

玛纳斯河流域草地覆盖度动态变化及影响因素研究

张林¹, 马松梅^{1*}, 张云玲², 雷诚³, 葛本伟¹

(1 石河子大学理学院/干旱区景观生态重点实验室/绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000;
2 新疆维吾尔自治区草原总站, 新疆 乌鲁木齐 830049; 3 新疆激光雷达应用工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:玛纳斯河流域草地覆盖度及其空间异质性的研究,有助于及时掌握干旱半干旱流域草地现状,对进行草地保护、生态恢复及建设具有重要意义。基于流域 9 类天然草地类型数据,利用 2001—2020 年 MODIS NDVI 数据,采用像元二分法模型和趋势分析法分析不同草地类型覆盖度及其动态变化趋势;基于气候、地形、土壤数据,利用地理加权回归模型分析草地覆盖度与自然因子空间异质性。结果表明:(1)近 20 a,流域草地覆盖度呈显著增加趋势,年均值为 28.78%,增速为 0.003 2/20 a,高值集中于 43.5°N 左右的南部山地区,低值集中于北部荒漠区;其中山地草甸覆盖度最高为 67.13%,温性荒漠覆盖度最低为 23.33%。(2)草地覆盖度提升面积和下降面积分别占流域草地总面积的 75.39%与 24.31%,其中流域西部的温性荒漠提升面积最广,山地草甸退化最为严重。(3)年平均降水、土壤有机碳含量对草地覆盖度主要为正向影响,年平均气温、海拔变幅、土壤酸碱度、土壤含沙量主要为负向影响。各因子与草地覆盖度的互作表现出明显的空间差异性,在流域北部草地覆盖度受降水和海拔变幅控制作用较为显著,中部主要受气温、降水影响,而南部主要受气温、降水和土壤含沙量的影响。

关键词:草地覆盖度;玛纳斯河流域;趋势分析;地理加权回归

中图分类号:P935.2

文献标志码:A

Study on dynamic change and influencing factors of grassland coverage in Manas River Basin

ZHANG Lin¹, MA Songmei^{1*}, ZHANG Yunling², LEI Cheng³, GE Benwei¹

(1 College of Sciences, Shihezi University/Key Laboratory of Landscape Ecology in Arid Region/Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2 General Grassland Station of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830049, China; 3 LIDAR Applied Engineering Technology Research Center, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: The study on grassland coverage and its spatial heterogeneity in Manas River Basin is helpful to timely grasp the current situation of grassland in arid areas, and is of great significance for grassland protection, ecological restoration and construction. Based on the data of 9 types of natural grassland and MODIS NDVI data of from 2001 to 2020 in the basin, this study uses the pixel dichotomy model and trend analysis method to analyze the coverage and dynamic change trend of different grassland types. And based on the data of climate, topography and soil, the spatial heterogeneity of grassland coverage and natural environment factors is analyzed by geographical weighted regression model. The results show that: (1) In the past 20 years, the grassland coverage in Manas River Basin has shown a significant increasing trend, with an average annual value of 28.78% and a growth rate of 0.003 2/20 a. The high value is concentrated in the southern mountain area of about 43.5° N, and the low value is concentrated in the northern desert area; Among the grassland types in the basin, the mountain meadow has the highest coverage with a value of 67.13%, while the temperate desert has the lowest coverage with a value of 23.33%. (2) The area of increasing and decreasing grassland coverage in Manas River Basin account for 75.39% and 24.31% of the total grassland area, respectively. Among different grassland types, the temperate desert in the western

收稿日期:2023-01-23

基金项目:新疆维吾尔自治区草原总站草原生态修复治理补助项目(XJCYZZ202007),新疆维吾尔自治区林业和草原局自治区林业发展补助项目(XJLYKJ-2022-07)

作者简介:张林(1997—),女,硕士研究生,专业方向为地图学与地理信息系统。

*通信作者:马松梅(1983—),女,教授,从事干旱区植物地理、植物谱系地理、气候变化与生态响应方向的研究,e-mail:shzmsm@126.com。

basin has the widest improvement area, and the degradation of mountain meadows is the most severe. (3) The annual average precipitation and soil organic carbon content mainly have a positive impact on grassland coverage, while the annual average temperature, altitude variation, soil acidity and alkalinity, and soil sand content mainly have a negative impact. The interaction between various factors and grassland coverage shows significant spatial differences. Precipitation and altitude variation mainly affect the grassland coverage in the northern basin. Temperature and precipitation affect grassland coverage in the central of basin. Temperature, precipitation, and soil sand content affect grassland coverage in the southern of basin.

Key words: grassland coverage; Manas River Basin; trend analysis; geographically weighted regression

草地生态系统是陆地上分布最广的生态系统,具有涵养水源、防风固沙和生物多样性维持等重要的生态服务功能^[1]。中国是草地资源大国,天然草地面积约占国土面积的 41%,居世界第二,是我国重要的生态安全屏障^[2]。西北干旱半干旱区拥有中国 85% 的草地资源,自然环境脆弱,对环境变化的响应十分敏感^[3]。玛纳斯河流域是西北干旱半干旱区最具有代表性的内陆河流域,是典型的山地—绿洲—荒漠系统,是中国第四大灌溉农业区、新疆最大的绿洲农耕地和天山北麓的经济核心区^[4]。玛纳斯河流域天然草地资源丰富,草地面积占流域总面积的 52% 左右,并且从山区、山前倾斜平原到荒漠,流域草地类型多样^[5-6],以温性荒漠、温性草原和高寒草甸为主,草地类型由南向北依次呈垂直带状分布规律。受气候变化和日益增强的人类活动的影响,流域草地呈不同程度的退化,草地覆盖度下降,造成生物多样性丧失、碳汇流失,导致草地生态系统的服务功能下降^[7]。

