# 北川震后植被恢复工程植物群落物种多样性及优势种生态位

刘尧尧 辜 彬 王 丽*

(四川大学生命科学学院,生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065)

**摘 要** 为探究工程治理后植物群落的恢复效果,本文运用数量生态学方法对北川震后工程治理植被的物种组成和多样性指数及其与环境因子间的关系、优势种生态位特征进行了研究。结果表明:(1)研究区有植物74种,隶属于37科72属,工程区木本层和草本层优势物种分别为李子(*Prunus salicina*)和鬼针草(*Bidens pilosa*),自然区木本层和草本层优势种分别为柏树(*Platycladus orientalis*)和扁竹根(*Iris confusa*)。(2)CCA排序结果显示,工程区物种可分为5个类群,自然区分为3个类群。影响工程区物种分布的环境因子(包括工法)顺序为:海拔>坡度>坡向>pH>工法>土壤含水量>坡位,海拔、坡度和坡向是影响工程区物种分布的主要因素,自然区物种分布受各因子影响均较大。(3)自然区木本植物丰富度和多样性明显高于工程区,工程区草本植物丰富度和多样性高于自然区。RDA排序结果显示,海拔是影响工程区草本层丰富度和多样性的最主要因子,坡位和工法是影响工程区木本层丰富度和多样性的主要因子。(4)与自然区相比,工程区生态位相似性(0.0~0.4)和生态位重叠值(0.0~0.5)大部分处于低值区,种间竞争较弱。综合以上结果,我们认为工程植被有一定的恢复,但不够理想;建议工程区增植自然区的木本优势植物。

**关键词** 植被恢复; 群落多样性; 生态位; CCA; RDA

**Species diversity of plant community and the niche of dominant species in Beichuan after earthquake engineering.** LIU Yao-yao, GU Bin, WANG Li* (*Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education*, *College of Life Sciences*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*).

**Abstract**: To explore the effects of vegetation restoration after engineering application, we examined species composition, diversity, their relationships with environmental factors, and the niche of dominant species of restored vegetation after the Beichuan earthquake in Sichuan Province. The results showed that: (1) There were 74 plant species in the study area, belonging to 37 families and 72 genera. The dominant species in the woody layer and herb layer of the engineering area were *Prunus salicina* and *Bidens pilosa*, respectively, while the dominant species in the respective layers of the natural area were *Platycladus orientalis* and *Iris confusa*, respectively. (2) Results of CCA ordination showed that species could be divided into five groups in the engineering area and into three groups in the natural area. The importance of environmental factors (including engineering methods) affecting the species distribution in the engineering area was in order of: elevation > slope > aspect > pH > engineering method > soil moisture > slope position. Elevation, slope, and aspect were the main factors affecting species distribution in the engineering area. Species distribution in the natural area was affected by various factors. (3) Species richness and diversity of woody plants in the natural area were significantly higher than that in the engineering area, while the species richness and diversity of herbaceous plants in the engineering area were higher than that in the natural area. Altitude was the most important environmental fac-

"十二五"国家科技支撑计划(2015BAC05B05)资助。
收稿日期: 2018-05-06 接受日期: 2018-11-28
* 通讯作者 E-mail: 414246445@qq.com

tor affecting species richness and diversity of herbaceous layers in the engineering area, while slope position and engineering method were the main factors as for the woody layer in the engineering area. (4) Compared with the natural area, lower niche similarity ratio (0.0-0.4) and niche overlap value (0.0-0.5) of most species suggested weaker interspecific competition in the engineering area. Therefore, we proposed to plant more native dominant woody species in the engineering area.

**Key words**: vegetation restoration; community diversity; niche; CCA; RDA.

北川县是2008年5·12大地震重灾地之一,大面积的山体崩塌和滑坡,生态系统遭到严重破坏,极易引发次生地质灾害。目前日本在边坡生态修复技术方面研究较多(前堀辛彦,1984;山村和也,1994;山寺喜成,1999),经过100余年的治山实践,已形成一门系统完善、科学严谨的治山工程(鄢武先等,2015)。北川震后植被修复项目为震后日本援助项目,于2010年在北川羌族自治县擂鼓镇石岩村山体滑坡修复工程中运用日本治山技术进行了边坡植被恢复。付诗雨(2015)曾对该区震后山体边坡生态修复的工法、植物的优选和配置等进行了调查,认为灾区边坡生态恢复工程方法既有有利的一面也有一些不足。武文娟(2016)研究了北川震后土壤特性与边坡植被物种多样性变化的相关性,发现震后边坡坡下、坡中和坡上的物种多样性和土壤特性值都大幅度下降。日本气候温暖湿润,而我国各地区气候较复杂,因此日本林业治山工程在我国的应用及恢复效果值得持续关注与研究。

灾后植被恢复与重建研究一直是生态学研究的重点领域。目前国内外对植被恢复评价主要有多样性和生态位两种方式,物种多样性指数能较好地反映群落种类组成、结构水平及稳定性和复杂性(罗双,2011)。林下植物多样性常作为林地质量、乔木层再生模式以及稳定状态的重要指标(Al-Fuqaha,2015)。而地形特征如海拔、坡向、坡度、坡位等对植物分布和物种丰富度具有重要影响(张昌顺等,2012)。曹梦等(2018)以飞播马尾松林为研究对象,分析了林下植被物种组成及其多样性与环境因子关系,认为生物因子及其与非生物因子的共同作用是影响林下植被物种多样性的主要因素。生态位是反映物种生态需求的重要指标,广泛地应用于研究森林资源的保护与利用、生物多样性保护、群落演替等(胡正华等,2005)。其中,植物群落物种尤其是优势种生态位及种间关系研究对于理解种群相互关系、群落结构、功能和演替等具有重要作用(康永祥等,2007;张明霞等,2015;韩锦涛等,2016)。周文嵩等(2017)采用生态位理论对山西省太岳山15年生华北落叶松人工林群落的种内及种间关系进行分析,提出一种新的竞争范围划定方法。简尊吉等(2017)对三峡水库峡谷地貌区消落带优势植物种群生态位进行研究,认为生态位分化程度较低的物种间竞争较为激烈,群落的稳定性较差。从已有研究来看,现有评价方法整体上不够全面,对影响植被恢复的环境因子影响力大小分析也较少,武文娟(2016)对北川恢复植被土壤养分与植物丰富度和多样性进行研究,但生态恢复过程中植被与生境因子相互作用的关系尚不明确。

2018年恰逢震后10年,虽前人对北川震损坡有一些研究,但都比较基础,随着修复时间的增加,震损坡的植被恢复需要更深入的调查研究。因此,本文以周边自然林为对照,在2017年北川震后工程治理植被调查研究基础上,将日本治山技术(工法)纳入影响植被恢复的因子之一,对恢复边坡的植被多样性、生态位等进行研究,并利用排序法(典范对应分析、冗余分析)分析植被多样性与环境因子间(包括工法)的关系,探讨影响震后工程区植被多样性的主要环境因素、种群对资源的利用情况等,并对工法应用效果进行评价,以期为震后植被恢复策略的制定、恢复效果的评价等提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究样地位于北川县擂鼓镇石岩村,距北川地震博物馆擂鼓接待中心直线距离约500 m(31°46′N,104°25′E),坡面主要由震后滑坡体形成,属北亚热带湿润季风气候,气候温和,雨量充沛,干湿分明。年平均气温15.6 ℃,年平均降水1002.7 mm;土壤质地为山地黄壤,由于山体垮塌滑动,土壤物理性状不良,砾石较多,土层厚度约13 cm;地势西高东低,由西北向东南倾斜,岩层为薄—中厚层状,岩层风化后呈碎裂—散体结构(王根龙,2009),自然区自下而上为常绿阔叶林、常绿落叶混交林,工程区为人工经

