

# 扰动方式对典型草原区路域植被和土壤的影响

张朕<sup>1</sup>, 刘宝河<sup>2</sup>, 茶娜<sup>1</sup>, 苏非非<sup>3</sup>, 王嫣娇<sup>2</sup>, 王国立<sup>4</sup>, 李龙<sup>5</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2.内蒙古交通设计研究院有限责任公司,

内蒙古 呼和浩特 010000; 3.内蒙古公路交通投资发展有限公司 赤峰分公司, 内蒙古 赤峰市 024000; 4.内蒙古公路交通投资发展有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 5.荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:** [目的] 分析不同扰动方式对内蒙古典型草原区土壤理化性质及植被特征的影响, 为探索路域生态环境恢复规律, 采用合理的恢复措施提供科学依据。[方法] 以锡林郭勒草原区3条公路(G303 锡市—阿巴嘎旗段、G207 锡市—西乌珠穆沁旗段、G207 锡市—乌日图塔拉苏木段)为研究对象, 采用空间代替时间的方法, 调查研究了不同恢复年限(1, 5, 15 a)与不同扰动方式(碾压、路堑、取土场、路堤)路域土壤和植被特征。[结果] ①扰动方式对土壤理化性质有显著影响, 其中土壤容重表现为: 碾压>路堤>路堑>取土场。随恢复年限增加, 土壤容重表现为向未扰动区容重靠近趋势。土壤含水率表现为: 碾压<路堑<取土场<路堤, 总体呈随恢复年限延长而增大趋势。土壤有机碳、全磷和全钾含量皆表现出碾压样地最差, 路堤样地最优。②植物群落丰富度指数随恢复年限的增加显先增高后降低最终趋于稳定趋势, 其中恢复5 a物种多样性指数相比于恢复15 a高。③主成分分析得出, 恢复15 a的路堤、路堑、取土场扰动综合排名较高, 其综合得分分别达到了2.33, 1.42, 1.32, 碾压扰动的综合得分均处在最低水平, 得分相比于未扰动区有明显差距, 说明对生态系统破坏较为严重。[结论] 受到扰动的土壤理化性质及植被指数与未扰动土壤对比有很大差异, 填方的土壤养分含量较高, 而挖方土壤与未扰动区域相比, 养分含量有明显缺失, 需加强对该扰动区域的生态保护力度。

**关键词:** 公路路域; 土壤理化性质; 生态恢复; 典型草原区; 主成分分析; 公路扰动

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0086-10

中图分类号: X825, S812.6

**文献参数:** 张朕, 刘宝河, 茶娜, 等. 扰动方式对典型草原区路域植被和土壤的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 86-95. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.012; Zhang Zhen, Liu Baohe, Cha Na, et al. Effects of disturbance modes on vegetation and soil in typical grassland area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 86-95.

## Effects of Disturbance Modes on Vegetation and Soil in Typical Grassland Area

Zhang Zhen<sup>1</sup>, Liu Baohe<sup>2</sup>, Cha Na<sup>1</sup>, Su Feifei<sup>3</sup>, Wang Yanjiao<sup>2</sup>, Wang Guoli<sup>4</sup>, Li Long<sup>5</sup>

(1. School of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner

Mongolia 010010, China; 2. Inner Mongolia Transportation Design and Research Institute Co., Ltd., Hohhot,

Inner Mongolia 010000, China; 3. Inner Mongolia Highway Transportation Investment and Development Co., Ltd.

Chifeng Branch, Chifeng City, Inner Mongolia 024000, China; 4. Inner Mongolia Highway Transportation

Investment and Development Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 5. Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration, National Forestry and Grassland Administration, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

**Abstract:** [Objective] The effect of different disturbance modes on soil physical and chemical properties and vegetation characteristics of typical grassland areas in Inner Mongolia were analyzed in order to provide a scientific basis for restoring the ecological environment following road construction and for adopting reasonable restoration measures. [Methods] Three highways (G303 Xilinhot-Abaga section, G207 Xilinhot-Xiwuzhumuqin section, G207 Xilinhot-Uritutala village section) in the Xilinguole brassland area were

收稿日期: 2022-04-20

修回日期: 2022-09-24

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项“内蒙古特殊环境公路灾变机理及综合防控成套技术研究”(zdx2018041)

第一作者: 张朕(1998—), 男(汉族), 河北省丰宁满族自治县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 862647322@qq.com.

通信作者: 刘宝河(1987—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 高级工程师, 主要从事公路防沙与生态修复相关研究。Email: baoheliu@126.com.

studied. Using the method of space instead of time, the soil and vegetation characteristics of a road ecosystem under different numbers of restoration years (1, 5, 15 years) and different disturbance modes (rolling, cutting, borrow pit, embankment) were investigated. [Results] ① Disturbance mode had a significant impact on soil physical and chemical properties, and soil bulk density followed the disturbance mode order of rolling > embankment > cutting > borrow pit. As the number of restoration years increased, soil bulk density approached the bulk density of the undisturbed area. Soil moisture content followed the disturbance mode order of rolling < cutting < borrow pit < embankment, and soil moisture increased as the number of restoration years increased. Soil organic carbon, total phosphorus, and total potassium contents were lowest for the rolling disturbance mode, and highest for the embankment disturbance mode. ② The plant community richness index initially increased, then decreased, and finally stabilized. Species diversity index for the 5-year restoration period was higher than for the 15-year restoration period. ③ From the principal component analysis of relevant data, the comprehensive ranking of embankment, cutting, and borrow pit disturbance after 15 years of recovery was high, and the comprehensive scores were 2.33, 1.42 and 1.32, respectively. The comprehensive scores of rolling disturbance were the lowest, and damage to the ecosystem was the most serious. [Conclusion] There were significant differences in the physical and chemical properties and vegetation index of disturbed soil compared with undisturbed soil. The nutrient content of the filled soil was higher, while the nutrient content of the excavated soil was significantly lacking in nutrients compared with the undisturbed area. Therefore, it will be necessary to strengthen the ecological protection of disturbed areas.

