# 郑尧高速公路边坡植物群落物种多样性对土壤环境的响应

王 华[1], 董娜琳[1,2], 徐恩凯[1,2], 谷翰思[1], 田国行[1,2]
(1.河南农业大学 风景园林学院, 河南 郑州 450002;
2.河南省风景园林国际联合实验室, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** [目的]探究高速公路边坡植被与土壤环境因子的相互作用关系,揭示植被与土壤的互馈机制。[方法]以郑尧高速公路K121—K137段边坡为研究对象,设置4个典型植物群落样地,标记为A,B,C,D,进行植被调查和土壤理化性质测定;采用Pearson相关性分析和冗余分析法(RDA),探究物种多样性指数和土壤环境因子的相关性。[结果]①样地内共记录优势物种16种,灌木层以紫穗槐、荆条、构树为主,草本层以艾草、狗尾草、一年蓬为主;②物种多样性整体水平排序为:B>D>C>A,土壤养分水平排序为:C>D>A>B;③物种多样性与0—20 cm土层的土壤因子相关性显著,与全氮、全磷、全钾、碱解氮及pH值的相关性较高;冗余分析显示,全钾是驱动群落多样性分异的关键因子(解释率为15.2%,贡献率为16%),且与物种多样性呈显著正相关性;物种丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数间呈显著正相关,三者与Pielou均匀度指数均无显著相关性。[结论]土壤环境因子是驱动边坡植物群落多样性分异的关键因素;土壤养分水平与物种多样性并非简单的正比关系,富营养化环境可能限制物种多样性提升。在边坡自然恢复阶段,建议注重关键限制因子的精准调控和土壤健康的整体提升,因地制宜发展多种群边坡植物群落,优化群落结构,以构建高效、稳定、可持续的边坡生态系统。

**关键词:** 物种多样性; 边坡恢复; 土壤环境; 相关性分析
**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0235-10 **中图分类号:** Q948.1, S154

**文献参数:** 王华, 董娜琳, 徐恩凯, 等.郑尧高速公路边坡植物群落物种多样性对土壤环境的响应[J].水土保持通报,2026,46(4):235-244. Wang Hua, Dong Nalin, Xu Enkai, et al. Response of plant community species diversity to soil environment on slopes of Zhengyao Expressway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):235-244.

**DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.003** **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.003**

# Response of plant community species diversity to soil environment on slopes of Zhengyao Expressway

Wang Hua[1], Dong Nalin[1,2], Xu Enkai[1,2], Gu Hansi[1], Tian Guohang[1,2]
(1.*College of Landscape Architecture, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan* 450002, *China*;
2.*Henan Provincial International Joint Laboratory of Landscape Architecture, Zhengzhou, Henan* 450002, *China*)

**Abstract:** [Objective] The relationships between vegetation communities and soil environmental factors on highway slopes were examined in order to reveal vegetation-soil feedback mechanisms. [Methods] Four typical plant community sample plots labeled A, B, C, and D were established along the K121—K137 section of the Zhengyao Expressway. Vegetation surveys and soil physicochemical analyses were conducted, and Pearson correlation analysis and redundancy analysis (RDA) were used to evaluate the associations between species diversity and soil variables. [Results] ① A total of 16 dominant species were recorded in the plots. The shrub layer was dominated by *Amorpha fruticosa*, *Vitex negundo*, and *Broussonetia papyrifera*, and the herb layer was

**收稿日期:**2025-03-05 **修回日期:**2026-01-16 **采用日期:**2026-01-16
**资助项目:**河南省自然科学基金面上项目"高速公路边坡植被演替过程中植被健康与土壤质量耦合关系研究:以河南省为例"(252300420194);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(222102320465);河南省高等学校学科创新引智基地项目(GXJD006);河南省国际科技合作项目(232102521015)
**第一作者:**王华(1990—),女(汉族),河南省郑州市人,博士研究生,研究方向为城市生物多样性保护与维育。Email:15136173044@163.com。
**通信作者:**徐恩凯(1982—),男(汉族),河南省南阳市人,博士,副教授,主要从事高速公路路域景观生态和城乡绿地资源调控研究。Email:xek1206@henau.edu.cn。

dominated by *Artemisia argyi*, *Setaria viridis*, and *Erigeron annuus*. ② Species diversity ranked B > D > C > A, whereas soil nutrient levels ranked C > D > A > B. ③ Species diversity was significantly associated with soil factors in the 0—20 cm layer, especially total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen, and pH value. The results of redundancy analysis showed that total potassium was the main factor associated with community diversity differentiation (with an explanation rate of 15.2% and a contribution rate of 16%), and showed a significant positive relationship with species diversity. The species richness, the Shannon-Wiener index, and the Simpson index were significantly positively correlated with each other, whereas none of them was significantly correlated with the Pielou evenness index. [Conclusion] Soil environmental factors are the key drivers of plant community diversity differentiation on highway slopes, but higher soil nutrient levels do not necessarily correspond to higher diversity. In particular, excessively nutrient-rich conditions may constrain further increases in species diversity. During the natural restoration stage of slopes, it is recommended to focus on precise regulation of key limiting factors and overall improvement of soil health, promote the development of multi-species plant communities adapted to local conditions, and optimize community structure to construct an efficient, stable, and sustainable slope ecosystem.

