

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

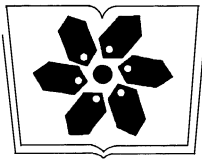
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201201190114

潘树林, 辜彬, 李家祥. 岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性. 生态学报, 2012, 32(20): 6404-6411.

Pan S L, Gu B, Li J X. Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6404-6411.

岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性

潘树林^{1,2}, 辜彬^{3,4,*}, 李家祥³

(1. 宜宾学院矿业与安全工程学院, 宜宾 644007; 2. 长江水环境教育部重点实验室宜宾研究基地, 宜宾 644007;

3. 四川大学生命科学学院, 成都 610064; 4. 四川大学生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610064)

摘要:以深圳市盐田港高速公路岩质边坡上历经 10a 的植被恢复边坡为研究对象,在厚层基材喷附、客土喷附、自然复绿 3 种边坡生态恢复方式下,重点分析和研究了土壤理化性质与酶活性、植物多样性、土壤特性与植物多样性之间的相关性。结果表明:3 种生态恢复方式下,1)土壤含水量、养分与酶活性均呈现出厚层基材喷附边坡>客土喷附边坡>自然复绿边坡的分布差异;2)3 种生态恢复方式的植物群落指数均偏低,群落演替仍处于灌草植物群落阶段;3)土壤特性同植物多样性之间存在明显的相关关系,即土壤速效氮与均匀度指数存在极显著的正相关,与木本层多样性指数存在显著的正相关;土壤全磷与均匀度指数存在显著的负相关;土壤有效磷与丰富度指数、多样性指数及均匀度指数都存在极显著的负相关;土壤全钾与丰富度指数存在极显著的负相关,与草本层多样性指数存在显著的负相关;土壤速效钾与均匀度指数存在极显著的负相关;土壤蔗糖酶活性与草本均匀度指数存在显著的负相关。该调查研究有助于对岩质边坡这类特殊生境下植被恢复基础生态资料的积累,其结果可为边坡生态恢复工程技术方法的开发、设计、施工,调控植被演替速度和预期植被恢复绩效等提供依据。

关键词:公路边坡;生态恢复;土壤特征;植物多样性;相关性

Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes

PAN Shulin^{1,2}, GU Bin^{3,4}, LI Jiaxiang³

1 School of Mining and Safety Engineering, Yibin University, Yibin 644007, China

2 Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment, Ministry of Education, Director of Yibin Research Base, Yibin 644007, China

3 College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China

4 Key Laboratory of Bio-Resources and Eco-Environment of Ministry of Education, College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: Soil is one of the main environmental factors which affects plant community composition and diversity in space and time. Especially during the restoration of rocky slopes, the properties of artificial soil play key roles in determining the generation and development of vegetation. Meanwhile, it is an important factor to assess the performance of slope eco-engineering. In order to evaluate the soil properties and recover vegetation features, field survey was carried out in Yantian Port of Shenzhen City in China, in which highway slopes have been ecologically restored using varied methods since 2002. This area locates in the sub-tropical maritime monsoon climate zone, Where annual rainfall is 948.8 mm and mean annual temperature is 22.4°C. The highway rocky slopes investigated are granite cut slopes and with slope ratio about 1:0.75. Three approaches were applied in the slope vegetation recovery, i. e., thick layer base material spraying method, external-soil spray seeding method and natural restoration, among which the artificial soils were about 10cm thick. Over ten years recovering, the plant communities of all rocky slopes investigated here are composed of woody, shrub and herb layers.

In the present studies, the physic-chemical and enzymatic activity of soil as well as plant diversity were investigated on different restoration patterns. Furthermore, the relationship between soil property and plant diversity was also analyzed. The

基金项目:国家自然科学基金项目(40971057)

收稿日期:2012-01-31; 修订日期:2012-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: amakusa@126.com

results were shown as follows:

(1) The enzymatic activities, contents of water and nutrient in the soil from thick layer base material sprayed slopes were the highest, while those from natural restoration slopes the lowest among three restoration patterns.

