

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2016.11.039

# 震后边坡植被多样性与土壤特性的相关性研究

武文娟, 辜 彬

(四川大学生命科学学院, 成都 610064)

**摘要:** 通过对四川省北川县地震后生态恢复边坡的植物群落和土壤特性进行调查, 并与周边未受地震破坏的自然边坡进行对比, 记录了生态恢复边坡不同坡位样地的植物物种多样性和土壤特性因子, 利用 PCA 排序和相关分析, 研究了土壤特性与边坡植被物种多样性变化的相关关系。结果表明: 与自然边坡相比, 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; 震后边坡不同坡位的物种多样性和土壤特性差异较大, 整体呈现出坡下 > 坡中 > 坡上的特点; 相关分析表明, Margalef 丰富度指数与碱解氮、速效钾和细菌数量呈极显著相关, Shannon-Wiener 多样性指数与碱解氮、过氧化氢酶活性、细菌数量和放线菌数量呈显著相关; 主成分分析结果显示, 全钾含量、全磷含量、脲酶活性、蔗糖酶活性和真菌数量在北川土壤因子与物种多样性变化的协同作用中居于主导地位。

**关键词:** 生态恢复; 土壤特性; 物种多样性; 相关分析; PCA

**中图分类号:** Q143      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2016)06-1415-08

## The relationship between vegetation diversity and soil properties in earthquake slope

WU Wen-Juan, GU Bin

(College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In this article, an investigation on the plant species and soil properties were carried out on eco-restored slope in Beichuan County of Sichuan Province, Southwest China, comparing with the natural slope which is not damaged by the earthquake. The results showed that the plant species diversity and soil properties factors on different slope position were recorded, the principal component analysis and correlation analysis was adopted to study the connection of soil properties factors and the vegetation species diversity. It was found that species diversity and soil properties earthquake slope were drastically reduced comparing to the non-damaged slope regardless of the slope positions. It was also found that the variations of soil diversity and soil properties between different slope positions were much increased. In general, the difference of the bottom slope was larger than the middle slope, and the difference of the middle slope was larger than the top slope. The data showed that the Margalef richness index had a close correlations with the local nitrogen, potassium and bacterial counts. Moreover, the Shannon-Wiener diversity index had much close relationships with the local nitrogen, catalase activity, bacteria and actinomycetes counts. Finally, our principal component analysis showed that the total potassium contents, the total phosphorus contents, the urease activity, the sucrose activity and the fungi counts were the most important factors in the coaction of species diversity and soil properties.

收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971057)

作者简介: 武文娟(1990-), 女, 山西平遥人, 硕士研究生, 研究方向为边坡土壤恢复生态学. E-mail: xiaodaodanw@126.com.

通讯作者: 辜彬. E-mail: amakusa@126.com.

**Keywords:** Ecological restoration; Soil properties; Species diversity; Correlation analysis; Principal component analysis

## 1 引言

2008年5月12日14时,四川省汶川县映秀镇发生了8.0级强烈地震,造成了边坡山体大规模崩塌和大小滑坡<sup>[1]</sup>.地震发生后,大面积坡体破裂和裸露,边坡植被和土壤都被大面积破坏<sup>[2,3]</sup>,山体应力状态改变,边坡因失去植被保护而生态系统变得极不稳定,极易引发水土流失.为了治理这种极度破坏的生态环境,防止泥石流、水土流失等次生灾害的发生,必须人为主导地进行边坡生态系统的重建与恢复<sup>[4]</sup>.

植被重建与土壤修复是极度退化边坡重建的第一步<sup>[5]</sup>,植被恢复的过程实质上是植被——土壤生态系统相互交互作用的过程<sup>[6]</sup>,退化边坡植被——土壤生态系统的恢复总是朝向生态多样性的方向构建,而其关键则是物种多样性的构建<sup>[5]</sup>.物种多样性的变化可反映群落组成和结构的变化,它受土壤环境因素的强烈影响,土壤特性影响物种多样性的空间分布格局,同时反过来物种多样性在不同尺度上影响土壤性质<sup>[7-9]</sup>.因此,研究震后边坡生态恢复过程中土壤特性与植物物种多样性的变化关系具有重要意义.

近年来,多项研究表明<sup>[10-16]</sup>,汶川边坡在生态恢复过程中,其植物物种多样性、土壤养分、土壤结构和土壤物理性质都有明显改善,然而对汶川震后边坡植物物种多样性和土壤特性相互变化的作用关系尚不明确.本文以四川省北川震后边坡的植物物种多样性和土壤特性为研究对象,采用相关分析和主成分分析相结合的方法,拟了解震后边坡物种多样性及土壤特性的空间分布规律,探讨其间相互关系,揭示地震退化边坡恢复机理,以期为治山和植被恢复生态工程及应用技术开发奠定科学基础.

