

深圳盐田港公路边坡生态恢复土壤特性 与植物多样性的研究^①

潘树林^{1,2}, 辜彬^{3*}

(1 宜宾学院矿业与安全工程学院, 四川宜宾 644007; 2 长江水环境教育部重点实验室宜宾研究基地, 四川宜宾 644007;

3 四川大学生命科学学院, 成都 610064)

摘要: 以深圳市盐田港高速公路岩质边坡上历经十年的植被恢复边坡为研究对象, 在厚层基材喷附边坡、客土喷附边坡、自然复绿边坡不同生态恢复方式下, 重点分析和研究了土壤理化性质、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: 不同生态恢复方式下, 土壤理化性质与酶活性都表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规律性; 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, 植物多样性指数和丰富度指数都偏低, 群落演替还处于初期的灌草植物群落阶段; 土壤特性同植物多样性之间存在明显的正负相关关系。土壤速效氮与均匀度指数有极显著的正面效应, 与多样性指数有显著的正面效应; 土壤全磷与均匀度指数有显著的负面效应; 土壤有效磷与丰富度指数、多样性指数和均匀度指数都有极显著的负面效应; 土壤全钾与丰富度指数有极显著的负面效应, 与草本多样性指数有显著的负面效应; 土壤速效钾与均匀度指数有极显著的负面效应; 土壤蔗糖酶活性与草本均匀度指数有显著的负面效应。提出了深圳高速公路边坡生态恢复的植物配置、工艺及工法的改进建议。

关键词: 公路边坡; 生态恢复; 土壤特征; 植物多样性

中图分类号: TP79

随着我国经济的快速发展和城市化进程的不断加快, 大规模的工程建设和矿山开采等人为活动产生了大量裸露的岩质边坡, 破坏了城市景观和生态格局, 影响了社会的和谐发展。因此, 对岩质边坡的防护不仅是水土保持的需要, 也是社会、经济、城市建设的需要。边坡工程稳定性要求较高, 而尽快恢复自然生态平衡才是解决问题的根本。

目前国内对岩质边坡植被恢复土壤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^[1-2], 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。因此, 系统深入研究岩质边坡修复中的植被恢复状况和土壤特性, 探索岩质边坡植被恢复土壤特征与植被之间的关系, 对工程设计、人工土壤配比、植物配置、后期维护都有重大的实际意义, 为人为调控植被演替速度和预期植被恢复绩效提供理论基础。

通过对深圳市盐田港高速路边坡进行调查研究,

可对岩质边坡生态恢复的工法进行比较研究, 同时可对岩质边坡现有的一些现象进行科学分析。最终目的是为切实进行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^[3-4]。

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℃(极端高温 38.7℃、极端低温 0.2℃), 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 41 次, 多集中在 4—9 月, 尤其 7—9 月多台风暴雨。深圳盐田港广泛分布着花岗岩、变质岩、石英砂岩、变质粉砂岩、板岩、炭质板岩、砂砾岩、花岗质砾岩以及在这一时期侵入的火山岩。区域内大多为断裂构造, 并伴有褶皱。

深圳盐田港高速公路边坡为岩质边坡。为了改善裸露坡面造成的景观污染, 边坡于 2002 年实施生态恢复。坡面上层采用客土喷混植生技术, 中层采用厚

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971057)资助。

* 通讯作者(amakusa@126.com)

作者简介: 潘树林(1970—), 男, 四川宜宾人, 硕士, 副教授, 主要从事生态环境研究。E-mail: pslytq@yahoo.com.cn

层基材喷混植生技术进行生态恢复，中间由一条 4~5 m 宽的水泥路隔开，下层为自然复绿，周边有未实施生态恢复的坡体，为边坡生态恢复的研究提供了较好的对比样本。现今，该坡体进行生态恢复已有近十年，不同样区生态恢复状况及植被、土壤演替等状况已截然不同。该边坡恢复工程是当时国内早期的边坡生态恢复实践，对其进行分析研究有助于对岩质边坡生态恢复技术进行科学评价，总结经验教训，同时有助于今后更科学、更可行地进行岩质边坡生态恢复实践。

