

衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤基础呼吸及代谢熵的变化

陈璟, 杨宁

(湖南环境生物职业技术学院园林学院, 湖南 衡阳 421005)

摘要: 为探讨衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段中的土壤呼吸特征, 采用空间序列代替时间序列的方法, 对土壤基础呼吸(SBR)及代谢熵($q\text{CO}_2$)的变化进行了研究, 并分析了它们与土壤性质的关系。结果表明: 不同植被恢复阶段中的 SBR、 $q\text{CO}_2$ 存在明显差异, 从裸地(I)、草本群落(II)、灌木群落(III)到乔木群落(IV)阶段, SBR 显著增强($P < 0.05$), $q\text{CO}_2$ 显著减小($P < 0.05$)。每个恢复阶段, 土层深度从 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 到 40 ~ 60 cm, SBR 显著减弱($P < 0.05$), $q\text{CO}_2$ 显著增加($P < 0.05$)。从 II、III 至 IV 阶段, 根际(R)与非根际(S)的 SBR 显著增加($P < 0.05$), SBR 的 R/S 显著减小($P < 0.05$); 而 $q\text{CO}_2$ 逐渐减小($P > 0.05$), $q\text{CO}_2$ 的 R/S 逐渐上升($P > 0.05$), SBR 与 $q\text{CO}_2$ 均表现出 $R > S$ 的特点。相关分析表明, SBR 与土壤微生物量碳(SMBC)、土壤温度(SST)呈极显著正相关($P < 0.01$), 与土壤容重(SBD)呈显著负相关($P < 0.05$); $q\text{CO}_2$ 与 SMBC 呈极显著负相关($P < 0.01$), 与 ST 呈显著负相关($P < 0.05$), 与 SBD 和 pH 值呈显著正相关($P < 0.05$)。这些对于构建植被恢复技术体系具有理论与实践意义。

关键词: 植被恢复; 土壤基础呼吸; 代谢熵; 紫色土; 衡阳

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.06.004

Changes in SBR and $q\text{CO}_2$ at Different Re-vegetation Stages on Sloping-land with Purple Soils in Hengyang of Hunan Province, South-central China

CHEN Jing, YANG Ning

(College of Landscape Architecture, Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang 421005, China)

Abstract: In order to understand the changes in soil respiration of sloping-land with purple soils in Hengyang, the soil basal respiration (SBR), metabolic quotient ($q\text{CO}_2$) were studied by using the space series to replace time series, and the relationships between SBR, $q\text{CO}_2$ and soil properties were analyzed. The results showed that SBR and $q\text{CO}_2$ had significant difference at different re-vegetation stages. From bare land stage (I), herb community stage (II), shrub community stage (III) to tree community stage (IV), SBR significantly increased ($P < 0.05$), while $q\text{CO}_2$ significantly decreased ($P < 0.05$). At every re-vegetation stage, SBR significantly decreased ($P < 0.05$) along 0 – 20 cm, 20 – 40 cm, and 40 – 60 cm soil layers, while $q\text{CO}_2$ significantly increased ($P < 0.05$). From II, III to IV stages, SBR of rhizosphere (R) and non-rhizosphere (S) significantly increased ($P < 0.05$), and R/S of SBR significantly decreased ($P < 0.05$), while $q\text{CO}_2$ of R and S gradually decreased ($P > 0.05$), and R/S of $q\text{CO}_2$ gradually increased ($P > 0.05$). SBR and $q\text{CO}_2$ in rhizosphere were bigger than those in non-rhizosphere. Correlation analysis showed that SBR had significantly positive correlation with soil microbial biomass carbon (SMBC) and soil temperature (ST) ($P < 0.01$), and significantly negative with soil bulk density (SBD) ($P < 0.05$). $q\text{CO}_2$ had significantly negative correlation with SMBC ($P < 0.01$) and ST ($P < 0.05$), but significantly

收稿日期: 2013-05-20

接受日期: 2013-07-26

基金项目: 国家林业局 948 重点项目(2008-4-32); 湖南省重点课题(62020608001); 湖南省教育厅科学研究项目(13C247)资助

作者简介: 陈璟(1966~), 男, 副教授, 主要从事园林植物、园林生态方面的研究与教学工作。E-mail: heshecheng2@sina.com

positive with SBR and pH value ($P < 0.05$). These would have a theoretical and practical significance for building vegetation restoration technique system.