植被覆盖度(Fraction of Vegetation Coverage, FVC)是反应生态环境总体情况与生态系统安全性、稳定性的重要指标^[8]。长时间序列多源遥感数据为研究多尺度、大范围的植被覆盖和环境变化提供了有效的数据来源。其中,归一化植被指数(NDVI)是反演地表植被覆盖变化的最常用指标^[9],MODIS-NDVI 产品数据广泛应用于区域植被覆盖变化的动态监测。目前,植被覆盖度和环境因子的关系研究多侧重两者的相关性,忽略了环境因子对覆盖度的空间异质性作用^[10]。地理加权回归模型(GWR),能有效处理回归分析中植被覆盖度与环境因子的空间依赖性^[11],这对探究局部地区植被覆盖度对环境因子的时空响应机制具有重要作用。例如,基于 GWR 模型的中国 NDVI 与气候因子的关系研究,揭示了 NDVI 动态特征对气候变化响应的空间格局^[10,12]。

目前,针对玛纳斯河流域草地开展的研究较少,仅体现在不同草地生态功能分区方面的研究^[6]。

然而,近 20 年,玛纳斯河流域不同草地类型的覆盖度如何? 时空演变趋势如何? 影响不同草地类型覆盖度差异的关键环境因子有哪些? 而且,针对流域三大生态区(北部荒漠区、中部绿洲区以及南部山地区,图 1),环境因子对不同草地类型覆盖度影响的空间异质性如何? 这一系列科学问题尚不可知。这在很大程度上限制了对玛纳斯河流域不同草地类型覆盖度时空变化驱动机制的系统认知,也阻碍了对流域草地生态系统变化与生态修复特征的理解。研究以期预测未来玛纳斯河流域草地覆盖度演变提供理论基础,同时为玛纳斯河流域生态环境改善、植被恢复及未来生态环境建设提供科学依据。

因此,本研究利用 3S 技术,基于趋势分析、地理加权回归等方法探究玛纳斯河流域 2001—2020 年不同草地类型覆盖度时空变化特征,以及草地覆盖度与自然环境因子的空间异质性关系。旨在解决以下科学目标:(1)揭示近 20 年玛纳斯河流域不同草地类型覆盖度的时空分布及变化特征;(2)采用 Sen 趋势分析和 Manna-Kendall 检验研究流域不同草地类型覆盖度的变化趋势特征;(3)利用 GWR 模型探究气候、地形、土壤因子对流域不同草地类型覆盖度的空间异质性影响。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

玛纳斯河流域(43.1°~45.9°N, 84.7°~86.7°E)地处准噶尔盆地南部,地势南高北低,海拔高度介于 220~5 070 m 之间,南部为天山山脉,中部为绿洲,北部为古尔班通古特沙漠(图 1a)。流域气候具有明显地域差异,大部分区域是温带大陆性气候,降水较少,气温的日(年)较差大。天然草地资源丰富,草地面积占流域总面积的 52% 左右,共包括 9 类草地类型:温性荒漠类、低平地草甸类、温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类、温性草原类、温性草甸草原、山地草甸类、高寒草原类、高寒草甸类^[5](图 1b)。

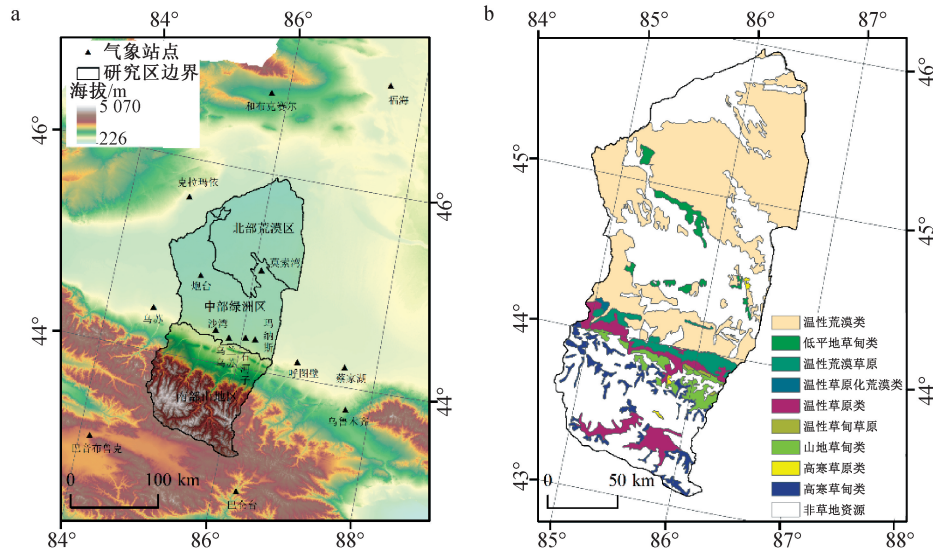


图 1 玛纳斯河流域研究区位置 (a) 及草地分布图 (b)

1.2 数据来源及处理

NDVI 数据:MOD13Q1(V006)是美国国家航空航天局地球观测系统 (<http://ecocast.arc.nasa.gov/>) 16 d 合成的归一化植被指数 (NDVI),分辨率为 250 m。首先,利用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 软件将研究所用玛纳斯河流域 2001—2020 年 NDVI 数据进行影像进行批量拼接、重投影、格式转换等预处理;其次,通过 ENVI 软件采用最大值合成法排除云和大气的干扰得到逐年 NDVI 数据;最后,利用 ArcGIS 10.5 对遥感数据影响进行裁剪,得到流域年 NDVI 数据。

气象数据:年平均气温和年平均降水选取中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 2001—2020 年玛纳斯河流域附近的 15 个气象站点 (图 1a,表 1),利用 ANUSPLIN 气象插值软件对气象数据进行插值,