2 研究方法

2.1 采样设置

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。边坡植物种类及样地群落类型调查样地采用：草本 1 m × 1 m，灌木 5 m × 5 m，乔木 10 m × 10 m。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，每种生态恢复方式设置 3 个采样点。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 > 15 cm 时可按 0~10 cm 和 10 cm 以下取两层次土样)，然后将所取的多样点表层土样充分混合，每个样方内取样重量为 1 kg 左右，用于土壤理化性质与土壤酶活性的测定。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。

2.2 测定项目和测定方法

本次研究植物多样性指数采用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数，各指数按照下式计算：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 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)用烘干法测定；土壤有机质(TOM)采用重铬酸钾容量法测定；土壤全氮(TN)用半微量凯氏法测定；土壤速效氮(AN)用氯化钾浸提-蒸馏法测定；土壤全磷(TP)用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定；土壤有效磷(AP)用双酸浸提-钼锑抗比色法测定；土壤全钾(TK)用氢氧化钠碱熔-火焰光度法测定；土壤速效钾(AK)采用乙酸浸提-火焰光度法测定。土壤酶活性表示方法为：脲酶(Ure)，37℃ 在脲酶作用下 24 h 内每克土中生成的 NH₃-N 质量表示(mg/g)；蔗糖酶(Suc)，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(mg/g)^[5-6]。

2.3 数据处理

利用 Excel 和 SPSS 软件进行试验数据处理。

3 结果与分析

3.1 土壤理化性质与土壤酶活性

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、速效氮、全钾的值均较大，表明人工修复边坡群落生态系统中土壤的质量还达不到自然演化几十年甚至上百年之久的群落生态系统的水平，短时间的人工修

表 1 不同恢复方式及周边自然边坡土壤理化性质和土壤酶活性
Table 1 Soil properties and enzyme activities under different recovery ways and natural slopes

土壤特性	厚层基材喷附边坡		客土喷附边坡		自然复绿边坡		周边自然山体	
	均值	标准误	均值	标准误	均值	标准误	均值	标准误
含水量(g/kg)	194.30	6.702 0	187.50	3.155 0	173.40	1.890 0	250.80	1.135 0
有机质(mg/kg)	67.63	0.779 1	45.64	0.267 8	19.04	0.092 5	129.17	0.109 3
全氮(g/kg)	2.45	0.075 0	2.02	0.057 0	0.94	0.021 7	2.93	0.040 2
速效氮(mg/g)	11.18	0.310 5	10.55	0.198 2	13.08	0.059 3	17.93	0.071 4
全磷(g/kg)	0.36	0.036 1	0.37	0.033 5	0.27	0.020 1	0.093	0.001 6
有效磷(mg/kg)	15.21	0.286 3	45.42	0.437 4	5.07	0.023 7	1.78	0.033 5
全钾(g/kg)	18.95	0.301 2	32.02	0.191 2	32.96	0.094 1	34.75	0.084 9
速效钾(mg/kg)	173.34	0.469 2	163.02	0.177 2	73.34	0.221 2	103.73	0.055 1
脲酶(mg/g)	0.37	0.034 3	0.35	0.024 2	0.25	0.013 2	0.30	0.013 6
蔗糖酶(mg/g)	44.34	0.305 7	43.22	0.155 4	29.54	0.141 0	15.94	0.066 3

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,但还处在土壤紧实、结构不良、保水性差、有机物质和土壤养分转化储存能力弱、土壤酶活性相对较低的阶段,仍需较长的时间来恢复和改善。

