

高速公路岩石路堑边坡不同恢复年限植被固碳量变化特征

高小虎¹,李帅²,宋桂龙³,齐韵涛¹,于洋¹

(1. 北京清大绿源科技有限公司,北京 100083;2. 山东省交通规划设计院集团有限公司,山东 济南 250101;3. 北京林业大学草业与草原学院,北京 100083)

摘要:【目的】不同生长年限高速公路边坡植被的固碳量会随着植物生长、群落发育不断发生变化,本研究旨在分析小尺度、断续、独立的高速公路边坡生态恢复工程下植被固碳量变化特征。【方法】以国家京沪高速公路山东境内植被恢复2、12和22年的3处岩石路堑边坡生态恢复工程为研究区,采用样方调查及生物量法对植被固碳量进行测算。【结果】区内共发现35种植物,8种典型群落;2年期坡面覆盖度达到85%,平均高度32 cm,分化出现了以禾本科、菊科、豆科为主的草本群落(VCS:241.75~286.09 g/m²)和以刺槐、紫穗槐、马棘、胡枝子为主的灌草群落(VCS:301.72~323.22 g/m²);恢复12、22年坡面覆盖度超过95%,平均高度330 cm,物种明显增加,全部形成以刺槐、紫穗槐为主的优势群落(VCS:778.86~808.63 g/m²);禾本科杂草、爬藤植物的固碳效率较豆科草本植物低,以刺槐、紫穗槐、胡枝子、马棘为主的灌草群落单位面积的固碳能力远强于草本群落。【结论】该结果可为高速公路边坡的植物群落设计、公路养护管理、植被碳汇效益评估等提供参考。

关键词:高速公路;路堑边坡;生态恢复;植被固碳;生物量

中图分类号:U416.1⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)04-0105-08

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.04.014



截至2021年12月,我国公路总里程已近500万km,随着高速公路的建设规模越来越大,逐步向更高、更险、更远的多山地区发展,开挖边坡及与之配套的边坡生态恢复工程规模也越来越大。边坡生态恢复工程是以植被恢复为先导,通过各种物理、化学等工程手段对受损边坡的结构和功能进行修复^[1-2]。工程上一般在边坡表面喷射一层由土壤、基质、保水剂、粘合剂、有机肥和植物种子组成的“客土”,经历种子发芽、先锋草成坪、灌草植被恢复的过程,最终实现坡面稳定植被覆盖^[3-6]。边坡植物在光合作用中将大气

中的CO₂转化为碳水化合物,并以有机碳形式固定下来,通过不断积累地上生物量和地下生物量完成边坡生态恢复工程植被碳汇^[7-10]。

我国研究植被碳汇的时间较晚,目前关于边坡生态恢复工程的碳汇研究并未多见,公开文献中的固碳量测算方法多出现于农林、气象、遥测等行业的研究成果,如遥感估测法、气象观察法、经验值法、同化量法^[11]。王大卫等^[12]采用蓄积-林龄的Logistic方程,结合IPCC材积源-生物量法,认为我国主要人工乔木林总碳储量增加了498.81Tg。黄玉芹等^[13]研究了赤峰地区主要灌木人工林生态系统碳储量,认为灌木层碳储量达到774.19 g/m²,草本层碳储量5.17 g/m²。王欢等^[14]认为不同森林的灌草生物量组成存在较大差异,油松林、栓皮栎林、针阔混交林林下灌草层生物量分别为162.2、165.2、200.8 g/m²。近年来各地农林行业发布了多项农林固碳标准,包括《农田土壤固碳核算技术规范》^[15]、《森林生态系统碳储量计量指

收稿日期:2022-11-18;**修回日期:**2022-12-23

基金项目:国家重点研发计划子课题(2019YFF0303202-01);齐鲁高速公路股份有限公司科技研发项目(QL-2022162KY-7)

