

不同气候条件对旱地红壤微生物群落代谢特征的长期影响^①

李云^{1,2}, 孙波^{1*}, 李忠佩¹, 车玉萍¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用 1988 年设置的暖温带和中亚热带两种气候条件下的土壤置换试验, 采用 BIOLOG 方法, 研究了气候条件对红壤中微生物群落功能的影响。结果表明, 长期处于不同的气候条件改变了红壤的 pH 和养分状况, 从而影响红壤微生物群落的代谢特征。与中亚热带气候条件相比, 暖温带气候条件下, 红壤的 pH 和全磷含量显著升高, 速效钾含量显著下降; 红壤微生物群落活性 (以 AWCD 值表示) 也显著降低。主成分分析表明, 不同气候条件下红壤微生物群落代谢特征显著不同, 与暖温带气候相比, 中亚热带气候条件下, 红壤微生物群落对氨基酸、胺类和酚类化合物等含氮化合物的利用显著增加。相关分析表明, 影响不同气候条件下红壤微生物代谢特征的主要因素有: 温度和降雨量气候因子, 土壤 pH、速效钾和全氮含量等土壤因子。

关键词: 红壤; 微生物群落; 中亚热带; 暖温带; BIOLOG; 土壤置换试验

中图分类号: S154.36

土壤中存在丰富的微生物资源, 据文献记载, 1 g 农田土壤中含有几百万细菌、数十万真菌孢子和数万个原生动物和藻类^[1]。土壤微生物能够敏感地反映气候以及土壤微生态环境的变化, 因此土壤微生物种群能较早地指示土壤有机质的变化^[2]; 土壤环境 (温度、湿度和养分含量) 的变化被认为影响与土壤肥力和生态系统活动^[3-4]相关的微生物群落结构和功能^[5-6]; 土壤中的微生物种群很大程度上决定着土壤中营养物质的循环、分解和能量流动, 通过调节土壤环境的变化可以改变土壤微生物的种群组成和多样性, 进而影响土壤生态系统的功能。

土壤微生物对 BIOLOG 微平板中单一碳源利用能力的差异反映了土壤中微生物群落代谢功能的不同。前人利用 BIOLOG 方法在土壤的微生物代谢特征方面做了较多的研究工作, Papatheodorou 等^[7]研究了地中海气候条件下土壤温度和湿度的变化对土壤微生物群落代谢的影响。结果发现, 由于季节波动引起土壤温度和湿度的改变导致土壤微生物群落代谢多样性 (BIOLOG 方法) 显著变化, 从 7 月到 12 月呈线性下降趋势。Pietri 等^[8]研究了底物输入和 pH 对微生物活性和群落结构的调控作用, Hamel 等^[9]研究了不同农业耕作方式下土壤微生物代谢功能的变化, Boehm 等^[10]研究了不同农业植被类型下土壤微生物多样性的

变化及其影响因素, 这些研究通过对比采样取得了一些有意义的结果, 但是关于气候条件对土壤微生物特性的研究还仅仅停留在试验室模拟阶段, 主要模拟温度和水分条件对土壤微生物特性的影响^[11], 缺乏对气候长期影响的田间定位试验研究, 而利用相同土壤设置在不同气候带下的长期置换试验可以比较气候条件对土壤微生物代谢的长期影响。

红壤是我国南方一种主要的土壤类型。本文利用 1988 年在中亚热带和暖温带设置的土壤置换试验, 结合 BIOLOG 方法, 研究: ①不同气候条件对红壤化学性质的长期影响; ②不同气候条件对红壤微生物活性和代谢特性的长期影响; ③不同气候条件对红壤中微生物利用碳源种类的长期影响。

1 材料与方法

1.1 土壤及试验设计

1988 年在江西鹰潭选择由第四纪红黏土发育的旱地红壤 (酸性红壤, Acrisol), 按 10 cm 分层采集 0~50 cm 的土壤剖面。在中国科学院鹰潭红壤生态实验站和封丘农业生态试验站设置田间微区试验, 微区的面积为 1 m×1 m, 每一微区用砖石砌成的壁与周围的土壤分开。壁高 65 cm, 露出地表 15 cm, 深入地下 50 cm。移除微区内 0~50 cm 的土壤, 然后按土层由深到浅的