以获得空间分辨率为 250 m 的栅格数据。

其它数据:DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 SRTM 产品数据,分辨率为 90 m,通过分析单元内最高海拔与最低海拔的差获得海拔变幅 (rel),研究将其作为生境异质性假说的一个指标^[13];土壤数据来自世界土壤数据库 (HWSD) 上层土壤 (0~30 cm) 的土壤含沙量、有机碳含量等 19 项。草地可分为天然和人工两类,本研究以玛纳斯河流域天然草地为研究对象。1995 年新疆 1:100 万草地资源数据来源于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>),包括温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原等 9 类草地类型 (图 1b)。

所有栅格数据统一坐标系为 WGS-1984-Albers,分辨率为 250 m。

表 1 玛纳斯河流域周边 15 个地面气象站点

区站号	台站名	纬度/°	经度/°	海拔/m	区站号	台站名	纬度/°	经度/°	海拔/m
51068	福海	47.117	87.483	497	51358	乌兰乌苏	44.283	85.817	468.5
51156	和布克赛尔	46.817	85.75	1322.1	51359	玛纳斯	44.317	86.2	471.4
51243	克拉玛依	45.617	84.85	450.3	51365	蔡家湖	44.2	87.533	440.5
51346	乌苏	44.433	84.667	478.7	51367	呼图壁	44.167	86.85	575.1
51352	炮台	44.85	85.25	337.1	51463	乌鲁木齐	43.783	87.65	935
51353	莫索湾	45.017	86.1	346	51467	巴仑台	42.767	86.333	1732.4
51356	石河子	44.317	86.05	442.9	51542	巴音布鲁克	43.033	84.15	2458
51357	沙湾	44.333	85.617	522.2					

1.3 研究方法

(1) 草地覆盖度计算

研究采用像元二分模型反演草地覆盖度,草地覆盖度 (FVC_g) 为研究区纯植被 NDVI 值 ($NDVI_{veg}$) 和纯土壤 NDVI 值 ($NDVI_{soil}$) 的加权平均和^[14]。利

用 NDVI 的频率累积值,将累积百分比 5% 作为纯土壤像元值,95% 的为纯草地像元值。

$$FVC_g = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \times 100\% \quad (1)$$

(2) Mann-Kandall 突变检验

Mann-Kandall 突变检验可通过对草地覆盖度时序数据构造一组秩序列,用于总体趋势分析中的突变点检验。在时间序列为随机的假设下,定义统计量为:

$$\begin{cases} UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Vars(s_k)}} & (k = 1, 2, 3 \dots n); \\ E(s_k) = \frac{k(k+1)}{4}; \\ Vars(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}. \end{cases} \quad (2)$$

UF_k 为标准正态分布,它是按时间序列 x 的顺序($x_1, x_2 \dots x_n$)计算的统计量序列, $UB_b = -UF_k$ 。通过 UF_k 和 UB_k 两条统计量曲线在 α 置信区间内的交点个数及位置,可判断该时序数据突变发生的次数及相应的时间。

研究对近 20 年植被覆盖度进行突变检验,取显著性水平 $\alpha = 0.05$,临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$,将 UF_k 和 UB_k 两个统计量序列曲线和 ± 1.96 两条直线进行绘图,若 UF_k 和 UB_k 的值大于 0,则表明时间序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势;当超过临界直线(± 1.96)时,表明上升或下降趋势显著;若 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时间是突变开始的时间。

(3) MK+Sen 趋势分析

研究利用 MATLAB 软件,将 Theil-Sen Median (Sen) 趋势分析和 Mann-Kendall (MK) 检验结合,用以分析研究区长时间序列逐像元草地覆盖度的变化趋势。

Theil-Sen Median (Sen) 趋势分析是一种稳健的非参数趋势分析方法^[15],公式如下:

$$\beta = \text{mean} \left(\frac{FVC_i - FVC_j}{i - j} \right), \forall j > i. \quad (3)$$

式中, FVC_i 和 FVC_j 为研究时段中第 i, j 年对应的草地覆盖数据。 $\beta > 0$ 表示时间序列呈现上升趋势; $\beta < 0$ 表示时间序列呈现下降趋势。

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验方法,用来判断所得趋势 β 的显著性,主要通过检验统计量 Z 值以评估时序数据变化趋势的显著性^[16],当 $|Z| \geq 1.96$,表明时间序列通过了 95% 的显著性检验。然后研究根据 MK+Sen 趋势分析结果,并结合研究区草地覆盖度的实际变化情况,在 Arcgis 10.5 中将变化趋势分为显著降低 ($\beta < 0, p < 0.05$)、轻度降低 ($\beta < 0, p > 0.05$)、轻微提升 ($\beta > 0, p > 0.05$)、中度提升 ($\beta > 0, p < 0.05$)、高度提升 ($\beta > 0.02, p <$

0.05) 5 级用以研究分析。

(4) 地理加权回归分析

GWR 模型通过对独立抽样的分析点分别进行回归分析模型解算,得到与空间位置一一对应的空间回归系数,能有效处理研究区域内部空间关系的变化。公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k x_{ij}(u_i, v_i) + \varepsilon_i. \quad (4)$$

式中, y_i 为在位置 i 处的因变量值; x_{ij} ($k = 1, 2 \dots m$) 为位置 i 处的自变量值; (u_i, v_i) 为回归分析点 i 的坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距项; ε_i 独立分布的随机误差项。本研究以高斯函数确定权重,以赤池信息量准则 (Akaike Information Criterion, AICc) 确定模型的最优带宽。为保障 GWR 模型的准确度,在构建 GWR 模型前通常需要进行最小二乘法 (Ordinary Least Squares, OLS) 线性回归^[17]。

研究以草地覆盖度为因变量,选择气候、地形和土壤因子作为自变量。利用 OLS 模型去除因变量与自变量之间的多重共线性 (方差膨胀因子 > 7.5),保留了气温 (tem)、降水 (rain)、海拔变幅 (rel)、土壤含沙量 (t-sand)、土壤有机碳含量 (t-oc)、土壤酸碱度 (t-ph) 6 个因子。在 GWR4.08 软件中进行建模,空间权函数选择高斯函数 (Gaussian),带宽优化选择 AICc 信息准则法 (Akaike Information Criterion, AIC),利用 ArcGIS 10.5 进行可视化分析。