作者简介:高小虎(1982-),男,四川高县人,博士,从事林草植被恢复工作。E-mail:gaoxh@vip.qq.com

南》^[16]、《林业碳汇计量监测体系建设技术规范》^[17]。具体在高速公路固碳研究方面,李斯涛^[18]、徐铭^[19]、龙圣勇等^[20]围绕高速公路服务区、绿化工程区提出了固碳型绿化配置和相应绿化设计,并依托杭浦高速公路等互通区、枢纽区进行固碳林建设,监测出平均年净碳量2 294 t,固碳交易经济效益人民币4.4万元,增值效益400万元。但从整体上看,目前高速公路固碳研究刚刚起步,未见针对边坡生态恢复工程进行的研究。从恢复生态学来讲,由于高速公路开挖所形成的边坡比原生地形更陡,其生境条件变得相对困难^[21],从而导致恢复过程中植物适生性、群落稳定性、生物多样性非常不稳定,难以恢复到受干扰前的原生状态,动态恢复的复杂特征使得植被固碳量难以量化,农林行业面向大尺度范围的林草固碳量测算方法,不足以支持高速公路边坡生态恢复工程这类小尺度、断续、独立环境下植被固碳量的分析和测算。

基于此,本研究以国家京沪高速公路(G2)山东境的3处岩石路堑边坡生态恢复工程为研究区,将高速公路封闭环境下的边坡生态恢复工程的植被固碳量定义为边坡植物在单位时间内单位面积上能固定的

总能量中除去其自身呼吸消耗掉的部分,这种边坡植物的净初级生产力几乎全部转化为植物的地上生物量和地下生物量,而枯死木、枯落物和土壤有机质是生物量的其他形式转化^[22],通过对植被样方和生物量调查,测算边坡植被固碳量,以期分析不同年限高速公路边坡恢复植被的固碳量变化特征。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

选择地处国家京沪高速公路山东境的3处岩石路堑边坡生态恢复工程为研究区,研究区的自然环境及立地条件见表1。其中,K562为1999年化临路建设工程(泰安市化马湾—临沂市义堂镇)实施的边坡绿化,采用人工覆土播种的方式进行生态恢复;K466为2009年青兰高速公路绿化提升工程(青岛—兰州)实施的生态防护,采用挂SNS主动防护网基础上+客土喷播进行生态恢复;K565为2019年京沪高速公路改扩建工程(北京—上海)实施的高边坡生态提升工程,采用挂热镀锌铁丝网+客土喷播进行生态恢复。工程选用物种及配方为高羊茅、多年生黑麦草、结缕草、紫花苜蓿、沙打旺、刺槐、胡枝子、紫穗槐。

表1 3处边坡自然环境及立地条件

Table 1 Natural environment and site conditions on the three slopes

编码	桩号	经纬度	样地数/个	坡度/°	坡向	年均降水量/mm	修复年限/年
2Y	K565	E 118°05', N 35°59'	9	45	南	626	2
12Y	K466	E 117°56', N 36°40'	9	55	南	640	12
22Y	K562	E 118°04', N 35°60'	9	40	北	640	22

1.2 研究方法

1.2.1 群落及生物量调查 在坡面随机设置样方,草本植物样方规格1 m×1 m,分别记录草本种数及每一物种高度、盖度;灌木样方规格5 m×5 m,分别记录灌木种数及高度、盖度、地径等数据;由于路堑边坡恢复乔木物种为灌木,均列入灌木进行统计。草本和爬藤植物生物量调查采取刈割法,剪取植株全部地上部分,称取鲜重并记录,从中称取标准样100 g,带回实验室105℃烘干后再称重获得草地上生物量。灌木生物量调查采取遴选法,按植株大小设置高、中、低3种水平,分别截取植株全部地上部分,分解枝、干、叶后称取鲜重并记录,各取标准100 g,带回实验室

105℃烘干后再称重获得灌木地上生物量。所有步骤均按3次重复进行,并对测得数据进行显著性检验。地下生物量选用林业行业标准《森林生态系统碳储量计量指南》,数据调查时间为2021年9月15—20日。

