC_i 和 FVC_j 分别为第 i , j 时间序列的 FVC 值; β 为正表示植被覆盖度呈现上升,反之,呈现下降趋势。结合 Mann-Kendall 法,取显著水平 0.05 进行显著性检验。

2.4 重心迁移模型

重心迁移模型可以反映某一要素的时空聚集和迁移特征,计算公式为^[23]:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{it} \times X_{it})}{\sum_{i=1}^n C_{it}} \quad (4)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{it} \times Y_{it})}{\sum_{i=1}^n C_{it}} \quad (5)$$

式中: X_t , Y_t 分别表示重心的经纬度坐标; C_{it} 表示第 t 年第 i 个植被覆盖斑块的面积; X_{it} , Y_{it} 分别表示第 t 年第 i 个植被覆盖度斑块重心的经纬度。

2.5 相关分析法

偏相关分析是指在剔除其他变量的影响下,只分析两个变量的相关程度,并采用 0.05 的置信水平对偏相关结果进行 T 检验。公式如下^[24]:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac} \cdot r_{bc}}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2) + (1 - r_{bc}^2)}} \quad (6)$$

$$t = \frac{r_{ab,c}}{1 - r_{ab,c}} \sqrt{n - m - 1} \quad (7)$$

式中: $r_{ab,c}$ 为将变量 c 固定后变量 a 和 b 之间的偏相关系数; n 为样本数; m 为自变量个数。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖度时间变化特征

对研究区 2000—2020 年平均植被覆盖度进行统计分析(图 2)。2000—2020 年保护区平均植被覆盖度在 0.42~0.67 之间变化,增长率为 0.09/10 a。其中,2000 年均值最低,约为 0.42,2017 年均值最高,约为 0.67。总体而言,21 a 间保护区平均植被覆盖度上升趋势显著,表明保护区整体植被生长向好发展。

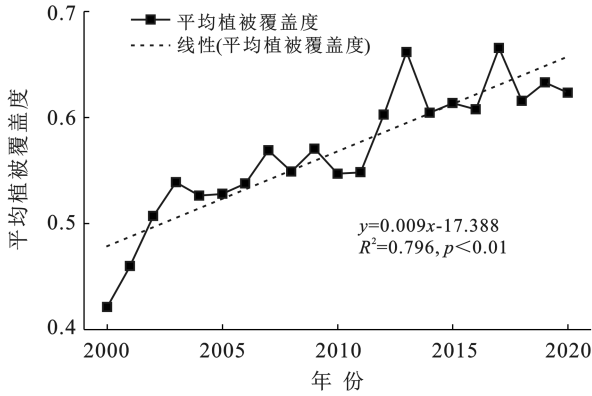


图 2 2000—2020 四川省泸沽湖湿地自然保护区平均植被覆盖度年际变化

Fig.2 Interannual change of average FVC in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province from 2000 to 2020

参照相关文献^[16, 25]对植被覆盖度的划分并结合保护区实际情况,将研究区植被覆盖度划分为:低植被覆盖度($0 < FVC \leq 0.3$)、中低植被覆盖度($0.3 < FVC \leq 0.45$)、中植被覆盖度($0.45 < FVC \leq 0.6$)、中高植被覆盖度($0.6 < FVC \leq 0.75$)、高植被覆盖度($FVC > 0.75$)5个等级。对研究区不同等级的植被覆盖度进行分析(图 3)发现,低、中低植被覆盖度面积呈波动下降趋势,中植被覆盖度面积无明显趋势,中高、高植被覆盖度面积比例呈上升趋势。其中:①低植被覆盖度比例在 1.14%~30.14%,2000 年比例最大,约为 30.14%,此后其比例有所下降,在 2019 年降至最低。②中低植被覆盖度比例在 6.38%~24.64%,2000 年最高,约为 24.64%,之后开始下降,在 2013 年降到 7.43%,之后大致在 6.12%~12.71%之间波动。③中植被覆盖度占比例基本稳定在 19.75%~33.38%,2013 年比例最低,约为 19.75%。2019 年比例最大,约为 33.38%。④中高植被覆盖所占比例在 16.12%~45.61%,整体呈上升趋势,2000 年占比最低,约为 16.12%,2019 年最高,约为 45.16%。⑤研究区高植被覆盖度比例在 6.20%~29.75%之间变化,最低值出现在 2001 年,约为 6.20%,此后比例呈波动上升趋势,在 2014 年升至最高,约为 29.75%,之后在 14.59%~29.71%之间波动。总体来看,保护区整体以中、中高植被覆盖度为主,植被覆盖良好。

3.2 植被覆盖度空间分布及变化特征

通过逐像元趋势分析(图 4)发现,保护区内生长季植被覆盖度以增加趋势为主,面积占比约为 85.67%,显著增加的区域主要分布在保护区中部、东部以及北部偏南的地区,主要植被类型为云南松次生林,这和保护区近年来开展植树造林等生态改善措施有一定关系^[26]。植被覆盖度呈减少趋势的区域面积

