

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第15期 Vol.32 No.15 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 15 期

2012 年 8 月 (半月刊)

目 次

放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响.....	张艳博, 罗 鹏, 孙 庚, 等 (4605)
北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素.....	王苏铭, 张 楠, 于琳倩, 等 (4618)
温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型	施婷婷, 高玉芳, 袁凤辉, 等 (4630)
洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响	刘 娜, 王克林, 段亚锋 (4641)
大辽河口水环境污染生态风险评估.....	于 格, 陈 静, 张学庆, 等 (4651)
标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数	渠晓东, 刘志刚, 张 远 (4661)
不同年龄段大连群体菲律宾蛤仔 EST-SSR 多样性	虞志飞, 闫喜武, 张跃环, 等 (4673)
基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性	杨晓明, 戴小杰, 朱国平 (4682)
广东罗坑自然保护区鳄蜥生境选择的季节性差异.....	武正军, 戴冬亮, 宁加佳, 等 (4691)
甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质.....	魏 强, 凌 雷, 柴春山, 等 (4700)
短轮伐期毛白杨不同密度林分土壤有机碳和全氮动态.....	赵雪梅, 孙向阳, 康向阳, 等 (4714)
放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响.....	丁小慧, 官 立, 王东波, 等 (4722)
UV-B 辐射增强对抗除草剂转基因水稻 CH ₄ 排放的影响	娄运生, 周文麟 (4731)
基于核磁共振波谱的盐芥盐胁迫代谢组学分析.....	王新宇, 王丽华, 于 萍, 等 (4737)
广西甘蔗根际高效联合固氮菌的筛选及鉴定.....	胡春锦, 林 丽, 史国英, 等 (4745)
不同稻蟹生产模式对土壤活性有机碳和酶活性的影响.....	安 辉, 刘鸣达, 王耀晶, 等 (4753)
大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征.....	白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (4762)
川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态.....	崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 等 (4772)
内生真菌角担子菌 B6 对连作西瓜土壤尖孢镰刀菌的影响	肖 逸, 戴传超, 王兴祥, 等 (4784)
西江颗粒直链藻种群生态特征.....	王 超, 赖子尼, 李跃飞, 等 (4793)
大型人工湿地生态可持续性评价.....	张依然, 王仁卿, 张 建, 等 (4803)
孢粉、炭屑揭示的黔西高原 MIS3b 期间古植被、古气候演变	赵增友, 袁道先, 石胜强, 等 (4811)
树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (4819)
豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系	杨 宁, 赵护兵, 王朝辉, 等 (4827)
一次陆源降雨污水引起血红哈卡藻赤潮的成因.....	刘义豪, 宋秀凯, 靳 洋, 等 (4836)
盐城国家级自然保护区景观格局变化及其驱动力.....	王艳芳, 沈永明 (4844)
城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例.....	邵天然, 李超骥, 曾 辉 (4852)
黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势.....	王介勇, 吴建寨 (4861)
重庆市生态功能区蝴蝶多样性参数	李爱民, 邓合黎, 马 琦 (4869)
专论与综述	
干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展.....	王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等 (4890)
土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素.....	栾军伟, 刘世荣 (4902)
森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展.....	程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等 (4914)
湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展	范俊楠, 赵建伟, 朱端卫 (4924)
研究简报	
刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响.....	吕改云, 何怀东, 杨丹菁, 等 (4932)
学术信息与动态	
全球气候变化与粮食安全——2012 年 Planet Under Pressure 国际会议述评	安艺明, 赵文武 (4940)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-08



封面图说: 水杉是中国特有种, 国家一级保护植物, 有植物王国“活化石”之称, 是 1946 年由中国的植物学家在湖北的利川磨刀溪发现的。水杉曾广泛分布于北半球, 第四纪冰期以后, 水杉属的其他种类全部灭绝, 水杉确在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存, 成为旷世奇珍。水杉耐水, 适应力强, 生长极为迅速, 其树干通直挺拔, 高大秀颀, 树冠呈圆锥形, 姿态优美, 枝叶繁茂, 入秋后叶色金黄。自发现后被人们在中国南方广泛种植, 成为著名的绿化观赏植物, 现在中国水杉的子孙已遍及中国和世界 50 多个国家和地区。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103310419

白爱芹,傅伯杰,曲来叶,黄元元,王丽华. 大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征. 生态学报, 2012, 32(15): 4762-4771.

