

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150235

公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系

薛 鸥¹ 魏天兴¹ 刘 飞² 李英勇³

(1 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室

2 北京圣海林生态环境科技股份有限公司 3 山东省交通厅公路局)

摘要:为促使高速公路边坡植被群落正向演替,探究植物群落多样性与环境因子的响应关系,以山东省青临高速公路16种典型绿化护坡类型为例,选取代表植物群落、地形条件和土壤特性的指标,运用冗余分析法揭示植被重建后群落多样性与环境因子的关系,并运用灰色关联度构建不同护坡模式下植被-土壤耦合模型。结果表明:1)各类环境因子共同解释了公路边坡植物多样性变异信息的87.599%,土壤理化性质的解释度最高,达到69.539%;2)多样性指数对土壤作用的反馈程度排序为Margalef指数>Shannon-Wiener指数>Simpson指数>Pielou指数;3)与群落多样性平均关联系数大于0.65的土壤因子排序为速效磷>全磷>全氮>全钾>有机碳,属于较强关联;4)公路边坡植被-土壤的耦合协调程度以弱协调和中等协调为主,耦合度排序为土质边坡>岩质边坡>岩土混合边坡。该研究可为山东省乃至华北地区公路边坡植被恢复提供参考依据。

关键词:植被恢复;冗余分析;耦合协调;护坡类型

中图分类号:S718.51+6 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)01-0091-10

XUE Ou¹; WEI Tian-xing¹; LIU Fei²; LI Ying-yong³. **Modeling the degree of coupling and interaction between plant community diversity and soil properties on highway slope.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(1) 91-100 [Ch,36 ref.]

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Beijing Shenghailin Ecological Environment Technologies Co., Ltd, Beijing, 100083, P. R. China;

3 Highway Bureau of Shandong Transportation Department, Ji'nan, Shandong, 250002, P. R. China.

In order to accelerate positive succession of the vegetation on highway slope and explore the response relationship between plant community diversity and environmental variables, we studied 16 typical slope protection patterns applied to Qing-Lin Highway in Shandong Province, eastern China. Seventeen variables representing diversity characteristics, topographic features and soil properties were selected for analysis, correlations between community diversity and environmental variables were examined by redundancy analysis, and the degree of coupling and interaction between vegetation and soil was modelled. Our results indicated that: 1) all environmental variables in the study jointly predicted 87.599% of the variance of community diversity on the highway slope, and soil properties had the greatest effects which explained 69.539% of the variance. 2) Based on the degree of response of diversity patterns to soil factors, the order of diversity indexes from strong to weak was Margalef index, Shannon-Wiener index, Simpson index, and Pielou index. 3) The major soil factors closely associated with plant community diversity were ranked as available phosphorus, total phosphorus, total nitrogen, total potassium, organic carbon, and all of their average correlation coefficient was greater than 0.65. 4) The coupling coordination between vegetation and soil on the highway slope was mainly in weak and medium level. According to the degree of coupling,

收稿日期: 2015-07-03 修回日期: 2015-10-09

基金项目: 山东省交通科技计划项目(2010Y14)、林业公益性行业科研专项(200904030)。

第一作者: 薛鸥。主要研究方向: 流域自然地理过程。Email: 15210504412@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 魏天兴, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 林业生态工程与流域自然地理过程。Email: weitx@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

the sequence of three slope types was soil slope, rocky slope and geotechnical slope. The research may provide some references for vegetation restoration on the highway slope in Shandong Province and even North China.

Key words vegetation restoration; redundancy analysis; coupling coordination; slope protection types

高速公路在开挖回填的建设过程中,会不可避免地对环境产生负面影响,以裸露边坡的防护问题尤为突出^[1]。植被恢复是改善生态环境、修复裸露边坡、控制土壤侵蚀的最佳途径^[2]。其主要手段是在调查分析损毁后的边坡立地条件以及当地乡土植物的基础上,人工选择搭配植物种并结合工程措施,快速重建或恢复边坡植被,引导群落正向演替,最终形成稳定的生态系统^[3]。公路边坡植被恢复主要受到地形和土壤等环境因素的限制^[4]。地形特征能够综合表征生境条件,它与光照、湿度、温度、水分、土壤等因子的空间分异密切相关,直接影响种群格局和群落分布^[5]。土壤是植物生长发育的物质基础,其理化性质影响着植被演替,与此同时也受到植被的反作用,两者相辅相成、协同变化^[6]。植物群落多样性是植被恢复内在机理的外在表现,可度量群落的组织结构和功能,可表征系统稳定性和抵御干扰能力,它对防治边坡水土流失具有重要作用^[7]。通过对植被多样性特征与环境因子特别是与土壤因子关系的分析,可以综合判断评价公路边坡植被恢复情况以及各种护坡类型群落演替的可持续性。

很多学者在森林^[8]、草地^[9]、荒漠绿洲^[10]、工程迹地^[11]等生境中研究了植被群落与环境因子之间的相互关系,大多使用线性回归、计算相关系数或者进行单因子描述的方法,将植被数量特征与环境因子联系起来,进而对比分析不同环境因子、不同立地条件或者不同人工措施对植被群落多样性的影响。然而这些研究并未将各类影响因素综合起来探讨,不明确多因子之间相互作用的程度,不利于对植被恢复过程的理解。耦合为深入研究各因子之间关系及过程,揭示生态系统的协同、约束关系提供了良好的方法^[12]。本文通过调查青临高速公路边坡植被恢复情况,以典型边坡防护绿化措施的坡面为研究对象,采用冗余分析、灰色关联度分析等方法,探究了公路边坡植被恢复群落的基本特征以及植物多样性与地形、土壤等环境因子之间的关系,并构建了植被-土壤耦合模型,对典型公路边坡护坡类型的植被恢复情况进行综合判定,为进一步提高公路边坡植被恢复技术体系提供参考。