占比为 14.33%,主要分布在人口较为密集的乡镇、农耕区以及保护区南部和北部的部分林区。

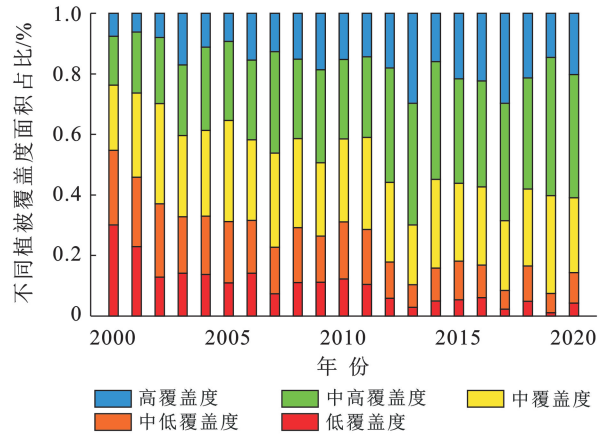


图 3 四川省泸沽湖湿地自然保护区各等级植被覆盖度年际变化

Fig.3 Interannual variation of FVC at different levels in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

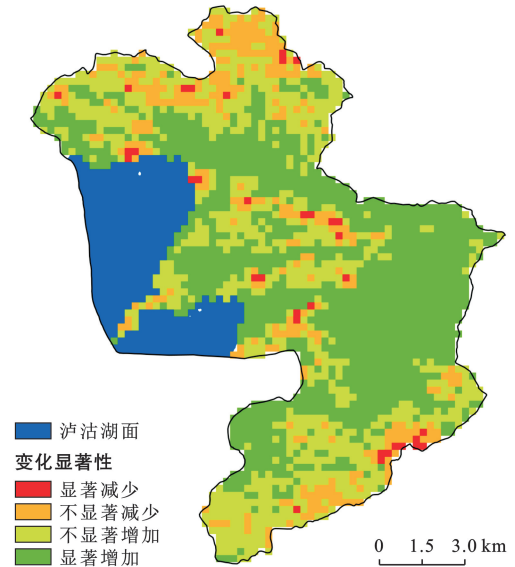


图 4 四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖度变化显著性
Fig.4 Significance of vegetation coverage change in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

由重心迁移(图 5)发现,保护区低、中低植被覆盖度的重心向西北迁移,这与近年来保护区北部植被覆盖度下降有关,中植被覆盖度的重心未发生明显变化,中高、高植被覆盖度重心向东南迁移,说明保护区东部、南部植被覆盖度近年来有所上升。从各时间段植被覆盖度分布(图 6)来看,泸沽湖自然保护区植被覆盖度呈现中部低、南北高的格局。不同年份的植被覆盖度分布具有一定的规律性:低、中低、中植被覆盖度主要分布在泸沽湖北岸、保护区中部和南部部分地区,这些地区多为人类活动比较密集的区域。高、中高植被覆盖度主要分布在保护区北部和南部的乔木林地,这些区域多为人类干预较少的山麓地带。其

中: ①低植被覆盖度面积在 3 个时间段均减少, 尤其 2000—2005 年变化明显, 减少面积约 2 750.00 hm²; ②中低植被覆盖度所占面积在研究期持续减少; ③中植被覆盖度所占面积呈先增加后减少的趋势, 变化主要发生在保护区东部, 2000—2005 年中植被覆盖度面积增加了约 1 700.00 hm², 2005—2010, 2010—2015 中植被覆盖度面积分别减少了约 862.50, 225.00 hm²; ④中高植被覆盖度所占面积

持续增加, 2000—2005 年中高植被覆盖度面积增加了约 1 437.50 hm², 变化的区域主要在保护区中部和北部; ⑤高植被覆盖所占面积整体呈增加趋势, 尤其是保护区南部变化较为明显, 2000—2005, 2005—2010 年高植被覆盖度增加的区域主要在中部、南部, 面积分别增加了约 237.50, 856.25 hm²(表 1)。整体来看, 人类活动比较密集的区域植被覆盖度常年较低, 其余大部分地区植被覆盖度在改善。

表 1 四川省泸沽湖湿地自然保护区不同等级植被覆盖度面积统计
Table 1 Statistics of vegetation coverage area of different levels in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

年份	低植被覆盖度	中低植被覆盖度	中植被覆盖度	中高植被覆盖度	高植被覆盖度
2000	4 312.50	3 525.00	3 075.00	2 306.25	1 087.50
2005	1 562.50	2 900.00	4 775.00	3 743.75	1 325.00
2010	1 756.25	2 700.00	3 912.50	3 756.25	2 181.25
2015	775.00	1 818.75	3 687.50	4 925.00	3 100.00
2020	618.75	1 431.25	3 537.50	5 825.00	2 893.75