3.1.1 土壤含水量 土壤水是土壤的最主要组成部分之一,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。可能由于周边自然山体、厚层基材喷附的边坡与客土喷附边坡相比,植被恢复状况良好,植被的覆盖率较高。草丛、树冠对降水具有的截流作用,使得水分慢慢渗入土层,减弱了地表径流,起到储存和涵养水源作用,同时树冠对太阳辐射具有遮蔽作用,导致地表温度较低,减少了地表水分蒸发量。而自然复绿边坡土壤层是经花岗岩风化后形成的,土壤层较薄,保水效果较差。

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。可能由于采用厚层基材喷附的边坡比客土喷附的边坡植被恢复状况良好,植被的覆盖率较高,由于草本和木本植物的覆盖,大大增加了植物生物量,且土壤中枯枝落叶等凋落物含量又比较高,随着根系分泌物的分解作用,释放出养分归还土壤,所以有机质含量高,但还不能与周边自然山体土壤中有机质的含量相比。自然复绿边坡位于坡顶,一些周边自然物种的入侵使得植被恢复状况也不错,但始终没有采取相应的施工工艺去修复,与采用厚层基材喷附和客土喷附修复方式的初始人工土壤添加及提供合理有机质和养分配比的边坡相比,有机质的积累和贮存能力还不强,含量相对较低。

土壤养分是土壤提供的植物生长所必需的营养元素,能被植物直接或者转化后吸收,是植物生长发育所必需的物质基础^[7]。由表 1 可知,对土壤全氮来说,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,全氮含量变化规律同有机质变化规律类似,主要是因为土壤中的氮素有 99% 以上来源于有机质,所以,土壤有机质含量的加大,可以间接加大土壤氮素含量。对土壤全磷来说基本稳定,3 种恢复边坡含量在 0.27 ~ 0.37 g/kg 之间变化。对土壤全钾来说,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,可能由于采用

厚层基材喷附的边坡比客土喷附的边坡乔、灌木植被丰富度较高,生长状况较好,分解钾的能力很强,养分归还率较低,从而造成全钾较小;但它们的全磷都相差不大,表明无论是以草本为主的植物群落,还是乔、灌、草的复合植物群落,它们固定磷的能力无较大差别。

土壤速效养分是提供植物生长所必需的易被作物吸收利用的营养元素,是评价土壤自然肥力的主要因素之一。由表 1 可知,对土壤速效氮来说,4 种坡体土壤中,速效氮相差不大,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,可能是由于客土喷附的人工土壤相对较薄、轻,且植被恢复过程中又出现土壤脱落、滑坡等现象,但初始土壤本身速效磷较高,植物以草本为主,草本对有效磷的吸收不如乔、灌、草组成的复合植物群落。对土壤速效钾来说,厚层基材喷附边坡 > 客土喷附边坡 > 自然复绿边坡,因为土壤有机质能有效地改善土壤理化性状、增强土壤的缓冲能力,同时有机质分解产生的有机酸还能促进土壤中矿质养分的溶解,避免难溶性的沉淀产生,故能减少交换钾的固定,从而使速效钾的含量增加,所以,速效钾含量与其有机质含量变化相似。

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^[8]。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,表明两种土壤中的酶活性均较好。

3.2 植物多样性

3.2.1 群落结构组成 对自然复绿边坡的调查得出,在此坡上出现的植物共 8 种,分属 6 科 6 属。其中乔木有 4 种,分别是含羞草科合欢属的马占相思、台湾相思,漆树科盐肤木属的盐肤木,蔷薇科石楠属石楠;灌木有 1 种,为五桠果科锡叶藤属的锡叶藤;草本有 2 种,分属禾本科的芒草,还有蕨类。

对客土喷附边坡的调查得出,在此边坡上出现的植物种类共有 7 种,分属 6 科 7 属。乔木为 2 种,分

属 2 科 2 属,分别为漆树科的盐肤木、榆科朴属的朴树;灌木有 1 种,为马鞭草科马缨丹属的五色梅;藤本有 1 种,为豆科葛藤属的葛藤;草本有 3 种,分属 2 科 3 属,分别是禾本科的芒草、狗牙根和菊科的蓼蓟菊。