Bai A Q, Fu B J, Qu L Y, Huang Y Y, Wang L H. The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4762-4771.

大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征

白爱芹^{1,2}, 傅伯杰¹, 曲来叶^{1,*}, 黄元元^{1,2,3}, 王丽华⁴

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049,

3. Soil and Water Science, University of Florida 32608; 4. 温州大学生命与环境科学学院 325035)

摘要: 对大兴安岭兴安落叶松 2003 年重度和中度火烧迹地以及未过火样地的土壤微生物群落进行了考察, 旨在揭示火烧迹地恢复初期土壤微生物群落变化特征。研究结果表明火烧迹地土壤养分(全氮、全碳、土壤有机质、有效氮)和土壤水分与未过火对照样地存在显著差异; 火烧迹地土壤微生物量碳氮、微生物代谢活性以及碳源利用能力均显著高于对照样地; 但火烧迹地与对照样地土壤微生物群落结构指标土壤微生物量碳氮比(MBC/MBN)以及多样性指数没有显著差异。相关分析结果表明: 土壤微生物量、代谢活性和碳源利用能力与土壤养分指标(全碳、全氮、速效氮、有机质)和土壤水分含量有显著相关性。主成分分析的结果表明火烧与否是火烧样地与对照样地土壤微生物对碳源利用能力差异的原因。所有样地土壤微生物群落真菌比例较高, 可能与该地区土壤酸碱度有关(pH=4.12—4.68)。经过 6a 的恢复, 重度和中度火烧迹地的土壤养分和水分、土壤微生物群落的生长、代谢、以及群落多样性仍存在差异, 但均不显著, 表明此时火烧程度对土壤微生物群落的影响已很微弱。

关键词: 大兴安岭; 火烧迹地; 土壤微生物群落; 重度和中度火烧

The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains

BAI Aiqin^{1,2}, FU Bojie¹, QU Laiye^{1,*}, HUANG Yuanyuan^{1,2,3}, WANG Lihua⁴

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

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

3 Soil and Water Science, University of Florida, Gainesville 32608, USA

4 College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

Abstract: The Great Xingan Mountain is one of the biggest forest regions in China and serves as an important wood resource base. However, in recent years, frequently experienced severe forest fires have caused great losses in this area. Forest restoration is a very important problem that draws attention from many scientific disciplines. Restoration of soil quality in burned areas could affect vegetation restoration directly. It is thus important to monitor soil quality. Soil microorganisms are one of the most useful indicators of soil quality. Here we focus on the response of microbial populations to changes in the soil environment of recently burned areas in the Great Xingan Mountain, in which the restoration was at the early regeneration stage. The purpose of this study is to examine the effects of a range of fire severities on soil microbial biomass distribution, soil microbial community structure, and soil microbial functional diversity in these areas.

Soil samples were collected from high and moderate severity burned forest sites (2003 fires), and an unburned site.

基金项目: 国家自然科学基金项目(30700639); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-T13); 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2009]1001号)

收稿日期: 2011-03-31; 修订日期: 2012-04-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyqu@rcees.ac.cn

Standard experimental methods were used to measure typical physical and chemical indicators, such as total nitrogen (TN), total carbon (TC), soil organic carbon (SOC), soil moisture (SM), soil available nitrogen (AN), and electrical conductance (EC). Fumigation, extraction, and Biolog methods were used to detect soil microbial biomass, soil microbial community structure, and soil microbial functional diversity, respectively.