## 2 研究地区和研究方法

### 2.1 研究区概况

研究区位于四川省西北部(103°44′-104°42′E, 31°14′-32°14′N),隶属于绵阳市.土壤质地为山地黄壤,粗骨性强,养分含量虽高,但土壤物理性状不良,砾石较多.本试验选择的北川县擂鼓镇石岩村,属于山间河谷地貌,海拔700-1500m,雨量充沛,全年平均降水量1002.7mm<sup>[3]</sup>,处于龙门山断裂带中

央的地震高烈度带,耕地破碎度较高,灾情较重<sup>[1]</sup>.

试验选择的研究样地如图1,研究对象在受地震扰动时,上方大面积山体垮塌滑动,大量残坡积碎石土向坡体中下部移动堆积,形成全新坡体.2010年,地震灾后综合治理和植被恢复工作全面展开,前期引进了日本林业治山技术,进行土袋阶梯工程、竹栅栏工程、铁丝笼挡土墙工程和排水沟工程,灌溉渠系系统等工程措施治理山体;中期主要根据当地居民经济和乡土树种的要求采用植树造林,点播核桃、枇杷、樱花、酸枣等树种,撒播黑麦草等草种生物措施进行恢复植被;后期根据植被恢复效果补植了刺槐和核桃,并覆盖草席以更好地为植物提供良好的生长环境,经过5年的灾后治理,坡体稳定性提高,植被恢复进程明显快于自然恢复坡体.

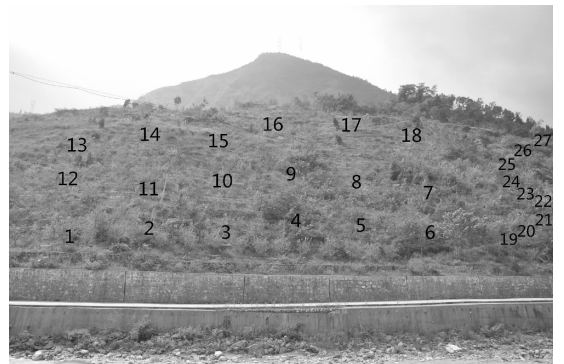


图1 北川边坡样地设置与布局

Fig. 1 Distribution and settings of sample plots in Beichuan slope

### 2.2 方法

2.2.1 植被调查与土样采集 2015年4月初,我们对北川震后边坡进行土样采集和植被种类调查.边坡采用S型机械布点,如图1所标,将震后边坡从上到下分为坡上、坡中、坡下三段,每个段位选取6个样地(其中坡下为1~6号样地,坡中为7~12号样地,坡上为13~18号样地),同时将临近未被地震破坏边坡作为对照样地(坡下为19~21号,坡中为22~24号,坡上为25~27号),称为自然边坡,共27个样地.土壤样品采集时,在选取的样地内分别按W型布局设5个样点,去除地表枯枝落叶,在0~20cm层深度进行采样,剔除石砾等杂物,然后将所取的多样点土样混合装袋,每个样方

内取样重量为1kg左右带回于4℃保存.群落植被调查时,植被乔木层样地样方采用10m×10m,灌木层样地样方采用5m×5m,草本层样地样方采用1m×1m,记录样方内出现的植物种类、数量和高度.

**2.2.2 土壤分析方法** 根据国标方法进行土壤各个特性测定<sup>[17]</sup>:采用稀释平板法测定土壤微生物组成区系:细菌数量(Bac)、真菌数量(Fun)和放线菌数量(Act);采用外加热法测定土壤有机质(TOM);采用半微量凯氏定氮法测定全氮(TN);采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定全磷(TP);采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法测定全钾(TK);采用碱解扩散法测定碱解氮(RaN);采用碳酸氢钠法测定速效磷(EP);采用1mol·L<sup>-1</sup>NH<sub>4</sub>Ac浸提,原子吸收法测定速效钾(RaK);采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性(Cat);采用苯酚—次氯酸钠比色法测定脲酶活性(Ure);采用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶活性Pho;采用二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性(Suc).

**2.2.3 数据处理与分析** Margalef丰富度指数,Shannon-Weiner多样性指数和Pielou均匀度指数<sup>[18]</sup>,计算公式如下:

Margalef丰富度指数: $R=(s-1)/\ln(n)$

Shannon-Wiener多样性指数: $H=-\sum(P_i \ln P_i)$  ( $i=1,2,\dots,s$ )

Pielou均匀度指数: $E=H/\ln(s)$

式中: $s$ ——群落中的总物种数; $n$ ——群落中全部种的总个体数; $n_i$ ——各物种的个体数; $P_i=n_i/n$

数据经Excel2010整理后,采用SPSS18.0软件对数据进行描述性统计分析、相关性分析,变量间的相关系数采用Pearson相关统计方法进行,采用CANOCO5.0软件对数据进行主成分分析(PCA).

