

关中平原高速公路路堤边坡土壤养分 与植被群落 α 多样性变化

张小娟¹, 高照良^{1,2}, 李 晶¹, 田红卫¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:选择不同植被恢复年限的高速公路路堤边坡为研究对象,采用时空替代法,通过相关性分析及主成分分析,研究关中平原高速公路植被恢复过程中土壤养分和植被群落 α 多样性的变化。结果表明:路堤边坡植被恢复过程中表层土壤养分因子含量平均值变化范围分别为:有机质 12.26~25.83 g/kg、全氮 0.60~1.25 g/kg、铵态氮 7.16~35.10 mg/kg、硝态氮 4.15~7.42 mg/kg、速效磷 9.30~26.68 mg/kg。植被恢复过程中,土壤养分特征受恢复年限、土层、坡向的影响。随着恢复年限的增加,表土养分条件明显好转,说明植被对土壤的培肥作用与时间密切相关。0—10 cm 土层土壤养分含量明显高于 10—20 cm 土层,阴面边坡土壤养分含量高于阳面边坡。在人工扰动下,群落的 α 多样性主要受恢复年限和土壤中硝态氮含量的影响。恢复到 17 a 时,边坡土壤养分和群落 α 多样性均达到较高水平。本研究对路堤边坡土壤质量及群落多样性的提高具有重要的意义,对高速公路生态建设和水土保持具有一定的参考价值。

关键词:关中平原; 高速公路路堤边坡; 土壤养分; 群落 α 多样性; 主成分分析

中图分类号:S154.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0157-06

Variation of Soil Nutrients and Mode of α Diversity of Plant Community on the Embankment Slope of Highways in Guanzhong Plain

ZHANG Xiao-juan¹, GAO Zhao-liang^{1,2}, LI Jing¹, TIAN Hong-wei¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The embankment slope of Highways with different years of vegetation restoration in Guanzhong Plain was selected as the study site. The dynamic changes of soil nutrient and variation mode of α diversity of plant community of vegetation restoration were examined based on the correlation analysis and principal component analysis methods. The results indicated that: in topsoil, the change range of soil organic matter values of embankment slope of vegetation restoration was 2.26~25.83 g/kg, 0.60~1.25 g/kg for total N, 7.16~35.10 mg/kg for ammonium N, 4.15~7.42 mg/kg nitrate N, and 9.30~26.68 mg/kg for available P. In the process of vegetation restoration, the characteristic of soil nutrient was closely related with the recovery period, the depth of soil layer and the slope gradient. The content of soil nutrient obviously increased with the extension of vegetation restoration time, indicating that effect of vegetation on soil fertilization was related to the restoration period. And the content of nutrient in 0—10 cm soil layer was significantly higher than that in 10—20 cm soil layer, and it was higher in the shady slopes than that in the sunny slopes. Under artificial disturbance, variation mode of α diversity of plant community was mainly influenced by the vegetation restoration time and the contention of soil nitrate. The topsoil nutrient of embankment slope and the variation mode of α diversity of plant community reached to a higher level after 17 years of vegetation restoration. This study is of important significance in improving the soil quality and the community diversity of embankment slope, and also has certain reference value on ecological construction as well as soil and water conservation of highways.

Key words: Guanzhong plain; embankment slope of highway; soil nutrient; variation mode of α diversity of plant community; principal component analysis

收稿日期:2012-05-03

修回日期:2012-06-20

资助项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题“农田水土保持关键技术研究示范”(2011BAD31B01)

作者简介:张小娟(1985—),女,山西吕梁人,硕士,主要从事工程开发与高速公路边坡防护研究。E-mail:714687705@qq.com

通信作者:高照良(1969—),男,河南灵宝人,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀与荒漠化研究。E-mail:gzl@ms.iswc.ac.cn

在高速公路建设中,为满足技术要求,不可避免地质回填和碾压工程渣土,形成填方路堤。路堤边坡稳定性差、土壤结构混乱无规律、养分匮乏、无原生植被。为了增强路堤边坡的稳定性、防治水土流失、美化公路,在公路建设过程中必须进行路堤边坡植被的恢复与重建。植被和土壤的相互作用不断影响着土壤质量,而土壤质量水平又直接影响到边坡植被恢复的后期效果^[1]。