**Keywords:** road area; physical and chemical properties of soil; ecological restoration; principal component analysis; typical grassland area; highway disturbance

随着人口的增长和经济的快速发展,公路建设施工和运营项目持续增多,导致沿线环境问题突出<sup>[1-2]</sup>。在公路施工过程中,高填路堤、低挖路堑改变了沿线原地貌,对区域植物群落及土壤理化性质造成严重影响,导致公路沿线生态退化<sup>[3]</sup>。对不同扰动方式及不同恢复年限的土壤理化性质及植被特征变化进行研究,以期为内蒙古典型草原区公路路域生态保护提供理论依据及科学指导。

关于不同恢复年限公路植物群落与土壤理化性质变化已开展很多研究。吕江等<sup>[4]</sup>对千黄高速淳安段公路边坡地表裸露区域和植被修复区域的研究得出,土壤植被修复显著提高了土壤有机质含量;宋伯瀚等<sup>[5]</sup>对二郎山亚高山公路边坡研究得出,其路域土壤全氮、铵态氮、硝态氮、有机氮、全磷、有机质在各生长季节间存在差异显著,各样点内土壤全磷含量均小于0.8 g/kg;徐晶园等<sup>[6]</sup>调查城市道路绿化植被生长状况得出,随群落层次结构增加,城市道路绿地的植物群落物种多样性水平呈现升高趋势,群落土壤含水率普遍较高,土壤有机质、土壤全氮和土壤速效钾的含量随群落层次的增加呈现增大趋势,张志伟等<sup>[7]</sup>通过在公路边坡设置沙障年限的不同而发现土壤含水量、容重在不同土层、不同高度间存在不同程度的显著差异,随着设置沙障年限的增加,土壤含水量呈增

加趋势,土壤容重呈减小趋势,其研究结果发现公路边坡土壤养分条件受恢复年限的影响显著。土壤有机质、全N含量处于缺乏和显著缺乏水平,植物群落丰富度随着边坡恢复年限的增长植被长势渐好且出现演替。在公路路域水土保持方面,史东梅等<sup>[8]</sup>提出高速公路水土保持防护措施应建立“点、线、面”水土流失综合防治体系,以形成系统化、层次化总体布局。防治“点”指高速公路沿线弃渣场、施工生产生活区布设的拦、挡、排及植被恢复措施;防治“线”指路面和沿线路基边坡、路堑边坡、施工便道及改河(沟)等线性拦、挡、排及植被防护措施;防治“面”指沿线不良地质条件地段的综合性防护措施<sup>[9-12]</sup>。同时,在水土保持措施总体布局方面,要综合考虑高速公路主体工程兼有水土保持功能的工程措施、植物措施与新增水土保持措施的互补关系<sup>[13-15]</sup>。

然而,前人关于路域生态恢复研究多集中在植被恢复或土壤理化性质变化的单一层面,在长时间序列上进行土壤和植被综合恢复规律的研究还并不多见。特别是公路修建过程中不同扰动方式对草原区土壤、植被的破坏程度,以及路域生态系统的自我恢复能力还鲜有报道。因此,本研究以内蒙古典型草原区公路为研究对象,以野外实地调查数据为基础,采用空间代替时间法,从土壤和植被两个层面,分析不同扰动

方式(碾压、路堑、取土场、路堤)和不同恢复年限(1,5,15 a)下公路路域生态恢复特征,探索路域生态环境恢复规律,为采用合理的恢复措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究所选取的 3 条公路分别为 G303 锡林浩特市—阿巴嘎旗段、G207 锡林浩特市—西乌珠穆沁旗段和 G207 锡林浩特市—乌日图塔拉苏木段。3 条公路均位于内蒙古自治区东部的锡林郭勒草原(东经  $110^{\circ}50'$ — $119^{\circ}58'$ , 北纬  $41^{\circ}30'$ — $46^{\circ}45'$  之间), 海拔 800~1 200 m, 属中温带半干旱、干旱大陆性季风气候, 寒冷、多风、干旱, 年平均气温  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ , 无霜期 90~120 d, 年降水量从西北向东南 150~400 mm 递增。土壤类型以栗钙土、棕钙土和草甸土为主。其中, 国道 G303(L<sub>1</sub>) 起点为吉林集安, 终点为内蒙古锡林浩特, 全长 1 263 km, 路经吉林、辽宁、内蒙古三省份。

本研究选取该路锡林浩特市至阿巴嘎旗段, 启建时间为 2020 年 5 月, 全长 96.4 km, 路侧土壤类型为栗钙土。国道 G207 起点为内蒙古锡林浩特, 终点为

广东徐闻县, 全长 3 738 km, 研究选取该路段锡林浩特市至西乌珠穆沁旗段(L<sub>2</sub>)和锡林浩特市至乌日图塔拉段(L<sub>3</sub>), 启建时间分别为 2016 年 4 月、2005 年 10 月, 锡西段公路长 148.9 km, 锡乌段路长 107.4 km, 3 条路侧均为栗钙土且气候环境基本一致。

### 1.2 试验设计

本研究采用野外样地调查与室内试验分析相结合。利用空间代替时间的方法分析内蒙古典型草原区三条公路在路堤、路堑、取土场、碾压 4 种扰动后, 在无人为恢复措施下的土壤与植被变化规律, 并分析不同恢复年限(1, 5, 15 a)下路域土壤、植被恢复特征。

1.2.1 样地选取 本试验起始时间为 2021 年 7 月, 所选 3 条公路内各扰动下的土壤及植被恢复状况皆为无人为措施干扰和保护下的自然恢复状况(表 1)。由于该地区铺设路面需要将坡地改为路基平面, 上层土壤植被被完全移除破坏, 因此每条公路各选取 3 个远离公路区未受到人为干扰的典型草原作为对照样地(各条公路 3 个对照样地各指标均值作为对照样地指标值), 此外, 所有样地立地条件基本相同且气候环境一致, 开发前均为典型草地, 通过向当地公路管理部门调查确定样地恢复时间和扰动方式。

表 1 研究样地概况

Table 1 Overview of sample sites in study area

样地编号	名称	恢复年限	扰动方式	取样个数	平均海拔/m	优势种
L <sub>1</sub>	G303 锡—阿	1 a	碾压	27	1 023	栉叶蒿
			路堤	25	1 027	大籽蒿
			取土场	19	1 098	羊草
			路堑	22	1 103	栉叶蒿
L <sub>2</sub>	G207 锡—西	5 a	碾压	27	1046	糙引子草
			路堤	24	1 103	大籽蒿
			取土场	23	1 037	冷蒿
			路堑	26	1 125	冰草
L <sub>3</sub>	G207 锡—乌	15 a	碾压	27	1 070	大籽蒿
			路堤	25	1 065	篦齿蒿
			取土场	18	1 044	糙引子草
			路堑	25	1 119	羊草

#### 1.2.2 各扰动方式样点选取

(1) 碾压扰动样点分别设置在 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> 距离锡林浩特市 35.1, 49.7, 15.4 km 处路侧约 10 m 的地表裸露区。