**表 1 样地基本情况**

**Table 1 Basic situation of plots**

| 边坡区域位置 | | 样地编号 | 群落特征 | 工法 | 纬度(°N) | 经度(°E) | 海拔(m) | 坡度(°) | 坡向(°) | 土壤含水量(%) | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 工程区 | 坡上 | 1 | 刺槐林+杂草 | 土袋阶梯+排水渠 | 31.4627 | 104.2531 | 820 | 30 | 86 | 14 | 8.49 |
| | | 2 | 李树林+杂草 | 干砌片石 | 31.4631 | 104.2532 | 800 | 32 | 335 | 24 | 7.89 |
| | | 3 | 李树林+作物 | 干砌片石 | 31.4631 | 104.2532 | 800 | 24 | 331 | 23 | 7.90 |
| | 坡中 | 4 | 景观林+作物 | 挡土墙 | 31.4631 | 104.2532 | 780 | 15 | 62 | 20 | 8.46 |
| | | 5 | 李树林+杂草 | 干砌片石 | 31.4628 | 104.2531 | 760 | 20 | 294 | 22 | 8.33 |
| | | 6 | 李树林+杂草 | 干砌片石 | 31.4628 | 104.2532 | 770 | 28 | 73 | 18 | 8.33 |
| | | 7 | 李树林+杂草 | 钢铁框+排水渠 | 31.4628 | 104.2535 | 760 | 18 | 305 | 8 | 8.53 |
| | 坡下 | 8 | 李树林+杂草 | 土袋阶梯 | 31.4630 | 104.2539 | 750 | 26 | 71 | 15 | 8.35 |
| | | 9 | 李树林+杂草 | 土袋阶梯 | 31.4632 | 104.2537 | 740 | 24 | 325 | 11 | 8.12 |
| | | 10 | 李树林+杂草 | 土袋阶梯+排水渠 | 31.4633 | 104.2536 | 730 | 30 | 300 | 15 | 8.34 |
| 自然区 | | 11 | 自然林+杂草 | 无 | 31.4628 | 104.2539 | 780 | 26 | 68 | 29 | 8.16 |
| | | 12 | 自然林+杂草 | 无 | 31.4629 | 104.2539 | 760 | 23 | 321 | 24 | 8.03 |
| | | 13 | 自然林+杂草 | 无 | 31.4631 | 104.2542 | 720 | 31 | 333 | 19 | 7.32 |

济林;2010 年工程施工结束后,后期有小面积修补,主要采用土袋阶梯、干砌片石、钢铁框、挡土墙和排水渠等工程,样地基本情况见表 1,北川县研究区地理位置、典型工法及 2017 年修复状态见图 1。

**1.2 研究方法**

**1.2.1 样地选择与调查** 调查样地分为工程区和自然区两部分,采用 S 型机械布点,根据工程区植被特征(木本层大部分为人工经济林,草本层大部分为自然生长),群落垂直结构划分为木本层和草本层 2 个层次。将工程区从上到下分为坡上、坡中、坡下 3 段,每个段位选取 3~4 个样地(其中坡上 1~3 号样地,坡中为 4~7 号样地,坡下 8~10 号样地),同时将临近未被地震破坏边坡作为对照样地(11~13 为自然样地),共 13 个样地;每个样地设置 1 个 10 m×10 m 的样方,逐株调查乔木物种;将每个木本样方划分为 4 个 5 m×5 m 样方,选择 1 个具有代表性的 5 m×5 m 样方调查乔木幼树、幼苗及灌木物种;在5 m×5 m样方中随机设置4个具有代表性的

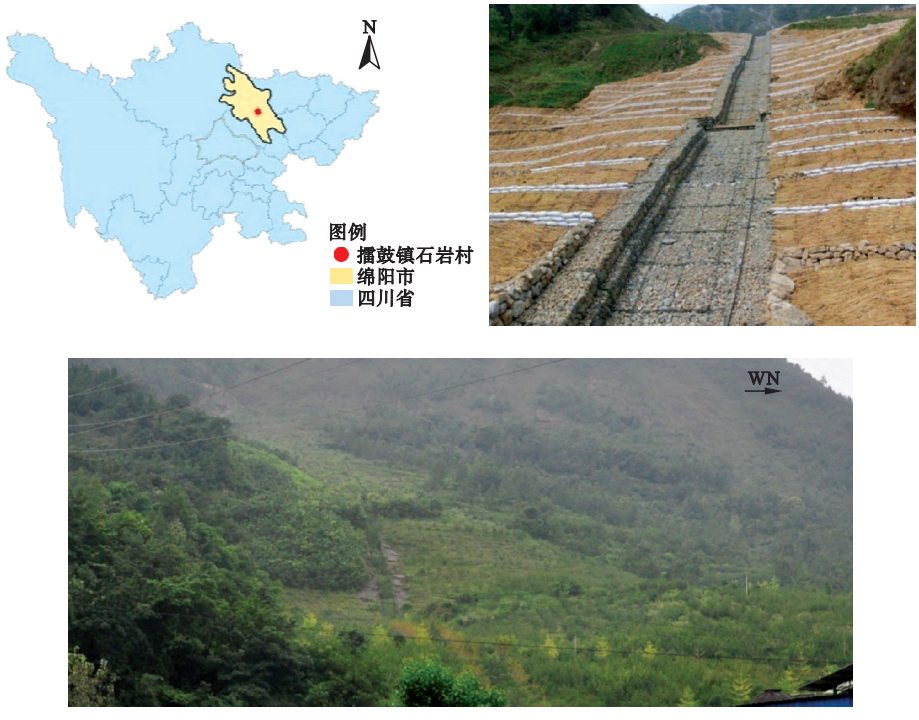



**图 1 研究区地理位置、典型工法和 2017 年恢复状况**

**Fig.1 Geographic location, typical construction method and recovery status in 2017**

1 m×1 m 小样方调查草本植物(邹蜜等,2013),在草本样方内用系统取样的方法采集 0~10 cm 处的混合土壤样品(重约 1 kg),测定其含水量、pH,同时用 GPS 定位,记录样方位置、坡度、海拔、坡位、坡向等生境因子信息。记录木本层样方内所有 1 cm 以上物种名称、胸径、盖度、数量,记录草本层物种名称、数量、盖度;工法调查的方法为实地人工调查,通过对工程进行查勘、丈量、记录、拍照,做到全面掌握真实情况。

**1.2.2** 物种多样性指数计算 选用 Margalef 指数($M$)、Simpson 指数($D$)、Shannon 指数($H$)衡量植物群落物种多样性特征,Pielou 均匀度指数($J$)衡量植物群落物种分布均匀程度(刘林馨等,2012)。

Margalef 指数:

$M=(S-1)/\ln N$;

Simpson 指数:

$D=1-\sum P_i^2$

Shannon 指数:

$H=-\sum P_i \ln P_i$

Pielou 指数:

$J=H/\ln S$

式中,$S$ 为每一样地中的物种总数,$N$ 为所有种的个体总数,$P_i$ 为第 $i$ 种个体数占总个体数的比例。

**1.2.3** 重要值计算 各物种的重要值(importance value,IV)采用以下的公式进行计算(简尊吉等,2017):

木本层重要值计算公式:

$IV=$(相对密度+相对频度+相对显著度)/300

草本层重要值计算公式为:

$IV=$(相对密度+相对频度+相对盖度)/300

其中:相对密度=1 个种的个体数/所有种的总个体数×100,相对盖度=1 个种的盖度/所有种的总盖度×100,相对频度=1 个种的频度/所有种的频度之和×100。相对显著度=某个种胸高断面积/样地面积×100。

**1.2.4** 生态位宽度的计算 生态位宽度采用 Levins 公式:

$$B_i=\frac{1}{r\sum_{j=1}^{r}P_{ij}^2}$$

式中:$P_{ij}=n_{ij}/N_i$;$N_i=\sum_{j=1}^{r}n_{ij}$;$B_i$ 为物种 $i$ 的生态位宽度;$P_{ij}$ 是物种 $i$ 在第 $j$ 个资源位的资源量占该物种利用全部资源位的比例;$n_{ij}$ 为物种 $i$ 在资源 $j$ 上的重要值;$r$ 为资源位的数量,即样地数;公式的值域为[0,1](张金屯,2004)。

**1.2.5** 生态位相似性比例 参照简尊吉等(2017)进行计算:

$$PS_{ik}=1-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{r}|P_{ij}-P_{kj}|$$