Our results showed that there were significant differences in soil nutrients (total nitrogen, total carbon, soil organic carbon, available nitrogen) and soil water content between burned and unburned sites. Soil microorganism biomass carbon on a high severity burned site and moderate severity burned site had values of (3143.93 ± 381.020) mg/kg and (3204.19 ± 54.798) mg/kg, respectively, which are significantly higher than those on the unburned site ((1639.60 ± 468.818) mg/kg). Soil microorganism biomass nitrogen on burned sites yielded (313.56 ± 103.599) mg/kg on the high severity burned site and (383.12 ± 43.509) mg/kg on the moderate severity burned site; these values were also higher than the value on the unburned site ((165.22 ± 29.752) mg/kg). However, only the difference between moderate severity burned site and unburned area reached a statistically significant level. Soil microorganism metabolic activities and carbon use capacities of microorganism community, which are assessed by average well-color development (AWCD), also showed the same pattern, that is, the values of AWCD were 1.45 on high severity burned site, 1.44 on moderate severity burned site, and 0.77 on the unburned site, respectively. However, the diversity of soil microorganism community among the three types of sites was not significantly affected. The results of statistical analysis indicate that the changes in soil microorganisms of burned sites compared with the unburned site were closely related to the soil nutrients (e. g., soil carbon, soil nitrogen, available nitrogen and soil organic carbon) and soil water contents. The Principle Component Analysis showed that fire had a major effect on carbon use by soil microorganisms. The higher fungi ratio among study sites may be due to soil acidity, with soil pH values at the Great Xingan Mountain ranging from 4.12 to 4.68. Soil nutrients, soil water contents, and soil microbial community characteristics, such as the soil microorganism biomass (carbon and nitrogen), metabolic activities, and diversity of microorganism community, were not statistically significantly influenced by the extent of fire (high or moderate severity fire) after 6 years. We only found the different carbon use by soil microorganism between high severity burned and moderate severity burned sites.

Key Words: Great Xingan Mountain; burned forest site; soil microorganism community; heavy and moderate fire

大兴安岭地处寒温带季风气候区,冻土分布广,土层极薄,并且气候干旱,生长季短。因其独特的地理位置以及气候特征使兴安落叶松林成为本地区的优势森林植被,为国家建设提供了大量的木材资源。但兴安落叶松林因其冠层结构的特性使其林下易于堆积大量的可燃物,同时又由于该地区受大陆性季风气候的影响,春秋两季干旱少雨,所以森林火灾发生率较高,居全国之首^[1]。根据烧死木占蓄积量的比例,森林火烧迹地可分为3类:轻度火烧迹地(烧死木占蓄积量30%以下)、中度火烧迹地(烧死木占蓄积量的31%—60%)和重度火烧迹地(烧死木占蓄积量的60%以上)^[2-4]。由于地上植被蓄积量的不同,导致不同火烧程度火烧迹地地上冠层的开阔度和沉积到土壤的灰分、木炭以及其它火烧产物含量存在很大的差异,这些土壤水、热条件的改变导致火烧迹地土壤质量发生很大的变化^[5]。

火烧迹地的植被如何快速更新和恢复不仅是该地区重要的生态问题,更与当地经济可持续发展有密切联系。目前大兴安岭林区森林火烧迹地的研究主要集中于火烧对地上植被的影响,如改变地上植物区系的组成^[6-7]、促进树木的再生^[7-8]、增加木材的产量^[9]等。对于由森林火灾引起的土壤质量的改变的研究相对较少,而对于火烧迹地土壤微生物群落的研究更是缺乏。

林火导致环境剧烈改变对大兴安岭火烧迹地的土壤环境产生很大的扰动,显著地改变该地区土壤的物理化学以及生物学特性^[7],森林土壤作为植物根系以及土壤微生物的所在地,其物理化学特性不仅决定着植被养分的获取,还与土壤微生物发生相互作用。土壤微生物作为土壤生态系统的重要的活性组成部分,是土壤

有机质和土壤养分(C、N、P、S等)转化和循环的动力^[10],参与土壤生态系统中许多物理化学过程。土壤微生物(主要是细菌和真菌)一方面通过改变土壤环境而影响植被的生境;另一方面通过与根系共生增加植物对养分的吸收和利用,直接或间接影响植物生长,因而在构建和维持土壤结构,促进土壤养分循环及植被演替等方面起着重要作用^[11],被认为是陆地生态系统植物多样性和生产力的重要驱动力^[12]。同时由于土壤微生物对于土壤环境的改变极为敏感,土壤特性的改变能够及时反映在土壤微生物的变化上^[13-14]。并且与传统的土壤理化性质(如有机质、全氮等)相比,土壤生物学和生物化学指标能更为迅速准确地反映土壤系统的微小变化,该指标的应用越来越广泛^[15-16]。因此深入理解不同程度火烧迹地森林土壤性质尤其是土壤微生物学特性的变化规律,将有助于对森林生态系统进行管理,包括树种的选择、侵蚀控制以及其他干预措施等火烧后管理决策的制定^[17]等。

