

DOI: 10.5846/stxb201505060936

孙丽文, 史常青, 李丹雄, 赵廷宁. 汶川地震滑坡迹地植物群落与环境的关系. 生态学报, 2016, 36(21): - .

Sun L W, Shi C Q, Li D X, Zhao T N. Relationship between plant communities and environment after landslide of Wenchuan Earthquake. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): - .

汶川地震滑坡迹地植物群落与环境的关系

孙丽文¹, 史常青^{1,*}, 李丹雄², 赵廷宁¹

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, 北京 100083

2 北京林丰源生态环境规划设计院有限公司, 北京 100083

摘要:为了加快汶川地震滑坡迹地人工恢复植被的进程,探讨地震诱发的滑坡迹地植物群落与环境的关系。在 5·12 地震重灾区北川境内选取 29 个样地进行植被调查,采用 10 个环境指标刻画植物群落的地形、空间位置和土壤养分特征;利用 TWINSpan、CCA、DCA 和 DCCA,分析植物种、植物群落和植物生活型与环境的关系。结果显示:1)研究区的植物群落可划分为 9 个类型。2)研究区环境变量对植物种的解释量为 21.96%,第一排序轴与 pH 值、海拔、土壤质地相关,反映的是植物种从次生植物群落向原生植物群落变化。通过 DCCA 分析得出,环境变量对植物群落的排序解释了 25.7%,第一排序轴与 pH 值、海拔、土壤质地的相关较强,反映植物群落按照耐旱、耐贫瘠→人工或先锋植物→未受损的植被变化;第二排序轴与土壤有机质、全氮含量、坡向的相关,反映的是植物群落从草本植物→乔灌木或者灌木植物变化。3)滑坡迹地的植物群落与未受损林地的植物群落物种存在较大差异。

关键词:汶川地震;植物群落;环境变量;降趋势典范对应分析(DCCA)

Relationship between plant communities and environment after landslide of Wenchuan Earthquake

SUN Liwen¹, SHI Changqing^{1,*}, LI Danxiong², ZHAO Tingning¹

1 Key Lab of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forest University, Beijing 100083, China

2 Beijing Greensource Environment Programmin Design Institute Ltd. Beijing 100083, China

Abstract: To shorten the process of vegetation restoration on the landslide sites of Wenchuan Earthquake, this study explored the relationship between plant communities and environmental factors. A total of 29 sample plots in Beichuan, the area of earthquake that occurred on May 12, 2008, were selected to conduct vegetation investigation, adopting 10 environmental indicators that describe the terrain, location, and soil nutrient characteristics of plant communities. Two-way indicator species analysis, canonical correspondence analysis, de-trended correspondence analysis, and de-trended canonical correspondence analysis were used to analyze plant species, plant communities, and plant life styles. The results showed the following: 1) Plant communities within the study area were classified into nine types. 2) The first two axes representing plant species explained 21.96% of the environmental factors; Axis 1 was related to pH, altitude, and soil texture, indicating the transformation from the secondary plant community to the primary plant community. By using de-trended canonical correspondence analysis, the environmental variables explained 25.7% of the ordination plant community, and Axis 1 showed a strong correlation with pH, altitude, and soil texture, demonstrating that plant community composition varied from drought and barren resistant plants to artificial or pioneer plants and to intact vegetation. Axis 2 correlated with soil organic matter, total nitrogen content, and slope direction, illustrating the change in plant communities from herbaceous

基金项目:国家林业公益行业科研专项(201104109)

收稿日期:2015-05-06; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: seqbj@163.com

plant community to tree-shrub-grass or shrub-grass type of vegetation. 3) Plant community composition on the landslide sites was significantly different from that of intact forest sites.

Key Words: wenchuan earthquake; plant communities; environmental variables; downward trend canonical correspondence analysis

5·12 汶川地震引发了大面积滑坡^[1],大量的森林植被遭到破坏,森林受损面积达 87.94 km²^[2]。震后,国家及地方政府紧急开启了一系列的植被恢复工程,促进滑坡等次生灾害迹地的植被恢复,以减少水土流失及滑坡的再次发生^[3-4]。四川地区的雨水较多,一般来说自然恢复植被较为可行,但是自然恢复植被所需时间较长^[5]。在恢复过程中还要经历诸如滑坡、崩塌、泥石流等次生灾害的不断扰动^[6],加剧了自然恢复的难度,也加重了水土流失^[7-8]。因此,采用必要的人工措施恢复灾害迹地植被迫在眉睫。

植物群落与环境因子之间存在紧密的关系。通过研究不同环境条件下的植物群落特征,能够给植被恢复工作提供有用的参考价值。从区域尺度上看,水热条件主导了区域的植物种、植物生活型或植被类型分布;而景观及更小的尺度格局是由环境因子和生物因素共同驱动的。土壤养分是影响植物群落组成和群落动态的关键因素,由于土壤养分会制约生态系统的演替,种间对土壤养分吸收利用能力差异也是引起物种更替和群落变化的原因^[9-10]。刘瑞雪从物种、植物生活型和植物群落三个层次上使用指示种分析、降趋势典范对应分析(DCCA)等方法,分析植被与环境之间的关系^[11]。排序一词是 1930 年由 Ramansky 提出的,指的是把一个地区内所调查的群落样地按照相似度来排定各样地的位序,从而分析各样地之间及其与生境之间的相互关系^[12]。目前常用于研究植物与环境关系的多元统计方法有数量分类和排序,为准确揭示植被群落与环境之间的关系提供合理有效的途径。