1 研究区及工程概况

青临高速公路(118°31'~118°50'E、34°42'~

36°40'N)是国家高速公路网长春至深圳线青州至临沭(鲁苏界)段,位于山东省中南部。路线走向由北向南,起自于已建成的东青高速公路的终点,终止于鲁苏界,与正在建设的长春至深圳线相连,全线长228.3 km。路线所经区域为鲁中南低山丘陵区,青州市境内地形起伏较小,总趋势是南高北低,临朐县地形起伏较大,平均海拔200~400 m。该地区属温带大陆性季风气候,年均气温11.7~13.3℃,极端最高气温41℃,极端最低气温-25.5℃。年平均降水量700~900 mm,多集中在7—8月份,12—2月份降水最少;西南部降水较多,并向东北部递减。土壤类型有褐土、潮土、棕壤和砂姜黑土,以褐土为主,其理化性状好,适宜做路基填料,且土源充足。地带性植被为落叶阔叶林及温带针叶林。

边坡植被重建工程于2011年完成。路堑边坡坡度较陡,多采用生态基材喷播技术,喷播厚度6~8 cm,生态基材配置为:黏合剂8.70%、保水剂4.35%、有机复合肥43.48%、木纤维43.48%、草炭土0.2袋/m²、种植土若干。灌草种设计为紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的坡面,总播种量为18 g/m²,3种植物播种量分别为8、8、2 g/m²。部分坡面随机点缀黑松(*Pinus thunbergii*),幼苗规格约0.6 m。五叶地锦(*Parthenocissus quinquefolia*)则选用3年生苗木,按照1.5 m间距在坡脚处种植。路基边坡坡度较缓,多采用拱形骨架护坡,回填的种植土厚度20 cm以上,点缀少量灌木,每10 m²种植2~3株,苗木规格约0.5 m,促使坡面实现近自然的植被覆盖。

2 研究方法

2.1 样地设置

2014年8月中旬至下旬,对青临高速公路边坡植被恢复情况进行了调查。在沿整条公路全面踏查的基础上,选取典型的护坡类型为研究对象,于各路段的路堑或路基边坡随机设置样地共计16个。样地沿公路坡脚的边长一般设定为15 m,其面积不定,随坡长变化。各样地护坡详情以及相对位置分布分别见表1和图1。在每个样地的坡中位至少设置3个样方。由于植被类型较为单一,乔木、灌木的植株比较矮小,为降低调查对坡面植被恢复的干扰

和破坏,在每个乔灌样地中设置3个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 和3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方调查乔灌和草本植物;每个灌木样地中设置3个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 和3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方调查灌木和草本植物;每个草本样地设置3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方调查草本植物。记录了样方内植物的种名、数量(株/丛)、盖度、高度;测定了坡度、坡向、坡长以及样地中心经纬度信息;估计了枯落物盖度和岩石裸露率。阳坡和阴坡分别赋值为1和0,1表示向阳、干燥^[13]。

2.2 土样采集与土壤指标测量

由于边坡人工喷播植被土层很薄,因此不做分层采样。在每个样地坡中位按S型采集0~10 cm

土层的混合样约1 kg装入土壤袋,并取回3个环刀原状土以测定土壤理化性质。土壤密度采用环刀法测定;土壤含水量采用烘干法测定;土壤有机碳采用浓硫酸重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮(TN)采用半微量凯氏法测定;土壤全钾(TK)采用氢氟酸-高氯酸消煮火焰光度计法测定;土壤全磷(TP)采用氢氟酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定;土壤碱解氮(AN)采用扩散皿法测定;土壤速效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[14]。共测定9个土壤指标。

表1 公路边坡植被护坡设计类型

Tab.1 Designed vegetation protection types on highway slope

样地编号 Sample plot No.	护坡类型 Slope protection types	边坡岩性 Slope lithology	边坡类型 Slope types	设计植物种 Plant design
A1	挂网+喷播护坡 Net-suspended spray seeding	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	紫穗槐、二色胡枝子、紫花苜蓿 <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Medicago sativa</i>
A2	喷播护坡 Spray seeding	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	臭椿、紫花苜蓿 <i>Ailanthus altissima</i> , <i>Medicago sativa</i>
A3	拱形骨架护坡 Arch skeleton	岩土混合 Geotechnical slope	路基 Subgrade	紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>
A4	石笼网+植生袋护坡 Gabion box-seed nutriment soil sacks	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	紫穗槐、二色胡枝子、紫花苜蓿 <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Medicago sativa</i>
A5	自然恢复 Natural restoration	岩土混合 Geotechnical slope	路基 Subgrade	无 None
A6	土工框格+喷播 Geogrid-external soil spray seeding	岩土混合 Geotechnical slope	路堑 Cutting	五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i>
A7	挂网+喷播+穴栽黑松护坡 Net-suspended spray seeding-planting <i>Pinus thunbergii</i>	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	黑松、紫穗槐、二色胡枝子、紫花苜蓿 <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Medicago sativa</i>
A8	穴栽黑松护坡 Planting <i>Pinus thunbergii</i>	岩土混合 Geotechnical slope	路堑 Cutting	黑松、五叶地锦 <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Parthenocissus quinquefolia</i>
A9	喷播+草帘覆盖护坡 Spray seeding-straw cover	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	紫穗槐、二色胡枝子、紫花苜蓿 <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Medicago sativa</i>
A10	拱形骨架护坡 Arch skeleton	岩土混合 Geotechnical slope	路基 Subgrade	紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> var. <i>atropurpurea</i>
A11	喷播+穴栽黑松护坡 Spray seeding-planting <i>Pinus thunbergii</i>	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	黑松、紫穗槐、二色胡枝子、紫花苜蓿 <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Medicago sativa</i>
A12	植草护坡 Grass covering	土质 Soil slope	路堑 Cutting	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>
A13	挡墙+喷播护坡 Barricade-spray seeding	土质 Soil slope	路堑 Cutting	紫穗槐、二色胡枝子、紫花苜蓿 <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> , <i>Medicago sativa</i>
A14	铁丝框格+喷播护坡 Wire sash-external soil spray seeding	岩质 Rocky slope	路堑 Cutting	五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i>
A15	拱形骨架护坡 Arch skeleton	土质 Soil slope	路基 Subgrade	小叶扶芳藤 <i>Euonymus fortunei</i> var. <i>radicans</i>
A16	植草护坡 Grass covering	土质 Soil slope	路基 Subgrade	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>