## 3 结果与分析

### 3.1 边坡群落的物种组成

本次对北川震后边坡27个样方的调查中,共发现了33个物种.在进行震后边坡重建时,草本人工引导种主要为黑麦草和苕种,木本引导种主要为刺槐、樱花、胡桃和辐射松.在27个样地里,草本植物共23种,灌丛和木本植物10种.植物科属成分多样化,以菊科、蔷薇科、禾本科、豆科居多,其中蔷薇科有5种,占总数的18.6%,菊科有8种,占总数的15.2%,禾本科和豆科各有3种,分别占总数的6.2%和5.0%,其余植物都为单种科.

的6.2%和5.0%,其余植物都为单种科.

### 3.2 边坡群落的物种多样性

边坡群落的物种多样性在一定程度上能够反映植被恢复的程度<sup>[19]</sup>,它与群落中物种丰富度和均匀度有关.图2、图3和图4分别为北川边坡植被Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数的变化曲线图,综合上图可看出北川震后边坡各物种多样性指数值均比未受地震边坡小,表明经重建修复后的北川生态恢复边坡在复绿工作上取得了一定效果,但要想达到震前自然状态仍需要更长时间.

通过对边坡27个样地物种多样性变化的分析,我们发现震后边坡不同坡位的物种多样性指数存在一定的差异(图2—图4),从下坡、中坡到上坡,Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数都呈现出下降的趋势.综合图2和图3可看出,植被的Margalef指数与Shannon-Wiener指数间的变化趋势基本一致,其中4、7、9号样地的指数值较大,8、16、17号样地的指数值较小,18号样地无木本植物;草本层的Margalef指数与Shannon-Wiener指数值高于木本层,表明经过修复的震后边坡整体群落结构单调且不富于变化.从图4可看出,震后边坡Pielou均匀度指数波动范围较小,草本层85%的Pielou指数值集中在0.705-0.891间,木本层集中在0.533-0.764间,13号样地的指数值达到了最大.综合图2和图4可看出,植被的Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀度指数间的变化趋势存在较大差异,表明经震后重建修复的边坡上、中、下坡面的植被生长状况不一,植被分布不均匀.

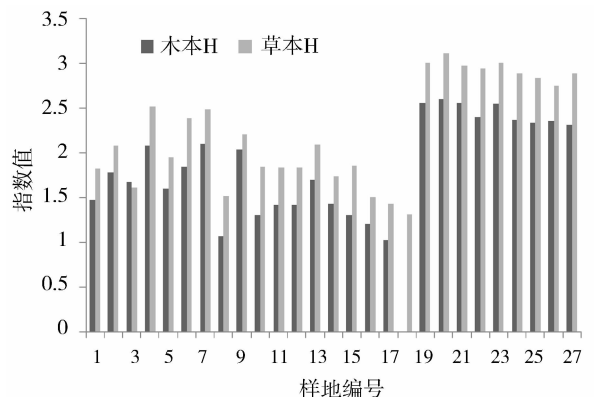


图2 北川边坡植被Shannon-Wiener多样性指数的变化  
Fig. 2 Variation of vegetation Shannon-Wiener index in different slopes of the BeiChuan county

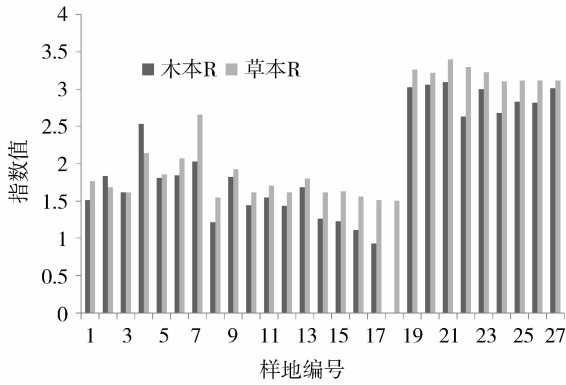


图 3 北川边坡植被 Margalef 丰富度指数的变化  
Fig. 3 Variation of vegetation Margalef index in different slopes of the BeiChuan county

