

环境因子对林地土壤微生物影响的研究进展

罗艺霖^{1,2} 李贤伟^{2*} 张良辉³

(1. 四川农业大学都江堰校区 四川 都江堰 611800; 2. 四川农业大学林学院 四川 雅安 625014;

3. 四川农业大学图书馆 四川 雅安 625014)

摘要: 土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,也是森林生态系统的重要组成部分,是森林生态恢复与重建的重要参与者。本文阐述了环境因子对林地土壤微生物影响的研究进展,包括植被、气候、土壤有机质、土壤肥力对土壤微生物的影响及规律;概述了目前对土壤微生物多样性的主要方法研究,提出了今后土壤微生物研究和应用的发展方向。

关键词: 土壤微生物; 环境因子; 微生物多样性

中图分类号: S714.8 文献标识码: A 文章编号: 1003-5508(2013)05-0019-06

Advances in Researches on Effect of Environmental Factors on Soil Microbes

LUO Yi Lin¹ LI Xian-wei^{2*} ZHANG Liang-hui³

(1. Dujiangyan Campus Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611800, China;

2. Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China; 3.)

Abstract: The soil microbe is an important component of soil ecosystem and also is an important component of the forest ecosystem and an important participant of the forest ecological restoration and rehabilitation. In this paper a description is given of advances in researches on effects of environmental factors on soil microbes, including effects and rules of vegetation, climate, soil organic matter and soil fertility. In addition, summary discussion is made on the current main methods in the study of soil microbial diversity and the developing direction of soil microbial research and use in the future.

Key words: Soil microbes, Environmental factor, Microbial diversity

前言

土壤作为农业生产的基地和基本生产资料,是植物生长的载体。土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分^[1],是森林生态系统的重要组成部分之一,也是森林生态恢复与重建的重要参与者^[2]。土壤中生活着的这些微生物类群,以细菌数量最多,放线菌和真菌类次之^[3]。在有机质分解、养分循环和植物养分利用过程中发挥着关键的作用^[4],同时土

壤微生物参数被认为是土壤质量变化的重要指标之一^[5]。我国对森林土壤微生物的研究始于20世纪50年代末,20世纪70年代以来,国内外对森林土壤微生物进行了广泛深入的研究。土壤中微生物的类群、数量与分布受土壤质地、土壤深度、发育阶段、植物类型、季节等因素的影响^[6~10]。因此,研究土壤微生物特性可以反映土壤质量的变化,并可用作评价土壤健康的生物指标^[11],为农林业的可持续发展、生态环境的保护等提供科学依据。

收稿日期: 2013-05-20

基金资助: 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAC09B05)和四川省科技支撑计划(2010NZ0049)。

作者简介: 罗艺霖(1984-),女(汉),四川金堂,助教,硕士,主要从事生态林业工程研究。

通讯作者: 李贤伟,男,教授,博导,主要从事生态林业工程研究, E-mail: lxw@sicau.edu.cn。

1 土壤微生物与植被

1.1 植被对土壤微生物多样性的影响

土壤微生物群落的演替依赖于森林植被发育,森林植被通过根系、地上和地下等生物过程影响土壤微生物的环境条件和能量供给^[12]。影响土壤微生物群落的生态因素很多。从微生物群落多样性的全球格局来看,植物群落类型初步决定了微生物群落的组成,土壤微生物群落多样性与覆盖于土壤上的植物群落多样性呈正相关;从微生物群落多样性的区域格局来看,土壤微生物群落多样性与覆盖于土壤上的植物群落的生产力和多样性呈正相关,随着植物群落存在的年限的增加,土壤微生物群落多样性也增加^[13]。钟文辉研究发现:未退化高寒草地土壤微生物数量明显高于其它退化草地,可能与植物多样性高对土壤改造作用强烈,使得微生物相互作用的资源范围或多样性较高,因此提供了更多的土壤微生物繁殖的环境^[14]。植被多样性与土壤微生物多样性相互联系、密不可分。植物通过对土壤环境,如含水量、pH值、碳、氮、磷含量及比例等的影响,作用于土壤微生物的生存环境,从而对微生物多样性产生效应。植物通过影响土壤环境,进而影响土壤微生物多样性;土壤微生物的多样性与地上植被多样性多呈正相关关系。但是,目前由于技术方法、取样的准确性及影响因子的复杂性等因素的局限,使得关于植物对微生物影响的研究还不透彻,需进一步探讨。