1.2.2 植被固碳量测算 本研究的植被固碳量只对活体植株进行测算分析,不包含枯枝落叶层。根据光合作用反应方程式 $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \uparrow$,高速公路边坡生态修复工程每产生1 g干物质(M)平均需要1.62 g CO_2 , CO_2 中的碳质量比 $12/44=0.273$,则植被固碳量(VCS)计算公式为:

$$\text{VCS} = \text{M} \times 1.62 \times 0.273 = \text{M} \times 0.44226$$

1.3 数据处理及分析

本研究的数据统计、趋势对应分析、聚类分析、方差分析、回归方程和制图均采用 SPSS 13 和 EXCEL 2013 进行分析、绘制。

2 结果与分析

2.1 群落组成特征

3 个边坡植被调查共发现 35 种植物(表 3)。其

中,灌化乔木、灌木、草本、藤本植物分别为 4、6、20、5 种,多见科包括豆科、禾本科、菊科,共 21 种植物,少见科包括马鞭草科、鼠李科、堇菜、蔷薇科、牻牛儿苗科、玄参科、桔梗科、葡萄科、萝藦科、旋花科、桑科,共 11 种植物。采用双向指示种(TWINSPAN)分类分析,可明显划分为 8 个群落,其中 K565 包括以马唐杂草为主(2Y.1 群落),以紫花苜蓿、高羊茅为主(2Y.2 群落),以刺槐、紫穗槐、紫花苜蓿、高羊茅为主(2Y.3 群落),

表 2 3 处边坡植被群落与物种分布(2021 年 9 月)

Table 2 Vegetation community and species distribution on the three slopes(Sep. 2021)

序号	植物名称	群落类型							
		2Y.1	2Y.2	2Y.3	2Y.4	12Y.1	12Y.2	22Y.1	22Y.2
1	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>			+		+			+
2	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>						+	+	
3	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>							+	+
4	泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>							+	
5	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>			+	+	+	+	+	+
6	马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
7	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>				+		+	+	
8	截叶铁扫帚 <i>Lespedeza cuneata</i>							+	+
9	荆条 <i>Vitex negundo</i>						+	+	+
10	酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i>						+	+	+
11	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	+	+	+	+				
12	米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>					+	+	+	+
13	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>			+	+				
14	高羊茅 <i>Festuca elata</i>	+	+	+	+	+	+		
15	黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	+	+	+	+				
16	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>			+	+				
17	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
18	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
19	隐子草 <i>Cleistogenes serotina</i>					+	+	+	+
20	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
21	小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
22	苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
23	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	+	+	+		+			
24	旋覆花 <i>Inula japonica</i>					+	+	+	+
25	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	+	+						
26	紫花地丁 <i>Viola philippica</i>							+	+
27	莓叶委陵菜 <i>Potentilla fragarioides</i>					+	+	+	+
28	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>			+	+		+	+	+
29	地黄 <i>Rehmannia glutinosa</i>							+	+
30	沙参 <i>Adenophora stricta</i>							+	+
31	五叶地锦 <i>Panthenocissus quinquefolia humifusa</i>			+		+		+	+
32	三裂叶葛藤 <i>Pueraria phaseoloides</i>	+	+						
33	地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	+	+		+		+		
34	牵牛 <i>Ipomoea nil</i>	+	+			+		+	+
35	葎草 <i>Humulus scandens</i>	+	+						

注:“*”表示该植物在对应的群落类型中出现

落),以马棘、胡枝子、紫花苜蓿、马唐为主(2Y.4群落) 4种群落,主要表现为禾本科和豆科草本的地被植物分布较多,灌木低矮;K466包括以刺槐、马棘、五叶地锦、狗尾草为主(12Y.1群落),以紫穗槐、马棘、胡枝子、高羊茅为主(12Y.2群落)2种群落,主要表现为豆科灌木分布较多,林下空间有草本和爬藤植物,立体结构丰富;K562包括以紫穗槐、马棘为主(22Y.1群落),以刺槐、五叶地锦为主(22Y.2群落)2种群落,主要表现为植株高大、灌木分布均匀,林下植被稀疏、郁闭度高。