**Keywords: species diversity; slope restoration; soil environment; correlation analysis**

随着中国高速公路网络的快速扩张,其建设引发的生态问题日益凸显。高陡边坡因土壤结构破坏、养分流失及生境异质性增强,导致水土流失、滑坡等次生灾害频发,严重威胁路域生态安全和区域可持续发展[1]。因此,如何实现受损边坡植被的稳定恢复,维护植被健康和路域生态系统的稳定,构建"工程-生态-景观"协同体系,已成为交通工程与生态学交叉领域亟待解决的关键问题[2]。

植被与土壤作为陆地生态系统的核心组分,其互馈机制在脆弱生境恢复中具有决定性作用。土壤通过调控植物群落的演替进程、结构和功能,影响着植被恢复的方向与效率[3];而植被则通过改善土壤理化性质与生态功能,形成正向反馈机制[4-5]。这种动态耦合关系不仅是群落稳定性维持的基础,更是退化生态系统重建的关键机制[6]。

高速公路边坡作为典型的人工扰动脆弱生境,其植被恢复具有特殊挑战性。线性工程跨越多样生态区导致环境异质性显著,加之工程实践中普遍存在"重短期覆盖、轻长期稳定"的修复倾向,常出现初期植被覆盖达标而后期逆向演替的困境[7]。研究表明,边坡植被的群落结构、物种多样性及其与土壤系统的协同进化能力,直接决定着边坡稳定性维持、土壤肥力恢复和路域生态系统功能重建的成效[8]。只有深入地了解植被和土壤的关联性,才能理解植被演替过程中的植被健康和土壤环境的关系,为高速公路边坡植被恢复提供科学可行的策略。近年来,开展的相关研究主要集中在生态工程防护[9],边坡植被恢复评价与修复[10],植被群落结构多样性及稳定性[11-13],边坡景观修复性设计[14],植被对土壤质量影响[15-16]等方面,但对高速公路边坡植物群落物种多样性对土壤环境因子的响应机制研究较少,尤其对长期恢复边坡的系统研究。

河南省作为中国高速公路建设的先行区域,其边坡植被恢复工程已实施20余年,但部分路段仍存在群落结构单一,土壤肥力低下等低效恢复模式,影响边坡生态重建的质量和效果。本研究以郑尧高速公路K121—K137段(平顶山—鲁山县)边坡为研究对象,对边坡植被和土壤进行定点定期野外调查采样和室内试验分析,综合运用Pearson相关性分析和冗余分析(redundancy analysis, RDA)等方法对边坡典型植物群落物种多样性及环境因子进行相关性分析[17],探讨高速公路边坡植被与土壤环境因子间相互作用关系以及边坡恢复特征,揭示植被与土壤的互馈机制,以期为今后高速公路边坡生境重建,生物多样性保护及生态管护技术优化提供理论参考与依据。

## 1 研究区概况

郑尧高速公路是2005年河南省唯一由交通运输部确定的"勘察设计典型示范工程",在建设初期采用以客土喷播和人工撒播为主的生态防护技术,边坡覆土以改良的本地棕壤与褐土为主,植物配置遵循乡土化、多样化原则,以草本植物(如狗尾巴草、艾草)为先锋,灌木(如紫穗槐、荆条)为主体进行混播,旨在快速建立稳定的边坡植物群落。该路段通车年限已超过15 a。研究区位于伏牛山北生态类型区东麓,淮河水系的沙河上游,以地势起伏的低山丘陵为主,属于暖温带和亚热带气候交错的边缘地区,具有明显的过渡性特征,四季分明,雨量充沛,年平均气温14.7 ℃,年降水量为1 000 mm,年湿润系数为0.8~1.0。研究路段边坡主要为土质边坡,由沿线广

泛分布的棕壤与褐土构成,部分路段为土石混合边坡。边坡主要植被有紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、艾草(*Artemisia argyi*)、狗尾巴草(*Setaria viridis*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、苘草(*Arthraxon hispidus*)等,群落植被覆盖度约达80%以上。调查期间,该路段植被处于自然恢复状态,除初期的生态防护工程外,后期未进行施肥、灌溉、补播等集约化养护管理,从而为研究边坡植物群落的长期自然演替及其与土壤环境的相互关系提供理想条件。

## 2　材料与方法

### 2.1　研究方法

#### 2.1.1　样地设置与群落调查

本研究于2022年7—9月对郑尧高速公路边坡植物群落和土壤进行实地调研与取样。通过对试验段边坡进行普查发现,平顶山—鲁山县路段植物群落分布较为集中,植被恢复年限一致,生长状况基本都能体现整段水平。为揭示土壤环境因子对边坡植物群落物种多样性和植被恢复状态的驱动机制,依据群落典型性、恢复时序一致性、立地环境相似性等原则,在郑尧高速公路K121—K137段筛选出具有代表性的植物群落样地4个,记为A,B,C,D,并在每个样地中下坡位布设3个5 m×5 m灌木样方,记为$A_1$,$A_2$,$A_3$,每个样方采用梅花五点法设置5个1 m×1 m的草本样方,共计12个灌木样方和60个草本样方。采用常规的植物群落调查方法[18],详细记录每个样方内所有灌木的种类、数量、高度、冠幅、地径、盖度、生长情况等;草本植物的种类、高度、盖度、生长情况等,测量并记录样方内的生境状况(如图1)。样地基本情况见表1。




**图1　样地植被情况**

**Fig.1　Vegetation conditions of sample plots**

**表1　边坡样地基本情况**

**Table 1　Basic conditions of slope sample plots**

| 样地编号 | 桩号 | 地理坐标 | 海拔高度/m | 护坡型式 | 边坡类型 | 坡长/m | 坡度/(°) | 坡向 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | K121 | 33°48′30.04″N,113°4′54.98″E | 119 | 镀锌铁丝网 | 路堑 | 13.5 | 43 | 阳坡 |
| B | K128 | 33°47′37.34″N,113°0′33.31″E | 141 | 无支护骨架 | 路堑 | 14 | 36 | 阳坡 |
| C | K129 | 33°47′40.48″N,112°59′10.53″E | 190 | 骨架+镀锌铁丝网 | 路堑 | 15.4 | 65 | 阳坡 |
| D | K137 | 33°46′37.71″N,112°54′35.87″E | 165 | 镀锌铁丝网 | 路堑 | 11.8 | 60 | 阳坡 |