1.2 土壤微生物与植物群落的相互作用

植被类型和土壤微生物群落密切相关,植被强烈地影响着土壤微生物的组成和活性,土壤微生物对植被变化快速作出响应^[15]。森林生态系统依靠土壤微生物将植物枯落物和土壤有机质转化为植物利用的矿质营养^[16]。土壤微生物群落受土壤碳源和氮源的限制,而现存植物群落是两种资源的主要来源,土壤微生物群落的组成和多样性与植物群落有密切联系,且植物群落组成对土壤微生物群落组成的影响可能比植物多样性或生产力更明显^[17]。即使处于同一环境其组成和比例也会随着区域小环境的变化而异,对于某一特定生态系统,环境因子基本稳定的情况下,土壤微生物的数量和活性与其所处的小环境的植物群落组成和结构存在着千丝万缕的联系^[17,18]。植物区系或功能群组成越丰富,越有利于其土壤微生物各生理类群的功能发挥;生理类

群的数量和种类自然增多,当达到某一阈值,各种功能的生理类群为了生存相互竞争、排斥,如分泌某些刺激性的物质等。在地上植物物种丰富,土壤环境相对稳定时,强大的植物根系为微生物的生长提供有利的环境,微生物反过来分解土壤残体等来提高土壤的养分状况,二者是互利合作的关系^[13]。土壤微生物群落组成、功能和活性的测定,以及土壤微生物生物标记的应用,能够有效评估植被恢复的进程、植被退化的程度和恢复措施的效果^[19]。

1.3 土壤微生物与植被恢复

魏媛等对喀斯特植被恢复情况的研究发现:随着退化植被的恢复,土壤微生物数量明显上升,土壤微生物活性明显增强,表现为乔木群落阶段>灌木群落阶段>草本群落阶段>裸地阶段^[20]。植被恢复的不同阶段,微生物的数量和种类都存在明显差异,植被恢复年限的长短是植被恢复影响土壤微生物的另一个主要因素。植被恢复实践同时影响土壤微生物的结构和功能,不同恢复演替阶段,土壤有机质输入的数量和质量不同。在植被恢复演替过程中,物种组成、多样性和生产力的变化影响土壤微生物群落的结构和组成^[21]。植被演替过程中,微生物群落的种类组成及其特征也是在不断变化的,许多研究表明,土壤微生物数量和生物量在原生性较强的植被下较高,即在植被恢复演替的后期达到最高^[22,23]。在演替的早期阶段,细菌在微生物群落中占有优势,随着演替的进行,真菌的优势逐渐显现^[24]。尤其在植被演替的中后期,地上植被和土壤微生物群落之间的相互反馈更为强烈^[25]。植被恢复过程中植物多样性的增加能够对土壤微生物的多样性产生影响,不同类型植被通过枯枝落叶和根系及其分泌物给土壤提供质与量不一样的有机质和恢复时间长短有关^[26,27]。植被演替到后期,放线菌的数量增高,细菌和真菌的数量降低,这是由于放线菌发育缓慢,当植物生物量增大,为微生物生长提供的营养物质较多,放线菌竞争能力弱,数量相对稀少;而当植物生物量较少时,放线菌比例反而占优势^[28]。因此土壤微生物的结构和功能可以用来评价植被演替的阶段。

