

庆丰采石场岩质边坡植被恢复状况和土壤特性研究

尹金珠, 朱凯华, 史翔宇, 韩超, 辜彬

(四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064)

摘要: 通过对庆丰采石场人工修复边坡的植被恢复状况和土壤特性进行调查, 探讨了土壤理化性质及土壤酶活性与边坡植被恢复状况间的关系, 以及影响土壤质量的主要因子, 以期对岩石边坡的防护及生态恢复提供可以借鉴的理论依据。结果表明, 在人工修复边坡上, 无论是物种多样性、群落的结构及稳定性, 还是土壤质量等, 在短期内都难达到周边自然边坡的状态。土壤性质与修复边坡草本层及木本层植物的 Margalef 指数、Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数间存在不同程度的相关性, 其中草本层植物的物种多样性对土壤含水量、酸性磷酸酶活性、蛋白酶活性影响较大; 木本层植物的物种多样性对土壤全磷质量分数、蛋白酶活性影响较大。土壤速效养分、土壤酶活性和土壤有机质等因子是影响土壤质量的主导因子。

关键词: 岩质边坡; 植被恢复; 物种多样性; 土壤特性; 主成分分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0144-06

中图分类号: S154.4, X171.4

Vegetation Restoration and Soil Properties on Rocky Slope in Qingfeng Quarry

YIN Jin-zhu, ZHU Kai-hua, SHI Xiang-yu, HAN Chao, GU Bin

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

Abstract: Through the investigation of the vegetation restoration and soil properties on an artificial-repaired slope in Qingfeng quarry, the relationships among soil physicochemical properties, soil enzyme activities, and vegetation restoration on slope, as well as the dominant factors affecting soil quality were explored so as to provide a theoretical basis for rocky slope protection and eco-restoration. Results showed that with regard to species diversity, plant community structure, and its stability or soil quality, the artificial restoration slope did not rapidly reach the natural state in a short term. There existed different degree correlations among soil properties and the plant indexes of Margalef, Shannon—Wiener, and Pielou when the indexes were applied in the herb and woody layers on the vegetation restoration slope. Species diversity in herb layer had greater impacts on soil water content and the activities of acid phosphatase and protease, while species diversity in woody layer mainly affected total phosphorus and protease activity. Factors like soil available nutrients, soil enzyme activities, and soil organic matter were the dominant factors affecting soil quality.

Keywords: rocky slope; vegetation restoration; species diversity; soil property; principal components analysis

随着我国经济建设的快速发展, 边坡开挖形成的岩石边坡逐年递增, 严重破坏了原有植被的覆盖层, 导致大量的次生裸地和严重的水土流失, 造成生态环境破坏, 边坡岩土体的崩塌、滑坡、泥石流等频发。其对生态环境的破坏已不再是某一地区或某一范围内的局部性问题, 而是影响到我国生态环境建设总体目标实现的全局性问题^[1-3]。目前国家正在进行大规模的基础设施建设, 铁路公路建设、矿山开采、开山填海等开发与建设项目的实施, 形成了各种形式的边坡, 边坡生态环境的治理和土壤植被的恢复显得十分重要。

山地生态系统中, 植被与土壤是一个相互作用, 相互影响, 相互制约, 协调发展的统一系统。植物群落的变化总是与土壤的演化相关联, 土壤的分异导致植被的变化, 植被的变化又影响着土壤的发育^[4]。因此, 植被特征与土壤环境的关系成为生态学研究的重要领域之一, 对其的研究主要集中在以下两方面: 一是植物群落演替阶段土壤特性差异研究^[5-6]; 二是植物群落演替过程中土壤肥力变化研究^[4, 7-8]。这些研究主要针对一些平原、湿地、丘陵、山岭及少数公路土质边坡等环境下的自然土壤^[9-11], 而对于稳定性差,

收稿日期: 2011-04-11

修回日期: 2011-05-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩石边坡植被恢复人工土壤动态特征及调控机制研究”(40971057)

作者简介: 尹金珠(1984—), 男(汉族), 山东省曲阜市人, 硕士研究生, 主要从事边坡植被恢复相关研究工作。E-mail: tianshi8175@163.com。

通信作者: 辜彬(1959—), 男(汉族), 重庆市人, 博士, 教授, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: amakusa@126.com。

