

衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系^{*}

杨 宁^{1,2} 邹冬生^{2**} 杨满元³ 胡利珍¹ 邹芳平¹ 宋光桃¹ 林仲桂¹

(¹湖南环境生物职业技术学院园林学院, 湖南衡阳 421005; ²湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; ³湖南环境生物职业技术学院实验实训中心, 湖南衡阳 421005)

摘 要 采用空间代替时间序列的方法,对衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系进行研究.结果表明:不同植被恢复阶段土壤理化特征存在明显差异,从草坡、灌草、灌丛到乔灌恢复阶段,0~40 cm 土层土壤有机质、全氮、速效氮和土壤含水量显著增加,土壤容重显著减小,土壤全磷和速效磷变化不明显,土壤 pH 逐渐减小,但不同恢复阶段间差异不显著.不同恢复阶段植物群落生物量影响土壤微生物数量和组成,细菌和真菌数量与植物群落地上生物量呈显著正相关,放线菌数量与地上生物量相关性不显著;在各恢复阶段,土壤脲酶、蛋白酶、磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶的活性随着土层的加深而逐渐减弱,并与植物群落丰富度和地上生物量呈显著正相关.

关键词 物种多样性 土壤微生物 土壤酶活性 植被恢复 紫色土

文章编号 1001-9332(2013)01-0090-07 **中图分类号** S727.23 **文献标识码** A

Relationships between vegetation characteristics and soil properties at different restoration stages on slope land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China.

YANG Ning^{1,2}, ZOU Dong-sheng², YANG Man-yuan³, HU Li-zhen¹, ZOU Fang-ping¹, SONG Guang-tao¹, LIN Zhong-gui¹ (¹College of Landscape Architecture, Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang 421005, Hunan, China; ²College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ³Centre of Experiment and Practice Training, Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang 421005, Hunan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 90–96.

Abstract: By using space series to replace time series, this paper studied the relationships between the vegetation characteristics and soil properties at different restoration stages on the slope land with purple soils in Hengyang of Hunnan Province South-central China. There existed obvious differences in the soil physical and chemical properties at different restoration stages. From grassplot, grass-shrub, shrub to shrub-arbor, the soil organic matter, total and available N, and moisture contents increased markedly, soil bulk density had an obvious decrease, soil total and available P contents changed little, and soil pH decreased gradually, but no significant differences were observed among different restoration stages. At different restoration stages, the biomass of plant community had effects on the quantity and composition of soil microbes. The quantities of soil bacteria and fungi had significant positive correlations with the aboveground biomass of plant community, but the quantity of soil actinomycetes had less correlation with plant community's aboveground biomass. At different restoration stages, the activities of soil urease, protease, alkaline phosphatase, invertase, cellulase, catalase, and polyphenol oxidase decreased with increasing soil layer, and had significant positive correlations with plant community's richness and aboveground biomass.

Key words: species diversity; soil microbe; soil enzyme activity; vegetation restoration; purple soil.

^{*} 湖南省科技厅项目(S2006N332)、湖南省教育厅科学研究项目(12C1057)、湖南省普通高校青年骨干教师培养对象资助项目和湖南环境生物职业技术学院南岳学者基金项目(湘环职院[2012]4号)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: zoudongsheng2@sina.com

2012-07-10 收稿, 2012-11-06 接受.

在生态系统中,植被与土壤是一个相互作用、协调发展的统一体,植物群落的变化总是与土壤的演化相关联. 植被演替的过程是植物与土壤相互影响、相互作用的过程,土壤分异导致植被变化,植被的变化影响土壤发育. 因此,关于植被特征与土壤环境之间关系的研究,一直是生态学研究的重要领域. 目前,相关研究主要涉及不同植物群落演替阶段土壤特性的差异^[1-2]、植物群落演替进程中土壤肥力变化综合评价^[3-5]、不同景观尺度植被与土壤特征的空间格局^[6-8]、植物群落分布与土壤特征和土壤营养的关系^[9-11]等.