(2) There were 6 plant species of 5 genus of 5 families in the natural restoration slope, 7 species of 7 genus of 6 families in the external-soil spray seeding slope, 11 species of 11 genus of 7 families in the thick layer base material spraying slope, and 14 species of 13 genus of 12 families in the natural slope. The plant diversity indices evaluated by species richness (R), the Shannon-Wiener index (H) and Pielou evenness (E) were lower than those of natural slopes, although R and H of thick layer base material sprayed slopes were much higher than those of other two kinds of slopes. This result suggested that those plant communities recovered were still in the early succession stages—herb/shrub stage.

(3) According to the correlation analysis, plant diversity was significantly correlated with the soil properties, i. e., soil available N had significantly positive correlation with E and with H of woody layer; soil available P was highly significantly negative correlated with all plant diversity measures, while soil total P significantly negative to E; soil total K was significantly negative correlated with R and with H of herb layer, while soil available K highly significantly negative to E.

(4) The soil enzymatic activities of urease and sucrase decreased with the order of thick layer base material sprayed, external-soil spray seeded, natural and natural restoration slopes. And activity of soil sucrase showed significant negative correlation with the evenness of herbs.

Based on above mentioned results, it indicated that the thick layer base material spraying approach is more suitable for the restoration of rocky slope.

Key Words: highway rocky slopes; ecological restoration; soil property; plant diversity; correlation

大规模的工程建设和矿山开采等人为活动产生了一类特殊生境——岩质边坡。由于受用地限制,边坡多呈高陡形态,具有极强的不稳定性^[1]。与土质边坡不同,岩质边坡土壤条件差,植被恢复困难。因此,岩质边坡生态恢复的基材配比与性质、工程技术方法、物种选择与配置、前期养护管理等是解决植被恢复自然生态平衡问题根本,而恢复后植被的效果是衡量成功与否的直接表现。

目前国内对岩质边坡生态恢复的研究取得了不少成果,但仅集中在不同添加物、不同配比、喷射工艺对其性能影响等^[2-4],而对岩质边坡植被恢复土壤特征与植被生长之间的调控机制方面的相关研究并不多,特别是较长时间尺度不同恢复方式下的植物多样性与土壤特性的调查研究。

本文选取深圳市盐田港高速公路边坡作为研究对象,对其恢复 10a 后边坡植被进行样方调查,并取回样方土壤带回实验室进行理化性质测定,分析岩质边坡修复中植被恢复状况和土壤特性,并深入探讨土壤的理化性质和土壤酶活性与边坡植被恢复的关系。该调查研究有助于对岩质边坡这类特殊生境下植被恢复基础生态资料的积累,其结果可为边坡生态恢复工程技术方法的开发、设计、施工,调控植被演替速度和预期植被恢复绩效等提供依据,最终目的是为岩质边坡生态恢复提供新的工艺、工法,科学的理论基础和实用的技术方法。

1 研究地概况

深圳盐田港属亚热带海洋性气候。平均年温 22.4 °C (极端高温 38.7 °C、极端低温 0.2 °C), 平均年降雨量 948.8 mm、平均日暴雨量 282 mm (极端暴雨量 385.8 mm), 平均年台风 416 次,多集中在 4—9 月,尤其 7—9 月多台风暴雨。

深圳盐田港高速公路边坡为中风化花岗岩岩质边坡,坡比为 1:0.75,坡向为 S180,海拔 70 m。为了延缓岩石风化进程、维护道路安全、改善景观等,边坡于 2002 年采用客土喷附和厚层基材喷附的方式实施生态恢复,两种恢复方式喷附的人工土壤厚度均为 10 cm,添加物种类与施工条件等类似。坡面上层采用客土喷混植生技术,中层采用厚层基材喷混植生技术进行生态恢复,中间由一条 4—5 m 宽的马道隔开,紧邻客土喷附

边坡西侧为自然复绿边坡,即未实施人工干预的生态恢复坡体(图1),为边坡生态恢复的研究提供了较好的对比样本。



图1 研究地分布图(从左到右分别为自然复绿、客土喷附、厚层基材喷附)

