

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201605005

引文格式: 张云,陈劲松. 克隆整合对异质性光照环境下紫竹根际土壤氮素有效性的影响 [J]. 广西植物, 2017, 37(6):757-762

ZHANG Y, CHEN JS. Effects of clonal integration on the nitrogen availability of rhizosphere soil in *Phyllostachys nigra* suffering from heterogeneous light [J]. Guihaia, 2017, 37(6):757-762

克隆整合对异质性光照环境下紫竹根际土壤氮素有效性的影响

张云, 陈劲松*

(四川师范大学 生命科学学院, 成都 610101)

摘要: 以根状茎克隆植物紫竹为对象, 研究克隆整合对遭受异质性光照胁迫分株根际土壤有机碳 (SOC)、总氮 (TN)、溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON)、氨氮 (NH_4^+-N)、硝态氮 (NO_3^--N) 以及微生物群落组成的影响。所取紫竹克隆片段由一个母本分株和一个子代分株组成, 母本分株置于全光照下, 而子代分株置于 80% 遮阴环境中, 同时母本分株与子代分株间的根茎保持连接或割断处理。结果表明: 与切断处理相比, 紫竹遮荫子代分株根际土壤的 SOC、TN、DOC、 NH_4^+-N 在保持根状茎连接时显著更高, 这表明异质性光照环境下克隆整合可能改善紫竹连接遮荫子代分株根际土壤的氮素有效性。克隆整合提高了连接遮荫状态下紫竹子代分株根际土壤中的放线菌、真菌和革阴细菌的 PLFAs 浓度。通过对遮荫子代分株根际土壤微生物群落 PLFAs 主成分分析得出克隆整合导致遮荫子代分株根际土壤微生物群落结构发生显著变化。该研究结果暗示了紫竹可能通过克隆整合作用降低土壤中某些对氮利用有效性影响较低的细菌数量, 而增加对土壤氮利用起重要作用的放线菌和真菌的数量, 进而改善紫竹对土壤中氮利用的有效性, 这有利于增强克隆植物对时空异质性生境的适应能力。

关键词: 紫竹, 根际土壤, 微生物群落组成, 放线菌, 真菌, 植物种群生态学

中图分类号: Q948.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)06-0757-06

Effects of clonal integration on the nitrogen availability of rhizosphere soil in *Phyllostachys nigra* suffering from heterogeneous light

ZHANG Yun, CHEN Jin-Song*

(College of Life Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: To study the effects of clonal integration on SOC, TN, DOC, DON, NH_4^+-N , NO_3^--N and microbial community composition, a pot experiment was conducted by rhizome clonal plant *Phyllostachys nigra* fragments consisting of two successive ramets subjected to heterogeneous light. Mother ramets suffering from full sun versus offspring ones suffering from 80% shade, meanwhile, the rhizome was kept connected or severed. The results showed that SOC, TN, DOC and NH_4^+-N concentrations of shaded *P. nigra* offspring ramets showed a significant difference between connected and

收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2016-06-13

基金项目: 四川省科技厅应用基础项目 (2015JY0013); 四川省教育厅项目 (14ZA0023); 四川师范大学研究生优秀毕业论文培育基金 (2015) [Supported by the Science and Technology Department of Sichuan Province for Application Foundation (2015JY0013); Education Department of Sichuan Province (14ZA0023); Outstanding Postgraduate Growth Fundation of Sichuan Normal University (2015)].

作者简介: 张云 (1988-), 女, 四川会理县人, 硕士研究生, 研究方向为植物种群生态学, (E-mail) 495570814@qq.com。

*通信作者: 陈劲松, 博士, 教授, 从事植物种群生态学, (E-mail) 84536683@qq.com。

severed treatments, which means clonal integration improves soil nitrogen utilization effectiveness for connected shaded offspring ramets; Principal component analysis of PLFAs concentration of rhizosphere soil microbial for *P. nigra* showed a significant difference between the two treatments of shading connected and severed conditions. The results indicated that *P. nigra* could reduce the percent of bacteria in soil which nitrogen utilization effectiveness was low, and could increase the percent of actinomycetes and fungi by clonal integration, so as to improve the soil nitrogen utilization efficiency of whole *P. nigra*, which endowed them with the adaptive advantages to heterogeneous habitats.