式中:$PS_{ik}$ 为物种 $i$ 与物种 $k$ 两物种生态位的相似程度;$P_{ij}$、$P_{kj}$ 为物种 $i$ 和物种 $k$ 在资源位 $j$ 上的重要值百分率;$r$ 的含义同前;公式的值域为[0,1]。

**1.2.6** 生态位重叠 Petraitis 生态位重叠计算公式为:

$$O_{ik}=\sum_{j=1}^{r}\frac{P_{ij}P_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{r}P_{ij}^2\sum_{j=1}^{r}P_{Kj}^2}}$$

式中:$O_{ik}$ 为物种 $i$ 对物种 $k$ 的生态位重叠指数;$P_{ij}$、$P_{kj}$、$r$ 含义同前;公式的值域为[0,1]。

**1.2.7** 数量排序 为简化计算,使定性因子参与计算,参照刘世梁等(2003)经验方法对坡位、工法进行赋值,上坡位、中坡位、下坡位依次赋值为 0.4、1.0、0.8;根据工法稳固性赋值,土袋阶梯、干砌片石、挡土墙、土袋阶梯+排水渠、钢铁框+排水渠工法分别赋值为:0.2、0.4、0.6、0.8、1.0,值越大,工法稳固性越强。参照薛鸥等(2016)对坡向进行赋值:东北 80°~100°、东北 60°~80°、东北 40°~60°、东北 20°~40°、东北 20°~20°、东 20~40°、东 40~60°、东 60~80°分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.4、0.3、0.2,值越大越向阳。

对物种和多样性矩阵数据进行 DCA(detrended correspondence analysis)分析并进行蒙特卡洛检验(5%置信度),根据分析结果选择木本、草本物种与环境因子矩阵进行典范对应分析(canonical correlation analyses,CCA)排序,α 多样性指数与环境因子矩阵的冗余分析(redundancy analysis,RDA)排序。

**1.2.8** 土壤含水量及 pH 的测定 采用常规方法测定 0~10 cm 土层厚度土壤含水量及其 pH 值。

**1.2.9** 统计分析 常规统计分析在 Microsoft Excel 2016 中进行,RDA 以及 CCA 分析和作图采用 CANOCO 4.5 软件(Biometris-Plant Research international,Wageningen,The Netherlands)。

## 2 结果与分析

### 2.1 物种组成及其与环境因子的关系

根据 13 个样点数据资料统计(表 2),共有植物

**表 2 样方物种统计**
**Table 2 Species in the plots**

| 物种编号 | 科 | 属 | 种名及拉丁名 | 物种编号 | 科 | 属 | 种名及拉丁名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 菊科 | 鬼针草属 | 鬼针草 *Bidens pilosa* | 38 | 胡桃科 | 核桃属 | 核桃 *Juglans regia* |
| 2 | 伞形科 | 水芹菜属 | 水芹 *Oenanthe javanica* | 39 | 马桑科 | 马桑属 | 马桑 *Coriaria nepalensis* |
| 3 | 报春花科 | 珍珠菜属 | 过路黄 *Lysimachia christiniae* | 40 | 桦木科 | 桤木属 | 桤木 *Alnus cremastogyne* |
| 4 | 禾本科 | 狗尾草属 | 狗尾草 *Setaria viridis* | 41 | 蔷薇科 | 李属 | 李子 *Prunus cerasifera* |
| 5 | 酢浆草科 | 酢浆草属 | 酢酱草 *Oxalis corniculata* | 42 | 蔷薇科 | 枇杷属 | 枇杷 *Eriobotrya japonica* |
| 6 | 伞形科 | 天胡荽属 | 红马蹄草 *Herba Hydrocotylis* | 43 | 棕榈科 | 棕榈属 | 棕榈 *Trachycarpus fortune* |
| 7 | 唇形科 | 风轮菜属 | 风轮菜 *Clinopodium chinense* | 44 | 豆科 | 刺槐属 | 刺槐 *Robinia pseudoacacia* |
| 8 | 菊科 | 苦苣菜属 | 苣荬菜 *Sonchus brachyotu.* | 45 | 银杏科 | 银杏属 | 银杏 *Ginkgo biloba* |
| 9 | 唇形科 | 香需属 | 香需 *Elsholtzia ciliate* | 46 | 桑科 | 桑树属 | 桑树 *Morus alba* |
| 10 | 菊科 | 大丁草属 | 大丁草 *Gerbera anandria* | 47 | 蔷薇科 | 悬钩子属 | 山莓 *Rubus corchorifolius* |
| 11 | 禾本科 | 求米草属 | 竹叶草 *Oplismenus compositus* | 48 | 荨麻科 | 苎麻属 | 水麻 *Debregeasia orientalis* |
| 12 | 豆科 | 山蚂蝗属 | 假地豆 *Desmodium heterocarpon* | 49 | 胡颓子科 | 胡颓子属 | 牛奶子 *Elaeagnus umbellate* |
| 13 | 荨麻科 | 苎麻属 | 苎麻 *Boehmeria nivea* | 50 | 禾本科 | 刚竹属 | 毛竹 *Phyllostachys heterocycle* |
| 14 | 豆科 | 两型豆属 | 两型豆 *Amphicarpaea trisperma* | 51 | 木犀科 | 木犀属 | 桂花 *Osmanthus fragrans* |
| 15 | 薯蓣科 | 薯蓣属 | 薯蓣 *Dioscorea opposite* | 52 | 蔷薇科 | 樱属 | 日本樱花 *Cerasus yedoensis* |
| 16 | 藜科 | 藜属 | 藜 *Chenopodium album* | 53 | 葡萄科 | 蛇葡萄属 | 蛇葡萄 *Ampelopsis glandulosa* |
| 17 | 唇形科 | 紫苏属 | 紫苏 *Erilla frutescens* | 54 | 菊科 | 蒿属 | 艾草 *Artemisia argyi* |
| 18 | 茜草科 | 茜草属 | 茜草 *Rubia cordifolia* | 55 | 五加科 | 常春藤属 | 常春藤 *Hedera nepalensis* |
| 19 | 禾本科 | 马唐属 | 马唐 *Digitaria sanguinalis* | 56 | 莎草科 | 莎草属 | 莎草 *Cyperus rotundus* |
| 20 | 菊科 | 千里光属 | 千里光 *Senecio scandens* | 57 | 金星蕨科 | 毛蕨属 | 毛蕨 *Cyclosorus interruptu.* |
| 21 | 木贼科 | 木贼属 | 节节草 *Equisetum ramosissimum* | 58 | 百合科 | 菝葜属 | 菝葜 *Smilax china* |
| 22 | 禾本科 | 稗属 | 稗 *Echinochloa crusgalli* | 59 | 蔷薇科 | 龙芽草属 | 龙牙草 *Agrimonia pilosa* |
| 23 | 豆科 | 野豌豆属 | 小巢菜 *Vicia hirsute* | 60 | 鸢尾科 | 鸢尾属 | 扁竹根 *Iris confuse* |
| 24 | 菊科 | 马兰属 | 马兰 *Kalimeris indica* | 61 | 菊科 | 黄鹌菜属 | 黄鹌菜 *Youngia Japonica* |
| 25 | 桔梗科 | 半边莲属 | 半边莲 *Lobelia chinensis* | 62 | 菊科 | 天名精属 | 天名精 *Carpesium abrotanoides* |
| 26 | 禾本科 | 求米草属 | 求米草 *Oplismenus undulatifolius* | 63 | 菊科 | 蛇莓属 | 蛇莓 *Duchesnea indica* |
| 27 | 菊科 | 地胆草属 | 地胆草 *Elephantopus scaber* | 64 | 莎草科 | 苔草属 | 苔草 *Carex insignis* |
| 28 | 禾本科 | 黑麦草属 | 黑麦草 *Lolium perenne* | 65 | 樟科 | 润楠属 | 润楠 *Machilus pingii* |
| 29 | 荨麻科 | 苎麻属 | 小赤麻 *Boehmeria spicata* | 66 | 芸香科 | 花椒属 | 花椒 *Zanthoxylum esquirolii* |
| 30 | 毛茛科 | 毛茛属 | 毛茛 *Ranunculus japonicas* | 67 | 山茱萸科 | 八角枫属 | 八角枫 *Alangium chinens.* |
| 31 | 大戟科 | 铁苋菜属 | 铁苋菜 *Acalypha australis* | 68 | 柏科 | 侧柏属 | 柏树 *Platycladus orientalis* |
| 32 | 鸭跖草科 | 鸭跖草属 | 鸭跖草 *Commelina communis* | 69 | 蔷薇科 | 棣棠花属 | 棣棠 *Kerria japonica* |
| 33 | 旋花科 | 打碗花属 | 打碗花 *Calystegia hederace.* | 70 | 禾本科 | 慈竹属 | 慈竹 *Neosinocalamus affinis* |
| 34 | 苋科 | 苋属 | 苋菜 *Amaranthus mangostanus* | 71 | 壳斗科 | 栎属 | 栎 *Quercus acutissima* |
| 35 | 菊科 | 飞蓬属 | 一年蓬 *Erigeron annuus* | 72 | 樟亚科 | 山胡椒属 | 山胡椒 *Lindera glauca* |
| 36 | 毛茛科 | 银莲花属 | 野棉花 *Anemone vitifolia* | 73 | 五加科 | 刺楸属 | 刺楸 *Kalopanax septemlobus* |
| 37 | 菊科 | 白酒草属 | 小蓬草 *Conyza Canadensis* | 74 | 杨柳科 | 杨属 | 杨 *Pterocarya stenoptera* |

