

不同植被恢复模式对植被混凝土基材 微生物特征的影响研究

熊诗源¹, 许文年², 夏 栋¹, 黄晓乐²

(1. 三峡大学 化学与生命科学学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 为了解植被混凝土生态修复对土壤微生物特征的影响, 测定了狗牙根、高羊茅、紫花苜蓿等几种不同植被恢复模式下土壤物理化学生物特征。结果表明: 植被恢复后, 土壤有机质、全氮、速效氮、微生物量碳氮升高。不同植被恢复模式对土壤改善作用不同, 对有机碳、微生物量碳改善作用大小顺序为高羊茅>狗牙根>紫花苜蓿, 对全氮、速效氮、微生物量氮改善作用大小依次为紫花苜蓿>高羊茅>狗牙根。植被混凝土恢复后, 土壤呼吸强度升高而土壤微生物代谢熵降低。相关性分析表明微生物量碳、氮与土壤呼吸强度、土壤养分相关性密切, 显然土壤微生物可以作为评价基材质量的生物学指标。

关键词: 植被混凝土; 基材; 植被恢复模式; 微生物量; 土壤肥力

中图分类号: S158.3; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0279-06

Effects of Soil Microbial Features on Vegetation-growing Concrete Gunning in Different Vegetative Restoration Patterns

XIONG Shi-yuan¹, XU Wen-nian², XIA Dong¹, HUANG Xiao-le²

(1. College of Chemistry and Life Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: In order to find the effect of the soil microbial features under vegetation-growing concrete gunning, the soil microbial biomass and nutrient level of several vegetative restoration patterns including *Cynodon dactylon*, *Festuca arundinacea* *Medicago sativa* were measured. The results showed as the follows: soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen and microbial biomass increase after vegetation restoration. Varrious types of vegetation restoration are different in improving soil properties. Generally, the soil organic matter contents and microbial biomass carbon under the different vegetative restoration patterns from followed the order of *Festuca arundinacea*>*Cynodon dactylon*>*Medicago sativa*, but the total nitrogen, available nitrogen, and microbial biomass nitrogen under the different vegetative restoration patterns followed the order of *Medicago sativa*>*Festuca arundinacea*>*Cynodon dactylon*. After vegetation-growing concrete gunning, the intensity of soil respiration increased, while metabolic quotient decreased. The signorificant relationships observed were between SMBC, SMBN, the intensity of soil respiration and physiochemical properties of soil. It is shown that microbial biomass can be used as an indicator of substrate quality.

Key words: vegetation-growing concrete gunning; substrate; vegetative restoration pattern; soil microbial biomass; soil fertility

“十一五”以来, 国家加大对公路、铁路、水电等基础设施建设的投入, 在这些基础建设工程中, 伴随着大量土石方的开挖和回填, 同时也大量破坏植被, 导致大量次生裸地的出现。针对工程扰动区生态极度脆弱的现实, 国内学者及工程界人士在引进国外相关技术的

基础上, 开发研制了一系列的工程扰动区(特别是开挖岩石边坡和混凝土边坡)植被恢复技术^[1], 开展人工恢复, 如喷混植生技术、客土喷薄、厚层基材等, 以加速扰动区的生态恢复, 特别是根据扰动区的具体条件加速生态恢复。这些技术能够实现工程扰动区坡面的快速

收稿日期: 2010-03-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(50879043); 国家科技支撑计划项目(2006BAC10B04)

作者简介: 熊诗源(1985—), 男, 湖北汉川市人, 硕士研究生, 从事生态恢复技术研究。E-mail: xiongshiyuan@163.com

通信作者: 许文年(1960—), 男, 河北元氏人, 博士, 教授, 主要从事生态防护工程技术研究。E-mail: xwn@ctgu.edu.cn

绿化,因此在工程扰动区生态创伤面得到广泛应用。同时植被的恢复与重建过程促进了土壤形成和发育,使土壤的性质得到改善,土壤质量和肥力明显提高^[2]。然而,目前扰动区植被恢复技术考虑较多的是修复基材(植被混凝土等)在扰动坡体上的稳定性^[3],先锋物种在修复基材中的适应性^[4]等方面,而对植被生长条件下修复基材中土壤微生物特征的变化鲜有涉足。为此,分析植被混凝土(Vegetation—growing concrete gunning, VGCG)生态护坡中不同植被恢复模式对土壤微生物的影响和作用,评价不同植被恢复模式的效应和功能,可以为边坡的生态恢复工程提供理论依据。