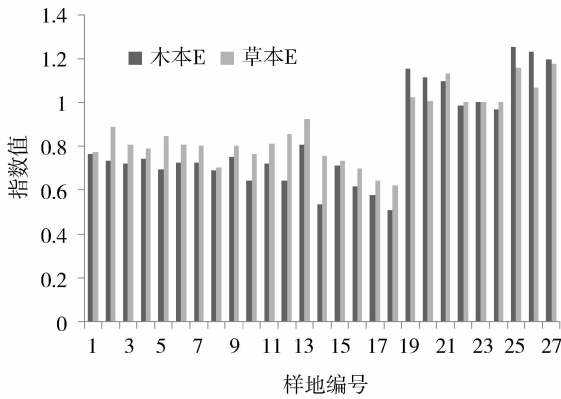


图 4 北川边坡植被 Pielou 均匀度指数的变化  
Fig. 4 Variation of vegetation Pielou index in different slopes of the BeiChuan county

### 3.3 边坡土壤特性

边坡的土壤是植物生长的基础,由表 1 可以看出,与未受地震破坏的自然边坡相比,震后边坡不同坡位的土壤理化性质、土壤酶活性和土壤微生物组成都有不同程度的降低,且从坡顶到坡底呈现出下降的趋势。

由表 2 的进一步分析表明,北川边坡土壤各特性的变异系数(C. V)有 70%集中在 0.27-0.39 范围内,整体变异系数并不大,其中全磷含量变异系数最大,达到了 2.54,全钾含量的变异系数最低,为 0.27。一般情况下,变异系数的大小可在一定程度上反映各特性参数的空间变异程度,当 C. V>1.0 为强变异性,当 0.1<C. V<1.0 为中等变异,C. V<0.1 为弱变异性<sup>[20]</sup>。从表 2 中的统计结果来看,除全磷含量为强变异程度外,其他土壤特性均呈现出中等变异,反映了北川边坡土壤各土壤特性空间分布不均匀。

### 3.4 边坡物种多样性与土壤特性间关系

通过 SPSS18.0 对数据的分析表明北川边坡植物物种多样性与土壤特性间有着密切的相关性,其 Pearson 相关系数见表 3。从表 3 可知,碱解氮含量和速效钾含量与草本层 Margalef 丰富度指数均呈极显著强正相关,细菌数量和酸性磷酸酶活性分别与草本层 Margalef 丰富度指数呈显著正相关;

表 1 北川边坡土壤特性的变化

Tab. 1 Variation of soil properties in BeiChuan slope

	震后边坡			自然边坡		
	坡下	坡中	坡上	坡下	坡中	坡上
TOM(g · kg <sup>-1</sup> )	33.62±6.87	28.94±5.64	20.95±6.48	115.36±4.99	111.34±1.82	110.90±2.75
TN(g · kg <sup>-1</sup> )	0.57±0.25	0.71±0.18	0.43±0.18	3.27±0.05	3.06±0.08	3.03±0.14
RaN(mg · kg <sup>-1</sup> )	45.59±10.11	51.18±30.85	31.66±9.28	231.67±0.28	231.86±0.93	231.75±0.76
TP(g · kg <sup>-1</sup> )	0.29±0.06	0.23±0.04	0.20±0.06	0.40±0.01	0.45±0.03	0.39±0.01
EP(mg · kg <sup>-1</sup> )	0.68±0.16	0.49±0.10	0.42±0.07	3.52±0.03	3.48±0.02	3.44±0.01
TK(g · kg <sup>-1</sup> )	0.27±0.52	0.21±0.05	0.18±0.05	0.52±0.03	0.48±0.03	0.47±0.02
RaK(mg · kg <sup>-1</sup> )	64.24±8.95	63.80±36.31	47.46±12.00	204.61±0.19	195.69±0.64	195.29±0.17
Bac(×10 <sup>4</sup> g <sup>-1</sup> )	218.07±8.97	140.82±35.07	94.02±11.84	485.01±4.44	497.44±3.84	453.56±1.74
Fun(×10 <sup>4</sup> g <sup>-1</sup> )	15.90±2.55	7.87±1.73	3.26±1.15	52.75±0.68	50.50±0.35	40.55±0.75
Act(×10 <sup>4</sup> g <sup>-1</sup> )	6.73±1.71	3.21±0.69	2.53±0.73	16.29±0.99	15.66±0.33	14.82±0.40
Suc(mg · g <sup>-1</sup> )	0.56±0.19	0.66±0.33	0.41±0.07	1.76±0.03	1.71±0.02	1.73±0.04
Pho(mg · g <sup>-1</sup> )	1.64±0.34	1.52±0.61	2.08±0.69	4.16±0.02	4.10±0.03	4.08±0.03
Ure(mg · g <sup>-1</sup> )	0.63±0.14	0.51±0.14	0.35±0.11	1.76±0.04	1.70±0.01	1.64±0.04
Cat(mL · g <sup>-1</sup> )	1.40±0.39	1.11±0.43	0.92±0.25	4.62±0.04	4.40±0.02	4.45±0.06

平均值±标准误, n=6.