衡阳紫色土丘陵坡地被认为是湖南省环境最为恶劣的地区之一,是植被恢复的老大难问题,长期以来该区域的植被恢复倍受重视. 由于紫色土有机质和氮含量较低,渗透性差,加上紫色土颜色深吸热性强、蒸发量大,以及区域内的水、热等不利因素,致使紫色土丘岗地区水土流失严重,植被稀疏,基岩裸露,有的区域几乎没有土壤发育层,生态环境恶劣,植被恢复十分困难^[7]. 多年来,该区域的研究重点集中在适宜植物种类的选育、工程整地和生物措施改良土壤等方面. 然而,这些举措并不能彻底实现衡阳紫色土丘陵坡地土地资源的持续利用,其中一个重要原因是忽视了土壤肥力维持与改善的主导因子和限制因子,导致所采取的经营措施存在盲目性. 对退化土壤生态系统的研究发现,土壤酶活性的高低不仅与土壤生态系统的退化有关,还与土壤类型、植被特征、微生物数量、土壤动物类群及数量有关,土壤微生物种类、数量及土壤酶活性是评价土壤质量健康状况、土壤恢复过程和恢复潜力的重要指标. 本文采用“空间序列代替时间序列”的方法^[12-14],研究了衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤微生物数量、酶活性及土壤有机碳和微生物生物量碳含量的关系,以期对衡阳紫色土丘陵坡地生态恢复与重建提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省中南部湘江中游(26°07'05"—27°28'24" N, 110°32'16"—113°16'32" E). 气候属亚热带季风湿润气候,年均温 18 ℃,极端最高气温 40.5 ℃,极端最低气温-7.9 ℃,年降雨量 1325 mm,年蒸发量 1426.5 mm,平均相对湿度 80%,全年无霜期 286 d. 地貌类型以丘岗为主. 紫色土面积为 1.63×10⁵ hm²,呈网状集中分布于该区中

部海拔60~200 m 的地带,东起衡东县霞流、大浦,西至祁东县过水坪,北至衡阳县演陂、渣江,南达常宁市官岭、东山和耒阳市遥田、市炉一带,以衡南、衡阳两县面积最大.

1.2 群落调查

2009 年 8 月,选择坡度、坡向、坡位和裸岩率等生态因子基本一致的坡中下部、沿等高线的有代表性的样地,代表不同植被恢复阶段(表 1):草坡恢复阶段(Ⅰ)、灌草恢复阶段(Ⅱ)、灌丛恢复阶段(Ⅲ)和乔灌恢复阶段(Ⅳ),各群落演替的初始条件均为撂荒地. 在样地中选取面积为 20 m×20 m 的样方 5 个调查乔木,在每个样方的四角与中心设置 5 个 4 m×4 m 的小样方调查灌木,设置 5 个 1 m×1 m 的小样方调查草本植物. 测定每个样方中植物群落的种类组成、盖度、高度、频度等,对草本植物进行齐地面刈割,对灌木和乔木采集新萌发的枝叶,烘干称生物量. 采用 30 cm×30 cm 样方分层取 0~10、10~20 和 20~40 cm 根系,5 次重复,过 1 mm 筛后去土,再用细纱布包裹根系,用清水洗净,于 80 ℃烘箱中烘至恒量,称干质量. 同时采集土壤样品,过 2 mm 筛后保存于 4 ℃冰箱中,用于微生物数量、生物量及土壤酶活性的测定.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤化学性质测定 采集 0~40 cm 土层土壤,5 次重复,风干测定土壤基本成分. 土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,全氮含量采用半微量开氏法测定,速效氮含量采用扩散吸收法测定,全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定,速效磷含量采用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定,土壤 pH 采用电极电位法测定^[15].

1.3.2 土壤含水量测定 用土钻取 0~10、10~20 和 20~40 cm 土层土壤并称鲜质量,然后在 105 ℃

表 1 样地概况
Table 1 Basic status of sampling sites

演替阶段 Succession stage	坡向 Aspect	坡位 Slope position	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type
I	SW	中下坡 Middle-down slope	120	紫色土 Purple soil
II	SW	中下坡 Middle-down slope	110	紫色土 Purple soil
III	SW	中下坡 Middle-down slope	100	紫色土 Purple soil
IV	SW	中下坡 Middle-down slope	110	紫色土 Purple soil

烘箱内烘干至恒量,称干质量,计算土壤含水量^[16-17].

1.3.3 土壤微生物数量与酶活性测定 土壤微生物数量采用稀释平板法计数测定,其中,细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌采用马丁氏培养基,放线菌采用改良高氏 1 号培养基^[18]. 脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定,蛋白酶采用茚三酮比色法,磷酸酶采用对硝基苯磷酸二钠比色法,蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,纤维素酶采用葡萄糖比色法,过氧化氢酶采用 KMnO₄ 滴定法,多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法^[19].