有研究表明,土壤理化性质与植物群落演替之间的关系十分密切^[2]。关于植被恢复和土壤质量前人已经做了很多研究,发现土壤养分影响着植物的生长发育、生理活力和物种多样性^[3-4],进而影响系统的稳定性^[5]。

目前对人工干扰状态下的土壤性质及植物群落的研究较少,对公路边坡物种多样性及其与土壤特性关系的研究更少。本文以野外植被调查和室内土壤实验为基础,选择植被恢复 3,9,16,17,19,40 a 高速公路路堤边坡为研究对象,采用时空代换法对关中平原高速公路路堤边坡土壤养分、植被 α 多样性特征及二者之间的关系进行探讨分析,旨在为类似扰动区域植被的恢复与重建提供参考依据。

1 研究区概况

本研究以西宝高速(西安—宝鸡)、西安绕城高速(北段)、西临高速(西安—临潼)、兵马俑连接线、西宝中线(西安—宝鸡)五段公路为研究对象,其中三段高

速基本以直线沿关中平原东西延伸,与西宝中线平行。公路所经关中地区(32°19′—35°12′N,107°37′—109°14′E)主要涉及临潼、西安、兴平、咸阳、杨凌、武功、宝鸡等县(市、区)。区域西窄东宽,海拔约 325~800 m,长约 210 km。本区地貌类型较均一,以渭河平原为主;气候属大陆性季风气候,四季分明,年均气温 12.0~13.5℃,极端最高气温 42.8℃,极端最低气温 -28.1℃,≥10℃的年积温 4 853℃,平均年降水量 615 mm。土壤以壤土为主,伴有黄鹮土、水稻土、潮土、新积土等;植被类型为暖温带落叶阔叶林。

2 研究方法

在研究区内,植被恢复年限参考通车年限,以人工植被(物种)一致性、边坡坡长、坡度、坡向、土壤、气候条件等生境一致性为原则^[6],以恢复 40 a 的路基边坡为对照,采用空间序列代替时间序列的方法进行研究。设置固定样地:长沿公路走向 20 m、宽平行公路坡向。样地基本情况见表 1。

于 2010 年 4 月在样地内随机选取三点,按表层和亚表层分别(0—10,10—20 cm)取样,带回实验室处理。室内实验方法:有机质为重铬酸钾容量法;全氮为凯氏定氮法;速效磷为钼锑抗比色法;无机氮通过流动分析仪获取。于 2010 年 8 月对样地进行植被调查,调查方法为:在每个样地选取 3 个 1 m×1 m 样方进行种类、高度的调查。植被 α 多样性分析选取丰富度指数、多样性指数和均匀度指数。

表 1 路堤样地基本情况

公路	桩号	植被恢复 年限/a	阳面 样地	坡长/ m	坡向	坡度/ (°)	阴面 样地	坡长/ m	坡向	人工植被
靳家	K0+850	3	1	5	半阳坡	35	7	5	半阴坡	绣球小冠花(<i>Coronilla varia</i> L.)
绕北	K30+900	9	2	5	阳坡	35	8	4	阴坡	绣球小冠花(<i>Coronilla varia</i> L.)
西宝	K274+300	16	3	6	半阳坡	45	9	8	阴坡	绣球小冠花(<i>Coronilla varia</i> L.)
西宝	K183	17	4	4	阳坡	35	10	4	阴坡	小冠花+火棘+早熟禾(<i>Coronilla varia</i> L. + <i>Pyracantha fortuneana</i> + <i>Poa annua</i>)
西临	K1022+100	19	5	6	阳坡	35	11	8	阴坡	绣球小冠花(<i>Coronilla varia</i> L.)
中线	—	40	6	5	阳坡	35	12	6	阴坡	自然植被