地震后国家和地方先后启动多个灾后生态恢复项目,在重灾区针对地震造成的滑坡迹地建立多个植被恢复技术推广示范工程区。而针对滑坡迹地植被恢复,利用先锋植物种构建简单植物种群,能够缩短群落恢复的时间^[13]。为此,本研究通过探讨植物群落与环境的关系,并比较在植被恢复初期人工措施样地植被与周边未受损植被的相似性,从而找出构建研究区灾害迹地稳定植物群落的关键因子,加速滑坡迹地地表的植被恢复。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于汶川地震极重灾区之一的北川县境内,沿着“黄土镇-擂鼓镇-陈家坝乡-桂溪乡”一带,海拔主要分布在 500—2000m 左右,属于北亚热带山地湿润季风气候,年平均气温 15.6℃,年平均降水量 1400mm,主要集中在 6—9 月份,年平均无霜期 276d,常年日照时数为 924.3h^[14]。土壤类型以黄壤和黄棕壤为主,滑坡迹地上砾石较多,土壤质地粗糙;森林类型大体上分为亚热带常绿阔叶林、常绿阔叶落叶混交林、针阔混交林和针叶林等,共有森林面积 13.47 万 hm²,常见树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉(*Cunninghamia lanceolata*)、柏(*Cupressus funebris*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、香椿(*Toona sinensis*)等。

“5·12”地震后,重灾区林地损失 94646km²,草地损失 14821km²^[15],大面积的树木被土石掩埋、压倒。据统计,地震发生后北川县境内发生滑坡和崩塌灾害点共计 284 处^[16]。为了加快滑坡迹地的植被恢复,推广林业治山技术,2010—2013 年期间,分别在北川县擂鼓镇建立了中日林业技术合作四川地震灾区森林植被恢复与重建示范项目的示范地和中日技术合作项目技术推广示范工程,试验示范地面积分别为 4.22hm²和 22.88hm²。主要采用了土袋、竹栅栏、干砌石、生态棒等措施。示范地栽植树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、李(*Prunus salicina*)、核桃(*Juglans regia*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)等,撒播草籽如白车轴草(*Trifolium repens*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、黄花草木犀(*Melilotus officinalis*)等。沿着地震断裂带“擂鼓镇-陈家坝乡-桂溪乡”

一线,按照不同海拔、不同坡度,并根据林地不同受损程度和人为因素,选取了 29 个调查样地,分别为未受损林地(C)13 个、人工恢复地(A)7 个和自然恢复地(N)9 个。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息
Table 1 Basic information of sample area

样地编号 Number of plot	地点 Location	工程措施 Engineering measures	地貌部位 Geomorphological sites	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Aspect
A ₁	擂鼓镇凤凰山 2011 年建中日合作示范地	生态袋+竹栅栏	滑坡鼓丘	716	35	35
A ₂	擂鼓镇凤凰山 2010 年建中日合作示范地	生态袋+竹栅栏	滑坡鼓舌	737	36	77
A ₃	擂鼓镇凤凰山 2013 年建工程示范地	干砌石	滑坡舌	718	25	47
A ₄	擂鼓镇凤凰山 2013 年建工程示范地	生态袋	滑坡舌	749	21	65
A ₅	擂鼓镇凤凰山 2013 年建工程示范地	竹栅栏	滑坡台阶	801	28	50
A ₆	擂鼓镇凤凰山 2013 年建工程示范地	生态棒	滑坡鼓丘	858	25	25
A ₇	擂鼓镇凤凰山 2013 年建工程示范地	封育	滑坡台阶	872	25	73
N ₁	擂鼓镇凤凰山 30 年以上侧柏林	—	滑坡台阶	925	15	51
N ₂	擂鼓镇凤凰山 30 年以上喜树、桉木林	—	滑坡台阶	923	19	21
N ₃	擂鼓镇高家坎滑坡自然恢复地	—	滑坡台阶	827	32	134
N ₄	擂鼓镇茶坊村滑坡自然恢复地	—	滑坡鼓丘	840	23	130
N ₅	曲山镇王家岩滑坡自然恢复地	—	滑坡鼓丘	686	26	89
N ₆	曲山镇王家岩滑坡自然恢复地	—	滑坡台阶	686	26	89
N ₇	曲山镇王家岩滑坡自然恢复地	—	滑坡洼地	686	26	89
N ₈	陈家坝乡麻柳林滑坡自然恢复地	—	滑坡台阶	746	34	131
N ₉	曲山镇任家坪滑坡自然恢复地	—	滑坡台阶	960	38	90
C ₁	擂鼓镇秦家坡杉木 20 年,厚朴 8 年混交林	—	山腰	1110	34	326
C ₂	擂鼓镇秦家坡 30 年生柳杉林	—	山腰	1056	27	340
C ₃	擂鼓镇秦家坡 20 年桉木林	—	山腰	1022	14	300
C ₄	擂鼓镇楠竹村 10 年以上楠竹林	—	山腰	997	26	337
C ₅	桂溪乡林峰村 9 年生厚朴林	—	山腰	1320	21	341
C ₆	通口镇同乐村 10 年生柳杉林	—	山腰	968	29	66
C ₇	通口镇同乐村 5 年生柳杉林	—	山腰	991	10	311
C ₈	通口镇同乐村 20 年生柳杉林	—	山腰	1145	4	0
C ₉	桂溪乡林峰村 30 年以上辛夷林	—	山麓	1320	10	172
C ₁₀	巴弄山林场(阔叶混交林)	—	山顶	2060	21	26
C ₁₁	黄土镇东渔村 20 年以上湿地松	—	山顶	563	7	26
C ₁₂	黄土镇东渔村 10 年以上桉木湿地松混交林	—	山顶	571	29	115
C ₁₃	通口镇战斗村 10 年以上斑竹林	—	山腰	862	20	166