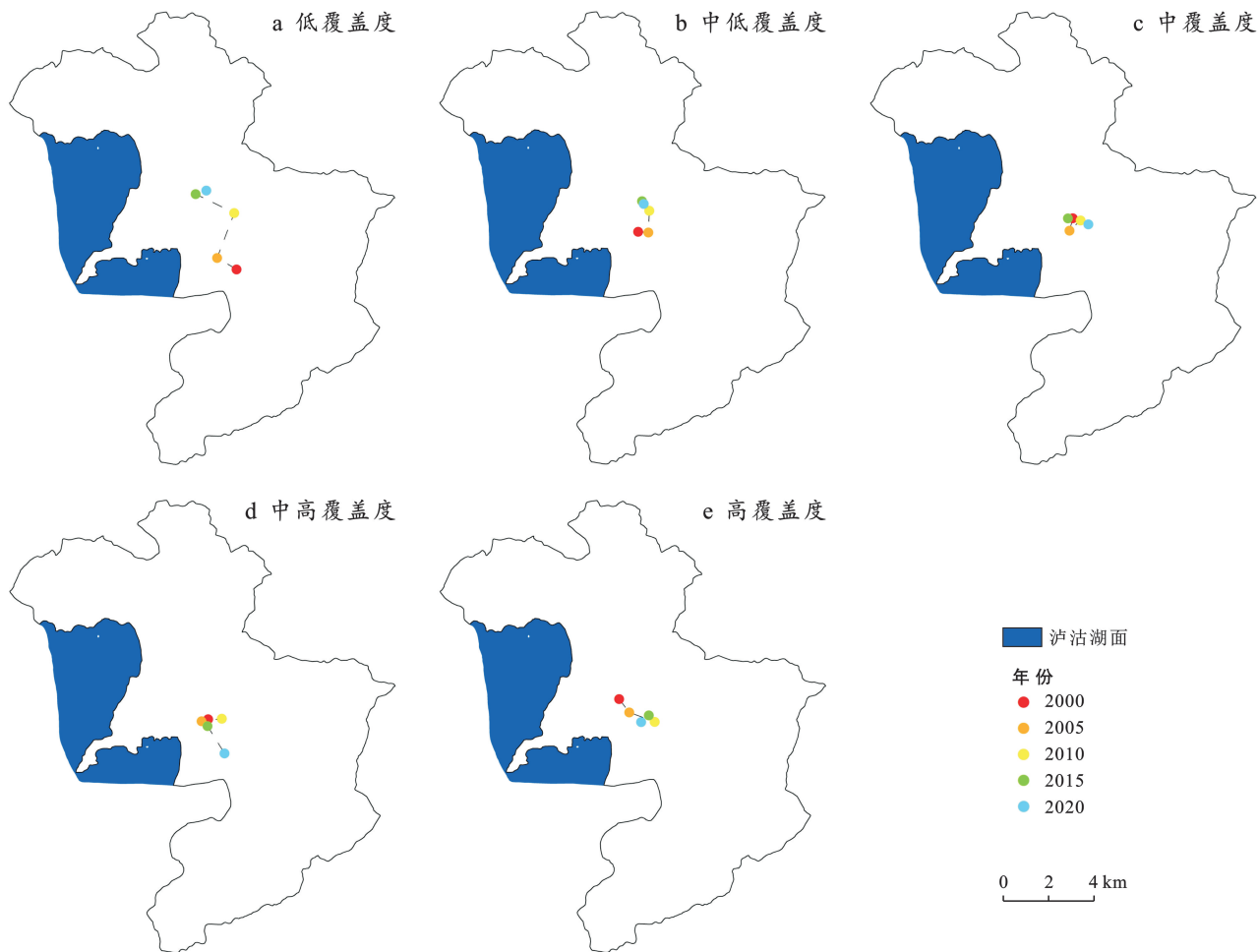


图 5 四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖度重心迁移

Fig.5 Gravity center migration of vegetation coverage in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