表 2 北川边坡土壤特性描述统计性特征

Tab. 2 Statistical characteristic of soil properties in BeiChuan slope

	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
TOM( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	9.55	44.82	27.83	8.04	0.29
TN( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.17	1.01	0.57	0.22	0.39
RaN( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	19.96	113.42	42.81	20.17	0.47
TP( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.14	0.38	0.24	0.61	2.54
EP( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.31	0.91	0.53	0.16	0.30
TK( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.11	0.35	0.22	0.06	0.27
RaK( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	30.22	131.72	58.50	22.76	0.39
Bac( $\times 10^4 \text{g}^{-1}$ )	81.23	232.59	150.97	56.54	0.37
Fun( $\times 10^4 \text{g}^{-1}$ )	2.09	19.31	9.01	5.66	0.63
Act( $\times 10^4 \text{g}^{-1}$ )	2.02	9.42	4.16	2.18	0.52
Suc( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.32	1.31	0.54	0.23	0.43
Pho( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	1.09	3.03	1.75	0.59	0.34
Ure( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.21	0.78	0.49	0.17	0.35
Cat( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.63	1.98	1.14	0.40	0.35

细菌数量、放线菌数量、碱解氮含量和过氧化氢酶活性分别与草本层 Shannon-Weiner 多样性指数呈显著正相关、显著正相关、显著正相关和极显著正相关。以上结果表明,北川边坡土壤特性中的细菌数量、碱解氮含量、速效钾含量和酸性磷酸酶活性均对草本植物物种的数量有影响,而细菌数量、放线菌数量、碱解氮含量和过氧化氢酶活性对边坡草本植物群落多样性的影响较大。

从表 3 中的相关系数来看,细菌数量、放线菌数量和过氧化氢酶活性与木本层 Margalef 丰富度指数呈极显著正相关,真菌数量、有机质含量、碱解氮含

量和有效磷含量与木本层 Margalef 丰富度指数呈显著正相关;细菌数量、放线菌数量、碱解氮和过氧化氢酶活性分别与木本层 Shannon-Weiner 多样性指数呈显著正相关;细菌数量与木本层 Pielou 均匀度指数呈极显著正相关。以上结果表明,细菌数量、放线菌数量、真菌数量、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量和过氧化氢酶活性等土壤特性均对北川边坡木本植物的数量有影响,边坡的细菌数量、放线菌数量、碱解氮和过氧化氢酶活性等土壤特性对木本植物群落的多样性存在较大影响,而木本植物植物分配的均匀程度则主要由细菌数量影响。

表 3 北川边坡土壤特性与物种多样性的相关分析

Tab. 3 Correlation analyses between soil properties and species diversity in Beichuan slope

	Pielou 指数		Shannon-Weiner 指数		Margalef 指数	
	草本层	木本层	草本层	木本层	草本层	木本层
TOM	0.285	0.197	0.4	0.364	0.296	0.531 *
TN	0.129	0.152	0.395	0.349	0.406	0.369
RaN	0.137	0.22	0.533 *	0.489 *	0.799 * *	0.481 *
TP	-0.095	0.122	-0.141	-0.108	-0.09	0.015
EP	0.313	0.449	0.338	0.324	0.127	0.477 *
TK	-0.151	0.14	-0.246	-0.175	-0.177	-0.052
RaK	0.117	0.211	0.465	0.426	0.746 * *	0.355
Bac	0.453	0.529 *	0.552 *	0.572 *	0.556 *	0.636 * *
Fun	0.376	0.466	0.333	0.375	0.309	0.477 *
Act	0.34	0.396	0.568 *	0.487 *	0.46	0.626 * *
Suc	0.103	0.11	0.29	0.103	0.154	0.196
Pho	0.178	0.092	0.405	0.252	0.470 *	0.169
Ure	0.299	0.093	0.259	0.217	0.18	0.307
Cat	0.342	0.423	0.596 * *	0.567 *	0.436	0.632 * *

\* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

### 3.5 主成分分析

北川边坡植物所需养分是一个积累与消耗的动态过程,植物物种多样性与土壤特性间有密切的

相关关系(表 3)表明两者之间不仅存在着简单、直接的关系,更重要的是通过各土壤特性因素共同融合来影响物种多样性的,故不仅要对各土壤影响因

素进行单因子分析,同时还需进行多因子分析.

利用 CANOCO5.0 对北川边坡土壤特性的原始变量数据进行主成分分析,结果表明第一主成分(PC1)的方差贡献率为 73.46%,第二主成分(PC2)方差贡献率为 11.52%,两者累积方差贡献率为 84.98%,因此前两个主成分可基本反应土壤特性因子系统的变异信息(表 4).