1.4 数据处理

采用 Patrick 丰富度指数 (*R*)、Simpson 指数 (*D*)、Shannon 指数 (*H*) 和物种均匀度指数 (*E*) 进行植物群落物种多样性测度,计算式为:

$$R = S$$
$$D = 1 - \sum P_i^2$$
$$H = - \sum P_i \ln P_i$$
$$E = H / \ln S$$

式中:*S* 为物种丰富度;*P_i* 为物种 *i* 的个体数占群落总个体数的比例.

乔木层重要值 = (相对密度 + 相对频度 + 相对优势度) / 300

灌木层 (草本层) 重要值 = (相对密度 + 相对频度 + 相对盖度) / 300

采用 SPSS 13.0 软件进行数据统计分析和作图,采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 和邓肯氏新复极差检验法 (DMRT 法) 进行方差分析和差异显著性检验 (α = 0.05), 采用 Pearson 分析法进行偏相关分析. 表中数据为平均值 ± 标准差.

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复阶段土壤理化性质

土壤容重和含水量是表征土壤结构与水源涵养

功能的物理环境指标. 由表 2 可以看出,不同植被恢复阶段土壤含水量在 144.1 ~ 328.5 g · kg⁻¹,且差异显著,大小顺序为:乔灌恢复阶段 (IV) > 灌丛恢复阶段 (III) > 灌草恢复阶段 (II) > 草坡恢复阶段 (I);不同植被恢复阶段土壤容重差异显著,可能受土壤有机质含量和植物生长状况的影响,大小顺序为:灌草恢复阶段 (II) > 草坡恢复阶段 (I) > 灌丛恢复阶段 (III) > 乔灌恢复阶段 (IV).

随着植被恢复演替的进行,土壤有机质、全氮和速效氮含量显著增加,土壤 pH 逐渐减小,但差异不显著. 由于衡阳紫色土含有丰富的正长石等矿物,其风化后保留了相当数量的磷,因此磷含量相对较高. 不同植被恢复阶段土壤全磷含量的变化范围在 0.07% ~ 0.08%,速效磷的变化范围在 7.55 ~ 15.19 mg · kg⁻¹,差异不显著.

2.2 不同植被恢复阶段植物群落特征

由表 3 可以看出,不同植被恢复阶段的植物群落物种丰富度指数 (*R*)、Shannon 指数 (*H*) 和均匀度指数 (*E*) 的变化趋于一致,其大小顺序为:灌丛恢复阶段 (III) > 乔灌恢复阶段 (IV) > 灌草恢复阶段 (II) > 草坡恢复阶段 (I);Simpson 指数 (*D*) 的大小顺序为:草坡恢复阶段 (I) > 灌草恢复阶段 (II) > 乔灌恢复阶段 (IV) > 灌丛恢复阶段 (III). 在灌丛恢复阶段 (III),植物群落物种的分布比较均匀,优势种较多,从而形成多优势种的植物群落,而乔灌恢复阶段 (IV)、灌草恢复阶段 (II) 和草坡恢复阶段 (I) 的植物群落仅有 2 或 3 种优势种,而且在群落中占有明显的优势地位.

作为对各植被恢复阶段土壤理化性质差异的响应,植物群落的地上生物量和地下生物量发生相应改变,其大小顺序均为:乔灌恢复阶段 (IV) > 灌丛恢复阶段 (III) > 灌草恢复阶段 (II) > 草坡恢复阶段 (I).

表 2 不同植被恢复阶段 0 ~ 40 cm 土层土壤理化性质
Table 2 Soil physio-chemical properties of 0-40 cm soil layer at different vegetation restoration stages

演替阶段 Succession stage	有机质 Soil organic matter (%)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (%)	速效氮 Available N (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	含水量 Water content (g · kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g · cm ⁻³)	pH
I	9.97±1.02b	0.51±0.02b	0.08±0.01a	34.51±2.11b	8.23±0.63a	144.1±2.1b	0.94±0.02a	8.72±0.05a
II	12.34±0.80b	0.61±0.08b	0.08±0.00a	33.76±0.06b	7.55±1.29a	182.5±0.2b	0.95±0.07a	8.41±0.04a
III	24.11±0.98a	1.20±0.04a	0.07±0.00a	81.81±2.11a	15.19±1.15a	259.2±0.5a	0.64±0.03b	8.05±0.07a
IV	26.12±0.84a	1.27±0.02a	0.07±0.02a	81.61±0.56a	11.04±0.52a	328.5±0.4a	0.56±0.03b	7.47±0.05a

不同字母表示不同植被恢复阶段间差异显著 (*P* < 0.05) Different letters meant significant difference among vegetation restoration stages at 0.05 level.