74 种,隶属于 37 科 72 属。以蔷薇科 Rosaceae(16%)、菊科 Compositae(30%)、禾本科 Gramineae(21%)、豆科 Leguminosae (11%)为主。其中木本植物 25 种,草本植物 49 种;双子叶植物 27 科、56 属、58 种,单子叶植物 8 科、14 属、14 种,蕨类植物 2 科 2 属 2 种。工程区植物共 52 种,其中,人工种 7 科 8 属 8 种,乡土种 22 科 43 属 44 种,占总科数的 24%,总属数的 18%,总种数的 18%;自然区 3 个调查样地共有植物 28 种。两个调查区域的共有种为半边莲(*Lobelia chinensis*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、棕榈(*Trachycarpus fortunei*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)、牛奶子(*Elaeagnus umbellate*)。

工程区与自然区物种组成与环境因子 CCA 分析如图 2 所示,工程区(图 2a)CCA 4 轴的解释量分别为 16.7%、15.9%、14.8%、11.2%,累积解释了物种与环境关系信息的 58.6%。1 轴与海拔($r=0.642$)和坡度($r=0.640$)显著强相关,与 pH($r=-0.303$)负相关,主要反映海拔和坡度两个环境因子变化梯度;2 轴与坡向($r=0.544$)显著相关;3 轴与土壤含水量($r=0.699$)、pH($r=-0.530$)显著相关;4 轴与坡向($r=-0.425$)负显著相关。

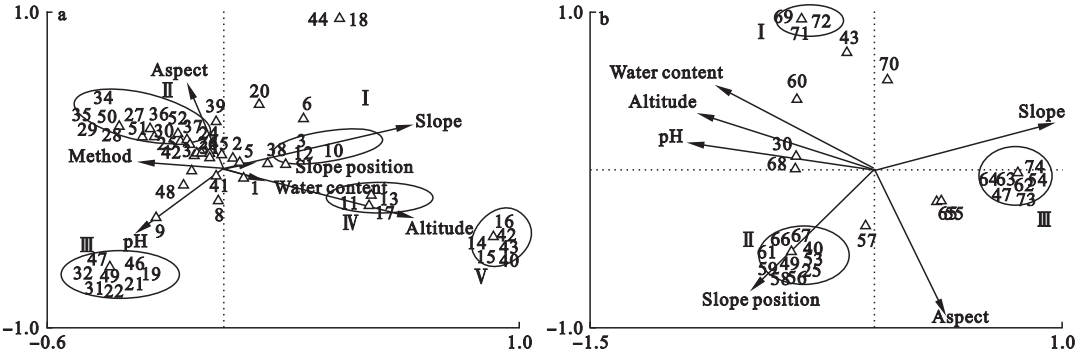



**图 2 工程区(a)、自然区(b)物种与环境因子 CCA 双序图**

**Fig.2 CCA biplot of engineering area (a), natural area (b) species and environmental variables in herb layer**

Altitude:海拔,Slope:坡度,Method:施工工法,Aspect:坡向,Slope position 坡位,pH:土壤 pH 值,Water content:土壤含水量;物种标号同表 2。

工程区环境因子影响力大小依次为:海拔>坡度>坡向>pH>工法>土壤含水量>坡位,据排序图,工程区物种大致可分为 5 个类群,位于排序图第一象限的Ⅰ类群,包括红马蹄草(*H. Hydrocotylis*)(6)、过路黄(*L. christinae*)(3)、大丁草(*G. anandria*)(10)、假地豆(*D. heterocarpon*)(12)等,与海拔密切相关,也受坡度影响,分布在海拔较高、坡度较大调查样地;Ⅱ类群物种较多,包括地胆草(*E. scaber*)(27)、野棉花(*A. vitifoli*a)(36)、毛竹(*P. heterocycle*)(50)等,与坡向关系最为紧密,沿坡向梯度分布;Ⅲ类群中铁苋菜(*A. australis*)(31)、山莓(*R. corchorifolius*)(47)等分布在 pH 较高调查样地;Ⅳ类群中有竹叶草(*O. compositus*)(11)、苎麻(*B. nivea*)(13)和紫苏(*E. frutescens*)(17),Ⅴ类群中有两型豆(*A. trisperma*)(14)、藜(*C. album*)(16)等 6 个种,Ⅳ、Ⅴ两类群均与海拔密切相关,但Ⅴ类群比Ⅳ类群在较高海拔上有最适值,此外,二者同时也沿坡度梯度分布,分布在相对较高的海拔和坡度调查样地。

自然区(图 2b)CCA4 轴的解释量分别为 52.6%、47.3%,前 2 轴累积解释了物种与环境关系信息的 100%。1 轴与坡度($r$ = 0.954)、pH ($r$ = −0.984)显著强相关,与海拔($r$ = −0.934)显著相关。2 轴与坡向($r$ = −0.924)和坡位($r$ = −0.764)显著相关。

自然区几个环境因子对物种分布影响均较大;根据排序图大致分为 3 个类群,Ⅰ类群棣棠(*K. japonica*)(69)、栎(*Q. linn*)(71)、山胡椒(*L. glauca*)(72),分布在水分含量充足、海拔较高、pH 值高的调查样地;Ⅱ类群蛇葡萄(*A. glandulosa*)(53)、半边莲(*L. chinensis*)(25)、莎草(*C. glomeratus*)(56)等,其分布与坡位密切相关,分布在高坡位调查样地;Ⅲ类群天名精(*C. abrotanoides*)(62)、蛇莓(*D. indica*)(63)、苔草(*C. insignis*)(64)等主要分布在坡度较大调查样地。

## 2.2 多样性及其与环境因子的关系

各个样地的物种多样性指数数量特征见表 3,Margalef 指数($M$)范围为 0.00~2.502,Simpson($D$)指数范围为 0.00~0.993,Pielou($J$)指数范围为 0.00~0.919,Shannon 指数($H$)指数范围为 0.00~2.210。总体上来看,工程区草本层多样性略高于自然区,木本层多样性低于自然区。$F$ 检验表明,不同坡位对草本层 Pielou 指数($J$)影响显著($P$<0.05),对其他多样性指数无显著影响。

将各层研究对象和环境因子的排序结果用排序图表示(图 3),工程区草本层(图 3a)α 多样性 RDA 第 1 轴特征值为 0.775,第 2 轴特征值为 0.113,前 2 轴对物种多样性变异的累积解释率为 88.8%,主要受海拔、坡度、工法和坡位影响,均不显著;Margalef 指数受工法影响大;Shannon 指数受海拔和坡度影响较大;Pielou 指数受坡位影响较大;Simpson 指数受各环境因子影响较小。