(2) 路堤扰动样点设置在 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> 距离锡林浩特市 24.3, 105.9, 76.3 km 处的高于路面的填方路基, 其距离路面高度大约在 1~2 m, 倾斜角在  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$

之间。

(3) 取土场扰动样点设置在 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> 距离锡林浩特市 33.6, 78.6, 17.5 km 处为的坑洼, 与公路垂直距离一般在 50~100 m, 深度普遍小于 1 m。

(4) 路堑扰动样点设置在 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> 距离锡林浩特市 45.2, 63.5, 101.5 km 处低于原路面的挖方路基, 倾斜角在  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  之间。

### 1.3 指标测定

1.3.1 土壤理化性质测定 确定研究样地后,按“S”形布设3个样点,相邻两个样点间隔3~5 m,去除土壤表层植被和枯落物后,挖掘长1 m,宽1 m,深30 cm的土壤剖面,按照0—10,10—20,20—30 cm划分3层,由下至上分层取样,每层取2个重复,每个土壤剖面中同一层次的土壤样品混合均匀,除去土壤中的砾石、植物体等杂质,按照四分法去除多余土样后装入塑封袋带回实验室。通过烘干法得出土壤的含水率,通过测量植被根系所能生长最深土层得出有效土层厚度,采用环刀法测定土壤容重,在通过使用重铬酸钾氧化法对土壤进行联合消煮得出土壤有机碳,利用凯氏定氮法确定土壤全氮含量、利用高氯酸—硫酸法确定土壤全磷含量、利用原子吸收分光光度法得到土壤全钾含量。土壤理化性质测定参照《森林土壤分析法》<sup>[16]</sup>。

1.3.2 植被盖度及植物群落丰富度测定 在不同恢复年限公路不同扰动方式各选取3个样地,每个扰动方式分别设置3个1 m×1 m的样方,每个样方沿对角线选取3个采样点以减少偶然性误差。本文试验区植被株高、多度、盖度、生物量等植被特征测量方法详见文献<sup>[17]</sup>。

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为种*i*的个体数与群落总个体数的比值; $S$ 为物种数。

### 1.4 数据分析

在土壤物理性质中选取土壤含水率( $X_1$ )、土壤容重( $X_2$ )2个指标,在化学性质中选取土壤有机碳( $X_3$ )、全磷( $X_4$ )、全钾( $X_5$ )、碳氮比( $X_6$ )4个指标,植被指数选取植物群落多样性指数( $X_7$ )、植被盖度( $X_8$ )2个指标,共计8个指标,利用SPSS 19.0软件,将土壤各理化性质和植物群落多样性指数数据进行标准化(Z-score法)处理,处理过的数据进行KOM检验法和Bartlett球体检验法以用于因子分析的适用性检验。根据KOM值、Bartlett球体检验、Sig值结果判断进行综合评价法的可行性<sup>[18]</sup>。

$$Y = \lambda_a / \sum_{i=1}^X \lambda_i \cdot Y_a + \lambda_b / \sum_{i=1}^X \lambda_i \cdot Y_b + \lambda_c / \sum_{i=1}^X \lambda_i \cdot Y_c + \dots \quad (2)$$

式中: $X$ 代表特征值大于1的主成分个数; $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \dots$ 为每个主成分对应的特征值所占比例; $Y_a, Y_b, Y_c, \dots$ 分别代表每个主成分对应的特征值所占比例中的主成分的特征值之和的比例。

### 1.5 数据处理

利用WPS Office软件对外业所得数据进行初步整理,运用SPSS 19.0的主成分分析对各扰动土壤的理化性质及植被指数数据进行分析处理,对各指标进行主成分分析,计算各主成分得分及综合得分进行综合评价分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 扰动方式对土壤容重和土壤含水量的影响

由表2可知,各扰动方式下土壤容重在1.47~1.94 g/kg之间,不同扰动方式下的土壤容重大体随恢复年限增加有显著降低趋势( $p < 0.05$ ),结合图1得出,除取土场扰动外,其余各扰动方式土壤容重皆随着恢复年限的增长出现下降趋势,其中,下降幅度最大的为路堑扰动,0—10,10—20,20—30 cm土层的容重分别下降了7.79%,10.04%,10.72%,而取土场扰动的土壤容重随恢复年限的增长大体出现增高的趋势,其中各土层第5—15 a段趋势尤为明显,容重分别增长了9.08%,6.76%,5.10%。4种扰动形式各土层土壤容重基本都高于对照;随着恢复年限增长,其数值表现出接近未扰动区容重趋势。根据不同扰动方式随恢复年限的增长,其土壤容重表现为:碾压>路堤>路堑>取土场。

根据表3可看出,扰动区土壤含水率在3.30%~19.59%,土壤含水率随深度增加而增加,结合图1可知,第1—5 a恢复段除路堑扰动外,其余3种扰动方式下土壤含水率均随恢复年限增加而上升,路堤扰动和取土场扰动升高幅度较大,3个土层含水率分别提升了23.49%,38.62%,38.96%和19.08%,33.14%,25.59%。相比于其他破坏形式,碾压扰动所导致的土壤含水率最低,恢复年限为1 a的3层土层土壤含水率均值仅为未扰动组CK均值的17.08%,恢复时间为5 a的路堤相比于其他扰动方式含水率最高(0—10 cm含水率为13.51%,10—20 cm含水率为17.41%,20—30 cm含水率为19.59%),4种扰动形式的土壤含水率表现为:碾压<路堑<取土场<路堤。土壤有效土层厚度指能提供植物根系正常生长发育的土壤厚度<sup>[19]</sup>。由表2可知,内蒙古公路路域各扰动下的有效土层厚度在9.2~42.3 cm之间,其中,路堑扰动的有效土层厚度最薄,恢复5 a时仅有9.2 cm,扰动方式为碾压与取土场的有效土层厚度较其他两种扰动较厚,恢复1 a时的取土场扰动有效土层厚度最大,为42.3 cm,由该表可以得出,各扰动下土壤的有效土层厚度与恢复年限无明显关系。

表 2 不同恢复年限各扰动方式土壤容重、含水率情况

Table 2 Soil bulk density and moisture content in different restoration years and different disturbance modes