A 和 N 均表示滑坡迹地 landslide blanks,其中 A 表示滑坡后实施工程措施恢复的样地 the sample area of vegetation restoration after landslide with engineering measures,N 表示滑坡后自然恢复的样地 the sample area of natural recovery after landslide;C 表示未受损林地 the sample area of intact forest

1.2 研究方法

1.2.1 植被调查

根据样地地形的特殊性,在选定的调查样地上,设置 20 m×20 m(或者 10 m×10 m)、2 m×2 m、1 m×1 m 的样方分别调查乔木层、灌木层和草本层植物,测定植物的物种名称、数量、高度、盖度等指标。其中,在每个大样方中设置 3 个灌木调查样方和 3 个草本调查样方,共计 203 个大小样方,调查到的植物种有 250 种。

1.2.2 土壤样品采集及其理化性质测定

在设置的大样方内,随机选取 3 个点,采集地表层 0—30 cm 的土壤样品,每个样地取回三份土样,风干保存,混合均匀利用四分法将约 1kg 土样带回实验室备用。采用重铬酸钾容量法、凯氏定氮法、碳酸氢钠(pH 值 8.5)浸提法、1mol/L 醋酸铵浸提-原子吸收法、精密酸度计测定法和甲种比重计速测法分别测定土壤的有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、pH 值以及土壤颗粒组成。

1.2.3 数据处理

用 Excel 整理数据,使用 Pcord 4 软件划分植物群落,使用 Canoco 5.0 软件分别分析植物种、植物群落、植物生活型与环境的关系,采用 Jaccard 指数公式和 Sorenson 指数公式^[4, 17] 计算人工恢复地植被与周边植被的相似度。

2 结果与分析

2.1 植物群落类型划分

本文采用双向指示法(Two-way indicator species analysis, TWINSpan)对研究区 29 个样地的植物群落进行分类,植物种名称用植物拉丁文第一个单词的前 4 个字母和第二个单词的前 3 个字母表示。第一次划分的指示种为地果(*Ficus tikoua*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、莎草(*Cyperus rotundus*)、小蓬草(*Conyza canadensis*)、苦苣菜(*Ixeris polycephala*)、野棉花(*Anemone vitifolia*)。

本文根据 TWINSpan 的 5 级分类水平上的划分,将研究区的植物群落分成了 9 个群落类型,并采用联名法^[12]对划分的群丛进行命名。

(1) 李<小花鬼针草+藿香+夏枯草+马唐+鬼针草+狗尾草+紫花苜蓿群丛(Ass. *Prunus salicina*<*Bidens parviflora*+*Agastache rugosa*+*Prunella vulgaris*+*Digitaria sanguinalis*+*Bidens pilosa*+*Setaria viridis*+*Medicago sativa*)

(2) 野漆树<水麻+金丝梅-心托冷水花+矛叶苎草+野棉花+小蓬草+野青茅群丛(Ass. *Toxicodendron succedaneum*<*Debregeasia orientalis*+*Hypericum patulum*-*Pilea cordistipulata*+*Arthraxon lanceolatus*+*Anemone vitifolia*+*Conyza canadensis*+*Deyeuxia arundinacea*)

(3) 刺槐+西南木荷+白蜡树+喜树+黄连木-胡颓子+大叶醉鱼草+醉鱼草+马桑-黑麦草+五节芒+车轴草+黄花草木樨+千里光群丛(Ass. *Robinia pseudoacacia*+*Schima wallichii*+*Fraxinus chinensis*+*Camptotheca acuminata*+*Pistacia chinensis*-*Elaeagnus pungens*+*Buddleja davidii*+*Buddleja lindleyana*+*Coriaria nepalensis*-*Lolium perenne*+*Miscanthus floridulus*+*Trifolium repens*+*Melilotus officinalis*+*Senecio scandens*)

(4) 刺楸-野菊+荇草群丛(Ass. *Kalopanax septemlobus*-*Dendranthema indicum*+*Arthraxon hispidus*)

(5) 核桃-蜂斗菜+艾蒿群丛(Ass. *Juglans regia*-*Petasites japonicas*+*Artemisia lavandulaefolia*)

(6) 盐肤木+灯台树+青冈+槐树+辛夷+厚朴+杉木+湿地松+楠竹-常山+茶+乌泡子+高粱泡+野蔷薇-多裂福王草+马交儿+扁竹根+酸膜叶蓼+狗脊群丛(Ass. *Rhus chinensis*+*Bothrocaryum controversum*+*Cyclobalanopsis glauca*+*Sophora japonica*+*Magnolia liliflora*+*Magnolia officinalis*+*Cunninghamia lanceolata*+*Pinus elliotii*+*Phyllostachys heterocycla*-*Dichroa febrifuga*+*Camellia sinensis*+*Rubus parkeri*+*Rubus lambertianus*+*Rosa multiflora*-*Prenanthes macrophylla*+*Zehneria indica*+*Iris confuse*+*Polygonum lapathifolium*+*Woodwardia japonica*)