本文对大兴安岭兴安落叶松林的重度和中度火烧迹地恢复初期的土壤微生物生物量、代谢活性、群落结构和功能进行了考察,以揭示林区火烧迹地恢复初期土壤微生物群落的变化规律与影响因素,及对不同程度林火扰动后的响应规律,为火烧后森林生态系统的管理和恢复提供更多的建议。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区新林区林业局位于黑龙江省西北部,地处大兴安岭伊勒呼里山的东北坡。地理坐标为东经 123°41′至 125°25′,北纬 51°20′至 52°10′,南北长约 108 km,东西宽约 103 km。地处寒温带季风气候区,冬季达 9 个月(平均气温<10℃),夏季最长不超过 1 个月(平均气温>22℃),全年降水量 350—550 mm,积雪期达 5 个月。地带性土壤为棕色针叶林土,另外还分布有沼泽土、河滩森林草甸土^[18]。地带性植被类型为寒温带针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为优势树种,并混有少量樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和白桦(*Betula platyphylla* Suk.),灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)和越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)等,草本主要有大叶章(*Deyeuxia langsdorffii* (Link) kunth)、小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)和苔草(*Carex appendiculata*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

在研究区域内选取 2003 年重度和中度过火的火烧迹地及其相邻的未过火样地(作为对照样地),考察两种程度火烧迹地恢复初期的土壤微生物生物量、群落结构和功能特性。

火烧迹地火烧前与对照样地的地上植被状况基本一致,优势物种为兴安落叶松,其余主要植物为白桦、山杨(*Populus davidiana*)。3 块样地立地条件基本相同(均为平地,河滩森林草甸土),并且火后没有人干预或人为干预较少。重度火烧迹地植被以灌木和草本为主,零星分布少量的乔木。乔木主要是白桦。灌木主要为丛桦(*Betula fruticosa*)和柴桦(*Betula fruticosa*)(盖度 30%—50%),绢毛绣线菊(*Spiraea sericea*)(盖度 20%)。草本主要是小叶章盖度达 90%,其次为苔草和龙江风毛菊(*Saussurea amurensis*)。中度火烧迹地乔木主要是兴安落叶松,也有少量白桦。灌木与草本层基本与重度火烧迹地类似。

1.2.2 土样的采集

由于该区土层极薄,选取 0—10 cm 的土壤进行土壤样品采集。取样时根据每个样地的植被群落类型,分别在其代表性植被下随机取 5 个点,将 5 点的土样均匀混匀为一个样品,每个火烧迹地与空地选取 3—5 个样品。一部分新鲜土样过 2 mm 筛后于 4℃ 保存,用于土壤微生物指标的测定;另一部分土样风干过 2 mm 筛,用于其它土壤理化常规指标的测定。

1.2.3 测定方法

全碳(TC)、全氮(TN)采用元素分析仪测定,pH 值采用酸度计(土水比为 1:5),电导率(EC)采用电导率仪(土水比为 1:5)测定,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化外加热法,其它土壤指标如土壤碱解氮含量(AN)、土壤含水率(SOM)的测定采用土壤农化常规分析方法^[19]。

土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法,氯仿熏蒸和未熏蒸土壤用 0.5 mol/L K_2SO_4 溶液浸提(土液比为 1:4),浸提溶液中有机碳含量采用 UV-Persuate 全自动有机碳分析仪(Tekmar-Dohrmann Co., USA)测定,转换系数 k_c 取值 0.45^[20];土壤微生物生物量氮转换系数 k_N 取值 0.54^[21] 的方法测定。

微生物群落代谢活性采用 Biolog EcoPlate 微平板培养法进行测定^[22-24]。具体方法除每孔接种量为 150 μ L 外,其它过程均与何寻阳等^[25]的方法一致。土壤微生物的整体代谢活性用培养时间为 96 h 的 Biolog EcoPlate 微平板的每孔颜色平均变化率(AWCD)来描述,土壤微生物群落多样性指标如 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、丰富度指数(S)、Shannon-Weiner 均匀度指数(E)、Simpson 优势度指数(D_s)也根据该培养时间的数据进行计算。计算方法采用胡婵娟等^[26]的方法:

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

式中, C 为有碳源的每个孔的光密度值, R 为对照孔的光密度值, n 为碳源的数目, BIOLOG 生态板的 C 源数目为 31。土壤微生物群落功能多样性指标的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{Shannon-Wiener 多样性指数} \quad H' &= - \sum_{i=1}^S P_i \log P_i \\ \text{丰富度指数} \quad S &= \text{被利用碳源的总数目} \\ \text{Shannon-Wiener 均匀度指数} \quad E &= \frac{H'}{\ln S} \\ \text{Simpson 优势度指数} \quad D_s &= 1 - \sum P_i^2 \end{aligned}$$