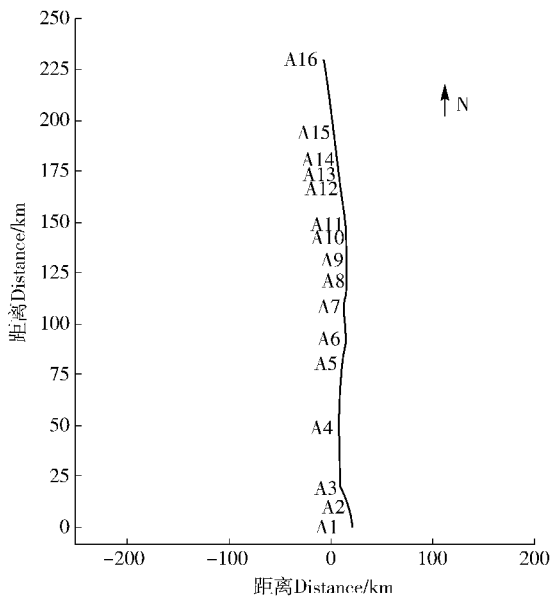


图1 植物群落调查样地空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 16 investigated plots

2.3 数据处理与分析

2.3.1 冗余分析

本研究选取 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数与 Margalef 指数作为公路边坡植被恢复的多样性测度指标,公式参见文献[4]。选取坡度、坡向、岩石裸露率、枯落物盖度以及土壤密度、含水量、土壤有机碳、TN、AN、TP、AP、TK、AK 共 13 个指标作为环境因子,采用冗余分析(RDA)方法^[15],探索植物群落多样性对环境因子的响应关系,并获得土壤特性对群落多样性变异信息的解释度。

2.3.2 耦合分析

为揭示群落多样性特征与土壤理化性质的耦合关系和协调程度,采用可以分析系统多因素交互作用的灰色关联度模型^[16]。先用区间标准化法对数据进行无量纲化处理,再按公式(1)计算关联系数。

$$\xi_i(j)(k) =$$

$$\frac{\min_i \min_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)|}{|Z_i^L(k) - Z_j^L(k)| + \rho \max_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)|} \quad (1)$$

式中: $\xi_i(j)(k)$ 为公路边坡的第 k 个样本点的土壤指标 i 和植物群落多样性指标 j 的关联系数, $Z_i^L(k)$ 、 $Z_j^L(k)$ 分别为土壤指标 i 和多样性指标 j 的标准化值, ρ 为分辨系数,通常取值 0.5。

将关联系数按样本数求其平均值,可以得到一个 $m \times n$ 关联度矩阵 γ ,它能够从整体上反映土壤因子单个指标和群落多样性单个指标之间的关联程度。其中, m 代表土壤指标数, n 代表多样性指标数。当 $0 < \gamma_{ij} \leq 1$ 时,说明存在关联性, γ_{ij} 值越接近 1,表明两者的关联度越大,耦合作用越强^[17]。当 $0 < \gamma_{ij} \leq 0.35$ 时,关联度为弱;当 $0.35 < \gamma_{ij} \leq 0.65$ 时,关联度为中;当 $0.65 < \gamma_{ij} \leq 0.85$ 时,关联度为较强;当 $0.85 < \gamma_{ij} \leq 1.0$ 时,关联度为极强;在关联度矩阵 γ 基础上,依据公式(2)按行或列求平均值,可以识别出主要影响因素和反馈情况。

$$d_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$d_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

(2)

式中: d_i 表示土壤理化性质(L)第 i 个指标对植物群落多样性(I)的影响关联度, d_j 表示植物群落多样性(I)第 j 个指标对土壤理化性质(L)的影响关联度。

为从整体上定量评判公路边坡群落多样性与土壤理化性质的耦合协调发展程度,进一步构建两者相互关联的系统耦合度模型^[14],耦合度(C)的计算公式为:

$$C = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \xi_i(j)(k) \quad (3)$$

系统耦合协调程度评价标准见表 2。

表 2 系统耦合协调度标准

Tab. 2 Standard of ecosystem coupling coordination

耦合度	$0 \leq C < 0.4$	$0.4 \leq C < 0.5$	$0.5 \leq C < 0.6$	$0.6 \leq C < 0.7$	$0.7 \leq C < 0.8$	$0.8 \leq C < 0.9$	$0.9 \leq C < 1.0$
Coupling degree (C)							
协调评价	严重不协调	中度不协调	轻度不协调	弱协调	中度协调	良好协调	优质协调
Type of coordination	Serious	Middle	Light	Light	Middle	Favorable	Superior
coordination	incoordination	incoordination	incoordination	coordination	coordination	coordination	coordination