Fig. 1 Distribution of study (From left to right: natural restoration, external-soil spray seeding, thick layer base material spraying)

2 研究方法

2011年4—5月,对深圳盐田港边坡进行了植被调查和土样的采集工作。采用机械布点和典型抽样方法对边坡进行常规生态学调查和样地的布局,样方采用:草本1 m×1 m、灌木5 m×5 m、乔木10 m×10 m,共设置乔木样方10个、灌木样方10个、草本样方20个。同时按照“W”形采样法采集土壤样品,样点取表层土样(当土层深度大于15 cm时可按0—10 cm和10 cm以下取两层次土样),将所取的表层土样充分混合,每个样点取样重量约1 kg,用于土壤理化性质与土壤酶活性的测定,每种生态恢复方式设置4个采样点,各采样点取样3次。同时测量厚层基材喷附、客土喷附和自然复绿边坡的土层厚度。

本次研究植物多样性指数采用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数^[5],各指数按照下式计算:

$$\text{Margalef 丰富度指数} \quad R = (S - 1) / \ln(n)$$

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

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad E = H / \ln(S)$$

式中, S 为群落中的总物种数; n 为群落中全部种的总个体数; n_i 为各个物种的个体数; $P_i = n_i / n$ 。

土壤理化性质测定:土壤(风干土)含水量(W)用烘干法;土壤有机质(TOM)采用重铬酸钾容量法;土壤全氮(TN)用半微量凯氏法;土壤速效氮(RaN)用氯化钾浸提-蒸馏法;土壤全磷(TP)用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法;土壤有效磷(EP)用双酸浸提-钼锑抗比色法;土壤全钾(TK)用氢氧化钠碱熔-火焰光度法;采用乙酸浸提-火焰光度法测定土壤速效钾(RaK)。土壤酶活性表示方法为:脲酶以37℃在脲酶作用下24 h内每克土中生成的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量表示(mg/g);蔗糖酶以37℃在蔗糖酶作用下24 h内每克土中生成的葡萄糖质量表示(单位:mg/g)。

利用 Excel 和 SPSS 13.0 软件进行实验数据处理。

3 结果

3.1 土壤理化性质与土壤酶活性

土壤理化性质与土壤酶活性,对植物的生长和生产力具有很明显的影响。土壤不但影响植物的生长发育,对植物群落的发生、发育和演替的速度具有明显的影响,而且能对整个植被系统的结构和生产力等产生显著影响。

从表1可以看出,作为对照的周边自然边坡与人工修复边坡相比较,土壤含水量、有机质含量、全氮含量、速效氮含量、全钾含量、脲酶活性、蔗糖酶活性的含量高,表明人工修复边坡土壤的质量还达不到周边自然边坡的水平,短时间的人工修复虽在一定程度上使边坡植被得到恢复,人工土壤得到改善,但还处在结构不良、保水性差、有机物质和土壤养分转化储存能力弱的阶段,仍需较长的时间来恢复和改善。

3.1.1 土壤含水量

土壤水是土壤主要组成部分之一,它对土壤的形成过程、土壤坡面的发育和土壤中物质和能量的运移都

有重要的影响,是植物生长和生存的物质基础。由表 1 可知,对土壤的含水量来说,周边自然山体>厚层基材喷附的边坡>客土喷附的边坡>自然复绿边坡。

表 1 3 种恢复方式及周边自然山体土壤理化性质和土壤酶活性
Table 1 Soil properties and enzyme activity Of three recovery ways and natural slope