2.2 群落分布特征

对比3种不同恢复年限的高速公路边坡生态恢复工程群落组成与物种分布,恢复2年坡面覆盖度达到85%,平均高度32 cm,物种出现24种,灌化乔木和灌木植物除工程引入的刺槐、紫穗槐、马棘、胡枝子,未见其他品种,草本植物较多,工程引入的豆科、禾本科与当地适生的禾本科、菊科植物都有显著分布,整体以草本和矮灌草地植物为主。恢复12、22年坡面覆盖度超过95%,平均高度3.3 m,灌草藤物种明显增加,丰富度提升,刺槐、紫穗槐植株高度、密度均表现为绝对优势物种,林下草本层虽然稀疏,但物种数量也呈增加趋势,尤其是恢复22年的22Y.1群落,灌化乔木、灌木和草本物种数量分别达到3、6、13种(图1),是本研究坡面中最为丰富的群落类型。2Y.1群落和2Y.2群落是以草本植物为主的类型,独立调查样本的灌木物种仅出现1种,但藤本物种多达4种,与以灌草群落相比较,当植物在生态恢复工程坡面的空间占有率和利用率不足时,马唐、狗尾草、地梢瓜、葎草等野生杂草和爬藤植物的种间竞争能力强劲,能在短期内迅速

建群并覆盖坡面,一旦形成优势物种,就会明显限制其他物种的正常生长。

2.3 生物量特征

除以草本植物为主的2Y.1群落和2Y.2群落外,所有群落地上生物量均表现为:灌木层>草本层;恢复2年的坡面出现的2Y.3群落和2Y.4群落属灌草群落,其地上生物量分别为783.28、798.11 g/m²,明显高出同时期的草本群落地上生物量457.173~558.383 g/m²,灌木植物平均增幅达到55.7%,而恢复12、22年的4个群落均为灌草群落,其灌木层地上生物量为1136.293~1244.013 g/m²,草本层地上生物量降为194.133~268.077 g/m²,在生态恢复过程中,灌木植物逐渐具有较高水平的最终形成了绝对优势。将同时期且同类型的群落地上生物量进行对比,具有刺槐植株的群落相对突出,2Y.3群落(798.110 g/m²)>2Y.4群落(783.280 g/m²),12Y.1群落(1458.065 g/m²)>12Y.2群落(1404.370 g/m²),22Y.1群落(1438.147 g/m²)>22Y.2群落(1419.637 g/m²),说明灌木植物中的刺槐相较紫穗槐、马棘、胡枝子的地上生物量均具有优势。

地下生物量选用林业行业标准《森林生态系统碳储量计量指南》进行取值计算^[17]。研究区均为相对低矮的灌草群落,参照幼龄和中龄树种,根据树种地下生物量与地上生物量的平均比值, $RSR_{幼龄}=0.253$, $RSR_{中龄}=0.255$,本次取值0.254。得到各群落的全生物量(表4)。按对数趋势线对群落总生物量进行拟合(图2)。经*t*检验为显著相关。群落总生物量始终处于递增趋势,随年限增加,植被趋于稳定,总生物量的增加趋势逐渐放缓。

2.4 固碳量测算分析

草本层固碳量随着恢复年期的增加呈减少趋势,其中恢复2年期2Y.2群落最高,为177.68 g/m²,灌木层固碳量随着恢复年限的延长增加(表5)。

3 讨论

3.1 草本层固碳量变化特征

2Y.2群落草本层植物构成以紫花苜蓿、高羊茅、黑麦草等豆科和禾本科植物为主,比同样恢复年期的以马唐、狗尾草等禾本科杂草2Y.1群落固碳量大,说明即使边坡生态修复工程使用了相同的土壤和种子