式中, P_i 为第 i 个孔的相对吸光值与整个微平板相对吸光值的比值, 计算公式为: $P_i = \frac{C - R}{\sum (C - R)}$

1.3 统计分析

对土壤理化数据,土壤微生物量,土壤微生物代谢功能多样性,采用 SPSS13.0 (SPSS Institute Inc., 2002)进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异;对不同类型碳源的利用,采用 SPSS13.0 进行主成分分析;用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 土壤的物理和化学性质指标

火烧 6 年后火烧迹地的土壤养分和土壤水分含量均显著高于对照未火烧的样地,重度火烧迹地土壤养分指标,包括 TN、TC、SOC、AN 和土壤水分(SM)都要低于中度火烧迹地,但没有达到显著水平(表 1)。重度火烧迹地的 pH 值和电导率(EC)低于中度火烧迹地和未火烧样地,但是三者差异不显著。这表明不同火烧程

表 1 火烧迹地 and 对照样地土壤理化化学性质

Table 1 Soil physiochemical characteristics of burned and unburned sites

样地 Sample sites	总氮 (TN) /(mg/kg)	总碳 (TC) /(mg/kg)	有机碳 (SOC) /(mg/kg)	碱解氮 (AN) /(mg/kg)	土壤水分 (SM)	pH	电导率 /(μ s/cm)
重度火烧迹地 High severity burned site	17706.67 $\pm$ 1593.710a	3.00 $\times 10^5 \pm$ 3.15 $\times 10^4$ a	2.03 $\times 10^5 \pm$ 1.64 $\times 10^4$ a	734.03 $\pm$ 40.935a	0.69 $\pm$ 0.021a	4.12 $\pm$ 0.134a	116.4 $\pm$ 12.974a
中度火烧迹地 Moderate severity burned site	19453.33 $\pm$ 1077.054a	3.30 $\times 10^5 \pm$ 1.25 $\times 10^4$ a	2.05 $\times 10^5 \pm$ 1.15 $\times 10^4$ a	793.16 $\pm$ 30.741a	0.70 $\pm$ 0.021a	4.46 $\pm$ 0.083a	158.57 $\pm$ 14.726a
对照样地 Unburned site	8413.33 $\pm$ 3383.826b	1.51 $\times 10^5 \pm$ 6.86 $\times 10^4$ b	1.24 $\times 10^5 \pm$ 5.00 $\times 10^4$ b	458.92 $\pm$ 82.925b	0.46 $\pm$ 0.079b	4.68 $\pm$ 0.392a	195.53 $\pm$ 91.301a

同列不同小写字母代表不同样地间的差异显著($P < 0.05$), “ $\pm$ ”后的值为标准误;总氮 Total nitrogen (TN);总碳 Total carbon (TC);有机碳 Soil organic carbon (SOC);碱解氮 Soil available nitrogen (AN);土壤水分 Soil moisture (SM);电导率 Electricity conductance (EC)

度在植被恢复初期能够显著影响土壤养分和水分情况,但未影响土壤酸碱度。而重度和中度的火烧迹地恢复过程中土壤的养分和水分变化也存在一定差异,重度火烧迹地的土壤肥力质量低于中度火烧迹地。

2.2 土壤微生物性质指标

2.2.1 土壤微生物生物量

土壤微生物生物量的变化如表 2 所示,恢复初期重度火烧迹地 MBC 低于中度火烧迹地,但两者均高于对照样地。统计分析表明两种火烧程度之间差异不显著,但是两种火烧迹地与对照样地之间土壤微生物碳差异达到显著水平。重度火烧迹地在恢复初期 MBN 低于中度,两者均高于对照样地。统计分析表明重度和中度火烧迹地的土壤微生物量氮没有显著差异,重度火烧迹地与对照样地之间差异也不显著,但是中度火烧迹地与对照样地之间差异达到显著。重度火烧迹地 MBC/MBN 高于中度火烧迹地和对照样地,但没有显著性差异。

表 2 火烧迹地与对照样地土壤微生物生物量碳氮含量、MBC/MBN

Table 2 Soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and MBC /MBN among burned and unburned sites