2.1.2 土样调查及理化性质测定

土壤取样与植被调查同步进行,使用环刀和铝盒对植被采样区内的土壤进行采样。在每个5 m×5 m样方内,随机在0—20 cm和20—40 cm土层分别用环刀取原状土并混合,每种群落对应的土壤均重复3次。每个样方所取的土样混合后按四分法进行取样并最终保留0.5~1 kg土样,分别装入自封袋,标记为Ⅰ。剩余土样现场称取湿重并记录,标记为Ⅱ。土样Ⅱ带回实验室后用105 ℃的烘箱烘干至恒定重量后,称其干重。计算不同深度的土壤含水率($w$),取其平均值,指标计算如下:

$$w=\frac{m_2-m}{m}\times 100\% \tag{1}$$

式中:$m_2$为土壤湿重,$m$为土壤干重。

土样Ⅰ带回实验室,置于室内阴凉处自然风干,剔除杂质,粉碎并用1 mm网筛去除根系和粗砂粒后,在实验室内分析全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾和碱解氮、有机质、pH值等指标。全氮采用半微量凯氏扩散法,全磷、有效磷采用紫外分光光度计法,全钾和速效钾采用火焰光度计法,有机质含量采用重铬酸钾-硫酸溶液法[19-20]。

### 2.2 数据处理与分析

2.2.1 植物群落物种多样性测度

本研究选取重要值(Ⅳ)、Margalef丰富度指数(DM)、辛普森(Simpson)优势度指数($D$)、香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数($H$)和皮洛(Pielou)均匀度指数($E$)测度高速公路边坡不同植物群落的物种多样性特征,计算公式如下[21-22]:

(1)重要值。

Ⅳ=(相对高度+相对盖度+相对多度)/3 (2)

(2)Margalef丰富度指数。

$$\mathrm{DM}=(S-1)/\ln N \tag{3}$$

(3)Simpson优势度指数。

$$D=1-\sum_{i}^{s}\left(p_i\right)^2 \tag{4}$$

$$p_i=N_i/N$$

(4)Shannon-Wiener多样性指数。

$$H=-\sum_{i=1}^{s}p_i\ln p_i \tag{5}$$

(5)Pielou均匀度指数。

$$E=H/\ln S \tag{6}$$

式中:$p_i$为群落中第$i$个物种的个体数占所有物种个体数的比例,$N_i$为第$i$个种的个体数,$N$为样方内全部物种的个体数之和,$S$为所计算样方中的物种数。

2.2.2 数据处理

应用SPSS 27.0进行植物物种多样性与土壤环境因子Pearson相关性分析,使用CANOCO 5.0对物种多样性与环境因子进行RDA分析,图表在Excel 2020、Origin 2023中完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 边坡植物群落物种组成

经调查,样地A群落以荆条、紫穗槐为主,伴生有少量的狗尾草和紫苜蓿,覆盖度高达95%;样地B群落以紫穗槐、狗尾草、艾草为主,伴生有白茅和一年蓬,覆盖度达85%;样地C群落以紫穗槐、五叶地锦为主,伴生有艾草、饭包草和刺儿菜,覆盖度达80%,但是群落长势不及其他样地,可能与其样方内掺杂碎石、土质生硬有关;样地D群落以构树、荆条、狗尾草、艾草为主,物种较为丰富,灌木层优势种主要有构树、紫穗槐、臭椿和荆条,草本层优势种有狗尾草、艾草和苣草,伴生有少量猪毛蒿和牵牛花,覆盖度达90%。由表2可知,样地中优势物种共11科,16属,16种,由于边坡立地条件较差,乔木体型矮小均按灌木统计,灌木层以紫穗槐、荆条和构树为主,重要值依次为3.88,1.81,0.62,草本层以艾草、狗尾草和一年蓬为主,重要值依次为1.75,1.27,0.47。边坡群落植物种类单一,组成结构简单,样地A,B,C均以紫穗槐为优势种。

### 3.2 植物群落物种多样性指数分析

通过对12个样方的群落、灌木和草本层的物种多样性指标分析,结果如表3所示,物种丰富度均较贫乏,Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数最大值分别为0.784,1.573,均为$B_2$,最小值分别为0.480,0.673,均为$A_1$,Pielou均匀度指数最大值为0.991属于$A_1$,最小值为0.688属于$C_3$。综合判断,样方植物群落物种多样性水平排序为:$D_3>D_2>C_2>B_2>B_1>C_1>B_3>C_3>A_3>D_1>A_1>A_2$。样地的物种多样性指数为其各自3个重复样方物种多样性指数累积的平均值,就4个样地植物群落而言,物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数排序为:B> D > C > A,Pielou均匀度指数顺序为:B > D > A > C,因此物种多样性整体水平排序为:B > D > C > A。

样地A以灌木为主,草本种类较少,灌木层郁闭度过高;样地C为拱形骨架高陡路堑边坡,环境条件相对恶劣,植物数量较少,长势较差;样地D草本种类丰富,且各样方灌木种类不一,物种多样性相对较高;样地B坡势平缓,覆盖度不高,光照条件较好,利于草本植物生长,因此草本物种丰富度较高。