影响方式	恢复年限/a	土层深度/cm	土壤容重/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	土壤含水率/%	有效土层厚度/cm	影响方式	恢复年限/a	土层深度/cm	容重值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	含水率/%	有效土层厚度/cm
碾 压	1	0—10	1.911	3.30	35.2	取 土 场	1	0—10	1.516	10.48	42.3
		10—20	1.914	3.50				10—20	1.523	12.07	
		20—30	1.937	3.90				20—30	1.524	13.52	
	5	0—10	1.858	3.51	22.4		5	0—10	1.487	12.48	29.5
		10—20	1.908	3.83				10—20	1.523	16.07	
		20—30	1.915	4.92				20—30	1.551	17.52	
	15	0—10	1.831	2.78	33.5		15	0—10	1.622	7.34	26.3
		10—20	1.863	3.75				10—20	1.626	12.97	
		20—30	1.867	5.90				20—30	1.63	15.08	
路 堑	1	0—10	1.824	7.45	10.2	路 堤	1	0—10	1.77	10.94	15.8
		10—20	1.833	9.19				10—20	1.823	12.56	
		20—30	1.833	11.06				20—30	1.847	14.10	
	5	0—10	1.75	5.44	9.2		5	0—10	1.672	13.51	11.4
		10—20	1.752	6.09				10—20	1.693	17.41	
		20—30	1.767	7.36				20—30	1.741	19.59	
	15	0—10	1.469	8.36	13.7		15	0—10	1.629	5.42	28.1
		10—20	1.489	9.45				10—20	1.64	8.07	
		20—30	1.497	10.56				20—30	1.649	15.79	

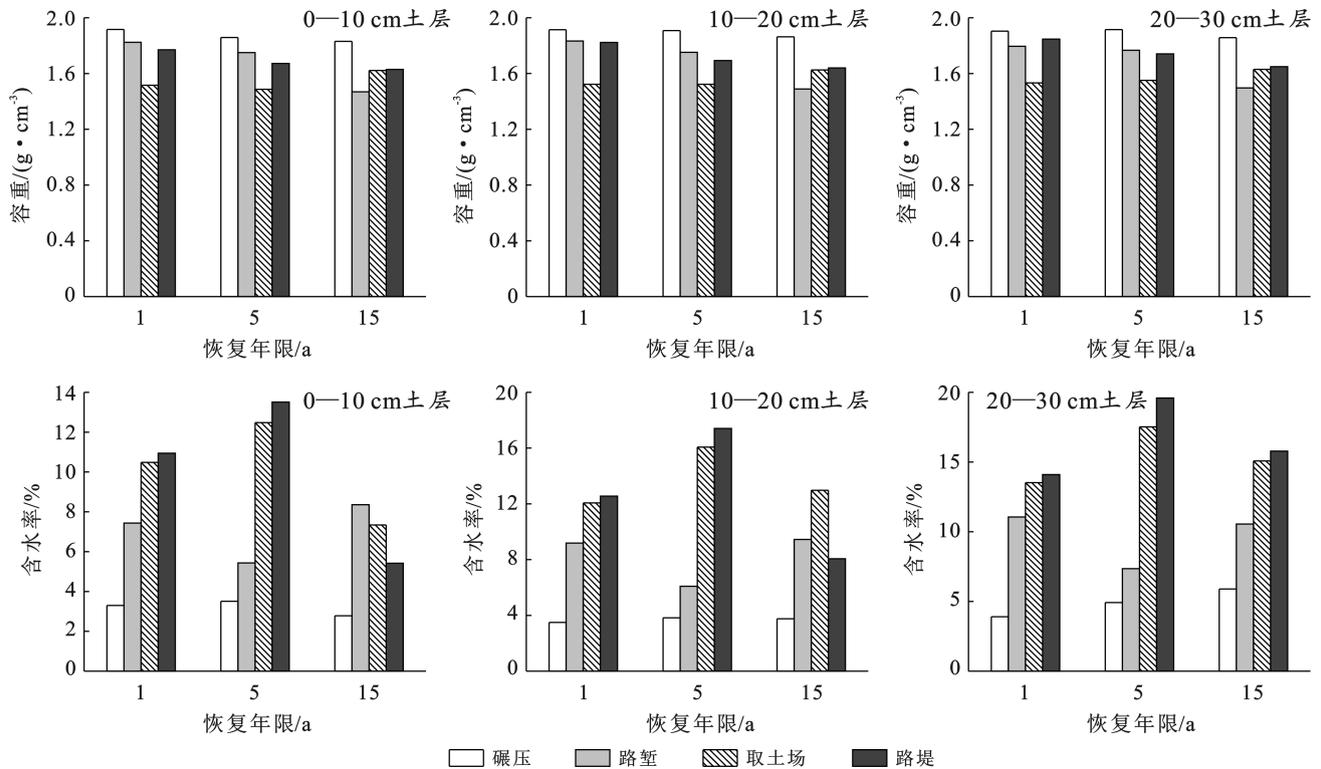


图 1 不同恢复年限各扰动方式土壤物理性质变化

Fig.1 Soil physical properties of different disturbance modes vary with different recovery years

## 2.2 扰动方式对土壤养分含量的影响

由表 3 可知,典型草原区在不同扰动方式下土壤

有机碳含量存在较大差异,而峰值皆出现在 15 a,恢复时间为 15 a 的路堤扰动表层土壤有机碳含量最

高, 达 14.33 g/kg, 土壤有机碳含量明显已经超过对照组 CK(有机碳含量为 13.57 g/kg)。而恢复时间为 15 a 的碾压扰动 20—30 cm 土层有机碳含量最低, 仅有 2.61 g/kg, 较之对照组(8.97 g/kg)有明显的降低。碾压扰动的土壤有机碳含量损失最为严重, 不同恢复年限下 3 个土层深度的有机碳含量都有很明显的下降, 其中土层深度较浅的位置, 碾压扰动在短时间会对有机碳的含量造成急剧减少的影响。在较深的位置, 碾压扰动在短时间对有机碳的含量造成的影响缓慢减少。其中, 在 0—10 cm 土层深度的位置, 恢复 1 a 的土壤有机碳含量为 4.91 g/kg, 恢复 15 a 的土壤有机碳含量为 6.81 g/kg, 可看出: 随着时间的增长有机碳含量会有所回升, 而在 20—30 cm 土层中, 恢复 1 a 有机碳含量为 4.65 g/kg, 恢复 15 a 有机碳含量为 2.61 g/kg, 其有机碳的含量并没有回升; 路堑扰动相比于碾压扰动, 其土壤有机碳含量也有明显的下降趋势, 在恢复 5 a 的土壤中 0—10 cm 土层有机碳