Key words: Re-vegetation; Soil basal respiration (SBR); Metabolic quotient ($q\text{CO}_2$); Purple soil; Hengyang

土壤基础呼吸(Soil basal respiration, SBR)是土壤中有代谢作用的活实体在代谢过程中吸收 O_2 和释放 CO_2 的过程,包括根际呼吸(根与根际微生物呼吸)和异氧呼吸(土壤微生物呼吸与土壤动物呼吸)^[1-2]。随着植被恢复,群落组成结构发生不同,其土壤中的根系组成、根际微环境、作为分解者的土壤微生物类群组成、活性也不同,因此 SBR 也不同;呼吸熵($q\text{CO}_2$),又称代谢熵(Metabolic quotient),它将微生物可矿化 C 与微生物生物量有机结合起来,是反映环境因素、管理措施等变化对微生物 C 库影响的一个敏感性指标^[3];根际(Rhizosphere, R)是土壤中的一个特殊环境,其中土壤微生物的数量和类型比非根际(Non-rhizosphere, S)的要多,植物根系的生长发育及根系分泌的化合物(包括有机化合物与无机化合物)影响着微生物的繁殖与分布而产生根际效应(R/S)。因此, SBR、 $q\text{CO}_2$ 与 R/S 均是一个受生物与非生物因素控制的非常复杂的过程,具有很大的空间与时间变异性,有关 SBR、 $q\text{CO}_2$ 与 R/S 的研究是生态学研究的重要内容之一,已取得了一定的研究成果^[4-6]。目前对于衡阳紫色土丘陵坡地的研究主要集中于土壤水分的研究^[7-8],有关植被恢复过程中 SBR 与 $q\text{CO}_2$ 的变化特征研究还鲜见报道,导致对当地植被所采取的经营措施存在盲目性。

衡阳紫色土丘陵坡地面积约有 $1.625 \times 10^5 \text{ hm}^2$,是湖南省环境最为恶劣的地区之一,因紫色土壤有机质碳(Soil organic carbon, SOC)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^[9-10]。本研究采用“空间序列代替时间序列”的方法^[11-13],以典型区域不同的植物群落为研究对象,了解不同恢复阶段、不同土层,及根际与非根际的 SBR 和 $q\text{CO}_2$ 的变化特征,一方面可以填补恢复生态学中土壤呼吸变化规律的理论空白,同时对于构建植被恢复技

术体系有一定的理论与实践意义。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

紫色土丘陵坡地区位于湖南省中南部,处于湘江中游(地理坐标为: $110^\circ 32' 16'' \sim 113^\circ 16' 32'' \text{ E}$, $26^\circ 07' 05'' \sim 27^\circ 28' 24'' \text{ N}$),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,年平均气温为 18°C ;极端最高温达 40.5°C ,极端最低温为 -7.9°C ,年平均降雨量有 1325 mm,年平均蒸发量达 1426.5 mm;年平均相对湿度为 80%,全年无霜期为 286 d。

1.2 样地设置

2010 年 5 - 6 月,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具代表性的样地,以裸地阶段(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,且每个样地的面积均大于 1 hm^2 ,演替的初始条件均为撂荒地。裸地阶段(I)的样地坡度为 25° ,坡向西南,海拔 125 m,仅有极少数阳性先锋幼苗,如野桐(*Mallotus tenuifolius*)、盐肤木(*Rhus chinensis*),近无草本植物。草本群落阶段(II)的样地坡度为 35° ,坡向西南,海拔 130 m,草本植物主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、须芒草(*Miscanthus sinensis*)与夏枯草(*Prunella vulgaris*)等;木本植物主要有野桐、火棘(*Pyracantha fortuneana*)与构树(*Broussonetia papyrifera*)等。灌木群落阶段(III)的样地坡度为 20° ,坡向西南,海拔 145 m,灌木层主要有牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)、紫薇(*Agrmonia 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*)与马桑(*Coriaria*

nepalensis)等。乔木群落阶段(IV)的样地坡度为25°,坡向西南,海拔135 m,乔木层主要有枫香(*Liquidambar formosana*)、圆叶乌桕、朴树(*Celtis sinensis*)、重阳木与山杨等;灌木层有紫薇、女贞、六月雪、矮地茶(*Ardisia japonica*)等。在每个样地内各设置3块400 m² (20 m × 20 m)样方,且样方间距大于20 m,在每个样方内按S型、线型或梅花型5点混合取样法,分不同生境、不同土壤层次(0~20 cm, 20~40 cm和40~60 cm),且在II、III与IV 3个恢复阶段分别随机选取优势植物各5株作为采样点,对其R与S的土壤样品进行采集。每个样品重复取样3次,除去杂物与石块,迅速混合放入无菌袋内,用带冰块的取样箱运回。土壤样品过2 mm筛,混匀,将土样分为2份:1份保存于4℃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筛备用。供试土壤的基本情况见表1。