Key words: *Phyllostachys nigra*, rhizosphere soil, composition of microbial community, actinomycetes, fungi, plant population ecology

克隆整合的基本含义是指资源(如光合同化产物、水分和矿质养分等)通过连接物或间隔子(如匍匐茎、根茎等)在克隆分株之间进行传输与分享的过程。许多克隆植物可通过克隆整合能够进行资源传输以改善处在不利生境下相连分株的生长繁殖(Luo et al, 2014; Liu et al, 2015)。N 的吸收和分配受根系物质中光合产物有效性的影响(Zhou et al, 2011)。克隆植物在氮素资源的生理需求与非克隆植物相比在本质上并无根本差异,但对土壤氮素资源摄取点的多样性和传输格局更为复杂,尤其在异质性条件下,氮素被某些分株吸收后,其传输和分配格局将更为复杂(李立科等,2011)。母本分株可通过克隆整合促进遮阴、连接的子代分株对 N 的吸收和贮存(Xu et al, 2010)。这意味着全光照条件下的分株可能会向遮阴连接状态的分株传递光合产物,从而促进它们根际土壤中氮的吸收。而这方面的相关研究较少。

根际土壤(rhizosphere soil)是指受植物根系直接影响的那部分微域土壤。是由植物根-土壤-微生物-酶组成的一个特殊微生态系统(李学垣, 2001)。植物根系通过根际分泌物如糖、氨基酸、有机酸、激素、酶等对根际土壤施加影响(Bais et al, 2006)。植物的光合产物通过根系以根际分泌物的形式向土壤中释放,这些物质作为土壤微生物碳、能量或结构物质的主要来源同时影响根际土壤微生物群落结构(Rajaniemi & Allison 2009)。反过来植物对养分的吸收也依赖于微生物的分解代谢(Norton & Firestone 1996),如根际土壤中氮矿化和硝化受微生物特殊种属如真菌、放线菌等的调节(Koranda et al, 2011)。它们的相互依存关系对维持植物的生长有利。一些内生微生物的存在能够增加植物对生物或非生物因素胁迫的容忍性,而植物的生长又对根际区微生物的生长代谢产生调节作用(Gray & Smith, 2005)。本研究探讨在异质性光照下,克隆

整合是否影响了遮荫子代分株根际土壤氮素利用的有效性,同时改变根际土壤微生物群落的结构。该研究对揭示克隆植物在遭受异质性光照条件下的生长机制具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 材 料

紫竹(*Phyllostachys nigra*)为中小型散生竹,属禾本科(Granmineae)刚竹属(*Phyllostachys*)。竿高4~8 m,直径可达5 cm,幼竿绿色,密被细柔毛及白粉,箨环有毛,一年生以后的竿逐渐先出现紫斑,最后全部变为紫黑色;花枝呈短穗状,小穗披针形,长1.5~2 cm,具2或3朵小花;花药长约8 mm;笋期4月下旬。主要分布于黄河流域以南各地,我国分布以浙、苏、皖、闽、陕、豫等地较多。国外日本、朝鲜、欧美、印度等有少量分布及引种栽培(吴庆国等, 2003)。

1.2 试验设计

2015年9月,大小相近的24株紫竹采自于四川省凉山州西昌市(101°46'~102°25'N, 27°32'~28°10'E),采集的植物样本种植于西昌学院农业种植实验田内。通过对所采集紫竹外观形态特征(如竹秆处的黑色斑点、紫黑程度)的分析,试验所用紫竹分株竹秆年龄分别为1 a和2 a,竹鞭年龄大致为2 a。所有植株在自然光照条件下生长两周后,其中一株用遮阳网进行80%的遮阴处理,而另一分株置于全光照条件下;同时,子代分株与母本分株间的根茎保持连接或割断,见图1。连接与割断两种处理,每个处理设置五个重复。试验期间根据土壤干湿情况进行不定期浇灌无菌水以减少水胁迫造成的影响。试验时间共持续了3个月,从2015年9月15日至12月15日。