从各因素在主成分中的载荷量来看(表 4),第一主成分中的土壤因子指标以全钾的载荷最大(0.9690),全磷含量、脲酶活性、蔗糖酶活性和酸性磷酸酶活性次之,载荷分别为(0.9655、0.9329、0.9017和 0.8198),说明它们可决定 PC1 坐标轴的正方向,即第一排序轴正方向主要反映了土壤酶活性和土壤养分因子的变化趋势;同时,真菌数量、细菌数量和碱解氮含量对植物物种多样性的影响也占有较高地位,但它们与第一排序轴成较强负相关.从第二主成分的载荷量来看,其与土壤因子中的全氮、速效钾和碱解氮含量成较强负相关,与细

菌数量和真菌数量呈较强正相关,表明第二排序轴的正方向主要反映了土壤微生物区系组成的变化趋势,负方向主要反映了有效养分因子的变化趋势.

应用主成分分析在 PC1 和 PC2 轴的排序来看(图 5),北川边坡的 27 个样地在 PC 轴上表现出了很好的分离,可据坐标轴的象限将其分开.自然边坡的采样地都分布在第三象限内,且集中于第一排序轴附近,表明自然边坡的物种多样性主要受真菌数量和碱解氮含量的影响;震后边坡坡下样地大多分布在集中于第二排序轴的第二象限内,表明坡下样地物种多样性主要受土壤中微生物组成区系的影响;震后边坡坡上样地分布于第四象限内,坡中样地大多分布于第一象限内,但它们均位于图的右侧,且大多数样地分布靠近第一排序轴,故震后边坡的坡中、坡上样地影响机制较相似,其物种多样性主要受土壤酶活性和土壤养分因子的影响,且其对坡上样地的影响更为显著.

表 4 主成分载荷量

Tab. 4 Loadings of component

	PC1	PC2	PC3	PC4
TOM	-0.705	-0.2111	-0.5614	-0.1018
TN	0.3796	-0.5394	-0.5468	0.2271
RaN	-0.8437	-0.4266	0.2371	0.1886
TP	0.9655	0.1914	0.1282	0.026
EP	0.0152	-0.2861	-0.4779	0.3236
TK	0.969	0.1815	0.1081	0.0362
RaK	-0.6081	-0.4707	0.4511	-0.2465
Bac	-0.7783	0.4291	0.1058	-0.289
Fun	-0.8964	0.4205	0.0117	0.1004
Act	-0.735	0.3327	0.0832	-0.319
Suc	0.9017	0.0525	-0.0743	0.3282
Pho	0.8198	-0.3462	0.0668	-0.2037
Ure	0.9329	0.1915	0.0154	0.0309
Cat	0.3607	-0.3414	-0.5399	-0.2885
贡献率%	73.46	11.52	5.26	2.93
累积贡献率%	73.46	84.98	90.24	93.17

## 4 讨论

北川震后边坡相较于自然边坡,其物种多样性和土壤特性值都显著降低,表明边坡在重建演进过程中虽正在恢复,但作用力还不够.这是由于坡体经过地震和人工修复时的工程扰动后,其植被和土壤受到巨大破坏<sup>[2,3]</sup>;而自然边坡林龄长,地表积累的枯枝落叶厚,既可为边坡植物生长提供更多的养分,也可缓冲外界压力对土壤的直接破坏<sup>[21]</sup>,故

如此经过多年良性循环必然会使北川自然边坡物种多样性和土壤特性值高于震后边坡.

在边坡植被和土壤演变规律的研究中,人们发现植被恢复是边坡重建修复的关键因素<sup>[22]</sup>.近年的研究中,一般都用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数来表征边坡的物种多样性<sup>[10,16,19]</sup>.植被和土壤在不同尺度上存在关联,本文通过分析北川边坡植被物种多样性分布梯度变化与土壤特性的相关性(表 3),发

现 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数分别与多个土壤特性因子有较好的耦合,但 Pielou 均匀度指数变化除了与细菌数量显著正相关外,与其他土壤特性均无显著关系,这与已有的研究相一致<sup>[23]</sup>. 对北川边坡 Pielou 均匀度指数变化的研究也表明,其指数值波动范围较小(图 4),这与北川震后边坡在生态恢复过程中,坡面大多采用相同的植物引种,边坡不同条件下植物分布的均匀性差异较小有关.