物种丰富度 Margalef 指数: $M = (S - 1) / \ln N_i$

多样性 Simpson 指数: $D = 1 - \sum P_i^2$

Shannon-Weiner 指数: $H = - \sum_{i=1}^S P_i \lg P_i$

Pielou(E_p): $P = (- \sum_{i=1}^S P_i \lg P_i) / \lg S$

式中: S ——群落中的物种数目; N ——所有物种的个体数; N_i ——第 i 个物种的个体数, $P_i = N_i / N$ 。对土壤质量随植被恢复年限的变化及其主要影响因素进行分析时,主要针对 12 个样地(0—10 cm 和 10—20 cm)中土壤养分中的有机质、全氮、速效磷、铵态氮,

进行主成分分析(样本数 24),并进行土壤质量的综合评价及排序。数据分析采用 Excel 2003、DPS 7.5 和 SPSS 17.0。

3 结果与分析

3.1 路堤边坡土壤质量分析

土壤有机质、全氮和速效磷是土壤养分的重要组成部分,是体现土壤肥力水平的重要指标。它们不仅可以提供植物生长所需养分,还可以影响土壤理化性质及生物学性质^[7],对土壤质量的改善起到重要作

用。土壤有机质和土壤全氮含量平均值变化范围分别为:12.26~25.83 g/kg 和 0.60~1.25 g/kg,依据国家第二次土壤养分分级标准均处于中等、较缺水平。速效磷含量平均值变化范围为:9.30~26.68 mg/kg,处于中等、较丰富水平。在植被恢复过程中,恢复年限、土层和坡向是影响土壤养分的重要因素。

3.1.1 土壤养分特征随植被恢复年限的变化 随着恢复年限的延长,高速公路路堤边坡土壤有机质、全氮、速效磷在土壤中不断积累,含量均呈增大趋势(图1),恢复17 a时达到峰值,体现出植被对土壤重要的培肥作用。铵态氮和硝态氮是土壤中无机氮的主要存在形式,由图1可知,土壤中铵态氮含量远大于硝态氮,二者的变化规律均为先增大后减小,恢复17 a时达最低值。硝态氮被植物吸收利用且在边坡径流的作用下易淋溶,因而高速公路路堤边坡土壤中铵态氮含量远大于硝态氮。随着恢复时间的延长,植物对铵态氮的吸收利用和铵态氮的不稳定性使其含量呈降低趋势,且降幅较大。而硝态氮的淋溶和铵态氮的转化使硝态氮含量保持在相对稳定状态,变化较小。植被恢复过程中,由于强烈的人工干扰,仅有阳坡下层的全氮和恢复年限呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.871,其余相关性不明显。

3.1.2 土壤养分特征随土层的变化 高速公路路堤边坡植物的根系较浅,与土壤的相互作用主要发生在表层,土壤有机质、全氮、速效磷含量均表现出上层(0—10 cm)大于下层(10—20 cm),且阳坡上层和下层的有机质含量、阴坡上层和下层的速效磷含量、阴坡上层和下层的铵态氮含量均呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.909,0.870,0.873;阳坡上层和下层的铵态氮含量呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为0.985。

3.1.3 土壤养分特征随坡向不同的变化 相同土层不同坡向,在水热条件的作用下阳坡所受的光照强,土温较高,土壤有机质矿化速率较快,从而引起土壤养分的减少。上层阳坡和阴坡的有机质、全氮含量呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.923,0.932;下层阳坡和阴坡的有机质、铵态氮、速效磷含量呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.968,0.946,0.920。

经方差分析,不同恢复年限,阴面和阳面边坡有机质含量均存在显著差异(阴面 F 值为54.545, P 值为0.0007, $P<0.01$;阳面 F 值为40.366, P 值为0.0014, $P<0.01$)。对有机质进行多重比较(表2)可知:阴坡、阳坡的有机质含量从17 a开始存在显著差异,且含量达最高水平。这可能是由于阴阳坡群落

