

李永鹏,贾平海,云旦迦沧,等.高寒草原公路建设对路域植物组成及多样性的影响[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):1002-1014.

LI Yong-peng, JIA Ping-hai, YUNDAN Jia-cang, et al. Influence of Highway Construction on Plant Species, Growth and Diversity in Alpine Grassland Area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 1002-1014.

DOI: 10.19814/j.jese.2023.03006

• 环境与可持续发展专刊 •

高寒草原公路建设对路域植物组成及多样性的影响

李永鹏¹, 贾平海¹, 云旦迦沧¹, 陈治华¹, 田 沛^{2,3*}

(1. 甘南藏族自治州交通运输局, 甘肃 甘南 747000; 2. 兰州大学 草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 3. 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:为揭示青藏高原公路施工过程对周围草原生态环境的影响,选择甘肃省甘南藏族自治州在建的 S10 卓尼—合作高速公路代表性路域的 2 个施工点,在路基施工期间(2021 年 6 月和 9 月)距离路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处,采用样线法调查取样,获取植物群落物种构成、盖度、株高、生物量等参数;通过 SPSS 软件对植物群落的构成、物种多样性等相关指标进行分析,并运用最小显著性差异(LSD)法检验其差异显著性,以此分析公路施工对路域沿线植物种类、生长及多样性的影响。结果表明:研究区域调查到的 86 种植物以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、藏嵩草(*K. tibetica*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)重要值较高。比较两个调查区域以及同一区域在距离路域建设红线外 10 m 处和 500 m 处的差异,发现仅部分采样点香农指数及植物生物量有显著差异($P < 0.05$),说明此次调查的区域以及距离路域建设红线外不同范围的植物群落构成差别不大,路域建设对植被影响较小。9 月大部分采样点的植被总盖度、植物平均株高、植物生物量、Menhinick 指数相较于 6 月有显著提高($P < 0.05$),说明公路施工虽然造成局部破坏并影响周围自然环境,但路域建设红线外的植物通过自身适应自然修复并正常生长,周围施工并不影响植被的自然生长。综上所述,在严格控制施工行为的前提下,距离路域建设红线外不同范围内的植物群落及生长变化不大,生态系统破坏相对较小。

关键词:生态环境工程;高速公路;路域建设;植物种类;植物生长;生态修复;甘肃

中图分类号: X37; Q948.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)04-1002-13

Influence of Highway Construction on Plant Species, Growth and Diversity in Alpine Grassland Area

LI Yong-peng¹, JIA Ping-hai¹, YUNDAN Jia-cang¹, CHEN Zhi-hua¹, TIAN Pei^{2,3*}

(1. Transportation Bureau of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture, Gannan 747000, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: In order to reveal the influence of highway construction on the natural grassland and ecological system in Qinghai-Tibet Plateau, two representative construction points at a distance of 17 km which are ongoing construction area of S10 Zhuoni-Hezuo expressway in Gannan Tibetan

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-06-10 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 甘肃省交通运输厅科技项目(2021-07); 国家自然科学基金项目(31971768)

作者简介: 李永鹏(1989-), 男, 甘肃临潭人, 工程师, E-mail: 949662564@qq.com.

* 通讯作者: 田 沛(1979-), 女, 河南新郑人, 教授, 博士研究生导师, 农学博士, E-mail: tianp@lzu.edu.cn.

autonomous prefecture of Gansu province were investigated. The sampling sites were 10 and 500 m away from the construction red line, and the sampling dates were June and September 2021. Line transect method was used to collect the samples, and species composition, coverage, height and biomass of plant community were calculated; the composition of plant community and species diversity were analyzed by SPSS software, and the least significant difference (LSD) method was used to test the significance of the above indexes, meanwhile the influences of highway construction on plant species, growth and diversity were discussed. The results show that there are 86 plant species presenting in investigation sites and the important values of *Kobresia capillifolia*, *K. tibetica* and *Elymus nutans* are higher; there are no significant difference between two investigation sites or between two distances (10 and 500 m away from the red line of highway construction) in the same location for most of the indices; only Shannon index and biomass of plant have significant difference ($P < 0.05$) in a few sampling sites, suggesting that there is little difference of plant community composition in the investigation sites and the different distances away from the red line of highway construction. The vegetation height, average height, biomass and Menhinick index of plant in September are significantly higher ($P < 0.05$) than those in June, indicating that the plants away from the red line of highway construction recover naturally and grow normally through their own adaptation, although the highway construction partially destroys and affects the surrounding natural environment. In general, under strict control of construction behavior, plant communities and growth in different distances away from the red line of highway construction have little change, and the damages to the ecosystem are relatively small.

Key words: ecological environment engineering; highway; road construction; plant species; plant growth; ecological restoration; Gansu

0 引言

高速公路建设规模逐年攀升可以带动区域经济发展,为当地社会提供新的发展机遇,但其施工过程涉及的开挖路基、桥梁涵洞等施工行为不可避免地使植被遭到大范围破坏,造成地表裸露,土壤物理化学性质恶化,并时常伴有扬尘、噪音、废水排放等环境污染活动^[1]。这些问题使得路域生态系统的维系面临严峻的挑战,尤其对于高寒草原等生态脆弱区来说,若没有适宜的处理措施甚至可能引起不可逆的生态衰退。因此,基于可持续发展理念,开展公路施工与运维过程中生态环境的修复、重构、维系等研究具有重要意义。

研究表明,公路建设会直接导致植物群落层次缺失,结构错乱,土壤与植被间关系失衡,沿线群落退化,形成大量特殊、恶劣的生态系统^[2]。与此同时,在车流量、生境特征(路边原有植被和土壤特征)、风以及路面特征等多重因素影响下^[3-4],公路穿越周边区域的自然因素也将随之改变,植物的分布、群落组成以及物种入侵、隔离、迁移等生物行为均受

到不同程度的影响,典型表现为植被盖度、密度、物种组成和丰富度与相邻天然植被相比存在明显差异^[3,5-9]。此外,不同生态系统、不同道路建设类型的负面影响各有不同,即使在同一生态系统中,道路建设对其生态系统影响也是不尽相同的^[10-11]。不难看出,公路建设对于整片路域植物物种组成及多样性存在复杂、多样、长期的负面影响。针对这一工程问题,结合物理防护工程的混播植草、挂网客土喷播植草、植生袋等公路建后快速修复技术不断涌现,以期实现道路沿线生态环境的快速修复^[12]。然而,有关公路施工过程对路域建设红线外生态系统的影响研究相对较少,更是缺乏针对高寒区域及适合恶劣条件路域的公路生态影响恢复技术理论和方法,因此有必要展开有针对性的研究。

本文以甘肃省甘南藏族自治州在建的S10卓尼—合作高速公路(简称“S10卓合高速”)所处的高寒草原路域生态环境为研究对象,通过野外调查,全面梳理甘南藏族自治州草原自然植被中物种分布情况,遴选适用于高寒草原区域公路建设绿化防护的植物品种,分析公路施工对路域建设红线外不同时

空跨度下植物物种组成及多样性的影响,梳理高寒草原公路施工条件下路域生态维系的难点,并提出相应的建议,以期为保护高寒草原区域原有生态资源和沿线自然景观、维系路域生态环境和生物多样性提供指导。

1 研究区概况

甘南藏族自治州大部分地区属于黄河流域,境内主要河流有黄河、白龙江、洮河、大夏河,是甘肃省水资源富集区之一^[13]。甘南藏族自治州蕴含着丰富的草地资源,草地面积约为 $281.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占该自治州土地总面积的 70.28%,占甘肃省草地总面积的 17.51%,区域内动植物资源丰富,具有较高的生态保护和美学旅游价值^[14]。