有较强异质性,生境恶劣,植被恢复人工土壤平均厚度不到 10 cm 且人工干预程度高的岩石边坡环境,其在植被演替过程中人工土壤动态变化特性的研究鲜有报道。目前国内外对岩石边坡植被恢复人工土壤的研究取得了不少成果,但仅集中在不同添加物,不同配比性能及不同喷射工艺对其性能影响等初始状态人工土壤方面^[2,12-13],而对岩质边坡植被恢复人工土壤在不同植被演替阶段的动态特性及调控机制方面的研究并不多。因此,系统深入研究岩质边坡植被恢复状况和土壤特性,探索土壤特性与植被恢复状况的关系及影响土壤质量变化的主要因子,对工程设计人工土壤配比、植物配置及植被恢复后期维护有重要的指导意义,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,对促进我国生态环境保护以及最佳人居环境改善有着十分重要的意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区为浙江省舟山市庆丰采石场,属北亚热带南缘季风海洋性气候区,冬暖夏凉。年平均气温 16.3 ℃,气候温和湿润。雨量充沛,年降雨量 1 318.8 mm,每年有 2 个明显的降水过程,主要集中在 4—6 这 3 个月的梅雨和台风季节。全年平均风速 3.4 m/s,春秋两季常受台风袭击,冬季多大风。冬季有寒潮,春季多海雾,初夏有梅雨。

庆丰采石场于 2001 年关闭,经过多年开采,原有植被遭全部破坏,形成了宽达 300 m,高近 140 m,裸露岩面达 $7.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的高陡边坡,存在山体水土流失严重,生物多样性减少,地质灾害频发等多种隐患。2006 年开始边坡的综合治理和植被恢复。先期进行地质灾害治理,后期应用边坡生态工程方案进行修复:分级削坡形成 14 级人工坡→清理坡面→较陡坡面安装挡土翼→坡面安装 PVC 网→厚层基材喷覆→补植、人工养护。经过长期的植被恢复,现有植物生长繁茂,坡面植被覆盖已达 95% 以上,景观整体协调性提高,初步形成了乔、灌、草所研究共生的植被生态系统。

1.2 样地设置与选择

采用机械布点和典型抽样方法对所调查的山体坡面进行常规生态学调查和样地布局,一般按坡下(样地 1—3)、坡中(样地 4—6)、坡上(样地 7—9)3 个位置进行取样布点,每个位置取 3 个样地。由于边坡植被恢复工程实施的特殊性,整个坡面上削有许多平台并进行植被恢复,在坡上、坡中、坡下的平台上各设 3 个样地(样地 10—12)。同时,在周围自然边坡的坡

上、坡中、坡下各设 3 个样方(样地 13—15)作为对照。具体的样地布局如图 1 所示。

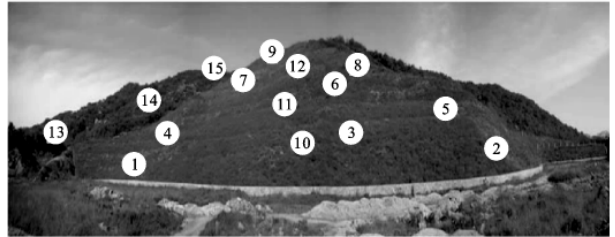


图 1 庆丰采石场边坡修复矿山样地设置

1.3 植被调查与土样采集方法

2010 年 4 月初,对庆丰采石场的恢复边坡进行植被调查和土样采集。对群落植被调查时,观察边坡植被恢复状况和植物群落结构,草本层样方为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,木本层样方为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,记录样方内出现的植物物种和各植物种数量。在植被样方调查过程中,按照“W”形采样法采集土壤样品,样点取表层土样(土层深度大于 15 cm 时按 0—10 和 10 cm 以下取 2 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酶活性的测定。

1.4 分析方法

群落物种多样性的测定采用 α 多样性指数中的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon—Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数,各指数按照下式计算:

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

$$\text{Simpson 多样性指数:}$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, s)$$

$$\text{Shannon—Wiener 多样性指数:}$$

$$H = - \sum (P_i \ln P_i) \quad (i = 1, 2, \dots, s)$$

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

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; $P_i = n_i / n$ 。

土壤特性测定:土壤含水量(W)、土壤容重、土壤有机质(TOM)、土壤全氮(TN)、土壤速效氮(RaN)、土壤全磷(TP)、土壤有效磷(EP)、土壤速全钾(TK)、土壤速效钾(RaK)等理化性质测定主要参照《土壤理化性质分析与剖面描述》的国标方法进行;对土壤酶活性测定^[14]时,脲酶(Ure)用苯酚一次氯酸钠比色法;蔗糖酶(Suc)用 3,5—二硝基水杨酸比色法;酸性磷酸酶(Pho)用磷酸苯二钠比色法;蛋白酶(Pro)用茚三酮比色法。

2 结果与分析

2.1 植被恢复状况

目前,整个边坡的植被恢复状况良好,植物生长茂盛,已初步形成了乔、灌、草相协调的群落生态系统。坡下部分植物生长非常茂盛,灌木生长过于旺盛,导致草本的部分退化,边缘部分也已进入与周围自然植物群落相融合的阶段。坡中部分是整个坡体最陡的部分,植物生长不如坡下部分茂盛,灌木较为低矮。坡上部分面积相对坡中、坡下部分面积稍小,虽然其坡度较坡中部分有所平缓,植物生长茂盛程度却不是很高,但植物覆盖率依然较高,土壤基本无外露,草本植物和藤本植物居多。平台上植被恢复所需的生境差异不大。在平台上面栽植了一些乔、灌木植物,整个坡面平台上植物种类、恢复状况相差不大。

2.1.1 植物种类 调查发现,庆丰边坡人工恢复坡面植物长势良好,总盖度达 95%,主要定居植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、普陀樟(*Cinnamomum japonicum*)等。调查样

方内发现有 28 种植物,其中草本植物 9 种,占总种数的 32.14%;藤本植物 2 种,占总种数的 7.14%;灌木和乔木各有 11 种和 6 种,分别占总种数的 39.29%和 21.43%。坡面以豆科、菊科、禾本科植物居多,豆科植物有 7 种,占总种数的 25%,菊科植物和禾本科植物各 3 种,各占 10.71%,榆科植物和蔷薇科植物各 2 种,其余的科则为单种科。整体上来说,坡面植物种类还较单一,植物的科属组成也较为分散。

2.1.2 群落物种多样性 从表 1 可以看出,整个人工修复边坡群落的 Margalef 丰富度指数和 Shannon—Wiener 多样性指数的区域差异性不显著($p > 0.05$),表明整个边坡的坡下、坡中、坡上和平台在植被修复施工时混合种子喷附及乔、灌木植物栽植的植物配置种类,经过一段时期的恢复仍可以保有其中较多的植物种类;整个人工修复边坡群落的 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的区域差异性显著($p < 0.05$),而草本层的 Simpson 多样性指数的区域差异性甚至达到极显著($p < 0.01$),表明植被恢复过程中虽然植物的种类数目在整个坡面差别不大,但坡下、坡中、坡上和平台上植物的生长状况不一,植被分布并不均匀,一些区域优势种现象明显。

表 1 群落物种多样性指数比较

边坡区 域位置	样地 编号	Margalef 指数 R		Simpson 指数 D		Shannon—Wiener 指数 H		Pielou 指数 E		
		草本层	木本层	草本层	木本层	草本层	木本层	草本层	木本层	
人工 修 复 边 坡	坡下	1	0.975	1.653	0.649	0.506	1.008	0.953	0.823	0.612
		2	1.038	1.780	0.705	0.564	1.291	1.087	0.970	0.699
		3	0.993	1.821	0.676	0.596	1.106	1.158	0.892	0.743
	坡中	4	1.365	2.346	0.691	0.757	1.273	1.806	0.918	0.753
		5	0.514	0.493	0.408	0.245	0.598	0.479	0.863	0.436
		6	0.962	1.385	0.533	0.628	0.900	1.227	0.819	0.630
	坡上	7	1.028	0.724	0.449	0.447	0.796	0.823	0.725	0.594
		8	0.000	1.924	0.000	0.813	0.000	1.837	—	0.883
		9	1.477	—	0.782	0.000	1.564	0.000	0.972	—
	平台	10	0.689	2.364	0.316	0.803	0.575	1.753	0.538	0.956
		11	0.649	2.215	0.343	0.778	0.589	1.716	0.547	0.852
		12	0.629	2.079	0.292	0.756	0.566	1.675	0.515	0.805
自然边坡	13	1.836	2.917	0.867	0.652	2.137	1.451	1.125	1.027	
	14	1.765	2.872	0.821	0.646	2.003	1.356	1.058	1.003	
	15	1.713	2.836	0.806	0.637	1.935	1.281	0.984	1.136	
F		2.370	0.779	6.078**	5.122*	2.605	1.436	4.135*	4.205*	

