

紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤微生物 生物量碳、微生物熵的变化

杨宁^{1,2}, 邹冬生², 杨满元¹, 雷玉兰¹, 林仲桂¹, 付美云¹, 宋光桃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, 湖南 长沙 410128)

摘要: 采用空间序列代替时间序列的方法, 对河南省衡阳市紫色土丘陵坡地植被恢复过程中的土壤微生物生物量碳(SMBC)、微生物熵(q_{SMBC})的变化特征进行了研究。结果表明: (1) 随着植被恢复的进行, SMBC和 q_{SMBC} 均显著增加; (2) 随着土层深度的增加, SMBC显著减小, 而 q_{SMBC} 显著增加; (3) 草本群落阶段(Ⅱ)→灌木群落阶段(Ⅲ)→乔木群落阶段(Ⅳ), 根际和非根际的SMBC显著增加, 表现出根际>非根际的特点, 阶段Ⅱ的根际与非根际SMBC比值明显高于Ⅲ与Ⅳ。根际和非根际的 q_{SMBC} 均显著增加, 表现出根际<非根际的特点, 根际和非根际的 q_{SMBC} 比值差异不显著; (4) 相关分析表明, SMBC与 q_{SMBC} 均与土壤有机碳、阳离子交换量呈极显著或显著正相关关系, 与土壤容重呈显著负相关关系。

关键词: 植被恢复; 土壤微生物生物量碳; 微生物熵; 紫色土; 湖南省衡阳市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0039-05

中图分类号: S154.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.015

Variations of Soil Microbial Biomass Carbon and Biological Information Entropy During Revegetation on Hillslope Land with Purple Soil

YANG Ning^{1,2}, ZOU Dong-sheng², YANG Man-yuan¹, LEI Yu-lan¹,
LIN Zhong-gui¹, FU Mei-yun¹, SONG Guang-tao¹

(1. College of Landscape Architecture, Hunan Polytechnic of Environment and Biology, Hengyang, Hunan 421005, China; 2. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: The properties of SMBC (soil microbial biomass carbon), q_{SMBC} (biological information entropy) during revegetation on hillslope land with purple soils in Hengyang City of Hunan Province were studied using the space for time method. The results showed that: (1) SMBC and q_{SMBC} significantly increased from bare land (Ⅰ), herbaceous community (Ⅱ), shrubby community (Ⅲ) to arboreal community stage (Ⅳ); (2) SMBC significantly decreased but q_{SMBC} significantly increased from soil layer of 0—20 cm, 20—40 cm to 40—60 cm; (3) From stage Ⅱ, Ⅲ to Ⅳ, SMBC in R (rhizosphere) and S (non-rhizosphere) were significantly increased, and expressed the properties $SMBC_R > SMBC_S$, $SMBC_R/SMBC_S$ in stage Ⅱ was obviously higher than that in Ⅲ and Ⅳ. q_{SMBCR} and q_{SMBCS} significantly increased from stage Ⅱ to Ⅳ, and $q_{SMBCR} < q_{SMBCS}$, but q_{SMBCR}/q_{SMBCS} had no significant difference; (4) Correlation analysis showed: SMBC and q_{SMBC} highly or significantly positively correlated with soil organic carbon and cation exchange capacity (CEC), and significantly negatively correlated with bulk density.

Keywords: revegetation; SMBC; q_{SMBC} ; purple soils; Hengyang City of Hunan Province

在土壤生态系统中, 存在着大量的微生物群落, 它们是土壤生命活体的主要组成部分, 是土壤物质转化的参与者, 在土壤有机质分解和营养元素矿化及转化过程中发挥主要作用^[1-2]。土壤微生物量碳 (soil

收稿日期: 2013-05-22

修回日期: 2013-07-21

资助项目: 湖南省科技厅项目“湖南省紫色土荒山坡地植被恢复技术研究”(S2006N332); 湖南省教育厅科学研究项目“衡阳紫色土丘陵坡地土壤种子库特征”(12C1057); 湖南省林业科技创新计划项目“衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复技术与示范”(XLK201341); 湖南省普通高校青年骨干教师培养对象资助项目; 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)