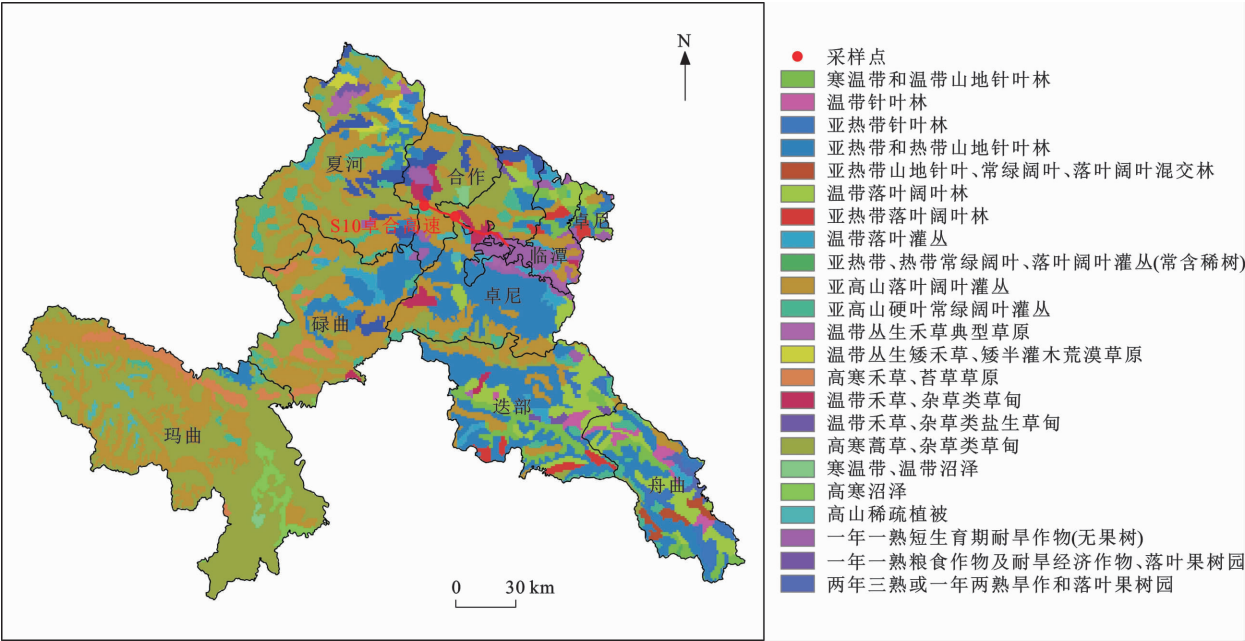
近年来,为了开发甘南藏族自治州丰富的旅游资源,促进乡村振兴,增加农牧民收入,大量公路交通项目建设在该自治州开展,其中包括 S10 卓合高速。S10 卓合高速地处青藏高原东北边缘,是西北内陆风沙防治区、黄土高原水土流失重点防治区与青藏高原高寒区的过渡地带,地势由西北向东南逐渐降低,海拔为 2 400~3 700 m^[15],属高原大陆性气候,年降水量为 400~800 mm,年平均气温为 1℃~13℃,最低气温接近-30℃,冻结期为 9 月至 10 月,解冻期为 3 月至 4 月,最大冻土深度为 147

cm。在地理位置、海拔、气温、土壤等因素的综合影响下,S10 卓合高速路域植被类型复杂多样(图 1)。主要草地类型为高寒草甸,并具有相当数量的杂草和灌丛,为高寒阴湿、气候恶劣、生态环境脆弱的高寒草原地区。

2 分析方法与数据处理

2.1 分析方法

本文采用样线法^[16]对植被物种组成及多样性进行统计调查,调查日期为 2021 年 6 月 19 日至 6 月 21 日和 2021 年 9 月 7 日至 9 月 9 日,调查地点为 S10 卓合高速沿线代表性路域 2 处直线距离 17 km 的施工点(图 2)。其中,施工点 1(8 标)位于卓尼县,地处青藏高原和黄土高原过渡带,植被类型为高寒嵩草、杂草类草甸;施工点 2(11 标)位于合作市,是典型的青藏高原高寒草甸区域,植被类型为高山稀疏植被。考虑到公路对邻近植被的影响程度随着离公路建设距离的增加而减小,在 200 m 内的影响尤为明显,而在 500 m 左右开始趋于稳定^[2,17]。因此,选取离公路建设红线(公路建筑区域边缘位置)外垂直距离 10 和 500 m 的未被施工破坏的区域,平行于公路路线区域设置样方,每个位点设置 4 个重复,样方面距为 100 m,样方面积为 1 m×1 m(图 2)。需要注意的是,8 标主线左侧,距离路域建



数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);图片绘制通过 ArcGIS10.8 软件与人工勾画完成

图 1 甘肃省甘南藏族自治州植被类型分布及 S10 卓合高速地理位置

Fig. 1 Distribution of Vegetation Types in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture of Gansu Province and Geographic Location of S10 Zhuoni-Hezuo Expressway

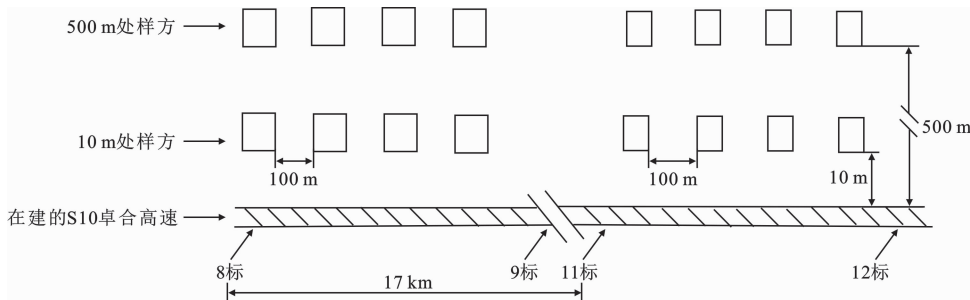


图 2 样方设置示意图
Fig. 2 Sketch of Plot Setting

设红线外垂直 10 m 处的样方标记为 8-10;8 标主线左侧,距离路域建设红线外垂直 500 m 处的样方标记为 8-500;11 标主线左侧,距离路域建设红线外垂直 10 m 处的样方标记为 11-10;11 标主线左侧,距离路域建设红线外垂直 500 m 处的样方标记为 11-500。

调查过程中记录每个样方出现的物种,以及样方中各物种的株数、株高、盖度、分盖度等指标。此外,将样方植被自地下 30 cm 整株挖出,分为地上和地下部分,称取鲜重,带回实验室在 65 ℃ 下烘干称重。

2.2 数据处理

根据调查内容计算物种重要值和多样性指数。指数类型包括综合指数、丰富度指数、均匀度指数和优势度指数。综合指数有香农(Shannon)指数、辛普森(Simpson)指数,用以评估样本的物种多样性;综合指数越高,表明多样性越复杂^[18]。丰富度指数主要为 Menhinick 指数,该指数不需要考虑研究面积的大小,强调了物种丰富度,具有直观的生态学意义^[19]。均匀度指数主要有 Evenness 指数和 Equitability 指数。Evenness 指数用以反映一个群落或生境中全部物种个体的分配状况,对物种丰富度敏感^[20];Equitability 指数反映各物种个体分配的均匀程度,取值范围为 0~1,如果所有物种观测值相同,则物种均匀程度最高^[21]。优势度指数主要有 Berger-Parker 指数和 Dominance 指数。Berger-Parker 指数具有直观简单、计算容易的特点,综合反映丰富度、均匀度和优势度,在大的群落中(物种种数大于 100),Berger-Parker 指数与种数无关,但在小的群落中,随种数增加,Berger-Parker 指数会下降^[22];Dominance 指数减小了个体测定值较小种的影响,增大了优势物种的影响,综合反映丰富度、均匀度和优势度^[23]。其计算公式^[18-19,21-24]分别为

$$I_v = \frac{A+B+C}{3} \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right)^2 \quad (3)$$

$$M_n = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

$$E = \frac{[1 - \sum_{i=1}^S (N_i/N)^2]}{1 - 1/S} \quad (5)$$

$$e = - \frac{\sum_{i=1}^S N_i [\ln(N_i/N)]/N}{S} \quad (6)$$

$$I_{BP} = \frac{N_{\max}}{N} \quad (7)$$

$$D_o = \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right)^2 \quad (8)$$