注:资料来源于世界经济合作与发展组织(2003)。Note:Data was cited from OECD(2003)。

3 结果

3.1 典型护坡类型的群落数量特征

对青临高速公路边坡坡中位植物群落进行数量

统计,结果显示,样方内共计出现 45 种植物。乔木 2 种,有黑松、臭椿;灌木 4 种,有紫穗槐、二色胡枝子、紫叶小檗、小叶扶芳藤;藤本 3 种,有五叶地锦、爬山虎(*Parthenocissus tricuspidata*)、萝摩(*Metaplexis*

japonica); 草本 36 种, 常见的有结缕草、紫花苜蓿、波斯菊 (*Cosmos bipinnata*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、旱蒿 (*Artemisia xerophytica*)、稗子 (*Echinochloa crusgalli*)、金色狗尾草 (*Setaria glauca*)、刺儿菜 (*Cirsium setosum*)、小飞蓬 (*Conyza canadensis*)、香丝草 (*Conyza bonariensis*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 等。具体各类护坡类型的多样性指数等群落数量特征见表 3。

以工程技术模式的角度看, 对于路堑边坡, 客土喷播种子护坡工程 (A2) 以及客土喷播种子护坡工程与铺金属网工程 (A1、A7)、点穴工程 (A11) 相结合使用的各类工程植物群落多样性水平相对较高; 对于路基边坡, 拱形骨架工程 (A3、A10、A15) 的群落多样性比阶梯植被工程 (A12) 表现更好。以边坡

岩性的角度来看, 岩质边坡和岩土混合边坡的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数均优于土质边坡。说明对于岩质边坡和岩土混合边坡的工程措施和植物设计较好地改良了边坡生境, 促进了植被恢复。调查显示, 在建植 3 年后, 已有多种乡土植物侵入公路边坡, 人工植被有向自然群落过渡的趋势, 因此群落还处于更新演替的动态变化阶段, 尚未达到稳定水平。肖培青等^[18]的研究表明, 盖度为 65% 的草被和灌木坡面可以抵抗径流侵蚀, 与裸露边坡相比, 具有较好的保持水土作用。除少数路堑边坡坡面的盖度较差外, 已有 60% 的坡面达到 65% 以上的盖度, 表明青临高速公路边坡多数坡面植被覆盖效果良好, 达到防治水土流失的要求。

表 3 不同护坡类型的群落数量特征

Tab. 3 Community quantitative characteristics of different slope protection types

样地 编号 Sample plot No.	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Simpson 指数 Simpson index	Pielou 指数 Pielou index	Margalef 指数 Margalef index	盖度 Coverage/ %	植被高度 Plant height/ cm	物种数 Species number	草本密度/ (株(丛)·m ⁻²) Herb density/ (plant(bundle)·m ⁻²)
A1	1.437	0.678	0.742	1.601	91	59	13	50
A2	1.560	0.739	0.828	1.580	95	52	11	55
A3	1.105	0.579	0.710	0.807	100	31	6	110
A4	1.014	0.450	0.488	1.566	97	66	15	82
A5	0.843	0.453	0.600	0.672	93	37	9	129
A6	0.743	0.474	0.536	0.572	93	21	7	159
A7	1.418	0.614	0.657	1.931	91	60	14	68
A8	1.067	0.483	0.546	1.459	58	39	12	63
A9	0.897	0.511	0.750	1.060	27	34	9	28
A10	1.170	0.537	0.623	1.584	53	36	16	55
A11	0.827	0.431	0.612	0.854	63	49	9	58
A12	0.222	0.095	0.170	0.528	96	25	7	160
A13	0.760	0.355	0.453	1.114	96	58	11	72
A14	0.840	0.405	0.492	1.190	40	21	11	52
A15	0.579	0.263	0.370	0.855	80	43	10	110
A16	0.530	0.252	0.363	0.737	96	39	7	84

3.2 植物群落多样性与环境因子关系分析

冗余分析结果显示, RDA 排序图 (图 2) 前 2 个典范轴能够解释全部方差即群落多样性信息总变异的 85.547%, 第一轴单独解释率为 75.466%, 第二轴为 10.081%。从图 2 中可以看到, 速效钾、全磷、有机质等因子对护坡类型沿第一轴分布起到关键作用, 土壤密度、速效钾等因子对护坡类型沿第二轴分布起到关键作用。土壤因子除速效钾、土壤密度以外, 箭头以有机碳为中心聚集在一起, 表明这些解释

变量之间有很强的相关性, 龙健等^[19]的研究表明, 土壤有机碳对其他养分因子有制约作用。坡度与土壤含水量关系非常密切, 并对反映物种分布均匀程度的 Simpson 指数和 Pielou 指数的影响非常明显, 表明坡度是影响公路边坡植被恢复比较重要的地形因素。坡向和群落多样性指标相关程度低, 说明本研究中坡向对植物分布影响较小。土壤速效钾含量与各项多样性指数的关联性小, 但与护坡类型 A12、A13、A15、A16 密切相关, 它们所在的边坡类型都为