工程区木本层(图 3b)α 多样性 RDA 第 1 轴特征值为 0.663,第 2 轴特征值为 0.191,2 轴与坡位($r$ = −0.734)显著强相关,与工法($r$ = 0.649)显著相关,前 2 轴对物种多样性变异的累积解释率为 85.4%;α 多样性主要受坡位、工法和 pH 影响;Margalef 指数受土壤 pH 和工法影响较大;Pielou 指数受坡位影响较大。

自然区草本层(图 3c)α 多样性 RDA 第 1 轴特征值为 0.977,第 2 轴特征值为 0.022,1 轴与坡向($r$ = −0.917)显著相关,2轴与坡度($r$ = 0.964)、pH($r$ =

**表 3 群落物种 α 多样性指数比较**

**Table 3 Comparison of community species diversity index**

| 边坡区域位置 | | 样地编号 | Margalef 指数 | | Simpon 指数 | | Shannon 指数 | | Pielou 指数 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 木本层 | 草本层 | 木本层 | 草本层 | 木本层 | 草本层 | 木本层 | 草本层 |
| 工程区 | 坡上 | 1 | 1.668 | 1.408 | 0.645 | 0.788 | 1.290 | 1.680 | 0.780 | 0.390 |
| | | 2 | 0.679 | 2.502 | 0.476 | 0.864 | 0.820 | 2.210 | 0.746 | 0.461 |
| | | 3 | 0.328 | 1.019 | 0.091 | 0.626 | 0.190 | 1.136 | 0.274 | 0.819 |
| | 坡中 | 4 | 1.125 | 2.015 | 0.042 | 0.816 | 1.343 | 1.809 | 0.835 | 0.754 |
| | | 5 | 0.000 | 1.300 | 0.000 | 0.771 | 0.000 | 1.658 | 0.000 | 0.852 |
| | | 6 | 1.125 | 2.012 | 0.491 | 0.750 | 0.975 | 1.583 | 0.606 | 0.884 |
| | | 7 | 0.874 | 1.915 | 0.379 | 0.809 | 0.750 | 1.803 | 0.541 | 0.783 |
| | 坡下 | 8 | 0.303 | 1.292 | 0.198 | 0.784 | 0.349 | 1.676 | 0.503 | 0.861 |
| | | 9 | 0.315 | 1.300 | 0.080 | 0.735 | 0.173 | 1.506 | 0.250 | 0.774 |
| | | 10 | 1.038 | 1.870 | 0.993 | 0.840 | 0.458 | 1.977 | 0.331 | 0.859 |
| 自然区 | | 11 | 1.573 | 0.289 | 0.711 | 0.320 | 1.462 | 0.500 | 0.816 | 0.722 |
| | | 12 | 2.233 | 2.511 | 0.790 | 0.748 | 1.714 | 1.822 | 0.881 | 0.829 |
| | | 13 | 1.595 | 1.470 | 0.786 | 0.769 | 1.646 | 1.577 | 0.919 | 0.880 |
| | | F | 0.292 | 0.359 | 0.350 | 0.139 | 0.881 | 0.017 | 0.530 | 4.32* |

*F* 为研究区不同坡位植物多样性指数的方差分析结果。* $P<0.05$。

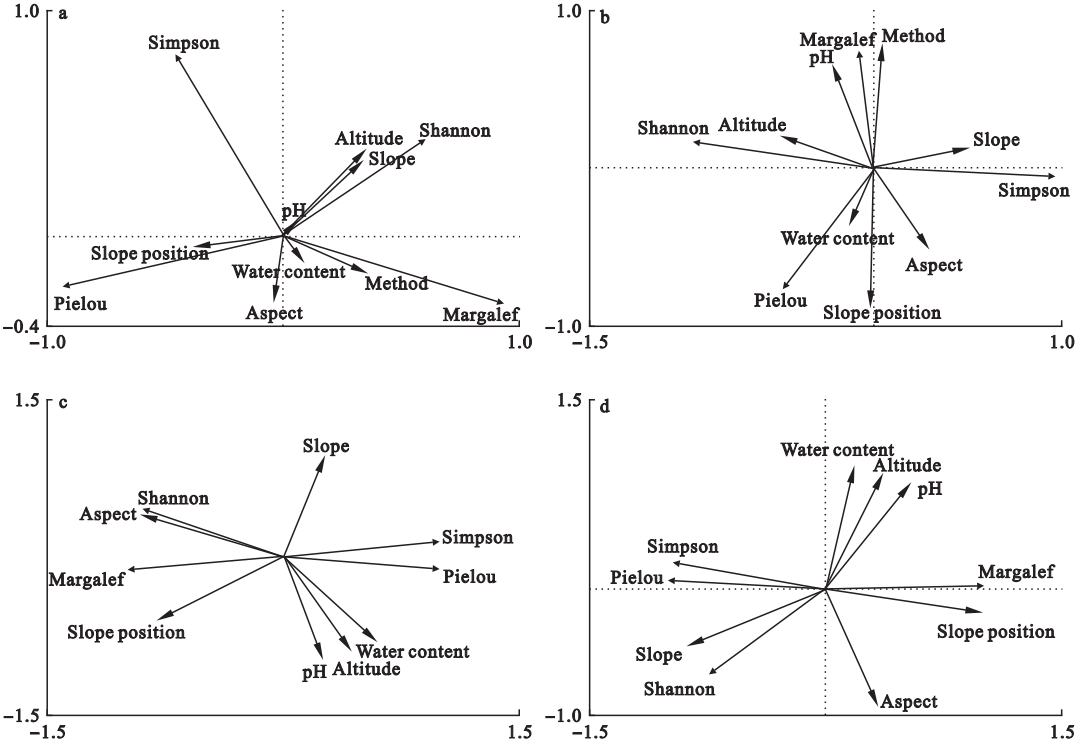



**图 3 工程区草本层(a)、工程区木本层(b)、自然区草本层(c)、自然区木本层(d)物种多样性与环境因子 RDA 排序图**

**Fig.3 RDA two-dimension of species diversity and environmental factors in herb layer in engineering area (a), woody layer in engineering area (b), herb layer in natural area (c), and woody layer in natural area (d)**

Altitude:海拔,Slope:坡度,Method:施工工法,Aspect:坡向,Slope position 坡位,pH:土壤 pH 值, Water content:土壤含水量。

−0.996)显著强相关,与海拔($r=-0.900$)显著相关;前 2 轴对物种多样性变异的累积解释率为 100%;Margalef 指数受坡位和坡向影响较大;Shannon 指数受坡向影响较大;Pielou 指数和 Simpon 指数受环境因子较小。

自然区木本层(图 3d)α 多样性 RDA 第 1 轴特征值为 0.982,第 2 轴特征值为 0.018,1 轴与坡位($r=0.982$)显著强相关、与坡度($r=-0.887$)显著相关,2 轴与土壤含水量($r=0.982$)、坡向($r=-0.944$)显著强相关,与海拔($r=0.930$)显著相关。前 2 轴对物种多样性变异的累积解释率为 100%,环境因子对 α 多样性影响均较大;Margalef指数受坡位影响