2 结果与分析

2.1 不同草地类型覆盖度的空间分布

2001—2020 年,玛纳斯河流域草地覆盖度平均值为 28.78%,年均值范围 24.98%~33.84%。流域不同草地类型覆盖度之间存在明显的空间差异,整体呈由 43.5°N 向南北两侧递减的空间分布格局 (图 2a),高值区集中在南部山地区中部与北部,包括 5 种草地类型 (山地草甸、温性草甸草原、高寒草原、低平地草甸与山前温性草原) (图 1,图 2);草地覆盖度较低的区域分布在北部荒漠区与南部山地 2 000 m 以上的高海拔地区,包括温性荒漠与高寒草甸 (图 1,图 2)。

其中,山地草甸覆盖度年均值最高,为 64.93%~74.66%,均值 67.13% (图 2),在南部山地区呈开口向东的喇叭状分布 (图 1),分布面积占流域草地面积的 3.86% (图 2b,表 2)。温性草甸草原和高寒草原年均覆盖度分别为 61.90%、51.27%,草地覆盖度次之,分布面积占比相同,均为 0.31% (图 2b,表 2)。

低平地草甸主要分布在流域中部温性荒漠边缘,草地覆盖度均值为 48.05%。高寒草甸、温性草原、温性荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠年均覆盖度差异不大,范围为 30.95%~42.35%,主要分布在天

山北坡(图 2b,表 2)。在流域的 9 类草地类型中,温性荒漠覆盖度年均值最低,但为流域分布最广的草地类型,集中在 44°N 以北区域,面积占比 73.68%(图 2b,表 2)。

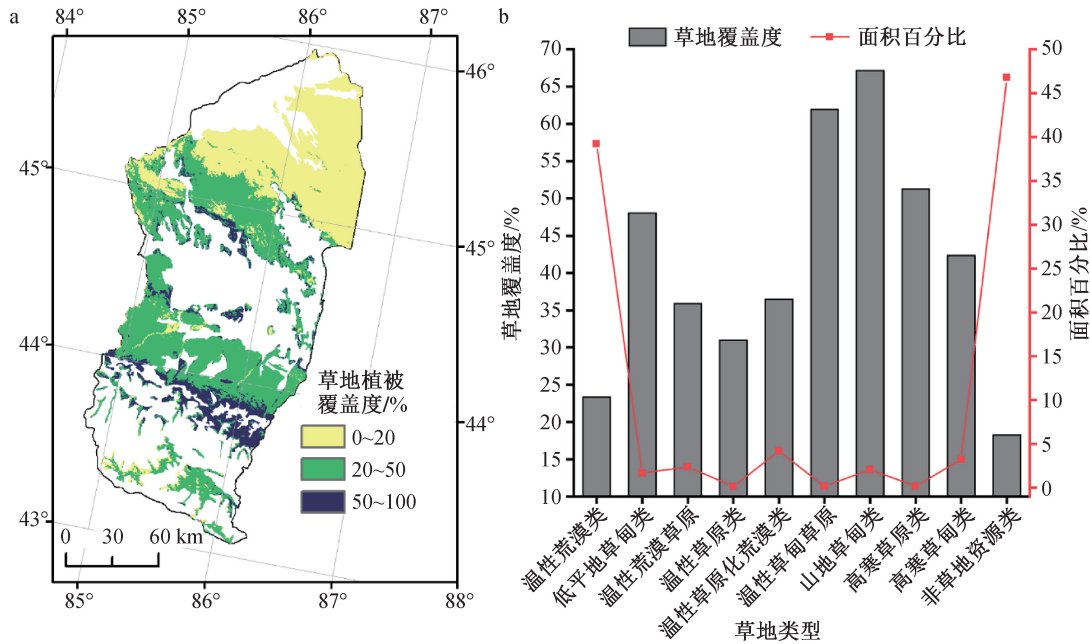


图 2 2001—2020 年玛纳斯河流域草地覆盖度均值空间分布图 (a)、不同草地类型覆盖度平均值 (b)

表 2 2001—2020 年玛纳斯河流域不同草地类型面积比、草地覆盖度平均值及变化趋势统计

草地类型	草地覆盖度平均值/%	面积百分比/%	趋势线方程	R ²	p
温性荒漠	23.33	73.68	$y = 0.0037x - 7.1191$	0.64	0
低平地草甸	48.05	3.15	$y = 0.0119x - 23.3745$	0.85	0
温性荒漠草原	35.9	4.49	$y = 0.0014x - 2.5021$	0.06	0.301
温性草原化荒漠	30.95	0.24	$y = -0.0008x + 1.8368$	0.01	0.653
温性草原	36.49	7.87	$y = 0.0002x - 0.0801$	0.005	0.765
温性草甸草原	61.9	0.31	$y = 0.0003x + 0.087$	0.002	0.848
山地草甸	67.13	3.86	$y = -0.0008x + 2.3162$	0.05	0.344
高寒草原	51.27	0.31	$y = 0.006x - 11.5992$	0.82	0
高寒草甸	42.35	6.08	$y = 0.001x - 1.5717$	0.18	0.06

2.2 不同草地类型覆盖度的时间动态分析

2001—2020 年,玛纳斯河流域草地覆盖度呈显著上升趋势,增长速率 0.003 2/20 a ($p < 0.05$),2016 年达到最大值(图 3a)。Mann-Kandall 突变检验结果显示,2010 年是流域草地突变点,2012 年后呈显著升高趋势(图 3b)。从不同草地类型覆盖度的逐年线性变化分析可得,高寒草原、低平地草甸以及温性荒漠的草地覆盖度呈上升趋势,其中低平地草甸增加趋势最明显(0.011 9/20 a, $p < 0.05$,表 2);温性草甸草原、温性草原与高寒草甸变化较平稳,上升趋势不显著;而温性草原化荒漠与山地草甸为不显著的下降趋势(表 2)。