作者简介: 杨宁(1974—), 男(苗族), 湖南省绥宁县人, 博士, 副教授, 主要从事植物生态学与恢复生态学的教学与研究。E-mail: yangning8787@sina.com。

通信作者: 邹冬生(1959—), 男(汉族), 湖南省祁东县人, 博士, 教授, 主要从事紫色土荒山坡地生态植被恢复研究。E-mail: zoudongsheng2@sina.com。

microbial biomass carbon, SMBC)虽然只占土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的1%~3%,但这一部分 SOC 却影响着整个 SOC 与植物养分的循环与转化,是植物矿质养分的源与汇,是稳定态养分转化为有效养分的催化剂^[3-4]。SMBC 是土壤营养库的重要组成部分,其与 SOC 的比值是衡量 SOC 积累或缺失的重要指标^[5-6]。因此,研究恢复过程中 SMBC 及土壤微生物熵(q_{SMBC})的变化,可以直接或间接地反映不同恢复阶段土壤质量的变化,对指导退化生态系统的恢复有着重大的意义。

湖南省衡阳市紫色土丘陵坡地面积 1.63×10^5 hm^2 ,是湖南省环境最为恶劣的地区之一,因紫色土 SOM 与 N 的含量低,渗透性较差,加上紫色土颜色深吸热性强,蒸发量大,以及区域性水、热分布等不利环境影响和不合理的开发,致使该区域不仅植被稀疏(有的区域出现大面积基岩裸露,几乎无土壤发育层,植被恢复极度困难),而且水土流失与季节性旱灾严重,该区域的生态系统的恢复与重建已成为农业生产环境改善、区域经济发展及人民脱贫致富的迫切要求。随着植被的恢复,由于生态要素的变化,导致不同恢复阶段、不同土壤垂直剖面及根际(rhizosphere, R)与非根际(non-rhizosphere, S)的土地质量发生变化。本研究采用时空互代法^[7-9],对不同恢复阶段、不同土层(0—20, 20—40 和 40—60 cm),以及根际与非根际的 SMBC, q_{SMBC} 进行比较研究,探索其土地质量的时空变化规律,以期为该区域的植被恢复与重建提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该区域位于湖南省中南部,湘江中游,地理坐标为:110°32′16″—113°16′32″E, 26°07′05″—27°28′24″N,东起衡东县霞流镇与大浦镇,西至祁东县过水坪镇,北至衡阳县演陂镇与渣江镇,南达常宁市官岭镇与东山瑶族乡和耒阳市遥田镇与市炉镇一带,以衡

南、衡阳两县面积最大,地貌类型以丘岗为主,呈网状集中分布于该区域中部海拔 60~200 m 的地带。该区域属亚热带季风湿润气候,年平均气温 18℃;极端最高气温 40.5℃,极端最低气温 -7.9℃,年平均降雨量 1 325 mm,年平均蒸发量 1 426.5 mm。平均相对湿度 80%,全年无霜期 286 d。

1.2 研究方法

选择坡度、坡向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,代表不同的植被恢复阶段,分别为:裸地阶段(I)、草本群落阶段(II)、灌木群落阶段(III)与乔木群落阶段(IV),代表不同恢复阶段,且每个样地的面积 > 1 hm^2 ,演替的初始条件均为撂荒地(表 1)。在每个样地内各设置 3 块 400 m^2 (20 m × 20 m) 样方,且样方间距 > 20 m,于春(2011 年 3 月)、夏(2011 年 8 月)、秋(2011 年 11 月)与冬(2012 年 1 月)四季,在每个样方内按 S 型、线型或梅花型 5 点混合取样法,分不同恢复阶段;不同层次(0—20, 20—40 和 40—60 cm);根际与非根际(在 II, III 与 IV 这 3 个恢复阶段分别随机选出的 5 株优势植株作为采样点)采集土样样品。同一恢复阶段的相同土层、相同的取样区域(R 与 S)的 5 个点的土样等比例混匀为一个混合样,编号,除去杂物与石块,迅速混合放入无菌袋内并装入带冰块的取样箱中运回,过 2 mm 筛,将土样分为 2 部分:1 份保存于 4℃ 的冰箱中供土壤微生物学指标的分析;另一份风干研磨过 0.25 mm 筛以供土壤理化性质的测定(表 2)。