**表4 工程区和自然区15个优势种植物重要值及生态位宽度**

**Table 4 Importance value and niche breadth of 15 dominant species in engineering area and natural area**

| 物种编号 | 种名 | | 重要值 | | 生态位宽度 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 工程区 | 自然区 | 工程区 | 自然区 | 工程区 | 自然区 |
| 1 | 李子 | 扁竹根 | 54.66 | 38.08 | 0.80 | 0.38 |
| 2 | 鬼针草 | 毛蕨 | 18.16 | 26.01 | 0.75 | 0.94 |
| 3 | 风轮菜 | 柏树 | 15.41 | 17.36 | 0.74 | 0.66 |
| 4 | 银杏 | 润楠 | 9.03 | 14.85 | 0.39 | 0.67 |
| 5 | 核桃 | 棕榈 | 8.64 | 11.77 | 0.38 | 0.58 |
| 6 | 千里光 | 慈竹 | 7.84 | 11.08 | 0.28 | 0.65 |
| 7 | 刺槐 | 苔草 | 7.15 | 10.42 | 0.10 | 0.33 |
| 8 | 狗尾草 | 杨树 | 6.81 | 10.22 | 0.57 | 0.33 |
| 9 | 马桑 | 常春藤 | 5.75 | 8.98 | 0.10 | 0.55 |
| 10 | 水芹 | 桤木 | 6.78 | 6.34 | 0.27 | 0.33 |
| 11 | 竹叶草 | 龙牙草 | 5.22 | 5.94 | 0.34 | 0.33 |
| 12 | 毛茛 | 蛇莓 | 3.70 | 5.66 | 0.24 | 0.33 |
| 13 | 桂花 | 莎草 | 3.69 | 5.35 | 0.18 | 0.33 |
| 14 | 半边莲 | 栎 | 2.98 | 5.07 | 0.15 | 0.33 |
| 15 | 红马蹄草 | 牛奶子 | 2.98 | 4.80 | 0.18 | 0.33 |

较大;Pielou 指数、Simpon 指数、Shannon 指数均受坡度影响较大。

**2.3** 物种重要值及生态位宽度值

以物种重要值为分析指标,确定研究区域优势种数量,自然区与工程区物种差异较大,因此分别选取工程区、自然区排名前15种植物作为优势种植物,分别对样地内工程区、自然区15种优势植物进行重要值及生态位宽度计算,各宽度值见表4。

表4可以看出,从两个角度物种的排序情况基本上是一致的,重要值大的物种生态位宽度也大;工程区重要值排序为李子>鬼针草>风轮菜>银杏>核桃树>千里光>刺槐>狗尾草>马桑>水芹>竹叶草>毛茛>桂花树>半边莲>红马蹄草。木本优势植物均为人工种,草本层优势种为自然种,其中李子、鬼针草和风轮菜在群落中占据很大的优势;自然区15种优势种生态位宽度大小排序分别是:扁竹根>毛蕨>柏树>润楠>棕榈>慈竹>苔草>杨树>常春藤>桤木>龙牙草>蛇莓>莎草>栎>牛奶子;工程区与自然区无共有优势种。

**2.4** 工程区、自然区植物群落内生态位相似性

分别对样地内工程区和自然区15个优势种生态位相似性比例进行计算发现(表5),在105组比对中,工程区生态位相似性比例大于0.8的有0对,0.7~0.8有5对,0.6~0.7有2对,0.5~0.6有7对,0.4~0.5有8对,0.3~0.4有15对,0.2~0.3有14对,0.1~0.2有15对,0.0~0.1有39对;自然区0.9~1.0有9对,0.8~0.9有1对,0.7~0.8有6对,0.6~0.7有10对,0.5~0.6有19对,0.4~0.5有16对,0.3~0.4有2对,0.2~0.3有8对,0.1~0.2有0对,0.0~0.1有34对。如图4所示,工程区大多数种对生态位相似性比例较低,大多数在0.0~0.4;自然区0.4~1.0有58对,生态位相似性比例较高。工程区生态位相似性比例较大的种对依次是:李子-风轮菜、李子-鬼针草、鬼针草-风轮菜、马桑-红马蹄草;自然区生态位相似性比例较大的种对依次是:扁竹根-栎、棕榈-慈竹、毛蕨-柏树、润楠-常春藤。

**表5 工程区、自然区15个优势种生态位相似性**

**Table 5 Ecological niche similarity of 15 dominant species in engineering area and natural area**

| 物种编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 0.787 | 0.790 | 0.399 | 0.318 | 0.277 | 0.000 | 0.645 | 0.000 | 0.221 | 0.386 | 0.308 | 0.171 | 0.246 | 0.098 |
| 2 | 0.433 | | 0.759 | 0.419 | 0.434 | 0.364 | 0.000 | 0.572 | 0.000 | 0.239 | 0.541 | 0.290 | 0.190 | 0.152 | 0.061 |
| 3 | 0.628 | 0.781 | | 0.593 | 0.346 | 0.367 | 0.000 | 0.704 | 0.006 | 0.186 | 0.422 | 0.294 | 0.270 | 0.142 | 0.151 |
| 4 | 0.064 | 0.632 | 0.437 | | 0.385 | 0.453 | 0.000 | 0.469 | 0.000 | 0.000 | 0.535 | 0.108 | 0.450 | 0.000 | 0.233 |
| 5 | 0.688 | 0.587 | 0.563 | 0.312 | | 0.206 | 0.000 | 0.351 | 0.000 | 0.275 | 0.519 | 0.305 | 0.152 | 0.195 | 0.291 |
| 6 | 0.573 | 0.587 | 0.563 | 0.427 | 0.885 | | 0.315 | 0.213 | 0.030 | 0.385 | 0.334 | 0.070 | 0.136 | 0.070 | 0.315 |
| 7 | 0.000 | 0.219 | 0.000 | 0.500 | 0.557 | 0.427 | | 0.000 | 0.528 | 0.495 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.663 |
| 8 | 0.000 | 0.219 | 0.000 | 0.500 | 0.721 | 0.427 | 1.000 | | 0.000 | 0.210 | 0.000 | 0.144 | 0.108 | 0.000 | 0.000 |
| 9 | 0.064 | 0.492 | 0.273 | 0.774 | 0.639 | 0.427 | 0.727 | 0.727 | | 0.210 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.715 |
| 10 | 0.064 | 0.413 | 0.437 | 0.500 | 0.680 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.273 | | 0.000 | 0.505 | 0.000 | 0.195 | 0.495 |
| 11 | 0.064 | 0.413 | 0.437 | 0.500 | 0.660 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.273 | 1.000 | | 0.000 | 0.320 | 0.000 | 0.098 |
| 12 | 0.000 | 0.219 | 0.000 | 0.500 | 0.670 | 0.427 | 1.000 | 0.500 | 0.727 | 0.000 | 0.000 | | 0.108 | 0.195 | 0.000 |
| 13 | 0.064 | 0.413 | 0.437 | 0.500 | 0.665 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.273 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | | 0.000 | 0.000 |
| 14 | 0.936 | 0.368 | 0.563 | 0.000 | 0.668 | 0.573 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | 0.000 |
| 15 | 0.064 | 0.413 | 0.437 | 0.500 | 0.666 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.273 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | |

表中左下角为自然区15个优势植物种间生态位相似性比例,右上角为工程区15个优势植物种间生态位相似性比例,物种编号同表4。

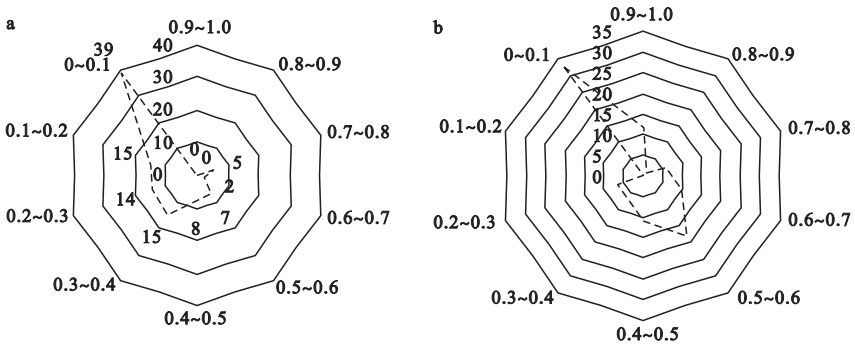



**图 4　工程区(a)、自然区(b)生态位相似性分布图**

**Fig.4　Distribution map of ecological niche similarity in engineering area and natural area**

**表 6　工程区、自然区 15 个优势物种生态位重叠**

**Table 6　Ecological niche overlap of 15 dominant species in engineering and natural areas**

| 物种编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 0.892 | 0.899 | 0.575 | 0.435 | 0.374 | 0.000 | 0.728 | 0.249 | 0.245 | 0.479 | 0.489 | 0.324 | 0.546 | 0.126 |
| 2 | 0.666 | | 0.806 | 0.593 | 0.537 | 0.476 | 0.000 | 0.650 | 0.258 | 0.147 | 0.733 | 0.491 | 0.288 | 0.282 | 0.076 |
| 3 | 0.831 | 0.914 | | 0.811 | 0.539 | 0.482 | 0.000 | 0.808 | 0.202 | 0.307 | 0.530 | 0.421 | 0.491 | 0.256 | 0.186 |
| 4 | 0.049 | 0.750 | 0.433 | | 0.390 | 0.349 | 0.000 | 0.586 | 0.147 | 0.223 | 0.384 | 0.305 | 0.594 | 0.185 | 0.209 |
| 5 | 0.908 | 0.716 | 0.720 | 0.293 | | 0.137 | 0.000 | 0.487 | 0.268 | 0.210 | 0.597 | 0.391 | 0.126 | 0.140 | 0.256 |
| 6 | 0.800 | 0.716 | 0.633 | 0.423 | 0.977 | | 0.531 | 0.337 | 0.483 | 0.443 | 0.463 | 0.078 | 0.097 | 0.028 | 0.473 |
| 7 | 0.000 | 0.368 | 0.000 | 0.707 | 0.414 | 0.598 | | 0.000 | 0.810 | 0.413 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.892 |
| 8 | 0.000 | 0.368 | 0.000 | 0.707 | 0.414 | 0.598 | 1.000 | | 0.417 | 0.221 | 0.191 | 0.776 | 0.417 | 0.122 | 0.142 |
| 9 | 0.024 | 0.589 | 0.216 | 0.911 | 0.387 | 0.560 | 0.936 | 0.936 | | 0.676 | 0.000 | 0.572 | 0.000 | 0.000 | 0.722 |
| 10 | 0.069 | 0.694 | 0.613 | 0.707 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.352 | | 0.079 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.913 |
| 11 | 0.069 | 0.694 | 0.613 | 0.707 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.352 | 1.000 | | 0.000 | 0.314 | 0.000 | 0.096 |
| 12 | 0.000 | 0.368 | 0.000 | 0.707 | 0.414 | 0.598 | 1.000 | 1.000 | 0.936 | 0.000 | 0.000 | | 0.153 | 0.155 | 0.000 |
| 13 | 0.069 | 0.694 | 0.613 | 0.707 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.352 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | | 0.000 | 0.000 |
| 14 | 0.998 | 0.619 | 0.790 | 0.000 | 0.910 | 0.801 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | 0.000 |
| 15 | 0.069 | 0.694 | 0.613 | 0.707 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.352 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | |

表中左下角为自然区优势植物种间生态位重叠值,右上角为工程区优势植物种间生态位重叠值,物种编号同表 4。

### 2.5　边坡植物群落内生态位重叠值

工程区、自然区 15 个优势种群生态位重叠情况见表 6,工程区各物种间生态位重叠度在 0.00~0.899波动,大部分分布在 0.0~0.5 低值区域;自然区大部分重叠值分布在 0.5~1.0 高值区域。

## 3　讨　论

### 3.1　物种组成及其与环境因子关系

物种组成是群落结构的重要特征,也是研究群落演替的基础,尤其是优势物种的变化是群落演替的重要标志(金艳强等,2017)。研究区共有植物 74 种,隶属于 37 科 72 属,工程区调查样地 52 种植物中,乡土种有 22 科 43 属 44 种,比恢复初期的乡土物种明显增多,说明工程区植被正向自然方向发展。但工程区物种与自然区优势种截然不同(表 4),施工初期坡体整体种植刺槐、核桃等经济树种,2015 年大部分改造为李子经济林。目前木本植物有 3 种·样方$^{-1}$,李子是其优势种,自然区木本植物有 6 种·样方$^{-1}$,优势种是柏树。草本层中,工程区优势种为鬼针草,其原因可能与鬼针草适应性强、种子容易传播的习性有关;自然区林下环境相对荫蔽,更适宜喜阴湿的扁竹根生长。此外,工程区草本植物数(8 种·样方$^{-1}$)略高于自然区(7 种·样方$^{-1}$),其原因可能是自然区林分郁闭度较高,林下光线阴暗、温度相对较低,微生物活性较小,土壤有机质和枯落物分解速度慢,限制了林下草本植物的生长。

环境因子的作用在于对物质和能量的再分配(张昌顺等,2012),控制着物种的组成和分布。前人研究认为,海拔通过直接影响温度、湿度和土壤等环境条件间接作用于植被物种组成(欧芷阳,2014;张天斌等,2015),是调控物种分布格局的主要因子之一(Sattler *et al.*,2010)。本研究中,CCA 分析结

果表明,影响工程区物种分布的环境因子(包括工法)顺序为:海拔>坡度>坡向>pH>工法>土壤含水量>坡位。海拔对工程区物种分布影响最大,坡度其次,主要影响灌木层或草本层群落结构,如Ⅰ类群中的过路黄(*L. christinae*)、大丁草(*G. anandria*)、假地豆(*D. heterocarpon*)主要分布在高坡度样地。坡向与降水、热量和土壤理化性质关联密切,会限制植物的生长和分布(刘宏文等,2014),Ⅱ类群中地胆草(*E. scaber*)、野棉花(*A. vitifolia*)、毛竹(*P. heterocycle*)等分布在向阳的调查样地。Ⅱ类群的植物种类最多,说明在本研究所调查区域内的大部分植物喜光,适宜在向阳的坡面种植。因此,在今后的震损坡植被修复工程中,根据修复地不同环境条件,种植相适应植物,可达到更好的修复效果。对于北川及其他地理环境相似的地区来说,Ⅰ、Ⅳ类群适宜在海拔相对高、坡度相对较大处种植,坡度最大处可选Ⅴ类群植物。酢酱草(*O. corniculata*)、鬼针草(*B. pilosa*)、李子(*P. cerasifera*)在所有的生境中具有均匀分布的特点,因而在工程区各生境中均适用。比较7个环境因子对不同调查区物种分布的影响力,可以看出与自然区中各因子影响力均有较大不同,海拔、坡度和坡向是影响工程区物种分布的主要因素,其原因主要是受损坡人工干预下的植被修复时间短,尚未形成稳定的顶极群落,物种组成和分布容易受到环境因子的影响所致。

### 3.2 物种多样性及其与环境因子关系

一般都用Margalef丰富度指数、Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数来表征边坡的物种多样性(武文娟,2016;尤业明等,2016)。Mohammadi等(2015)认为,坡位与草本层物种分布和丰富度的关联性很强,但本研究中坡位仅对工程区草本层Pielou指数($J$)影响显著(表3,图3a)。原因可能与本研究样地大多分布在低山区,坡位间海拔跨度低等因素相关。RDA分析显示,影响工程区草本层α多样性指数的环境因子主要是坡度、坡位、海拔和工法,而影响木本层的则主要是坡位、pH和工法。León等(2018)对智利巴塔哥尼亚人为和天然泥炭地生态环境及其多样性调查发现,水体pH值随着泥炭藓的丰度而下降。在工程区木本层中,土壤pH随物种丰富度增加而增加,这可能是经济林人为施肥导致。此外,本研究中治山工法与工程区物种分布关系不大,但与工程区Margalef指数正相关性较大(图3),说明稳固性高的治山工法(土袋阶梯+排水渠、钢铁框+排水渠等)有利于后期植被丰富度的增加。

对比自然区与工程区的木本植物丰富度和多样性,发现前者高于后者(表3),工程区草本层多样性略高于自然区。工程区部分样地多样性高于自然区,说明工程植被有一定的恢复效果。为使工程区与周边自然相协调,建议工程区适当增加木本植物种类。值得注意的是,样地1为人工刺槐林(表1),施工结束后人为影响较小,木本层Margalef指数(1.668)与自然区相近,表明工程区的恢复若无人为干扰,植被多样性会增加。欧芷阳等(2014)对桂西南喀斯特山地木本植物群落研究表明,群落物种多度分布主要受生物间的相互作用和人为干扰等因素影响。本研究发现,工程区植被多样性受环境因子影响大小不同,而环境因子对自然区影响都较大,这可能是工程区恢复期较短且后期受人为干扰较大导致,同时也说明成熟的自然生态系统发展过程中受各因素的影响均衡,这也是工程区植被未来应有的发展趋势。