含量为 8.07 g/kg, 同年 20—30 cm 土层中有机碳含量仅为 6.58 g/kg, 由此可以看出, 随着深度的增加有机碳含量也会随之减少。

与碾压扰动较之不同的是, 无论土层的深浅, 路堑扰动造成的有机碳含量减少, 都会随着时间的推移有所恢复, 从表 3 可知, 路堑扰动在恢复 15 a 时, 有机碳的含量(10.76, 9.83, 7.62 g/kg)已经相较于恢复 1 a(6.09, 4.99, 4.87 g/kg)有很明显的回升, 并且接近对照组; 在 0—10 cm 的土层深度的位置间, 路堤扰动和取土场扰动都会在短时间内对土壤有机碳的含量造成减少, 而减少量相较于碾压扰动以及路堑扰动来说, 数值较小, 并且在恢复 5 a 以及恢复 15 a 时的可知, 路堤扰动有机碳含量达到了 13.61 g/kg 和 14.33 g/kg, 取土场扰动有机碳含量已经达到 11.57 g/kg 和 12.35 g/kg, 其有机碳含量已经恢复到与对照组 CK(13.57 g/kg)相差无几的地步, 甚至相较于对照组有所反超。

表 3 不同恢复年限各扰动方式土壤有机碳、全磷、全钾含量

Table 3 Soil organic carbon, total phosphorus and total potassium contents in different restoration years and different disturbance modes

影响方式	恢复年限/a	土层深度/cm	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	影响方式	恢复年限/a	土层深度/cm	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )
碾压	1	0—10	4.91	0.12	120.61	取土场	1	0—10	7.12	0.16	189.91
		10—20	4.52	0.09	115.81			10—20	6.19	0.16	187.32
		20—30	4.65	0.04	109.42			20—30	6.01	0.14	175.63
	5	0—10	3.51	0.08	133.53		5	0—10	11.57	0.21	121.13
		10—20	4.13	0.09	112.54			10—20	10.81	0.13	125.23
		20—30	4.01	0.04	115.35			20—30	7.03	0.15	110.32
	15	0—10	6.81	0.14	170.73		15	0—10	12.35	0.22	201.81
		10—20	3.32	0.11	176.91			10—20	4.28	0.23	187.35
		20—30	2.61	0.09	133.52			20—30	5.91	0.19	193.57
路堑	1	0—10	6.09	0.14	185.21	路堤	1	0—10	10.98	0.23	190.45
		10—20	4.99	0.13	177.33			10—20	9.72	0.22	190.82
		20—30	4.87	0.09	143.81			20—30	8.05	0.17	179.21
	5	0—10	8.07	0.17	183.22		5	0—10	13.61	0.21	210.13
		10—20	6.54	0.13	180.24			10—20	9.76	0.17	158.31
		20—30	6.58	0.12	174.33			20—30	6.33	0.13	145.92
	15	0—10	10.76	0.17	237.01		15	0—10	14.33	0.27	261.83
		10—20	9.83	0.12	202.11			10—20	9.61	0.23	199.71
		20—30	7.62	0.12	190.72			20—30	8.44	0.19	186.12
对照		0—10	3.57	0.11	221.13			0—10	3.57	0.11	221.13
		10—20	10.80	0.13	195.21			10—20	10.80	0.13	195.21
		20—30	5.97	0.19	181.12			20—30	5.97	0.19	181.12

由表 4 可知, 除路堤扰动外, 不同扰动形式下的土壤全磷含量均小于对照组 CK(0.11, 0.13, 0.19

g/kg), 同种扰动形式下, 大体表现出随着深度增加土壤全磷含量降低的趋势, 在同一深度, 土壤全磷含量

表现出随着恢复年限的增加而增加,除碾压扰动外,其他 3 种扰动形式在恢复年限达到 15 a 时,其不同深度的土壤全磷含量皆相近于对照组 CK 相应土层全磷含量。

在碾压扰动中,土壤全磷含量最高值仅达到了 0.14 g/kg,相比于对照组 CK,具有显著差距,在 4 种扰动方式中,土壤中全磷含量表现为:碾压<路堑<取土场<路堤。不同恢复年限下各个扰动方式的土壤全钾含量都呈现随土层深度增加而减少的趋势,其

中,碾压扰动全钾含量相比于其他扰动较低,恢复 1 a 的 20—30 cm 土层中全钾含量仅有 109.42 g/kg,相比于对照组相同土层,只达到了 60.41%;路堤扰动的土壤全钾含量最多,在恢复到 15 a 时,各土层深度的全钾含量已明显超过对照组(221.13 g/kg, 195.21 g/kg, 181.12 g/kg),总体来说,各扰动方式的土壤皆表现出随恢复年限的增加,各土层全钾含量随之增加,4 种扰动方式中,土壤的全钾含量表现为:碾压<取土场<路堑<路堤。

表 4 扰动土壤各指标相关性分析

Table 4 Correlation analysis of disturbed soil indexes

指标	扰动方式	恢复年限	土层深度	有机碳	全磷	全钾	含水率	容重	有效土层深度	shannon 指数	植被盖度	碳氮比
扰动方式	1											
恢复年限	0	1										
土层深度	0	0	1									
有机碳	0.516**	0.181	-0.433**	1								
全磷	0.669**	0.246	-0.421*	0.753**	1							
全钾	0.325	0.436**	-0.322	0.567**	0.685**	1						
含水率	0.768**	-0.085	0.351*	0.327	0.384*	0.091	1					
容重	-0.719**	-0.086	0.176	-0.610**	-0.563**	-0.454**	-0.558**	1				
有效土层深度	0.221	-0.002	0	-0.227	-0.060	-0.194	-0.101	-0.044	1			
Shannon 指数	-0.159	0.193	0	0.212	0.084	-0.036	0.085	0.347*	-0.340*	1		
植被盖度	0.296	0.725**	0	0.438**	0.517**	0.437**	0.221	-0.148	-0.056	0.533**	1	
碳氮比	0.379*	-0.426**	0.001	0.155	0.306	0.188	0.376*	-0.188	0.235	-0.031	-0.151	1

注: \*\* 表示相关性极显著( $p < 0.01$ ), \* 表示相关性显著( $p < 0.05$ )。

### 2.3 扰动方式下对植被盖度和多样性指数的影响

未扰动区域的物种多样性指数和植被盖度分别为 0.95, 80%。由图 2 可知,不同扰动方式在恢复 1 a 时,物种多样性指数皆处于最低值,最明显表现在碾压扰动区,该扰动区的物种多样性指数和植被盖度分别为 0.13, 10%,仅为未扰动区域的 13.73% 和 12.51%,而在恢复到 5 a 时,不同扰动区的物种多样性指数均