式中: I_v 为物种重要值; H 为香农指数; D 为辛普森指数; M_n 为 Menhinick 指数; E 为 Evenness 指数; e 为 Equitability 指数; I_{BP} 为 Berger-Parker 指数; D_o 为 Dominance 指数; A 为相对盖度; B 为相对频度; C 为相对高度; S 为每个样方的物种种数; N 为 S 种物种的重要值之和; N_i 为第 i 种物种的重要值; N_{\max} 为重要值的最大值。

本文运用 SPSS 23.0 软件对植物群落盖度、高度、生物量、物种多样性等指标随着位置(8 标和 11 标)和距离路域建设距离(10 m 和 500 m)的差异进行单因素 ANOVA 方差分析,采用最小显著性差异(Least Significant Difference, LSD)法检验其差异显著性,结果用均值±标准误差表示。而各指标在季节(6 月和 9 月)之间的差异采用独立样本 t 检验进行分析,显著性定义在 95% 置信区间,并利用 Sigmaplot 12.5 软件作图。

3 结果分析

3.1 植被物种组成结构

植被物种调查结果表明:6 月共调查到 48 属 64

物种,其中以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)和藏嵩草(*K. tibetica*)为主;而在9月共有73属86物种(表1)。其中,线叶嵩草、藏嵩草和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)重要值较高,为群落中的主要优势物种。而部分植物只在8标的样方中出现,比如纤毛鹅观草(*Roegneria ciliaris*)、艾蒿(*Artemisia argyi*);部分植物仅在距离路域建设红线外垂直10 m处的样方中出现,比如高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、剪股颖(*Agrostis matsumurae*)、羊茅(*Festuca*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、甘露子(*Stachys sieboldii*)等。11标的物种种数相对于8标较少,而部分植物仅在距离路域建设红线外垂直10 m处的样方中出现,比如羊茅(*Festuca*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)和椭圆叶花锚(*Halenia elliptica*)等,部分植物仅在距离路域建设红线外垂直500 m处的样方中出现,比如高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、湿生扁蕾(*Gentianopsis paludosa*)、高山韭(*Allium sikkimens*)和高原紫菀(*Aster alpinus*),且各物种重要值也不一样。

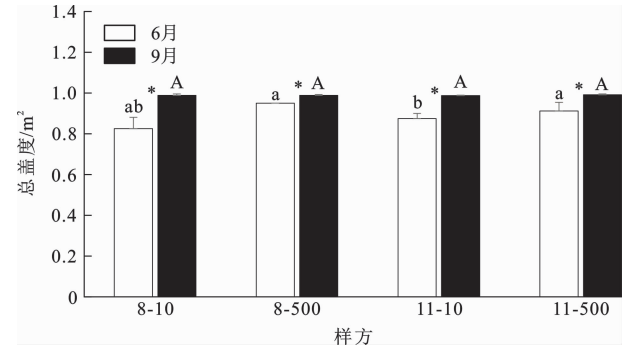
3.2 植物群落基本参数

3.2.1 植被总盖度

比较同一季节同样距离的样方在2个标段间的差异发现:无论距离路域建设红线外垂直10 m处还是500 m处,8标和11标两个调查地点之间的植被总盖度均无显著差异(图3)。比较同一季节同一标段距离路域建设红线外不同距离的样方差异发现:6月调查时,8标距离路域建设红线外垂直10 m处和500 m处样方之间植被总盖度无显著差异,而11标距离路域建设红线外垂直10 m处样方的植被总盖度显著低于距离路域建设红线外垂直500 m处样方的植被总盖度($P<0.05$);而9月调查时,无论是8标还是11标,其距离路域建设红线外垂直10 m处和500 m处样方的植被总盖度之间无显著差异(图3)。比较同一采样点在6月和9月的差异发现:所有采样点9月植被总盖度均高于6月($P<0.05$)。

3.2.2 植物株高

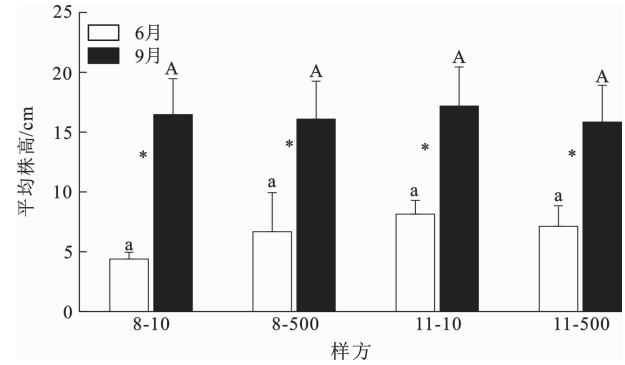
比较同一季节同样距离样方在2个标段间的差异发现:无论距离路域建设红线外垂直10 m处还是500 m处,8标和11标两个调查地点之间的植物平均株高均无显著差异(图4)。比较同一季节同一标段距离路域建设红线外不同距离的样方差异发现:无论是8标还是11标,距离路域建设红线外垂



图中不同小写字母代表6月各采样点在0.05显著性水平下差异显著,相同小写字母代表在0.05显著性水平下差异不显著;相同大写字母代表9月各采样点在0.05显著性水平下差异不显著; *表示6月和9月同一采样点在0.05显著性水平下差异显著

图3 不同时间不同采样点的植被总盖度直方图

Fig. 3 Histogram of Vegetative Coverage of Different Sampling Locations in Different Time



图中相同小写字母代表6月各采样点在0.05显著性水平下差异不显著;相同大写字母代表9月各采样点在0.05显著性水平下差异不显著; *表示6月和9月同一采样点在0.05显著性水平下差异显著

图4 不同时间不同采样点的植物平均株高直方图

Fig. 4 Histogram of Plant Average Height of Different Sampling Locations in Different Time

直10 m处和500 m处的植物平均株高在6月和9月无显著差异(图5)。比较同一采样点在6月和9月的差异发现:所有采样点9月植物平均株高显著高于6月($P<0.05$)。

3.2.3 植物生物量

比较同一季节同样距离样方在2个标段间的差异发现:无论距离路域建设红线外垂直10 m处还是500 m处,仅在9月距离路域建设红线外垂直500 m处的样方,11标的植物生物量显著高于8标($P<0.05$)(图5)。比较同一季节同一标段距离路域建设红线外不同距离样方的差异发现:仅9月调查时,11标距离路域建设红线外垂直500 m处的植物总生物量显著高于距离路域建设红线外垂直10 m处的植物生物量($P<0.05$)。比较同一采样点在

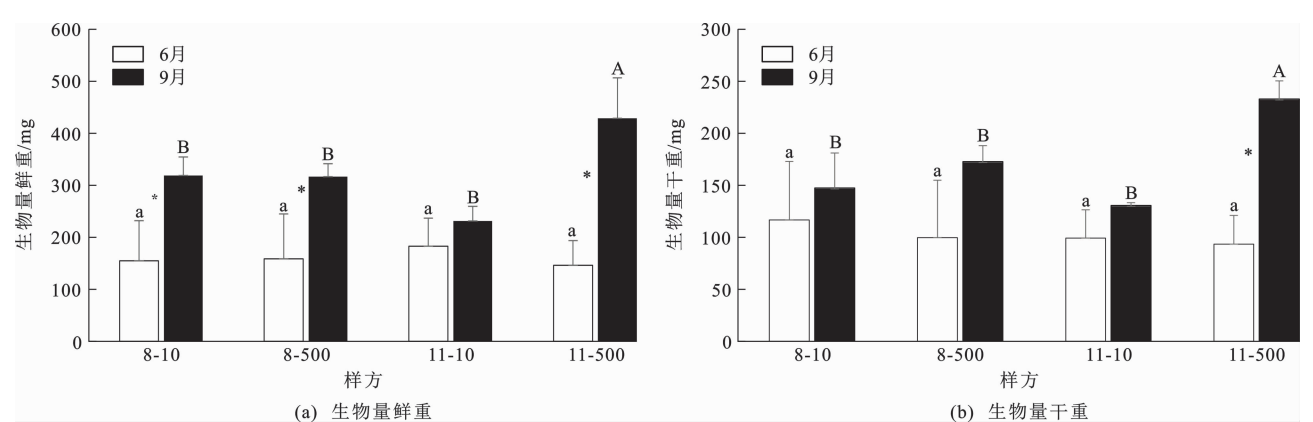
表 1 9 月两个调查地点的主要物种组成及其重要值

Table 1 Composition and Importance Value of the Main Species in Two Investigation Sites in September