1 试验地概况

研究供试材料采自三峡大学植被混凝土生态防护坡面,该区位于湖北西部,地处长江上游与中游的交汇处,鄂西山区向江汉平原的过渡地带,地跨东经 110°15′—112°04′,北纬 29°56′—31°34′之间,全年平均气温为 14.8~16.9℃,总降水量为 907~1 445 mm,总雨日为 125~158 d,总日照时数 1 058~1 556 h。冬季冷暖

呈现明显的阶段性。春季阴雨多,光照少,温度偏低。降水过程以连续性降水居多,降水量多,但强降水过程少,降水时空分布均匀。梅雨期较迟,降水集中。出梅后有一段高温伏旱天气。8 月中旬出现一次明显低温连阴雨。秋季降温早,气温升降反复无常,入冬时间正常。

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集

研究选择立地条件基本相同的狗牙根(*Cynodon dactylon* L., CD)、高羊茅(*Festuca arundinacea*, FA)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L. MS)等几种不同植被恢复模式的标准地作为采样地,以荒坡为对照坡地。在不同植被恢复模式的标准样地内采用“S”多点采集混合样,分别采集 0—5 cm、5—10 cm 土层土壤。新鲜土样采回后,过 2 mm 筛,分成 2 份,一份于 4℃保存新鲜样品用于土壤微生物指标测定,一份风干备用以用于土壤理化性质测定。分析样品,不同植被恢复模式基本概况见表 1。

表 1 不同植被恢复模式基本情况

模式	坡面类型	应用技术	年份	基本情况
高羊茅(FA)	岩石坡度 68°	VGCG	2003	盖度 100%,生长良好
狗牙根(CD)	岩石坡度 64°	VGCG	2004	盖度 90%以上,分布于坡面上中上部,半生中主要有黑麦草等,人为破坏少
紫花苜蓿(MS)	岩石坡度 64°	VGCG	2004	分布与坡面中下部,伴生有蒿类,无人为破坏
对照荒坡(CK)	土坡 45°	无	2005	长有依稀杂草,主要有野菊花、蒿等

2.2 分析指标及测定方法

土壤含水量用烘干法,土壤 pH 用水浸提液电位测定法、土壤容重用环刀法、土壤有机质(Organic matter, OM)采用重铬酸钾氧化—稀释热法,土壤全氮(Total N, TN)用凯氏定氮法,速效氮(Available N, AN)采用扩散吸收法。土壤微生物量碳(soil microbial biomass C, SMBC)、土壤微生物量氮(soil microbial biomass N, SMBN)用氯仿熏蒸浸提法^[5]。土壤呼吸强度采用碱液吸收法^[6]。

2.3 数据处理

试验数据的处理比较用 Turkey’s—b 单因素方差分析,相关性分析用 Pearson’s test 分析,在 SPSS11.5 软件上分析。

3 结果与分析

3.1 土壤物理化学特征的变化

从图 1 可以看出,3 种植被混凝土生态坡地含水量由高到低依次为紫花苜蓿地>狗牙根地>高羊茅地,由单因素方差分析表明,紫花苜蓿地、狗牙根地和高羊

茅地含水量差异显著($P<0.05$)说明植被混凝土生态护坡可以很好的涵养水分,因为坡面恢复植被能拦截径流防止水土流失。紫花苜蓿茎叶覆盖地面,根系密集,对提高土壤通透性和降雨入渗有很大影响,固持土壤作用强,拦截效果更好;高羊茅生长旺盛,土壤水分消耗较大导致土壤储水较低。在土壤容重方面,对照荒坡、高羊茅地、狗牙根地、紫花苜蓿地之间没有显著差异,这可能是因为虽然地表植被覆盖不同,但植被都比较单一,对土壤容重影响不显著。无论哪种植被覆盖模式,土壤 pH 值在微碱性范围内(7.98~8.13),荒坡 pH 值为 6.75,在中性范围内,因为添加水泥和植被混凝土添加剂影响了土壤的 pH 值,使土壤呈碱性^[7]。