(7) 桤木-西南绣球-莎草+过路黄群丛(Ass. *Alnus cremastogyne*-*Hydrangea davidii*-*Cyperus rotundus*+*Lysimachia christinae*)

(8) 榉木+箭竹群丛(Ass. *Aralia chinensis*+*Fargesia spathacea*)

(9) 柳杉+构树-天名精群丛(Ass. *Cryptomeria fortunei*+*Broussonetia papyrifera*-*Carpesium abrotanoides*)

2.2 植物种与环境变量的关系

剔除只在一个样方出现的植物,将剩下的 229 个植物种及 10 个环境变量使用 Canoco 5.0 软件进行分析。其中植物种的名称缩写使用的是拉丁名第一个单词的前 4 个字母,以及第二个单词的前 3 个字母;环境变量名缩写见表 2。在研究区,环境变量对植物种的解释量为 21.96%,前 2 个排序轴的影响最大(表 3)。由图 1 可以看出,pH 值、坡度、海拔、土壤质地、土壤容重与排序轴的相关性较强。其中,pH 值、海拔和土壤质地与第一排序轴的相关性较强,坡度和土壤容重与第二排序轴的相关性较强。排序图从左往右,有蜈蚣蕨、苦苣菜、小蓬草、野棉花、鱼腥草、高粱泡、楼梯草,反映的是随着海拔的升高、pH 值减小,表层土壤质地逐渐变好,植物

群落从次生植被到原生植被过渡;排序图从下往上,有菜豆、白茅、牛膝、酸膜叶蓼、粗齿冷水花、刺楸、山茱萸,反映的是随着坡度、土壤透水透气状况的改变,植物群落从草本植物向灌木、乔木植物过渡。

表 2 环境变量名缩写对照

Table 2 Abbreviation of environment variable

环境变量名 Name of environmental variables	缩写 Abbreviations	环境变量名 Name of environmental variables	缩写 Abbreviations
土壤有机质 Soil organic matter	SOM	全氮 Total nitrogen	TN
速效钾 Available K	AvK	有效磷 Available phosphorus	AvP
pH 值 pH value	pH	海拔 Elevation	Elevatio
坡度 Slope	Slope	坡向 Aspect	Aspect
土壤容重 Soil bulk density	SBD	土壤质地 Soil texture	ST

表 3 植物种 CCA 排序

Table 3 CCA ordinations of plant communities

项目 Item	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
特征值 Eigenvalues	0.660	0.512	0.441	0.416
解释变量 Explained variation (cumulative)	7.14	12.68	17.45	21.96
范式典型相关 Pseudo-canonical correlation	0.986	0.961	0.970	0.982
解释拟合变量 Explained fitted variation (cumulative)	17.19	30.51	42.01	52.85
置换检验结果 Permutation Test Results	pseudo- $F = 1.3$, $P = 0.002$			