特性分类 Characteristics classification	厚层基材喷附边坡 Thick layer base material spraying		客土喷附边坡 External-soil spray seeding		自然复绿边坡 Natural restoration		周边自然山体 Natural slope	
	均值 Mean value	标准误 Standard error	均值 Mean value	标准误 Standard error	均值 Mean value	标准误 Standard error	均值 Mean value	标准误 Standard error
含水量/% soil moisture	19.43	0.6702	18.75	0.3155	17.34	0.1890	25.08	0.1135
有机质/(mg/kg) Organic matter	67.63	0.7791	45.64	0.2678	19.04	0.0925	129.17	0.1093
全氮/(g/kg) Total nitrogen	2.45	0.075	2.02	0.057	0.94	0.0217	2.93	0.0402
速效氮/(mg/g) Exchangeable nitrogen	11.18	0.3105	10.55	0.1982	13.08	0.0593	17.93	0.0714
全磷/(g/kg) Total phosphorus	0.36	0.0361	0.37	0.0335	0.27	0.0201	0.093	0.0016
有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	15.21	0.2863	45.42	0.4374	5.07	0.0237	1.78	0.0335
全钾/(g/kg) Total potassium	18.95	0.3012	32.02	0.1912	32.96	0.0941	34.75	0.0849
速效钾/(mg/kg) Exchangeable potassium	173.34	0.4692	163.02	0.1772	73.34	0.2212	103.73	0.0551
脲酶/(mg/g) Soil urease	0.37	0.0343	0.35	0.0242	0.25	0.0132	0.30	0.0136
蔗糖酶/(mg/g) Soil sucrase	44.34	0.3057	43.22	0.1554	29.54	0.1410	15.94	0.0663

每种生态恢复方式设置 4 个采样点,每个样点取样 3 次

3.1.2 土壤养分

土壤有机质是反映土壤肥力高低的一个重要指标。由表 1 可知,对土壤有机质含量来说,周边自然山体>厚层基材喷附的边坡>客土喷附的边坡>自然复绿边坡。对土壤速效钾含量来说,厚层基材喷附边坡>客土喷附边坡>自然复绿边坡。

土壤全氮、全钾含量通常用于衡量土壤氮素、磷素的基础肥力。由表 1 可知,对土壤全氮含量来说,周边自然山体>厚层基材喷附的边坡>客土喷附的边坡>自然复绿边坡;对土壤有全氮含量来说基本稳定,含量在 0.27—0.37 g/kg 之间变化,厚层基材喷附和周边自然山体的边坡相对略高;对土壤全钾含量来说,周边自然山体>自然复绿边坡>客土喷附的边坡>厚层基材喷附的边坡。

土壤速效养分是提供植物生活所必需的易被作物吸收利用的营养,是评价土壤自然肥力的主要因素之一。由表 1 可知,对土壤速效氮含量来说,4 种坡体土壤中,速效氮的含量相差不大,表明速效氮素的利用与吸收无太大差异;对于土壤有效磷的含量来说,采用客土喷附修复的边坡土壤远远高于厚层基材喷附和自然复绿的边坡;对土壤速效钾含量来说,厚层基材喷附边坡>客土喷附边坡>自然复绿边坡。

3.1.3 土壤酶活性

土壤酶催化土壤中的一切生物化学反应,对土壤肥力有重要影响,是土壤质量变化中比较敏感的一种生物学指标,与植被生长密切相关^[6]。由表 1 可知,对土壤脲酶和蔗糖酶活性来说,厚层基材喷附的边坡>客土喷附的边坡>周边自然山体>自然复绿边坡,且厚层基材喷附和客土喷附修复边坡土壤脲酶和蔗糖酶活性都相差不大,说明两处边坡现处的植被群落阶段的土壤氮代谢和土壤碳氮转化能力没有本质差异,且与周边自

然山体比较时,土壤中碳、氮代谢能力比周边自然山体还要高。

3.2 植物多样性

3.2.1 群落结构组成

对 3 种恢复方式边坡调查得出其群落结构组成如表 2。在自然复绿边坡上出现的植物共 6 种,分属 5 科 5 属。在客土喷附边坡上出现的植物共 7 种,分属 6 科 7 属。在厚层基材喷附边坡上出现的植物共 11 种,分属 7 科 11 属。在周边山体上出现的植物共 14 种,分属 12 科 13 属。与周边山体比较,从群落结构组成来看,周边山体>厚层基材喷附>客土喷附>自然复绿,说明经过 3 种生态恢复方式后,植物群落结构还是与周边山体有较大差距。