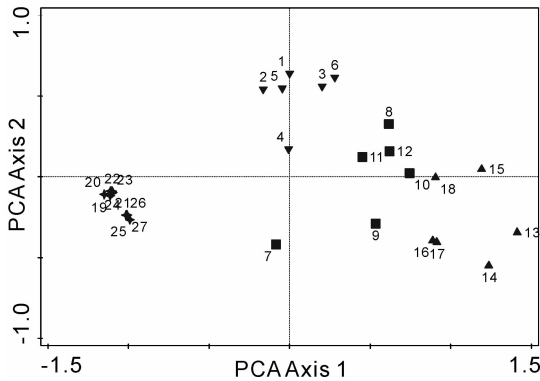


图 5 北川 27 个样地的 PCA 二维排序图

Fig. 5 Two-dimensional principal component analysis ordination of 27 sample plots in Beichuan slope

本文通过对北川震后边坡物种多样性和土壤特性的研究表明(图 2、图 3、图 4 和表 1),坡位对物种多样性和土壤特性变化的影响显著,且它们都有类似规律,即从坡顶到坡底,各物种多样性和土壤特性值呈现增大趋势. 一方面,北川地区降雨量丰富,集中的降雨使得边坡上部的细粒径颗粒物随雨水径流流向坡底,加之地震造成边坡越靠近坡底粗粒径颗粒含量越高,粗粒径颗粒阻截的土壤细粒径颗粒物质也会越多,由此造成越靠近坡底部,土壤的粗细颗粒填充和堆积效果越好,因而对外界的抗击强度也越强<sup>[14]</sup>,更利于植物的发育和土壤的修复;另一方面,震后边坡集中的降雨会使得边坡表层枯枝落叶易随斜坡朝坡底流失,造成越靠近坡底部分,地表枯枝落叶层越厚,土壤养分越不易流失,更有利于土壤养分的积累<sup>[21,24]</sup>,因此更利于植物生长,故北川震后边坡枯枝落叶数量相对较高的坡底部,植物物种多样性和土壤特性值更高;此外,北川震后边坡坡上地带存在下陷小地形,更易聚积降水,会进一步造成坡面土体软化和土壤间粘结力减小,不利于其对于外界侵蚀的抵抗. 这些因素的综合作用造成了北川震后边坡不同坡位的物

种多样性和土壤特性呈现坡下>坡中>坡上的规律,因此,今后在该区震后边坡生态恢复时,上坡部位应多种植耐瘠薄的植物.

本研究中,北川边坡大部分物种多样性和土壤特性变化呈现上述所说规律,但也有部分例外,土壤特性中全氮含量、碱解氮含量和蔗糖酶活性呈现出了坡中>坡下的趋势,酸性磷酸酶活性呈现出了坡上>坡下>坡中的趋势,这可能是由于北川震后边坡大部分经济作物分布于坡上部,坡上人为活动频繁,施肥较多造成的. 与自然边坡相比,北川震后边坡钾含量的降幅最显著,这是由于北川降雨量充沛,更易造成有效性钾离子的淋失而致.

本研究中,北川震后边坡土壤微生物类群组成呈现细菌>真菌>放线菌的特点,与未受地震破坏的自然边坡土壤微生物类群组成情况相似,表明震后边坡土壤在经过五年重塑后,已经形成与自然边坡的类似微生物格局,并具有发展成为自然边坡微生物特性的潜质. 微生物类群数量真菌>放线菌,是由于北川地区降雨量充沛,湿润的土壤更有利于真菌的生长,且土壤呈现酸性<sup>[2]</sup>,真菌有相当复杂的酶系统,其生长要求最适宜的 pH 恰好为偏酸性造成的<sup>[25]</sup>. 同时,放线菌数量最少也从另一个侧面反应出北川边坡土壤经五年重建修复后已有很大改善,因为放线菌主要参与难分解物质组分的分解,形成腐殖质,放线菌数量最少则某种程度上也意味着该样地土壤结构佳、容易腐烂分解.

边坡物种组成的差异可由坡体本身资源的可用性决定<sup>[7]</sup>. 北川边坡在震后植被恢复时,基本采用相同的植物引导种,故导致边坡物种多样性差别的原因主要为边坡自身的可利用资源,如土壤、水分条件等. 物种多样性作为边坡植被群落演替的重要特征之一,受众多土壤因子的影响. 本文对北川边坡各土壤特性因子主成分分析的结果显示,不同坡位物种多样性受不同的土壤因子所影响,在震后边坡的坡中和坡上样地,土壤酶活性和土壤养分因子为在生态恢复中对边坡植被物种多样性影响最大的因子,而坡下样地则主要受土壤微生物区系组成的影响. 因此今后在该区震后边坡生态恢复时,除考虑经济等因素外,还应在一般边坡植被恢复工程技术方法的基础上,针对边坡不同坡位的影响因子采取更恰当方式进行修复,上坡和中坡部位应多注重提高土壤酶活性和土壤养分,控制土壤肥料的供给与循环,下坡部位则应多注重提高土壤微生物区系组成,可考虑添加土壤微生物改良剂等.