^①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-407), 国家自然科学基金项目 (40871123) 和国家科技支撑计划项目 (2009BAD6B003) 资助。

* 通讯作者 (bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 李云 (1980—), 女, 陕西长武人, 博士, 讲师, 主要从事土壤微生物分子生态学研究。E-mail: wya312@yahoo.com.cn

顺序将采集的第四纪红黏土分层置入微区内。2 个地点的试验全部采用旱作模式, 鹰潭是花生, 封丘是玉米-小麦。氮磷钾化肥的施肥水平与当地农民的平均水平一致, 田间管理与大田条件下相同。

2006 年 11 月和 2008 年 5 月在鹰潭试验站和封丘试验站微区采集土壤样品, 每一小区多点混合取样, 采集表层 (0~20 cm) 土壤样品, 采集好的样品装入封口聚乙烯袋, 放入保鲜盒, 带回实验室, 去除植物根系、石块等肉眼可见杂质后, 分成两份, 一份风干过筛用于基本理化性状的测定, 一份在-4℃冰箱中保存用于 BIOLOG 分析。

1.2 试验地气候条件概况

试验分别设置在中国科学院鹰潭红壤生态开放实验站和中国科学院封丘农业生态试验站。中国科学院鹰潭红壤生态开放实验站位于东经 116°55', 北纬 28°15', 属于中亚热带湿润季风气候, 年均温度 17.6℃, 年均降雨量 1795 mm, 水热不完全同季, 降水多集中在 3 至 6 月, 土壤类型为红壤, 母质为第四纪红色黏土。中国科学院封丘试验站位于河南省封丘县潘店乡, 该区位于东经 116°14', 北纬 34°53', 属于暖温带半湿润型季风气候区, 年平均温度为 13.9℃, 年降水量 615.1 mm。

1.3 土壤分析方法

土壤 pH 值和养分含量的测定及分析方法以鲁如坤主编的《土壤农业化学分析方法》为依据^[12]。土壤 pH 值用 pHS-3C pH 计测定, 水土比为 2.5:1; 土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法; 全 N 的测定采用半微量凯氏法; 全 P 用碳酸钠熔融法, 全 K 用氢氧化钠熔融法, 有效 P 的测定采用 Olsen-P 法; 土壤矿质 N 用 2 mol/L KCl 溶液浸提, 流动分析仪 (AutoAnalyzer3) 测定; 速效 K 用醋酸铵溶液浸提, 火焰光度法测定。

土壤微生物群落代谢特征的测定: 使用 BIOLOG 生态测试板 (Eco microplate, 美国 matrix Technologies Corporation 生产) 对微生物群落代谢特征进行测定。测定方法: 称取相当于 5.00 g 干土重的新鲜土壤, 加入到 45 ml 灭菌 0.85% (w/v) NaCl 溶液中, 振荡 30 min 后取出静止 5 min, 吸取土壤上悬液, 用灭菌的 0.85% NaCl 溶液稀释至细菌密度为大约 10^5 cfu/ml, 吸取稀释液接种到 ECO 板, 每孔接种量 150 μ l。接种后的 ECO 板于 25℃ 培养, 分别在 24、48、72、96、120 和 144 h 在 590 nm 波长下测定吸光度 (OD) 值。BIOLOG ECO 微平板和 BIOLOG Reader 购自美国 BIOLOG 公司 (BIOLOG, Hayward, USA)。

1.4 数据处理

$$AWCD = \frac{\sum(C - R)}{31}$$

式中: AWCD 为每孔溶液吸光值平均变化率, C 为各反应孔溶液的吸光值, R 为对照孔溶液的吸光值, 每个盘在每一个测定时间获得一个平均 AWCD 值, 将 AWCD 值与时间序列作图^[13]。