表 2 3 种恢复方式及周边自然山体的群落结构组成

恢复方式	植物类型	物种名	科	属
Recovery way	Plant type	Species name	Branch	Belong
自然复绿	乔木	马占相思 <i>Acacia mangium</i>	含羞草科	合欢属
	乔木	台湾相思 <i>Acacia richii</i>	含羞草科	合欢属
	乔木	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科	盐肤木属
	乔木	石楠 <i>Photinia serrulata</i>	蔷薇科	石楠属
	灌木	锡叶藤 <i>Tetracera asiatica</i>	五桠果科	锡叶藤属
	草本	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	禾本科	芒属
客土喷附	乔木	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科	盐肤木属
	乔木	朴树 <i>Celtis sinesis</i>	榆科	朴属
	灌木	五色梅 <i>Lantana camara</i>	马鞭草科	马缨丹属
	藤本	葛藤 <i>Pueraria iobata</i>	豆科	葛藤属
	草本	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	禾本科	芒属
	草本	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	禾本科	狗牙根属
厚层基材喷附	草本	蟛蜞菊 <i>Wedelia chinensis</i>	菊科	蟛蜞菊属
	乔木	南洋楹 <i>Albizia falcata</i>	含羞草科	合欢属
	乔木	朴树 <i>Celtis sinesis</i>	榆科	朴属
	乔木	台湾相思 <i>Acacia richii</i>	含羞草科	合欢属
	乔木	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科	盐肤木属
	灌木	五色梅 <i>Lantana camara</i>	马鞭草科	马缨丹属
	灌木	牡荆 <i>Vitex negundo</i>	马鞭草科	牡荆属
	藤本	葛藤 <i>Pueraria lobata</i>	豆科	葛藤属
	草本	弯叶画眉 <i>Eragrostis ssp. s</i>	禾本科	画眉草属
	草本	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	禾本科	芒属
	草本	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	禾本科	狗牙根属
	草本	蟛蜞菊 <i>Wedelia chinensis</i>	菊科	蟛蜞菊属
周边山体	乔木	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科	盐肤木属
	乔木	台湾相思 <i>Acacia richii</i>	含羞草科	合欢属
	乔木	南洋楹 <i>Albizia falcata</i>	含羞草科	合欢属
	乔木	朴树 <i>Celtis sinesis</i>	榆科	朴属
	乔木	青冈 <i>C. nubium</i>	壳斗科	青冈属
	乔木	山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	大戟科	乌柏属
	乔木	野漆树 <i>Toxicodendron succedaneum</i>	漆树科	漆树属
	灌木	鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	五加科	鹅掌柴属
	灌木	桃金娘 <i>Rhodomyrtus tomentosa</i>	桃金娘科	番石榴属
	灌木	梅叶冬青 <i>Ilex asprella</i>	冬青科	冬青属
	灌木	水同木 <i>Ficus fistulosa</i>	桑科	榕属
	灌木	五色梅 <i>Lantana camara</i>	马鞭草科	马缨丹属
	草本	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	禾本科	狗牙根属
	草本	蟛蜞菊 <i>Wedelia chinensis</i>	菊科	蟛蜞菊属

3.2.2 植物多样性

对深圳盐田港边坡的多样性指数结果分析见表3。从表中可以看出,植物群落丰富度指数和物种多样性指数都表现出基本一致的分布差异,即周边山体>厚层基材喷附边坡>自然复绿边坡>客土喷附边坡,说明3种生态修复方式的整体群落结构单调不富于变化,植物群落结构较为简单。厚层基材喷附边坡指数中,除均匀度相差不大之外,其丰富度、多样性指数远高于其他修复方式的边坡,表明不同修复方式之间群落演替快慢存在严重差异。与周边山体相比,3种生态恢复方式的植物群落丰富度、多样性、均匀度指数均偏低,说明植物的演替阶段比较低。研究表明,经过生态恢复,边坡复绿取得了一定的效果,但是效果并不明显,植物群落指数均偏低,群落演替仍处于灌草植物群落阶段。