## 5 结 语

通过对北川边坡 27 个样地的物种多样性和土壤特性的分析发现,在北川震后边坡的生态恢复中,坡位对边坡物种多样性和土壤特性的变化影响显著,呈现坡下>坡中>坡上趋势;Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数是边坡植物物种多样性变化的主要指示因子,它们与多个土壤特性因子间存在明显的相关关系,而 Pielou 均匀度指数与大多数土壤特性因子无显著关系;在北川边坡的各土壤因子中,全钾含量、全磷含量、脲酶活性、蔗糖酶活性、酸性磷酸酶活性、真菌数量和碱解氮含量在其与物种多样性变化的协同作用中居于主导地位.可见,在进行退化边坡生态恢复前,调查、分析边坡的生境条件是十分必要的.今后在北川震后边坡生态恢复时,还应根据边坡不同坡位生境的特性,采取不同的重建修复措施.

震后边坡的生态恢复是一个漫长的过程,因此,还需要增加边坡研究数量,进行长期、周期性的调查,深入研究植被多样性与土壤相互作用的关系,揭示地震退化边坡恢复机理,促使震后边坡更快地进行生态恢复.

### 参考文献:

- [1] 徐新良, 江东, 庄大方, 等. 汶川地震灾害核心区生态环境影响评估[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5899.
- [2] 吴聪, 王金牛, 卢涛, 等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(6): 911.
- [3] 梁超, 赵廷宁, 史常青, 等. 基于 NDVI 的汶川大地震前后北川县次生地质灾害区植被破坏评估[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(04): 86.
- [4] Wang Z Q, Wu L H, Liu T T. Revegetation of steep rocky slopes: Planting climbing vegetation species in artificially drilled holes[J]. Ecological Engineering, 2009(35): 1079.
- [5] 王伯荪, 彭少麟. 植被生态学—群落与生态系统[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 197.
- [6] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, *et al.* Relationships between woody plants and environmental factors in karst mixed evergreen-deciduous broadleaf forest, southwest China[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012(1): 890.
- [7] Bakhtiar F, Ali R I. Effect of some environmental factors on plant species diversity in the mountainous grasslands[J]. International Journal of Natural Resources and Marine Sciences, 2011(1): 45.
- [8] 冶民生, 关文彬, 谭辉, 等. 岷江干旱河谷灌丛  $\alpha$  多样性分析[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1123.
- [9] Wu G T, Wu M, Yu M K, *et al.* Palnt distribution in relation to soil conditions in Hangzhou Bay Coastal Wetlands, China[J]. Pakistan Journal of Botany, 2011(43): 2331.
- [10] 李丹雄, 杨建英, 史常青, 等. 汶川地震滑坡迹地植被恢复中优势种的种间关联性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5): 938.
- [11] 张广帅, 林勇明, 马瑞丰, 等. 汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性[J]. 环境科学, 2015, 36(02): 669.
- [12] Cheng S, Yang G, Yu H, *et al.* Impacts of Wenchuan earthquake-induced landslides on soil physical properties and tree growth[J]. Ecological Indicators, 2012, 15(1): 263.
- [13] 赵旦, 张森, 于名召, 等. 汶川地震灾后农田和森林植被恢复遥感监测[J]. 遥感学报, 2014, 18(04): 958.
- [14] 王俭成, 杨建英, 史常青, 等. 北川地区典型林分土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(01): 71.
- [15] 秦纪洪, 武艳镗, 孙辉, 等. 彭州市龙门山不同地震裸地次生演替初期土壤酶活性研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(03): 55.
- [16] 武艳镗, 秦纪洪, 孙辉, 等. 彭州市龙门山震后迹地植物群落生态恢复初探[J]. 水土保持研究, 2012, 19(03): 140.
- [17] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 146.
- [18] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 78.
- [19] Zhang C S, Xie G D, Fan S H, *et al.* Variation in vegetation structure and soil properties, and the relation between understory plants and environmental variables under different Phyllostachys pubescens forests in southeastern China [J]. Environmental Management, 2010(45): 779.
- [20] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 5978.
- [21] Oztas T, Koc A, Comakli B. Changes in vegetation and soil properties along a slope on overgrazed and eroded rangelands [J]. Journal of Arid Environments, 2003(55): 93.
- [22] Bradshaw A. Restoration of mined lands using natural processes[J]. Ecological Engineering, 1997(8): 255.
- [23] Zhang J T, Dong Y R. Factors affecting species diversity of plant communities and the restoration process in the loess area of China[J]. Ecological Engineering, 2010(36): 345.
- [24] 秦松, 樊燕, 刘洪斌, 等. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 47.
- [25] 赵聪, 李勇, 杨红军. 缙云山森林次生演替群落土壤微生物、酶活性和养分的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(04): 46.