物种属	物种种类	8 标不同范围的物种重要值		11 标不同范围的物种重要值	
		距离路域建设 红线外垂直 10 m 处	距离路域建设 红线外垂直 500 m 处	距离路域建设 红线外垂直 10 m 处	距离路域建设 红线外垂直 500 m 处
嵩草属 <i>Kobresia</i>	线叶嵩草 <i>K. capilli folia</i>	9.0	19.8	16.1	8.9
	藏嵩草 <i>K. tibetica</i>	6.8	10.0	3.3	15.5
披碱草属 <i>Elymus</i>	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	8.5	7.0	7.7	5.7
剪股颖属 <i>Agrostis</i>	剪股颖 <i>A. matsumurae</i>	8.0			
	华北剪股颖 <i>A. clavata</i>	7.2			
鹅观草属 <i>Roegneria</i>	纤毛鹅观草 <i>R. ciliaris</i>	7.7	3.2		
唐松草属 <i>Thalictrum</i>	芸香叶唐松草 <i>T. rutifolium</i>	6.7			2.5
洽草属 <i>Koeleria</i>	洽草 <i>K. cristata</i>	5.4	5.9	6.2	6.3
茴香属 <i>Cnidium</i>	野茴香 <i>C. monnieri</i>	5.3			
风毛菊属 <i>Saussurea</i>	中华风毛菊 <i>S. chinensis</i>	5.2	3.3		
蒿属 <i>Artemisia</i>	艾蒿 <i>A. argyi</i>	4.8	3.1		
拉拉藤属 <i>Galium</i>	猪殃殃 <i>G. aparine</i> Linn	4.7	3.0		2.5
委陵菜属 <i>Potentilla</i>	鹅绒委陵菜 <i>P. anserina</i>	4.5	1.8	2.8	
	多裂委陵菜 <i>P. multifida</i>	4.4	5.5	3.0	3.5
	金露梅 <i>P. fruticosa</i>	3.0	3.8	2.8	3.7
	珍珠委陵菜 <i>P. chinensis</i>				0.8
银莲花属 <i>Anemone</i>	草玉梅 <i>A. rivularis</i>	4.4	3.3	3.5	2.1
早熟禾属 <i>Poa</i>	西藏早熟禾 <i>P. tibetica</i>	4.4			
	早熟禾 <i>P. annua</i>	4.1	5.1	5.1	3.3
	草地早熟禾 <i>P. pratensis</i>	2.3		5.3	3.3
肉果草属 <i>Lancea</i>	肉果草 <i>L. tibetica</i>	4.3	1.9	2.5	3.0
黄鹌菜属 <i>Youngia</i>	无茎黄鹌菜 <i>Y. simulatrix</i>	4.3			
毛茛属 <i>Ranunculus</i>	高原毛茛 <i>R. tanguticus</i>	4.3			6.7
	毛茛 <i>R. japonicus</i>		1.0		
羊茅属 <i>Festuca</i>	羊茅 <i>F. ovina</i>	4.0		3.6	
海乳草属 <i>Glaux</i>	海乳草 <i>G. maritima</i>	4.0		2.9	1.1
火绒草属 <i>Leontopodium</i>	火绒草 <i>L. leontopodioides</i>	3.6	2.7	2.0	12.3
	矮火绒草 <i>L. nanum</i>	2.9	3.1	1.7	
花锚属 <i>Halenia</i>	椭圆叶花锚 <i>H. elliptica</i>	3.4	4.7	2.3	
侧金盏花属 <i>Adonis</i>	蓝侧金盏花 <i>A. coerulea</i>	3.1	4.5	3.6	2.3
野豌豆属 <i>Vicia</i>	广布野豌豆 <i>V. cracca</i>	2.9	1.6		
	野豌豆 <i>V. villosa</i>	2.7	1.6	2.2	1.6
葱属 <i>Allium</i>	高山韭 <i>A. sikkimens</i>	2.8	2.3		2.3
	蓝花韭 <i>A. beesianum</i>			2.8	
酸模属 <i>Rumex</i>	水生酸模 <i>R. aquaticux.</i>	2.8			
小米草属 <i>Euphrasia</i>	小米草 <i>E. pectinata</i> Tenore	2.7		2.5	3.1
扁蕾属 <i>Gentianopsis</i>	湿生扁蕾 <i>G. paludosa</i>	2.5	3.2		2.3
决明属 <i>Thermopsis</i>	披针叶黄华 <i>T. lanceolata</i>	2.5			
龙胆属 <i>Gentiana</i>	黄白龙胆 <i>G. prattii</i> Kusnez	2.4			
	线叶龙胆 <i>G. lawrencei</i> var. <i>farreri</i>		2.0	3.1	2.6
车前属 <i>Plantago</i>	平车前 <i>P. depressa</i> willd	2.4			
紫菀属 <i>Aster</i>	高原紫菀 <i>A. alpinus</i> Linn.	2.3	3.4		3.0