统计分析采用 SPSS 13.0, 本文的结果均为 3 次重复的平均值, 应用 LSD 法检验处理间的差异程度。

2 结果与分析

2.1 不同气候条件下红壤的 pH 和养分含量

由表 1 可知, 不同气候条件下红壤 pH 显著不同, 从北向南, 从暖温带到中亚热带气候, 红壤的 pH 显著降低, 这主要是由于暖温带气候条件下农田灌溉水 pH 较高, 偏碱性, 长期灌溉导致土壤盐基含量增加, 土壤 pH 升高。

表 1 不同气候条件下红壤 pH 和养分状况

Table 1 Soil pH and nutrient contents of red soil under different climatic conditions

| 项目 | 2006 | | 2008 | |
|---|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 封丘 | 鹰潭 | 封丘 | 鹰潭 |
| pH (H ₂ O) | 7.64 ± 0.08 a | 5.14 ± 0.04 b | 7.61 ± 0.01 A | 5.01 ± 0.06 B |
| 有机 C (g/kg) | 13.89 ± 0.60 a | 14.19 ± 0.40 a | 14.04 ± 0.01 B | 16.85 ± 0.01 A |
| 全 N (g/kg) | 1.02 ± 0.00 a | 1.04 ± 0.00 a | 0.99 ± 0.02 B | 1.13 ± 0.01 A |
| 全 P (g/kg) | 0.84 ± 0.09 a | 0.65 ± 0.01 b | 1.22 ± 0.02 A | 0.84 ± 0.00 B |
| 全 K (g/kg) | 15.57 ± 0.98 a | 14.21 ± 1.47 a | 8.97 ± 0.01 A | 8.79 ± 0.01 B |
| NH ₄ ⁺ -N (mg/kg) | 41.35 ± 2.09 b | 69.35 ± 0.03 a | 8.12 ± 0.47 A | 10.43 ± 1.68 A |
| NO ₃ ⁻ -N (mg/kg) | 22.88 ± 0.11 a | 2.09 ± 0.01 b | 8.52 ± 0.15 B | 18.51 ± 0.35 A |
| 有效 P (mg/kg) | 73.17 ± 1.57 a | 75.24 ± 0.68 a | 45.96 ± 3.48 A | 27.07 ± 5.95 B |
| 速效 K (mg/kg) | 89.77 ± 9.14 b | 307.29 ± 2.28 a | 210.37 ± 6.82 B | 232.09 ± 3.41 A |

注: 同行数据标有不同小写字母表示 2006 年处理间差异显著 (p<0.05), 不同大写字母表示 2008 年处理间差异显著 (p<0.05)。

土壤有机质包括各种动植物残体以及微生物及其生命活动的各种有机产物, 它的含量的多少受动植物残体以及微生物的多少等影响。不同气候条件下, 2006 年红壤有机碳含量没有显著差异, 原因在于 2006 年采样时两种气候条件下所种植植物植株较小, 没有植物输入土壤增加土壤有机质含量, 而且土壤温度较低, 均小于 15℃, 土壤矿化率也没有差异, 所以土壤有机碳没有变化; 2008 年中亚热带气候条件下红壤有机碳含量显著大于暖温带气候条件下, 这是受 2008 年两种气候条件下所种植植物的影响, 暖温带气候条件下种植小麦, 采样时正值小麦大量需要养分期, 红壤中有机碳含量低; 而中亚热带气候条件下则没有种植作物, 小区被杂草覆盖, 红壤中由于杂草的输入而使其有机质含量增加。

气候条件显著影响红壤全 P 含量, 从暖温带到中亚热带气候, 红壤全 P 含量显著降低 (表 1)。这是由于暖温带半湿润气候土壤 pH 接近中性, 土壤中的 P 素均处于有效态, 很少被土壤固定; 而中亚热带气候条件下, 土壤 pH 低, 土壤中的 P 素大部分处于被固定的状态, 所以尽管施肥量一致, 但是两种气候条件土壤对 P 素的利用上不同, 从而导致土壤全 P 含量暖温带气候条件显著大于中亚热带气候条件。