样地 Sample sites	微生物生物量碳含量 MBC(mg/kg)	微生物生物量氮含量 MBN(mg/kg)	微生物生物量碳氮比 MBC/MBN
重度火烧样地 High severity burned site	3143.93±381.020a	313.56±103.599ab	11.49±2.361a
中度火烧样地 Moderate severity burned site	3204.19±54.798a	383.12±43.509a	8.62±1.142a
对照样地 Unburned site	1639.60±468.818b	165.22±29.752b	9.59±0.986a

同一列中不同的小写字母代表不同的样地间差异显著($P < 0.05$) ; MBC: Soil microbial biomass carbon; MBN; microbial biomass nitrogen

2.2.2 土壤微生物多样性指标

土壤微生物多样性指标的分析结果见表 3。除丰富度指数(S) 重度火烧迹地略高于中度火烧迹地外,Shannon-Winner 多样性指数(H')、均匀度指数(E) 以及 Simpson 优势度指数(D_s) 在重度火烧迹地和中度火烧迹地差别微弱。总体来看,虽然两种程度的火烧迹地与对照样地土壤微生物群落多样性指数没有显著性差异,但是高于对照样地。

表 3 火烧迹地和对照样地土壤微生物群落多样性指数

Table 3 The diversity of soil microbial community of burned and unburned sites

样地 Sample sites	Shannon-Winner 多样性指数 H'	均匀度指数 E	Simpson 优势度指数 D_s	丰富度指数 S
重度火烧样地 High severity burned site	3.09±0.042a	0.93±0.010a	0.95±0.003a	28.00±0.577a
中度火烧样地 Moderate severity burned site	3.09±0.010a	0.93±0.003a	0.95±0.001a	27.67±0.333a
对照样地 Unburned site	2.93±0.174a	0.90±0.023a	0.93±0.015a	26.33±2.667a

同一列中不同的小写字母代表不同的样地间差异显著($P < 0.05$)

2.2.3 土壤微生物代谢活性

土壤微生物总的代谢活性(AWCD) 见图 1。平均颜色变化率(AWCD) 可以用来反映土壤微生物利用碳源的整体能力及微生物活性,是表征土壤微生物活性的有效指标。3 块样地的 AWCD 值(培养时间为 96 h 的数据)分别为 1.45、1.44 和 0.77。重度火烧迹地在恢复初期 AWCD 值略高于中度火烧迹地,但两者之间差异不显著。与对照样地相比较发现火烧迹地的 AWCD 值均高于对照样地,并且重度火烧迹地和重度火烧迹地微生物活性与对照样地微生物活性之间差异都达到显著水平。

不同火烧迹地微生物对不同类型碳源的利用能力也存在差异(图 1)。重度和中度火烧迹地土壤微生物对糖类及衍生物、脂肪酸和脂类以及氨基酸及衍生物的利用能力均显著高于对照样地土壤微生物。在对代谢

中间产物和次生代谢物利用方面,虽然火烧迹地比对照样地的利用能力高,但无显著性差异。中度火烧迹地土壤微生物对于糖类和氨基酸的利用能力要高于重度火烧迹地土壤微生物,而在脂类和代谢物的利用能力低于重度火烧迹地微生物,但重度和中度火烧迹地土壤微生物之间碳源利用能力差异不显著。

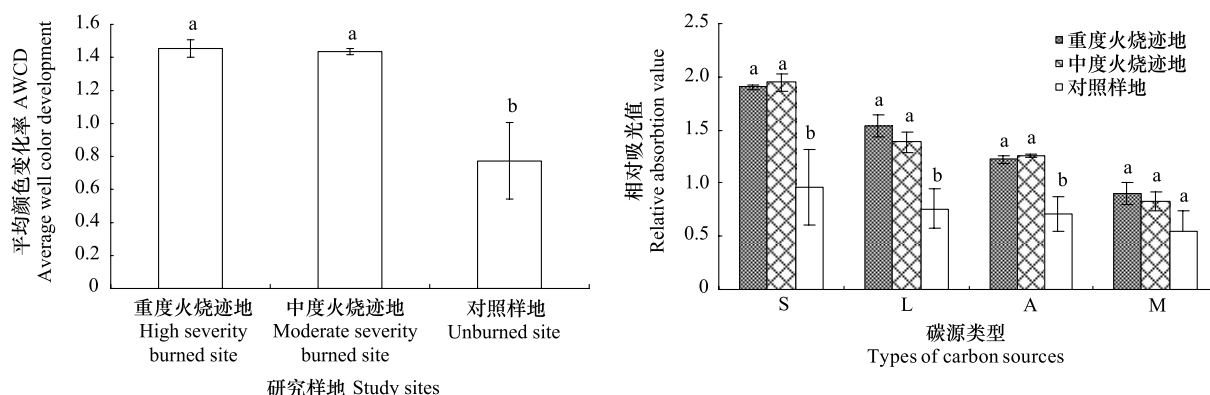


图1 火烧迹地和对照样地 AWCD、土壤微生物对不同类型碳源的利用情况

Fig.1 AWCD (average well color development) and use efficiency of different carbon sources by soil microbes of burned and unburned sites