3.2 土壤养分因子的变化

土壤有机质的含量及其动态平衡是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标,直接影响了土壤物理化学生物学性质及土壤肥力的高低^[8]。

由图 2 可知,在表层土壤有机质含量方面,高羊茅地最高(36.98 g/kg),狗牙根地(21.38 g/kg)和紫花苜蓿(20.24 g/kg)其次。单因素方差分析表明,紫花苜蓿、狗牙根和紫花苜蓿显著高于对照荒坡,高羊茅显著

高于狗牙根和紫花苜蓿。说明坡地在恢复后种植高羊茅能显著改善土壤有机质含量,其次是狗牙根和紫花苜蓿,这可能与各种植被地上生物量及腐烂速度有关,有研究表明,在植被恢复过程中,一些禾本科、豆

科植物逐渐生长,有利于土壤有机碳、氮素的积累^[9],比较而言,高羊茅生长旺盛,生物量大、腐烂快,而紫花苜蓿生物量小,狗牙根草木质化程度高不易腐烂,所以相互间相差较大。

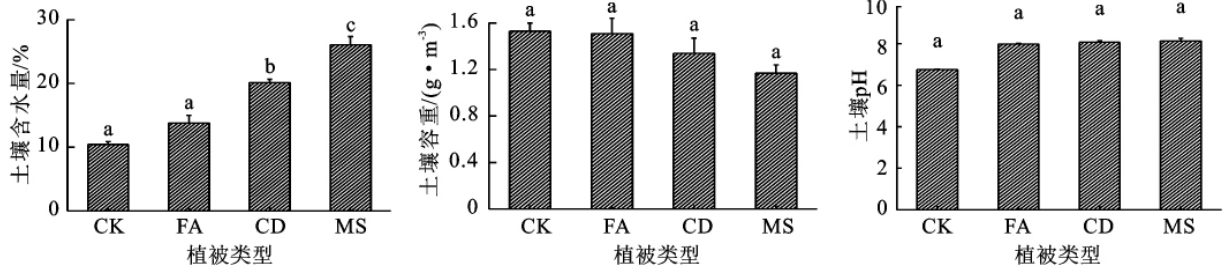


图 1 不同植被恢复模式的土壤物理特征

在表层土壤全氮含量方面,紫花苜蓿地最高(1.65 g/kg),对照荒坡最低(0.92 g/kg),由高到低依次为紫花苜蓿地>高羊茅地>狗牙根地>对照荒坡,由单因素方差分析表明,紫花苜蓿地显著高于其它恢复模式样地,高羊茅、狗牙根与对照坡地差异不显著。紫花苜蓿属于豆科植物,具有固氮作用,其根部根瘤菌能够固定空气中的游离氮,增加土壤中的氮。

在表层土壤速效氮含量方面,紫花苜蓿地(76.04 mg/kg)最高,其次是高羊茅地(44.82 mg/kg)、狗牙根地(40.40 mg/kg),对照荒坡最低(20.92 mg/kg),由单因素方差分析表明,紫花苜蓿显著高于高羊茅和狗牙根,紫花苜蓿、高羊茅和狗牙根显著高于对照荒坡。恢复边坡为粗放式管理,期间没有施肥,土壤氮素变化主要受植物生长和利用的影响。表明植被覆盖能提高土壤中速效氮含量。