对厚层基材喷附边坡的调查得出,在坡上出现的植物种共 11 种,分属 7 科 10 属。其中乔木植物共 4 种,分属 3 科 3 属,分别是含羞草科合欢属的南洋楹、台湾相思,榆科朴属的朴树,漆树科盐肤木属的盐肤木;灌木植物共 2 种,分属 1 科 2 属,分别是马鞭草科马缨丹属的五色梅和牡荆属的牡荆;藤本植物有 1 种,为豆科葛藤属的葛藤;草本有 4 种,分属 2 科,分别是禾本科的芒草、狗牙根、弯叶画眉和菊科的蓼蓟菊。

从群落结构组成来看,群落建立初期,草本植物为优势群体,但随着时间的推移,灌木植物和乔木的种数大幅增加,物种变得更加丰富,植物群落呈现出乔、灌、草搭配的立体感,系统稳定性大大增强。植

被改善了土壤的营养状况,同时它所具有的深根性质也对增加土层的稳定性起到了重要的作用,使土壤更适合植被恢复和群落演替^[9-10]。

3.2.2 植物多样性分析 对深圳盐田港边坡的多样性指数分析结果见表 2。从表中可以看出,3 类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变化趋势,即厚层基材喷附边坡>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。调查研究表明,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,植物的多样性和丰富度都偏低,群落演替阶段处于初期的灌草植物群落时期^[11],因此后续还需要继续

表 2 不同恢复方式下植物多样性指数比较
Table 2 Comparison between diversity index under different recovery ways

生态恢复方式	丰富度指数(R)		多样性指数(H')		均匀度指数(E)	
	草本	木本	草本	木本	草本	木本
厚层基材喷附边坡	8.12	14.10	1.27	1.56	0.91	0.87
客土喷附边坡	3.83	1.39	0.52	0.56	0.76	0.81
自然复绿边坡	5.99	9.59	1.04	1.41	0.95	0.88
周边自然山体	11.46	20.23	1.57	2.13	1.34	1.68

跟进调查研究。

3.3 土壤特性与植物多样性之间的相关性

植被与土壤是一个相互作用、相互制约、相互影响、协调发展的统一体。在植被演替过程中,植物与土壤相互作用和相互制约,植物群落的演替总是同土壤的变化相关联,土壤的差异性导致植被的变化,反之,植被的变化影响着土壤的发育^[12]。所以,植物多样性和土壤特性的关系成为了生态研究的重要领域之一。岩质边坡植被重建和修复过程中,由于岩质边坡较强的异质性,坡面不能提供给植被正常生长发育所需的物质基础,很难使植被发挥应有的生态作用,因此,必须创造有利的人工土壤条件,使其既能提供植被生长发育所需的合理物质结构,又能成为植被养分、水分转化利用的载体,满足植被正常生长发育的基础物质^[13]。

植被具有改善生态环境的作用。植被对土壤的改

良效应,主要是因为枯枝落叶层、固氮作用和根系的影响而造成,其主要是改善了土壤物理性质(土壤水分和体积质量),进而增加了土壤的氮素、有机质等养分含量,促进土壤酶参与土壤的许多重要的生物化学过程和物质循环^[14-15]。边坡植被恢复因为改变了山体的生境,导致土壤性质的变化。所以,植被恢复与土壤性质间是一种相互依赖和制约的关系。

由表 3 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 3 不同恢复方式下土壤特性与植物多样性之间的相关性
Table 3 Correlation of soil characteristics and plant diversity under different recovery ways