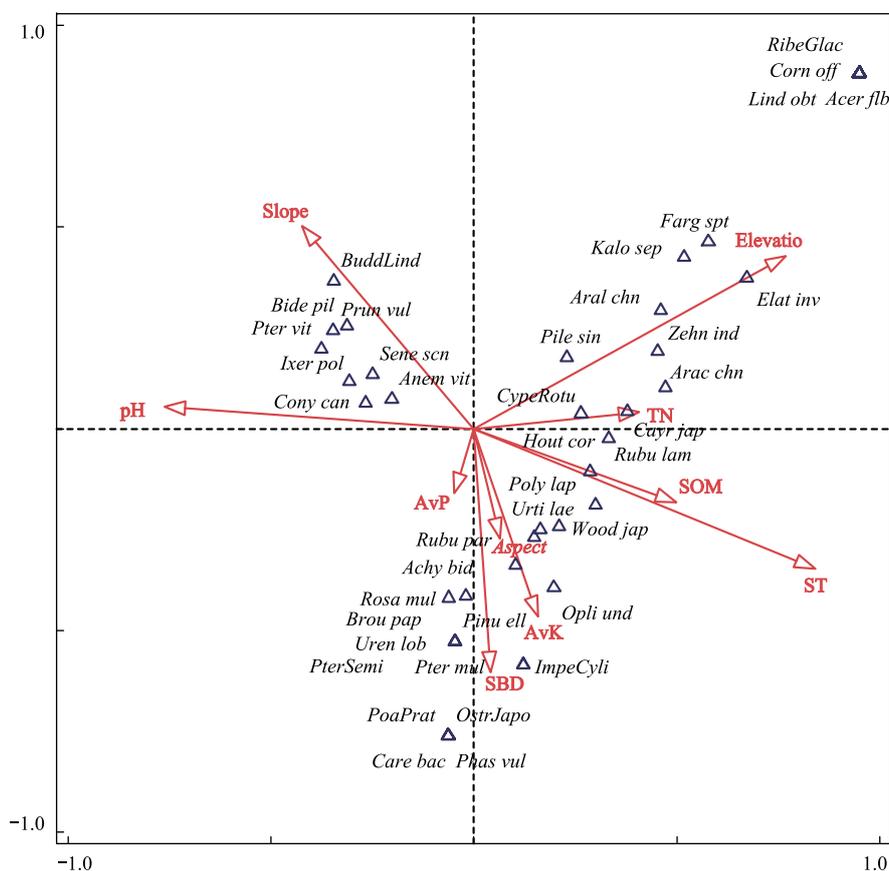


图 1 植物种 CCA 排序图

Fig.1 CCA ordinations of plant communities

2.3 植物群落与环境变量的关系

植物群落与环境变量关系中,环境变量对植物群落分布的排序解释了 25.7%,物种数据总变异的约束典范排序特征值总和为 6.282,前 2 个排序轴的影响最大(见表 4)。由表 5 所示,pH 值、海拔、土壤质地与第一排序轴的相关性最大,其中,pH 值呈负相关,海拔、土壤质地呈正相关;土壤有机质含量、土壤全氮、坡向与第二排序轴的相关性最大,其中,土壤有机质含量呈负相关,土壤全氮、坡向呈正相关。结合表 5 和图 2,从左往右(图 2),pH 值越来越小、海拔和土壤质地越来越大,说明在第一排序轴中环境变量土壤的酸碱度、海拔高差及土壤颗粒大小组成对植物群落分布的影响最大;从下往上(图 2),土壤有机质越来越少,土壤全氮含量增多,坡向由阳坡向阴坡转化,说明在第二排序轴中,土壤有机质、全氮含量以及坡向对植物群落分布的影响较大。图 2 中的 group 1 至 group 9 分别为植物群落分组“刺槐-胡颓子-千里光等”群丛、“野漆树<水麻-矛叶苎草等”群丛、“辛夷-高粱泡-扁竹根等”群丛、“李<小花鬼针草等”群丛、“桉木-西南绣球-过路黄等”群丛、“箭竹等”群丛、“核桃-艾蒿等”群丛、“刺楸-野菊等”群丛和“柳杉-天名精等”群丛;图中,第一排序轴从左往右呈现的植物群落变化主要是 group 4→group 1→group 2→group 3,即由耐旱、耐贫瘠的自然恢复草本植物群落向乔灌草结合的人工植物或者先锋灌草植物群落、以及未受损的乔灌草植物群落转变,反映出植被受损与否、植被恢复方式等外界条件对植物的影响;第二排序轴从下往上呈现的植物群落变化主要是 group 4→group 3(group 2),即由草本植物群落过渡到乔灌草或灌草植物群落,呈现的是一个植物群落生长环境由恶劣到良好的变化过程。

表 4 植物群落分布 DCA 排序
Table 4 DCA ordinations of plant communities

项目 Item	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
特征值 Eigenvalues	0.687	0.419	0.317	0.194
梯度长度 Gradient length	5.14	3.65	2.91	2.79
物种数据的变异累计百分比 Cumulative percentage variance of species data	10.9	17.6	22.7	25.7
辅助变量所占的百分比 Supplementary variables account			43.6%	
物种数据总变异的约束典范排序特征值总和 Sum of canonical eigenvalues of all variance of species data			6.282	

表 5 10 个环境变量与 DCCA 排序轴的相关性
Table 5 Correlation coefficients between 10 environmental variables and DCCA ordination axes

环境变量 Environmental variables	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第三轴 Axis 3	第四轴 Axis 4
SOM	0.3999	-0.3062	-0.2072	0.1985
TN	0.3056	0.3839	-0.3904	-0.1275
AvK	0.3089	-0.1765	-0.0467	-0.0430
AvP	-0.2004	0.1081	-0.0706	-0.1726
pH	-0.6840*	0.0410	0.0156	-0.1283
Elevatio	0.4705	-0.0025	0.2505	0.1255
Slope	-0.5244	0.1624	-0.0172	-0.1277
Aspect	0.1317	0.3231	0.2022	0.0726
SBD	0.3246	-0.0252	-0.1571	0.0793
ST	0.7927**	-0.2810	-0.0206	-0.0109

环境变量缩写见表 2。*、** 和 *** 分别表示 0.05、0.01 和 0.001 水平上的显著性

2.4 植物种生活型与环境变量的关系

前四个排序轴对植物种生活型的解释量达 19.04%,其中第一排序轴和第二排序轴的影响最大,明显高出

第三、第四排序轴,见表 6。由表 7 可知,pH 值、海拔、土壤质地与第一排序轴的相关性最大,其中,pH 值呈负相关,海拔、土壤质地呈正相关;土壤有效磷、海拔与第二排序轴的相关性最大,其中,海拔呈负相关,土壤有效磷呈正相关。结合表 7 和图 3,从左往右(图 3),pH 值越来越小、海拔和土壤质地越来越大,说明在第一排序轴中环境变量土壤的酸碱度、海拔高差及土壤颗粒组成对植物生活型的影响最大;从下往上(图 3),土壤有效磷越来越多,海拔降低,说明在第二排序轴中,土壤有效磷含量及海拔对植物生活型的影响较大。而且从图 3 可以看出,第一排序轴从左往右,由一年生草本植物、多年生草本植物向乔灌木植物过渡,灌木和乔木植物多集中在第一排序轴的右侧;第二排序轴由下往上,植物生活型的划分并不明显,灌木植物多分布在第二排序轴的下方,乔木植物多分布在第二排序轴的上方,草本植物没有明显的集中分布特征。