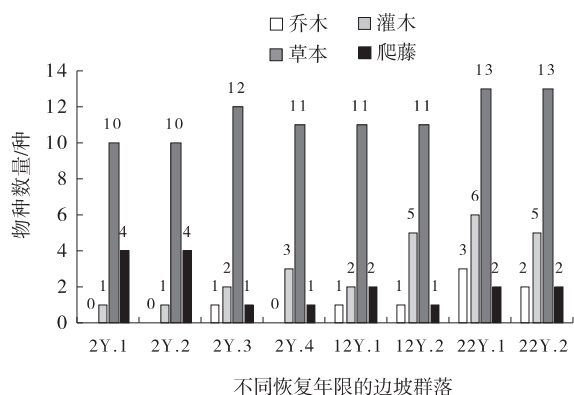


图1 8个群落的物种分布

Fig. 1 Species distribution of 8 communities

表 3 3 处边坡植被地上生物量

Table 3 Aboveground biomass of vegetation on the three slopes

指标	群落类型							
	2Y.1	2Y.2	2Y.3	2Y.4	12Y.1	12Y.2	22Y.1	22Y.2
灌木层								
平均值/(g·m ⁻²)	97.260	103.297	207.077	174.360	1 201.443	1 136.293	1 215.777	1 244.013
标准差	3.014	3.264	7.425	2.260	26.864	15.549	19.599	23.815
变异系数/%	3.099	3.160	3.586	1.296	2.236	1.368	1.612	1.914
草本层								
平均值/(g·m ⁻²)	333.247	401.753	321.033	308.920	256.621	268.077	203.860	194.133
标准差	6.886	3.185	2.739	3.562	2.707	1.963	1.627	1.653
变异系数/%	2.066	0.793	0.853	1.153	1.055	0.732	0.798	0.852
灌草合计								
平均值/(g·m ⁻²)	457.173	558.383	798.110	783.280	1 458.065	1 404.370	1 419.637	1 438.147
标准差	9.804	1.019	28.786	13.949	26.124	13.915	20.671	25.464
变异系数/%	2.144	0.182	3.607	1.781	1.792	0.991	1.456	1.771

注:表中的灌木层、草本层和灌草合计地上生物量,均以获得的独立样本进行统计,取算术平均值,其中“灌草合计”是单个样本中的“灌木层”+“草本层”的整体平均值

表 4 3 处边坡的群落全生物量

Table 4 Total biomass of communities on the three slopes

指标	g·m ⁻²							
	2Y.1	2Y.2	2Y.3	2Y.4	12Y.1	12Y.2	22Y.1	22Y.2
地上部分	457.173	558.383	798.110	783.280	1 458.065	1 404.370	1 419.637	1 438.147
地下部分	116.122	141.829	202.720	198.953	370.348	356.710	360.588	365.289
全株	573.295	700.213	1 000.830	982.233	1 828.413	1 761.080	1 780.224	1 803.436

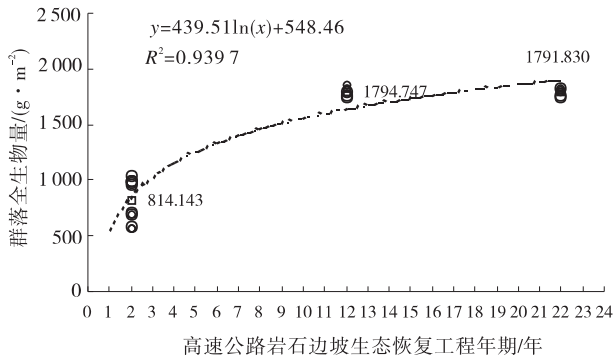


图 2 不同恢复年限的全生物量趋势

Fig. 2 Total biomass trend in different restoration years

配方,由于从种子到出苗,再发展为植被群落的过程中,种间竞争非常激烈,光照、水肥条件不同,会在坡面形成不同的群落类型,2Y.1群落是典型的人为设计物种,占有率和光热利用率不足,本地马唐、狗尾草等野生禾本科杂草能在短期内迅速建群并覆盖坡面,形成优势种后限制人为设计物种的正常生长。因此,同一个坡面出现不同类型的植物群落,其坡面固碳量也会随之分化。恢复 22 年的 22Y.2 群落为最低值 85.86 g/m²,其草本层植物构成以五叶地锦和狗尾草