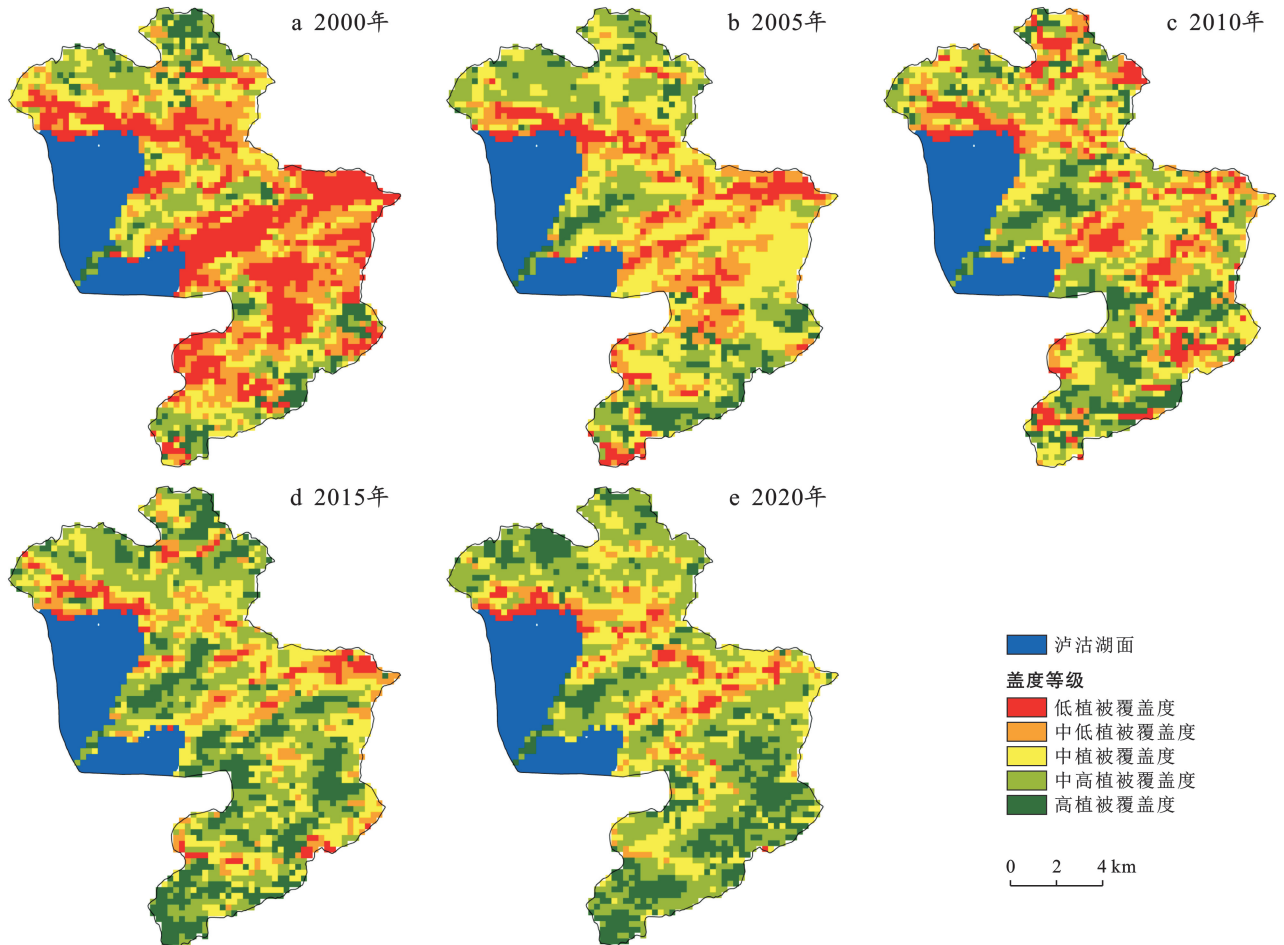


图 6 四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of vegetation coverage in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

3.3 植被覆盖度的变化程度

根据植被覆盖度变化情况划分为:基本无变化($|\Delta FVC| \leq 0.05$)、略微变化($0.05 < |\Delta FVC| \leq 0.3$)、中度变化($0.3 < |\Delta FVC| \leq 0.45$)和明显变化($|\Delta FVC| > 0.45$),对 2000—2020 年四川泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖变化程度进行分析(图 7,表 2)。从不同时段来看,2000—2005 年植被覆盖以改善为主的面积约为 7 643.75 hm^2 ,在保护区各个区域均有分布,改善程度以略微增加为主,约占改善总面积的 47.91%;2005—2010 年植被覆盖度以改善为主,分布区域和上一时间段大致相似,改善程度以中度增加

为主,约占改善总面积的 40.35%;2010—2015 年植被覆盖退化和改善面积相似,退化面积约为 5 256.25 hm^2 ,集中分布在保护区南部,退化程度以略微减少为主,约占退化总面积的 51.25%,改善面积约为 5 731.25 hm^2 ,集中分布在保护区中部和东北部,改善程度以略微增加为主,约占改善总面积的 42.20%;2015—2020 年植被覆盖以改善为主,改善程度以略微增加为主,约占改善总面积的 53.70%。总体来看,2000—2020 年保护区各个时间段变化程度以基本不变和略微增加为主,说明保护区整体植被覆盖度稳中有升。

表 2 四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖变化等级面积统计

Table 2 Vegetation cover change level area statistics of Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

年份	明显减少	中度减少	略微减少	基本不变	略微增加	中度增加	明显增加
2000—2005	768.75	1 018.75	1 643.75	3 231.25	3 662.50	2 806.25	1 175.00
2005—2010	893.75	1 118.75	1 275.00	2 825.00	3 131.25	3 306.25	1 756.25
2010—2015	825.00	1 737.50	2 693.75	3 318.75	2 418.75	1 825.00	1 487.50
2015—2020	525.00	1 425.00	2 281.25	3 906.25	3 312.50	2 087.50	768.75

3.4 气候因子的时间变化特征

由图 8 可以看出,2000—2020 年研究区 6—9 月

累积降水量呈不显著下降趋势。2002 年最大值为 763.38 mm,2006 年最小值为 453.15 mm,多年平均

累积降水量为 629.76 mm; 月均气温呈波动上升趋势, 且趋势显著 ($p < 0.05$), 2002 年为最低值 16.19 °C, 2019 年为最大值 17.71 °C, 多年平均气温为 17.15 °C。其中 2000—2005 年年均累积降水量为 663.27 mm, 较多年累积降水量高 33.51 mm, 相应时期研究区年均气温为 16.68 °C, 较多年平均值低 0.47 °C; 2005—2010 年年均气温为 17.22 °C, 较多年