MK+Sen 分析结果表明,从空间上看,近 20 年

玛纳斯河流域草地覆盖度以提升为主,提升面积占草地面积的 75.39%。其中,高度提升区面积占比 3.80%,分布草地类型为低平地草甸类、温性荒漠和高寒草原;中度提升区占比 23.07%,分布于高度提升区周围,主要草地类型为低平地草甸、温性荒漠与高寒草原;轻度提升区分布最为广泛,占比 48.52%,草地类型为温性荒漠草原、温性荒漠与高寒草甸(图 4a)。下降区域的面积占比 24.31%,轻度降低区占 22.67%,显著降低区则破碎化分布于轻度降低区周围,占比 1.65%(图 4a)。

温性荒漠草原、高寒草原、温性荒漠、低平地草甸、温性草原与高寒草甸 6 类草地类型提升区域面积大于降低区域面积,其中温性荒漠提升面积最广,

占草地面积的 31.37%,而低平地草甸与高寒草原提升效果最显著,草地覆盖度提升面积占自身草地类型的 86%以上(图 4b)。山地草甸、温性草原化荒

漠、温性草甸草原覆盖度的降低区域面积高于提升区域面积,其中山地草甸覆盖度降低面积占比 1.35%,退化最为严重。

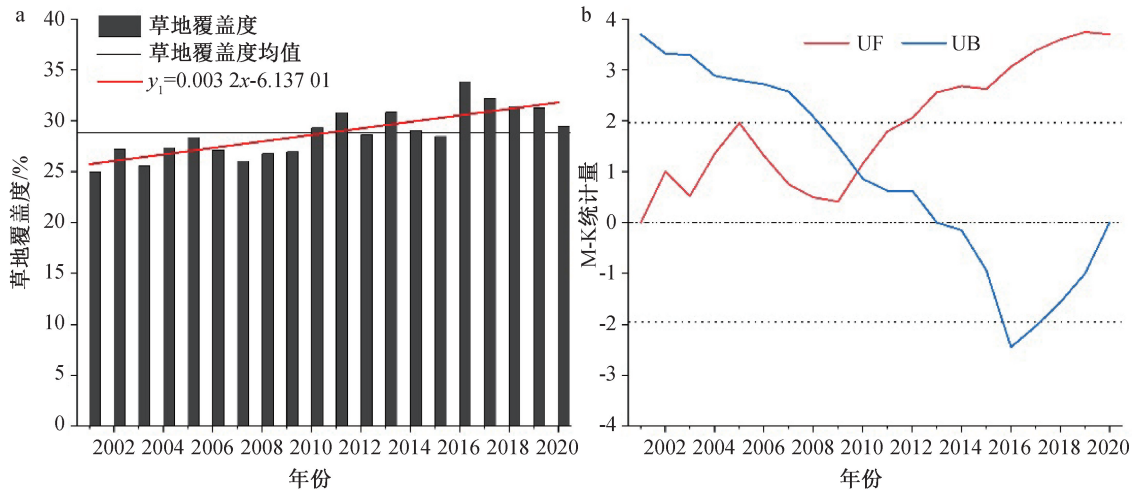


图 3 2001—2020 年玛纳斯河流域草地覆盖度的变化趋势 (a) 与 M-K 突变检验 (b)

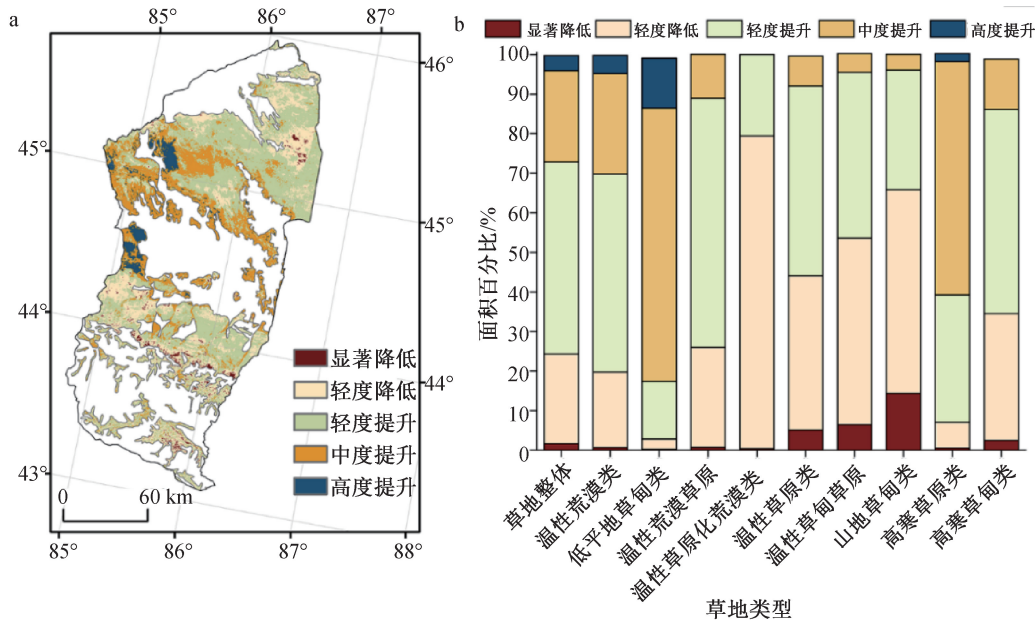


图 4 2001—2020 年玛纳斯河流域草地覆盖度变化趋势 (a) 及不同草地类型覆盖度变化显著性统计 (b)