续表 1

物种属	物种种类	8 标不同范围的物种重要值		11 标不同范围的物种重要值	
		距离路域建设 红线外垂直 10 m 处	距离路域建设 红线外垂直 500 m 处	距离路域建设 红线外垂直 10 m 处	距离路域建设 红线外垂直 500 m 处
卷耳属 <i>Cerastium</i>	卷耳 <i>C. glomeratum</i> Thuil	2.2			
银莲花属 <i>Anemone</i>	小花草玉梅 <i>A. rivularis</i> var. <i>flore-minore</i>	2.1	3.5	4.4	3.0
蒲公英属 <i>Taraxacum</i>	蒲公英 <i>T. mongolicum</i>	2.0			
米口袋属 <i>Gueldenstaedtia</i>	米口袋 <i>G. multiflora</i> Bge	2.0			
水苏属 <i>Stachys</i>	甘露子 <i>S. sieboldii</i> Miq	1.9			
毛莲菜属 <i>Picris</i>	日本毛莲菜 <i>P. japonica</i>	1.8	1.7	2.3	2.1
水团花属 <i>Adina</i>	水杨梅 <i>A. rubella</i>	1.8		3.1	
乌头属 <i>Aconitum</i>	露蕊乌头 <i>A. gymnandrum</i>	1.8			
马先蒿属 <i>Pedicularis</i>	甘肃马先蒿 <i>P. Linn</i>	1.5		1.9	1.5
婆婆纳属 <i>Veronica</i>	唐古拉婆婆纳 <i>V. vandelliioides</i>	1.4		1.5	2.3
	细叶婆婆纳 <i>V. linarii folia</i>			1.2	4.6
棘豆属 <i>Oxytropis</i>	甘肃棘豆 <i>O. kansuensis</i> Bunge	1.4	2.0	2.5	1.3
积雪草属 <i>Centella</i>	积雪草 <i>C. asiatica</i>	1.4	1.9	1.5	2.1
扁蓿豆属 <i>Medicago</i>	扁蓿豆 <i>M. ruthenica</i>	1.4	1.3		
大戟属 <i>Euphorbia</i>	甘青大戟 <i>E. micractina</i> Boiss	1.3	1.1	2.5	2.6
菊属 <i>Dendranthema</i>	齐继菊 <i>D. Morifolium</i>	1.1			
	甘菊 <i>D. Matricaria recutita</i>		4.7		
棘豆属 <i>Lathyrus</i>	五麦山黧豆 <i>L. quinquenervius</i>	1.1			
胡萝卜属 <i>Daucus</i>	野胡萝卜 <i>D. carota</i>	0.4	1.7	1.9	2.3
发草属 <i>Deschampsia</i>	发草 <i>D. caespitosa</i>		8.1	7.8	5.4
藁草属 <i>Carex.</i>	白颖苔草 <i>C. rigescens</i>		6.8		
	青绿苔草 <i>C. breviculmis</i>		3.5	3.4	
	黑褐穗苔草 <i>C. atrofusca</i> Schkuhr		2.5	2.9	2.7
瞿麦属 <i>Ragged</i>	高山知更团更草 <i>R. Robin</i>		3.9		
亚菊属 <i>Ajanía</i>	细叶亚菊 <i>A. tenuifolia</i>		3.9		
	铺伞亚菊 <i>A. khartensis</i>			2.5	2.0
蒿属 <i>Artemisia</i>	冷蒿 <i>A. frigida</i> Willd		3.8		
风毛菊属 <i>Saussurea</i>	厨宝风毛菊 <i>S. japonica</i>		3.0		
柳叶菜属 <i>Epilobium</i>	西山柳叶菜 <i>E. hirsutum</i>		2.8		
蓼属 <i>Polygonum</i>	拳蓼 <i>p. yunnanensis</i>		2.6		
	珠芽蓼 <i>P. viviparum</i>		1.2	13.7	10.6
橐吾属 <i>Ligularia</i>	黄州橐吾 <i>L. virgaurea</i>		2.5		
香青属 <i>Anaphalis</i>	乳白香青 <i>A. lacteal</i>		2.5		3.8
柴胡属 <i>Bupleurum</i>	柴胡 <i>B. chinense</i>		2.2	2.7	2.4
狼毒属 <i>Stellera</i>	狼毒 <i>S. chamaejasme</i> Linn		1.7		
山莓草属 <i>Sibbaldia</i>	癭伴山莓草 <i>S. procumbens</i> var <i>aphanopetala</i>			3.9	2.3
喉毛花属 <i>Comastoma</i>	喉毛花 <i>C. pulmonarium</i>			2.7	2.2
梅花草属 <i>Parnassia</i>	细叉梅花草 <i>P. oreophila</i>			2.0	6.6
珍珠菜属 <i>Lysimachia</i>	珍珠蓝尾菜 <i>L. clethroides</i>				3.9
藁本属 <i>Ligusticum</i>	辽藁本 <i>L. jeholense</i>				3.7
绣线菊属 <i>Spiraea</i>	高山绣线菊 <i>S. alpina</i>				3.1
香茅属 <i>Cymbopogon</i>	芸香叶松草 <i>C. Lemongrass</i>				2.7
碱毛茛属 <i>Halerpestes</i>	三裂叶碱毛茛 <i>H. tricuspis</i>				0.9



图中相同小写字母代表 6 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著;不同大写字母代表 9 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异显著, 相同大写字母代表在 0.05 显著性水平下差异不显著; * 表示 6 月和 9 月同一采样点在 0.05 显著性水平下差异显著

图 5 不同时间不同采样点的植物生物量鲜重和干重直方图

Fig. 5 Histograms of Plant Fresh Biomass and Dry Biomass of Different Sampling Locations in Different Time

6 月和 9 月的差异发现:除 11 标距离路域建设红线外垂直 10 m 处的样方外,所有采样点 9 月植物生物量鲜重均显著高于 6 月($P<0.05$);而 11 标距离路域建设红线外垂直 500 m 处的样方 9 月植物生物量干重显著高于 6 月($P<0.05$)。

3.3 植被物种多样性

3.3.1 香农指数

比较同一季节同样距离样方在 2 个标段的差异发现:无论距离路域建设红线外垂直 10 m 处还是 500 m 处,仅 9 月距离路域建设红线外垂直 10 m 处的样方,8 标的香农指数显著高于 11 标($P<0.05$) (图 6)。比较同一季节同一标段距离路域建设红线外不同距离样方的差异发现:仅 9 月调查时,8 标距离路域建设红线外垂直 10 m 处的香农指数显著高于距离路域建设红线外垂直 500 m 处的香农指数($P<0.05$)。比较同一采样点在 6 月和 9 月的差异发现:8 标距离路域建设红线外垂直 10 m 处的样方和 11 标距离路域建设红线外垂直 500 m 处的样方,其 9 月香农指数均显著高于 6 月($P<0.05$);而 8 标距离路域建设红线外垂直 10 m 处的样方,其 9 月辛普森指数显著高于 6 月($P<0.05$)。

3.3.2 Menhinick 指数

比较同一季节同样距离样方在 2 个标段的差异发现:无论距离路域建设红线外垂直 10 m 处还是 500 m 处,8 标和 11 标之间的 Menhinick 指数均无显著差异(图 7)。比较同一季节同一标段距离路域建设红线外不同距离的样方差异发现:在 2 个调查时间,无论是 8 标还是 11 标,距离路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处的 Menhinick 指数无显著差异(图 7)。比较同一采样点在 6 月和 9 月的差异

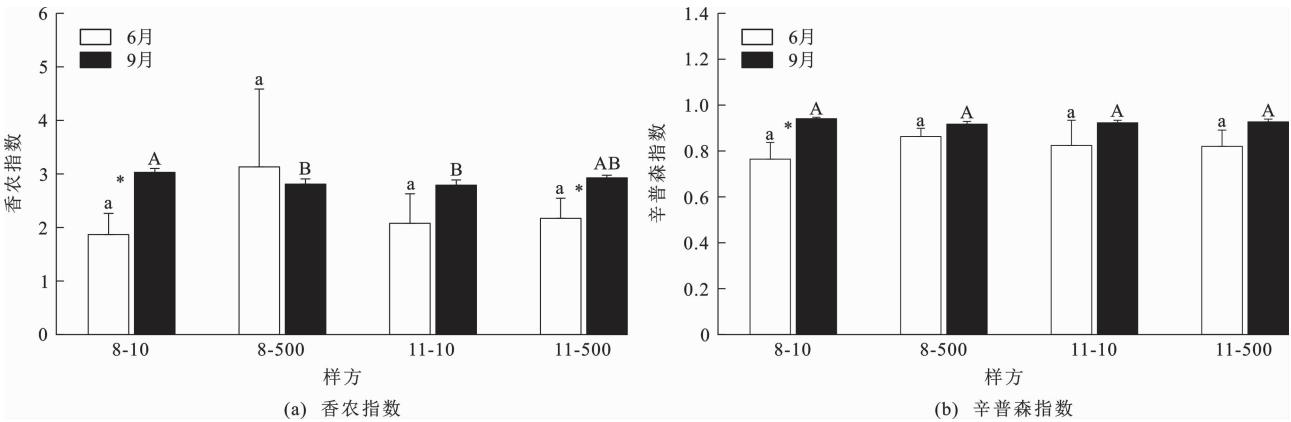
发现:所有采样点 9 月 Menhinick 指数显著高于 6 月($P<0.05$)。

3.3.3 均匀度指数和优势度指数

比较同一季节同样距离样方在 2 个标段的差异发现:无论距离路域建设红线外垂直 10 m 处还是 500 m 处,8 标和 11 标之间的均匀度指数(Equitability 指数和 Evenness 指数)和优势度指数(Berger-Parker 指数和 Dominance 指数)均无显著差异(图 8、9)。比较同一季节同一标段距离路域建设红线外不同距离样方的差异发现:无论是 8 标还是 11 标,距离路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处的均匀度指数(Equitability 指数和 Evenness 指数)和优势度指数(Berger-Parker 指数和 Dominance 指数)在 6 月和 9 月均无显著差异(图 8、9)。比较同一采样点在 6 月和 9 月的差异发现:8 标距离路域建设红线外垂直 10 m 处和 11 标距离路域建设红线外垂直 500 m 处,6 月 Equitability 指数显著高于 9 月($P<0.05$),说明季节生长变化对 Equitability 指数有显著影响。