表3 3种恢复方式及周边自然山体多样性指数

Table 3 The diversity index of three recovery ways and natural slope

恢复式方 Recovery way	丰富度指数 Richness index (<i>R</i>)				多样性指数 Shannon-Wiener index (<i>H</i>)				均匀度指数 Evenness index (<i>E</i>)			
	草本 Herb layer		木本 Woody layer		草本 Herb layer		木本 Woody layer		草本 Herb layer		木本 Woody layer	
	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error	标准误 Standard error
厚层基材喷附边坡 Thick layer base material praying	8.12	0.2442	14.12	0.2015	1.27	0.0279	1.56	0.0268	0.91	0.0295	0.87	0.0227
客土喷附边坡 External-soil spray seeding	3.83	0.0310	1.39	0.02263	0.52	0.0282	0.56	0.0264	0.76	0.0291	0.81	0.0255
自然复绿边坡 Natural estoration	5.99	0.0458	9.59	0.0406	1.04	0.0275	1.41	0.0314	0.95	0.0227	0.88	0.0377
周边山体 Natural slope	11.46	0.3449	20.23	0.2536	1.57	0.0338	2.13	0.0513	1.34	0.0357	1.68	0.0362

3.3 土壤特性与植物多样性之间的相关性

由表4可知,土壤特性同植物多样性之间存在明显的相关关系。土壤速效氮与均匀度指数存极显著的正相关,与木本层多样性指数存显著的正相关;土壤全磷与均匀度指数存显著的负相关;土壤有效磷与丰富度指数、多样性指数及均匀度指数都存极显著的负相关;土壤全钾与丰富度指数存极显著的负相关,与草本层多样性指数存显著的负相关;土壤速效钾与均匀度指数存极显著的负相关;土壤蔗糖酶活性与草本均匀度指数存显著的负相关。

表4 3种恢复方式土壤特性与植物多样性之间的相关性

Table 4 Correlation of soil characteristics and plant diversity on three recovery ways

土壤特性指标 Soil characteristics	丰富度指数 Richness index (<i>R</i>)		多样性指数 Shannon-Wiener index (<i>H</i>)		均匀度指数 Evenness index (<i>E</i>)	
	草本层 herb layer		木本层 woody layer		草本层 herb layer	
	草本层 herb layer	木本层 woody layer	草本层 herb layer	木本层 woody layer	草本层 herb layer	木本层 woody layer
含水量 soil moisture	0.315	0.162	0.105	-0.059	-0.389	-0.325
有机质 Organic matter	0.448	0.302	0.247	0.085	-0.252	-0.186
全氮 Total nitrogen	0.272	0.118	0.060	-0.104	-0.430	-0.367
速效氮 Exchangeable nitrogen	0.243	0.393	-0.44	0.585 *	0.822 **	0.782 **
全磷 Total phosphorus	-0.048	-0.205	-0.261	-0.415	-0.695 *	-0.645 *
有效磷 Available phosphorus	-0.858 **	-0.928 **	-0.948 **	-0.987 **	-0.984 **	-0.993 **
全钾 Total potassium	-0.832 **	-0.735 **	-0.694 *	-0.567	-0.259	-0.325
速效钾 Exchangeable potassiumRaK	0.212	-0.363	-0.416	-0.560	-0.805 **	-0.761 **
脲酶 Soil urease	0.152	-0.006	-0.063	-0.225	-0.538	-0.479
蔗糖酶 Soil sucrase	0.064	-0.093	-0.151	-0.311	-0.610 *	-0.554

4 讨论

4.1 土壤特性变化

深圳盐田港高速公路岩质边坡不同生态恢复方式下土壤含水量、养分与酶活性均呈现出厚层基材喷附边坡>客土喷附边坡>自然复绿边坡的分布差异的主要原因是:1)不同生态恢复方式造成了植被覆盖率和植物凋落物的差异,进而引起地表土层厚度的变化,调查发现厚层基材喷附边坡、客土喷附边坡、自然复绿边坡土层厚度分别为12—15、6—8、6—9 cm。2)植被对降水具有截流作用,可减缓水分渗入土层速度、减弱地表径流、减少地表水分蒸发量,进而降低地表的水土流失,起到保水、保肥的作用。