2.3 不同草地类型覆盖度对气候、地形因子的空间异质性响应

本研究中,GWR 模型具有最大 R^2 ($R^2 = 0.73$)、最小 $AICc$,其解释程度较 OLS 模型提高 21.59%, $AICc$ 值(-16 638.15)显著小于 OLS 模型 $AICc$ (-11 740.36)。利用 GWR 模型准确揭示了玛纳斯河流域环境因子对不同草地类型覆盖度的空间异质性影响。

GWR 模型统计结果表明,模型的最优带宽为 1 025.82,年平均降水、土壤有机碳含量对草地覆盖度主要为正向影响;年平均气温、海拔变幅、土壤酸碱度、土壤含沙量对草地覆盖度主要为负向影响

(表 3)。从整体格局看,各个因子与草地覆盖度的影响表现出明显的空间差异(表 4,图 5)。对流域北部与中部的草地类型来说,气温对草地覆盖度的影响是中间低两边高,除了与流域北部的温性荒漠为正相关外,气温与大部分草地类型覆盖度为负相关;流域南部草地类型与气温为正相关,相关性由西向北逐渐增强。年平均降水的回归系数在流域自南向北呈“正-负”相间分布规律,除流域中部温性荒漠与高海拔温性草原外,其它草地类型与年平均降水均为正相关。海拔变幅对草地覆盖度的影响强度为北低南高,对北部与中部的温性荒漠、低平地草甸

等草地类型为负相关,对南部山地区的大多数草地类型覆盖度为正相关。3 种土壤因子的回归系数变化规律相似,由东向西逐渐增加。其中,土壤含沙量与土壤酸碱度除对西部温性荒漠为正向影响外,对其它草地类型覆盖度均为负相关。而土壤有机碳含

量对草地覆盖度的影响大多为正相关。从整体格局来看,流域北部草地覆盖度受到降水和海拔变幅的控制作用更为显著,中部草地主要受气温和降水的影响更显著,南部草地主要受气温、降水、土壤含沙量的影响(图 5,表 4)。

表 3 玛纳斯河流域草地不同环境因子正值、负值作用区域面积百分比

环境因子	描述	平均值	最大值	最小值	正值	负值
					百分比	百分比
					/%	/%
tem	平均气温	-0.12	1.63	-4.75	44.30	55.70
rain	平均降水	0.71	3.92	-1.13	80.91	19.09
rel	海拔变幅	-3.16	0.64	-20.8	22.39	77.61
t-oc	土壤有机碳	0.06	3	-13.18	64.56	35.43
t-ph	土壤酸碱度	-0.01	0.89	-2.63	28.84	71.16
t-sand	土壤含沙量	-0.16	0.74	-5.5	22.44	77.56

表 4 基于草地类型的不同环境因子 GWR 空间回归参数平均值统计

草地类型	tem	rain	rel	t-sand	t-oc	t-ph
温性荒漠	-0.34	0.88	-4.03	-0.07	0.05	-0.02
低平地草甸	-0.14	0.29	-7.28	-0.15	0.06	0.02
温性荒漠草原	0.07	0.65	0.23	-0.14	0.02	-0.15
温性草原化荒漠	-1.21	-0.36	0.08	-0.1	0.11	-0.14
温性草原	0.53	0.17	0.06	-0.58	0.03	-0.26
温性草甸草原	0.8	0.51	0.35	-0.16	0.14	-0.13
山地草甸	0.94	0.33	0.17	-0.4	0.16	-0.21
高寒草原	1.18	-0.21	-0.28	-0.37	0.27	-0.23
高寒草甸	0.78	0.08	0.02	-0.63	0.16	-0.31