2 土壤微生物与气候

地球上有多多种多样的气候类型,由此形成的复杂自然条件影响土壤微生物的生态分布,并直接或间接地影响土壤微生物量和微生物多样性,研究发现微生物多样性在一定范围内随纬度增加、温度降

低而降低,与 pH 呈正相关^[29]。在湿度适宜的情况下,一般土壤微生物量与温度呈正相关性,土壤微生物总数、细菌和真菌数量以夏季高,春、秋季较低。在土壤低水分含量情况下,土壤微生物量随土壤水分的含量的增加而增加,当土壤含水量较高时,土壤含水量不会成为土壤微生物变化的限制因子。微生物的生长受温度和水分等因素的影响,气候条件通过温度和降水影响土壤含氧量、碱解氮含量、土壤酶活性等进而影响土壤微生物量和种群结构,在不同的季节微生物多样性和活性可能不同。土壤微生物活性通常在夏天比较高而在冬天比较低。

2.1 土壤微生物与温度

相关研究表明在杉木连栽林地营造混交林后的土壤微生物表现为春季较高、夏季最高、秋季稍有下降、冬季最低的季节性动态^[30]。土壤微生物生物量的季节性变化主要受不同季节有机物质投入量的影响,同时还与温度和湿度有关^[31]。温度是影响土壤微生物生长和繁殖的主要原因之一,随着温度的升高,土壤中一些在低温下处于“缺失”和“休眠”状态的真菌开始活跃起来。因为,低温会抑制某些种类真菌的生长和繁殖,甚至影响它们的生存^[32]。从2月份至4月份气温逐渐回升,越来越适宜微生物的生长,并且此时植物生长发育快,根分泌物增加,因此微生物数量迅速上升^[33]。另一方面,土壤温度也是影响微生物活性的重要因素,在一定温度范围内,土壤温度升高提高了土壤微生物活性和呼吸率。

2.2 土壤微生物与水分

在湿度适宜的情况下,一般土壤微生物量与温度呈正相关性。有研究指出,当土壤含水量高于11%时,土壤含水量不会成为土壤微生物变化的限制因子。在土壤含水量为6.75%~23.23%范围内,与水分呈指数相关关系,当土壤水分小于10.87%时,水分对微生物量氮有突出效果,当超过10.87%后,几乎没有影响^[34]。土壤水分含量对土壤真菌、细菌和放线菌数量变化的影响不同,相同水分条件下,真菌、细菌和放线菌的数量变化不一致。真菌变化受土壤含水量变化影响较大^[35],真菌与土壤水分呈正相关,细菌与水分呈正相关但不显著,放线菌与土壤水分关系不大^[36]。但也有研究表明放线菌在干旱土壤环境中比湿润土壤环境中的数量更多,这可能与放线菌更能适应土壤干旱、贫瘠的土壤条件有关^[37]。周兴民等对嵩草草甸的研究中则发现高寒地区未退化草地细菌数量随土壤含水量增大而减少,真菌数量则增多^[38]。

另一方面,随着大气的雨、雪、雾等降水过程,大气氮沉降和酸沉降也间接或直接影响土壤微生物数

量和土壤微生物多样性。土壤微生物的结构组成能直接反映出对氮输入的反应,过量的氮沉降会导致土壤微生物数量发生变化。有研究表明:低氮能促进土壤微生物数量的增加,而高氮则抑制土壤微生物数量^[39]。酸沉降对土壤环境的影响是直接的、不可逆的,对土壤微生物的影响目前研究还不多,但可以肯定的是酸沉降对土壤微生物种群数量、组成等方面都会产生不利影响,导致土壤肥力下降,改变土壤生态环境,影响各类元素在土壤中的迁移,从而减缓土壤生态环境的养分循环^[40]。

3 土壤微生物与立地类型

不同立地类型的立地因子与土壤中微生物的数量和分布密切相关。多数立地因子对土壤微生物的影响主要表现在与其他因子共同作用后的间接效应,立地因子间互相制约,互相联系^[41]。在水热条件充足,植被生长良好的立地类型中,土壤微生物数量相对较高,造林条件良好;而在水热条件差,特别是在干旱, pH 值高且植被稀少的立地类型中,土壤微生物数量低^[42]。