土壤特性	丰富度指数(R)		多样性指数(H')		均匀度指数(E)	
	草本	木本	草本	木本	草本	木本
含水量	0.315	0.162	0.105	-0.059	-0.389	-0.325
有机质	0.448	0.302	0.247	0.085	-0.252	-0.186
全氮	0.272	0.118	0.060	-0.104	-0.430	-0.367
速效氮	0.243	0.393	-0.44	0.585*	0.822**	0.782**
全磷	-0.048	-0.205	-0.261	-0.415	-0.695*	-0.645*
有效磷	-0.858**	-0.928**	-0.948**	-0.987**	-0.984**	-0.993**
全钾	-0.832**	-0.735**	-0.694*	-0.567	-0.259	-0.325
速效钾	0.212	-0.363	-0.416	-0.560	-0.805**	-0.761**
脲酶	0.152	-0.006	-0.063	-0.225	-0.538	-0.479
蔗糖酶	0.064	-0.093	-0.151	-0.311	-0.610*	-0.554

注：*表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平；**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

4 讨论与建议

4.1 土壤特性变化

已有研究表明^[16]，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，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^[17]。所以土壤含水量、养分、酶活性与植被覆盖率、植被类型及植物凋落物量紧密相关。

因此，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。

4.2 植物多样性及与土壤特性的相关性

近来有许多学者对岩质边坡植物多样性进行了研究，康艳^[18]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。王倩等^[11]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 10 年，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^[10]。

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^[19]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 Shannon-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^[20]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呈负相关关系。

4.3 建议

4.3.1 植物配置的改进 通过对植被护坡在深圳盐田港高速公路边坡生态恢复的应用效果的调查研究。在植物配置上应做到：

(1) 岩质边坡生态恢复中植物物种的选择以当地原生植被有大量分布的乡土植物为主，即使引入的少数外来种也应是不具强侵入性的物种，能使植被快速覆盖坡面，形成坡面保护层。

(2) 岩质边坡生态恢复中植物护坡也有局限性，如植被根系的延伸使土体产生裂隙，增加了土体的渗透率；又如对于高陡边坡，不采用工程措施，植被难

以生长，因此植被防护技术应与工程防护技术相结合，发挥各自的优点，既保证了边坡的稳定，又实现了坡面植被的快速恢复。

(3) 岩质边坡生态恢复中护坡植物应以灌木为主，草本为辅，兼顾长期和短期效果，保证植物的多样性，做到“乔、灌、花、草”相结合，既能稳固边坡，又能美化路容环境。可在周围栽种种子传播能力强的乡土树种，在先锋树种退化后的时间里，迅速侵入到坡面。同时，植被防护是一个过程，所以有关部门应对植被的种植、生长进行长期的监控和修护，做到及时的补栽、移栽。

4.3.2 工艺、工法的改进 通过对深圳盐田港高速公路边坡护坡系统的 3 种不同恢复方式调查研究，厚层基材喷附边坡、客土喷附边坡都有一个共同的缺陷，即破坏了生态系统的连续性，影响了植被演替的进程。

(1) 本次调查研究的 3 种边坡生态恢复中，除自然复绿边坡生态系统的连续性没有遭到破坏外，其他两类边坡生态系统的连续性均遭到了严重的破坏，也是区域生态系统恢复状态不佳的重要原因。在现有的护坡条件下，可以采取勾缝、钻生态孔的方式，将坡体水系及岩石风化后产生的有机质引入已喷附的坡面土壤，加快植被与土壤生态系统的恢复。

(2) 为了对坡顶山体的雨水起到截流作用，防止暴雨时期坡顶汇水对坡面的冲刷，一般在坡顶环线上修筑截水沟，这种工程措施同样造成了坡面与整个山体之间的生态隔离，为此，在以后的边坡生态工程设计中应尽量避免这种设计，或在不影响生态系统连续性情况下，设计以在暴雨时期起到截水，但在少雨时间起到保水充当水源作用的其他截水方式。