1.3 测定项目与分析方法

2015年12月,对所有试验植株采集根际土壤,

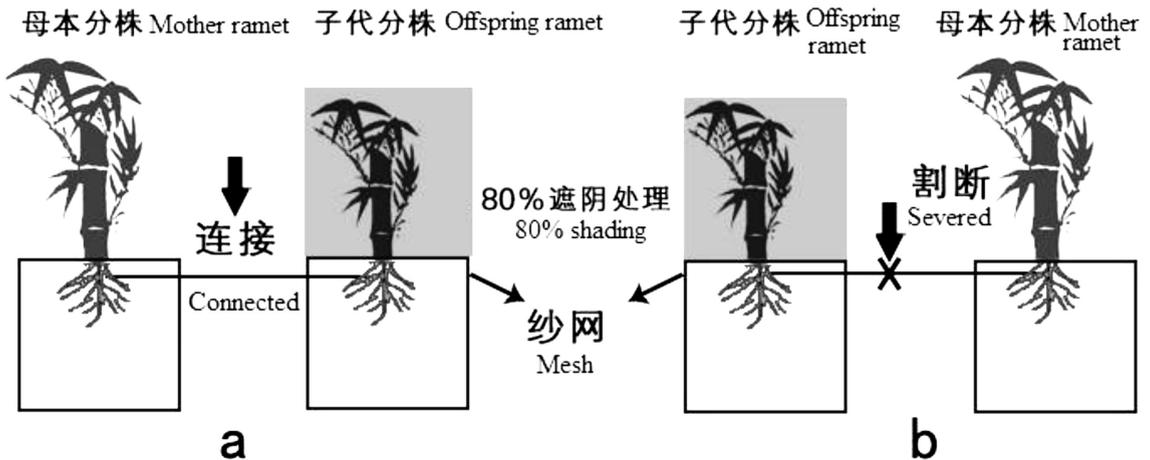


图 1 实验设计简图 包括两个母本分株。**a.** 表示连接状态, **b.** 表示割断子代分株。
所有母本分株置于自然全光照下, 所有子代分株进行 80% 遮阴处理。

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental design Clonal fragments consist of mother ramets and its offspring ramet.
a. showing connected state, **b.** showing severed state. The offspring ramets were subjected to 80% shading treatment, the mother ramets were exposed to natural light.

根际土壤的取样方法采用 Riley & Barber (1970) 的“抖落法”进行。处理好的土壤样品作好标记储存于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中以备进行各项指标的分析。

土壤中的溶解性有机碳 (DOC, Dissolved organic carbonate) 和溶解性有机氮 (DON, Disolved organic nitrogen) 采用氯化钾浸提法并通过总有机碳/有机氮分析仪 (型号: Vario TOC) 上机测定; 土壤中的铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 采用氯化钾浸提法流动分析仪测定, 测定步骤如下: 称取 10 g 土壤样品于广口瓶中, 加入 $2\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶解 25 mL, 振荡浸提 30 min 后过滤, 流动分析仪测定。土壤有机碳 (SOC) 和总氮 (TN) 采用元素分析仪 (型号: vario MACRO cube) 测定。

根际土壤微生物群落的菌属浓度及比例变化采用磷脂脂肪酸 (PLFAs) 技术进行分析测定。磷脂脂肪酸存在于活体微生物细胞膜, 含量相对稳定、对环境因素变化敏感、用于鉴定土壤微生物种类和识别微生物类群, 具有较高的准确性、稳定性和敏感性 (Bai et al, 2006)。

1.4 数据统计与分析

所有数据采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行检验, 采用 IBMSPSS 22.0 软件进行单因素 ANOVA 显著性水平检验。图形绘制以及相关性水平分析采用 originPro 8 软件进行。

2 结果与分析

2.1 根际土壤碳、氮测定结果

由表 1 可知, 子代分株处于连接状态的 DOC 和 DON 均比切断状态的要高, 说明克隆整合对于溶解性碳、氮的转化和利用起到了积极的作用。异质性光照条件下连接状态不同处理的紫竹根际土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 与切断状态相比均有所提高, 但连接光照条件下的硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 比其他处理均明显降低, 尤其是与相连遮阴状态分株的根际土壤硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 相比, 降低了 49.11%。这可能与克隆整合时对氮资源传输类型的偏好有关。