1.3 方法

土壤微生物量碳(Soil microbial biomass carbon,

SMBC)的测定采用氯仿熏蒸-0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄ 浸提法^[14-17]。SMBC = (熏蒸浸提液中SOC - 未熏蒸浸提液中SOC)/0.411^[16-17]。

SBR参考吴金水等^[18]改进的室内密闭培养法测定。土壤含水量(Soil water content, SWC)采用烘干法(105℃, 12 h)测定,土壤容重(Soil bulk density, SBD)采用环刀法测定,土壤温度(Soil temperature, ST)采用温度探针计测定, pH值采用电极电位法测定^[19]。

$q\text{CO}_2$ 是SBR与SMBC的比值,即 $q\text{CO}_2 = \text{SBR} / \text{SMBC}$ 。

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3次重复的平均值。结果为平均数 ± 标准差。

表1 供试土壤的基本情况

Table 1 Basic properties of soils tested

阶段 Stage	土层 Layer (cm)	SOC (g kg ⁻¹)	SMBC (mg kg ⁻¹)	SWC (%)	SBD (g cm ⁻³)	ST (℃)	pH
I	0 ~ 20	24.12 ± 2.00Aa	531.82 ± 20.12Aa	30.43 ± 2.32Aa	1.24 ± 0.11Aa	19.06 ± 1.87Aa	8.00 ± 0.65Aa
	20 ~ 40	22.87 ± 1.097Aab	343.72 ± 15.98Aab	27.99 ± 1.08Aab	1.29 ± 0.13Ab	18.35 ± 1.67Aab	8.21 ± 0.57Aa
	40 ~ 60	19.37 ± 2.12Ab	231.54 ± 14.12Ab	25.21 ± 1.26Ab	1.36 ± 0.17Ac	16.09 ± 1.60Ab	8.33 ± 0.78Aa
II	0 ~ 20	28.43 ± 2.84Aa	716.25 ± 36.09Aa	32.34 ± 2.09ABa	1.18 ± 0.12ABa	25.21 ± 2.43ABa	7.56 ± 0.76Ba
	20 ~ 40	25.98 ± 2.49Bab	432.63 ± 23.98Bab	30.37 ± 2.03ABab	1.25 ± 0.14Aab	24.98 ± 2.40Bab	7.78 ± 0.56Ba
	40 ~ 60	22.09 ± 2.26Ab	258.05 ± 16.09Ab	26.89 ± 1.86Ab	1.34 ± 0.13Ab	22.56 ± 2.21Bb	7.98 ± 0.65Ba
III	0 ~ 20	35.76 ± 3.07ABa	1100.00 ± 82.09Ba	33.89 ± 2.53ABa	1.11 ± 0.10ABa	28.34 ± 2.65Ba	7.34 ± 0.78Ba
	20 ~ 40	30.05 ± 3.00BCb	636.57 ± 60.45BCb	31.09 ± 2.08ABab	1.20 ± 0.12ABab	27.43 ± 2.66BCab	7.39 ± 0.76BCa
	40 ~ 60	25.43 ± 2.37ABc	333.03 ± 20.00ABc	27.84 ± 2.67Bb	1.33 ± 0.12Ab	26.54 ± 2.65BCb	7.43 ± 0.68Ca
IV	0 ~ 20	53.64 ± 4.35Ba	1276.18 ± 99.98Ba	35.76 ± 2.78Ba	0.98 ± 0.11Ba	33.01 ± 3.00Ca	7.12 ± 0.76Ba
	20 ~ 40	40.35 ± 3.98Cab	752.61 ± 43.76Cb	33.54 ± 2.54Bab	1.12 ± 0.09Bab	30.32 ± 3.01Bab	7.15 ± 0.68Ca
	40 ~ 60	30.54 ± 2.97Bb	504.12 ± 28.09Bb	27.13 ± 2.54Bb	1.23 ± 0.10Bb	28.09 ± 2.89Cb	7.16 ± 0.76Ca