参考文献：

- [1] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 257-267
- [2] Gao GJ, Yuan JG, Han RH, Xin GR, Yang ZY. Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(4): 303-311
- [3] 谭东林. 公路边坡生态防护技术初探[J]. 中国高新技术企业, 2009(15): 175-176
- [4] 卢民安, 薄双. 生态护坡技术[J]. 东北水利水电, 2009, 27(3): 54-55
- [5] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 186-191
- [6] Didden W, Rmbke J. Enchytraeids as indicator organisms for chemical stress in terrestrial ecosystems [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, 50(1): 25-43
- [7] 舒安平, 苏建明, 冷剑, 高小虎. 半干旱区生态护坡工程客土养分衰减特征与恢复趋势[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 82-85
- [8] 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[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 61-66
- [9] 程小琴, 赵方莹. 门头沟区煤矿废弃地自然恢复植被数量分类与排序[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(11): 75-78
- [10] 陈敬贤. 延庆山区公路边坡植物群落物种多样性特征[J]. 中国水土保持, 2010(2): 3-5
- [11] 王倩, 艾应伟, 裴娟, 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[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6 892-6 900
- [12] 陈海霞, 付为国, 王守才, 卞新民. 镇江内江湿地植物群落演替过程中土壤养分动态研究[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1 475-1 480
- [13] 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[J]. 水土保持通报, 2009(2): 192-195
- [14] 陈立明, 丁雷, 满秀玲. 云冷杉林土壤酶活性与植物多样性[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(3): 58-61
- [15] 殷秀琴, 顾卫, 董炜华, 邱丽丽, 刘永兵, 陶岩. 公路边坡人工恢复植被后土壤动物群落变化及多样性[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4 295-4 305
- [16] 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[J]. 现代农业科技, 2011(15): 258-261, 263
- [17] 高晟, 吴永波, 薛建辉, 姚健. 贵州省溶岩区植被类型对凋落物量、土壤有机碳及速效养分的影响[J]. 水土保持通报, 2011(5): 7-12
- [18] 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[J]. 中国水土保持, 2011(6): 50-53
- [19] 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(硕士学位论文)[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010: 14-15
- [20] 陈芳. 莽山植物物种多样性及其土壤理化性质关系的研究(硕士学位论文)[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011: 40-41

Study on Soil Property and Plant Diversity of Roadside Slopes of YanTian Harbor in Shenzhen Under Ecological Restoration

PAN Shu-lin^{1,2}, GU Bin^{3*}

(1 *School of Mining and Safety Engineering, Yibin University, Yibin, Sichuan 644007, China*; 2 *Director of Yibin Research Base, Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment, Ministry of Education, Yibin, Sichuan 644007, China*;
3 *College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

Abstract: The study selected rocky slopes of Yantian Port highway in Shenzhen City for vegetation survey, which had already been ecological restored for ten years. Under different eco-restoration methods such as the thick layer base material spraying method, external-soil spray seeding method, natural restoration method, physicochemical property and enzyme activity of soil, plant diversity, the correlation between soil properties and plant diversity were analyzed. The results showed that under different eco-restoration modes: 1) soil properties and enzyme activities showed consistent trends: thick layer base material sprayed slopes > external-soil spray seeded slopes > natural recovered slopes; 2) after ecological restoration, rocky slopes had achieved initial vegetation cover, but not obvious; vegetation diversity index and richness index were low, plant community was still in the early successional stages of shrub-herb community; 3) soil properties were significantly correlated with plant diversity. Soil available N had extremely highly significantly positive correlation with plant evenness index, significant positive correlation with diversity index; soil total P was significantly negative correlated with plant evenness index; soil available P was extremely highly significantly negative correlated with plant richness, diversity and evenness; soil total K was extremely significantly negative correlated with plant richness index, significant negative correlated with diversity index; soil available K was extremely significantly negative correlated with plant evenness; activity of soil sucrase was significant negative correlated with the evenness of herbs. Plant configuration, improvements of technology and engineering methods were also proposed based on the above results.

Key words: Roadside slopes, Ecological restoration, Soil property, Plant diversity