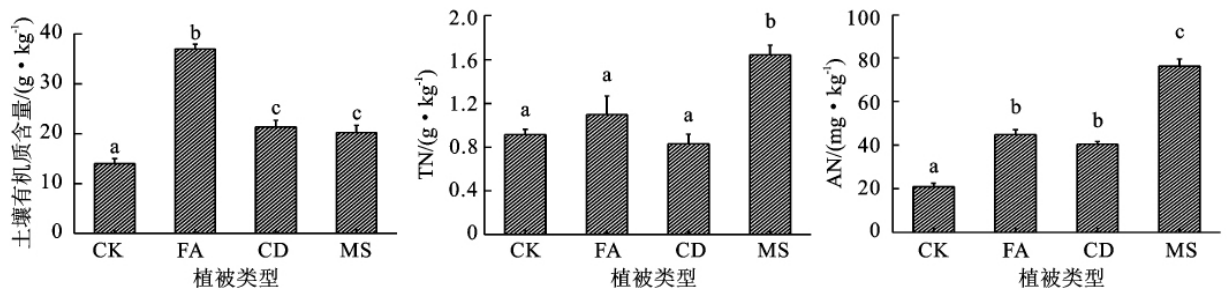


图 2 不同植被恢复模式的土壤养分特征

3.3 土壤微生物量的变化

土壤微生物是土壤中有生命的成分,对土壤环境各种变化极为敏感,微生物量库的任何变化,都会影响土壤养分的循环和有效性,土壤微生物体碳是土壤微生物的综合性指标之一,它不仅从总体上反映微生物受环境因子影响的变化,还反映了微生物对环境作用的能力,是土壤有机质库的活跃部分^[10]

单因素方差分析表明(图 3),各样地之间表层土壤微生物量碳含量差异显著($p<0.05$)。高羊茅地最高(546.85 mg/kg),对照荒坡(271.13 mg/kg)最低,顺序为高羊茅地>狗牙根地>紫花苜蓿地>对照荒坡。

微生物量氮是指活的微生物体内所含有的氮,是有机氮库中的活性部分,它周期短、易矿化,是主要的可矿化氮源,对土壤氮素供应和循环具有重要的意义^[11]。在表层土壤微生物量氮含量方面,单因素方差分析表明,各样地之间差异显著($p<0.05$)。紫花苜蓿地最高(61.41 mg/kg),对照荒坡最低(12.75

mg/kg)由高到低依次为紫花苜蓿地>高羊茅地>狗牙根地>对照荒坡。

微生物量碳,微生物量氮与土壤有机质,全氮变化趋势基本一致。有研究显示微生物量碳指示着土壤总有机质的状态与积累情况与本研究结果基本一致。植被得到恢复,有机物质输入增多,供微生物利用的碳源氮源增大,微生物活性及微生物量升高,但由于不同植被恢复模式输入有机物质的数量和质量不同,从而造成不同微生物种类和数量的差异,导致恢复过程中土壤生物学质量各异。Jenkinson 研究认为,在无外部因素干扰的情况下,土壤微生物量并不能完全反映微生物的活性、结构和功能,因此在分析微生物量的绝对量外,还应考虑微生物量碳、氮在全碳、全氮中的比例,从微生物学角度揭示植被恢复过程中土壤生物学质量的变异。