4 土壤微生物与林分组成

土壤微生物与林分组成密切相关,林地林龄、树种的组成、林分的郁闭度,以及所覆盖植被的数量都会影响土壤微生物的多样性和数量。不同林龄林地土壤微生物数量变化呈现出一定的规律性,大部分研究表明:人工林土壤微生物的多样性和数量随着人工林的生长发育而逐步增加^[43],但在对大青山森林土壤微生物的研究中却发现:土壤微生物总量7年生>15年生>17年生,细菌和微生物总数均随着树龄的增加呈现减少趋势^[44]。不同树种组成的土壤微生物数量变化呈现一定的规律性。对杉木人工林研究发现:杉木人工林土壤微生物多样性和数量显著低于阔叶林;在低海拔区,土壤微生物总量依次为山杏>沙棘>油松,林地所覆盖的植被类型和数量不同都会导致土壤微生物结构和数量的改变^[43~45]。林分密度的变化也会影响土壤微生物数量的变化,土壤微生物数量基本上随着林分密度的增加呈先上升后下降的趋势,林分密度对土壤微生物数量的影响主要在于林地可供利用的营养元素、O₂的充足量、光照及温度等,因此林分密度与土壤微生物数量的变化也是在一定范围内的,当林分密度超过这个相对范围密度后,这个规律会变得不

那么明显,甚至消失^[44~46]。

5 土壤微生物与土壤有机质

土壤微生物在参与土壤有机物分解与合成的同时,还同化土壤有机质和土壤中的一些矿质养分构成其躯体,微生物固持的这些养分在其死亡后可发生再矿化,成为矿质养分^[47]。

土壤微生物生物量与土壤有机质含量密切相关,而且土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的比值($C_{mic}:C_{org}$)的变化在一定程度上反映了土壤有机碳的利用效率。 $C_{mic}:C_{org}$ 比值的变化可以反映土壤有机碳的动态。如果以成熟森林的 $C_{mic}:C_{org}$ 比值为参照值,那么当 $C_{mic}:C_{org}$ 比值高于参照值时,可认为土壤有机碳处于积累阶段;反之则反映了土壤有机碳处于消耗阶段^[48]。张成娥等研究表明土壤有机质含量与土壤微生物量呈正相关^[49],李香真等认为土壤有机质水平高,微生物所受胁迫小,有利于微生物群落的发展^[50]。往往有机质含量高的生境中放线菌的数量往往较高。蔡艳等的研究表明放线菌易于有机质含量高的生境中生存^[51]。因此,土壤微生物对土壤有机碳的影响可以作为一个判断土壤质量的一个重要指标。

6 土壤微生物与土壤肥力

土壤养分含量直接影响林木的生长,土壤微生物能够促进或直接参与土壤中一系列复杂的生理生化反应,可以客观地反映土壤肥力状况。土壤微生物是土壤生态系统中物质循环和能量转化畅通的前提,是土壤生态系统发育成熟与否和系统资源能否高效持续利用的重要标志^[52]。

土壤微生物在土壤生态系统的物质转化和能量流动中起重要作用,土壤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(特别是 C、N、P、S 等元素)内循环的“源”和“库”^[53]。土壤微生物直接参与了养分循环、有机质分解等诸多生态过程,是土壤中物质转化和养分循环的驱动力,其指标已经被用来评价退化生态系统中生物群落与恢复功能之间的关系^[54]。在土壤生态系统中,土壤微生物参与系统的物质和能量循环,微生物在土壤中的数量、分布与活动情况,反映了土壤肥力的高低,对植株生长发育起着重要的作用^[47]。从微生物的角度来看,土壤肥力与微生物数量关系密切,而生态恢复增加了土壤肥力,因