多样性的不一致造成的。由于人为因素的影响,有机质含量与对照年限差异显著,要恢复到自然状态还需要较长的时间。

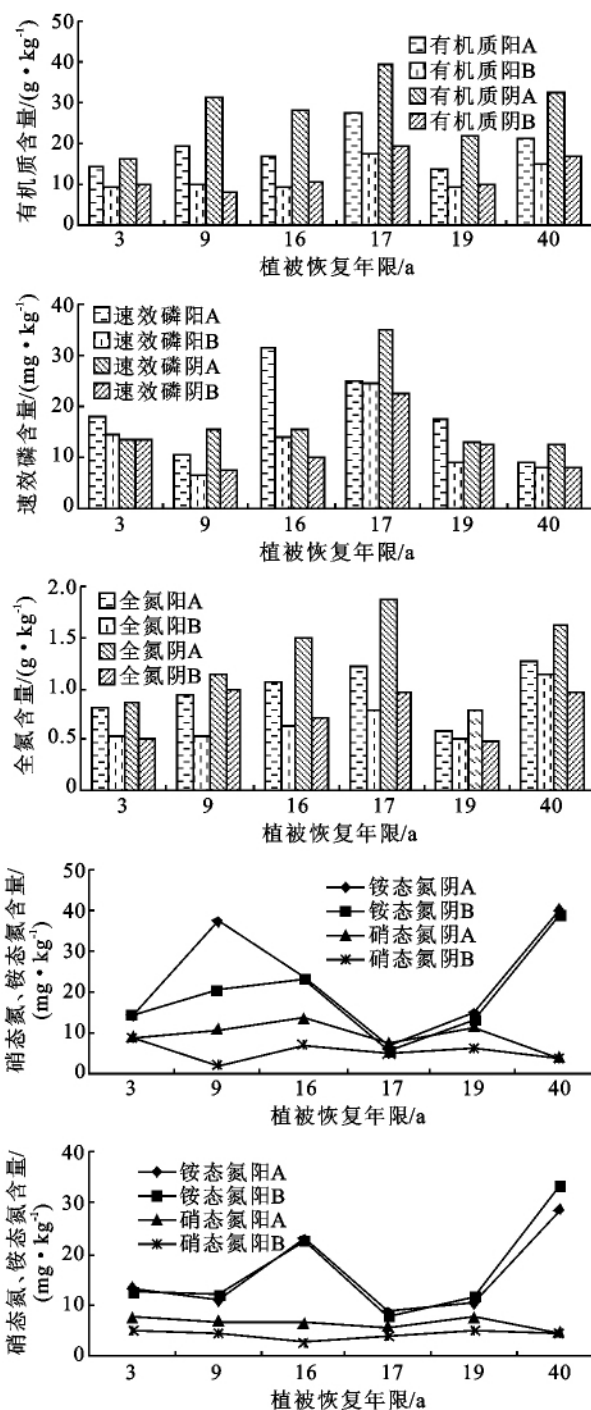


图1 土壤有机质、速效磷、全氮、铵态氮、硝态氮随年限的变化
注:“阴”表示阴坡;“阳”表示阳坡;“A”表示0—10 cm土层;“B”表示10—20 cm土层。

3.1.4 不同土壤养分间的关系 土壤氮素含量主要决定于生物量的积累和有机质的分解强度,土壤全氮是土壤肥力的主要指标之一,极大程度地影响着土壤的质量。由于土壤表层中约80%~97%的氮^[8]存在于有机质中,因此有机质积累对土壤氮素的含量起着主导作用。由土壤养分之间的相关性分析知(表3):

阴坡上层的有机质和全氮含量存在着极显著正相关关系,相关系数达 0.887;阳坡上层的硝态氮和全氮含量呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数为-0.926;阴坡下层的硝态氮和全氮含量呈显著负相关($P<0.05$),相关系数为-0.835。

表 2 边坡有机质的 LSD 比较

植被恢复 年限/a	阳边坡		阴边坡	
	样地号	有机质含量	样地号	有机质含量
3	1	11.7399c	7	12.7765c
9	2	14.5343bc	8	19.3986abc
16	3	12.9734c	9	19.2229abc
17	4	22.2262a	10	29.4401a
19	5	11.6944c	11	15.9641bc
40	6	17.7123b	12	24.6072ab

3.1.5 土壤质量随植被恢复年限的变化及主要影响因素 对土壤养分中的有机质、全氮、速效磷、铵态氮的主成分分析表明,在成分矩阵(表 4)中,根据 0.5 原则,因子 1 在变量有机质、铵态氮、全氮上有较大的负荷;因子 2 在速效磷上有较大负荷。因此它们可以较全面地代表土壤的养分状况。排序结果见表 5。(注:本分析中特征值 >1 ,累积贡献率为 90.064,KOM 检验值为 0.547。)