注: F 为人工修复边坡不同区域物种多样性指数的方差分析结果值; * $p < 0.05$ 表明在整个人工修复边坡上,群落物种多样性指数区域差异性显著; ** $p < 0.01$, 表明在整个人工修复边坡上,群落物种多样性指数区域差异性极显著。下同。

作为对照的周边自然边坡各样地群落物种多样性的值比人工修复边坡明显大,表明自然边坡群落中物种丰富度和均匀度都较高。人工修复边坡的群落无论物种数目的多寡,物种分配状况还是群落结

构及稳定性方面在短时间内还很难达到要求,仍要经历长时期的恢复过程才能修复人为开发和利用资源所造成的山体植被破坏。

平台各样地的木本层群落物种多样性指数的值

基本上比人工修复边坡的坡下、坡中和坡上各样地木本层群落物种多样性指数的值大,而草本层的值基本上较小,表明平台上木本植物的物种种类较丰富,植物分配均匀,相对的草本植物较稀少,分配较为集中,群落处在草本群落向乔、灌木群落过渡且木本植物占优势的时期。这可能是由于平台所提供的生境条件相对稳定和人工修复时多在平台上栽植一些乔、灌木植物的缘故。

植被修复边坡有些样地群落物种多样性指数呈现特殊性的数值特征,表明边坡植被恢复在短时期内还不太稳定,易受边坡修复工程施工方案、山体生境、气象水文、地形地貌等多方面的制约。如样地 5 群落物种多样性指数的值相对较小,植被郁闭度不高,可能由于其位于坡向改变且坡度较陡的山脊处,群落生境条件比较恶劣,植被恢复过程中容易遭受雨水冲刷,人工土壤难于附着。样地 8 草本层的群落物种多样性指数的值为 0,而木本层的值相对较大,表明草本植物极少,乔、灌木植被生长茂盛。这可能是在植被恢复过程中由于雨水冲刷而导致人工土壤流失和滑

坡,草本植物死亡,生命力强的木本植物渡过了恶劣条件的时期而生存下来,草本植物退化也进一步促进了乔、灌木的生长。样地 9 草本层的群落物种多样性指数的值相对较大,而木本层的值为 0,表明草本植物的盖度比较高,生长状况良好,极少有乔、灌木植物生长。这可能是由于其位置接近坡顶,周边草本植物物种入侵比较严重,生长力较强而抑制了木本植物的生长。

2.2 土壤理化性质与土壤酶活性

从表 2 可以看出,人工修复边坡土壤含水量、有机质含量、速效氮质量分数、全磷质量分数、全钾质量分数、速效钾质量分数和蔗糖酶活性的区域差异性极显著($p < 0.01$),容重、全氮质量分数、有效磷质量分数、脲酶活性、酸性磷酸酶活性和蛋白酶活性区域差异性不显著($p > 0.05$),表明在边坡植被恢复过程中,坡下、坡中、坡上和平台的植被生长状况呈现不一致性和不稳定性,正处在不同植被类型相互演替的阶段,土壤的生物化学反应比较活跃,土壤酶的催化作用较强,土壤中元素循环、迁移和积累过程复杂多变,土壤理化性质极不稳定。