### 3.3 优势种生态位

一般来说,一个种群的生态位宽度越大,对环境的适应性越强,相对于生态位宽度窄的种群,在竞争中处于优势地位,往往成为该群落的优势种群。与张德魁等(2007)研究结果相似,工程区中重要值大的物种(李子、鬼针草、风轮菜)生态位宽度也大,与其他物种的生态位相似性比例和生态位重叠值也大。与自然区相比,工程区生态位相似性比例(共105对,88对分布在0.0~0.4范围)以及生态位重叠值(大部分在0.0~0.5)都低,说明工程区物种对环境资源利用的相似程度不高,种间竞争不强。原因可能是工程区处于植被恢复初期,人为控制因素导致趋向于独立占据一定资源,形成局部生长优势。根据工程区生态位及相似性结果,李子、马桑、鬼针草、风轮菜为目前北川震后山体工程植被中生态位较相似的优势种,种间竞争较激烈。人工经济种李子占据最大生态位,这与在自然区不协调,为增加木本植物物种多样性和与周边自然的协调性,建议工程区后期维护过程中增植自然区木本优势植物:如柏树(*P. orientalis*)、润楠(*G. biloba*)、棕榈(*T. fortune*)等。

## 4 结论及建议

土袋阶梯、干砌片石、钢铁框、挡土墙和生态排

水渠等多种林业治山技术实施后,石岩村地震滑坡山体表层整体稳定性得到了控制,降低了坡度,减缓了水土流失,促进了边坡植被恢复和坡地土地经济利用。本研究表明:(1)在物种上,工程区与自然区相比较,共有种和共有优势种较少,工程区与自然区协调性不够,要与自然相协调,还需要很长时间;(2)与自然区植被受各生境因子影响力较均衡不同,各生境因子对北川边坡恢复植被群落多样性有着不同程度的影响,在今后山体恢复过程中,物种选择还需因地制宜;(3)工程区优势种生态位相似性比例大部分处于低值区,优势种对环境资源利用性竞争不强,形成局部生长优势,生长不均衡;(4)工程区植被有一定的恢复且群落结构相对稳定,但后期农民改种植青脆李、核桃等经济树种,导致木本植物丰富度和多样性偏低,使周边自然与工程植被差异较大,影响了工程区植被群落构成和恢复。建议后期维护过程中减少人为干扰,增加自然区木本优势植物,待植被恢复到一定程度后再追求经济生产收入。

汶川地震到今年整整 10 年,北川边坡 2011 年植被恢复工程完工已有 7 年,灾区山体自然恢复缓慢,研究区为日本林业治山技术示范区,工程效果和生态恢复状况有必要长期跟踪调查评估,发现问题并不断总结经验。

**致　谢**　四川大学程婷婷、贾宏宏、唐彬童、王芝棋等参与样地调查工作,表示谢意。

**参考文献**

曹　梦, 潘　萍, 欧阳勋志, 等. 2018. 飞播马尾松林林下植被组成、多样性及其与环境因子的关系. 生态学杂志, **37**(1): 1-8.

付诗雨, 辜　彬. 2015. 震损山体边坡生态恢复的有效途径——以北川羌族自治县擂鼓镇石岩村山体边坡为例. 安徽农业科学, **43**(1): 204-208.

韩锦涛, 李素清, 赵德怀, 等. 2016. 晋西北丘陵风沙区人工植物群落优势种种间关系研究. 干旱区资源与环境, **30**(12): 164-169.

胡正华, 于明坚. 2005. 古田山青冈林优势种群生态位特征. 生态学杂志, **24**(10): 1159-1162.

简尊吉, 马凡强, 郭泉水, 等. 2017. 三峡水库峡谷地貌区消落带优势植物种群生态位. 生态学杂志, **36**(2): 328-334.

金艳强, 李　敬, 刘运通, 等. 2017. 围封对元江稀树灌草丛林下植被物种组成及生物量分配的影响. 生态学杂志, **36**(2): 343-348.

康永祥, 康博文, 岳军伟, 等. 2007. 陕北黄土高原辽东栎(*Quercus liaotungensis*)群落类型划分及其生态位特征. 生态学报, **27**(10): 4096-4105.

刘林馨. 2012. 小兴安岭森林生态系统植物多样性及生态服务功能价值研究(博士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.

罗　双, 孙海龙, 刘　冲, 等. 2011. 四川道路边坡自然恢复的植被多样性研究. 水土保持研究, **18**(6): 51-56.

刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 等. 2003. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. 植物生态学报, **27**(4): 496-502.

刘宏文, 程小琴, 康峰峰. 2014. 油松人工林林下植物群落变化及其环境解释. 生态学杂志, **33**(2): 290-295.

欧芷阳, 苏志尧, 袁铁象, 等. 2014. 土壤肥力及地形因子对桂西南喀斯特山地木本植物群落的影响. 生态学报, **34**(13): 3672-3681.

前堀辛彦. 1984. 植生にするのり面の保护. 土木技术, **39**(2): 85-93.

山村和也. 1994. のり面安定とその対策. 土木技术, **49**(2): 29-30.

山寺喜成. 1999. 21 世纪に向けた绿化技术. 基础工, **27**(5): 1.

武文娟, 辜　彬. 2016. 震后边坡植被多样性与土壤特性的相关性研究. 四川大学学报: 自然科学版, **53**(6): 1415-1422.

王根龙, 张军慧, 刘红帅. 2009. 汶川地震北川县城地质灾害调查与初步分析. 中国地质灾害与防治学报, **20**(3): 47-51.

鄢武先, 张黎明, 姜建军, 等. 2015. 日本治山技术在石漠化防治中的推广应用探讨. 四川林业科技, **36**(1): 65-68.

薛　鸥, 魏天兴, 朱金兆. 2016. 环境因子对北京低山区低效林林下植被物种组成和丰富度的影响. 生态学杂志, **35**(9): 2321-2328.

尤业明, 徐佳玉, 蔡道雄, 等. 2016. 广西凭祥不同年龄红椎林林下植物物种多样性及其环境解释. 生态学报, **36**(1): 164-172.

邹　蜜, 罗庆华, 辜　彬, 等. 2013. 生境因子对岩质边坡生态恢复过程中植被多样性的影响. 生态学杂志, **32**(1): 7-14.

张明霞, 王得祥, 康　冰, 等. 2015. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性. 林业科学, **51**(1): 12-21.

张天斌, 牛　赟, 敬文茂. 2015. 祁连山东段哈溪林区不同海拔青海云杉林下灌木和草本植物分布特征. 防护林科技, (7): 7-10.

张金屯. 2004. 数量生态学. 北京: 科学出版社.

周文嵩, 韩海荣, 康峰峰, 等. 2017. 山西太岳山华北落叶松人工林种内与种间关系. 生态学杂志, **36**(2): 335-342.

张昌顺, 谢高地, 包维楷, 等. 2012. 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. 生态学杂志, **31**(11): 2767-2774.

张德魁, 王继和, 马全林, 等. 2007. 古浪县北部荒漠植被主要植物种的生态位特征. 生态学杂志, **26**(4): 471-475.

Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, *et al*. 2015. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **17**: 2347-2376.

León CA, Martínez GO, Gaxiola A. 2018. Environmental controls of cryptogam composition and diversity in anthropogenic and natural peatland ecosystems of Chilean Patagonia. *Ecosystems*, **21**: 203-215.

Mohammadi MF, Jalali SG, Kooch Y, *et al*. 2015. The influence of landform on the understory plant community in a temperate beech forest in northern Iran. *Ecological Research*, **30**: 1-10.

Sattler T, Borcard D, Arlettaz R, *et al*. 2010. Spider, bee, and bird communities in cities are shaped by environmental control and high stochasticity. *Ecology*, **91**: 3343-3353.

**作者简介** 刘尧尧,女,1992 年生,硕士研究生,主要从事边坡生态修复研究。E-mail: 825989370@qq.com

**责任编辑** 张 敏