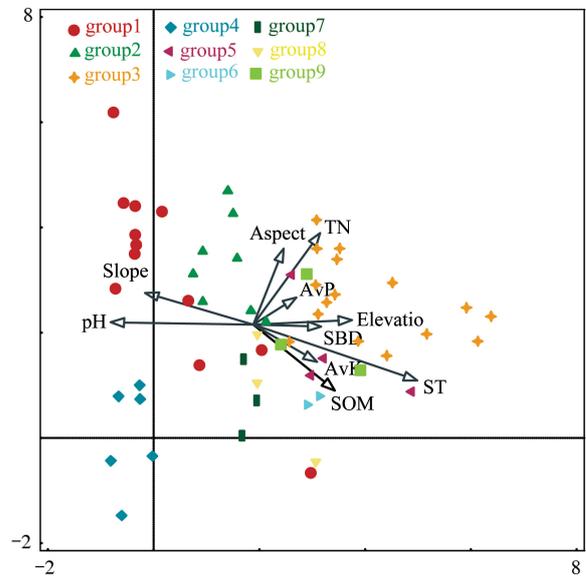


图 2 植物群落 DCCA 排序图

Fig.2 DCCA ordinations of plant communities

表 6 植物种生活型 DCA 排序

Table 6 DCA ordinations of plant life forms

项目 Item	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
特征值 Eigenvalues	0.696	0.438	0.343	0.282
梯度长度 Gradient length	5.68	3.51	3.07	3.18
物种数据的变异累计百分比 Cumulative percentage variance of species data	7.54	12.27	15.98	19.04
辅助变量所占的百分比 Supplementary variables account			42.6%	
物种数据总变异的约束典范排序特征值总和 Sum of canonical eigenvalues of all variance of species data			9.238	

表 7 10 个环境变量与 DCCA 排序轴的相关性

Table 7 Correlation coefficients between 10 environmental variables and DCCA ordination axes

环境变量 Environmental variables	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第三轴 Axis 3	第四轴 Axis 4
SOM	0.5034	-0.0637	-0.0725	0.0315
TN	0.3742	0.1650	-0.1639	0.3957
AvK	0.1985	-0.0248	-0.0143	0.0273
AvP	-0.2324	0.3165	0.0759	0.2398
pH	-0.7307 *	0.1482	0.0101	-0.1526
Elevatio	0.6749 *	-0.3357	-0.0077	0.0006
Slope	-0.4743	0.1678	-0.0466	0.2055
Aspect	0.4010	-0.1225	-0.2786	0.1237
SBD	0.1403	0.1395	0.1109	-0.1408
ST	0.8322 **	-0.1094	-0.1273	-0.0225

环境变量缩写见表 2; *、** 和 *** 分别表示 0.05、0.01 和 0.001 水平上的显著性

2.5 人工恢复植被与周边植被的相似度

将人工恢复样地(A₁—A₇),与靠近工程样地的自然恢复样地(N₃、N₄)和未受损林地(C₁—C₄,分别为针阔混交林、针叶林、常绿阔叶林和楠竹林)相比,通过 Jaccard 指数和 Sorenson 指数公式计算,得出滑坡迹地植物群落与未受损林地植物群落的相似程度。由表 8 可知,所有人工恢复样地及自然恢复样地的植被与未受损

林地植被的 JI 、 C_s 都很低 ($JI < 0.25$, $C_s < 0.25$), 说明滑坡迹地(包括人工恢复和自然恢复)的植物群落与未受损林地的植物群落相比, 相似程度较低。如表 8 所示, “土袋+竹栅栏”措施(样地 A_1)、“土袋”措施(样地 A_4)、“生态棒”措施(样地 A_6)的植物与针阔混交林(样地 C_1)的群落相似度相对较高(JI 为 0.04—0.08, C_s 为 0.09—0.17), 样地“土袋+竹栅栏”措施(样地 A_2)、“干砌石”措施(样地 A_3)、“竹栅栏”措施(样地 A_5)、“封育”措施(样地 A_7)的植物与常绿阔叶林(样地 C_3)的群落相似度相对较高(JI 为 0.03—0.08, C_s 为 0.06—0.17)。因此, 建议在人工恢复植被过程中将 A_1 、 A_4 和 A_6 样地的植物按照针阔混交林的植物群落方向进行恢复, 将 A_2 、 A_3 和 A_5 样地的植物按照常绿阔叶林的植物群落方向进行恢复。

从整体的群落相似度来看, “土袋+竹栅栏”措施和“生态棒”措施的植被与周围未受损林地的最为接近, 其次为“竹栅栏”措施, “干砌石”措施的植被则与周围未受损林地植被最不相似。此外, 自然恢复的植被与周围未受损林地植被也较为接近, 群落相似度 JI 为 0.07—0.10, C_s 为 0.16—0.22。由于未受损林地植被经过多年发育, 植被群落达到一个相对稳定状态。而受损地区的林地是在原生演替初期, 所处的发育阶段不同, 因此群落物种相似性低。

表 8 不同工程措施与未受损林地群落的共有物种数、Jaccard 指数和 Sorenson 指数

Table 8 Total species, Jaccard Index and Sorenson Index of the site with different engineering measures or undamaged community