图中不同的小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下显著; S 代表糖类底物及其衍生物; L 代表脂肪酸和脂类; A 代表氨基酸底物及其衍生物; M 代表代谢中间产物和次生代谢物

研究土壤微生物对不同碳源利用能力的差异,有助于更全面地了解微生物群落代谢功能特性^[27-29]。对 96 h 各种碳源的相对吸光值作统计变量进行主成分分析,可以清晰直观的反映重度和中度火烧迹地与对照样地土壤微生物对碳源的利用情况(图 2)。主成分分析结果发现第 1 主成分(PC1)聚集了 48.8% 的数据变异,第 2 主成分(PC2)聚集了 19.5% 的数据变异,两主成分基本能反映土壤微生物群落碳源利用情况的主要信息。PC1 轴上火烧迹地主要分布在正方向,重度和中度火烧迹地之间分异不明显;对照样地主要分布在 PC1 轴负方向,火烧迹地与对照样地之间分异显著。这进一步表明火烧与否是土壤微生物对碳源利用能力差异的原因,而重度和中度不同火烧程度的差异对碳源利用能力差异的影响不大。将主成分分析结果的第一主成分 PC1 与土壤理化指标进行相关分析,发现土壤微生物群落对碳源利用的分异与 TN、TC、AN、SM 具有极显著的相关关系,与 SOC 具有显著的相关关系,而与 pH 和 EC 没有显著相关关系。

2.3 土壤微生物与土壤理化性质的关系

土壤环境对土壤微生物生物量以及微生物多样性的影响已经被许多研究所报道^[30-31]。火烧迹地土壤的理化性质的改变也可能会对土壤微生物产生影响。土壤微生物生物量指标与土壤物理化学性质的相关分析关系结果如表 4 所示。MBN 与 TN、TC、AN、SM 等指标呈显著正相关关系;MBC 与 TN、TC、SOC、AN、SM 达到极显著相关关系。说明火烧后土壤养分的变化对土壤微生物生物量的影响显著。

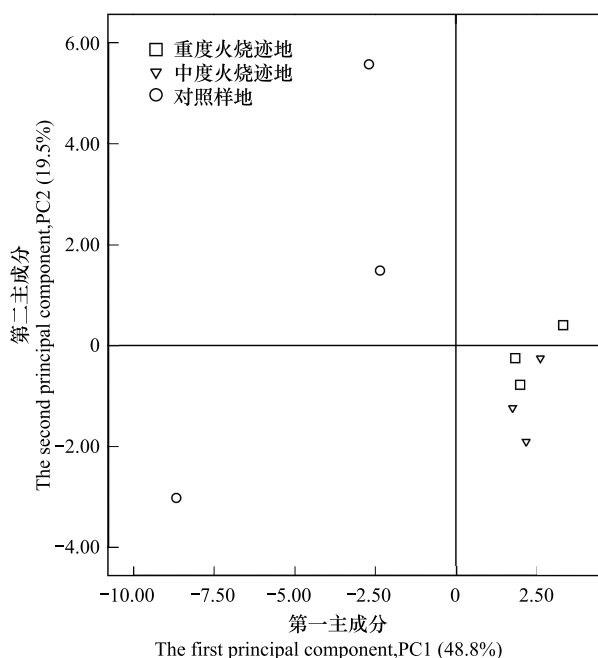


图2 火烧迹地和对照样地的主成分分析

Fig. 2 Principle components analysis on soil microbial community in burned and unburned sites

火烧迹地以及对照样地土壤微生物对碳源的综合利用能力指标 AWCD 结果显示,火烧迹地土壤微生物的总体代谢活性显著高于对照样地,重度火烧样地土壤微生物的总体代谢活性略高于中度,但是无显著差异。AWCD 与 TN、TC、SOC、AN、SM 呈显著正相关关系,并且 TN、AN、SM 与之达到极显著相关水平(表 4)。