已有研究也表明^[7-9],植被覆盖对土壤水分有明显的影响,不同植被下的土壤含水状况存在明显差异,植被覆盖度与土壤含水量呈正相关。而土壤有机质最主要来源是植物根系分泌物与地上凋落物^[10]。植物凋落物量对土壤速效钾含量有重要的影响,两者呈极显著的正相关^[11]。所以,岩质边坡人工土壤重建生境条件下,土壤含水量、养分与酶活性与植被覆盖率、植被类型及植物凋落物量也呈现相似的规律或趋势。

厚层基材喷附边坡因为植被恢复状况良好,植被的覆盖率较高,土层相对较厚,且土壤中枯枝落叶等凋落物含量也比较高,随着根系分泌物的分解作用,释放出养分归还土壤,所以土壤品质相对良好,但还不能与周边自然山体相比。客土喷附边坡的土层与厚层基材喷附边坡相比相对较薄、轻,且恢复过程中又出现土壤脱落等现象,所以植被覆盖率较差,土壤中凋落物含量也较底。虽然自然复绿边坡的土层厚度为6—9 cm,一些周边自然物种的入侵使得植被恢复也具一定多样性和盖度不错,但其土壤是贫瘠性砂质花岗岩风化土,所以土壤质量不及添加了人工土壤的厚层基材喷附边坡和客土喷附边坡。

4.2 岩质边坡植物多样性

近来有许多学者对岩质边坡植物多样性进行了研究,康艳^[12]等在沪(上海)陕(陕西)高速公路信阳至南阳段4种路基边坡上进行植物群落调查研究,结果表明不同群落的物种多样性指数、丰富度指数及均匀度指数存在显著差异。王倩^[13]等以遂渝铁路边坡植物群落为研究对象,自然边坡为对照,结果表明自然边坡物种多样性明显大于铁路边坡,总体上自然边坡植被恢复优于铁路边坡。

深圳盐田港高速公路岩质边坡经3种生态恢复方式恢复后,恢复时间不到10a,且立地条件恶劣,故群落构成与周边山体还存在很大差异,植物种类数目在各类边坡上差别较大,但植物种类都比较单一,不同区域植物的生长状况不一,植被分布并不均匀,且3种生态恢复方式植物群落指数均偏低,所以,群落演替仍处于灌草植物群落阶段。因此,人工修复边坡群落结构及稳定性在短时间内还很难达到周边自然山体的状态^[14]。

植被恢复是在破坏了山体局部生境条件下进行的,重建土壤特性与自然山体存在差异,尽管如此,就恢复地而言,植物多样性与土壤特性间存在明显的相关关系,这与一些学者得到的研究结果是一致的。刘旭^[15]通过对川西亚高山针叶林植物多样性与土壤理化性质关系的研究表明,乔木层 Shalmon-Wiener 指数与全钾呈显著负相关, Margalef 指数与有效磷、全钾呈正相关;灌木层 Shannon-Wiener 指数与土壤全氮、速效钾呈极显著正相关, Margalef 指数与全氮、速效钾呈正相关;草本层 Shannon-Wiener、Pielou 指数都与全氮呈负相关。陈芳^[16]对莽山植物物种多样性及其土壤理化性质关系的研究表明,物种多样性指数与土壤理化性质之间的相关性基本存现出负相关关系。

References:

- [1] Tan D L. Investigating of the technology on ecological protection of highway slope. Chinese Hi-tech Enterprises, 2009, (15): 175-176.
- [2] Li S C, Sun H L, Yang Z R, He L, Cui B S. Effect of straw fiber, polyacrylamide and super absorbent polymer eco-engineering on rock slope protection. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 257-267.
- [3] Gao G J, Yuan J G, Han R H, Xin G R, Yang Z Y. Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration. Ecological Engineering, 2007, 30(4): 303-311.
- [4] Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences. Biodiversity Studies Series No.1 Principles and Methodologies of Biodiversity Studies. Beijing: China Science and Technology Press.