2006 年, 暖温带和亚热带气候条件下红壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和速效 K 含量显著不同, 从暖温带到亚热带气候, 红壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和速效 K 含量显著增加, 红壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著降低; 2008 年, 暖温带和亚热带气候条件下红壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、有效 P 和速效 K 含量显著不同, 从暖温带到亚热带气候, 红壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和速效 K 含量显著增加, 有效 P 含量显著降低。

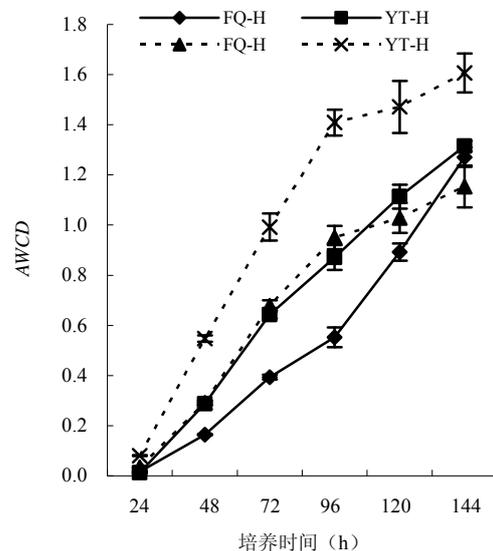
由于气候条件的不同, 造成土壤的水热状况亦不尽相同, 中亚热带湿润气候温度和湿度条件对微生物的活动极为有利, 故土壤有机质分解快、速效养分 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和速效 K) 因微生物活性较强分解了有机质和矿物成分而得以增加; 从暖温带到亚热带气候, 2006 年红壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著降低可能是中亚热带气候降雨量较大, 表层土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的随雨水被淋失到下层土体, 所以导致表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低, 而暖温带气候降雨量小, 表层土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不能较快地淋失到下层土壤, 所以表层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高^[14]; 2008 年红壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著升高可能是中亚热带气候条件下降雨量过大, 从而使土壤中水分含量达到饱和状态,

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 无法随水分向土壤下层迁移, 从而使表层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增加。

2.2 不同气候条件下红壤的微生物群落活性

土壤微生物接种到 BIOLOG ECO 微平板后, 微生物利用板中的碳源而使显色剂变色, 并且随碳源的消耗量的增加而颜色加深, 从而相应碳源的光密度值 (OD) 增大。AWCD 值反映了微生物代谢碳源的平均状况, 是微生物整体活性的有效指标^[15]。

从平均吸光度值随时间的变化的曲线图中 (图 1) 可以看出, 微生物整体活性随着培养时间的延长首先增加, 然后达到一个稳定值, 结合曲线图与前人研究成果, 我们选择培养 120 h 的平均吸光度值来反映土壤微生物的总体活性。



(图中 FQ-H 代表暖温带气候, YT-H 代表中亚热带气候, 实线代表 2006 年, 虚线代表 2008 年。)

图 1 不同气候条件下红壤平均光密度值 (AWCD) 随时间的变化

Fig. 1 Changes of average well color development (AWCD) with incubation times in red soil under different climatic conditions

由图 1 可以看出, 在暖温带和亚热带气候条件下, 土壤微生物群落整体活性 AWCD 值均随着培养时间的增加而增加, 但是中亚热带和暖温带气候条件下红壤微生物活性的增加速度不同, 中亚热带气候红壤的平均增加速度在整个培养时间内均较暖温带气候条件下大; 2006 年, 中亚热带气候条件下红壤的 AWCD 值在培养 7 天后达到最大值 1.45, 暖温带气候条件下的相对较低, 为 1.03; 2008 年, 中亚热带气候条件下红壤的 AWCD 值在培养 7 天后达到最大值 1.60, 暖温带气候条件下的相对较低, 为 1.15。