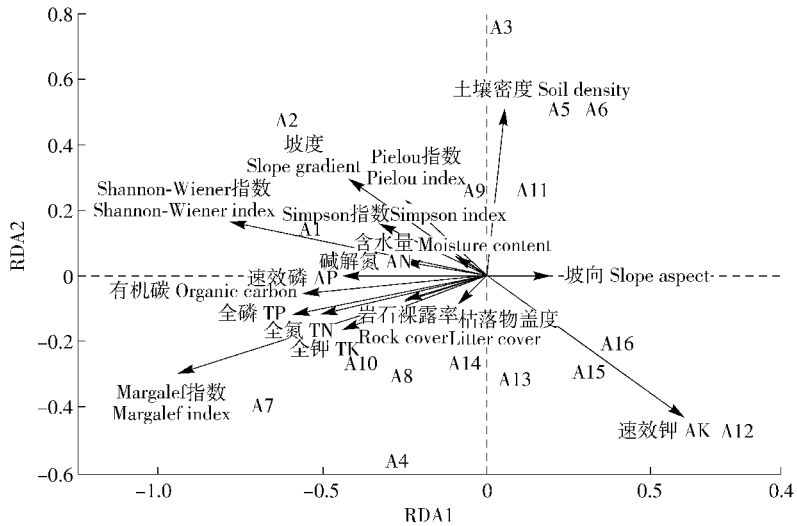


图2 植物群落多样性与环境因子的 RDA 三序图

Fig. 2 RDA biplot of species community diversity and environmental variables

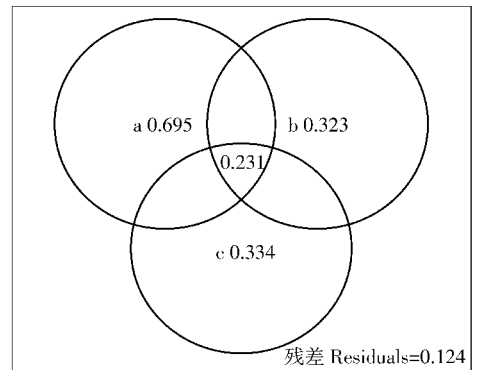
土质边坡,其含量比岩质边坡、岩土混合边坡丰富。总体来说,对公路边坡植物群落多样性影响程度较大的环境因子为有机碳、坡度、全磷、全氮、速效磷等。

在冗余分析的基础上,采用方差分解的方法可定量分析环境因子对公路边坡植被恢复多样性的解释度。由图3可知,13个环境因子共同解释了87.599%的植物多样性变异信息。土壤理化性质的解释度最高,达到69.539%;枯落物盖度、岩石裸露率的解释度次之,为34.444%;代表地形因子的坡度、坡向解释度最低,为32.261%,但解释比例也是相当高的。不同的环境因子之间常通过复杂的相互作用而存在较强的关联性,因而它们对群落多样性的解释存在重叠效应^[20],可以看到,本文中3组变量的联合解释度为23.102%。剩余12.401%部分为未解释度,说明还存在其他因素影响高速公路边坡植物群落多样性的变化。

3.3 植物群落多样性与土壤因子耦合关联分析

由灰色关联度分析结果(表4)可知,各指标之间的关联度值在0.545~0.764范围内,均值为0.654,中位数为0.649,小于0.65和大于0.65的比例约为2:3,属于中等及较强关联,表明公路边坡群落多样性与土壤理化性质之间有较强的耦合作用,两者之间的联系和反馈是比较紧密的。为进一步揭示它们之间交互耦合的特征及主要驱动力和胁迫力,将关联度值在同一层次予以简单平均,分别得到土壤特性对植物多样性的主要作用因素和植物多样性对土壤因子的主要反馈作用,以及两者相互耦合的主要关系。

Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指



小于零的部分未列出。Values < 0 was not shown.

图3 土壤理化性质(a)、坡度和坡向(b)、枯落物盖度和岩石裸露率(c)对植物群落多样性的解释度

Fig. 3 Venn diagram of soil physical chemical properties (a), slope grade and slope aspect (b), and litter cover and rock cover (c) on the explanation of plant community diversity on highway slope

数、Margalef 指数对土壤因子的反馈作用较为明显,平均关联系数分别为0.661、0.637、0.619、0.700,数值差异不大,Margalef 指数的平均关联系数最高,Pielou 指数最低。说明土壤因子对物种丰富度的影响最大,对物种分布的均匀程度影响稍小。所有土壤因子中,有机碳、全钾、全氮、全磷、速效磷对群落多样性的影响尤为明显,并依次增强,平均关联系数都大于0.65,与RDA排序图反映的结果一致,表明上述5个因子是植被生长的关键性环境因子。土壤密度、含水量、碱解氮与植物多样性关联系数都接近0.65,速效钾的平均关联系数稍低,为0.568,属于中等关联水平。综上所述,植物多样性与土壤相互作用类型以中等关联和较强关联为主,土壤理化性质有利于植被恢复。

表4 植物多样性与土壤耦合矩阵

Tab.4 Matrix of plant diversity and soil properties coupling

关联度 Correlation	土壤密度 Soil density	含水量 Moisture content	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Available nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus	全钾 Total potassium	速效钾 Available potassium	平均值 Mean value
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	0.655	0.634	0.679	0.693	0.630	0.703	0.706	0.677	0.568	0.661
Simpson 指数 Simpson index	0.654	0.611	0.638	0.648	0.631	0.661	0.701	0.641	0.550	0.637
Pielou 指数 Pielou index	0.650	0.603	0.603	0.611	0.625	0.624	0.691	0.622	0.545	0.619
Margalef 指数 Margalef index	0.633	0.682	0.764	0.754	0.666	0.756	0.684	0.753	0.609	0.700
平均值 Mean value	0.648	0.633	0.671	0.676	0.638	0.686	0.695	0.673	0.568	0.654

3.4 植物群落多样性与土壤因子耦合度分析

公路边坡不同护坡类型的群落多样性与土壤的耦合协调程度见表5。系统耦合度的范围为0.476~0.731,平均耦合度为0.642,属于弱协调并比较接近中等协调程度,说明植物群落多样性与土壤系统还没有达到最佳的协同状态,主要是受恢复时间相对短暂的影响。不同护坡类型的系统耦合协调程度按C值的排序为:A13 > A2 > A15 > A9 > A12 > A6 > A7 > A16 > A5 > A14 > A11 > A4 > A8 > A3 > A10 > A1。属于中度不协调、轻度不协调、弱协调、