- [5] Zhou S T, Gu B, Cai S, Han Y. Application of soil protecting wing technics in restoration of lithoid slope. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, (2): 192-195.
- [6] Zhang Z Q, Ai Y W, Yang Y Y, Liu H, Pei J, Zeng L X. Soil microbial counts and enzyme activities on railway slope. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 61-66.
- [7] Wang S Y, Su W C, Fan X R, Li C, Shi X T. Influence factors of soil moisture in karst rocky desertification region — a case study of puding county, Guizhou Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(3): 171-175.
- [8] Deng J M, Yin H Y, Yu C B. Determination of moisture of soils covered by typical vegetation in hot-dry valley in panzhihua at the end of dry season. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(34): 21013-21015.
- [9] Hu T J, Zhou Q W, Zhou Y G, Feng Y, Song P. Soil water contents of different vegetation types in the ecotone between dry-hot valley and mountain forest in upper reaches of the Minjiang River. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011, (15): 258-261.
- [10] Chapin F S III, Mooney H A, Chapin M C, Maston P. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [11] Lavelle P, Spain A V. *Soil Ecology*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [12] Kang Y, Yang X M, Liu R Q, Tian G X. Analysis of the relationship between species diversity and soil-property of highway slope. *Soil and Water Conservation in China*, 2011, (6): 50-53.
- [13] Wang Q, Ai Y W, Pei J, Liu J, Li W, Da Z J, Guo P J. Seasonal dynamics and spatial distribution of herbage diversity on the slopes of Suiyu railway. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6892-6900.
- [14] Chen J X. Characteristics of species diversity of plant community on the road side-slope in mountainous area in Yanqing County. *Soil and Water Conservation in China*, 2010, (2): 3-5.
- [15] Liu X. Study on the Relationship Between Plant Species Diversity and Physicochemical Property of Soil in Subalpine Coniferous In Western Sichuan [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [16] Chen F. Study on the relationship between plant diversity and soil properties in Mangshan Nature Reserve [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.

参考文献:

- [1] 谭东林. 公路边坡生态防护技术初探. *中国高新技术企业*, 2009, (15): 175-176.
- [2] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 何磊, 崔保山. 秸秆纤维、聚丙烯酰胺及高吸水树脂在岩石边坡植被护坡中的效应. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 257-267.
- [4] 中国科学院生物多样性委员会. 生物多样性研究系列专著 1. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141-165.
- [5] 周顺涛, 辜彬, 蔡胜, 寒烟. 挡土翼工法在石质边坡生态恢复中的应用研究. *水土保持通报*, 2009, (2): 192-195.
- [6] 张志卿, 艾应伟, 杨雅云, 刘浩, 裴娟, 曾丽霞. 铁路边坡土壤微生物数量和酶活性研究. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 61-66.
- [7] 王思砚, 苏维词, 范新瑞, 李灿, 史雪廷. 喀斯特石漠化地区土壤含水量变化影响因素分析——以贵州省普定县为例. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 171-175.
- [8] 邓建梅, 尹海英, 余传波. 攀枝花地区干热河谷干季末期典型植被的土壤含水量研究. *安徽农业科学*, 2011, 39(34): 21013-21015.
- [9] 胡天均, 周启文, 周义贵, 冯毅, 宋鹏. 岷江上游山地森林/干旱河谷交错带几种植被类型土壤含水量研究. *现代农业科技*, 2011, (15): 258-261.
- [12] 康艳, 杨晓明, 刘仁庆, 田国行. 高速公路边坡物种多样性与土壤特性的关系分析. *中国水土保持*, 2011, (6): 50-53.
- [13] 王倩, 艾应伟, 裴娟, 刘浩, 李伟, 答竹君, 郭培俊. 遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征. *生态学报*, 2010, 30(24): 6892-6900.
- [14] 陈敬贤. 延庆山区公路边坡植物群落物种多样性特征. *中国水土保持*, 2010, (2): 3-5.
- [15] 刘旭. 川西亚高山针叶林植物多样性与土壤理化性质关系的研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [16] 陈芳. 莽山植物物种多样性及其土壤理化性质关系的研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元