I: 裸地阶段; II: 草本群落阶段; III: 灌木群落阶段; IV: 乔木群落阶段; SOC: 土壤有机碳; SMBC: 土壤微生物量碳; SWC: 土壤含水量; SBD: 土壤容重; ST: 土壤温度。数据后不同大写字母表示同一土层不同演替阶段间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一演替阶段不同土层间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

I: Bare land stage; II: Herb community stage; III: Shrub community stage; IV: Tree community stage; SOC: Soil organic carbon; SMBC: Soil microbial biomass carbon; SWC: Soil water content; SBD: Soil bulk density; ST: Soil temperature. Data followed different capital letters indicate significant difference at 0.05 level among different succession stages at the same soil depth, while different small letters indicate significant difference at 0.05 level among different soil layers in the same succession stage. The same is following Tables.

2 结果和分析

2.1 植被恢复阶段中SBR及 $q\text{CO}_2$ 的变化

随着植被恢复的进行,各恢复阶段以及各土层的 SMBC、SWC、SBD、ST 等土壤性质发生变化(表 1), SBR 及 $q\text{CO}_2$ 的变化也表现出一定的规律性^[20]。

从表 2 可知, SBR 均随植被的恢复而显著加强($P < 0.05$), 表现为乔木群落阶段(IV) > 灌木群落阶段(III) > 草本群落阶段(II) > 裸地阶段(I); 在每个恢复阶段, SBR 均随着土层深度的加深而显著减弱($P < 0.05$), 各土层的 SBR 依次为 0 ~ 20 cm > 20 ~ 40 cm > 40 ~ 60 cm。

$q\text{CO}_2$ 的变化规律与 SBR 的相反, 即均随植被恢复的进行而显著减小($P < 0.05$), 表现为裸地阶段(I) > 草本群落阶段(II) > 灌木群落阶段(III) > 乔木群落阶段(IV); 在每个恢复阶段, 随着土壤深度的增加, $q\text{CO}_2$ 呈现明显的垂直变化特点, 表现为:

40 ~ 60 cm 土层 > 20 ~ 40 cm 土层 > 0 ~ 20 cm 土层($P < 0.05$)。

2.2 SBR和 $q\text{CO}_2$ 在根际与非根际间的变化

在土壤中, 根际(R)是一个特殊的生境, R 的土壤微生物在数量与类型上要比非根际(S)的多, R 的土壤微生物数量(生物量)与 S 的土壤微生物数量(生物量)的比值称之为根际效应(R/S)^[21-22], R/S 越大, 根际效应越明显。从表 3 可知, 从草本群落阶段(II) → 灌木群落阶段(III) → 乔木群落阶段(IV), R 与 S 的 SBR 均显著增加($P < 0.05$), 且 $R > S$, R/S 显著减小($P < 0.05$); R 与 S 的 $q\text{CO}_2$ 均逐渐减小($P > 0.05$), 同样表现出 $R > S$ 的特点, R/S 逐渐上升($P > 0.05$)。

2.3 SBR及 $q\text{CO}_2$ 与土壤性质的关系

相关分析表明(表 4), SBR 与土壤微生物量

表 2 恢复过程中 SBR 与 $q\text{CO}_2$ 的变化

Table 2 Changes in SBR and $q\text{CO}_2$ during re-vegetation stages

恢复阶段 Re-vegetation stage	土层 Layer (cm)	SBR (mg CO ₂ -C kg ⁻¹ h ⁻¹)	$q\text{CO}_2$ ($\times 10^{-3}$ h ⁻¹)
I	0 ~ 20	2.524 ± 0.243Aa	4.746 ± 0.401Aa
	20 ~ 40	1.996 ± 0.187Ab	5.807 ± 0.502Aab
	40 ~ 60	1.765 ± 0.143Ab	7.623 ± 0.689Ab
II	0 ~ 20	3.337 ± 0.298ABa	4.659 ± 0.444Aa
	20 ~ 40	2.225 ± 0.287Bab	5.143 ± 0.512ABab
	40 ~ 60	1.803 ± 0.200Ab	6.987 ± 0.632ABb
III	0 ~ 20	4.653 ± 0.443Ba	4.230 ± 0.407ABa
	20 ~ 40	3.109 ± 0.319Cab	4.884 ± 0.438Ba
	40 ~ 60	2.187 ± 0.254ABb	6.567 ± 0.549ABb
IV	0 ~ 20	5.009 ± 0.547Ca	3.925 ± 0.298Ba
	20 ~ 40	3.243 ± 0.365Cb	4.309 ± 0.309Cab
	40 ~ 60	3.000 ± 0.299Bb	5.951 ± 0.587Bb