由图 4 可知,在表层土壤 MBC/SOC 方面,狗牙根地最高(2.12%),高羊茅地最低(1.48%),由高到

低依次为狗牙根>对照荒坡>紫花苜蓿>高羊茅。由单因素方差分析表明,狗牙根与对照荒坡之间差异

不显著,高羊茅与紫花苜蓿之间差异不显著,狗牙根和对照荒坡显著高于高羊茅和紫花苜蓿($p<0.05$)。

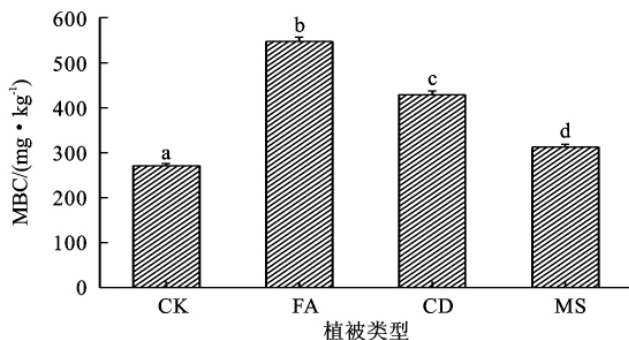


图 3 不同植被恢复模式的土壤微生物量碳与微生物量氮

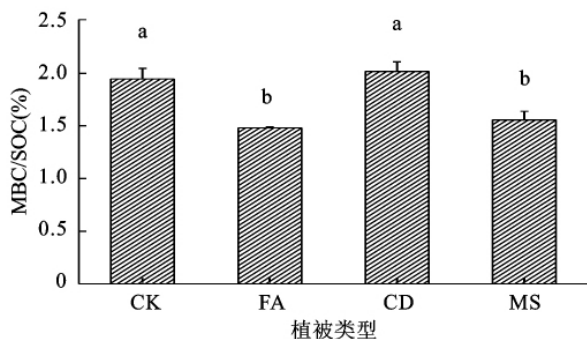
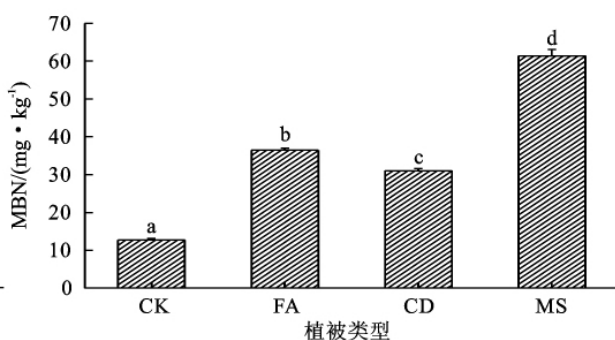
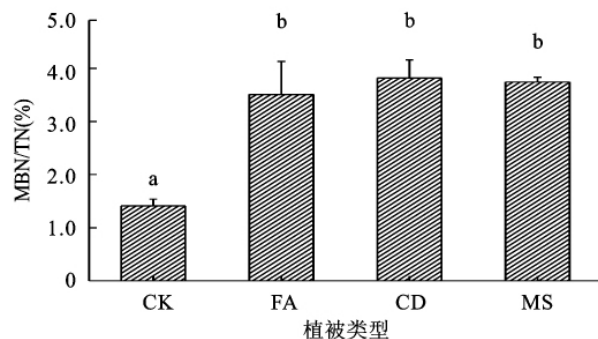


图 4 不同植被恢复模式的土壤 MBC/SOC、MBN/TN



在表层土壤 MBN/TN 方面,狗牙根最高(3.81%),其次是紫花苜蓿(3.74%)、高羊茅(3.51%),对照荒坡最低(1.41%)。由单因素方差分析表明,狗牙根、紫花苜蓿、高羊茅之间没有显著性差异,但 3 者显著高于对照坡地($p<0.05$)。

不同植被恢复模式恢复后,土壤微生物量碳、氮在全碳、全氮的比例变化不同,狗牙根地、紫花苜蓿地和高羊茅地显著高于对照,造成这种现象的原因可能是由于在对照样地中土壤有机碳、全氮含量明显低于植被恢复后的样地,而恢复后的样地微生物量碳、氮增加幅度快于土壤有机碳、全氮的增加幅度。另一方面,狗牙根地中提供了适合土壤微生物生长所需要合适的 C/N 环境,是微生物得到丰富,微生物量碳、氮在全碳、全氮中的比例迅速上升,其增长幅度大于其他覆盖模式样地,表明在植物恢复的过程中,合适的碳氮比有利于土壤微生物量在全碳、全氮中的比例升高。

3.4 土壤呼吸强度和微生物代谢熵(qCO_2)的变化

土壤呼吸作为土壤质量和肥力的重要生物学指标,在一定程度上反映了土壤养分转化和供应能力,表征着土壤的生物学特性和物质代谢强度。在生态恢复过程中植被的变化通过吸收养分和归还有机物等影响着土壤的物理、化学和生物学性质,土壤微生物呼吸随之变化,指示着系统恢复中土壤质量的演变过程。

由图 5 可知,不同植被恢复模式下表层土壤的呼

吸强度不同,单因素方差分析表明,各样地间差异显著($p<0.05$)。高羊茅地最高(91.03 mg/kg · d),对照坡地最低(50.05 mg/kg · d),由高到低依次为高羊茅地>狗牙根>紫花苜蓿>对照坡地。