表 5 不同恢复年期的植被固碳量

Tab. 5 Vegetation carbon sequestration in different restoration years 期

指标	g/m ²							
	2Y.1	2Y.2	2Y.3	2Y.4	12Y.1	12Y.2	22Y.1	22Y.2
灌木层	43.01	45.68	91.58	77.11	531.35	502.54	537.69	550.18
草本层	147.38	177.68	141.98	136.62	113.49	118.56	90.16	85.86
地下层	51.36	62.73	89.65	87.99	163.79	157.76	159.47	161.55
合计	241.75	286.09	323.22	301.72	808.63	778.86	787.32	797.59

为主,整体表明禾本科杂草、爬藤植物的固碳效率较豆科草本植物较低,虽然在工程上的短期效果明显,但固碳能力相对有限。

3.2 灌木层固碳量变化特征

灌木层固碳量随着恢复年限的延长增加量非常突出,恢复12、22年的灌木层固碳量达到502.54~550.18 g/m²,是同时期草本层固碳量的4~6倍,证明边坡生态恢复工程一旦确立了以刺槐、紫穗槐、胡枝子、马棘等灌木为主的植被群落,其单位面积的植被固碳能力远强于草本群落,这与灌木植株高度、植株密度、单株覆盖度、层间分布均对坡面植被的稳定性贡献最大等研究结果相符^[5]。

3.3 路域边坡生态恢复工程启示

边坡植被固碳能力随着恢复年限的增加而增加,当形成稳定群落后增加幅度不明显,灌草群落固碳能力最高可达到808.63 g/m²,与乔灌林地中的林下灌丛固碳能力相当,应当认为,边坡生态恢复工程是高速公路路域固碳环境的重要组成。本研究的结果分析与陈学平等^[23-25]对于边坡工程中的灌木护坡作用看法一致,在高速公路边坡生态修复工程中不应过分强调先锋草本物种的重要性,避免因追求快速复绿而形成草本植物退化,在设计、施工和养护阶段都应充分考虑到灌木的护坡优势,这有利于提高边坡植被持久稳定,更能提升边坡生态修复工程的整体固碳能力。

4 结论

(1) 3处京沪高速公路边坡植被恢复工程中,坡面共出现35种植物,8种典型群落,尽管调查期内的以禾本科杂草、豆科与禾本科混合的草本群落覆盖度较高,但总生物量比以灌木植物为主的灌草群落的偏低,灌化乔木和灌木植物应作为边坡生态恢复工程的主要建群物种。

(2) 2年坡面覆盖度达到85%,平均高度32 cm,分化出现了以禾本科、菊科、豆科为主的草本群落(VCS:241.75~286.09 g/m²)和以刺槐、紫穗槐、马棘、胡枝子为主的灌草群落(VCS:301.72~323.22 g/m²);恢复12、22年坡面覆盖度超过95%,平均高度330 cm,物种明显增加,全部形成以刺槐、紫穗槐为主的优势群落(VCS:778.86~808.63 g/m²)。

(3) 边坡植被固碳能力随着恢复年限的增加而增

加,当形成稳定群落后增加幅度不明显,灌草群落固碳能力最高可达到808.63 g/m²,与林下灌丛固碳能力相当,比草本群落的生物量和固碳能力明显偏高,边坡生态恢复工程是高速公路路域固碳环境的重要组成部分。

参考文献:

- [1] 吕一河,傅伯杰,陈利顶.生态建设的理论分析[J].生态学报,2006,30(11):3891-3897.
- [2] 李凤,陈法扬.生态恢复与可持续发展[J].水土保持学报,2004,18(6):187-189.
- [3] 章梦涛,邱金淡,颜冬.客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用[J].中国水土保持科学,2004(3):10-12.
- [4] 章清涛,高小虎,宋桂龙,等.高速公路岩石边坡3类人工植物群落凋落物分解特征[J].草原与草坪,2020,40(2):87-91+98.
- [5] 高小虎,苏德荣,舒晓锐,等.高速公路风化岩石路堑边坡植被恢复的群落稳定性研究[J].公路交通科技,2018,35(2):129-136.
- [6] 舒安平,苏建明,冷剑,等.半干旱区生态护坡工程客土养分衰减特征与恢复趋势[J].水土保持学报,2008,32(5):82-85+90.
- [7] 宋倩,肖红,柴锦隆,等.呼伦贝尔草甸草原杂类草碳水化合物含量的动态变化[J].草原与草坪,2020,40(1):11-16+27.
- [8] 赵娜,邵新庆,吕进英,等.草地生态系统碳汇浅析[J].草原与草坪,2011,31(6):75-82.
- [9] 张智袁,赵祥,李刚.6种灌木不同器官生物量及其碳、氮含量的分配特征[J].草原与草坪,2016,36(3):23-27+34.
- [10] 王丽华,刘尉.刈割对暖性草丛草地碳交换的影响——以渝北岐山草地为例[J].草原与草坪,2017,37(3):22-28.
- [11] 张桂莲,邢璐琪,张浪,等.城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J].园林,2022,39(1):4-9+49.
- [12] 王大卫,沈文星.中国主要人工乔木树种碳储量测算及固碳潜力分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):11-19.
- [13] 黄玉芹.赤峰地区主要灌木人工林生态系统碳储量研究[J].内蒙古林业调查设计,2017,40(6):58-60+17.
- [14] 王欢.北京妙峰山林场林下灌草层生物量及固碳效益研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [15] 北京市农业局.农田土壤固碳核算技术规范:DB11T

- 1562—2018[S]. 北京:北京市质量技术监督局,2018.
- [16] 国家林业和草原局. 森林生态系统碳储量计量指南: LY/T 2988—2018 [S]. 北京:国家林业和草原局, 2018.
- [17] 黑龙江省林业和草原局. 林业碳汇计量监测体系建设技术规范: DB23/T 2475—2019[S]. 黑龙江:黑龙江省市场监督管理局,2019.
- [18] 李斯涛,刘志强,李培锋,等. 高速公路服务区低碳生态技术体系探讨[J]. 公路交通科技, 2020, 37(S2): 56—61.
- [19] 徐铭,薛铸. 碳中和服务区植被碳汇能力提升技术与措施研究[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(5):10—13.
- [20] 龙圣勇,申家成,赵红,等. 高速公路路域植被固碳量分析研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(3): 149—152+157.
- [21] 任海,彭少麟,陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学[J]. 生态学报, 2004, 24(8):1760—1768.
- [22] 季蕾,亢新刚,郭韦韦,等. 金沟岭林场3种林型不同郁闭度林下灌草生物量[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(9):29—33+39.
- [23] 陈学平,江玉林. 公路边坡灌木化植被建植技术研究[J]. 公路, 2007(8):206—209.
- [24] 祁玉超,兰惠娟,王道杰,等. 暴雨条件下灌木对边坡稳定性的影响模拟试验[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 61—68.
- [25] 芦建国,梁同江,孔凡海. 8种灌木根系分布对高速公路生态边坡的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(5):155—159.