1.3 分析方法

土壤容重(bulk density, BD)测定采用环刀法;SOC 测定采用重铬酸钾—硫酸外加热法;全氮(total nitrogen, TN)测定采用半微量凯氏法;阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)采用乙酸铵交换法测定;pH 值采用电极电位法测定^[10-12]。

SMBC 采用氯仿熏蒸— K_2SO_4 浸提法测定,转换系数 K 采用 0.45^[13]。

$$q_{SMBC} = SMBC/SOC$$

表 1 样地基本情况

恢复阶段	坡度	坡向	海拔/m	主要组成物种
I	30°	SW	130	极少数阳性先锋幼苗,如野桐、盐肤木,近无草本植物。
II	25°	SW	125	草本植物主要有狗尾草、须芒草与夏枯草等;木本植物主要有野桐、火棘与构树等。
III	25°	SW	135	灌木层主要有牡荆、紫薇、圆叶乌桕、重阳木、女贞、六月雪、山杨与马桑等。
IV	35°	SW	140	乔木层主要有枫香、圆叶乌桕、朴树、重阳木与山杨等;灌木层有紫薇、女贞、六月雪、矮地茶等。

注:各种植物学名分别为:野桐(*Mallotus tenuifolius*);盐肤木(*Rhus chinensis*);狗尾草(*Setaria viridis*);须芒草(*Miscanthus sinensis*);夏枯草(*Prunella vulgaris*);火棘(*Pyracantha fortuneana*);构树(*Broussonetia papyrifera*);牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*);紫薇(*Agromonia pilosa*);圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*);重阳木(*Bischofia polycarpa*);女贞(*Ligustrum lucidum*);六月雪(*Serissa foetida*);山杨(*Populus davidiana*);马桑(*Coriaria nepalensis*);枫香(*Liquidambar formosana*);朴树(*Celtis sinensis*);矮地茶(*Ardisia japonica*)。

表 2 供试土壤的基本情况

恢复阶段	土层/cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	阳离子交换量/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	pH 值
I	0—20	1.13±0.11Aa	8.06±3.11Aa	0.70±0.04Aa	11.13±1.09Aa	8.55±0.67Aa
	20—40	1.29±0.13Aab	3.98±1.54Ab	0.39±0.05Aab	9.88±1.03Ab	8.68±0.76Aa
	40—60	1.40±0.10Ab	2.54±1.00Bb	0.24±0.02Ab	8.33±0.78Ab	8.78±0.78Aa
II	0—20	1.11±0.11Ba	10.09±3.94Aa	0.72±0.06Aa	13.99±1.43ABa	8.13±0.80ABa
	20—40	1.21±0.13Aab	5.21±2.43Aab	0.44±0.04ABab	12.57±1.24ABa	8.21±0.81ABab
	40—60	1.30±0.12ABb	3.21±1.56ABb	0.25±0.07ABb	11.99±1.21ABb	8.34±0.37ABb
III	0—20	1.00±0.09BCa	13.67±4.00ABa	0.80±0.06ABa	15.77±1.43Ba	8.01±0.57ABa
	20—40	1.06±0.08ABa	7.09±2.34ABb	0.66±0.05Bab	14.33±1.09Bab	8.12±0.43ABb
	40—60	1.24±0.12Bb	4.59±1.58ABc	0.26±0.02Bb	12.91±1.32ABb	8.14±0.67Bb
IV	0—20	0.93±0.08Ca	15.43±4.78Ba	0.90±0.07Ba	18.68±2.01Ca	7.13±0.76Ba
	20—40	1.02±0.10Bab	9.76±2.98Bb	0.59±0.0Bab	15.70±1.57Cb	7.24±0.68Bab
	40—60	1.22±0.12Bb	6.67±1.97Ab	0.42±0.03Cb	14.33±1.39Bb	7.46±0.86Cb

注:同列不同大写字母表示同一土层不同恢复阶段间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一恢复阶段不同土层间差异显著($p < 0.05$)。下同。