2.2 根际土壤微生物群落结构的测定结果

磷脂脂肪酸浓度应用标准品甲基十九烷脂肪酸 (19:0) 作为内标进行定量测定, 将表示各特征 PLFAs 相对生物量的响应值 (Response) 换算成各类脂肪酸的具体含量, 通过特征峰值名 (Peak Name) 比对可定性确定脂肪酸的名称 (Salomonová et al, 2001)。根据生物标记物所对应的微生物属, 对 24 个土壤样品气相色谱图信息进行量化, 转化成数据形式。对重复处理的样本分析结果计算平均值及标准误差, 形成以不同处理方式自变量的数据矩阵, 分析不同处理对以根际土壤微生物群落结构的影响。遮阴条件下, 紫竹连接与切断状态下子代分株

表 1 异质性光照条件下克隆整合对根际土壤性质的影响

Table 1 Effects of clonal integration on properties of rhizosphere soil under heterogeneous light

土壤性质 Soil character	连接 Connected		切断 Severed	
	自然光照 Natural lighting	80%遮阴 80% shading	自然光照 Natural lighting	80%遮阴 80% shading
SOC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	36.05±3.01	35.39±1.98	32.07±3.20	29.43±1.55
TN ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.58±0.17	2.61±0.12	2.48±0.22	2.29±0.08
C/N	13.86±0.29	12.87±0.24	13.53±0.26	12.81±0.31
DOC ($\text{mg} \cdot \text{kg}$)	12.57±0.92	10.24±0.35	8.72±0.38	8.27±0.32
DON ($\text{mg} \cdot \text{kg}$)	5.41±0.32	5.59±0.36	4.75±0.17	4.83±0.17
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.01±0.13	1.95±0.13	1.78±0.35	1.62±0.07
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	13.50±1.99	20.13±1.35	16.11±1.57	16.56±1.11

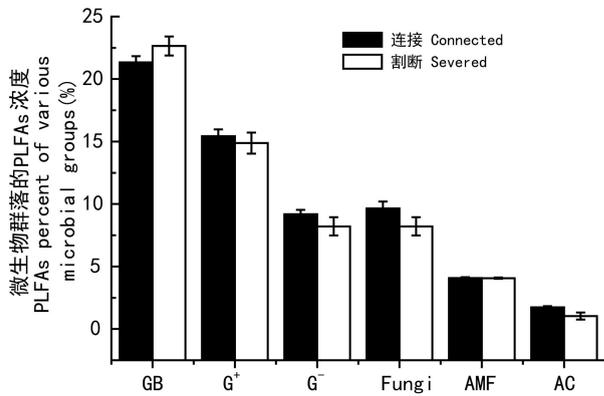


图 2 克隆整合对遮阴子代分株根际土壤微生物群落各菌属 PLFAs 比例的影响 GB. 一般细菌; G⁺. 革兰氏阳性菌; G⁻. 革兰氏阴性菌; AMF. 丛枝菌根真菌; AC. 放线菌。

Fig. 2 Effects of clonal integration on the each bacteria species of soil microbial groups in the rhizosphere around shaded offspring ramets GB. General bacteria; G⁺. G⁺ bacteria; G⁻. G⁻ bacteria; AMF. AM fungi; AC. Actinomycete.

根际土壤微生物群落各菌属 PLFAs 比例对照见图 2。由图 2 可知,连接遮阴状态下的放线菌、真菌和革阴细菌 PLFAs 比例较切断遮阴状态有较为明显的增高,分别增加了 67.31%、17.59%、11.75%。而一般细菌相对有所减少。丛枝菌根真菌的变化最小。连接遮阴状态与切断遮阴状态的紫竹分株根际土壤丛枝菌根真菌分别占微生物总量 PLFAs 的 4.08%和 4.07%。遮阴条件下连接与切断状态的根际土壤微生物菌属的 PLFAs 浓度呈显著性差异($P=0.024<0.05$)。连接状态的自然光照与遮阴异性