表 2 边坡不同样地土壤理化性质和土壤酶活性

区域位置	样号	含水量/%	容重/(g·cm ⁻³)	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	速效氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(g·kg ⁻¹)	速全钾/(g·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·g ⁻¹)	脲酶/(mg·g ⁻¹)	蔗糖酶/(mg·g ⁻¹)	磷酸酶/(mg·g ⁻¹)	蛋白酶/(mg·g ⁻¹)
坡下	1	19.41	1.37	30.89	0.69	19.53	0.38	11.95	24.27	173	1.06	34.26	1.58	1.05
	2	19.43	1.35	32.37	0.71	20.35	0.41	12.43	24.48	160	0.92	33.02	1.51	1.21
	3	19.38	1.29	33.61	0.67	19.03	0.43	11.07	25.09	197	0.87	30.28	1.39	0.94
人工修复边坡中	4	19.30	1.19	25.56	0.52	11.30	0.47	39.17	25.72	260	1.14	33.74	1.01	0.93
	5	18.53	1.13	30.25	0.64	11.30	0.67	80.15	26.98	196	1.07	29.52	0.80	0.89
	6	18.78	1.53	21.88	0.48	5.64	0.70	40.78	29.97	132	1.02	16.84	0.77	0.59
人工修复边坡上	7	19.95	1.20	37.54	0.80	16.94	0.48	27.83	26.46	158	1.09	28.64	1.45	0.47
	8	16.53	1.13	38.67	0.94	13.56	0.32	4.20	24.73	146	0.80	34.66	2.21	0.22
	9	17.34	1.13	40.22	0.81	13.57	0.72	72.35	25.25	172	1.04	33.78	0.79	1.66
平台		17.12	1.28	25.07	0.23	20.56	0.23	15.28	24.26	112	0.83	13.49	1.73	0.43
	11	17.21	1.32	27.36	0.25	22.73	0.19	26.56	23.74	128	0.79	11.34	1.56	0.35
	12	17.07	1.30	26.02	0.26	21.41	0.20	13.47	23.98	100	0.72	10.97	1.64	0.29
自然边坡	13	25.02	1.14	172.58	1.81	41.65	0.52	8.56	28.13	208	1.83	31.45	2.39	0.37
	14	24.86	1.11	173.37	1.86	45.51	0.51	9.49	29.20	230	1.71	28.86	2.28	0.33
	15	25.23	1.12	170.29	1.83	43.15	0.48	11.28	28.65	253	1.62	26.79	2.31	0.28
F		11.86**	1.96	123.21**	2.10	55.45**	7.28**	3.44	245.72**	18.70**	3.37	29.13**	1.66	3.42

作为对照的周边自然边坡各样地与人工修复边坡各样地相比较,土壤含水量、有机质含量、全氮质量分数、速效氮质量分数、全钾质量分数、速效钾质量分数、脲酶活性、酸性磷酸酶活性的值较大,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。

人工修复边坡上平台各样地与其他样地相比较,土壤含水量、全氮质量分数、全磷质量分数、全钾质量分数、脲酶活性、蔗糖酶活性的值较小,而土壤酸性磷

酸酶活性的值较大,表明边坡平台群落正处于草本植物向木本植物过渡时期,乔、灌木植被的生长占优势,植物的生长需要吸收掉土壤中大量的水分和养分。分析了群落物种多样性,结果表明,8,9号样地是相对特别的2种群落类型。8号样地植被基本上为乔、灌木植物,9号样地则以草本植物为主,它们的土壤特性存在以下现象。9号样地土壤全磷质量分数、有效磷质量分数、脲酶活性、蛋白酶活性是人工修复边坡各样地中最高的,8号样地则相反,表明在草本植物群落阶段,土壤磷的分解、转化和储存能力较强,土壤脲酶和蛋白酶较活跃地参与土壤一系列生物化学过程和物质循环。

2.3 土壤特性与植物多样性的关系

利用 Excel 的数据统计功能对人工修复边坡土壤特性与植物多样性进行了相关性分析^[15],具体的相关系数见表 3。从表 3 中可知,土壤脲酶活性、酸性磷酸酶活性和蛋白酶活性与草本层植物 Margalef 指数相关程度分别达到显著正相关($p < 0.05$),显著正相关($p < 0.05$)和极显著正相关($p < 0.01$);土壤含水量、酸性磷酸酶活性和蛋白酶活性与草本层植物 Shannon—Wiener 指数相关程度分别达到显著正相关($p < 0.05$),显著正相关($p < 0.05$)和极显著正相关($p < 0.01$);土壤含水量、全氮、全磷、速效钾质量分数、脲酶活性和蛋白酶活性与草本层植物 Pielou 指数相关程度分别都达到极显著正相关($p < 0.01$),土壤蔗

糖酶活性与其达到显著正相关($p < 0.05$),而土壤酸性磷酸酶活性与其达到显著负相关($p < 0.05$)。以上结果表明,人工修复边坡草本植物的物种数目对土壤脲酶活性、酸性磷酸酶活性和蛋白酶活性的影响比较显著,草本植物的物种分配均匀程度对土壤含水量、全氮、全磷、速效钾质量分数、脲酶活性、蔗糖酶活性和蛋白酶影响比较显著,其中草本层植物的物种多样性对土壤含水量、酸性磷酸酶活性和蛋白酶活性影响较大。