此可以认为生态恢复促进了土壤微生物的增殖,微生物数量越大,土壤微生物活性越高^[48]。微生物数量越大,土壤微生物活性越高,其生态恢复的状况也就越好。

在生态恢复过程中,土壤微生物的数量变化和多样性指数的高低可以作为表征土壤状况改善与否的一项生物学指标^[49]。有资料表明,土壤中三大微生物区系比例是衡量土壤肥力的一个指标。土壤微生物数量的差异主要是与土壤养分种类和含量有关^[50]。土壤中细菌、放线菌密度高,表明土壤肥力水平较高。细菌是土壤微生物生命活动的主体,利用各种物质的速度快,能力强,因而数量较多,其多样性在营养元素高的环境下即土壤养分充足的土壤环境也较大^[51]。而放线菌和真菌对环境条件要求高,且分解物质能力弱,因而数量少^[52]。在土壤肥力较高的环境,土壤中放线菌和真菌的数量比土壤肥力低的情况高。有研究指出,真菌数量的增加通常是土壤性质不良、土壤肥力降低的反映,因为真菌参与难分解物质的分解,且是酸性分解,分解缓慢^[53,54]。但是真菌数量增加可以增加土壤 N 的质量分数,从一定程度上提高土壤肥力,促进土壤 N 的良性循环^[55]。

7 研究展望

7.1 技术进步

土壤微生物的研究在技术上主要是对土壤微生物多样性的研究,根据研究技术类型,土壤微生物多样性的研究方法大体上可分为两类:基于生物或化学的方法和基于现代分子生物学技术的方法^[56,57]。

生物或化学方法包括传统的平板计数法、荧光染色法、Biolog 微平板分析、磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acid, PLFA)谱图分析方法、脂肪酸甲酯(fatty acid methyl esters, FAME)谱图分析方法等。

分子生物学方法可归纳为三方面:

一是基于分子杂交技术的分子标记法,如荧光原位杂交(fluorescence *in situ* hybridization, FISH)、同位素标记技术等,可对微生物在特定环境中的存在与否、分布模式及丰度等情况进行研究,具有较高的灵敏性和特异性。

二是基于 PCR 技术的研究方法,这些方法可以将极微量的 DNA 进行大量扩增,通过比较分析基因序列的特异性来研究微生物的多样性。如随机扩增多态性 DNA 技术(random amplified polymorphic DNA, RAPD)、扩增片段长度多态性技术(amplified

fragment length polymorphism, AFLP)、限制性片段长度多态性技术(restriction fragment length polymorphism, RFLP)和末端限制性片段长度多态技术(terminal restriction fragment length polymorphism, T-RFLP)、单链构象多态性技术(single-strand conformational polymorphism, SSCP)、变性梯度凝胶电泳(denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE)和温度梯度凝胶电泳(temperature gradient gel electrophoresis, TGGE)、核糖体基因间区分分析(ribosomal intergenic spacer analysis, RISA)等。

三是基于 DNA 序列测定的研究方法,分析具体碱基序列的突变情况,通过与生物信息学结合,进行数据比较分析,找出微生物的遗传进化线索,如元基因组(metagenome)测序技术,成为对难培养微生物或不可培养微生物的系统发育和功能研究的重要方法。