光照条件下,根际土壤各菌属浓度呈非常高正相关,极显著差异($R=0.995>0.9, P<0.001$)。说明克隆整合影响了分株根际土壤各菌属浓度。

2.3 根际土壤微生物群落 PLFAs 主成分分析

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是把多个指标通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量,是多个指标转换为少数几个综合指标的一种统计方法(沙月霞等, 2011)。本研究采用主成分分析法将不同处理的紫竹根际土壤微生物群落各菌属转换为互不相关的变量。构建各个微生物菌属指标的标准化值矩阵,利用 IBM SPSS 21.0 进行数据处理,通过该软件运行得出矩阵的特征根与对应的方差贡献率。并根据特征根的方差贡献率和累积方差贡献率选择主成分,形成因子载荷贡献图。本试验的土壤微生物群落菌属的特征根和方差贡献率见表 2。由表 2 可知,紫竹各分株不同处理间根际微生物群落菌属中前两个菌属,放线菌和真菌已经包含了原始样本数据中 95.89%的信息,这两个指标可以用以解释不同处理间根际土壤微生物群落各菌属分布比例问题。

3 讨论

在异质性环境条件下,克隆整合可以帮助分株之间通过其相连的根茎或匍匐茎分享生境中的资源,通过资源的转运及转移以达到所有分株之间资源分配的最优化及收益最大化(Gao et al, 2014)。克隆整合通过这种优化可提高克隆植物所有分株的

表 2 土壤微生物群落菌属的特征根与方差贡献率
Table 2 Characteristic roots and variance contribution rate of each bacterial species in soil microbial groups

指标 Index	特征根 Characteristic root	方差贡献率 Variance contribution (%)	累计方差贡献率 Accumulated variance contribution rate (%)
放线菌 Actinomycete	6.326	79.072	79.072
真菌 Fungi	1.346	16.823	95.894
细菌 Bacteria	0.328	4.106	100.000
革阴细菌 G ⁻ bacteria	1.005×10^{-13}	1.062×10^{-13}	100.000
革阳细菌 G ⁺ bacteria	-1.001×10^{-13}	-1.012×10^{-13}	100.000
丛生菌根真菌 AM fungi	-1.001×10^{-13}	-1.015×10^{-13}	100.000
原生生物 Protists	-1.002×10^{-13}	-1.027×10^{-13}	100.000
原生动物 Protozoa	-1.008×10^{-13}	-1.100×10^{-13}	100.000

表现,如植物光合作用效率、增加植物存活概率,而在异质性环境中获得生长和系列的优势 (Oborny et al, 2001)。植物根系对土壤氮素的吸收通常是以无机态氮,即铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 为主。植物可以直接利用土壤中的铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 合成氨基酸,而硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 则必须转换成铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 才能被吸收利用。王长爱 (2006) 发现结缕草对 $^{15}\text{NH}_4^+$ 和 $^{15}\text{NO}_3^-$ 在主匍匐茎和分枝上都具有明显的整合作用,植株从根部吸收的氮素在主匍匐茎上具向基和向顶的双向传输。陈惠娟等 (2015) 研究结果表明长期而完整的克隆整合使结缕草克隆植株的一级分株、复合节和匍匐茎的生长显著受益。紫竹连接与切断处理遮阴状态下两个子代分株铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 呈显著性差异且连接处理的铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 明显高于切断处理,说明克隆整合提高了子代分株对于土壤中氮利用的有效性。本研究中连接与切断的遮阴子代分株的紫竹根际土壤硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 的不显著差异一方面可能与该分株土壤中有有机氮的氨化作用高于硝化作用,另一方面也可能与硝态氮⁻具有高的流动性和水溶性,从而通过土壤的迁移作用而影响到根际土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度水平。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,其群落结构组成和活性变化是衡量土壤肥力、质量和作物生产力的一个重要指标。植物根际土壤微生物群落结构组成的变化也是研究植物与土壤微生物之间关系的核心问题。本研究通过对比异质性光照条件下连接与切割状态下紫竹根际土壤微生物群落结构的变化,发现连接状态下的紫竹分株根际土壤中的放线菌、真菌和革阴细菌 PLFAs 比例较切断状态有较为明显的增高,而一般细菌相对有所减少。这里面最为突出的放线菌生物量的明显增高。土壤放线菌是指在形态学特征上是细菌和真菌间过渡的单细胞微生物。属于原核生物,具有直径 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 呈分枝状的菌丝。土壤中氮元素是影响土壤微生物细菌、真菌和放线菌组成的重要因素 (Treseder et al, 2008)。异质性光照条件下不同处理根际土壤微生物群落各菌属的主成分分析得出的特征根和方差贡献率在前三位的菌种分别为放线菌、真菌、细菌。土壤中这三大类微生物区系比例是土壤肥力的衡量指标。土壤肥力影响微生物活动和改变微生物群落的结果,同时,各种类型的微生物亦可改善土壤的肥力状况及养分利用的有效性 (王超等, 2005)。张信娣等 (2008) 的结果表明放线菌数量与土壤养分含量及作物产量呈显著正相关,而真菌与土壤养分含量相关性较差。这与本研究中放线菌、真菌与土壤中 C、N 的关系一致。