达到峰值,其中路堤扰动区的物种多样性指数从 1 a 时的 0.68 提升到了 1.43,明显超过未扰动区域(0.95),在恢复到 15 a 时,各扰动区的物种多样性指数又出现了下降趋势,并在数值上表现出向未扰动区域靠拢的趋势。而不同扰动方式的植被盖度大致都随恢复年限的延长表现出增长的趋势,但始终低于未扰动区域(80%)。

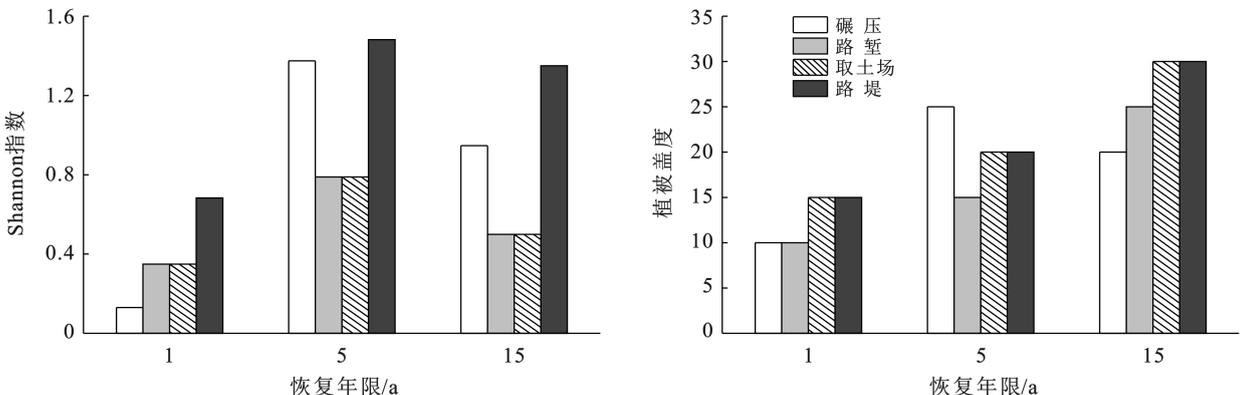


图 2 不同恢复年限各扰动方式群落多样性指数与植被盖度

Fig.2 Community diversity index and vegetation coverage in different restoration years and disturbance modes

## 2.4 土壤理化性质指标及植被指数间相关性

运用 SPSS 软件对不同恢复年限及不同扰动方式的路域土壤各指标相关参数进行相关性分析,路域扰动土壤相关性分析见表 4。

由表 4 可以看出路域扰动下土壤有机碳、全磷、含水率与扰动方式呈显著正相关( $p < 0.01$ ),土壤容重与扰动方式呈显著负相关( $p < 0.01$ ),土壤全钾、植被盖度与恢复年限呈显著正相关( $p < 0.01$ ),土壤碳氮比与恢复年限呈显著负相关( $p < 0.01$ ),含水率与土层深度呈正相关( $p < 0.05$ )有机碳与土层深度呈显著负相关( $p < 0.01$ ),全磷与土层深度呈负相关( $p < 0.05$ ),Shannon 指数与有效土层深度呈负相关( $p < 0.05$ ),植被盖度与 Shannon 指数呈显著正相关( $p < 0.01$ )。碳氮比与含水率、扰动方式呈正相关( $p < 0.05$ ),Shannon 指数与容重呈正相关( $p < 0.05$ ),Shannon 指数与有效土层深度呈负相关( $p < 0.05$ ),植被盖度与有机碳、全磷、全钾、Shannon 指数呈显著正相关( $p < 0.01$ )。容重与含水率呈显著负相关( $p < 0.01$ )。

## 2.5 公路路域土壤理化性质综合评价

根据特征值大于 1 的原则,进行主成分分析,分析结果见表 5。由表 5 可知,该 8 个指标归结为 2 个主成分,其信息提供量分别为 46.387%,22.173%,其贡献能力有降低趋势,在该表第一组主成分中,有机碳(0.937)、全磷(0.912)全钾(0.719)、容重(-0.791)、含水率(0.734)上均有较高载荷,说明这 4 个因素有很强的相关性,且还说明容重值越大,有机碳、全磷、含水率含量越少,第二组主成分在植被盖度(0.774)和碳氮比(-0.711)上有较高载荷,说明这两个因素在土壤中起到主要作用。

表 5 扰动土壤理化性质主成分分析

Table 5 Principal component analysis of physical and chemical properties of disturbed soil

因子	主成分	
	1	2
含水率/%	0.672	-0.544
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	-0.791	0.012
有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.937	0.142
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.912	0.029
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.719	0.268
碳氮比/%	0.259	-0.711
Shannon 指数	-0.322	0.530
植被盖度	0.487	0.774
特征值	3.711	1.774
贡献率/%	46.387	22.173
积累贡献率/%	46.387	68.560

根据 2 个主成分系数,得到  $Y_1, Y_2$  的线性组合:

$$Y_1 = 0.349 X_1 - 0.411 X_2 + 0.487 X_3 + 0.474 X_4 + 0.373 X_5 + 0.134 X_6 - 0.167 X_7 + 0.253 X_8 \quad (3)$$

$$Y_2 = -0.408 X_1 + 0.009 X_2 + 0.107 X_3 + 0.022 X_4 + 0.201 X_5 - 0.534 X_6 + 0.398 X_7 + 0.581 X_8 \quad (4)$$

主成分的累计贡献率达到了 68.56%,可以表达 8 个指标的信息,但是单独提取其中一个因子无法对不同扰动方式下的土壤理化性质及植被指数进行综合评价,故而以每个主成分对应的特征值所占比例中的主成分的特征值之和的比例作为权重计算主成分综合模型,对提取的 2 个主成分计算公式为:

$$Y = \lambda_1 / \sum_{i=1}^2 \lambda_i \cdot Y_1 + \lambda_2 / \sum_{i=1}^2 \lambda_i \cdot Y_2 \quad (5)$$