7.2 研究热点

土壤微生物与植被、气候、林分组成、土壤有机质、土壤肥力息息相关。我国土壤微生物过去长期停留在对土壤微生物区系的组成和作用过程的定性探讨,并且只要集中在对农业土壤微生物的研究,对草地、森林土壤微生物研究相对较少。鉴于土壤微生物在土壤养分转化与循环、维护生态平衡和保护环境等方面具有非常重要的意义,未来需要迫切开展环境变化、不同气候带、不同土壤类型、不同土壤深度及不同营林措施下土壤微生物动态及调控机理研究;开展对影响土壤微生物量高低不确定性的因子进行深入研究;加强不同尺度下土壤微生物的影响因子及调控机理研究;并且对土壤微生物学鉴定技术方面进一步研究。同时应将微生物生态学与地区、区域及全球范围的生态学动态分析结合起来。目前人们所能了解的详细的微生物信息大部分来自于几类易于研究的群落类型如农田、森林、草地生态系统,岩岸潮间带,温带湖泊等。而对其他类型生态系统及与微生物的相互作用结合起来进行研究,将为我们了解微生物普遍模式提供重要帮助。因此,微生物与地区、区域及全球范围的生态学动态分析相结合;扩大微生物研究的群落范围将成为未来微生物研究的热点。

参考文献:

- [1] Wang J L, Liu J Z, Chen Z L, et al. Effects of enrofloxacin residue on number and community function diversity of soil microbes. *Chin J Appl Environ Biol*, 2005, 11(1): 86 ~ 89.
- [2] van Elsland J D, Duarte G F, Rosado A S, et al. Microbiological and molecular biological methods for monitoring inoculants and their effects in the soil environment. *Journal of Microbiological Methods*, 1998, 32: 133 ~ 154.
- [3] 周德庆. 微生物教程(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 5.
- [4] Kirk J L, Beaudette L A, Hart M, et al. Methods of studying soil microbial diversity. *Journal of Microbiological Methods*, 2004, 58: 169 ~ 188.
- [5] KENNEDY A C, SMITH K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soil [J]. *Plant Soil*, 1995, 170: 75 ~ 86.
- [6] 黎宁, 李华兴, 朱凤娇, 等. 菜园土壤微生物生态特征与土壤理化性质的关系 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(2): 285 ~ 290.
- [7] 梁理勇. 雷州林业局按树人工林地土壤微生物的分布规律 [J]. *中南林学院学报*, 2004, 24(4): 59 ~ 61.
- [8] 焦如珍, 杨承栋, 孙启武, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化 [J]. *林业科学*, 2005, 41(6): 163 ~ 165.
- [9] 陈仁华. 武夷山不同森林类型土壤微生物分布状况的研究 [J]. *福建林业科技*, 2004, 31(4): 44 ~ 47.
- [10] 庄铁诚, 林鹏, 陈仁华. 武夷山森林土壤微生物的季节动态 [J]. *厦门大学学报, 自然科学版*, 1997, 36(4): 655 ~ 658.
- [11] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指标作用 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 162 ~ 171.
- [12] 张薇, 魏海雷, 高洪文, 等. 土壤微生物多样性及其环境影响因子研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 48 ~ 52.
- [13] 夏北成. 植被对土壤微生物群落结构的影响 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(3): 296 ~ 300.
- [14] 钟文辉, 蔡祖聪. 土壤微生物多样性研究方法 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 899 ~ 904.
- [15] Bever J D. Feedback between plants and their soil communities in an old field community [J]. *Ecology*, 1994, 75: 1965 ~ 1977.
- [16] Rogers B F, Fate R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a top sequence in Pineland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1389 ~ 1401.
- [17] Broughton L C, Gross K L. Patterns of diversity in plant and soil microbial communities along a productivity gradient in a Michigan old-field. *Oecologia*, 2000, 125: 420 ~ 427.
- [18] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原土壤微生物的数量和生物量 [J]. *生态学报*, 1997, 17(1): 78 ~ 82.
- [19] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 801 ~ 808.
- [20] 魏媛, 张金池, 俞元春, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生物活性的季节动态 - 以贵州花江喀斯特峡谷地区为例 [J]. *新疆农业大学学报*, 2009, 32(6): 1 ~ 7.
- [21] Bever J D. Feedback between plants and their soil communities in an old field community. *Ecology*, 1994, 75: 1965 ~ 1977.
- [22] Chabrierie O, Laval K, Puget P, et al. Relationship between plant and soil microbial communities along a successional gradient in a chalk grassland in northwestern France. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24: 43 ~ 56.
- [23] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究. *土壤学报*, 2004, 41(4): 597 ~ 602.
- [24] Bardgett R D, Kandel E, Tschirko D, et al. Belowground microbial community development in a high temperature world. *Oikos*, 1999, 85: 193 ~ 203.