**表 2　样地优势物种及其重要值**

**Table 2　Dominant species and their importance values of sample plots**

| 物 种 | 类 型 | 科 名 | 属 名 | 重要值 |
|---|---|---|---|---|
| 紫穗槐(*Amorpha fruticosa*) | 灌 木 | 豆 科 | 紫穗槐属 | 3.88 |
| 荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*) | 灌 木 | 马鞭草科 | 牡荆属 | 1.81 |
| 构树(*Broussonetia papyrifera*) | 灌 木 | 桑 科 | 构 属 | 0.62 |
| 臭椿(*Ailanthus altissima*) | 灌 木 | 苦木科 | 臭椿属 | 0.33 |
| 石楠(*Photinia serrulata*) | 灌 木 | 蔷薇科 | 石楠属 | 0.16 |
| 艾草(*Artemisia argyi*) | 多年生草本植物 | 唇形科 | 益母草属 | 1.75 |
| 狗尾草(*Setaria viridis*) | 一年生草本植物 | 禾本科 | 狗尾草属 | 1.27 |
| 一年蓬(*Erigeron annuus*) | 一年或两年生草本植物 | 菊 科 | 飞蓬属 | 0.47 |
| 荩草(*Arthraxon hispidus*) | 一年生草本植物 | 禾本科 | 荩草属 | 0.39 |
| 猪毛蒿(*Artemisia scoparia*) | 多年生草本植物 | 菊 科 | 蒿 属 | 0.33 |
| 五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia*) | 木质藤本植物 | 葡萄科 | 地锦属 | 0.32 |
| 饭包草(*Commelina bengalensis*) | 多年生草本植物 | 鸭跖草科 | 鸭跖草属 | 0.23 |
| 紫花苜蓿(*Medicago sativa*) | 多年生草本植物 | 豆 科 | 苜蓿属 | 0.19 |
| 白茅(*Imperata cylindrica*) | 多年生草本植物 | 禾本科 | 白茅属 | 0.14 |
| 牵牛(*Pharbitis nil*) | 一年生草本植物 | 旋花科 | 牵牛属 | 0.07 |
| 刺儿菜(*Cirsium setosum*) | 多年生草本植物 | 菊 科 | 蓟 属 | 0.05 |

**表 3　边坡群落物种多样性分析**

**Table 3　Analysis of species diversity in slope communities**

| 物种多样性指数 | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 物种丰富度(DM) | 2 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 |
| Shannon-Wiener多样性指数($H$) | 0.480 | 0.494 | 0.679 | 0.770 | 0.784 | 0.724 | 0.526 | 0.698 | 0.500 | 0.546 | 0.776 | 0.767 |
| Simpson优势度指数($D$) | 0.673 | 0.687 | 1.241 | 1.531 | 1.573 | 1.330 | 0.891 | 1.340 | 0.953 | 0.931 | 1.557 | 1.521 |
| Pielou均匀度指数($E$) | 0.971 | 0.991 | 0.895 | 0.952 | 0.978 | 0.959 | 0.811 | 0.833 | 0.688 | 0.847 | 0.967 | 0.945 |

### 3.3　边坡样地土壤不同土层理化指标含量分析

土壤不同层次的理化性质决定了植物群落类型和物种多样性,因此,选择全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、pH值和含水率共9个指标,并结合国家第二次土壤养分分级标准,对群落样地中不同层次的土壤养分水平进行分析评价。

结果如表4所示,样地C土层的pH值低于其他样地,土壤整体偏碱性;样地A中2个土层的有效磷的含量相对于其他样地最低;样地B中2个土层的全磷和碱解氮的含量相对于其他样地最低;样地D中2个土层的有机质含量相对于其他样地最低。0—20 cm土层,全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾的含量在样地C中最高;全钾的含量在样地B中最高;有机质的含量在样地A中最高。20—40 cm土层,全氮、全磷、碱解氮、有效磷的含量在样地D中最高;全钾、速效钾的含量在样地B中最高;有机质的含量在样地A中最高。所有样地中,0—20 cm土层理化指标含量普遍高于20—40 cm土层;整体土壤养分恢复水平排序为C > D > A > B。

### 3.4　植物群落物种多样性与土壤环境因子相关性分析

为明确边坡植物群落物种多样性的主导因素,将物种多样性指数与土壤因子进行Pearson相关性分析。由图2可知,群落物种多样性与0—20 cm土层的土壤因子存在明显的相关性,而与20—40 cm土层的相关性较弱,因此,本研究只对群落物种多样性与0—20 cm土层的土壤环境因子的相关性进行分析。结果显示,Pielou均匀度与全氮、全磷、碱解氮、有效磷呈显著负相关,与全钾、pH值呈显著正相关;Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数与速效钾呈显著负相关;pH值与全氮、全磷、全钾、碱解氮等呈极显著相关性,表明pH值为核心枢纽因子,凸显土壤酸碱平衡对多样性维持的重要性;有机质与全钾显著正相关,二者起协同作用;含水率与各指标间均无显著相关性。

以上分析表明,对植物群落物种多样性影响较大的土壤环境因子主要有全氮、全磷、全钾、碱解氮及pH值。

表4 边坡样方土壤不同土层的理化指标含量

Table 4 Contents of physicochemical indicators in different soil layers of slope sample plots