中度协调的护坡类型分别有1、3、7、5个,所占百分比分别为6.250%、18.750%、43.750%、31.250%、75%的坡面已经跨越不协调阶段。注意到A1护坡类型的耦合协调程度最低(0.476),从RDA排序图中可以看到,A1坐标与坡度比较接近,可能是受采样路段坡度太陡的影响。总体来看,岩土混合边坡处于轻度不协调或弱协调阶段;土质边坡处于弱协调或中度协调阶段;岩质边坡处于以弱协调为主的阶段。耦合协调的排序为土质边坡 > 岩质边坡 > 岩土混合边坡。

表5 不同护坡类型植被与土壤系统耦合协调状况评判结果

Tab.5 Evaluation results of ecosystem coordination for slope protection types

护坡类型编号 Slope protection type No.	耦合度 Coupling degree (C)	协调类型 Type of coordination
A1	0.476	中度不协调 Middle incoordination
A2	0.713	中度协调 Middle coordination
A3	0.590	轻度不协调 Light incoordination
A4	0.614	弱协调 Light coordination
A5	0.649	弱协调 Light coordination
A6	0.681	弱协调 Light coordination
A7	0.662	弱协调 Light coordination
A8	0.597	轻度不协调 Light incoordination
A9	0.704	中度协调 Middle coordination
A10	0.500	轻度不协调 Light incoordination
A11	0.636	弱协调 Light coordination
A12	0.703	中度协调 Middle coordination
A13	0.731	中度协调 Middle coordination
A14	0.640	弱协调 Light coordination
A15	0.712	中度协调 Middle coordination
A16	0.660	弱协调 Light coordination

4 讨 论

植物群落多样性影响着边坡水土流失防治效果,不同植物种抵抗水土流失的能力具有明显差别,群落中多样化的植被可以在动态变化的环境条件下,在物种此消彼长的过程中持续地存留植物来进行防治,因此保护和恢复群落物种多样性对防治水土流失和提高边坡安全性非常重要^[7]。本文通过冗余分析,探讨了公路边坡植被重建以后群落多样性与环境因子的关系。坡度和坡向是衡量公路边坡地形分异的主要属性特征,两者共同对群落多样性变异信息的解释度为32.261%。它们对植物群落多样性的影响是间接的^[13]。由于重力作用,坡度对土壤层或基质层的稳定性存在威胁,并会通过影响坡面水文过程进而限制植物固定和生长,仅部分灌木和草本植物在坡度较陡的情况下还能生存^[21]。所以道路边坡坡度对植物分布具有显著影响^[18,22]。坡向主要通过影响地表获得的热量^[23],进而对水分和温度的分配产生影响^[24]。关于坡向对植物分布的作用,不同学者的研究结果不同。王英宇等^[2]认为,在人工植被形成期,坡向是影响群落格局和特征的关键因子;邹文涛等^[8]、邱波等^[9]的研究表明,阴坡的群落多样性大于阳坡;Andrew等^[25]认为,坡向会加剧物种丰富度的差异;而张昌顺等^[26]、Tambe

等^[27]则认为物种丰富度与坡向没有密切关系。从本研究 RDA 图中显然可以看到,坡度对反映物种分布均匀程度的多样性指数影响比较明显,而坡向对群落多样性的影响较小,这可能是因为两者之间对其他生态因子具有共同的交互作用^[28],并且公路边坡坡度严重影响到土壤的厚度、稳定性以及土壤侵蚀强度,致使其对植物分布格局的作用更加明显。

土壤特征对植被恢复的多样性解释度为 69.539%,说明土壤是公路边坡植被恢复的关键性因子。Ulrich 等^[29]的研究表明,在植被演替初期,小尺度内群落结构的变异取决于土壤特性。由耦合关联分析可知,土壤特性对植被各项多样性指标的影响明显,与 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数为较强关联水平,与 Simpson 指数、Pielou 指数为中等关联水平。土壤有机碳是土壤养分循环转化的核心^[6,30];土壤氮素和磷素对植物生理过程和生长状况有很大影响,是植物必需的营养元素^[6,31];土壤钾素不参与植物体内的组织构成,但也具有重要的生物物理和生物化学功能^[32]。速效态土壤养分的含量决定着土壤在短期内对植物供给养分的有效性^[33]。土壤对植被群落多样性的内在作用机制复杂,表现为土壤因子与多样性指标之间存在数量关系,各学者的研究结果不完全一致。一般认为,土壤有机碳和全氮是影响群落多样性的重要因子,与多样性指数会表现出较高的关联性^[18,31],也有人认为,群落多样性与有机碳相关程度较低^[25,34]。张林静等^[10]的研究结果表明,群落多样性与土壤全钾和速效钾无关。赵方莹等^[35]则认为速效钾是人工植被恢复的主要限制因子。本研究中,土壤有机碳、全钾、全氮、全磷、速效磷对群落多样性的作用比较明显,并依此增强;碱解氮、速效钾次之。土壤密度可以反映土壤的透气性、透水性以及保水性,并以机械阻力的形式对植物根系产生影响,进而限制植物的生长^[19];土壤含水量则代表着水分的有效性^[34]。高速公路边坡生境通常较为干旱,而现存的大多数植物种又具有抗旱性。因此,本文中土壤密度和含水量对多样性的作用仅属于中等程度。张林静等^[10]的研究也表明,在干旱的环境中,土壤含水率与多项多样性指标的关联程度并不强烈。总体来说,植物多样性与土壤相互作用的类型以中等关联和较强关联为主,土壤理化性质有利于植被恢复。

对依托实际工程护坡的植被多样性研究反映了在高速公路边坡特殊生境下,植被恢复 3 年后群落结构与功能等方面的差异。不同护坡类型下,岩质边坡和岩土混合边坡的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数皆优于土质边坡。另一方