表 3 相关矩阵

项目	养分	有机质	全氮	速效磷	铵态氮
相关	有机质	10.000	0.873	0.497	0.184
	全氮	0.873	10.000	0.399	0.339
	速效磷	0.497	0.399	10.000	-0.394
	铵态氮	0.184	0.339	-0.394	10.000
Sig. (单侧)	有机质		0.000	0.007	0.194
	全氮	0.000		0.027	0.053
	速效磷	0.007	0.027		0.028
	铵态氮	0.194	0.053	0.028	

表 4 成分矩阵

养分	成份 1	成份 2
有机质	0.954	0.045
铵态氮	0.939	0.213
全氮	0.628	-0.685
速效磷	0.202	0.928

从表 5 可以看出不同恢复年限、不同坡向、不同土层土壤质量的综合排序为:40 a(阴 A) $>$ 9 a(阴 A) $>$ 17 a(阴 A) $>$ 16 a(阴 A) $>$ 40 a(阳 A) $>$ 40 a(阴 B) $>$ 40 a(阳 B) $>$ 16 a(阳 A) $>$ 17 a(阳 A) $>$ 19 a(阴 A) $>$ 9 a(阳 A) $>$ 17 a(阴 B) $>$ 3 a(阴 A) $>$ 16 a(阴 B) $>$ 3 a(阳 A) $>$ 17 a(阳 B) $>$ 9 a(阴 B) $>$ 16 a(阳 B) $>$ 19 a(阳 A) $>$ 3 a(阴 B) $>$ 3 a(阳 B) $>$ 19 a(阴 B) $>$ 9 a(阳 B) $>$ 19 a(阳 B)。

表 5 各样地主成分得分及排序

样地号	植被恢复年限/a	坡向	土层深度/cm	第一主成分 F_1	排名	第二主成分 F_2	排名	综合主成分 F	排名
1	3	阳坡	0—10	-0.86	15	0.41	9	-0.37	15
2	9			-0.55	11	-0.72	19	-0.62	11
3	16			0.85	8	1.65	1	1.16	8
4	17			0.80	9	0.47	6	0.67	9
5	19			-1.51	19	0.65	3	-0.68	19
6	40			1.48	5	-1.06	24	0.51	5
7	3	阴坡	10—20	-0.71	13	-0.12	14	-0.48	13
8	9			3.18	2	0.11	12	2.00	2
9	16			2.27	4	-0.78	20	1.10	4
10	17			3.12	3	0.50	5	2.12	3
11	19			-0.20	10	-0.08	13	-0.16	10
12	40			4.18	1	-1.00	23	2.20	1
13	3	阳坡	10—20	-1.95	21	0.42	7	-1.05	21
14	9			-2.17	23	-0.49	18	-1.53	23
15	16			-0.99	18	0.40	10	-0.46	18
16	17			-0.91	16	1.06	2	-0.16	16
17	19			-2.18	24	-0.18	16	-1.41	24
18	40			1.03	7	-0.88	21	0.30	7
19	3	阴坡	10—20	-1.85	20	0.41	8	-0.98	20
20	9			-0.94	17	-0.97	22	-0.95	17
21	16			-0.82	14	-0.16	15	-0.57	14
22	17			-0.68	12	0.52	4	-0.22	12
23	19			-1.96	22	0.31	11	-1.09	22
24	40			1.40	6	-0.49	17	0.68	6

(1) 总体来看,恢复年限为 40 a 的对照样地在不同恢复年限中土壤质量综合排名最高;恢复年限为 17 a 的排名第二,恢复年限为 16 a 的排名第三。即关中平原高速公路路堤边坡恢复到 17 a 时土壤质量较高,最接近自然土壤,恢复 16 a 的次之。可见,恢复时间越长,土壤质量越高,越接近自然状况。而恢复 19 a 的土壤质量比恢复 3 a 的还要差,这主要是由于人工植被的建立对土壤性状改良产生了深刻的影响,且恢复初期在较强的人为管护下,土壤质量较高;但随着恢复年限的增加和人工管护的差异,土壤养分被消耗但尚未形成稳定群落,因而造成恢复 19 a 后土壤质量较差的现象。