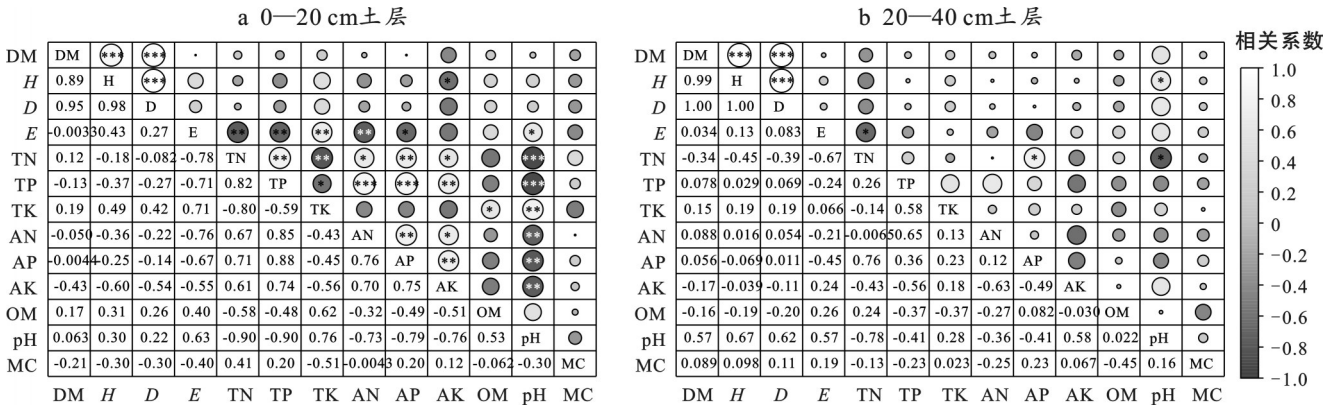
| 样方 | 采样深度/cm | 全氮/(g·kg$^{-1}$) | 全磷/(g·kg$^{-1}$) | 全钾/(g·kg$^{-1}$) | 碱解氮/(mg·kg$^{-1}$) | 有效磷/(mg·kg$^{-1}$) | 速效钾/(g·kg$^{-1}$) | 有机质/(g·kg$^{-1}$) | pH值 | 含水率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 0—20 | 1.31 | 0.356** | 18.11 | 16** | 3.1** | 209 | 30.3 | 8.5 | 4.23 |
| | 20—40 | 1.16 | 0.158** | 17.01 | 90 | 3.4** | 225 | 25.0 | 8.4 | 6.25 |
| $A_2$ | 0—20 | 1.10 | 0.216** | 16.52 | 48** | 2.1** | 289 | 26.6 | 8.4 | 4.11 |
| | 20—40 | 1.06 | 0.166** | 16.66 | 22** | 1.4** | 213 | 24.3 | 8.4 | 5.61 |
| $A_3$ | 0—20 | 2.33 | 0.442* | 19.32 | 99 | 3.5** | 168 | 53.0 | 8.5 | 5.38 |
| | 20—40 | 0.61** | 0.028** | 16.56 | 80* | 1.0* | 248 | 13.0* | 8.5 | 4.40 |
| $B_1$ | 0—20 | 1.90 | 0.075** | 20.93 | 64* | 5.2* | 213 | 46.8 | 8.6 | 4.32 |
| | 20—40 | 1.49 | 0.031** | 18.46 | 17** | 5.1** | 226 | 35.9 | 8.6 | 4.59 |
| $B_2$ | 0—20 | 1.65 | 0.361** | 19.97 | 61* | 4.4** | 152 | 40.5 | 8.5 | 3.35 |
| | 20—40 | 0.45** | 0.000** | 17.97 | 36** | 3.8* | 216 | 7.5** | 8.6 | 11.83 |
| $B_3$ | 0—20 | 3.12 | 0.420 | 19.22 | 43** | 6.2** | 242 | 9.3** | 8.4 | 3.71 |
| | 20—40 | 0.49** | 0.265** | 20.63 | 21** | 0.9 | 355 | 10.0** | 8.6 | 5.85 |
| $C_1$ | 0—20 | 6.26 | 1.338 | 13.05* | 366 | 20.7 | 391 | 17.9* | 6.8 | 4.62 |
| | 20—40 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| $C_2$ | 0—20 | 5.17 | 0.597* | 10.77* | 38** | 10.5 | 249 | 16.6* | 7.6 | 5.50 |
| | 20—40 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| $C_3$ | 0—20 | 4.47 | 0.844 | 13.45* | 337 | 14.0 | 303 | 13.4* | 7.9 | 3.94 |
| | 20—40 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| $D_1$ | 0—20 | 3.27 | 0.748 | 16.49 | 145 | 18.6 | 281 | 9.7** | 8.0 | 5.42 |
| | 20—40 | 2.77 | 0.665 | 18.66 | 71* | 7.1* | 126 | 11.1* | 8.2 | 6.67 |
| $D_2$ | 0—20 | 1.68 | 0.606 | 21.69 | 144 | 13.8 | 258 | 34.8 | 8.2 | 3.10 |
| | 20—40 | 0.59** | 0.986 | 22.97 | 132 | 3.7** | 114 | 11.1* | 8.5 | 4.87 |
| $D_3$ | 0—20 | 3.39 | 0.498* | 16.36 | 134 | 6.4* | 188 | 9.8** | 8.0 | 4.02 |
| | 20—40 | 1.12 | 0.272** | 12.89 | 84* | 2.1** | 103 | 21.7 | 8.4 | 5.03 |

注:①C试验段边坡土壤层掺杂坚硬碎石块,未能操作土钻取20—40cm土层。②除含水率和pH值不参与养分等级划分外,其余指标无标记均表示处于三级及更高水平。③*表示处于四级水平,**表示处于五级水平及更低水平。

### 3.5 边坡植物群落物种多样性与土壤因子的RDA排序分析

考虑到Pearson相关性分析存在局限性,还需采用RDA分析进一步研究物种多样性与土壤因子的关系。在初次排序中样方内全氮、全磷、有机质的贡献度小于1%,$p$值大于0.6,因此剔除这3个土壤因子后进行再次排序,并绘制群落物种多样性与土壤因子的RDA二维排序图。结果显示RDA四轴累计方差解释率为94.63%,其中第一和第二排序轴的累计方差解释率达到94.37%,这说明第一轴和第二轴可以解释绝大部分的物种多样性水平差异。由表5可知,6种土壤因子中速效钾的解释率和贡献率最高,分别为28.4%和30.0%,其次是全钾、有效磷、碱解氮、pH值、含水率。全钾的$p$值小于0.05,说明全钾是导致群落多样性呈现差异性的关键因子。

由图3可知,物种丰富度与全钾呈正相关关系,与含水率、速效钾呈负相关关系;Simpson优势度指数与全钾、pH值呈正相关关系,与速效钾、有效磷、碱解氮、含水率均呈负相关关系;Shannon-Wiener多样性指数与全钾、pH值呈正相关关系,与有效磷、碱解氮、含水率、速效钾呈负相关关系,其中与速效钾的负相关关系最显著;Pielou均匀度指数与全钾、pH值呈显著正相关关系,与其他土壤因子呈负相关关系,其中与有效磷、碱解氮的负相关关系最为显著。




注:①*表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.01 水平上显著相关,***表示在 0.001 水平上显著相关。②DM 为物种丰富度;*H* 为 Shannon-Wiener 多样性指数;*D* 为 Simpson 优势度指数;*E* 为 Pielou 均匀度指数;TN 为全氮;TP 为全磷;TK 为全钾;AN 为碱解氮;AP 为有效磷;AK 为速效钾;OM 为有机质;pH 为土壤 pH 值;MC 为含水率。下同。