土壤代谢熵(qCO_2)是基础呼吸强度与微生物量碳的比率,它把微生物生物量的大小和微生物整体活性有机地结合起来,代表了微生物群落的维持能大小和对基质的利用效率,是反映环境因素等对微生物活性影响的一个敏感性指标^[12]。 qCO_2 效率高,则形成单位微生物质量所呼出的 CO_2 少, qCO_2 较小; qCO_2 效率低,说明利用相同能量而形成的微生物量小, qCO_2 较大,释放的 CO_2 较多。在土壤微生物代谢熵方面,紫花苜蓿地最高(7.86 mg/g · h),高羊茅地最低(5.12 mg/g · h),由高到低依次是紫花苜蓿>对照荒坡>狗牙根地>高羊茅地,由单因素方差分析表明,紫花苜蓿地与对照荒坡之间差异不显著,但高羊茅、狗牙根显著低于对照荒坡($p<0.05$)。

植被混凝土边坡恢复后,土壤代谢熵变大。随着有机质含量积累,肥效的作用导致土壤微生物活性比较高,利用基质的效率比较高。Odum^[13]认为环境胁迫条件下,微生物必须从维持生长和繁殖的能量中分流出一部分去补偿由于胁迫所需要付出的额外能量。植被混凝土中由于掺入水泥,此种环境下微生物要维持其正常的生命活动必然要付出外的维持能,因此 qCO_2 高。

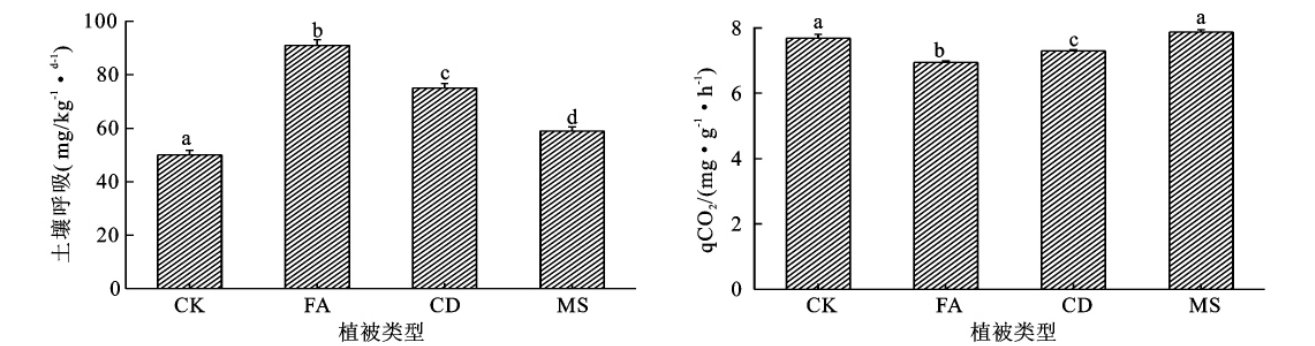


图 5 不同植被恢复模式下土壤呼吸强度与微生物代谢熵

表 2 不同深度土壤土壤特征变化

样地	土层/cm	OM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	MBC/ (mg·kg ⁻¹)	MBC/ SOC(%)	MBN/ (mg·kg ⁻¹)	MBN/ TN(%)	土壤呼吸/(mg· kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	qCO ₂ /(mg· kg ⁻¹ ·h ⁻¹)
CK	0-5	14.03±1.64	0.92±0.09	10.46±0.78	271.13±8.97	1.95±0.17	12.74±0.80	1.40±0.23	50.05±1.73	7.68±0.12
	5-10	8.73±1.78*	0.56±0.10*	5.70±0.68*	123.77±9.60**	1.51±0.20*	9.70±0.82**	1.06±0.03	26.37±0.88**	8.46±0.10*
FA	0-5	37.0±1.64	1.10±0.30	22.41±1.14	546.85±16.49	1.48±0.02	36.49±0.85	3.51±0.62	91.03±2.04	6.93±0.05
	5-10	21.3±1.51**	0.66±0.16	11.83±0.56**	463.47±28.49*	2.18±0.02**	27.83±0.70**	2.65±0.40	85.02±1.45	7.65±0.14*
CD	0-5	21.38±2.33	0.83±0.16	20.20±0.59	428.68±14.00	2.02±0.16	31.04±1.04	3.81±0.35	75.50±1.72	7.29±0.06
	5-10	6.59±1.64**	0.51±0.05*	15.60±0.72**	364.86±9.66	5.75±1.31**	19.63±0.36**	2.42±0.24*	65.06±1.45*	7.45±0.05
MS	0-5	20.24±2.48	1.65±0.15	38.02±1.61	312.69±10.41	1.56±0.14	61.41±2.97	3.74±0.09	59.05±1.53	7.86±0.08
	0-10	8.07±1.61**	1.00±0.16**	19.28±0.90**	291.12±10.39	3.69±0.62**	41.39±1.25**	2.52±0.09**	54.02±1.20	7.82±0.04