- [25] Bever J D. Host - specificity of AM fungal population growth rates can generate feedback on plant growth [J]. *Plant Soil* ,2002 ,244: 281 ~ 290.
- [26] 张平究,潘根兴. 植被恢复不同阶段下喀斯特土壤微生物群落结构及活性的变化——以云南石林景区为例[J]. *地理研究* ,2010 ,29(2) : 223 ~ 233.
- [27] Lee C S ,You Y H. Robins on G R1 Secondary succession and natural habit at restoration in abandoned fields of central Korea *Restoration Ecology* ,2002 ,10: 306 ~ 3141.
- [28] 杨鹏,薛立,陈红跃,等. 不同混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. *湖南林业科技* ,2004 ,31(4) : 43 ~ 45.
- [29] Staddon W J ,Trevors J T ,Duchene L C ,et al. Soil microbial diversity and community structure across a climatic gradient in western Canada. *Biodiversity and Conservation* ,1998 ,7(8) : 1081 ~ 1092.
- [30] 张其水,俞新妥. 杉木连栽林地土壤微生物的季节动态研究. *福建林学院学报* ,1991 ,11(4) : 422 ~ 427.
- [31] 陈国潮,何振立,姚槐应. 红壤微生物量的季节性变化研究[J]. *浙江大学学报* ,1999 ,25(4) : 387 ~ 388.
- [32] 张荣,陈占全,李松龄. 湟水流域农田土壤真菌数量分布研究[J]. *青海农林科技* ,2003(2) : 4 ~ 6.
- [33] 梁晨,吕国忠. 辽宁省农田土壤真菌区系及分类研究[J]. *沈阳农业大学学报* ,2000 ,3(5) : 515 ~ 516.
- [34] 李世清,任书杰,李生秀. 土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系[J]. *植物营养与肥料学报* ,2004 ,10(1) : 18 ~ 23.
- [35] 谢龙莲,陈秋波,王真辉,等. 环境变化对土壤微生物的影响[J]. *热带农业科学* ,2004 ,24(3) : 39 ~ 47.
- [36] 钟文辉,蔡祖聪. 土壤微生物多样性研究方法[J]. *应用生态学报* ,2004 ,15(5) : 899 ~ 904.
- [37] 薛立,邱立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. *土壤学报* ,2003 ,40(2) : 280 ~ 285.
- [38] 周兴民. *中国嵩草草甸* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [39] 袁颖红,樊后保,李辉信,等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响[J]. *林业科学* ,2012 ,48(9) : 9 ~ 14.
- [40] CORY C C ,DIANA R N ,STEVEN K S ,et al. Increases in soil respiration following labile carbon additions additions linked to rapid shifts in soil microbial community composition [J]. *Biogeochemistry* ,2007 ,82: 229 ~ 240.
- [41] 靳正忠,雷加强,徐新文,等. 黄土高原不同植被坡地土壤微生物区系特征[J]. *土壤通报* ,2008 ,39(2) : 287 ~ 293.
- [42] 赵瑾,张丽华,钟芳,等. 兰州市郊干旱半干旱黄土丘陵区不同立地条件土壤微生物区系特征, 2010 ,30(5) : 1160 ~ 1165.
- [43] 刘丽,段争虎,汪思龙,等. 不同发育阶段杉木人工林对土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学杂志* ,2009 ,28(12) : 2417 ~ 2433.
- [44] 王素英,王海荣,方亮,等. 大青山不同森林结构与根际土壤微生物数量变化研究[J]. *内蒙古林业科技* ,2010 ,36(2) : 20 ~ 26.