面,土质边坡的植被-土壤耦合协调度优于其他 2 类边坡,表明土质边坡的植被与土壤的发展比较协调同步,具有近自然的特点。虽然目前所有边坡植物群落多样性与土壤特性还没有达到完全匹配与协调的程度,但都跨越了不协调阶段。又由于群落多样性特征与土壤理化性质联系紧密,土壤有利于植被恢复,可以推测随着建植时间延长,两者的协调性水平会逐渐提高。本研究填补了山东省高速公路边坡基于不同护坡措施植被恢复研究中,植物群落多样性与环境因子特别是土壤因子关系的空白,可为该省乃至华北地区公路边坡植被恢复提供基础资料。如何更加科学地通过对土壤理化性质的调控,进而有效地促进群落演替进程,增加群落多样性并提高植被与土壤的耦合协调性,仍然是恢复生态学需要探讨的重要问题。由方差分解可知,植物群落多样性变异信息中,还有占 12.401% 的部分不能被文中所包含的环境因子解释,说明还存在其他影响因子。已有研究表明,群落多样性还会受到土壤厚度^[24,28]、土壤种子库、土壤孔隙度^[34]、气候条件^[36]、岩土比例等因素的影响。要探明上述因子具体作用的大小,还需进一步研究。

5 结 论

影响公路边坡植被恢复群落多样性水平的因素是多方面的,包括施工工艺、地形条件、土壤理化性质等。土壤特性是决定植物群落多样性水平的关键性因素。文中土壤因子整体上与 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数之间属于较强关联,与 Simpson 指数、Pielou 指数之间属于中等关联。有机碳、全钾、全氮、全磷、速效磷是影响群落多样性格局最为重要的土壤养分因子,影响程度依次增强。截至目前,3 类边坡的植物群落多样性与土壤理化性质皆未达到理想的耦合协调水平。其中,岩土混合边坡处于轻度不协调或弱协调阶段;土质边坡处于弱协调或中度协调阶段;岩质边坡处于以弱协调为主的阶段。随着植被恢复时间的推移,各类边坡植被与土壤的协调程度有逐渐提高的趋势。

参 考 文 献

- [1] ROBERTSON D I, BRETHERTON R D. Optimizing networks of traffic signals in real time: the SCOOT method [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 11-15.
- [2] 王英宇, 宋桂龙, 韩烈保, 等. 京承高速公路岩石边坡植被重建 3 年期群落特征分析 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 74-80.
WANG Y Y, SONG G L, HAN L B, et al. Population characteristics on revegetation of Jingcheng Highway rock slope in the third recovery year [J]. Journal of Beijing Forestry University,

- 2013,35(4):74-80.
- [3] 刘春霞,韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展[J]. 生态学报,2007,27(5):2090-2098.
LIU C X, HAN L B. Review of researches in vegetation restoration of freeway slopes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5): 2090-2098.
- [4] 张艳,赵廷宁,史常青,等. 坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价[J]. 农业工程学报,2013,29(3):121-131.
ZHANG Y, ZHAO T N, SHI C Q, et al. Evaluation of vegetation and soil characteristics during vegetation recovery procedure [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 121-131.
- [5] 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等. 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性[J]. 生态学报,2013,33(21):6944-6956.
TAN S S, YE Z L, YUAN L B, et al. Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6944-6956.
- [6] 赵自超,夏振尧,熊诗源,等. 扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质演变[J]. 水土保持通报,2013,33(5):82-86.
ZHAO Z C, XIA Z Y, XIONG S Y, et al. Evolution of soil properties in vegetation restoration process on disturbed slopes [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 82-86.
- [7] BERENDSE F, RUIJVEN J V, JONGEJANS E, et al. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance [J]. *Ecosystems*, 2015, 18(5): 881-888.
- [8] 邹文涛,姜艳,尹光天,等. 石门森林公园不同海拔或坡向林地物种多样性的比较[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(4):77-81.
ZOU W T, JIANG Y, YIN G T, et al. Biodiversity comparison of forestland with different altitude or aspect in Shimen National Forest Park [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(4): 77-81.
- [9] 邱波,任青吉,罗燕江,等. 高寒草甸不同生境类型植物群落的 α 及 β 多样性研究[J]. 西北植物学报,2004,24(4):655-661.
QIU B, REN Q J, LUO Y J, et al. Study on α diversity and β diversity of plant community of different habitats in alpine meadow [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2004, 24(4): 655-661.
- [10] 张林静,岳明,顾峰雪,等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系[J]. 应用生态学报,2002,13(6):658-662.
ZHANG L J, YUE M, GU F X, et al. Coupling relationship between plant communities' species diversity and soil factors in ecotone between desert and oasis in Fukang, Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6): 658-662.
- [11] 王志泰,李毅,王志杰. 岩石边坡植被建植初期植被特征与土壤养分动态[J]. 农业工程学报,2012,28(2):215-221.
WANG Z T, LI Y, WANG Z J. Characteristics and soil nutrient dynamics in beginning period of artificial vegetation on rock slope [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 215-221.
- [12] 于明含,孙保平,胡生君,等. 退耕还林地结构与生态功能的耦合关系[J]. 生态学报,2014,34(17):4991-4998.
YU M H, SUN B P, HU S J, et al. Modeling the degree of coupling and interaction between forest structure and ecological function in a grain for green project, Shanxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4991-4998.
- [13] 张峰,张金屯,张峰. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释[J]. 生态学报,2003,23(3):421-427.
ZHANG F, ZHANG J T, ZHENG F. Pattern of forest vegetation and its environmental interpretation in Zhuweigou, Lishan Mountain Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (3): 421-427.
- [14] 庞成庆,秦江涛,李辉信,等. 秸秆还田和休耕对赣东北稻田土壤养分的影响[J]. 土壤,2013,45(4):604-609.
PANG C Q, QIN J T, LI H X, et al. Effects of rice straw incorporation and permanent fallow on soil nutrient of paddy field in northeastern Jiangxi Province [J]. *Soils*, 2013, 45 (4): 604-609.
- [15] CARVALHO F D, GODOY E L, LISBOA F J G, et al. Relationship between physical and chemical soil attributes and plant species diversity in tropical mountain ecosystems from Brazil [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4): 875-883.
- [16] SONG H W, LU S M. Study on repairing permanent transportation roadway in deep mining by bolt-shotcrete and mesh supporting [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 9(2): 167-171.
- [17] 汪阳洁. 黄土丘陵区退耕还林对农地资源产业系统耦合的影响研究:农户决策的视角[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
WANG Y J. Grain for green and agricultural land resource industry system coupling in loess hilly region [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [18] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 植被影响下坡面侵蚀临界水流量试验研究[J]. 水科学进展,2011,22(2):229-234.
XIAO P Q, YAO W Y, SHEN Z Z, et al. Experimental study of critical flow energy for slope erosion under the influence of vegetation cover [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 229-234.
- [19] 龙健,廖洪凯,李娟,等. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究[J]. 环境科学,2012,33(6):2131-2138.
LONG J, LIAO H K, LI J, et al. Relationships between soil and rocky desertification in typical karst mountain area based on redundancy analysis [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 2131-2138.
- [20] BORCARD D, LEGENDRE P, DRAPEAU P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. *Ecology*, 1992, 73(3): 1045-1055.
- [21] BOCHET E, GARCÍA F P. Factors controlling vegetation establishment and water erosion on motorway slopes in Valencia, Spain [J]. *Restoration Ecology*, 2004, 12(2): 166-174.
- [22] TAKAHASHI K, MURAYAMA Y. Effects of topographic and edaphic conditions on alpine plant species distribution along a slope gradient on Mount Norikura, central Japan [J]. *Ecological Research*, 2014, 29(5): 823-833.
- [23] SHARMA C M, BADUNI N P, GAIROLA S, et al. Effects of slope aspects on forest compositions, community structures and soil properties in natural temperate forests of Garhwal Himalaya [J].