1.4 数据处理

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($\alpha = 0.05$),采用 Pearson 分析法进行相关分析。所有数据均为 4 个季节,且每个季节 3 次重复共 12 个样品的平均值(表中数据为平均数±标准差)。

2 结果与分析

2.1 恢复过程中 SMBC 与 q_{SMBC} 的变化

研究表明(表 3),就 SMBC 来说,在 0—20, 20—40 与 40—60 cm 各土层中,随着植被恢复的进行,从 I → IV, SMBC 显著增加($p < 0.05$);在 I, II, III 与 IV 各恢复阶段, SMBC 垂直分布明显,表现为随着土层深度的增加而显著减小($p < 0.05$),其大小顺序为: SMBC(0—20 cm 土层) > SMBC(20—40 cm 土层) > SMBC(40—60 cm 土层)。就 q_{SMBC} 来说,在时间上变化规律与 SMBC 的变化规律相似,0—20, 20—40 与 40—60 cm 各土层中,随着植被恢复的进行,从 I → IV, q_{SMBC} 显著增加($p < 0.05$);其垂直变化规律与 SMBC 的变化规律刚好相反, q_{SMBC} 随土层深度的增加而显著增加($p < 0.05$),其大小顺序为: q_{SMBC} (0—20 cm 土层) < q_{SMBC} (20—40 cm 土层) < q_{SMBC} (40—60 cm 土层)。

2.2 恢复过程中 SMBC 与 q_{SMBC} 的 R 与 S 变化

研究表明(表 4),就 SMBC 来说,在 II, III 与 IV 这 3 个恢复阶段中,根际与非根际显著增加($p < 0.05$),表现出根际 > 非根际的特点,3 个恢复阶段的 SMBC_R/SMBC_S 值分别为 1.3±0.1, 1.2±0.1 和 1.2

±0.1,其中 II 的 SMBC_R/SMBC_S 明显高于 III 与 IV ($p < 0.05$);就 q_{SMBC} 来说, q_{SMBCR} 与 q_{SMBCS} 均显著增加($p < 0.05$),且表现出 $q_{SMBCR} < q_{SMBCS}$ 的特点,在 3 个恢复阶段中, q_{SMBCR}/q_{SMBCS} 值分别为 0.9±0.1, 0.9±0.1 和 0.9±0.1,但差异不显著($p > 0.05$)。

表 3 恢复过程中 SMBC 与 q_{SMBC} 的变化

恢复阶段	土层/cm	土壤微生物量碳/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	土壤微生物熵/ ($mg \cdot g^{-1}$)
I	0—20	350.9±29.1Aa	43.5±3.9Aa
	20—40	268.1±19.0Aab	67.4±5.7Ab
	40—60	178.1±15.2Ab	70.1±6.7Ab
II	0—20	487.1±30.5Ba	48.3±5.0ABa
	20—40	376.7±27.9Bab	72.3±6.8ABab
	40—60	275.3±19.1Bb	85.8±7.9ABb
III	0—20	765.1±50.8Ca	55.3±4.8Ba
	20—40	612.5±47.0Cb	75.4±7.0Bab
	40—60	487.3±30.7Cc	96.2±10.3Cb
IV	0—20	856.7±67.0Da	55.5±5.7Ba
	20—40	732.8±45.2Dab	86.1±6.8ABab
	40—60	600.3±51.2Db	107.0±10.0Bb

2.3 SMBC 及 q_{SMBC} 与土壤性质的关系

相关分析表明(表 5), SMBC 与 SOC 及 CEC 呈极显著正相关关系($p < 0.01$),与 TN 呈显著正相关关系($p < 0.05$),与 BD 呈显著负相关关系($p < 0.05$); q_{SMBC} 与 SOC 呈显著正相关关系($p < 0.05$),与 CEC 呈极显著正相关关系($p < 0.01$),与 BD 呈显著负相关关系($p < 0.05$)。