(2) 相同恢复年限的土壤质量均为:阴面 0—10 cm>阳面 0—10 cm>阴面 10—20 cm>阳面 10—20 cm。由于阴面边坡的光照较差,水分蒸发较慢,土壤通透性较差,植物生长较慢,因此在同一层土壤中阴坡养分含量较高。而植物和土壤的相互作用在土壤表层较为强烈,且人工植被根系较浅,因此表层(0—10 cm)土壤质量比下层(10—20 cm)中的高,土壤养分表现出一定的表聚性^[9]。

(3) 各样地土壤质量的综合得分表明,随着植被恢复年限的增加,土壤质量总体上呈增长趋势。但受人工植被和人为管护的影响,土壤质量也会有所波动。恢复时间从 3~17 a 之间土壤质量显著增加,但恢复 19 a 时显著下降,反映了在人为因素的作用下,土壤质量呈渐变和跳跃性变化的特征^[10]。

3.2 物种多样性随恢复年限的变化

路堤边坡共有 6 种人工植物群落,共发现 72 个自然物种,以绣球小冠花(*Coronilla varia* L.)、狗尾草(*Setaira viridis* (L.) Beauv.)、铁苋菜(*Acalypha australis* Linn.)、香附子(*Rhizoma Cyperi.*)、红花酢酱草(*Oxalis rubra.*)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.)等为主。阴面和阳面边坡的植被种类相似,但阳面边坡植物长势明显优于阴面边坡。

由图 2 可知,随着群落演替的进行,植被物种丰

富度 Margalef 指数、Simpson 指数、S—W 指数及 Pielou 指数均呈增大趋势,即随着植被恢复,植物的物种丰富度、多样性及均匀度越来越高,阳坡、阴坡分别在植被恢复 17 a、19 a 时达到最高水平。但与对照年限 40 a 相比还有一定差距。

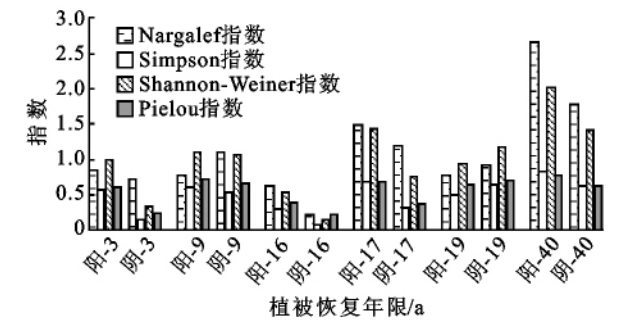


图 2 各样地路堤边坡群落 α 多样性分析
注:阳表示阳坡,阴表示阴坡。

经相关分析(表 6)知,不同年限不同坡向多样性指数和群落丰富度指数、均匀度指数差异显著。物种丰富度 Margalef 指数、S—W 指数与群落重要值呈极显著负相关($P<0.01$),多样性 Simpson 指数与其呈显著负相关($P<0.05$),而均匀度 Pielou 指数与其相关性不明显。

3.3 路堤边坡群落物种多样性与恢复年限和土壤养分的关系

边坡群落物种多样性的变化因恢复时间和土壤养分资源的供给水平而表现出不同的响应。由表 6 可知,物种丰富度 Margalef 指数、多样性 Simpson 指数、S—W 指数与硝态氮和速效磷均呈负相关,其中物种丰富度、多样性 Simpson 指数、S—W 指数与硝态氮呈显著负相关($P<0.05$),相关系数分别为 $-0.631, -0.621, -0.654$,与速效磷相关性不显著;物种丰富度 Margalef 指数、多样性 Simpson 指数、S—W 指数与有机质、铵态氮、全氮均呈正相关,但相关性不明显。Pielou 指数与有机质、硝态氮、全氮、速效磷呈负相关,与铵态氮呈正相关,但相关性均不明显。