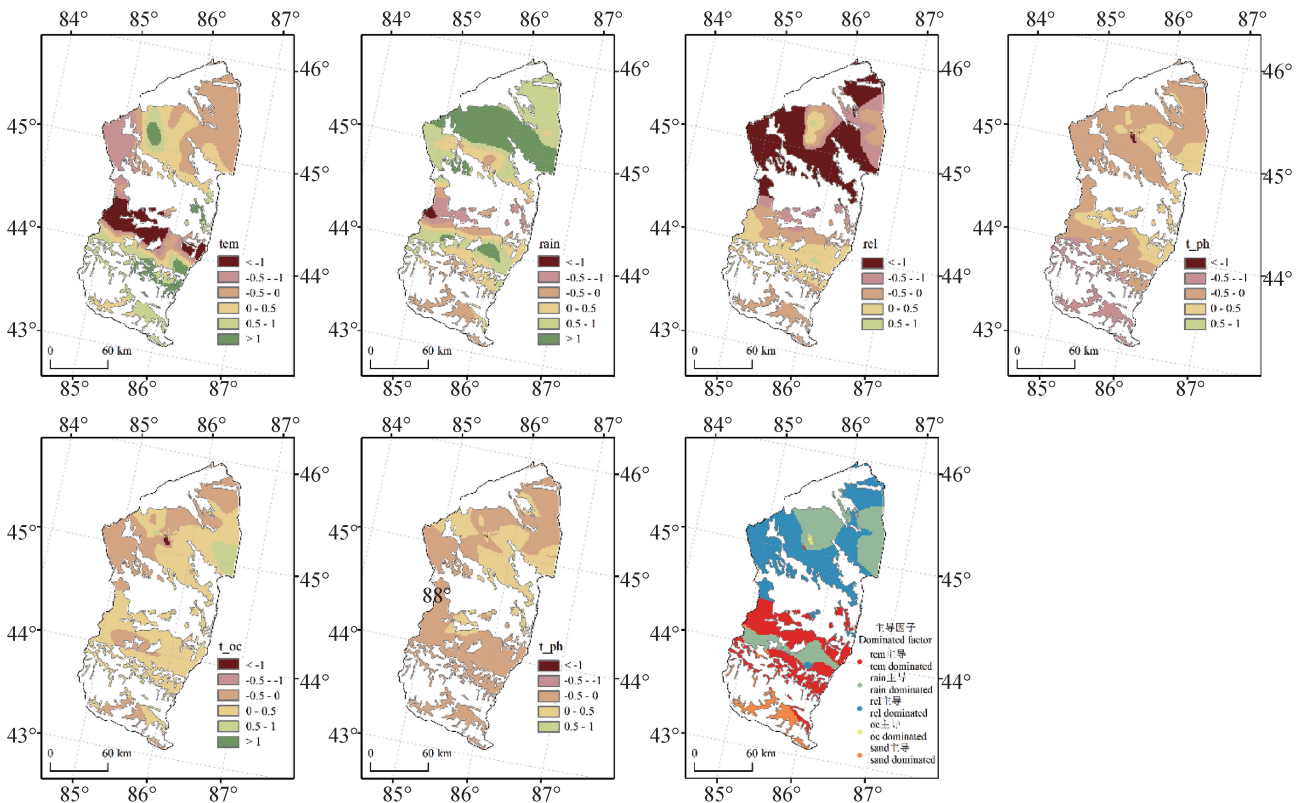


图 5 玛纳斯河流域草地覆盖度与不同环境因子的 GWR 空间回归参数

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 玛纳斯河流域不同草地类型覆盖度的时空变化特征

2001—2020 年,玛纳斯河流域草地覆盖度均值(28.78%),高于全疆(2000—2019 年)植被覆盖度均值(25.5%/20 a)^[18]。南部山地区草地类型丰

富,分布有 7 种草地类型,其中山地草甸、温性草甸草原和高寒草原因区域水热条件较好,草地生长潜力大,草地覆盖度较高(图 4a)。其中,山地草甸覆盖度最高(表 2),达 67.13%,这与山地草甸自身群落盖度的植物特性有关^[19],相关研究表明流域南部山地草甸具有研究区草地类型中最高的群落盖度(91%)与牧草产量(10 509 kg·hm²)^[6]。流域山地草甸在南部山地区呈开口向东的喇叭状分布

(图 1),占流域草地面积的 3.86%,对流域生态系统维护功能的发挥和生态安全建设具有重要作用。然而,根据本研究,近 20 年山地草甸退化面积大于提升面积(图 4b),草地覆盖度降低区域面积占自身草地类型面积的 58.87%,退化严重,过度放牧活动、不合理利用草地资源和滥用水资源可能在很大程度上导致山地草甸类发生严重退化^[20-21],也使得生态服务功能不断下降,加强山地草甸的动态监测对流域生态安全和草地修复具有重要的现实意义。因此,根据本研究,对清水河乡、塔西河乡、早卡子滩乡进行退牧还草、人工种草等工程建设具有现实意义,这也是目前玛纳斯县生态修复治理的重点工程。

温性荒漠是流域分布最广的草地类型,占流域面积的 73%以上,且具有较高的生产力指数与生态服务功能价值^[6],近 20 年覆盖度呈显著增加趋势(表 2),增长速率为 0.003 7/20 a($p < 0.05$),提升面积大于退化,这有利于流域草地生态系统的良性循环。整体来看,流域多数草地类型覆盖度呈增加趋势,提升面积占草地面积的 75.39%。可能是因为 2011 年玛纳斯湿地被纳入国家湿地公园建设试点,成为国家重点生态功能区范围,湿地的改善使流域东部草地覆盖度得到显著提升。

(2) 玛纳斯河流域草地覆盖度驱动机制分析

气候因子(气温、降水)影响玛纳斯河流域草地覆盖度的主要环境因子(图 5)。流域中部温性荒漠、低平地草甸的覆盖度受降水影响较大,相关研究也表明水分条件是草地生长的主要限制因子,降水的增加能够促进植物的生长^[22]。新疆位于西北干旱区,在水分不足的区域如荒漠草原,由于蒸发量增加,土壤水分常处于亏缺状态,水分条件将成为草地生长的关键限制因素^[23]。气温是影响南部山地不同草地类型(温性草原、山地草甸、高寒草原与温性草甸草原)覆盖度的主导因子(图 5,表 4),这主要是由于地形通过改变热量、水分显著影响草地覆盖度,热量成为草地生长的限制因子,体现在南部山地区的草地覆盖度随海拔上升呈不同程度的下降趋势(图 3a)。土壤因子对植被覆盖度具有重要影响,土壤含沙量是影响南部山地区北部高寒草甸和温性草原的主导因子,土壤含沙量越高,越不利于植被生长。土壤理化性质影响植物群落物种组成,间接影响植被覆盖度^[24]。研究表明^[25],草地的退化实际上是植被-土壤系统的退化,植被和土壤是一种相互依赖相互制约的影响,土壤持水量随草地植被退化而减少,土壤酸碱度的变化是造成高寒草地退化

的重要原因,因此,在植被的恢复中,不能忽视土壤对植被的影响。GWR 模型准确揭示了不同环境要素(气候、地形、土壤)对草地活动的控制作用及其分布区域,说明 GWR 模型在探究干旱区、半干旱区流域草地覆盖度驱动因素的空间差异性方面具有独特的优势。

3.2 结论

本研究利用趋势分析、突变检验等方法分析了玛纳斯河流域近 20 年不同草地类型覆盖度时空变化,并利用 GWR 模型揭示了自然环境要素对不同草地类型覆盖度的空间异质性影响。结论如下:

(1) 流域草地覆盖度在空间上呈现由 43.5°N 向南北两侧递减的空间分布特征,高值区集中在海拔 1 500~2 000 m 的南部山地区,9 种草地类型覆盖度依次为山地草甸>温性草甸草原>高寒草原>低平地草甸>高寒草甸>温性草原>温性荒漠草原>温性草原化荒漠>温性荒漠。