表 3 不同植被恢复阶段植物群落丰富度、多样性和生物量
Table 3 Richness, diversity and biomass of plant community at different vegetation restoration stages

演替阶段 Succession stage	物种丰富度 Richness	Simpson 指数 Simpson index	Shannon 指数 Shannon index	均匀度指数 Evenness index	地上生物量 Aboveground biomass (g · m ⁻²)	地下生物量 Belowground biomass (g · m ⁻²)
I	5	0.98	2.53	0.84	189.34±13.49	1025.36±189.35
II	14	0.96	3.30	0.92	240.36±15.98	1897.54±100.39
III	21	0.88	3.55	0.94	350.39±23.87	2547.32±142.38
IV	17	0.95	3.47	0.94	490.98±28.24	3425.68±203.98

2.3 不同植被恢复阶段土壤微生物数量

由表 4 可以看出,不同植被恢复阶段中,土壤微生物数量的大小顺序均为:细菌>放线菌>真菌.其中,以细菌占绝对优势,土壤微生物数量主要取决于细菌数量,细菌数量的大小顺序为:乔灌恢复阶段(Ⅳ)>灌丛恢复阶段(Ⅲ)>灌草恢复阶段(Ⅱ)>草坡恢复阶段(Ⅰ),乔灌恢复阶段(Ⅳ)的细菌数量显著高于其他 3 个植被恢复阶段;真菌和放线菌数量则呈现相反的变化规律,乔灌恢复阶段(Ⅳ)的真菌和放线菌的数量均显著低于其他 3 个植被恢复阶段.

由于土壤表层聚集较多的枯枝落叶,有充足的营养源,水热与通气状况较好,有利于微生物的生长与繁殖,因此随着土层的加深,无论是细菌,还是真菌和放线菌,它们的数量均显著减少.

2.4 不同植被恢复阶段土壤酶活性

由表 5 可以看出,随着植被恢复演替的进行,土壤酶活性的大小发生变化.脲酶和纤维素酶活性在乔灌恢复阶段(Ⅳ)最高,显著高于其他 3 个恢复阶

表 4 不同植被恢复阶段土壤微生物数量
Table 4 Soil microbe quantity at different vegetation restoration stages

演替阶段 Succession stage	土层 Soil layer (cm)	细菌数量 Number of bacteria (×10 ⁶ cfu · g ⁻¹)	真菌数量 Number of fungi (×10 ⁴ cfu · g ⁻¹)	放线菌数量 Number of actinomycete (×10 ⁵ cfu · g ⁻¹)
I	0 ~ 10	22.56Aa	7.99Aa	15.53Aa
	10 ~ 20	11.32Aab	4.82ABb	9.53Aab
	20 ~ 40	6.39Ab	3.96ABb	5.43Ab
II	0 ~ 10	37.96Ba	9.59Aa	8.23Ba
	10 ~ 20	16.34Bab	6.83Bb	5.27Bb
	20 ~ 40	10.32Bb	5.18Ab	2.34Bc
III	0 ~ 10	44.69Ba	7.47Aa	12.45ABa
	10 ~ 20	19.69Bab	2.00Aab	5.36Bb
	20 ~ 40	14.28Bb	1.28Bb	4.27Ab
IV	0 ~ 10	124.78Ca	0.38Ba	0.17Ca
	10 ~ 20	115.82Ca	0.17Cb	0.16Ca
	20 ~ 40	36.29Cb	0.16Cb	0.09Cb

不同大写字母表示不同植被恢复阶段间差异显著,不同小写字母表示不同土层间差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference among different vegetation restoration stages, and different small letters meant significant difference among different soil layers at 0.05 level. 下同 The same below.