由上式得出主成分综合模型:

$$Y = 0.677 Y_1 + 0.323 Y_2 \quad (6)$$

根据该综合评价模型可以得出不同恢复年限下不同扰动方式土壤理化性质及植被指数的综合得分见表 6。从表 6 可知,扰动方式为路堤和取土场相比于其他扰动方式的综合得分较高,恢复 15 a 的路堤、路堑、取土场扰动综合排名为 1, 2, 3, 其综合得分分别达到了 2.33, 1.42, 1.32, 说明该恢复年限下的土壤理化性质及植被指数相对较好;其次为恢复 5 a 的路堤扰动(0.99)、取土场扰动(0.58)和恢复 1 a 的路堤扰动(0.12)、取土场扰动(-0.26),碾压扰动的综合得分均处在极低水平,综合排名在 9, 11, 12 位。除恢复年限为 15 a 的路堑(1.42)外,各恢复年限扰动形式为碾压和路堑的 5 种的土壤理化性质综合得分皆小于 0, 说明其土壤理化性质极差,根据扰动区土壤理化性质总体得分情况,需采取相应措施,改善土壤理化性质提高养分含量。

表 6 扰动土壤理化性质主成分分析和总额分析

Table 6 Principal component analysis and total analysis of physical and chemical properties of disturbed soil

影响方式	主成分 $Y_1$ 得分	主成分 $Y_2$ 得分	综合得分	排名
恢复 1 a 碾压	-2.89	-0.85	-2.23	12
恢复 5 a 碾压	-3.15	1.64	-1.60	11
恢复 15 a 碾压	-1.75	0.80	-0.93	9
恢复 1 a 路堑	-1.42	-0.88	-1.24	10
恢复 5 a 路堑	-0.91	0.37	-0.49	8
恢复 15 a 路堑	1.62	0.98	1.42	2
恢复 1 a 取土场	0.66	-2.19	-0.26	7
恢复 5 a 取土场	1.05	-0.41	0.58	5
恢复 15 a 取土场	1.49	0.95	1.32	3
恢复 1 a 路堤	1.07	-1.87	0.12	6
恢复 5 a 路堤	1.72	-0.52	0.99	4
恢复 15 a 路堤	2.50	1.99	2.33	1

## 3 讨论

### 3.1 各扰动方式下土壤理化性质的变化

路域生态恢复初期各扰动方式下的土壤容重处于最大值,这是由于该阶段受到机械碾压、人为干扰较频繁,路域土壤土层排列凌乱,土壤容重大,随恢复年限的增加,植物枯落物及 1 a 生植物的逐年死亡,土壤有机质增多,土壤成分改善后土壤微生物增多以及各种成土因素的联合作用下,各扰动方式土壤容重随恢复年限皆表现出逐年减小并在数值上向未扰动区域靠拢(表 2),其中,路堑扰动第 5—15 a 恢复段容重下降幅度最为明显,各深度土层的容重分别下降了 7.79%,10.04%,10.72%,本研究发现,土壤容重与含水率呈现负相关,与前人研究结果保持一致<sup>[20]</sup>,路域生态恢复过程中,第 1—5 a 恢复段各扰动形式下不同土层土壤含水率皆出现大幅度的上升,这是由于生态恢复改善了土壤的墒情,植被的覆盖和枯落物提高了土壤的保水性<sup>[21]</sup>。但在恢复第 5—15 a 段中,各扰动方式的土壤含水率均出现下降的情况,这与薛杨<sup>[22]</sup>的研究结果相同。有效土层厚度仅与扰动方式有关,与恢复年限并无明显特征。

各扰动方式下土壤的有机碳含量和全磷含量皆随恢复年限的进行而增长,其中,路堤扰动的表层土壤有机碳含量和全磷含量普遍高于未扰动区,其主要原因和公路运营过程中,人为活动使得土壤养分富集有关。已有的研究结果表明<sup>[23]</sup>,生态恢复的初期,土壤环境恶化,植物群落结构和物种组成简单,随着恢复的进行,土壤有机质的不断积累,土壤容重、含水率等物理性质会得到改善,土壤有机碳、全磷含量会增加<sup>[24-26]</sup>,本研究结果与以上观点结果保持一致,但对照全国土壤标准指标<sup>[27]</sup>,可以发现该研究区土壤理化性质各指标普遍偏低,这与郭文研究结果相同<sup>[28]</sup>。

### 3.2 各扰动方式下植被盖度、物种多样性指数的变化

纵观路域生态恢复过程,植被群落不同扰动方式下的物种多样性指数皆出现了先急速增加后趋于稳定的趋势,结合这一趋势,可将路域生态恢复过程分为 3 个时期,恢复初期(恢复 1 a):不同扰动使得路域生态遭到破坏,4 种扰动方式(碾压、路堑、取土场、路堤)的植物群落的物种多样性指数分别为:0.1,0.3,0.3,0.6,其数值明显低于未扰动水平;恢复中期(恢复 5 a):在一定扰动范围内,4 种扰动方式(碾压、路堑、取土场、路堤)的植物群落的物种多样性指数分别为:1.4,0.8,0.8,1.5,其数值出现明显升高,且物种多样性指数已经显著超越未扰动地区;恢复后期(恢复

15 a):植物群落的物种多样性指数在达到峰值后出现降低的阶段,4 种扰动方式(碾压、路堑、取土场、路堤)的植物群落的物种多样性指数分别为:0.8,0.4,0.4,1.3,其数值逐步接近未扰动地区。

赵晶<sup>[29]</sup>在陕南高速公路边坡植被生长状况的研究中发现路域生态系统各扰动方式下植被盖度随恢复年限呈现增加趋势,本研究与前人研究结果相同,在恢复到 15 a 时,路堤、取土场扰动的植被盖度相对最佳,均达到了 30%。而物种多样性指数呈先增加后减少,根据这一趋势,本研究将恢复过程分为 3 个阶段,恢复初期物种多样性指数低,碾压、路堑、取土场、路堤 4 种扰动的植物群落物种多样性指数仅为 0.13,0.35,0.12,0.68,恢复中期物种多样性指数大幅度增加,4 种扰动方式的物种多样性指数达到了峰值,恢复后期物种多样性指数出现下降最终趋于稳定。前人的结果表明,生物量的增加意味着植物通过光合作用从外界吸收 CO<sub>2</sub> 的能力增强,也就是碳汇能力的增强<sup>[30]</sup>,土壤有机质的增加意味着土壤碳储量的增加<sup>[31]</sup>,因此,路域生态系统的恢复过程是碳汇增加的过程,其对于应对气候变化方面存在着重大意义。