4 路域生态维系的难点与建议

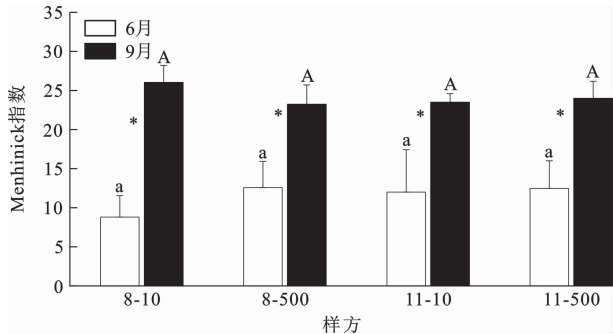
甘南藏族自治州高寒阴湿、气候恶劣,自然条件严酷,生态环境脆弱,森林、草地、湿地等生态系统自我恢复能力差,自然修复周期长^[25]。随着高寒草原公路的大面积建设,草地退化明显,生物多样性受到威胁,路域生态维系面临严重挑战。因此,在高寒草原地区进行各种交通项目建设的同时,还应着力保护原有的生态资源和沿线的自然景观,尽量减少对当地自然环境的破坏,对不得不破坏的部分区域,尽快实施适宜于当地脆弱环境的生态修复工程建设,



图中相同小写字母代表 6 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著;不同大写字母代表 9 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异显著, 相同大写字母代表在 0.05 显著性水平下差异不显著; * 表示 6 月和 9 月同一采样点在 0.05 显著性水平下差异显著

图 6 不同时间不同采样点的香农指数和辛普森指数直方图

Fig. 6 Histograms of Shannon Index and Simpson Index of Different Sampling Locations in Different Time



图中相同小写字母代表 6 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著;相同大写字母代表 9 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著; * 表示 6 月和 9 月同一采样点在 0.05 显著性水平下差异显著

图 7 不同时间不同采样点的 Menhinick 指数直方图
Fig. 7 Histogram of Menhinick Index of Different Sampling Locations in Different Time

促进当地交通项目建设与生态系统保护的协调发展,对于维系当地生态治理成果至关重要。然而,高寒草原公路建设条件下路域生态维系还存在可用于生态修复的乡土草种培育获取困难、外界因素干扰等问题。

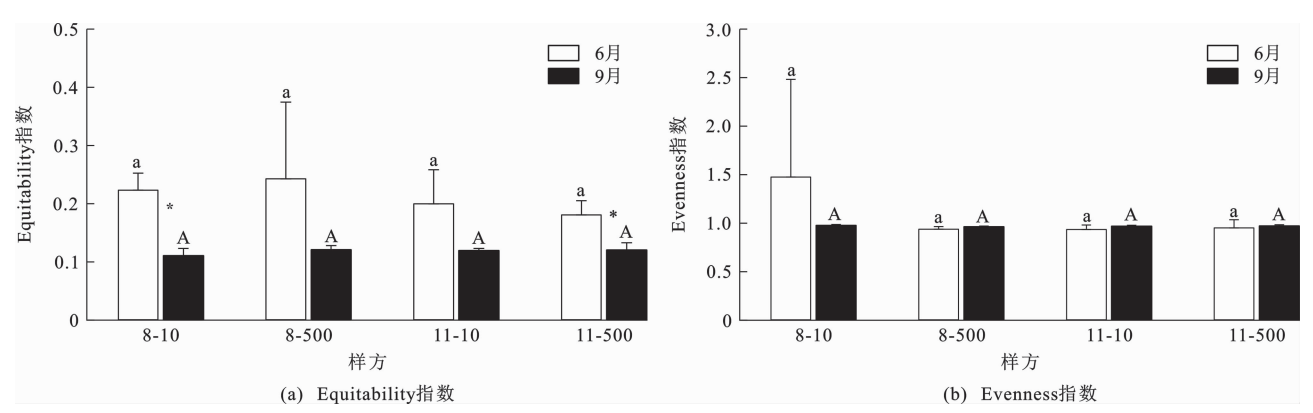
4.1 可用于生态修复的乡土草种培育获取困难

植物重要值是反映植物在群落中所处地位重要程度的指标,其值越大表明该物种在群落中优势越大^[26-27]。本文调查中,线叶嵩草、藏嵩草和垂穗披碱草重要值较高,这些植物生长较好,对当地生态环境有高度的适应性,可利用这些乡土草种进行公路边坡修复,尤其是垂穗披碱草已在甘南藏族自治州生态修复中发挥了重要作用^[28-29]。莎草科植物高山嵩草、矮生嵩草具有很强的抗逆性,是青藏高原所特有的抗旱耐寒品种,在草地群落中具有很强的稳定

性^[30]。这些乡土草在我国资源丰富,且对当地生态环境有高度的适应性,能避免生物入侵^[31-32]。由于受青藏高原极端环境条件限制,用于生态治理的乡土草种田几近空缺^[33]。受草种生产的限制,能用于草地恢复的植物物种仍然偏少。目前能够大量获取的乡土草种只有垂穗披碱草、老芒麦(*E. sibiricus*)、中华羊茅(*F. sinensis*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)等 10 种禾本科草种,其他科属植物种源不易获取^[34-35]。将乡土草种应用于青藏高原高速公路生态修复,首先要解决草类植物种子等一系列问题。因此,加强高寒植物群落及植物特性研究,保护好当地的优良种质资源,加强草类植物育种工作,加强乡土草种驯化栽培,建立大规模的种子生产基地^[33,36],可为路域生态治理提供优良的草种,使沿线次生裸地早日恢复并达到生态平衡。

4.2 外界因素干扰

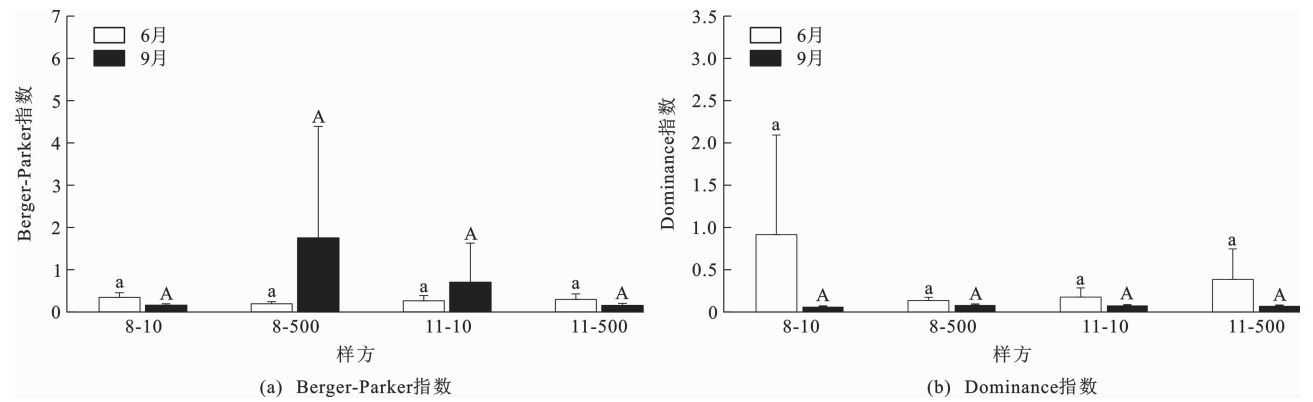
公路建设对生态系统造成负面影响,可以改变草地的微生态环境和植物的群落结构^[37]。本文调查表明,虽然公路施工直接破坏了建设红线内的部分草原,但是在距离路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处自然区域,其物种的生物量及多样性没有显著差异。在公路建设期间严格控制施工行为的前提下,虽然施工区域的原生地表植被遭受严重破坏,但是对路域建设红线外草原区域的植物群落及生长影响较小。已有研究表明,在河北雾灵山自然保护区的调查中,公路建设区域距离路肩 30 m 以外的区域,草本植物群落物种组成以及多样性指数基本无影响,而距离路肩 15 m 的区域,公路建设对植物群落生长的干扰作用也几乎为 0^[38]。此外,在



图中相同小写字母代表 6 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著;相同大写字母代表 9 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著;* 表示 6 月和 9 月同一采样点在 0.05 显著性水平下差异显著