平均气温相差不大, 相应时期年累积降水量为 580.59 mm, 较多年累积降水量低 49.17 mm; 2010—2015 年均气温为 17.37 °C, 比多年平均值高 0.22 °C, 降水量比多年平均值低 7.82 mm; 2015—2020 年降水量较多年平均值高 15.8 mm, 气温较多年平均值高 0.32 °C。整体来看, 保护区 6—9 月气候趋向“暖干化”发展, 这与李美丽等^[27]研究结果一致。

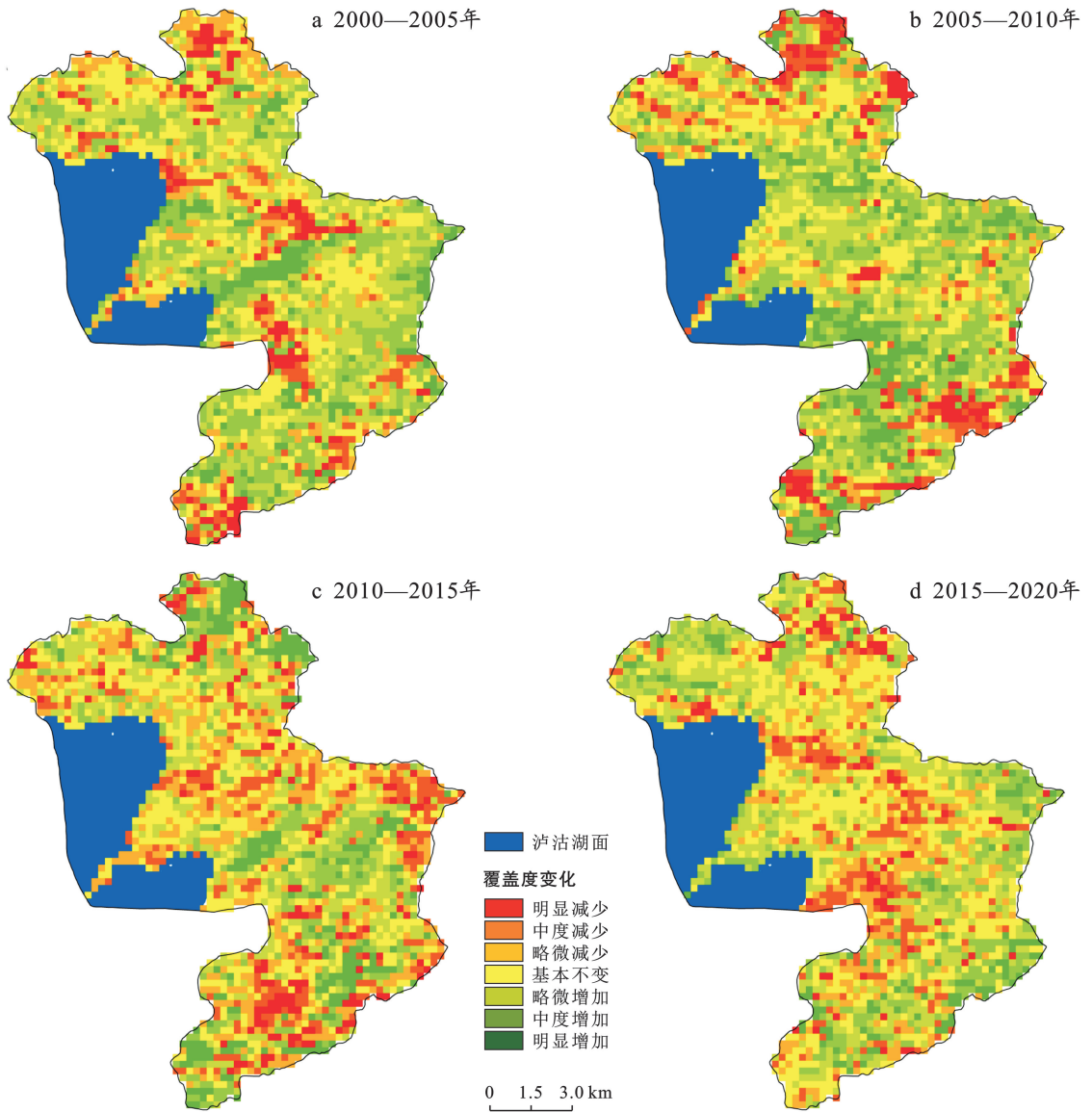


图 7 四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖度变化程度

Fig.7 Vegetation coverage change in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

3.5 植被覆盖度与气候因子的偏相关分析

对保护区生长季植被覆盖度与累积降水和平均气温进行逐像元偏相关分析结果见图 9。植被覆盖度与累积降水量的偏相关系数范围为 -0.703 ~ 0.722, 平均偏相关系数为 0.126, 正负相关区域面积占比分别为 68.50% 和 31.50%, 通过显著性检验 ($p < 0.05$) 的区域占保护区面积的 12.84%, 其中, 显

著正相关的区域(10.70%)主要分布在保护区中部偏北和东部的乔森林区, 显著负相关区域(2.14%)分布在保护区中部的居民聚集区、耕地以及保护区北部和南部的部分林区。植被覆盖度与平均气温的偏相关系数范围为 -0.715 ~ 0.881, 平均偏相关系数为 0.286, 正负相关区域面积占比分别为 80.12% 和 19.88%, 呈显著正、负相关 ($p < 0.05$) 区域面积比例