表 4 植被恢复过程中 R 与 S 的 SMBC 与 q_{SMBC}

恢复阶段	SMBC _R / (mg · kg ⁻¹)	SMBC _S / (mg · kg ⁻¹)	SMBC _R / SMBC _S	q_{SMBCR} / (mg · g ⁻¹)	q_{SMBCS} / (mg · g ⁻¹)	q_{SMBCR} / q_{SMBCS}
II	555.8 ± 42.1a	436.1 ± 44.7a	1.3 ± 0.1a	61.9 ± 6.76a	68.8 ± 6.7a	0.9 ± 0.1a
III	804.0 ± 67.7b	666.5 ± 54.6b	1.2 ± 0.1b	68.0 ± 7.1ab	75.6 ± 6.09ab	0.9 ± 0.1a
IV	967.4 ± 56.7c	800.5 ± 79.0c	1.2 ± 0.1b	74.6 ± 7.2b	82.9 ± 7.4b	0.9 ± 0.1a

注: SMBC_R 表示根际土壤微生物量碳; SMBC_S 表示非根际土壤微生物量碳; SMBC_R/SMBC_S 表示土壤微生物量碳的根际效应; q_{SMBCR} 表示根际土壤微生物熵; q_{SMBCS} 表示非根际土壤微生物熵; q_{SMBCR}/q_{SMBCS} 表示土壤微生物熵的根际效应。

表 5 SMBC 及 q_{SMBC} 与土壤性质的相关系数

项目	容重	土壤有机碳	全氮	阳离子交换量	pH 值
土壤微生物量碳	-0.58*	0.90**	0.60*	0.77**	0.30
土壤微生物熵	-0.60*	0.48*	0.26	0.80**	0.24

注: * 表示 SMBC 或 q_{SMBC} 与土壤性质的相关性达到显著水平 ($p < 0.05$, 双尾); ** 表示 SMBC 或 q_{SMBC} 与土壤性质的相关性达到极显著水平 ($p < 0.01$, 双尾)。

3 讨论

(1) 在植被恢复的过程中, 土壤微生物生物量、活性及种群结构都会发生很大的变化^[14]。由于植被凋落物的输入, SOC 增加, 为微生物提供丰富的 C 源; 植物根系可以为微生物栖息提供良好的场所, 且根系分泌物作为营养基质被微生物利用; 另外, 植物根系的生长活动也可以改变土壤的物理环境, 使其有利于微生物生长。因此, 随着植被恢复的进行, SMBC 与 q_{SMBC} 显著增加 ($p < 0.05$) (表 3), 同时也反映在植被的恢复的过程中, 土地质量在逐渐恢复。这一研究结果与刘爽等^[15] 对黑龙江 5 种温带森林土壤微生物生物量碳和王国兵等^[16] 对北亚热带次生栎林与火炬松 (*Pinus taeda* L.) 人工林土壤微生物生物量碳的研究结果相似。而与 Jia 等^[17] 的 SMBC 与 q_{SMBC} 与随着恢复年限的增加先下降后升高, 在 23 a 时降至最低, 最后保持在一个比较稳定的水平的研究结果不一致, 在 Jia 等^[17] 的研究中, 开始地上植物生长迅速, 地上生物量不断增加, 大量消耗土壤中的 C, N 元素, 造成 SMBC 与 q_{SMBC} 在 23 a 时降至最低。因此, SMBC 与 q_{SMBC} 的变化是植物群落结构、土壤性质的综合影响的结果 (表 5)。

(2) 在 I, II, III 与 IV 这 4 个恢复阶段的 SMBC 均随土层深度的增加而显著降低 ($p < 0.05$), 而 q_{SMBC} 则随着土层深度而显著升高 ($p < 0.05$), 表明土壤中的 C 素处于积累状态, 且深层土壤中 C 积累强度高于表层土壤, SOC 逐渐由土壤表层向深层转移, 这一研究结果与易志刚等^[18] 和尉海东等^[19] 的研究结果一致。笔者认为造成这一现象的原因有: 土壤表层理化