- [45] Grayston S J ,Griffith G S ,Mawdsley J L ,et al. Accounting for variability in soil microbial communities of temperate up land grassland ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry* ,2001 ,33: 533 ~ 551.
- [46] 王树力,孙悦,沈海燕,等. 不同密度杂种落叶松人工林的土壤微生物变化特征[J]. *中国水土保持科学* ,2009 ,7(3) : 59 ~ 66.
- [47] Jenkinson ,D S. Soil organic matter and its dynamics. In: Wild ,A (Editor) ,Russell's soil conditions and plant growth ,Longman , Harlow ,1988: 564 ~ 607.
- [48] Ding MM ,Yi WM ,Liao LY ,et al. Effects of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China. *Soil Biology and Biochemistry* ,1992 ,24 ,865 ~ 872.
- [49] 孙维,赵吉. 不同草原生境下的土壤微生物生物量研究. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版* . 2002 ,23(1) : 29 ~ 31.
- [50] 李香真,曲秋皓. 蒙古高原草原土壤微生物量碳氮特征. *土壤学报* .2002 ,39(1) : 97 ~ 104.
- [51] 蔡艳,薛泉宏,陈占全,等. 青藏高原东部几种自然土壤放线菌的生态分布[J]. *应用与环境生物学报* ,2004 ,10(3) : 378 ~ 383.
- [52] 杨涛,徐慧,李慧,等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究[J]. *水土保持学报* ,2005 ,19(3) : 50 ~ 53.
- [53] Fan J ,Hao M D. Effects of long-term rotation and fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen. *Res Soil Water Cons* , 2003 ,10(10) : 85 ~ 87.
- [54] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *Eur. J. Soil Sci.* ,2003 ,54: 801 ~ 808.
- [55] 冯健,张健. 巨桉人工林地土壤微生物生物类群的生态分布规律[J]. *应用生态学报* ,2005 ,16(8) : 1422 ~ 1426.
- [56] 黄韶华,王正荣,朱永琦. 土壤微生物与土壤肥力的关系研究初报[J]. *新疆农垦科技* ,1995(3) : 6 ~ 7.
- [57] 邵玉琴,赵吉,杨劫. 恢复草地和退化草地土壤微生物类群数量的分布特征[J]. *中国沙漠* ,2004 ,24(2) : 224 ~ 226.
- [58] 阿继军,孙小凤. 湟水流域农田不同类型土壤细菌数量研究[J]. *青海农林科技* ,2003(4) : 14 ~ 17.
- [59] 杨官品,男兰,贾海波,等. 土壤细菌遗传多样性及其与植被类型相关性研究[J]. *遗传学报* ,2000 ,27(3) : 278 ~ 282.
- [60] 邓欣,谭济才,尹丽蓉,等. 不同茶园土壤微生物数量状况调查初报[J]. *茶叶通讯* ,2005 ,32(2) : 7 ~ 9.
- [61] 熊英,邓福英,唐庆兰,等. 万鹤山鹭鸟保护区土壤微生物优势类群生态分布的研究[J]. *广西农业生物科学* ,2005 ,24(1) : 58 ~ 62.
- [62] 刘苑秋,杨家林,杜天真. 重建森林对退化红壤微生物特性的影响[J]. *福建林学院学报* ,2003 ,23(1) : 65 ~ 69.
- [63] Cang D H ,Yang Y S ,Zou SQ. A study on the microflora and biochemical properties of soil microorganisms and the soil fertility of untempered forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Amomum villosum* [J]. *Scientia silvace Sinicae* ,1988 ,24(4) : 458 ~ 465.
- [64] 吴才武,赵兰坡. 土壤微生物多样性的研究方法[J]. *中国农业通报* ,2011 ,27(11) .
- [65] 姚晓华. 土壤微生物群落多样性研究方法及其进展[J]. *广西农业生物科学* ,2008 ,27(21) : 84 ~ 88.