从表 3 可知,土壤全磷、有效磷和全钾质量分数与木本层植物 Margalef 指数相关程度分别达到极显著负相关($p < 0.01$)、显著负相关($p < 0.05$)和显著负相关($p < 0.05$);土壤全磷质量分数和蛋白酶活性与木本层植物 Shannon—Wiener 指数相关程度分别达到显著负相关($p < 0.05$)和极显著负相关($p < 0.01$);土壤含水量、土壤全磷、有效磷质量分数和脲酶活性与木本层植物 Pielou 指数相关程度分别达到显著负相关($p < 0.05$),极显著负相关($p < 0.01$),显著负相关($p < 0.05$)和极显著负相关($p < 0.01$),而土壤酸性磷酸酶与其达到显著正相关($p < 0.05$)。以上结果表明,人工修复边坡木本植物的物种数目对土壤全磷、有效磷和全钾质量分数的影响比较显著,木本植物的物种分配均匀程度对土壤含水量、全磷、有效磷质量分数、脲酶活性和酸性磷酸酶活性影响比较显著,其中木本层植物的物种多样性对土壤全磷质量分数、蛋白酶活性影响较大。

表 3 人工修复边坡土壤特性与植物多样性之间的相关性

指标	Margalef 指数 R		Shannon—Wiener 指数 H		Pielou 指数 E	
	草本层	木本层	草本层	木本层	草本层	木本层
含水量	0.560	-0.353	0.595*	-0.393	0.731**	-0.648*
容重	0.127	0.164	0.124	0.178	-0.147	-0.007
有机质	0.011	-0.350	0.087	-0.521	0.416	-0.117
全氮	0.057	-0.489	0.155	-0.501	0.808**	-0.405
速效氮	-0.128	0.403	-0.096	0.148	-0.507	0.444
全磷	0.461	-0.717**	0.496	-0.668*	0.725**	-0.804**
有效磷	0.333	-0.611*	0.332	-0.497	0.358	-0.681*
速全钾	0.169	-0.577*	0.105	-0.231	0.345	-0.572
速效钾	0.472	-0.136	0.502	-0.320	0.747**	-0.405
脲酶	0.610*	-0.536	0.550	-0.420	0.688*	-0.729**
蔗糖酶	0.261	-0.292	0.376	-0.455	0.885**	-0.401
磷酸酶	0.634*	0.453	0.625*	0.533	-0.599*	0.686*
蛋白酶	0.731**	-0.182	0.871**	-0.713**	0.838**	-0.528

2.4 土壤特性主成分分析

利用 SPSS 13.0 统计软件对土壤特性各指标进行主成分分析^[16],主成分载荷矩阵、特征值、贡献率及累积贡献率见表 4。由表 4 中数据可知,第 1 成分中 RaN, TP, EP, RaK, Ure, Suc, Pho, Pro 所占的比重相比其他指标的系数较大,所以第 1 主成分是土壤

速效养分状况及土壤酶活性程度的综合反映。第 2 主成分以 TOM 所占比重大,反映了土壤供肥潜力和养分活化的能力。第 3 主成分 W 所占的比重最大,突出反映了土壤蓄水、保水的能力。第 4 主成分 TN, TK 所占的比例较大,它反映了土壤养分状况。这表明土壤速效养分、土壤酶活性和土壤有机质等因

子对土壤质量的贡献度较大,是影响土壤质量的主导因子。因此,在边坡植被修复过程中,控制土壤速效养分氮、磷、钾的供给,提高土壤酶活性以及注重有机物质积累与循环显得尤为重要。

表 4 土壤特性主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

指标	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
含水量	0.556	-0.108	0.785	0.036
容重	-0.245	-0.655	0.530	0.259
有机质	0.286	0.846	-0.249	0.144
全氮	0.595	0.657	-0.034	0.436
速效氮	-0.719	0.373	0.303	-0.390
全磷	0.924	-0.213	0.198	0.096
有效磷	0.705	-0.264	-0.502	-0.387
速全钾	0.603	-0.620	-0.140	0.462
速效钾	0.735	0.229	0.313	-0.219
脲酶	0.885	-0.086	0.187	-0.031
蔗糖酶	0.688	0.654	0.214	0.139
磷酸酶	-0.768	0.521	0.094	0.314
蛋白酶	0.700	0.213	0.218	-0.426
特征值	5.914	3.031	1.598	1.152
贡献率/%	45.493	23.312	12.295	8.859
累积贡献率/%	45.493	68.805	81.100	89.958