表 3 植被恢复过程中 R、S 的 SBR 及 $q\text{CO}_2$ 的变化

Table 3 Change of SBR and $q\text{CO}_2$ of R and S during the re-vegetation

阶段 Stage	SBR (mg CO ₂ -C kg ⁻¹ h ⁻¹)			$q\text{CO}_2$ (h ⁻¹)		
	R	S	R/S	R	S	R/S
II	4.203 ± 0.326a	2.764 ± 0.187a	1.521 ± 0.129a	0.0072 ± 0.0005a	0.0064 ± 0.0004a	1.125 ± 0.012a
III	5.432 ± 0.445b	3.754 ± 0.239ab	1.447 ± 0.120ab	0.0068 ± 0.0003a	0.0058 ± 0.0006a	1.172 ± 0.016a
IV	5.996 ± 0.512b	4.329 ± 0.386b	1.385 ± 0.111b	0.0063 ± 0.0005a	0.0052 ± 0.0004a	1.212 ± 0.013a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level.

表4 SBR及 $q\text{CO}_2$ 与土壤性质的相关系数Table 4 Correlation coefficients between SBR, $q\text{CO}_2$ and soil properties

	SMBC	SWC	SBD	ST	pH
SBR	0.8237**	0.2547	-0.6015*	0.7908**	0.2879
$q\text{CO}_2$	-0.7985**	-0.2179	0.4621*	-0.5000*	0.6035*

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

碳(SMBC)与土壤温度(ST)呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与土壤容重(SBD)呈显著负相关关系($P < 0.05$),与土壤含水量(SWC)与pH值的相关性不明显。 $q\text{CO}_2$ 与SMBC呈极显著负相关关系($P < 0.01$),与ST呈显著负相关关系($P < 0.05$),与SBD和pH值呈显著正相关关系($P < 0.05$),与SWC的相关性不明显。

3 讨论

(1) SMBC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,预示了土壤潜在的碳通量。就当前研究SMBC的方法而言,SBR、 $q\text{CO}_2$ 与SMBC的关系尚不明确^[23]。Wang等^[24]认为SBR、 $q\text{CO}_2$ 取决于土壤基质的性质而不是SMBC的大小,Scott-Denton等^[25]的研究表明,SBR、 $q\text{CO}_2$ 与SMBC的关系密切,而Sato等^[26]的研究表明它们之间没有关系。本研究结果表明,SMBC与SBR呈极显著正相关关系(相关系数为0.8237**),与 $q\text{CO}_2$ 呈极显著负相关关系(相关系数为-0.7985**)(表4)。

(2) ST不仅影响着植物地上部分的生理生态活动,同时还对土壤有机物(Soil organic matter, SOM)的分解、植物根系呼吸以及土壤微生物的活动产生影响,因此对SBR、 $q\text{CO}_2$ 的影响最大(其相关系数分别为0.7908**、-0.5000*)(表4),本研究结果与Burton等^[27]、Keith等^[28]的研究结果相似。

(3) SWC对SBR、 $q\text{CO}_2$ 的影响较为复杂,SBR在一定的范围内随SWC的增大而增强,在接近田间持水量的一定范围内,在饱和或永久萎蔫含水量时,SBR停滞^[29]。Davidson等^[30]认为,12%是SWC的一个阈值,SWC < 12%时,SBR与SWC呈正相关关系,SWC > 12%时,SBR与SWC呈负相关关系。Xu等^[31]认为19%是SWC的一个阈值。杨金艳与王传宽^[32]认为,多数情况下,SBR与SWC呈正相关关系,但当SWC超过某一