将 BIOLOG 微平板中的 31 种碳源分为氨基酸、胺类、酚类化合物、聚合物、糖类和羧酸 6 大类，比较在培养 120 h 后红壤微生物的整体活性，由表 2 可知，从暖温带中亚热带气候，红壤的整体活性 (AWCD 值) 显著增大，这是由于中亚热带气候条件下温度和降雨量大于暖温带 (2006 年采样的月均温为：9.43℃ (暖温带)，14.45℃ (中亚热带)；月累积降雨量：62.7

mm (暖温带)，82.6 mm (中亚热带)；2008 年采样的月均温为：21.34℃ (暖温带)，23.79℃ (中亚热带)；月累积降雨量：55.2 mm (暖温带)，147.8 mm (中亚热带))。本试验研究表明：从暖温带中亚热带气候，随着温度的增加，红壤微生物整体活性增加。这与前人的研究结果一致^[16]：在一定的温度范围内 (0 ~ 35℃)，土壤微生物活性随着温度的升高而升高。

表 2 不同气候条件下红壤微生物对不同组碳源的利用量

Table 2 Amounts of C groups used by red soil microorganism under different climatic conditions

| 土壤采样期 (年) | 地点 | AWCD 值 (120h) | 氨基酸 (120h) | 胺类 (120h) | 酚类化合物 (120h) | 聚合物 (120h) | 糖类 (120h) | 羧酸 (120h) |
|--------------|----|------------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| 2006 | 封丘 | 0.91 ± 0.01 b | 0.73 ± 0.02 b | 0.62 ± 0.02 b | 0.18 ± 0.00 b | 0.76 ± 0.08 a | 1.17 ± 0.01 b | 1.07 ± 0.03 a |
| 2006 | 鹰潭 | 1.09 ± 0.04 a | 1.04 ± 0.02 a | 0.96 ± 0.06 a | 0.47 ± 0.00 a | 0.87 ± 0.04 a | 1.48 ± 0.03 a | 0.95 ± 0.06 a |
| 2008 | 封丘 | 0.99 ± 0.00 B | 0.91 ± 0.04 B | 0.57 ± 0.04 B | 0.53 ± 0.07 B | 1.00 ± 0.08 B | 1.26 ± 0.03 B | 1.09 ± 0.03 B |
| 2008 | 鹰潭 | 1.41 ± 0.00 A | 1.38 ± 0.04 A | 1.16 ± 0.28 A | 0.82 ± 0.13 A | 1.76 ± 0.02 A | 1.67 ± 0.05 A | 1.29 ± 0.04 A |

注：同列数据标不同小写字母表示 2006 年处理间差异显著 (p<0.05)，大写字母表示 2008 年处理间差异显著 (p<0.05)。

中亚热带气候条件下红壤微生物对氨基酸、胺类、酚类化合物和糖类的利用显著高于暖温带气候，这可能有以下几方面的原因：一是中亚热带温度高，微生物生长繁殖快^[17]，对碳源的利用增加；二是土壤中的微生物组成发生了变化，中亚热带气候条件下土壤中的微生物种群组成和暖温带气候条件下不同，导致对不同碳源的利用发生改变。

2.3 不同气候条件下红壤的微生物群落碳源利用特征
针对 BIOLOG 31 种碳源的吸光度值数据，不易直

观比较。通过主成分分析 (principal component analysis, PCA) 可以反映出不同微生物群落的代谢特征^[18]。培养 120 h 的吸光度数据能够最大程度地反映不同微生物群落的代谢特征差异，因此被用于不同气候下红壤微生物代谢特征的分析。应用主成分分析在 31 个主成分中提取的前 2 个主成分因子，分别可以解释原变量特征的 39.94%、24.62% (2006 年) 和 48.27%、15.40% (2008 年)。用第 1 主成分 (PC1) 和第 2 主成分 (PC2) 作图表征红壤中微生物的代谢特征 (图 2)。