表 5 不同植被恢复阶段土壤酶活性
Table 5 Soil enzyme activities at different vegetation restoration stages

演替阶段 Succession stage	土层 Soil layer (cm)	脲酶 Urease (mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	蛋白酶 Protease (μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹)	磷酸酶 Alkaline phosphatase (μg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	蔗糖酶 Invertase (mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	纤维素酶 Cellulase (mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	过氧化氢酶 Catalase (μmol · g ⁻¹ · h ⁻¹)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase (mg · g ⁻¹ · 3h ⁻¹)
I	0 ~ 10	0.28Aa	1.38ABa	1.39Aa	5.12ABa	1.49Aa	52.34Ba	0.42Aa
	10 ~ 20	0.25Ba	0.88ABb	0.80Bab	3.98Bab	1.31Aab	32.14Aab	0.28Bab
	20 ~ 40	0.14Ab	0.84Ab	0.32Bb	1.05Ab	1.04ABb	25.73Cb	0.26Ab
II	0 ~ 10	1.47BCa	0.98Aa	1.15ABa	0.87Aa	1.48Aa	75.36Aa	0.58Aa
	10 ~ 20	0.50ABb	0.92ABab	0.35Ab	0.82Ca	1.39Aa	74.59Ba	0.45ABab
	20 ~ 40	0.29Bc	0.80Ab	0.27ABb	0.64Cb	0.71Ab	72.87Ba	0.35Cb
III	0 ~ 10	1.05Ba	1.79Ba	0.76Ba	7.69Ba	1.42Aa	78.23Ab	1.18Ba
	10 ~ 20	0.84Ab	1.32Bab	0.44Aab	5.93Aab	1.32Aab	78.00Bb	0.69Ab
	20 ~ 40	0.39BCc	0.79Ab	0.21Ab	2.54Bb	1.15ABb	76.45Bb	0.28Ac
IV	0 ~ 10	1.98Ca	0.87Aa	0.87Ba	0.89Aa	3.20Ba	1.25Ca	0.19Ca
	10 ~ 20	0.49ABb	0.69Aab	0.71Ba	0.57Cb	2.45Bab	1.23Ca	0.18Ca
	20 ~ 40	0.45Cb	0.57Bb	0.26ABb	0.54Cb	1.98Bb	0.98Ab	0.17Ba

表 6 不同植被恢复阶段土壤微生物数量与群落物种丰富度、多样性和生物量的偏相关系数

Table 6 Partial coefficients between richness, diversity, biomass and soil microbe quantity at different vegetation restoration stages

项目 Item	演替阶段 Succession stage	偏相关 关系 Partial correlation	偏相关 系数 Partial coefficient	t 值 t value	P
细菌数量 Number of bacteria	I	$r(n, m_1)$	0.986 **	5.54	0.02
		$r(n, m_2)$	0.949 **	3.75	0.11
		$r(n, m_5)$	0.454	1.59	0.66
	II	$r(n, m_1)$	0.997 **	60.06	<0.01
		$r(n, m_4)$	0.999 **	62.46	<0.01
		$r(n, m_6)$	0.987 **	50.86	<0.01
	III	$r(n, m_2)$	0.999 **	45.58	<0.01
		$r(n, m_3)$	0.997 **	50.78	<0.01
		$r(n, m_4)$	0.999 **	30.22	<0.01
	IV	$r(n, m_1)$	0.987 **	17.52	<0.01
		$r(n, m_4)$	0.996 **	12.15	<0.01
		$r(n, m_6)$	0.986 **	13.26	<0.01
真菌数量 Number of fungi	I	$r(n, m_1)$	0.956 **	5.86	0.05
		$r(n, m_2)$	0.926 **	3.12	0.17
		$r(n, m_4)$	0.964 **	6.16	0.04
	II	$r(n, m_1)$	0.986 **	15.64	<0.01
		$r(n, m_2)$	0.988 **	29.38	<0.01
		$r(n, m_4)$	0.976 **	11.12	<0.01
	III	$r(n, m_2)$	0.987 **	12.26	<0.01
		$r(n, m_3)$	0.989 **	21.98	<0.01
		$r(n, m_4)$	0.989 **	7.65	0.02
	IV	$r(n, m_1)$	0.963 **	5.78	0.05
		$r(n, m_2)$	0.976 **	4.99	0.03
		$r(n, m_6)$	0.976 **	5.65	0.04
放线菌数量 Number of actinomycetes	I	$r(n, m_2)$	0.511 *	0.66	0.62
		$r(n, m_4)$	0.734 **	2.13	0.39
		$r(n, m_5)$	0.878 **	3.01	0.21
	II	$r(n, m_1)$	0.595 *	9.20	<0.01
		$r(n, m_2)$	0.961 **	5.72	0.05
		$r(n, m_3)$	0.956 **	6.57	0.03
	III	$r(n, m_2)$	0.470 *	1.19	0.36
		$r(n, m_4)$	0.904 **	3.23	0.17
		$r(n, m_5)$	0.973 **	5.23	0.05
	IV	$r(n, m_1)$	0.652 *	1.00	0.45
		$r(n, m_4)$	0.274	0.30	0.80
		$r(n, m_5)$	0.574 *	0.86	0.55

n :细菌、真菌或放线菌数量 Numbers of bacteria, fungi or actinomycetes; m_1 :地上生物量 Aboveground biomass; m_2 :地下生物量 Belowground biomass; m_3 :丰富度 Richness; m_4 :Simpson 指数 Simpson index; m_5 :Shannon 指数 Shannon index; m_6 :均匀度指数 Evenness index. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