(2) 近 20 年流域整体草地覆盖度呈显著增加趋势,流域西部的温性荒漠提升面积最广,而山地草甸退化最为严重,加强草地覆盖度动态监测对草地修复具有价值。

(3) 自然环境因子与草地覆盖度的影响表现出明显的空间差异性,但本研究在影响因素建模过程中,未考虑人为因素(如放牧、旅游、农业水土开发等)的定量分析,因此将人类活动相关因子合理纳入 GWR 模型,探究其对草地覆盖度的影响,也是研究今后进行的重点内容。

致谢:感谢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>)提供 1995 年新疆 1:100 万草地资源数据支撑。

参考文献(References)

- [1] WU J G, XIANG W N, ZHAO J Z. Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 222-233.
- [2] 沈海花,朱言坤,赵霞,等.中国草地资源的现状分析[J]. *科学通报*, 2016, 61(2): 139-154.
SHEN H H, ZHU Y K, ZHAO X, et al. Analysis of current grassland resources in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2): 139-154.
- [3] 常娟,张增信,田佳西,等.西北地区草地水分利用效率时空特征及其对气候变化的响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(3): 119-125.
CHANG J, ZHANG Z X, TIAN J X, et al. Spatio-temporal characteristics of grassland water use efficiency and

- its response to climate change in northwest China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(3): 119-125.
- [4] 范文波,吴普特,韩志全,等. 玛纳斯河流域 ET_0 影响因素分析及对 Hargreaves 法的修正 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 19-24.
FAN W B, WU P T, HAN Z Q, et al. Influencing factors analysis of reference crop evapotranspiration and modification of Hargreaves method in manas river basin [J]. Transactions of the Chinese society agricultural engineering, 2012, 28(8): 19-24.
- [5] 新疆维吾尔自治区畜牧厅. 新疆草地资源及其利用 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993.
- [6] 张青青,于辉,安沙舟,等. 玛纳斯河流域草地生态功能区划研究 [J]. 新疆农业科学, 2017, 54(5): 969-977.
ZHANG Q Q, YU H, AN S Z, et al. Study on grassland ecoeconomic function regionalization in manas river basin [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(5): 969-977.
- [7] 张青青,徐海量,樊自立,等. 基于玛纳斯河流域生态问题的生态安全评价 [J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 479-486.
ZHANG Q Q, XU H L, FAN Z L, et al. Eco-security assessment based on ecological problems of manas river basin [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 479-486.
- [8] LIU H, LIU F, YUAN H, et al. Assessing the relative role of climate and human activities on vegetation cover changes in the up down stream of Danjiangkou, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2021, 15(1): 180-195.
- [9] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等. 中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(3): 213-223.
XU G L, LI A J, XU X H, et al. NDVI dynamics and driving climatic factors in the protected zones for ecological functions in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(3): 213-223.
- [10] 韩雅,朱文博,李双成. 基于 GWR 模型的中国 NDVI 与气候因子的相关分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 1125-1133.
HAN Y, ZHU W B, LI S C. Modelling relationship between NDVI and climatic factors in China using geographically weighted regression [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(6): 1125-1133.
- [11] PROPASTIN P A, KAPPAS M. Reducing uncertainty in modeling the NDVI-precipitation relationship: a comparative study using global and local regression techniques [J]. Mapping Sciences & Remote Sensing, 2008, 45(1): 47-67.
- [12] 高江波,焦珂伟,吴绍洪. 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析 [J]. 地理学报, 2019, 74(3): 534-543.
GAO J B, JIAO K W, WU S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982—2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 534-543.
- [13] 冯建孟,徐成东. 中国种子植物物种丰富度的大尺度分布格局及其与地理因子的关系 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 249-254.
FENG J M, XU C D. Distribution patterns of species richness of seed plants in China and its relationship with geographical factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 249-254.
- [14] 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.
- [15] JIANG W G, YUAN L H, WANG W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the yellow river basin [J]. Ecological Indicators, 2015, 51: 117-126.
- [16] TOSIC I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2004, 77(1/2): 47-56.
- [17] 税伟,杜勇,陈毅萍,等. 基于地理加权回归的茶叶种植专业化空间格局及影响因素——以福建省安溪为例 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1298-1308.
SHUI W, DU Y, CHEN Y P, et al. Spatial patterns and influence factors of specialization in tea cultivation based on geographically weighted regression model: a case study of Anxi county of Fujian province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1298-1308.
- [18] 王建国,张飞. 2000—2019 年新疆植被覆盖度时空格局及重心变化分析 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 188-194.
WANG J G, ZHANG F. Spatial-temporal pattern and gravity center change of fractional vegetation cover in Xinjiang, China from 2000 to 2019 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 188-194.
- [19] 陈雅敏,张韦倩,杨天翔,等. 中国不同植被类型净初级生产力变化特征 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2012, 51(3): 378-381.

- CHEN Y M, ZHANG W Q, YANG T X, et al. The change characteristics of net primary production in different vegetation types in China[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2012, 51(3): 378-381.
- [20] 杨红飞, 刚成诚, 穆少杰, 等. 近 10 年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究[J]. *草业学报*, 2014, 23(3): 39-50.
- YANG H F, GANG C C, MU S J, et al. Analysis of the spatio-temporal variation in net primary productivity of grassland during the past 10 years in Xinjiang[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(3): 39-50.
- [21] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. *资源科学*, 2011, 33(11): 2143-2149.
- ZHANG C, REN Z Y. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2011, 33(11): 2143-2149.
- [22] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 15-30.
- ZHOU W, GANG C C, LI J L, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982—2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 15-30.
- [23] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [24] SUN J, WANG P, WANG H, et al. Changes in plant communities, soil characteristics, and microbial communities in alpine meadows degraded to different degrees by pika on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021(27): e01621.
- [25] 魏晶晶, 秦瑞敏, 张中华, 等. 不同退化程度高寒草地植物群落与土壤性质变化及相关性分析[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 3035-3045.
- WEI J J, QIN R M, ZHANG Z H, et al. Analysis of changes and correlation between alpine grassland plant communities and soil properties at different degradation levels[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3035-3045.

(责任编辑: 郭芸婕)