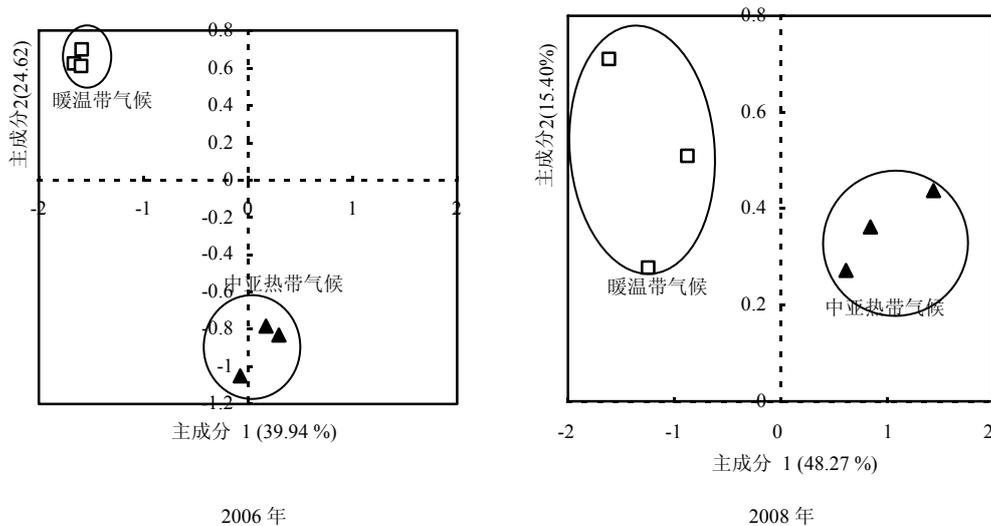


图 2 不同气候条件下红壤微生物群落碳源利用主成分分析

Fig. 2 Principal components analysis of carbon utilization profiles of red soil microbial communities under different climatic conditions

由图 2 可以看出, 不同气候条件下红壤微生物群落之间有很好的分离, 微生物代谢特征表现出较大差异。2006 年, 与中亚热带气候条件相比, 暖温带气候条件下红壤的微生物群落对碳源的利用向主成分 1 轴负端有较大幅度偏移; 2008 年, 暖温带和亚热带气候条件下红壤微生物群落分别位于主成分 1 轴的负向和正向两端, 说明暖温带气候条件下红壤中微生物群落对主成分 1 显著负相关的碳源代谢能力相对较强。通过分析主成分 1 具有较高相关系数的碳源可知, 有 9 种碳源与主成分 1 具有显著相关性, 它们分别是: 衣康酸、L-精氨酸、L-天冬酰胺酸、L-苯基丙氨酸、D-苹果酸、苯乙基胺、吐温 80、吐温 40 和 α -环式糊精, 其中 L-精氨酸、L-天冬酰胺酸、L-苯基丙氨酸和苯乙基胺是含氮化合物, 吐温 80、吐温 40 和 α -环式糊精是聚合物。暖温带气候条件下和亚热带气候条件下红壤微生物代谢特征的主要差异在于红壤微生物群落对含氮化合物和聚合物代谢大小的不同。

3 讨论与结论

土壤微生物是土壤的重要组成部分, 是构成土壤肥力的重要因素之一^[19], 在土壤的物质转化和能量流动中发挥着重要的作用。微生物既是土壤养分循环过程的动力和进入土壤有机质的“转化者”, 又是土壤能量和养分循环的“源”和“库”^[20]。

影响土壤微生物多样性的因素很多, 主要有土壤母质、肥力水平、温度、湿度等。在特定的自然环境下, 气候条件是影响土壤微生物多样性的一个重要因素, 从罗海峰^[21]的研究可知, 无论可培养细菌的多样性, 还是细菌物种遗传多样性, 我国 13 个地区的土壤呈现很大差异, 这主要由于不同环境条件的影响所致。本实验的实验结果表明, 不同气候条件下红壤微生物活性显著不同, 亚热带气候条件下红壤微生物的活性显著大于暖温带气候条件下。对土壤微生物活性与土壤、气候因子的相关分析表明(表 3), 红壤微生物活性与月均温和月累积降雨量呈显著正相关, 亚热带气候条件下月均温和月累积降雨量大于暖温带气候条件, 所以红壤微生物活性随月均温和月累积降雨量的增加而增加。温度和水分对土壤微生物多样性的影响存在交互性, 具有协同效应^[22], 因此可以用季节的概念来说明不同温度和水分对微生物多样性和活性的影响。Liu 等^[23]用 BIOLOG 分析方法证明, 在美国新墨西哥州北部 Chihuahuan 沙漠牧场中微生物的功能多样性在夏季最高, 春季最低。