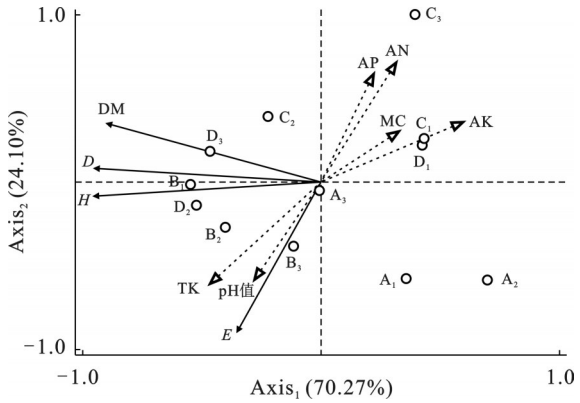
**图 2　群落物种多样性与土壤环境因子的相关性分析**

**Fig.2　Correlation analysis between community species diversity and soil environmental factors**

**表 5　环境因子对群落物种多样性的解释和贡献率**

**Table 5　Explanation and contribution rates of environmental factors to community species diversity**

| 土壤因子 | 解释率/% | 贡献率/% | *F* | *P* |
|---|---|---|---|---|
| 全钾(TK) | 15.2 | 16 | 4.8 | 0.038 |
| 速效钾(AK) | 28.4 | 30 | 4 | 0.054 |
| 有效磷(AP) | 6.5 | 6.9 | 3.5 | 0.108 |
| 含水率(MC) | 3.9 | 4.1 | 2.9 | 0.164 |
| 碱解氮(AN) | 5.7 | 6.1 | 2 | 0.172 |
| pH 值 | 4 | 4.3 | 1.5 | 0.226 |




注:$A_1$,$A_2$,$A_3$…$D_3$代表各样方。

**图 3　群落物种多样性与环境因子的 RDA 二维排序图解**

**Fig.3　RDA two-dimensional ordination diagram of community species diversity and environmental factors**

# 4　结　论

(1) 样地植物群落物种多样性整体水平排序为 B>D>C>A。土壤养分恢复整体水平排序为 C>D>A>B。这表明土壤养分水平与植物群落多样性并非简单的正比关系。富营养化环境可能导致群落简化甚至生长胁迫,而自然演替下形成的较高多样性群落能在较低养分条件下实现较好的自我维持。因此,对进入自然演替阶段的边坡,生态管理应侧重于关键限制因子的精准调控和群落结构的辅助优化,而非单纯的养分补充。

(2) 研究区边坡植物群落物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数相互呈显著正相关,而三者与 Pielou 均匀度指数均无显著相关性,揭示了群落中物种分布不均,少数优势种占据主导地位的特征。

(3) 物种多样性与 0—20 cm 土层的土壤环境因子各指标间存在不同程度的相关性,与全氮、全磷、全钾、碱解氮及 pH 值的相关性较高;土壤环境因子是驱动边坡植物群落多样性分异的关键因素。因此,边坡植被的适应性管理需重视土壤健康的整体提升,将土壤视为一个生命系统,而非养分的简单载体,从而引导群落向稳定、多样的方向发展。

# 5　讨　论

## 5.1　边坡植物群落物种多样性特征及其对土壤环境因子的响应

植被恢复通过植物-土壤互馈机制驱动生态系统正向演替:植物群落动态改变土壤结构、水分和养分循环,而土壤理化性质的改善又反哺植物生长,最终形成稳定平衡[23-24]。本研究揭示了郑尧高速公路边坡经过 15 a 自然恢复后,植物群落物种多样性与土壤环境因子存在着复杂而显著的响应关系。

(1) 物种多样性指数间的关联性表明,在该边坡生态系统中,物种丰富度、Shannon-Wiener 和

Simpson指数间存在显著正相关,这共同表征了群落的物种数目和综合多样性水平。然而,这三者与Pielou均匀度指数无显著关联,这可能与样地处于边坡下坡位生境条件相对优越、少数优势种(如紫穗槐)在群落中占主导地位相关,导致物种个数分布不均,均匀度不高。有研究显示,有机质与多样性指标有显著相关性[25],而本研究发现有机质仅与Pielou均匀度指数呈正相关,这与王慧敏等[26]、曹娓等[27]研究结果一致。这一发现提示,在评价边坡生态恢复效果时,需综合考量多样性的不同维度,仅关注物种数量可能无法全面体现群落的真实结构。

(2)关键土壤环境因子对群落物种多样性的驱动作用是本研究的核心发现。RDA分析结果表明,全钾是驱动植物群落多样性分异的关键土壤因子。这与高速公路边坡贫瘠和易流失的立地条件密切相关。钾元素作为重要的抗逆养分,可通过增强植物的抗旱、抗病能力,影响不同物种在边坡胁迫环境下的定植与竞争,从而决定群落组成。此外,pH值与多数多样性指标呈显著负相关,表明pH值对植物生长的抑制作用,印证了土壤偏碱性是限制该区域植物生长的重要胁迫因子。建议通过施用pH值调节剂以优化微生物活性与养分有效性,营造适宜植物生长的酸碱环境[28]。有效磷、速效钾与多样性显著正相关,表明这些速效养分是边坡生态系统中的稀缺资源,其有效性直接促进植物的生长与种类的增加。而碱解氮、全磷等因子与多样性的相关性不显著或规律不一,暗示其可能并非当前演替阶段下的主要限制因子,有些养分仅利于少数物种吸收利用从而形成单优群落,导致植物物种多样性较低。