Analysis on variation characteristics of vegetation carbon sequestration in highway rock cutting slope with different restoration years

GAO Xiao-hu¹, LI Shuai², Song Gui-long³, QI Yun-tao¹, YU Yang¹

(1. Beijing Tsingda Greens Tech Co., Ltd., Beijing 100084, China; 2. Shandong Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China; 3. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The carbon sequestration of vegetation in highway slopes with different restoration years varies continuously with plant growth and community development. In the past, few studies have analyzed the change characteristics of vegetation carbon sequestration in small-scale, intermittent and independent highway slope ecological restoration projects. [Method] Three rocky cutting slope ecological restoration projects in the years of vegetation resoration 2, 12 and 22 of Beijing-Shanghai Expressway (G2) were studied, and vegetation carbon sequestration was calculated by quadrat survey and biomass method. [Result] The results showed that 35 plant species and 8 typical communities were found in the area. The 2-year slope vegetation coverage reached 85%, and the average plant height reached 32 cm. These slopes had evolved herb communities and shrub-herb communities. The herb communities were dominated by *Gramineae*, *Asteraceae* and *Leguminosae* (VCS: 241.75~286.09 g/m²), and the shrub-herb communities were dominated by *R. pseudoacacia*, *A. fruticosa*, *H. rhamnoides* and *L. bicolor* (VCS: 301.72~323.22 g/m²). The slope vegetation coverage of 12 and 22 years was more than 95%, and the average plant height reached 330 cm. The species increased significantly, all the dominant communities were dominated by *Robinia pseudoacacia* and *Amorpha fruticosa* (VCS: 778.86~808.63 g/m²). Carbon sequestration efficiency of gramineous weeds and climbing plants was lower than that of leguminous herbs, carbon sequestration capacity per unit area of shrub-herb communities dominated by *Robinia pseudoacacia*, *Amorpha fruticosa*, *Lespedeza bicolor* and *Hippophae*

rhamnoides was far greater than that of herb communities. This was consistent with the existing research results that shrubs contributed the most to the stability of slope vegetation. **【Conclusion】** The conclusion could provide reference for plant community design, highway maintenance management and vegetation carbon sink benefit evaluation of highway slopes.

Key words: highway; cutting slope; ecological restoration; vegetation carbon sequestration; biomass

(上接 104 页)

Responses of alpine meadow vegetation and soil nutrients to different grazing methods in Qilian Mountains

AN Hai-tao, CAO Wen-xia*, LI Wen, LIU Yu-zhen, WANG Shi-lin,
XIN Yu-qiong, WANG Jin-lan

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: **【Objective】** Rational grazing is of great significance in the sustainable development of alpine meadows, but the effects of different grazing patterns on vegetation characteristics and soil nutrients in alpine meadows are still controversial. **【Method】** In this study, three alpine meadows with continuous grazing throughout the year, grazing in dormant season, and no grazing were selected as the research objects. The changes of vegetation and soil indexes under different grazing patterns were systematically analyzed. **【Result】** The results showed that the vegetation height and aboveground biomass were the highest in the grazing prohibition plots, followed by grazing in the dormant season. The grazing prohibition significantly increased the coverage and density of grasses. The soil water content, organic matter, total effective and available nutrient contents were significantly different in the 0~10 cm soil layer ($P < 0.05$), and all the contents of the prohibited grazing plots were the highest. Available nitrogen content was significantly positively correlated with total nitrogen and organic matter content, significantly negatively correlated with bulk density, and extremely significantly positively correlated with available potassium and water content ($P < 0.01$). **【Conclusion】** Continuous grazing throughout the year has not completely degraded public pastures, which requires scientific management and effective restoration by the government and herdsmen. Short-term grazing prohibition and grazing in dormant seasons are beneficial to the improvement of grassland productivity and soil nutrient retention. Pasture with heavy degradation should be banned for a short time. For dormant grazing pastures, supplementary feeding and early transfer are recommended to improve meadow-like grassland vegetation and soil in the East Qilian Mountains.

Key words: Qilian Mountains; meadows and grasslands; vegetation; soil nutrients; correlation analysis