分别为 32.81% 和 1.44%，植被覆盖度与气温显著相关的分布区域和与降水显著相关的区域类似，但分布范围更大，表明气温是对保护区植被覆盖度影响更为明显的气象因子，这和李应鑫等^[28]得出的研究结果一致。

4 讨论与结论

4.1 讨论

通过研究发现，在时间变化上，四川泸沽湖湿地自然保护区被覆盖度平均值在 2000—2020 年呈显著 ($p < 0.01$) 增加趋势，研究区平均植被覆盖度由 0.42 上升到 0.67，与彭文甫等^[29]得出的盐源县植被覆盖变化趋势基本一致。这种变化与近年来保护区实施退耕还林、植树造林等活动有一定关系^[30]。在空间变化上，保护区植被覆盖呈现整体上升，局部下降的特征。植被覆盖度上升的区域多为乔木林地，其中，保护区核心区植被覆盖度上升更为显著，说明保护区的建设对于植被恢复具有正向作用。植被覆盖度下降

的区域主要位于保护区中部、北部和南部的部分林地。其中，保护区中部多为人类活动较为频繁的区域，旅游业的发展使得人类干预进一步加强，因而导致这些区域植被覆盖度下降^[31]。

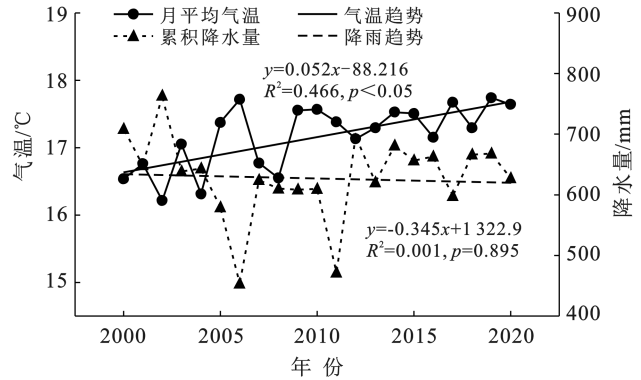


图 8 四川省泸沽湖湿地自然保护区 6—9 月平均气温和累积降水量的年际变化

Fig.8 Interannual changes of average temperature and cumulative precipitation from June to September in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

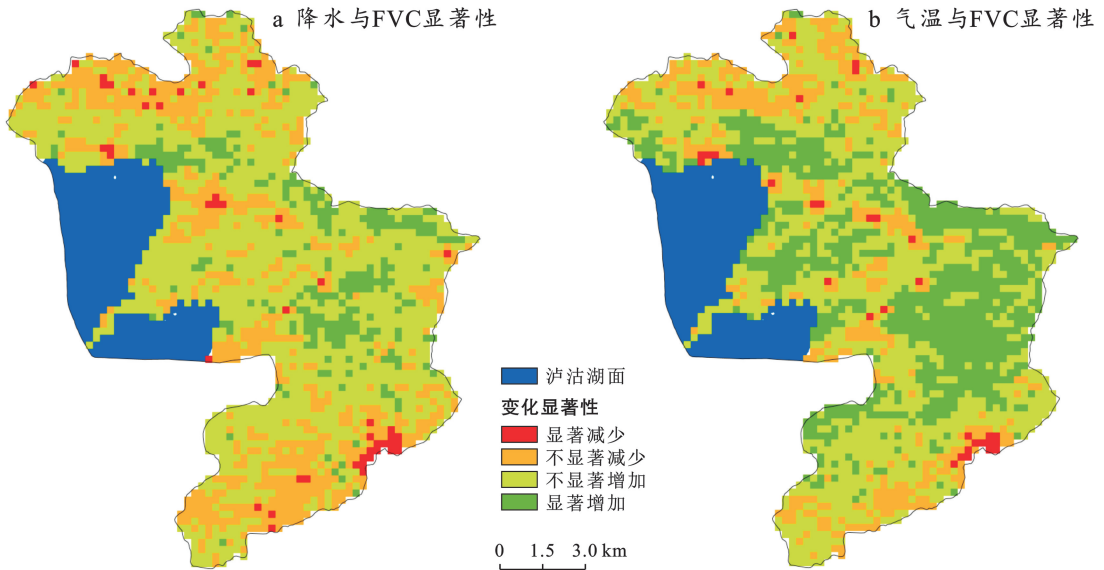


图 9 四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖度与气温、降水偏相关显著性

Fig.9 Significance of partial correlation between vegetation coverage and temperature and precipitation in Lugu Lake Wetland Nature Reserve in Sichuan Province

植被生长对气温和降水等气象因素的响应受区域、地形、人类活动等多方面的影响^[12, 32]，在中国西北等相对干旱地区，降水是决定植被生长的主要气象因素^[33]。而在中国西南等相对湿润地区，气温对植被的影响要大于降水^[34]，也有研究认为西南地区植被生长对降水变化更为明显^[18]。本文从像元尺度上分析了植被覆盖度与气温和降水的关系，发现植被覆盖度整体上与气温和降水均以正相关为主，即水热条件的增加整体上会促进保护区植被生长，且气温对保护区植被覆盖度影响大于降水，分析原因可能是该地