界限时,SWC则成为SBR的抑制因子,其原因是SWC过高或者过低均会抑制凋落物的分解、根呼吸及土壤微生物的活动,从而降低了SBR的强度。本实验中,SBR、 $q\text{CO}_2$ 与SWC没有显著相关关系,这是由于该研究区域属亚热带季风湿润气候,实验时间为2010年5-6月,降雨量充沛,SWC充足,且其波动范围小[(25.21 ± 1.26)% ~ (35.76 ± 2.78)%之间](表2),不足以影响植物根系与土壤微生物的活动,所以难以甄别出SWC对SBR与 $q\text{CO}_2$ 贡献^[33]。此外,实验观测到的SWC变化范围如果太小,SBR与 $q\text{CO}_2$ 受SWC变化的影响也可能被其它生态因子的影响或者系统误差所掩盖^[34]。同时也从一个侧面说明了影响SBR、 $q\text{CO}_2$ 的生态因子的复杂性。

(4) 根际(R)是植物、土壤与微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^[35-36]。在衡阳紫色土丘陵坡地的植物恢复过程中,SBR及 $q\text{CO}_2$ 在R与非根际(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,SBR及 $q\text{CO}_2$ 均表现出R > S的变化特点。由于从II→IV的恢复过程中,植物凋落物的碳的含量升高,其质量较低,难分解性较大,从而导致参加分解的微生物数量,尤其是参加分解难分解物质的真菌数量的增多,因而SBR的R/S显著减小($P > 0.05$),而 $q\text{CO}_2$ 的R/S逐渐上升($P > 0.05$),这与Grego与Kennedy^[37]的研究结果相似。目前,我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、微生物生态系统整体研究、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深入的研究^[38-39]。

参考文献

- [1] Hanson P J, Edwards N T, Garten G T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of

- methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 48(1): 115–146.
- [2] Tang J W, Badocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale [J]. *Glob Change Ecol*, 11(8): 1298–1304.
- [3] Powelson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: Grammas irradiation, autoclaving, air-drying and fumigation [J]. *Soil Biol Biochem*, 1976, 16(4): 459–464.
- [4] Chen J, Yang N. Dynamatic change of microbial biomass carbon (MBC) in the process of natural recovery on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, 21(10): 1670–1673.
陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地自然恢复过程中微生物量碳动态变化 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(10): 1670–1673.
- [5] Wang G B, Tang Y F, Ruan H H, et al. Seasonal variation of soil respiration and its main regulating factors in a secondary oak forest and a pine plantation in north-subtropical area in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(2): 966–975.
王国兵, 唐燕飞, 阮宏华, 等. 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异及其主要影响因素 [J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 966–975.
- [6] Montserrat G, Martí E, Sierra J, et al. Discriminating inhibitory from enhancing effects in respirometry assays from metal polluted-sewage sludge amended soils [J]. *Appl Soil Ecol*, 2006, 34(1): 52–61.
- [7] Yang N, Zou D S, Li J G. Study on dynamic of water content on the sloping-land with purple soils in Hengyang Basin [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2009, 16(6): 16–21.
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.
- [8] Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. Analysis on soil physico-chemical characteristics in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *Res Agri Modern*, 2012, 33(6): 757–761.
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.
- [9] Yang N, Zou D S, Li J G. Spatial pattern of main populations of the natural recovery shrub stage community in sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, 18(3): 996–1001.
杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地自然恢复灌丛阶段主要种群空间分布格局 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 996–1001.
- [10] Yang N, Zou D S, Li J G. Study on numerical classification and species diversity of plant community in a sloping-land with purple soils in Hengyang Basin [J]. *Res Agri Modern*, 2009, 30(5): 615–619.
杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植物群落数量分类及物种多样性研究 [J]. *农业现代化研究*, 2009, 30(5): 615–619.
- [11] Yang N, Zou D S, Li J G, et al. Niche dynamics of main plant communities in natural restoration succession process on sloping land with purple soils in Hengyang Basin [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2010, 30(4): 87–93.
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.
- [12] Zhang J Y, Zhao H L, Zhang T H, et al. Dynamica of species diversity of communities in Restoration processes in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, 28(1): 86–92.
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.
- [13] Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. Structure and spatial distribution pattern of *Taiwania flousiana* population in Leigong Mountain, Guizhou [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2011, 31(10): 2100–2105.
杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉的种群结构和空间分布格局 [J]. *西北植物学报*, 2011, 31(10): 2100–2105.
- [14] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703–707.
- [15] Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. The change of soil microbial biomass carbon and the relationship between it and soil physico-chemical factors in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, 22(1): 25–30.
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.
- [16] Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. 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 [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(1): 90–96.
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.
- [17] Bååth E. Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations: A review [J]. *Water Air Soil Poll*, 1989, 47(3/4): 335–379.
- [18] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Determination Method for Soil Microbial Biomass and Its Application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 1–150.
吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 1–150.