图 8 不同时间不同采样点的 Equitability 指数和 Evenness 指数直方图

Fig. 8 Histograms of Equitability Index and Evenness Index of Different Sampling Locations in Different Time



图中相同小写字母代表 6 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著;相同大写字母代表 9 月各采样点在 0.05 显著性水平下差异不显著

图 9 不同时间不同采样点的 Berger-Parker 指数和 Dominance 指数直方图

Fig. 9 Histograms of Berger-Parker Index and Dominance Index of Different Sampling Locations in Different Time

东北季冻区草炭土湿地环境的研究中发现,线路工程的扰动并未改变植物群落组成,只改变了植物群落 α 多样性指数,但并不影响植物群落 β 多样性指数^[39]。在黄河三角洲的调查研究表明,与远离道路边界的自然区域(>200 m)相比,道路边界的物种丰富度和多样性显著高于远离道路边界的区域,并且随着该距离的增加而降低。综上所述,公路对邻近植被的影响程度随着距离路域建设红线的距离增加而减小,且距离路域建设红线外垂直 500 m 的区域基本不受影响。

另外,与距离路域建设红线外垂直 10 m 区域的对比研究表明,其与 500 m 区域的差异不大,说明在严格控制施工行为的前提下,距离路域建设红线外不同距离的植物群落及生长变化不大,生态系统破坏相对较小。同时,在不同季节的比较中,9 月部分采样点的植被高度、植物平均株高、植物生物量比 6 月有显著提高($P<0.05$),随着植物的生长,植物群落多样性增加^[40],说明周围施工对周边群落影

响不是特别严重。这也表明青藏高原高寒区公路建设对未破坏的草原区域的植物群落及生长影响较小。因此,在进行工程规划时,尽量缩小施工范围,会为后续生态恢复节省巨大的经济成本。董清福等研究认为,在公路路域土质环境下,经自然恢复演替到草、灌丛植物群落至少需要 20 年,岩质边坡至少需要千百年^[41]。因此,若不及时对破坏的生态进行恢复和治理,不仅影响路域本身的生态和景观环境,还将直接影响区域的生态环境以及高速公路的运营安全。建议路域生态建设应与主体工程同步进行,根据所在区域的地形地貌、气候等因素,在植物生长季节科学合理地做好物种的选配及先进技术的应用,确保生态建设工程的质量,以快速修复被破坏的生态环境。

5 结 语

本文以甘肃省甘南藏族自治州在建的 S10 卓尼—合作高速公路代表性路域的 2 个施工点以及同

一路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处为采样点,采用样线法调查统计了上述 4 个点位的植被物种组成及多样性,分析了 2 个调查路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处以及同一取样点不同季节的植被群落组成及生长的差异。

(1)研究区域内线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、藏嵩草(*K. tibetica*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)重要值较高,说明这 3 种乡土草种对甘南藏族自治州的生态环境具有高度的适应性,可利用其进行公路边坡修复。

(2)2 个调查路域建设红线外垂直 10 m 处和 500 m 处的草地物种生物量和多样性变化较小,说明路域建设对植被影响和生态系统破坏相对较小。

(3)同一取样点 9 月份的植被高度、植物平均株高、植物生物量、Menhinick 指数较 6 月份有显著提高,说明公路施工虽然局部破坏并影响周围自然环境,但并不影响植被的自然生长,公路建设期间严格控制施工行为能有效削弱其对路域生态环境的负面影响。

(4)以上调查研究取得的数据和结论均发生在公路建设施工期间,但从工程全寿命周期和价值工程角度考虑,下一步应研究公路建成通车后的运营期间,因汽车尾气排放、交通量的逐年增加、危化液体泄漏、日常公路养护行为等多种因素对公路路域植物物种、生物多样性、生态环境、水文地质的影响变化。同时,应有针对性地研究路域系统碳汇平衡,以降低建设期公路碳排放,实现公路全寿命全过程碳中和。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 郝英玲. 三江源地区公路建设对植被的影响分析[J]. 青海交通科技, 2021, 33(4): 34-38.
HAO Ying-ling. Impact of Expressway Construction on Vegetation in Sanjiangyuan Area[J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2021, 33(4): 34-38.
- [2] 胡永歌. 豫南高速公路边坡植物景观调查及优化分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
HU Yong-ge. Investigation and Optimization of Plant Landscape on the Slopes Along Highways in Southern Henan[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018.
- [3] TROMBULAK S C, FRISSELL C A. Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities[J]. Conservation Biology, 2000, 14(1):

18-30.

- [4] FORMAN R T T. Estimate of the Area Affected Ecologically by the Road System in the United States[J]. Conservation Biology, 2000, 14(1): 31-35.
- [5] ANGOLD P G. The Impact of a Road Upon Adjacent Heathland Vegetation: Effects on Plant Species Composition[J]. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(2): 409-417.
- [6] HANSEN M J, CLEVENGER A P. The Influence of Disturbance and Habitat on the Presence of Non-native Plant Species Along Transport Corridors[J]. Biological Conservation, 2005, 125(2): 249-259.
- [7] HOVD H, SKOGEN A. Plant Species in Arable Field Margins and Road Verges of Central Norway[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 110(3/4): 257-265.
- [8] TRUSCOTT A M, PALMER S, MCGOWAN G M, et al. Vegetation Composition of Roadside Verges in Scotland: The Effects of Nitrogen Deposition, Disturbance and Management[J]. Environmental Pollution, 2005, 136(1): 109-118.
- [9] O'FARRELL P J, MILTON S J. Road Verge and Rangeland Plant Communities in the Southern Karoo: Exploring What Influences Diversity, Dominance and Cover[J]. Biodiversity & Conservation, 2006, 15(3): 921-938.
- [10] 冯 丽, 李新荣, 郭 群, 等. 腾格里沙漠东南缘公路对路域植被物种组成的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1114-1120.
FENG Li, LI Xin-rong, GUO Qun, et al. Effects of Highway on the Vegetation Species Composition Along a Distance Gradient from Road Edge in South-eastern Margin of Tenge'er Desert[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1114-1120.
- [11] 刘 杰, 崔保山, 董世魁, 等. 公路建设干扰下的生态系统变化及其机理[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 31-36.
LIU Jie, CUI Bao-shan, DONG Shi-kui, et al. Ecosystem Changes and Their Mechanisms Caused by Disturbances of Highway Construction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(2): 31-36.
- [12] SHEN Y F, LI Q, PEI X J, et al. Ecological Restoration of Engineering Slopes in China: A Review[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5354.
- [13] 张志强, 孙成权, 王学定, 等. 论甘南高原的生态保护、生态建设与可持续发展[J]. 科技导报, 2000, 18(8): 30-33.
ZHANG Zhi-qiang, SUN Cheng-quan, WANG Xue-