表 7 不同植被恢复阶段土壤酶活性与物种丰富度、地上生物量的相关系数

Table 7 Coefficients among the soil enzymes, richness and aboveground biomass at different vegetation restoration stages

演替阶段 Succession stage	指数 Index	脲酶 Urease	蛋白酶 Protease	磷酸酶 Alkaline phosphatase	蔗糖酶 Invertase	纤维素酶 Cellulase	过氧化氢酶 Catalase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase
I	丰富度 Richness	0.180	0.472 *	0.130	0.564 *	0.120	0.478 *	0.847 **
	生物量 Biomass	0.499 *	0.424	0.876 **	0.836 **	0.802 **	0.168	0.457
II	丰富度 Richness	0.519 *	0.825 **	0.688 **	0.432	0.346	0.166	0.524 *
	生物量 Biomass	0.827 **	0.668 *	0.470 *	0.190	0.472 *	0.796 **	0.228
III	丰富度 Richness	0.588 *	0.786 **	0.417	0.187	0.852 **	0.478 *	0.305
	生物量 Biomass	0.654 *	0.847 **	0.814 **	0.480 *	0.417	0.445	0.837 **
VI	丰富度 Richness	0.569 *	0.587 *	0.915 **	0.336	0.416	0.472 *	0.541 *
	生物量 Biomass	0.650 *	0.834 **	0.199	0.028	0.548 *	0.866 **	0.909 **

段;蛋白酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性在灌丛恢复阶段(Ⅲ)最高,显著高于其他3个植被恢复阶段;过氧化氢酶的活性在灌草恢复阶段(Ⅱ)和灌丛恢复阶段(Ⅲ)显著高于草坡恢复阶段(Ⅰ)和乔灌恢复阶段(Ⅳ);而磷酸酶活性在草坡恢复阶段(Ⅰ)最高,显著高于其他3个恢复阶段.

在每个植被恢复阶段,脲酶、蛋白酶、磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶的活性在土壤剖面中的变化趋势与土壤微生物数量一样,即随着土层的加深而逐渐减弱.

2.5 土壤微生物数量与群落物种丰富度、多样性和生物量的关系

自然条件下,植物群落生物量取决于群落的结构和功能,它可以反映群落在演替过程中土壤特征和土壤资源的持续供给能力.因此,分析植物群落物种丰富度、多样性、生物量与土壤微生物数量之间的相关关系,可以说明植被变化与土壤演替的内在联系.

由表6可以看出,在草坡恢复阶段(Ⅰ)、灌草恢复阶段(Ⅱ)和乔灌恢复阶段(Ⅳ),细菌数量、真菌数量与群落地上生物量呈显著正相关;在灌丛恢复阶段(Ⅲ),细菌数量、真菌数量与群落地下生物量呈显著正相关;在草坡恢复阶段(Ⅰ)和灌丛恢复阶段(Ⅲ),放线菌数量与地下生物量呈显著正相关;而在灌草恢复阶段(Ⅱ)和乔灌恢复阶段(Ⅳ),放线菌数量与地上生物量呈显著正相关.

2.6 土壤酶活性与群落丰富度、地上生物量的关系

由表7可以看出,在草坡恢复阶段(Ⅰ),植物群落地上生物量与脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性呈显著正相关;植物群落丰富度与蛋白酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性呈显著正相关.在灌草恢复阶段(Ⅱ),植物群落地上生物量与脲酶、

蛋白酶、磷酸酶、纤维素酶和过氧化氢酶活性呈显著正相关;植物群落丰富度与脲酶、蛋白酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性呈显著正相关。在灌丛恢复阶段(Ⅲ),植物群落地上生物量与脲酶、蛋白酶、磷酸酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性呈显著正相关;植物群落丰富度与脲酶、蛋白酶、纤维素酶和过氧化氢酶活性呈显著正相关。在乔灌恢复阶段(Ⅳ),植物群落地上生物量与脲酶、蛋白酶、纤维素酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性呈显著正相关;群落植物丰富度与脲酶、蛋白酶、磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性呈显著正相关。