- [19] Bao S D. Soil Agrochemical Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 1–395.
鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1–395.
- [20] Yang M Y, Yang N, Guo R, et al. Numerical properties of soil microbial population in re-vegetation stages on sloping land with purple soils in Hengyang [J]. Ecol Environ Sci, 2013, 22(2): 229–232.
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.
- [21] Lu Y H, Zhang F S. The advances in rhizosphere microbiology [J]. Soils, 2006, 38(2): 113–118.
陆雅海, 张福锁. 根际微生物研究进展 [J]. 土壤, 2006, 38(2): 113–118.
- [22] Hao H R, Li Z F, Xiong J, et al. Variation of microbial flora and enzyme activity in rhizospheric soil under continuous cropping of *Achyranthes bidentata* [J]. Chin J Eco-Agri, 2008, 16(2): 301–311.
郝慧荣, 李振芳, 熊君, 等. 连作怀牛膝根际土壤微生物区系及酶活性的变化研究 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 301–311.
- [23] Shen R F, Brookes P C, Powlson D S. Effect of long-term straw incorporation on soil microbial biomass and C and N dynamics [J]. Pedosphere, 1997, 7(4): 297–302.
- [24] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content [J]. Soil Biol Biochem, 2003, 35(2): 273–284.
- [25] Scott-denton L E, Sparks K L, Monson R K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest [J]. Soil Biol Biochem, 2003, 35(4): 525–534.
- [26] Sato A, Seto M. Relationship between rate of carbon dioxide evolution, microbial biomass carbon, and amount of dissolved organic carbon as affected by temperature and water content of a forest and an arable soil [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1999, 30(19/20): 2593–2605.
- [27] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine [J]. Tree Physiol, 2003, 23(4): 273–280.
- [28] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. Plant Soil, 1997, 190(1): 127–141.
- [29] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests [J]. Glob Change Biol, 2002, 8(12): 1183–1194.
- [30] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. Glob Change Biol, 1998, 4(2): 217–227.
- [31] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. Glob Change Biol, 2001, 7(6): 667–677.
- [32] Yang J Y, Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Acta Ecol Sin, 2006, 26(6): 1640–1647.
杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化 [J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1640–1647.
- [33] Chen J, Yang N. Soil hydrological function at different vegetation restoration stages in purple soil slopelands in Hengyang [J]. Chin J Eco-Agri, 2013, 21(5): 590–597.
陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复过程中土壤水文效应 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 590–597.
- [34] Yang Q P, Li M G, Wang B S. Study on soil respiration of the lower subtropical successive forest communities [J]. Guihaia, 2004, 24(5): 443–449.
杨清培, 李鸣光, 王伯荪. 南亚热带森林群落演替过程中林下土壤的呼吸特征 [J]. 广西植物, 2004, 24(5): 443–449.
- [35] Yang N, Peng W X, Zou D S, et al. Eco-economic vegetation restoration model of soil and water conservation in the karst mountainous earth-rock areas in Guizhou [J]. China Popul Resour Environ, 2011, 21(S1): 474–477.
杨宁, 彭晚霞, 邹冬生, 等. 贵州喀斯特土石山区水土保持生态经济型植被恢复模式 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(S1): 474–477.
- [36] Yang N, Zou D S, Li J G. The vegetation restoration mode construction in sloping-land with purple soils in Hengyang Basin [J]. Pratac Sci, 2010, 27(10): 10–16.
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.
- [37] Grego S, Kennedy A C. Effect of ammonium nitrate and stabilized farmyard manure on microbial biomass and quotient of soil under *Zea mays* [J]. Agri Medit, 1998, 128(2): 132–137.
- [38] Chen J, Yang N. Soil microbial properties under different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. Ecol Environ Sci, 2013, 22(5): 739–742.
陈璟, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物特性 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 739–742.
- [39] Yang N, Zou D S, Li J G, et al. On biomass properties of the main plant communities in sloping-land with purple soils in Hengyang Basin [J]. J Hunan Agri Univ (Nat Sci), 2009, 35(5): 466–469.
杨宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落生物量特征 [J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2009, 35(5): 466–469.