3 结论

边坡植被恢复过程中,植物种数在整个坡面差别不大,但植物种类相对来说还较单一,植物的科属组成也较为分散;不同的区域植物的生长状况不一,植被分布并不均匀,一些区域优势种现象明显。人工土壤还处在土壤紧实、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。在人工修复边坡上,无论是物种多样性、群落的结构及稳定性还是土壤质量等,在短期内都难达到周边自然边坡的状态。整个坡面的坡下、坡中和坡上各样地群落物种多样性指数并没呈现出明显的规律性特征,表明边坡植被恢复在短时期内还不太稳定,易受边坡修复工程施工方案、山体生境、气象水文、地形地貌等多方面的制约。因此,边坡植被恢复过程中,应注意到这些因素的影响。

土壤特性与植物多样性的相关性分析表明,人工修复边坡草本植物的物种数目对土壤脲酶活性、酸性磷酸酶活性和蛋白酶活性的影响比较显著,草本植物的物种分配均匀程度对土壤含水量、全氮、全磷、速效钾质量分数、脲酶活性、蔗糖酶活性和蛋白酶影响比较显著,其中草本层植物的物种多样性对土壤含水量、酸性磷酸酶活性、蛋白酶活性影响较大;人工修复

边坡木本植物的物种数目对土壤全磷、有效磷和全钾质量分数的影响比较显著,木本植物的物种分配均匀程度对土壤含水量、全磷、有效磷质量分数、脲酶活性和酸性磷酸酶活性影响比较显著,其中木本层植物的物种多样性对土壤全磷质量分数、蛋白酶活性影响较大。对土壤特性各指标的主成分分析结果表明,土壤速效养分、酶活性和有机质等因子对土壤质量的贡献度较大,是影响土壤质量的主导因子。因此,在边坡植被修复过程中,控制土壤速效养分氮、磷、钾的供给,提高土壤酶的活性以及注重有机物质积累与循环显得尤为重要。

本文对庆丰采石场人工修复边坡的植被恢复状况和土壤特性进行了调查,深入探讨了土壤理化性质及土壤酶活性与边坡植被恢复状况间的关系,以及影响土壤质量的主要因子,以期对岩质边坡的防护及生态恢复提供可资借鉴的理论依据。今后,可以对植被恢复的岩质边坡进行周期性的调查,适当增加所研究边坡的数量,进一步探索植被恢复的岩质边坡上人工土壤在不同植被演替阶段的动态特性及其调控机制。

[参 考 文 献]

- [1] 杨喜田,董惠英,黄玉荣,等.黄土地区高速公路边坡稳定性的研究[J].水土保持学报,2000,14(1):77-81.
- [2] 张俊云,周德培,李绍才.岩石边坡生态护坡研究简介[J].水土保持通报,2000,20(4):36-38.
- [3] 张俊云,周德培.厚层基材植被护坡植物选型设计研究[J].水土保持学报,2002,16(4):163-165.
- [4] 陈海霞,付为国,王守才,等.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):1475-1480.
- [5] 王凯博,陈美玲,秦娟.子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J].西北植物学报,2007,27(10):2089-2096.
- [6] 郝文芳,梁宗锁,陈存根,等.黄土丘陵沟壑区弃耕地群落演替与土壤性质演变研究[J].中国农学通报,2005,21(8):226-231.
- [7] 余海龙,顾卫,江源,等.半干旱区高速公路边坡不同年代人工植被群落特征及其土壤特性研究[J].中国生态农业学报,2007,15(6):22-25.
- [8] 贾国梅,王刚,陈芳清.子午岭植被演替过程中土壤生物学特性的动态[J].生态环境,2007,16(5):1466-1469.
- [9] 王韵,王克林,邹冬生,等.广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响[J].水土保持学报,2007,21(6):130-134.
- [10] 宋会兴,苏智先,彭远英.山地土壤肥力与植物群落次生演替关系研究[J].生态学杂志,2005,24(12):151-153.