降水量相对较为丰富，植被生长期水分充足，而热量差异较为明显^[27]，因此保护区植被覆盖度变化对气温响应更为明显。坡度越大，土壤持水性越差，在强降雨的作用下，更易形成地表径流引发生水土流失等灾害问题，导致植被覆盖度下降^[35]，而在植被覆盖度低或无植被覆盖的土地，升温往往会加速土壤水分蒸发，抑制植被生长，加剧水土流失现象^[36]。通过叠加遥感影像和实地调查发现，保护区北部和南部植被覆盖度与气温、降水呈负相关的区域大多位于坡地，植被类型主要为灌、草丛，且保护区北面山地为匹夫村

村民聚集地,居民从事放牧等活动,导致该地植被覆盖下降;保护区东南角 2012 年曾发生过火灾,导致该地植被覆盖骤然下降。因此,气温和降水的增加反而不利于这些地区植被的生长。据此,今后在这些地区开展植被恢复工作,应以防止水土流失为前提,充分考虑地形因素,尽可能减少人为干扰,采取合理的植被恢复建设,宜草则草,宜木则木。

保护区植被覆盖度变化是气候、地形与人类活动多种因素作用的结果。本研究起始时间与四川泸沽湖湿地保护区建立时间基本一致,一定程度上可以反映保护区建立的成效。本文重点关注了保护区植被覆盖度格局分布与演化,并进一步探讨了植被覆盖度与气温、降水的响应情况,为保护区的建设提供科学决策依据。但随着旅游业的发展,人类活动对保护区的干扰越来越大,保护区地形也较为复杂。因此,未来还需进一步深入研究人为、地形因素对保护区植被覆盖的影响。

4.2 结论

(1) 在时间变化上,2000—2020 年四川省泸沽湖湿地自然保护区植被覆盖度呈略微上升趋势,整体以 0.09/10 a 速率波动上升,平均植被覆盖度由 0.42 上升到 0.67。保护区植被覆盖整体向好发展。

(2) 在空间分布上,保护区植被覆盖度总体良好,呈现湖区及其周边区域低、南北高的特征。植被覆盖度低值区主要分布在泸沽湖北岸及保护区中部。植被覆盖度高值区主要分布在南、北部的乔木林地。在空间变化,保护区植被覆盖呈现整体上升,局部下降的特点。

(3) 2000—2020 保护区(6—9 月)平均气温呈显著上升趋势,累积降水量呈不显著下降趋势,气候趋向“暖干化”发展。保护区植被覆盖度与气温、降水以正相关为主,且气温影响大于降水。具体影响因素具有空间差异性,其中,保护北部受气候、人类活动和地形共同作用;中部主要受人类活动影响;南部主要受地形、气候共同影响。

[参 考 文 献]

[1] 牛剑龙,陈国坤,黄义忠,等.近 20 a 云南文山州植被覆盖动态变化及其驱动因素[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):118-125.

[2] Wang H, Qi Y, Huang C, et al. Analysis of vegetation changes and dominant factors on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2019,11(2):150-158.

[3] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J].

Remote Sensing of Environment, 2002,80(1):76-87.

- [4] 徐虹,刘琴.2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系[J].水土保持研究,2022,29(1):162-168.
- [5] 辛宇,孙梦鑫,张岳,等.2000—2020 年四川省植被覆盖时空变化特征及其气候驱动因子[J].水土保持通报,2022,42(4):312-319.
- [6] 李磊,兰安军,钟九生.黔中水利枢纽工程区植被覆盖变化及其对地形与地貌的响应[J].水土保持研究,2022,29(4):176-183.
- [7] 王国帅,孙桂凯,魏义熊,等.1990—2019 年澄碧河流域 NDVI 时空动态及驱动因素分析[J].水土保持研究,2022,29(4):207-214.
- [8] 王思,张路路,林伟彪,等.基于 MODIS-归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究[J].生态学报,2022,42(6):2149-2163.
- [9] 朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS-EVI 的四川植被覆盖地形分布特征[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(9):122-132.
- [10] 陈成,杨栋溟,王建雄,等.滇西南植被覆盖度动态变化特征及其驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(4):198-206.
- [11] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J].水土保持学报,2022,36(3):130-137.
- [12] 刘阳,周忠发,闫利会.2001—2018 年贵州省 NDVI 时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J].水土保持通报,2021,41(1):327-336.
- [13] 代仁丽,钟九生,何志远,等.气候因子对贵州省植被覆盖度的协同影响[J].水土保持研究,2022,29(3):262-268.
- [14] 张诗羽,张毅,王昌全,等.岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性[J].水土保持通报,2018,38(1):69-75.
- [15] 朱林富,杨华,谢世友,等.基于 MODIS-EVI 的四川省 2000—2020 年植被覆盖度地形分异研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2022,39(5):58-68.
- [16] 何利平,简季.四川省 2009—2020 年植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J].水土保持通报,2022,42(2):203-209.
- [17] 熊巧利,何云玲,李同艳,等.西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(6):259-266.
- [18] 郑勇,杨武年,刘冲,等.川西高原近 20 a 植被覆盖变化遥感动态监测及驱动力分析[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1447-1456.
- [19] Fernández-Guisuraga J M, Calvo L, Suárez-Seoane S. Comparison of pixel unmixing models in the evaluation of post-fire forest resilience based on temporal series of satellite imagery at moderate and very high spatial resolution [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,164:217-228.