表 3 红壤微生物活性与土壤养分含量、pH、温度和降雨量的相关性

Table 3 Correlation of soil microbial activity with soil nutrients, pH, temperature and rainfall

| 项目 | 相关系数(2006年) | 相关系数(2008年) |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| pH | -0.975** | -1.000* |
| 速效 K | 0.969** | 0.944* |
| 有效 P | 0.660 | -0.940* |
| 总 P | -0.835 | -1.000** |
| 有机 C | 0.219 | 1.000** |
| 全 N | 0.974** | 0.993** |
| NO ₃ ⁻ -N | -0.974** | 0.999** |
| NH ₄ ⁺ -N | 0.976** | 0.797 |
| 全 K | -0.709 | -0.994** |
| 月均温 | 0.974** | 1.000** |
| 月累积降雨量 | 0.974** | 1.000** |

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平下显著相关, * 表示在 $p < 0.05$ 水平下显著相关。

土壤养分含量也显著影响土壤微生物活性, pH 值对红壤微生物活性的影响呈显著负相关, 即红壤微生物活性随着 pH 值的增加而降低; 土壤速效 K 和全 N 含量与红壤微生物活性显著正相关, 即土壤速效 K 和全 N 含量高则红壤微生物活性也高。Staddon 等^[24]对加拿大西部不同气候带的土壤微生物多样性和结构进行了研究, 结果表明土壤微生物功能多样性与土壤 pH 值呈正相关, 但随纬度增加而降低; O'Donnell 等^[25]研究也发现, 土壤 pH 值是影响土壤微生物多样性的重要因子。

本文基于 2 个气候条件下的长期土壤置换试验研究表明: 气候条件的长期差异显著影响了红壤微生物活性, 从北到南, 从暖温带到亚热带气候, 红壤微生物活性显著增加。不同气候条件下红壤微生物代谢特征显著不同, 亚热带气候条件下红壤微生物对含氮化合物的利用显著高于暖温带气候。气候(温度和降雨)和土壤(pH、速效 K 和全 N 含量)等因子共同影响了红壤微生物代谢特征。

参考文献:

- [1] 池振明. 微生物生态学. 济南: 山东大学出版社, 1999
- [2] Lundquist EJ, Jackson LE, Scow KM, Hsu C. Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools after incorporation of rye into three California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(2): 221-236
- [3] Beare MH, Coleman DC, Crossley Jr DA, Hendrix PE, Odum EP.