(下转第 155 页)

反馈于系统的能值比较少,系统主要依靠自然界无偿的能值促进生产(当然过高的净能值产出率意味着生产过分依赖自然环境,如果能值被输出虽然具有价格竞争优势但往往是低级的资源输出型农业)。民勤县当前面临的主要问题是设法适当提高净能值产出率(在当前基础上大约提高 50%),至少达到与全国平均水平持平,以保证民勤县农业经济在国家统一市场竞争中有一定的价格优势。根据民勤县农业生产的实际情况,从生态系统能值利用途径,例如通过节约农业用电,节约使用化肥、农药、农膜等辅助工业能可作为提高这一指标的有效方式,与此同时,要立足于本地,加强对环境资源中生物能的开发与利用。

(4) 民勤县可持续发展指数数年来一直偏小(10 a 来均处于大于 0 小于 1 的范围,平均值为 1.81E-01),而且有逐年下降的趋势,表明民勤县农业生态系统 10 a 来一直存在着过度的环境资源开发,环境恶化已经到了非常严峻的地步。造成这种现象的主要原因是由于民勤县农业生态系统的净能值产出率逐渐降低,环境的压力逐年增大,资源利用率不高造成的。因此,要想使当地农业生态系统发展的可持续性提高,当务之急是保护好水源地、基本农田等重要的生态功能用地,同时,要有效控制土地沙化、荒漠化等环境灾害以及土壤污染、水污染,从而控制对生态和环境的不良影响,走以资源节约利用为基础的新型、高效的集约化农业发展道路,使民勤县的农业生态系统走上可持续发展的道路。

[参 考 文 献]

- [1] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002:1-3,16,75-95.
- [2] 樊胜岳,马永欢,钟方雷. 民勤县生态政策实施的效果在农户中的响应[J]. 中央民族大学学报:哲学社会科学版,2006,33(1):32-39.
- [3] 民勤县志编纂委员会. 民勤县志[M]. 兰州:兰州大学出版社,1994:83-85.
- [4] Odum H T. Environmental accounting: energy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons., Inc., 1996:79-81.
- [5] 周连第,胡艳霞,严茂超,等. 生态经济系统能值分析[J]. 地理科学进展,2006,25(5):94-104.
- [6] 董孝斌,高旺盛. 黄土高原丘陵沟壑区典型县域的能值分析[J]. 水土保持学报,2003,17(1):89-92.
- [7] 张希彪. 泾河流域农业生态经济系统的能值研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):196-198.
- [8] 杜鹏,徐中民. 甘肃生态经济系统的能值分析及其可持续性评估[J]. 地球科学进展,2006,21(9):982-989.
- [9] 刘继展,李萍萍. 江苏农业生态系统能值分析[J]. 农业系统科学与综合研究,2005,21(1):29-36.
- [10] 李海涛,廖迎春,严茂超,等. 新疆生态经济系统的能值分析及其可持续性评估[J]. 地理学报,2003,58(5):765-772.
- [11] 白瑜,陆宏芳,何江华,等. 基于能值方法的广东省农业系统分析[J]. 生态环境,2006,15(1):105-106.
- [12] 张耀辉. 农业生态系统能值分析方法[J]. 中国生态农业学报,2004,12(3):181-183.
- [13] 姬瑞华,康文星. 南方丘陵区县域农业生态经济系统的能值分析[J]. 中南林学院学报,2006,26(6):49-55.
- [14] 董孝斌,高旺盛,严茂超. 基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析[J]. 农业工程学报,2005,21(11):2-3.
- [15] 陈东景,徐中民. 干旱区农业生态经济系统的能值分析[J]. 冰川冻土,2002,24(4):374-379.
- [16] 陈兴鹏,薛冰,拓学森. 基于能值分析的西北地区循环经济研究[J]. 资源科学,2005,27(1):52-59.
- [11] 郭道宇,张金屯,宫辉力,等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报,2005,25(4):763-770.
- [12] 李绍才,孙海龙. 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,2006,16(2):257-267.
- [13] Gao G J, Yuan J G, Han R H, et al. 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 陈小红,段争虎,谭明亮. 沙漠化逆转过程中土壤理化因子的权重分析:以宁夏盐池县为例[J]. 土壤通报,2009,40(6):1280-1283.

(上接第 149 页)