- 38(2):537-549.
- [31] Bergholz K, May F, Giladi I, et al. Environmental heterogeneity drives fine-scale species assembly and functional diversity of annual plants in a semi-arid environment [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2017,24:138-146.
- [32] 梁爽,许涵,林家怡,等.尖峰岭热带山地雨林优势树种白颜树空间分布格局[J].*植物生态学报*,2014,38(12):1273-1282.
- [33] 单立山,李毅,张正中,等.人工模拟降雨格局变化对红砂种子萌发的影响[J].*生态学报*,2017,37(16):5382-5390.
- [34] 王健铭,董芳宇,巴海·那斯拉,等.中国黑戈壁植物多样性分布格局及其影响因素[J].*生态学报*,2016,36(12):3488-3498.
- [35] Liu Ran, Wang Yugang, Li Congjuan, et al. Partitioning water source and sinking process of a groundwater-dependent desert plant community [J]. *Plant and Soil*, 2018,430(1):73-85.
- [36] 张腊梅,刘新平,赵学勇,等.科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应[J].*生态学报*,2014,34(10):2737-2745.
- [37] 黄绪梅,张翼,李建平.毛乌素荒漠草原植被特征对降水变化的响应[J].*草地学报*,2022,30(1):178-187.
- [38] 樊婷,张存厚,张德广,等.内蒙古自治区达茂旗荒漠草原土壤水分对降水的响应[J].*水土保持通报*,2020,40(1):72-77.
- [39] Xu Hao, Li Yan. Water-use strategy of three Central Asian Desert shrubs and their responses to rain pulse events [J]. *Plant and Soil*, 2006,285(1):5-17.
- [40] 杨昊天,李新荣,刘立超,等.荒漠草地 4 种灌木生物量分配特征[J].*中国沙漠*,2013,33(5):1340-1348.
- [41] 单立山,李毅,董秋莲,等.红砂根系构型对干旱的生态适应[J].*中国沙漠*,2012,32(5):1283-1290.
- [42] 南笑宁,刘旻霞,朱恭,等.黄土高原中部红砂与荒漠锦鸡儿种群空间分布格局及关联性[J].*生态学杂志*,2019,38(2):354-360.
- [43] 苏铭.降水变化对混生红砂—珍珠植物功能性状及种间关系的影响[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2019.
- [44] 张正中.红砂和珍珠对降雨的适应性及其种间、种内关系研究[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2019.
- [45] 李文静,吕光辉,张磊,等.干旱区荒漠植物体内潜在水源差异及利用策略分析[J].*生态环境学报*,2019,28(8):1557-1566.
- [46] 吴应明,韩璐,刘柯言,等.晋西黄土区不同土壤水分条件下刺槐和侧柏人工林的水分利用来源[J].*应用生态学报*,2023,34(3):588-596.

(上接第 211 页)

- [20] 刘明霞,刘友存,陈明,等.2000—2018 年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J].*水土保持通报*,2020,40(5):284-290.
- [21] 银朵朵,王艳慧.温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J].*生态学报*,2021,41(3):1158-1167.
- [22] 皮贵宁,贺中华,游漫,等.2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(4):160-167.
- [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] 范微维,易桂花,张廷斌,等.黄河源区青海省玛多县 2000—2014 年 NDVI 变化及气候驱动因子[J].*水土保持通报*,2017,37(1):335-340.
- [25] 朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS-EVI 的重庆植被覆盖时空分异特征研究[J].*生态学报*,2018,38(19):6992-7002.
- [26] 肖山.泸沽湖地区文化景观旅游可持续发展评价及对策研究[D].四川 成都:成都理工大学,2017.
- [27] 李美丽,尹礼昌,张园,等.基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J].*生态学报*,2021,41(3):1138-1147.
- [28] 李应鑫,李石华,彭双云.云南省九大高原湖泊流域 NDVI 时空演变及其与气候的响应关系[J].*水土保持研究*,2020,27(4):192-200.
- [29] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].*地理学报*,2019,74(9):1758-1776.
- [30] 曹慧明,董仁才,邓红兵,等.区域生态系统重心指标的概念与应用[J].*生态学报*,2016,36(12):3639-3645.
- [31] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等.近 15 年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J].*国土资源遥感*,2017,29(3):128-136.
- [32] 张乐艺,李霞,冯京辉,等.2000—2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J].*水土保持通报*,2021,41(5):276-286.
- [33] 马锋,卓静,何慧娟,等.陕西省榆林市植被生态演变及其驱动机制[J].*水土保持通报*,2020,40(5):257-261.
- [34] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].*遥感技术与应用*,2017,32(5):966-972.
- [35] 白玛曲西,普布多吉,卓永,等.基于 MODIS 的横断山区植被时空演变特征及地形效应分析[J].*生态与农村环境学报*,1-16.
- [36] 李红英,张存桂,汪生珍,等.近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J].*生态学报*,2022,42(12):4770-4783.