样地编号 Number of Plots	物种数 Number of Species				JI				C_s			
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_1	C_2	C_3	C_4	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1 (土袋+竹栅栏)	3	1	2	3	0.06	0.03	0.04	0.05	0.12	0.05	0.09	0.11
A_2 (土袋+竹栅栏)	3	0	3	2	0.06	0.00	0.08	0.04	0.14	0.00	0.17	0.09
A_3 (干砌石)	1	0	1	0	0.02	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.06	0.00
A_4 (土袋)	2	0	1	1	0.04	0.00	0.03	0.02	0.09	0.00	0.05	0.04
A_5 (竹栅栏)	3	1	3	0	0.06	0.03	0.07	0.00	0.12	0.06	0.15	0.00
A_6 (生态棒)	4	1	3	2	0.08	0.03	0.07	0.04	0.17	0.06	0.15	0.08
A_7 (封育)	3	0	3	3	0.05	0.00	0.06	0.05	0.10	0.00	0.12	0.10
N_3 (自然恢复)	2	0	4	2	0.04	0.00	0.10	0.04	0.09	0.00	0.22	0.09
N_4 (自然恢复)	3	1	3	2	0.06	0.03	0.07	0.04	0.13	0.06	0.16	0.08

C_1 : 针阔混交林 mixed needle; C_2 : 针叶林 coniferous forest; C_3 : 常绿阔叶林 evergreen broad-leaved forest; C_4 : 楠竹林 Nanzhu Bamboo forest; JI : Jaccard 指数; C_s : Sorenson 指数

3 结果与讨论

3.1 结果

本研究通过对北川县滑坡体植被调查, 应用降趋势典范对应分析(DCCA)对数据进行排序, 揭示了植物种、植物群落、植物生长型对环境因子的响应情况。得到以下结论:

1) 采用 TWINSpan 将研究区的 29 个植物群落样方划分为 9 个群落类型。

2) 研究区环境变量对植物种解释达 21.96%, 第一排序轴与 pH 值、海拔、土壤质地的相关性较强, 反映的是植物种从次生植物群落向原生植物群落变化; 第二排序轴与坡度、土壤容重的相关性较强, 反映的是植物种从草本植物向乔灌木变化。

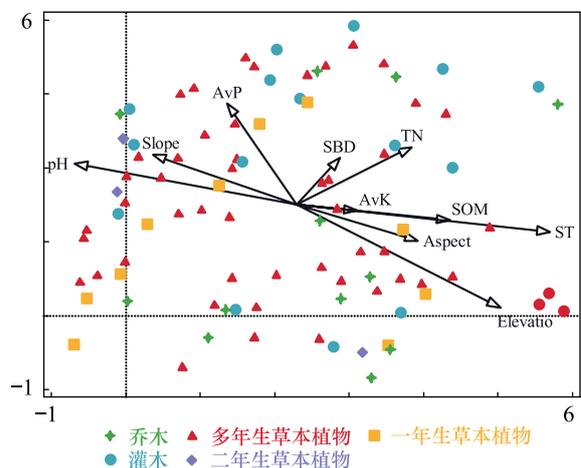


图 3 植物种生活型 DCCA 排序图

Fig.3 DCCA ordinations of plant life forms

3) 环境变量对植物群落的排序解释了 25.7%。第一排序轴与 pH 值、海拔、土壤质地的相关较强,反映的是植物群落是按照“耐旱、耐贫瘠→人工或先锋植物→未受损的乔灌木”变化;第二排序轴与土壤有机质、全氮含量、坡向的相关性较强,反映的是植物群落是按照“草本植物→乔灌木或者灌木植物”变化。

4) 环境变量对植物种生活型的解释量达 19.04%。第一排序轴与 pH 值、海拔、土壤质地的相关较强,反映的是植物生活型由“一年生草本植物、多年生草本植物→乔灌木”变化;第二排序轴与土壤有效磷、海拔的相关性较强,对植物生活型的划分不明显。

5) 滑坡迹地(包括人工恢复和自然恢复)的植物群落与未受损林地的植物群落相比,相似程度较低。相对而言,自然恢复的植被与周围未受损林地植被最为接近,“土袋+竹栅栏”措施和“生态棒”措施的物种与周围未受损林地也较为接近。

3.2 讨论

通过对地震后滑坡迹地植被的调查,滑坡迹地以草本层植被为主,有些样地缺失乔木层和灌木层;而人工治理区人为栽植的乔木弥补了植被恢复早期乔木层植被的缺失,所以人工治理区的植被恢复情况要稍好于自然恢复样地。滑坡迹地植被恢复进程与其环境因子有着密切联系。目前,有关植被与环境因子关系的研究很多,海拔、水文、地形、人为干扰、土壤情况都会对植物群落格局有一定的影响^[18-19]。植被与环境关系的研究方法分两类:一是植被与气候分类研究;另一种就是本文所采用的多元分析,以此得出植被类型的环境解释^[20]。本研究通过对北川县滑坡体植被的调查,应用典范对应分析方法分析植物群落学特征与环境因子的关系。结果表明,环境因子对植物群落特征有重要的影响,但土壤 pH 值、土壤质地是影响其分布格局变化的重要因子。郝占庆研究显示海拔高度也是影响植物群落特征的关键因子,海拔高度作为各种环境因素的综合,它的变化直接导致其它环境因子的变化^[21]。不同海拔梯度群落间的相异性不仅反映了群落间环境的异质性,也在一定程度上反映了物种的适应性,进而影响植物群落的分布与结构及物种多样性^[22]。冶民生研究表明,随着海拔增加,群落有从多优势种向单优势种发展的趋势^[22]。王增如指出土壤环境是植物生活的基础,土壤有机质、全氮和全钾等含量变化对植被群落结构的影响显著^[23]。张元明利用 CCA 排序值的数量分析表明,影响塔里木河下游植物群落分布格局的环境因子主要是地下水位、土壤含水量及土壤 pH 值^[24]。各环境因子对植物群落特征的影响程度是有区别的。