### 5.2 边坡植被恢复的启示与优化策略

本研究发现的"高养分≠高多样性"现象(如C样地)具有重要生态启示:土壤养分最高的C样地并未出现最高的植物多样性,这表明在自然恢复阶段,土壤养分的绝对水平并非决定群落多样性的唯一主导因素。我们推测,C样地在初期生态修复过程中,可能因其立地条件特殊或接受的客土本身肥力较高,导致其土壤本底养分显著优于其他样地。然而,这种富营养化环境可能筛选并促进少数强竞争性物种的快速扩张与占优,它们通过竞争光、水和空间资源,抑制其他物种的生存,不利于多样性群落的构建。与之相对,B样地呈现出"较高多样性-较低养分"的状态,这主要因为植物群落种类多样化和结构复杂化加速土壤中物质的分解,而植物本身的化学组成和特征又制约着枯落物的分解和矿化过程,影响着植物对于土壤的养分归还[29]。这可能体现了植物群落对贫瘠环境的自适应:多样性高的群落能更有效地循环和利用有限的养分,形成某种程度的自维持机制。

因此,对通车多年,已进入自然演替阶段的高速公路边坡,养护策略应从"人工干预驱动"转向"辅助自然演替"。此外,有学者发现,有乔木的植物群落稳定性相对较高,对于群落结构为灌木+草本的,灌木层物种丰富的群落稳定性较高[30]。基于本研究结果,高速公路边坡植被优化方向可包括:①微生境改良:针对pH值偏高的普遍问题,可考虑小范围施用土壤改良剂(如硫磺粉),而非全面施肥,为植物创造更适宜的"土壤斑块"。②植物配置优化:可选择对钾需求较高或耐碱的乡土物种,而非盲目增加豆科植物(本研究中豆科植物占比有限,说明其固氮作用在此环境下可能并非关键生态过程),重点应放在提升群落的物种功能多样性和结构复杂性上。可增加适应性强的乔灌木,例如栓皮栎(*Quercus variabilis*)、槲栎(*Quercus aliena*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、榆树(*Ulmus pumila*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、丝棉木(*Euonymus maackii*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、扶芳藤(*Euonymus fortunei*)、常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等,因地制宜地发展多种群边坡植物群落,丰富物种多样性,优化群落结构,提高高速公路边坡生态系统的稳定性和可持续发展。③适应性管理:对于灌木覆盖度过高的样地,可实施轻度、局部刈割,为林下草本植物创造更新窗口,从而提升均匀度和整体多样性。

本文通过对郑尧高速公路K121—K137段边坡恢复15 a后群落物种多样性与土壤环境因子的相关性分析,旨在为高速公路边坡植物群落优化配置和土壤改良提供科学依据,推动边坡植被恢复和生态系统功能重建,降低后期养护强度和成本。受限于试验条件和资源,本研究尚处于初步探索阶段,目前仅对小尺度上的数据资料进行样地调查和数据分析,样地数量有限,研究结果在空间尺度和适用范围上存在一定的局限性,尚难以全面代表更大尺度或更复杂条件下的高速公路边坡生态状况。因此,高速公路边坡植物群落物种多样性与土壤环境因子的相互关系和影响机制的研究仍需在深度和广度上进一步拓展。亟须扩大样地和样方数量,提高调查频次和密度,建立更多具有代表性的长期监测试验段,以获取更具广泛性和连续性的监测数据,开展进一步探究。当前对植物、微生物、土壤(自然)三者的交

互作用与反馈机制的研究仍然有限,特别是在本研究的数据维度和采集规模的限制下,相关探讨尚不深入。未来需结合生态学、统计学、地理信息系统等多学科交叉方法进行定量研究,全面、深入探究边坡群落物种多样性与土壤微生物多样性的关系,及其共同调控的生态系统循环机制。此外,本研究注意到调查样地的坡度、海拔等存在一定差异,它们作为重要的地形因子,可能通过调控地表径流、土壤侵蚀与养分累积过程,间接塑造土壤环境的异质性。本研究主要聚焦于植物多样性对土壤环境的直接响应,而坡度、坡向、海拔等其他环境因子的间接驱动作用及其与土壤因子的交互效应,将是未来研究需要深入探讨的重要方向。

## 参考文献(References)


[1] Southerland M. Evaluation of ecological impacts from highway development [R]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1994.

[2] 胡兴,陈璋,李成俊,等.植物护坡工程质量的等级评价研究[J].水土保持通报,2013,33(3):180-185.
Hu Xing, Chen Zhang, Li Chengjun, et al. Grade evalution on quality of slope protection engineeing by vegetation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3):180-185.

[3] 余杭,高若允,杨柳生,等.震后生态恢复初期植被-土壤的耦合关系研究:以汶川县威州镇、绵竹市汉旺镇为例[J].北京林业大学学报,2021,43(5):53-63.
Yu Hang, Gao Ruoyun, Yang Liusheng, et al. Coupling relationship between vegetation and soil in the early stage of ecological restoration after earthquake: A case study of Weizhou Town in Wenchuan County and Hanwang Town in Mianzhu City of Sichuan Province, southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5):53-63.

[4] Qu Qing, Xu Hongwei, Wang Minggang, et al. Plant - soil feedback plays an important role in the progression of plant community succession [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2023,186(2):169-176.

[5] Bennett J A, Klironomos J. Mechanisms of plant-soil feedback: Interactions among biotic and abiotic drivers [J]. New Phytologist, 2019,222(1):91-96.

[6] Allek A, Viany Prieto P, Korys K A, et al. How does forest restoration affect the recovery of soil quality: A global Meta-analysis for tropical and temperate regions [J]. Restoration Ecology, 2023,31(3):e13747.

[7] 肖蓉,高照良,宋晓强,等.高速公路边坡植被特征分析及护坡模式优化研究[J].水土保持学报,2009,23(2):90-94.
Xiao Rong, Gao Zhaoliang, Song Xiaoqiang, et al. Analysis of vegetation features on slopes of expressway and study of slope protection model optimization [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 90-94.

[8] Hou Lingyu, Zhang Yongqiang, Li Zhichao, et al. Comparison of soil properties, understory vegetation species diversities and soil microbial diversities between Chinese fir plantation and close-to-natural forest [J]. Forests, 2021,12(5):632.