- Journal of Forestry Research, 2010, 21(3):331-337.
- [24] 庞亮,李绍才,龙凤,等. 四川盆地路域边坡植被的数量分类与排序[J]. 植物研究, 2013, 33(3):360-366.
PANG L, LI S C, LONG F, et al. Quantitative classification and ordination of roadside slope vegetation in Sichuan Basin [J]. Bulletin of Botanical Research, 2013, 33(3):360-366.
- [25] ANDREW S M, TOTLAND Ø, MOE S R. Spatial variation in plant species richness and diversity along human disturbance and environmental gradients in a tropical wetland [J]. Wetlands Ecol Manage, 2015, 23:395-404.
- [26] 张昌顺,谢高地,包维楷,等. 地形对澜沧江源区高寒草甸植物丰富度及其分布格局的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11):2767-2774.
ZHANG C S, XIE G D, BAO W K, et al. Effects of topographic factors on the plant species richness and distribution pattern of alpine meadow in source region of Lancang River, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11):2767-2774.
- [27] TAMBE S, RAWAT G S. The alpine vegetation of the Khangchendzonga landscape, Sikkim Himalaya: community characteristics, diversity, and aspects of ecology [J]. Mountain Research & Development, 2011, 30(3):266-274.
- [28] 任学敏,杨改河,朱雅,等. 环境因子对太白山高山植被物种组成和丰富度的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(23):6993-7003.
REN X M, YANG G H, ZHU Y, et al. Effect of environmental variables on species composition and richness of alpine vegetation in Taibai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23):6993-7003.
- [29] ULRICH W, PIWCZYŃSKI M, ZAPLATA M K, et al. Small-scale spatial variability in phylogenetic community structure during early plant succession depends on soil properties [J]. Oecologia, 2014, 175(3):985-995.
- [30] LAGOMARSINO A, MOSCATELLI M C, TIZIO A D, et al. Soil biochemical indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a Mediterranean environment [J]. Ecological Indicators, 2009, 9(3):518-527.
- [31] 江源,章异平,杨艳刚,等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被-土壤系统耦合的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4):837-846.
JIANG Y, ZHANG Y P, YANG Y G, et al. Impacts of grazing on the system coupling between vegetation and soil in the alpine and subalpine meadows of Wutai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4):837-846.
- [32] GHANA K. Genotypic differences in K response and praline accumulation in maize during wilting [J]. Plant Cell Physiol, 1980, 21(1):197-200.
- [33] 杨丁丁,罗承德,宫渊波,等. 退耕还林区林草复合模式土壤养分动态[J]. 林业科学, 2007, 43(增刊1):101-105.
YANG D D, LUO C D, GONG Y B, et al. The dynamic of soil nutrient under forest and grass composite pattern in area of conversion of farmland to forests [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(Suppl. 1):101-105.
- [34] 康艳,杨晓明,刘仁庆,等. 高速公路边坡物种多样性与土壤特性的关系分析[J]. 中国水土保持, 2011(6):50-53.
KANG Y, YANG X M, LIU R Q, et al. Relation of species diversity and soil properties on highway slope [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(6):50-53.
- [35] 赵方莹,郭亚娟,曹波,等. 延庆县公路边坡植被多样性特征与土壤因子灰关联分析[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6):64-68, 90.
ZHAO F Y, GUO Y J, CAO B, et al. Grey incidence analysis of vegetation diversity characteristics and soil factors on highway side slopes in Yanqing County [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6):64-68, 90.
- [36] HONG H, QI F, HONG S Y. Shrub communities and environmental variables responsible for species distribution patterns in an alpine zone of the Qilian Mountains, Northwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(1):166-176.

(责任编辑 李 契
责任编辑委 杨晓晖)