表 6 群落物种多样性与恢复年限和土壤养分的相关性

项目	Margalef 指数	Simpson 指数	S—W 指数	Pielou 指数	重要值	有机质	硝态氮	铵态氮	全氮	速效磷
年限	0.752**	0.481	0.635*	0.348	-0.727**	0.422	-0.473	0.615*	0.549	-0.219
Margalef		0.737**	0.888**	0.576	-0.850**	0.385	-0.631*	0.427	0.513	-0.144
Simpson 指数			0.963**	0.966**	-0.587*	0.045	-0.621*	0.177	0.025	-0.278
S—W 指数				0.882**	-0.733**	0.192	-0.654*	0.284	0.227	-0.262
Pielou 指数					-0.479	-0.060	-0.550	0.107	-0.111	-0.358

注:**指在 0.01 水平上显著相关,*指在 0.05 水平上显著相关。

恢复年限与物种丰富度 Margalef 指数、多样性 Simpson 指数、S—W 指数、Pielou 指数均呈正相关,

且与物种丰富度 Margalef 指数呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.752;恢复年限与 S—W 指数呈

显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.635。其余相关性不明显。

由此可知高速公路路堤边坡群落的 α 多样性主要受到恢复年限和土壤中硝态氮含量的影响。此外, 由于边坡人为管护作用较强, 人为因素对群落的 α 多样性也起到决定性作用。

4 结论与讨论

随着恢复年限的延长, 高速公路路堤边坡土壤中的有机质、全氮含量均呈增大趋势(其中: 阴坡 > 阳坡, 上层 > 下层), 且二者之间存在着极显著正相关关系, 恢复 17 a 时达到峰值, 体现出植被恢复对土壤有重要的培肥作用; 同时, 植物对土壤的培肥作用使土壤中铵态氮、硝态氮含量在恢复初期先增加, 随后由于植物的吸收和边坡径流作用, 铵态氮含量明显降低, 恢复 17 a 时达最低值。而硝态氮则一直维持在相对稳定的状态。植被恢复过程中, 恢复年限、土层、坡向是影响土壤养分特征的三大主要因素。全氮含量受恢复年限的影响最明显。有机质、速效磷、铵态氮含量与不同土层及不同坡向间存在一定相关性。

不同恢复年限、不同坡向, 群落的丰富度指数和多样性指数、多样性指数和均匀度指数差异显著。边坡群落的 α 多样性主要受到恢复年限和土壤中硝态氮含量的影响。随着恢复年限的延长, 群落 α 多样性先减小后增大。恢复 16 a 时, 人工植被绣球小冠花占绝对优势, 群落 α 多样性处于最低水平。之后由于自然植被入侵, 人工植被逐渐衰退, 阳坡和阴坡的群落 α 多样性分别在恢复 17 a 和 19 a 后达最高水平。而随着恢复年限的延长, 土壤质量先增大后减小, 在植被恢复 17 a 时达最高水平, 16 a 次之。但不论是群落 α 多样性还是土壤质量水平, 与对照 40 a 相比仍具有一定差距, 说明本次研究的高速公路路堤边坡并未达到

稳定群落, 在较少的人为作用下将朝着自然演替方向进行。

参考文献:

- [1] 许文年, 夏振尧, 戴方喜, 等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用[J]. 中国水土保持, 2005(4): 31-33.
- [2] Vitousek P M, Matson P A, Van Cleve K, et al. Nitrogen availability and nitrification during succession, primary, secondary and old field seres[J]. Plant and Soil, 1989, 11(5): 229-239.
- [3] 宋创业, 郭柯, 刘高焕. 浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 8-13.
- [4] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 602-611.
- [5] 赵平, 彭少麟. 种、种的多样性及退化生态系统功能的恢复和维持研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 132-136.
- [6] Tormo J, Garcia-Fayos P, Bochet E. Relative importance of plant traits and ecological filters in road embankment revegetation under semiarid Mediterranean conditions[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(3/4): 258-264.
- [7] Nelson D W, Sommers L E. Total Carbon, Organic Carbon, Organic Matter[M]// Page A L. Methods of Soil Analysis. Wisconsin, USA: Madison, 1982.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [9] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23.
- [10] 余海龙, 顾卫, 殷秀琴, 等. 高速公路路域边坡人工植被下土壤质量的变化[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 32-36.