## 4 结论

(1) 路域生态系统中,不同扰动方式皆会使 0—30 cm 的土壤容重发生变化,其中碾压扰动所导致的土壤容重变化幅度最大,相比于未扰动区域,恢复 1,5,15 a 的表层土壤容重分别增加了 26.98%,23.46%,21.66%,土壤容重下降幅度最大的为路堑扰动,各深度土层土壤容重分别下降了 7.79%,10.04%,10.72%,而取土场扰动的土壤容重随着恢复年限的增长大体出现增加的趋势,其中各土层 5—15 a 段土壤容重增加趋势尤为明显,分别增长了 9.08%,6.76%,5.10%,4 种破坏形式的土壤容重表现为:碾压>路堤>路堑>取土场,随着恢复年限的增长,土壤容重有向未扰动区土壤容重靠拢趋势。而各扰动方式下的含水率与容重保持反比关系。

(2) 随着生态群落恢复的进行,植物丰富度指数显现先增高后降低最终趋于稳定的趋势,其中恢复中期物种多样性指数相比于恢复后期有所升高,其中恢复 5 a 路堤扰动区的物种多样性指数从 1 a 时的 0.68 提升到了 1.43,在 4 种扰动中物种多样性指数升高最为明显。

(3) 通过对土壤理化性质及植被指数的综合评价分析得出,受到扰动的土壤理化性质及植被指数与未扰土壤对比有很大差异,填方的土壤养分含量较高,综合得分在 1.573~0.748 之间,综合排名位于总

体前6,说明土壤中含有一定量的养分,而挖方的土壤无论是路堑还是取土场,其养分含量相比其他扰动均有所降低,综合得分在0.401~2.337之间,综合排名名次偏后。

### [参 考 文 献]

- [1] Johst. Susan K. Wisser, Ian J. Payton, Miquel De Cáceres. Using classification assignment rules to assess land-use change impacts on forest biodiversity at local-to-national scales [J]. *Forest Ecosystems*, 2018, 5(2): 162-176.
- [2] 陈辉,李双成,郑度.青藏公路铁路沿线生态系统特征及道路修建对其影响[J].*山地学报*,2003,21(5):559-567.
- [3] Ganasri B P, Ramesh H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Nethravathi Basin [J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(6):953-961.
- [4] 吕江,赵晖,袁宗浩,等.高速公路边坡植被修复对土壤微生物群落的影响[J].*福建农林大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(3):420-426.
- [5] 宋伯翰.二郎山亚高山公路边坡植物群落和土壤季节变化特征研究[D].四川 成都:四川师范大学,2020.
- [6] 徐晶园,圣倩倩,王伟希,等.南京典型城市道路植物多样性与土壤因子的耦合关系[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(6):119-126.
- [7] 张志伟,尹惠妍,周尧治,等.不同设置年限沙障对沙漠土壤理化性质的影响[J].*西北林学院学报*, 2020, 35(5): 68-77.
- [8] 史东梅,刘益军,陈晏,等.国家重点公路重庆奉云段高速公路水土保持措施的探讨[J].*水土保持学报*, 2006, 20(3):88-92.
- [9] 杨翠林,邬鹏程,葛华.半干旱草原区公路建设水土保持措施及效益研究[J].*内蒙古水利*, 2009(3):31-32.
- [10] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the *R*-factor in the revised USLE [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/2/3/4):287-306.
- [11] Dissmeyer G E, Foster G R. Estimating the cover-management factor (*C*) in the universal soil loss equation for forest conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1981, 36:235-240.
- [12] 高启晨,陈利顶,吕一河,等.西气东输工程沿线陕西段区域生态安全格局设计研究[J].*水土保持学报*, 2005, 19(4):164-168.
- [13] 明家跃,戴喜丽,胡长振.界阜蚌高速公路水土保持方案的探讨[J].*交通环保*, 2000(3):26-30.
- [14] Demirci A, Karaburun A. Estimation of soil erosion using RUSLE in a GIS framework: A case study in the Buyukcekmece Lake watershed, Northwest Turkey [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(3):903-913.
- [15] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the *R*-factor in the revised USLE [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/2/3/4):287-306.
- [16] 国家林业局.森林土壤分析方法[J].北京:中国标准出版社,1999:1-108.
- [17] 牛玉璐.高速公路边坡植被生态恢复效果评价:以大广高速(衡水—深州段)为例[J].*现代园艺*, 2020, 43(23): 37-39.
- [18] 曹晓俊.对我国上市银行经营业绩的分析:基于主成分分析、因子分析和聚类分析的方法[J].*宿州学院学报*, 2016, 31(7):25-29.
- [19] 许文旭,杨献坤,崔斌,等.东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(3):28-36.
- [20] 张青青,张桂莲,伍海兵,等.城市森林土壤有机碳密度及影响因子变化研究[J].*生态科学*, 2022, 41(2):204-210.
- [21] 宋百敏,刘建,张玉虎,等.废弃采石场自然恢复过程中土壤和植被特征[J].*山东大学学报(理学版)*, 2022, 57(1):8-19.
- [22] 李文军,刘少文,贾春峰,等.黄土地区高速公路边坡土质特征试验研究[J].*公路*, 2015, 60(7):259-264.
- [23] 陈维梁,王树学,齐统祥,等.黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性[J].*生态学报*, 2021, 41(14):5643-5657.
- [24] 陈佩岩,马岚,梅雪梅,等.降雨过程中不同密度枯落物对各土层含水率动态影响[J].*北京林业大学学报*, 2018, 40(11):93-101.
- [25] 安慧,杨新国,刘秉儒,等.荒漠草原区弃耕地植被演替过程中植物群落生物量及土壤养分变化[J].*应用生态学报*, 2011, 22(12):3145-3149.
- [26] 杨振意,薛立,许建新.采石场废弃地的生态重建研究进展[J].*生态学报*, 2012, 32(16):5264-5274.
- [27] 张亦扬.榆神府采煤塌陷区不同植被恢复方式下土壤与植物演替规律及其耦合关系[D].陕西 西安:西安科技大学,2019.
- [28] 郭文,焦鹏宇,唐楚珺,等.不同林龄杉木根际和非根际土壤矿质养分含量及根际效应[J].*福建农林大学学报(自然科学版)*, 2022, 51(4):533-539.
- [29] 赵晶.陕南高速公路边坡人工植被恢复初期土壤及群落特征变化研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [30] Wellbrock N, Riek W, Wolff B. Characterisation of and changes in the atmospheric deposition situation in German forest ecosystems using multivariate statistics [J]. *European Journal of Forest Research*, 2005, 124(4): 261-271.
- [31] 曹先磊.碳交易视角下人工造林固碳效应价值评价研究:以邵阳县为例[D].北京:北京林业大学,2018.