性质的改善, 有充分的营养源, 水热与通气状况较好, 有利于微生物的生长与繁殖, 使得 SOC 在表层富集, 为 SOC 随着土壤颗粒向深层迁移提供了重要的来源; 植物根系向深层土壤穿插, 为微生物栖息提供良好的场所, 且根系分泌物可作为营养基质被微生物利用, 促进了深层 SOC 的提高; 植被恢复后, 土壤容重减小, 入渗性能增强, 有利于 SOC 随水分运动向深层土壤的迁移。(3) R 是植物、土壤与微生物生物相互作用的重要界面, 也是物质与能量交换的结点, 是生物能不断积累与扩张的一个重要区域, 是土壤中活性最强的小生境^[20-21]。在衡阳紫色土丘陵坡地的植物恢复过程中, SMBC 及 q_{SMBC} 的 R 与 S 变化明显, 从草本群落阶段 (II) → 灌木群落阶段 (III) → 乔木群落阶段 (IV) 的恢复过程中, SMBC 表现出 SMBC_R > SMBC_S 的特点, 其中 II 的 SMBC_R/SMBC_S 明显高于 III 与 IV ($p < 0.05$); 而 q_{SMBC} 表现出 q_{SMBCR} 与 q_{SMBCS} 均显著增加 ($p < 0.05$), 表现出 $q_{SMBCR} < q_{SMBCS}$ 的特点 (表 4)。目前, 中国对植物根际养分研究较多, 国外注重对植物根系分泌物和根际微生物进行研究。结合国内外研究现状, 在研究方法、微生态系统整体研究、根系分泌物与微生物生物相互作用、植物根际环境与逆境胁迫等方面均需要进一步深入地研究^[22-24]。

[参 考 文 献]

- [1] Powlson D S, Brookes P C, Christensen D S. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19 (2): 159-164.
- [2] 杨满元, 杨宁, 郭锐, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物数量特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 229-232.
- [3] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 90-96.
- [4] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤酶活性特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1516-1524.
- [5] Insam H, Domsch K H. Relationship between soil or-

- ganic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites[J]. *Microbial Ecology*, 1988, 15(2):177-188.
- [6] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1):25-30.
- [7] 杨宁, 邹冬生, 李建国, 等. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落自然恢复演替进程中种群生态位动态[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(4):87-93.
- [8] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(1):86-92.
- [9] 杨宁, 陈璟, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉林不同林冠环境下箭竹分株种群结构特征[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(11):2326-2331.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(6):703-707.
- [12] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地土壤水分变化动态研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(6):16-21.
- [13] Bath E. Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations (a review)[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1989, 47(3/4):335-379.
- [14] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4):801-808.
- [15] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12):3135-3143.
- [16] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1):37-42.
- [17] Jia Guomei, Cao Jing, Wang Chunyang, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession of secondary forest succession in Ziwulin, Northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1):117-125.
- [18] 易志刚, 蚁伟民, 丁明懋, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳、微生物生物量碳和土壤 CO₂ 浓度垂直分布[J]. *生态环境*, 2006, 15(3):611-615.
- [19] 尉海东, 董彬. 鲁东南杨树人工林土壤微生物生物量碳的时空动态[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(2):233-238.
- [20] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. *生态学报*, 2014, 34(10):2693-2701.
- [21] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4):575-580.
- [22] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(6):757-761.
- [23] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性[J]. *生态学报*, 2012, 32(8):2390-2399.
- [24] 杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植被恢复模式建设[J]. *草业科学*, 2010, 27(10):10-16.
- (上接第38页)
- [18] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J]. *地理科学*, 2003, 23(5):617-621.
- [19] 杨弘, 李忠, 裴铁璠, 等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2):272-276.
- [20] Putuhena W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor [J]. *Journal Hydrology*, 1996, 180(1):283-299.
- [21] 叶仲节, 柴锡周. 浙江林业土壤[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1986:77-103.
- [22] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水分—物理性质特征分析[J]. *中南林业学院学报*, 2005, 34(2):1-6.
- [23] 杨建, 陈家军, 杨周喜, 等. 松散砂粒孔隙结构、孔隙分形特征及渗透率研究[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(3):93-98.
- [24] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20):1896-1896.
- [25] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):53-56.
- [26] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆市四面山典型林分土壤饱和导水率研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(2):29-34.
- [27] 丁小龙, 张兴昌, 龚晶晶, 等. EN-1 固化剂对 4 种土壤饱和导水率的影响研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1):132-134.
- [28] 贾小旭, 邵明安, 魏孝荣, 等. 黄土高原北部草地表层土壤水分状态空间模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10):38-44.