分别对表中同一植被恢复模式不同土层深度同一列数据进行方差分析; * 差异显著(0.01<p<0.05); ** 差异极显著(p<0.01)

3.5 不同土层深度间土壤生化指标的变化

由表 2 可知,相同恢复模式下,不同取样深度,土壤有机质、全氮、速效氮、微生物量存在差异,表现出一定规律,即表现为随土层深度增加而降低的趋势,且随土层深度的增加而变化差异极显著($p<0.01$),李涛^[14]研究表明土壤微生物数量随采样深度的增加而降低,这与本研究结果相同。地表地面提供较多的枯枝落叶,这为土壤微生物的生长提供了营养来源,一定程度上促进了土壤中微生物的繁殖。而深层土由于土壤较紧实,不利于微生物生长。

MBC/SOC、呼吸熵表现为随土层深度增加有升高的趋势。随土层深度的增加而变化差异显著($p<0.05$),表层的有机碳全氮含量明显高于亚表层土壤,而微生物碳、氮的增加幅度慢于亚表层的增加幅度。说明植被混凝土表层土壤中有丰富的有机碳、氮素,要维持植物生长所需要的碳源、氮源和营养物质,则必须提高表层土壤中微生物量在有机碳和全氮中所占比例来维持高的有机物代谢和物质循环。

3.6 不同植被模式土壤物理、化学生物特征之间的关系

由表 3 可以看出,不同植被恢复模式下表层土壤物理与化学生物特征之间有显著或极显著的相关关系,其中含水量与全氮、速效氮、微生物氮分别达到了显著与极显著相关;土壤化学与土壤生物性质之间有显著或极显著的相关关系,其中全氮与速效氮、微

生物氮、分别达到了极显著与显著相关,有机碳与微生物碳、呼吸强度、代谢熵、分别达到了极显著与显著相关,此外土壤微生物特征之间也有显著或极显著的相关关系,其中微生物碳与呼吸强度、代谢熵之间有极显著相关关系,其中,代谢熵与微生物碳、有机碳、呼吸强度呈显著的负相关。可见土壤微生物类群与土壤物理化学性状有极显著的相关关系,对土壤有机质、全氮、速效氮等有机和无机养分的转换有积极作用。这一结果说明土壤微生物与土壤养分循环、代谢有着重要的关系。与前人研究结果一致。有关研究显示,土壤微生物生物量是衡量生态稳定性的指标之一,同时也可以作为生态环境土壤健康和肥力的指标^[15]。

许多研究认为有机碳与全氮、微生物量碳与微生物量氮呈显著相关,本研究未能证实它们之间存在相关性,一方面是因为不同植被恢复过程中植被有机碳的积累与氮素固定不一致所诱导的微生物区系不同,导致微生物对碳源利用和氮素固定、分配及转化的多样性。另一方面,植被混凝土抑制了土壤微生物活性,微生物代谢功能差,降低了土壤微生物对碳源和氮源的利用,不能有效参与土壤养分循环和代谢。

4 结 论

(1)边坡植被恢复后,土壤的理化性质得到改善,土壤含水量升高,有助于涵养水分,植被覆盖能有效防

止边坡的水土流失。各种植物覆盖土壤含水量差异较大,其中紫花苜蓿由于根系发达,涵养水分效果最好。

表 3 土壤物理化学特性以及微生物量之间的相关性

	含水量	容重	有机碳	全氮	速效氮	微生物碳	微生物氮	呼吸强度
容重	-0.547							
有机碳	-0.036	0.286						
全氮	0.695*	-0.158	0.123					
速效氮	0.896**	-0.513	0.224	0.859**				
微生物碳	-0.092	0.262	0.933**	-0.159	0.043			
微生物氮	0.865**	-0.581	0.264	0.801**	0.989**	0.093		
呼吸强度	-0.011	0.251	0.936**	-0.093	0.114	0.995**	0.155	
代谢熵	0.402	-0.240	-0.748*	0.495	0.297	-0.887**	0.216	-0.839*