细菌中的氨化细菌、硝化细菌、亚硝化细菌可促进有机氮分解、铵态氮硝化,从而达到将土壤中的氮转化为能被植物利用的形式。对紫竹进行遮阴连接处理条件下,根际土壤中 DON 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与切断处理相比均有所上升,而根际土壤中的细菌 PLFAs 浓度降低,相反真菌、放线菌浓度增高。说明紫竹可以很聪明地降低细菌中某些对土壤氮利用有效发生较低的部分,而增加对土壤养分起着较重要作用的放线菌和真菌的数量。这与前述的放线菌、真菌对土壤养分的影响结论一致。

4 结论

(1) 克隆整合对于紫竹连接遮阴状态下根际土壤中除硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 外其他几种碳、氮存在形式如土壤有机碳 (SOC)、总氮 (TN)、溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 均表现出了促进的作用,且连接与切断处理下,紫竹遮

阴子代分株间 SOC、TN、DOC、 NH_4^+ -N 均呈显著性差异,说明克隆整合提高了紫竹在异质性光照条件下对碳、氮利用的有效性,从而有利于紫竹子代分株在遮阴条件下的生存。(2)遮阴条件下两种处理方式连接、切断状态紫竹根际土壤微生物菌属的 PLFAs 浓度呈显著性差异($P=0.024 < 0.05$);连接遮阴状态下的放线菌、真菌和革阴细菌 PLFAs 比例较切断遮阴状态有较为明显的增高,分别增加了67.31%、17.59%、11.75%。而一般细菌相对有所减少。说明克隆整合影响了分株根际土壤各菌属浓度及分布比例。(3)主成分分析表明紫竹各分株不同处理间根际微生物群落菌属中放线菌、真菌、细菌已经包含了原始样本数据中 100%的信息,这三个指标可以用以解释不同处理间根际土壤微生物群落各菌属分布比例问题。(4)紫竹可以通过克隆整合作用降低细菌中某些对土壤氮利用有效性较低的部分,而增加对土壤养分起着较重要作用的放线菌和真菌的数量,从而达到提高紫竹对土壤中氮利用的有效性。

参考文献:

BAI Z, HONG BO HE, ZHANG W, et al, 2006. PLFAs technique and its application in the study of soil microbiology [J]. Acta Ecologica Sinica, 42(4): 272.

BAIS HP, WEIR TL, PERRY LG, et al, 2006. Role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. Ann Rev Plant Biol, 57(1): 233-266.

CHEN HJ, LI DZ, LAI SW, et al, 2015. The growth costs and benefits of clonal integration of *Zoysia japonica* grown at various N:P ratios [J]. Jiangsu Agri Sci, 31(4): 771-778 [陈惠娟, 李德志, 赖苏雯, 等, 2015. 不同氮磷比条件下结缕草克隆整合作用的生长代价与收益 [J]. 江苏农业学报, 31(4): 771-778.]

GAO Y, WANG D, XING F, et al, 2014. Combined effects of resource heterogeneity and simulated herbivory on plasticity of clonal integration in a rhizomatous perennial herb [J]. Plant Biol, 16(4): 774-782.

GRAY E, SMITHD, 2005. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant-bacterium signaling processes [J]. Soil Biol Biochem, 37(3): 395-412.

KOURTEV PS, EHRENFELD JG, HÄGGBLUM M, 2008. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil [J]. Ecology, 83(11): 3 152-3 166.

KORANDA M, SCHNECKER J, KAISER C, et al, 2011. Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech: the influence of plant C exudates [J]. Soil Biol Biochem, 43(3): 551-558.