3 讨 论

土壤有机质、氮和磷是土壤主要的养分指标,而且土壤有机质还是形成土壤结构的重要物质,直接影响土壤肥力、持水能力、抗蚀能力、土壤容重和 pH 等,有利于增强土壤孔隙度、通气性和结构性,有显著的缓冲作用和持水力,含有大量的植物营养元素,是土壤微生物的碳源和氮源,能激发土壤微生物酶活性,有利于地下死根和凋落物的及时降解。衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段理化特征的差异,引起植被组成、物种多样性等群落结构特征发生变化。作为对土壤理化性质变化的响应,植物为了更加充分地利用土壤养分,在土壤理化性状较好的局部环境中有利于根系的生长,直接影响植物生长与代谢,加速植被恢复的演替进程。乔灌恢复阶段植物群落的地上生物量和地下生物量显著高于其他植被恢复阶段,说明土壤理化性质的好坏直接影响着植物群落的生产力和植被恢复的演替进程。

在各演替阶段,细菌数量偏高,乔灌恢复阶段 0~10 cm 土层细菌数量达 1.25×10^8 cfu · g⁻¹,而真菌和放线菌的数量分别只有 3.84×10^3 和 1.71×10^4 cfu · g⁻¹。这与细菌、真菌和放线菌生态属性的差异有关,细菌个体小,繁殖方式简单,速度快,而且取样时间为 8 月,水热条件适宜,有利于细菌的发育,而真菌和放线菌发育缓慢,当微生物繁殖与生长的环境得到改善时,真菌、放线菌与细菌竞争处于弱势地位,细菌数量增加从而抑制了真菌和放线菌的生长发育。有研究发现,细菌数量在某些土壤中较高,如祁连山山杨(*Populus davidiana*)灌木林土壤细菌的数量达 4.27×10^9 cfu · g⁻¹[20],四川洪雅县退耕还林模式下土壤细菌在秋季达到 1.86×10^9 cfu · g⁻¹[21]。生长限制性资源的有效性影响生物群落的组成,对土壤微生物来说,土壤资源的有效性受枯枝落叶和

根系的氨基酸、纤维素、有机酸等分泌物的影响,在不同时空尺度上,植物生产水平(如腐殖质)的高低比物种丰富度更能影响微生物群落的组成。乔灌恢复阶段的地下生物量明显高于其他植被恢复阶段,土壤 pH 等理化性状更有利于土壤有机质和氮的矿化,土壤中有有机质和氮等有效成分最多,能更好地为微生物生长发育提供丰富的碳源和氮源,因此土壤微生物数量最多。

土壤酶是土壤中非常活跃的物质,土壤中一切生化反应和代谢活动都是在酶的参与下完成的。土壤酶对土壤肥力和其他环境因子的变化非常敏感,能够较早地反映土地利用与生物的变化,能更好地表达土壤的生物活性,可作为反映土壤营养元素有效水平的一项生物指标。对植物而言,需要不同的酶来吸收土壤中的养分,而土壤微生物与这些酶在土壤营养物质循环转化过程中是密切联系的,存在着相互促进、相互制约的复杂关系[22]。土壤中脲酶、磷酸酶和蛋白酶均为参与氮素循环的酶,其活性的高低可作为土壤肥力指标,土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和纤维素酶的活性反映了土壤有机质碳、腐殖质积累与分解转化规律,与 CO₂ 的释放有密切关系,是表征土壤碳素循环和土壤生化活性的重要指标。有研究表明,土壤中大多数酶活性与土壤中某些养分元素的含量具有密切相关性。在衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段,脲酶、蛋白酶、磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶参与了土壤的碳、氮循环,对土壤有机质和腐殖质的合成起到了积极作用。土壤酶活性通过影响土壤理化特征、微生物种类与数量,间接影响植物群落特征。

参考文献

- [1] Qu G-H (曲国辉), Guo J-X (郭继勋). The relationship between different plant communities and soil characteristics in Songnen grassland. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2003, **12**(1): 18–22 (in Chinese)
- [2] Nihlgård B. Pedological influence of spruce planted on former beech forest soil in Scania, South Sweden. *Oikos*, 1971, **22**: 302–314
- [3] Zhang Q-F (张庆费), Song Y-C (宋永昌), Qu W-H (曲文辉). Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(2): 174–178 (in Chinese)
- [4] Kellner O, Redbotorstensson PR. Effects of elevated nitrogen deposition on field-layer vegetation in coniferous forests. *Ecological Bulletins*, 1995, **44**: 227–237
- [5] Yang X-B (杨小波), Zhang T-L (张桃林), Wu Q-S (吴庆书). The relationship between biodiversity and

- soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of Southern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(2): 190–196 (in Chinese)
- [6] Yang N (杨宁), Zou D-S (邹冬生), Yang M-Y (杨满元), *et al.* Structure and spatial distribution pattern of *Taiwania flousiana* population in Leigong Mountain, Guizhou. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2011, **31**(10): 2100–2105 (in Chinese)
- [7] Yang N (杨宁), Zou D-S (邹冬生), Li J-G (李建国). The vegetation restoration mode construction in sloping-land with purple soils in Hengyang basin. *Practical Science* (草业科学), 2010, **27**(10): 10–16 (in Chinese)
- [8] Yang N (杨宁), Peng W-X (彭晚霞), Zou D-S (邹冬生), *et al.* Eco-economic vegetation restoration model of soil and water conservation in the karst mountainous earth rock areas in Guizhou. *China Population Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2011, **21**(suppl.): 474–477 (in Chinese)
- [9] Hou F-J (侯扶江), Nan Z-B (南志标), Xiao J-Y (肖金玉), *et al.* Characteristics of vegetation, soil, and their coupling of degraded grasslands. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(8): 915–922 (in Chinese)
- [10] Wang L (王琳), Zhang J-T (张金屯), Shangguan T-L (上官铁梁), *et al.* Species diversity of mountain meadow of Lishan and the relation with the soil physico-chemical properties. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2004, **10**(1): 18–22 (in Chinese)
- [11] Yuan Y-X (袁永孝), Guo S-L (郭水良), Cao T (曹同), *et al.* Environmental interpretation on distribution of forest vegetation and main tree species in Baishilazi Nature Reserve. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology* (辽宁林业科技), 2002(1): 1–6 (in Chinese)
- [12] Yang N (杨宁), Zou D-S (邹冬生), Li J-G (李建国), *et al.* Niche dynamics of main plant communities in natural restoration succession process on sloping land with purple soils in Hengyang basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2010, **30**(4): 87–93 (in Chinese)
- [13] Zhang J-Y (张继义), Zhao H-L (赵哈林), Zhang T-H (张铜会), *et al.* Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin sandy land. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(1): 86–92 (in Chinese)
- [14] Yang N (杨宁), Zou D-S (邹冬生), Li J-G (李建国). Spatial pattern of main populations of the natural recovery shrub stage community in sloping-land with purple soils in Hengyang. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(3): 996–1001 (in Chinese)
- [15] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [16] Yang N (杨宁), Zou D-S (邹冬生), Li J-G (李建国). Study on dynamic of water content on the sloping-land with purple soils in Hengyang basin. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2009, **16**(6): 16–21 (in Chinese)
- [17] Yang N (杨宁), Zou D-S (邹冬生), Yang M-Y (杨满元), *et al.* Analysis on soil physio-chemical characteristics in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2012, **33**(6): 757–761 (in Chinese)
- [18] Wu J-S (吴金水), Lin Q-M (林启美), Huang Q-Y (黄巧云), *et al.* Soil Microbial Biomass: Methods and Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 108–256 (in Chinese)
- [19] Guan S-Y (关松荫). Soil Enzymes and Research Methods. Beijing: China Agriculture Press, 1983: 182–226 (in Chinese)
- [20] Guo Y-B (郭银宝), Xu X-Y (许小英). Three kinds of soil microbe community quantity distribution in different vegetable soil. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry* (青海农林科技), 2005(3): 16–18 (in Chinese)
- [21] Liu Z-X (刘子雄), Zhu T-H (朱天辉), Zhang J (张健). Analysis on communities of soil microbes under forest rehabilitation. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science) (南京林业大学学报·自然科学版), 2005, **29**(4): 45–48 (in Chinese)
- [22] Chen J (陈璟), Yang N (杨宁). Dynamic change of microbial biomass carbon (MBC) in the process of natural recovery on sloping-land with purple soils in Hengyang. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2012, **21**(10): 1670–1673 (in Chinese)

作者简介 杨宁,男,1974年生,博士,副教授。主要从事植物生态学和恢复生态学研究,发表论文20余篇。E-mail: yangning8787@sina.com

责任编辑 孙菊