[9] 田国行,田耀武,路玲,等.生态防护工程对高速公路边坡土壤保持效率的影响[J].河南农业大学学报,2005,39(3):259-264.
Tian Guohang, Tian Yaowu, Lu Ling, et al. The effect of ecological protective measures on freeway slope soil conservative efficiency [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2005,39(3):259-264.

[10] 曹娓,吕若冰,贺环宇,等.扶沟—项城段高速公路边坡植物群落恢复状态评价[J].河南农业大学学报,2016,50(6):799-804.
Cao Wei, Lv Ruobing, He Huanyu, et al. Assessment of vegetation community restoring condition on Fugou—Xiangcheng expressway slope [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016,50(6):799-804.

[11] 胡永歌,曹娓,王艺琳,等.信南高速公路边坡土壤化学性质对植物分布的影响[J].西北林学院学报,2019,34(3):212-218.
Hu Yongge, Cao Wei, Wang Yilin, et al. On coupling relationship between plant distribution and soil chemical properties on the slope of Xinnan highway [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34 (3): 212-218.

[12] 吴昊,冯川川,马铭阳,等.信阳市南湾湖消落带冬季植物群落结构及物种多样性[J].信阳师范大学学报(自然科学版),2026,39(1):117-128.
Wu Hao, Feng Chuanchuan, Ma Mingyang, et al. Plant community structures and species diversity of the Nanwan Lake riparian zone within Xinyang City in winter [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026,39(1):117-128.

[13] 曹娓,胡永歌,陈冰,等.扶项高速公路边坡植被特征与稳定性比较[J].水土保持通报,2017,37(6):129-135.
Cao Wei, Hu Yongge, Chen Bing, et al. Character and comparison of community stability on Fugou—Xiangcheng highway slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(6):129-135.

[14] 程逸楠,苏光,秦晓春,等.基于景观生态学的旅游公路路域景观现状与生态敏感性研究[J].中国园林,2020,36(1):113-117.
Cheng Yinan, Su Guang, Qin Xiaochun, et al. Study on landscape status and ecological sensitivity of tourism

highway roads based on landscape ecology [J]. Chinese Landscape Architecture, 2020,36(1):113-117.

[15] 昝玉亭,奚同行,吴治玲,等.不同植物配置模式对人工边坡减流减沙效益的影响[J].水土保持通报,2022,42(3):1-7.
Zan Yuting, Xi Tonghang, Wu Zhiling, et al. Effects of different plant configuration patterns on flow and sediment reduction of artificial slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):1-7.

[16] Li Xinhui, Lei Shaogang, Liu Feng, et al. Analysis of plant and soil restoration process and degree of refuse dumps in open-pit coal mining areas [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(6):1975.

[17] 王艺琳.商登高速公路边坡植物群落恢复评价[D].河南 郑州:河南农业大学,2019.
Wang Yilin. Evaluation of vegetation communities restoration in slope of Shangdeng expressway [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2019.

[18] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.
Fang Jingyun, Wang Xiangping, Shen Zehao, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. Biodiversity Science, 2009,17(6):533-548.

[19] 陈立新.土壤实验实习教程[M].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学出版社,2005.
Chen Lixin. Soil Experiment Internship Tutorial [M]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University Press, 2005

[20] Zhang Yan, Yang Jianying, Wu Hailong, et al. Dynamic changes in soil and vegetation during varying ecological-recovery conditions of abandoned mines in Beijing [J]. Ecological Engineering, 2014,73:676-683.

[21] 张金屯.数量生态学[M].2版.北京:科学出版社,2011.
Zhang Jintun. Quantitative Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011.

[22] 杨崇曜,李恩贵,陈慧颖,等.内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素[J].生物多样性,2017,25(12):1303-1312.
Yang Chongyao, Li Engui, Chen Huiying, et al. Biodiversity of natural vegetation and influencing factors in western Inner Mongolia [J]. Biodiversity Science, 2017,25(12):1303-1312.

[23] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2005,30:75-115.

[24] van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, et al. Plant-soil feedbacks: The past, the present and future challenges [J]. Journal of Ecology, 2013, 101(2): 265-276.

[25] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.
Hu Chanjuan, Guo Lei. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(9):1640-1646.

[26] 王慧敏,张峰,庞春花,等.汾河流域中下游植物群落物种多样性与土壤因子的关系[J].西北植物学报,2013,33(10):2077-2085.
Wang Huimin, Zhang Feng, Pang Chunhua, et al. Interrelation between plant species diversity and soil factors in the middle and lower reaches of Fenhe River [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(10):2077-2085.

[27] 曹娓,郭佳月,武小栖,等.京港澳高速公路郑新段边坡植物群落稳定性[J].草业科学,2022,39(10):2074-2082.
Cao Wei, Guo Jiayue, Wu Xiaoqi, et al. Stability analysis of the vegetation community in the Zheng-Xin section of the Beijing—Hong Kong—Macao highway slope [J]. Pratacultural Science, 2022,39(10):2074-2082.

[28] Hillhouse H L, Schacht W H, Soper J M, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer and topsoil amendment on native plant cover in roadside revegetation projects [J]. Environmental Management, 2018, 61(1): 147-154.

[29] 苗静,张克斌,刘小丹,等.宁夏盐池封育草地植被群落多样性及其与环境关系的典范对应分析[J].生态环境学报,2015,24(5):762-766.
Miao Jing, Zhang Kebin, Liu Xiaodan, et al. Diversity of plant community in relation to environment factors based on CCA in fencing region in Yanchi, Ningxia [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 762-766.

[30] 张建昌,冯武焕,刘宏,等.勉—宁高速公路生态恢复中的土壤肥力恢复研究[J].西北林学院学报,2007,22(1):43-46.
Zhang Jianchang, Feng Wuhuan, Liu Hong, et al. Research on the soil recovery in ecology recovery along the highway from Mian County to Ningqiang [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007,22(1):43-46.