LI XH, 2001. Soil chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press: 350. [李学垣, 2001. 土壤化学 [M]. 北京: 高等教育出版社: 350.]

LI XY, 2001. Soil chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press: 350.

LI YK, LI DZ, PAN Y, et al, 2011. Nitrogen transmission in pri-

mary stolons of clonal plant *Zoysia japonica* [J]. J NE For Univ, 39(11): 40-45. [李立科, 李德志, 赵鲁青, 等, 2011. 克隆植物结缕草主匍匐茎中氮素的传输特征 [J]. 东北林业大学学报, 39(11): 40-45.]

LIU L, LIN HF, DONG BC, 2015. Clonal integration enhances expansion ability of *Ipomoea aquatica* in aquatic-terrestrial ecotones [J]. Aquat Bot, 128: 33-40.

LUO FL, CHEN Y, HUANG L, et al, 2014. Shifting effects of physiological integration on performance of a clonal plant during submergence and de-submergence [J]. Ann Bot, 113(7): 1265-1274.

NORTON JM, FIRESTONE MK, 1996. N dynamics in the rhizosphere of *Pinus ponderosa* seedlings [J]. Soil Biol Biochem, 28(3): 351-362.

OBORNY B, CZÁRÁN T, ÁDÁM K, 2001. Exploration and exploitation of resource patches by clonal growth: a spatial model on the effect of transport between modules [J]. Ecol Model, 141(1-3): 151-169.

RILEY D, BARBER S, 1970. Salt accumulation at the soybean (*Glycine max*) root-soil interface [J]. Soil Sci Soc Am J, 34(1): 154-155.

SALOMONOVÁ S, LAMA ČOVÁ J, RULÍK M, et al, 2001. Determination of phospholipid fatty acids in sediments [J]. X-Ray Spectrom, 30(1): 49-55.

SHA YX, 2011. Principal component analysis of carbon source utilized by microorganism on the surface of stored jujube fruit [J]. Microbiol Chin, 38(1): 35-44. [沙月霞, 2011. 红枣贮藏期果面微生物对碳源的利用及主成分分析 [J]. 微生物学通报, 38(1): 35-44.]

TRESEDER KK, 2008. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies [J]. Ecol Lett, 11(10): 1111-1120.

WANG CA, 2006. Growth pattern and physiological intergration of nitrogen in *Zoysia japonica* Steud., a clonal herb [D]. Shanghai: East Chin Norm Univ. [王长爱, 2006. 克隆植物结缕草的生长格局与氮素整合特征 [D]. 上海: 华东师范大学.]

WANG C, WU F, LIU XL, et al, 2005. Tobacco rhizosphere microorganism in different fertility of soil [J]. Chin J Tob Sci, 26(2): 12-14. [王超, 吴凡, 刘训理, 等, 2005. 不同肥力条件下烟草根际微生物的初步研究 [J]. 中国烟草科学, 26(2): 12-14.]

WU QG, CHEN XF, ZHOU GH, et al, 2003. Study on the technology for *Phyllostachys nigra* cultivated [J]. Pract For Technol, (4): 8-9. [吴庆国, 陈兴福, 邹官辉, 等, 2003. 紫竹品种及栽培技术研究, 林业实用技术, (4): 8-9.]

XU CY, SCHOOLER SS, VAN KLENKEN RD, 2010. Effects of clonal integration and light availability on the growth and physiology of two invasive herbs [J]. J Ecol, 98(4): 833-844.

YU FH, WANG N, HE WM, CHU Y, DONG M, 2008. Adaptation of rhizome connections in drylands: increasing tolerance of clones to wind erosion [J]. Ann Bot, 102(4): 571-577.

ZHANG XD, CAO H, XU DQ, et al, 2008. Effects of photosynthetic bacteria and organic fertilizer on soil microorganisms and soil enzyme activities [J]. Soils, 40(3): 443-447. [张信娣, 曹慧, 徐冬青, 等, 2008. 光合细菌和有机肥对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响 [J]. 土壤, 40(3): 443-447.]

ZHOU W, CHEN H, ZHOU L, et al, 2011. Effect of freezing-thawing on nitrogen mineralization in vegetation soils of four landscape zones of Changbai Mountain [J]. Ann For Sci, 68(5): 943-951.