* * 相关性在 0.01 水平上显著(双尾), * 相关性在 0.05 水平上显著(双尾), (2-tailed)。

(2)边坡植被的恢复能增强土壤腐殖化作用,促进土壤有机质的发育,明显提高土壤中有机质含量,改善土壤肥力状况,土壤有机质、全氮、速效氮含量增加。但不同植被恢复模式,对土壤腐殖化作用有差异,有机质增加量不同。其中高羊茅生长旺盛,生物量大、腐烂快,土壤有机质增加最大,紫花苜蓿为豆科植物,具有固氮作用,对土壤全氮、速效氮提高作用明显。

(3)边坡植被恢复能显著提高土壤微生物量碳、氮含量。由于土壤全氮质量分数和土壤有机碳质量分数增加,高的有机质会为微生物的生长提供足够的碳氮和能源,这就使得土壤微生物活性增强,微生物数量提高,微生物量碳、氮含量与土壤全碳、全氮和速效氮含量有极显著的正相关关系。不同植被对土壤改善作用不同,对有机质、微生物量碳改善作用大小依次为高羊茅>狗牙根>紫花苜蓿,对全氮、速效氮、微生物碳改善作用大小依次为紫花苜蓿>高羊茅>狗牙根,因此在进行群落类型的设计时应考虑物种的多样性,功能性综合改善土壤状况。

(4)植被混凝土生态修复后,土壤呼吸强度明显升高,微生物代谢熵显著降低,为微生物代谢提供了丰富的可利用物质,使微生物群落的食物网复杂化,生态系统更趋于稳定。

(5)相关性分析说明微生物量碳、氮、呼吸强度与土壤化学养分相关性最为密切,植被混凝土生态修复过程中,土壤理化性质与微生物性质相互影响,相互促进,使土壤质量逐步得到改善和提高,表明土壤微生物量可以作为评价植被混凝土基材质量的生物学指标。

参考文献:

[1] 宋林,余娜,许文年,等. 植被混凝土护坡绿化技术在高陡边坡生态治理中的应用[J]. 中国水土保持,2009(5): 15-16.

[2] 孙超,许文年,夏振尧,等. 岩石边坡植被混凝土肥力时间变异性研究[J]. 中国水土保持,2009(4):32-34.

[3] 许文年,叶建军,周明涛,等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术,2004,35(1):50-52.

[4] 吴少儒,许文年,王路根,等. 喷射护坡绿化技术的物种选择[J]. 中国水土保持,2006(6):41-43.

[5] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19: 703-707.

[6] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京:农业出版社,1986:226-227.

[7] 叶建军,周明涛,许文年. 谈喷射护坡绿化技术[J]. 水土保持研究,2004,11(6):194-197.

[8] Xu Z H, Ward S, Chen C R, et al. Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia[J]. Journal of Soils and Sediments, 2008,8(2):99-105.

[9] 程积民,万惠娥,胡相明,等. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解[J]. 生态学报,2006,26(4):1207-1212.

[10] Stark S, Julkunen-Tiitto R, Kumpula J. Ecological role of reindeer summer browsing in the mountain birch forests: effects on plant defense, litter decomposition, and soil nutrient cycling[J]. Oecologia,2007,151:486-498.

[11] Bastida F, Barbem G G, Garcta C, et al. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions [J]. Applied Soil Ecology,2008,38:62-70.

[12] Esther Enowashu, Christian Poll, Norbert Lamersdor, et al. Microbial biomass and enzyme activities under reduced nitrogen deposition in a spruce forest soil [J]. Applied Soil Ecology,2009,43(1):11-21

[13] Odum E. Trends expected in stressed ecosystems [J]. Bioscience, 1985,35:419-422.

[14] 李涛,潘志华,安萍莉,等. 北方农牧交错带(武川县)土壤微生物数量分布及层化比率研究[J]. 水土保持学报,2006,20(1):99-102.

[15] Insam H. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? [J]. Soil Biology and Biochemistry,1990,22(4):525-532.