植被恢复是地震后滑坡体生态恢复的一项重要工作。滑坡迹地土壤表层堆积着大量的松散碎石、土壤养分缺乏、土壤肥力较差、保水能力弱,因此对植被恢复很不利,在这些迹地上生长的多为菊科和禾本科等耐贫瘠的草本植物。在受损立地植被恢复初期,草本植物基本能迅速恢复,而灌木、乔木在短时间内很难恢复。因此,受损立地植被恢复早期植被类型主要为灌木丛,较少有乔木出现。在滑坡迹地生态恢复工作中,应以自然恢复为主,减少人为干预,而对于急需采取人工治理措施的灾区要以工程措施与植物措施相结合,选取乡土树种,同时要兼顾植物群落的复杂多样化,尽量做到乔灌木搭配适宜,在土壤极为贫瘠的地区应采取客土移植等方法,才能使受损立地的植被恢复工作快速有效。因此,研究植物群落与环境因子关系,对滑坡体植被恢复重建具有理论指导意义。若是对研究地区连续长期观测调查,更加深入的研究植物群落和植被演替,对灾后植被恢复重建发挥重要借鉴作用。

参考文献 (References):

- [1] 四川省林业调查规划院. 汶川地震灾害四川省林业损失评估报告. 四川省林业调查规划院, 2008.
- [2] Yang C J, Ren X L, Huang H. The vegetation damage assessment of the Wenchuan earthquake of May 2008 using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 2012, 62(1): 45-55.
- [3] 李丹雄, 杨建英, 史常青, 周进, 王兴宇, 王新, 伏凯, 赵廷宁. 汶川地震滑坡迹地植被恢复中优势种的种间关联性. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(5): 938-943.
- [4] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 吴承祯, 洪伟. 汶川地震生态治理区土壤种子库及其与地上植被的关系. *中国生态农业学报*, 2015, (1): 69-79.

- [5] Lu T, Zeng H C, Luo Y, Wang Q, Shi F S, Sun G, Wu Y, Wu N. Monitoring vegetation recovery after China's May 2008 Wenchuan earthquake using Landsat TM time-series data: a case study in Mao County. *Ecological Research*, 2012, 27(5): 955-966.
- [6] Walker L R, Velázquez E, Shiels A B. Applying lessons from ecological succession to the restoration of landslides. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 157-168.
- [7] Yin Y P, Wang F W, Sun P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 2009, 6(2): 139-152.
- [8] Yin Y P, Zheng W M, Li X C, Sun P, Li B. Catastrophic landslides associated with the M8.0 Wenchuan earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(1): 15-32.
- [9] Rubio A, Escudero A. Small-scale spatial soil-plant relationship in semi-arid gypsum environments. *Plant and Soil*, 2000, 220(1): 139-150.
- [10] Franssen B, De Kroon H, Berendse F. Soil nutrient heterogeneity alters competition between two perennial grass species. *Ecology*, 2001, 82(9): 2534-2546.
- [11] 刘瑞雪. 丹江口水库水滨带植被特征及其与环境因素的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [12] 牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳. 基础生态学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [13] 聂娟, 连健, 胡卓玮. 汶川地震灾区滑坡空间特征变化分析. *地理研究*, 2014, 33(2): 214-224.
- [14] 北川县志编纂委员会. 北川县志. 北京: 方志出版社, 1996.
- [15] 张翔, 王庆安, 方自力, 余红英. 汶川地震灾区自然植被恢复的先锋植物特征分析. *中国水土保持*, 2011, (4): 47-50.
- [16] 梁超. 基于 3S 的 5.12 地震北川县植被破坏及变化分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [17] 彭贤锋, 史常青, 赵廷宁, 梁超, 冯晶晶, 张成梁, 高俊, 龙军, 王兴宇, 韩煜. 汶川地震不同次生地质灾害类型区土壤种子库特征. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 192-197.
- [18] 张先平, 王孟本, 余波, 肖扬. 庞泉沟自然保护区森林群落的数量分类和排序. *生态学报*, 2006, 26(3): 754-761.
- [19] 胡相明, 赵艳云, 程积民, 万惠娥, 刘京涛. 云雾山天然草地物种分布与环境因子的关系. *生态学报*, 2008, 28(7): 3102-3107.
- [20] 王敏, 周才平. 山地植物群落数量分类和排序研究进展. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(4): 126-130.
- [21] 郝占庆, 郭水良. 长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析. *生态学报*, 2003, 23(10): 2000-2008.
- [22] 冶民生. 岷江上游植被群落特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [23] 王增如, 杨国靖, 何晓波, 武震, 王杰, 赵求东, 赵传成, 叶柏生. 长江源区植物群落特征与环境因子的关系. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 640-645.
- [24] 寇思勇, 赵成义, 李君, 朱宏, 王丽娟. 塔里木河干流荒漠河岸线植物群落多元分析及其土壤环境解释. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(3): 156-161.