- A hierachal approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. *Plant and Soil*, 1995, 170: 5-22
- [4] Chapin III FS, Korner CH. Patterns, causes, changes and consequences of biodiversity in arctic and alpine ecosystems // Chapin III FS, Korner CH. *Arctic and Alpine Biodiversity: Patterns, Causes and Ecosystem Consequences*. *Ecol. Stud.*, 1995, 113: 313-320
- [5] Grayston SJ, Griffith GS, Mawdsley JL, Campbell CD, Bardgett RD. Accounting for variability in soil microbial communities of temperate upland grassland ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 533-551
- [6] Wilkinson SC, Anderson JM, Scardelis SP, Tisiafouli M, Taylor A, Wolters V. PLFA profiles of microbial communities in decomposing conifer litters subject to moisture stress. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 189-200
- [7] Papatheodorou EM, Argyropoulou MD, Stamou GP. The effects of large- and small-scale differences in soil temperature and moisture on bacterial functional diversity and the community of bacterivorous nematodes. *Applied Soil Ecology*, 2004(25): 37-49
- [8] Pietri JCA, Brookes PC. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1 396-1 405
- [9] Hamel Chantal, Hanson Keith, Selles Fernando, Cruz Andre F. , Mcconkey Brain, Zentner Robert. Seasonal and long-term resource-related variations in soil microbial communities in wheat-based rotations of the Canadian prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2 104-2 116
- [10] Boehm MJ, Tianyun Wu, Stone AG, Kraakman. Cross-polarized magic-angle spinning ^{13}C nuclear magnetic resonance spectroscopic characterization of soil organic matter relative to culturable bacterial species composition and sustained biological control of *Pythium* root rot. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(1): 162-168
- [11] 肖辉林, 郑习健. 土壤变暖对土壤微生物活性的影响. *土壤与环境*, 2001, 10(2): 138-141
- [12] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [13] Garland JL, Mills AL. Classification and characterization of heterophic microbial communities on the basis patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57: 2351-2359
- [14] 曾曙才, 吴启堂. 华南赤红壤无机复合肥氮磷淋失特征. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1015-1020
- [15] Larkin RP. Characterization of soil microbial communities under different potato cropping systems by microbial population dynamics, substrate utilization, and fatty acid profiles. *Soil Biol. Biochem.*, 2003(35): 1 451-1 466
- [16] Qiu S, McComb AJ, Bell R.W, Davis JA. Response of soil microbial activity to temperature, moisture and litter leaching on a wetland transect during season alrefilling. *Wetlands Ecology and Management*, 2005, 13: 43-54
- [17] Hackett CA, Griffiths BS. Statistical analysis of the time-course of biolog substrate utilization. *Journal of Microbiological Methods*, 1997, 30(1): 63-69
- [18] 王淼, 姬兰柱, 李秋荣. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1 234-1 238
- [19] Atlas RM. Diversity of microbial community. *Advanced Microbiology Ecology*, 1984, 7: 1-47
- [20] 李阜棣. 当代土壤微生物学的活跃研究领域. *土壤学报*, 1993, 30(3): 229-236
- [21] 罗海峰. 变性梯度凝胶电泳技术研究土壤微生物多样性(博士学位论文). 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2004
- [22] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 204-209
- [23] Liu BR, Jia GM, Chen J, Wang G. A review of methods for studying microbial diversity in soils. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 18-24
- [24] Staddon WJ, Duchesne LC, Trevors JT. Impact of clear-culling and prescribed burning on microbial diversity and community structure in a Jack pine (*Pinus banksiana Lamb*) clear-cut using Biolog Gram-negative microplates. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1998, 14(1): 119-123
- [25] O'Donnell Anthony G, Seasman Melanie, Macrae Andrew, Waite Lan, Davies John T. Plants and fertilizers as drivers of change in microbial community structure and function in soils. *Plant and Soil*, 2001, 232(1/2): 135-145

Long-term Effects of Different Climatic Conditions on Microbial Metabolic Properties in Red Soil

LI Yun^{1,2}, SUN Bo¹, LI Zhong-pei¹, CHE Yu-ping¹

(¹ *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: To study the impact of climatic conditions on soil microbial metabolic properties, a transplant experiment of red soil was conducted in the warm temperate and mid-subtropical zone of East China. Soil microbial communities were measured by BIOLOG ECO plate. The results showed that the climatic conditions affected soil pH and nutrient contents, and then affected soil microbial metabolic properties. From warm temperate to mid-subtropical climate, soil pH and total P contents decreased significantly, soil available K contents increased significantly, soil microbial community activity (expressed as AWCD) also increased significantly. Principal component analysis of soil microbial communities showed there was significant difference in the metabolic fingerprints of soil microbial communities in red soil among different climatic conditions. Amino acid, amines and phenolic ethylamine were much more to be utilized by red soil microorganism in middle subtropical climate compared with warm temperate climate. Correlation analysis of soil microbial communities and soil nutrient contents showed that temperature and rainfall, soil pH, total N and available K contents are the influential factors of soil microbial metabolic properties.

Key words: Red soil, Microbial community, Warm temperate zone, Mid-subtropical zone, BIOLOG, Transplant experiment