- ding, et al. On Ecological Protection Ecological Construction and Sustainable Development of South Gansu Plateau[J]. Science & Technology Review, 2000, 18(8):30-33.
- [14] MENG B P, LIANG T G, YI S H, et al. Modeling Alpine Grassland Above Ground Biomass Based on Remote Sensing Data and Machine Learning Algorithm: A Case Study in East of the Tibetan Plateau, China [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 13: 2986-2995.
- [15] 崔霞, 宋清洁, 张瑶瑶, 等. 基于高光谱数据的高寒草地土壤有机碳预测模型研究[J]. 草业学报, 2017, 26(10):20-29.
- CUI Xia, SONG Qing-jie, ZHANG Yao-yao, et al. Estimation of Soil Organ Carbon Content in Alpine Grassland Using Hyperspectral Data[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(10):20-29.
- [16] 刘杰, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区高速公路建设对沿线植物生物量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(1):83-90.
- LIU Jie, CUI Bao-shan, YANG Zhi-feng, et al. Effects Caused by Highway Construction on Plant Biomass of Roadsides in Longitudinal Range-gorge Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1):83-90.
- [17] 梁凯旋, 章桂芳, 李红中, 等. 基于植被指数的公路路域界限[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(2):101-109.
- LIANG Kai-xuan, ZHANG Gui-fang, LI Hong-zhong, et al. The Road-region Boundary Based on Vegetation Index[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(2):101-109.
- [18] 杨星晨, 雷少刚, 徐军, 等. 生物多样性指数遥感制图方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6):105-113.
- YANG Xing-chen, LEI Shao-gang, XU Jun, et al. Remote Sensing Mapping of Biodiversity Index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6):105-113.
- [19] 徐国巧, 马娇娇, 陈哲, 等. 疏伐转化对山杨林分林下植物多样性的影响[J]. 防护林科技, 2022(2):19-23.
- XU Guo-qiao, MA Jiao-jiao, CHEN Zhe, et al. Effects of Thinning Transformation on Understory Plant Diversity of Populus Davidiana Forest [J]. Protection Forest Science and Technology, 2022(2):19-23.
- [20] 周笛轩, 林永标, 汪雁佳, 等. 南亚热带不同人工林生态系统服务功能评估[J]. 生态环境学报, 2021, 30(5):907-919.
- ZHOU Di-xuan, LIN Yong-biao, WANG Yan-jia, et al. Assessment of Main Ecosystem Services in Subtropical Plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(5):907-919.
- [21] 张喜, 王莉莉, 刘延惠, 等. 喀斯特天然林植物多样性指数和土壤理化指标的相关性[J]. 生态学报, 2016, 36(12):3609-3620.
- ZHANG Xi, WANG Li-li, LIU Yan-hui, et al. Correlation on Plant Diversity Indices and Soil Physical and Chemical Indicators of Karst Natural Forest, Southern Guizhou Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12):3609-3620.
- [22] 张喜, 霍达, 向凯旋, 等. 样地面积对黔中喀斯特石漠灌丛植物多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5):1305-1313.
- ZHANG Xi, HUO Da, XIANG Kai-xuan, et al. The Effect of Plot Size on Shrub Plant Diversity in a Karst Desertification Area, Central Guizhou Province, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5):1305-1313.
- [23] WHITTAKER R H. Evolution of Species Diversity in Land Communities[J]. Evolutionary Biology, 1977, 10:1-67.
- [24] SMITH B, WILSON J B. A Consumer's Guide to Evenness Indices[J]. Oikos, 1996, 76(1):70-82.
- [25] 马悦, 何洪鸣, 赵宏飞. 基于GIS和RUSLE的甘南州土壤侵蚀时空演变[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3):37-46.
- MA Yue, HE Hong-ming, ZHAO Hong-fei. Spatiotemporal Change of Soil Erosion in Gannan Tibetan Prefecture Based GIS and RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3):37-46.
- [26] 黎露, 王永琪, 马姜明, 等. 南亚热带马尾松人工林近自然恢复过程中林下木本植物生态位动态[J]. 广西科学, 2021, 28(5):499-510.
- LI Lu, WANG Yong-qi, MA Jiang-ming, et al. Niche Dynamics of Understory Woody Plants During the Near-natural Restoration of Pinus Massoniana Plantations in Southern Subtropics [J]. Guangxi Sciences, 2021, 28(5):499-510.
- [27] 柴勇, 孟广涛, 武力, 等. 馨香木兰所处植物群落的物种多样性及其种群结构特征研究[J]. 西部林业科学, 2008, 37(3):46-50.
- CHAI Yong, MENG Guang-tao, WU Li, et al. Species Diversity and Population Character of Magnolia Odratissima Community[J]. Journal of West China Forestry Science, 2008, 37(3):46-50.

- [28] 张卫雄,孙其河,余志峰,等. 甘南高寒草甸采矿活动及植被恢复方式对土壤有机质和活性的影响[J]. 草业科学,2020,37(2):266-272.
ZHANG Wei-xiong, SUN Qi-he, YU Zhi-feng, et al. Effects of Mining Activities and Vegetation Restoration Methods on Soil Organic Matter Content and Enzyme Activities in the Alpine Meadows of Gannan[J]. Pratacultural Science,2020,37(2):266-272.
- [29] DONG S K, SHANG Z H, GAO J X, et al. Enhancing Sustainability of Grassland Ecosystems Through Ecological Restoration and Grazing Management in an Era of Climate Change on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 287:106684.
- [30] MIEHE G, MIEHE S, KAISER K, et al. Status and Dynamics of the *Kobresia Pygmaea* Ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. AMBIO,2008,37(4):272-279.
- [31] 南志标,王锁民,王彦荣,等. 我国北方草地 6 种乡土植物抗逆机理与应用[J]. 科学通报,2016,61(2):239-249.
NAN Zhi-biao, WANG Suo-min, WANG Yan-rong, et al. Stress Tolerance Mechanisms of 6 Native Plant Species Growing in China's Northern Grassland and Their Utilization[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2):239-249.
- [32] 王 孜,任海彦. 乡土植物在植被修复中的作用[J]. 湖北农业科学,2018,57(10):83-87.
WANG Zi, REN Hai-yan. The Role of Native Plants in Vegetation Restoration[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(10):83-87.
- [33] 南志标,王彦荣,贺金生,等. 我国草种业的成就、挑战与展望[J]. 草业学报,2022,31(6):1-10.
NAN Zhi-biao, WANG Yan-rong, HE Jin-sheng, et al. Achievements, Challenges and Prospects of Herbage Seeds Industry in China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(6):1-10.
- [34] 尚占环,董全民,施建军,等. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展:兼论三江源生态恢复问题[J]. 草地学报,2018,26(1):1-21.
SHANG Zhan-huan, DONG Quan-min, SHI Jian-jun, et al. Research Progress in Recent Ten Years of Ecological Restoration for ‘Black Soil Land’ Degraded Grassland on Tibetan Plateau: Concurrently Discuss of Ecological Restoration in Sanjiangyuan Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1):1-21.
- [35] 贺金生,刘志鹏,姚 拓,等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J]. 科技导报,2020,38(17):66-80.
HE Jin-sheng, LIU Zhi-peng, YAO Tuo, et al. Analysis of the Main Constraints and Restoration Techniques of Degraded Grassland on the Tibetan Plateau[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(17):66-80.
- [36] 贺金生,卜海燕,胡小文,等. 退化高寒草地的近自然恢复:理论基础与技术途径[J]. 科学通报,2020,65(34):3898-3908.
HE Jin-sheng, BU Hai-yan, HU Xiao-wen, et al. Close-to-nature Restoration of Degraded Alpine Grasslands: Theoretical Basis and Technical Approach[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(34):3898-3908.
- [37] 江小蕾,张卫国,杨振宇,等. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(9):1479-1485.
JIANG Xiao-lei, ZHANG Wei-guo, YANG Zhen-yu, et al. The Influence of Disturbance on Community Structure and Plant Diversity of Alpine Meadow[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(9):1479-1485.
- [38] 赵 明,张希军,郭建刚. 雾灵山旅游公路的修建对发展区域经济的重要作用[J]. 河北林业科技, 2003(2):51-52.
ZHAO Ming, ZHANG Xi-jun, GUO Jian-gang. The Construction of the Wuling Mountain Tourist Highway Plays an Important Role in the Development of the Regional Economy[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2003(2):51-52.
- [39] 王 宏. 线路工程对季冻区草炭土湿地环境影响与评价研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
WANG Hong. Environmental Impact and Evaluation of Line Project on Turfy Wetland in Seasonal Frozen Area[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [40] 曾胜兰. 道路建设对路边植物群落的影响:以黄河三角洲为例[D]. 上海:复旦大学,2011.
ZENG Sheng-lan. The Effect of Road Construction on Roadsides Plant Community: A Case Study in the Yellow River Delta of China[D]. Shanghai: Fudan University, 2011.
- [41] 董清福,洪丽娟,唐建军,等. 高速公路建设对路域生态系统中生物的影响及生物廊道设计的意义[J]. 科技通报,2007,23(2):289-293.
DONG Qing-fu, HONG Li-juan, TANG Jian-jun, et al. Impacts of Expressway Construction on Biota in Waysides Ecosystem and Significance of the Biological Corridor Design[J]. Bulletin of Science and Technology, 2007, 23(2):289-293.