表 4 火烧迹地与对照样地土壤微生物与土壤物理化学性质的相关关系

Table 4 Correlations among soil microbial and soil physiochemical characteristics for burned and unburned sites														
	AWCD	H'	MBN	MBC	TN	TC	SOC	AN	SM	pH	EC	MBC/MBN	MBN/TN	MBC/SOC
AWCD	1	0.83 **	0.67 *	0.85 **	0.80 **	0.78 *	0.71 *	0.83 **	0.85 **	-0.20	-0.13	0.08	-0.21	0.32
H'		1	0.56	0.70 *	0.64	0.68 *	0.71 *	0.65	0.66	-0.05	0.30	0.01	-0.11	0.04
MBN			1	0.85 **	0.74 *	0.76 *	0.63	0.79 *	0.71 *	-0.11	0.04	-0.54	0.21	0.44
MBC				1	0.96 **	0.96 **	0.91 **	0.96 **	0.96 **	-0.49	0.16	-0.04	-0.30	0.14
TN					1	0.99 **	0.95 **	0.95 **	0.99 **	-0.60	0.20	0.04	-0.47	-0.07
TC						1	0.97 **	0.95 **	0.98 **	-0.59	0.30	0.02	-0.45	-0.11
SOC							1	0.88 **	0.95 **	-0.67	0.45	0.16	-0.56	-0.29
AN								1	0.95 **	-0.52	0.15	0.01	-0.36	0.11
SM									1	-0.63	0.17	0.14	-0.51	-0.04
pH										1	-0.29	-0.54	0.84 **	0.53
EC											1	0.10	-0.30	-0.68 *
MBC/MBN												1	-0.81 **	-0.45
MBN/TN													1	0.67 *
MBC/SOC														1

3 讨论

火烧迹地与对照样地土壤理化性质比较发现,在火烧迹地恢复 6a 后土壤养分相关的指标如 TN、TC、SOC、AN 以及土壤水分均显著高于对照样地,说明林火对土壤养分的扰动在 6a 后仍处在一个较高的水平,这与国内外一些相关研究的结果一致^[32-35]。究其原因,一方面可能是因为森林火烧直接向火烧迹地土壤输入大量养分,火烧使植物、枯落物以及土壤生物体以灰分的形式迅速归还于土壤,使得土壤养分含量增加;另一方面也可能与火烧迹地地上植被的迅速恢复有关。虽然由于挥发以及风的作用会使部分土壤养分流失,或者由于地上植被的缺失,降雨侵蚀也会引起养分的流失,导致养分含量下降^[36]。本研究中的样地均为平地,由于水土流失损失的养分相对较少;加之火烧迹地冠层被烧毁,土壤光照充足,地面的黑色木炭进一步增加了土壤对热辐射的吸收,提高了土壤温度^[37],促进了冻土层的溶解,使得土壤含水量增加;同时相邻未过火对照样地可以为火烧迹地提供丰富的植物种源,所以导致火烧迹地土壤养分和水分条件都好于对照样地。有学者^[32-33]指出火烧后土壤的养分含量会有所增加,但是在火烧后几年又会降低到火烧前水平。在本文的研究中发现重度和中度的火烧 6a 后土壤养分的含量还是显著高于对照样地,没有恢复到未火烧时的水平。

H'、E、Ds 和 S 指数都是比较常用的表征物种多样性的指数。Ds 是测定群落组织水平最常用的指标之一,其值越大表示群落受优势物种的影响比较大。S 表示群落的物种丰富度,其值越大,群落中的物种越丰富。H'是将丰富度和均匀度综合起来的一个量,能较全面的测度物种的多样性^[26]。从研究结果来看,两种程度火烧迹地土壤微生物群落多样性之间差异很小,且与对照样地之间差异不显著,说明火烧与否以及火烧程度均没有显著影响土壤微生物群落多样性。H'与 TC 和 SOC 具有显著正相关关系,这表明土壤微生物多样性与土壤碳源的关系密切。Saetre 和 Baath^[38]也曾指出森林土壤中异养性微生物群落的结构和功能的差异主要与土壤有机质的数量和质量有关。

本研究发现火烧迹地土壤微生物量碳和氮都显著高于对照样地。Andersson 等^[39]对非洲草原自燃结束 12 d 后进行的研究结果也发现火烧区的微生物生物量碳比未燃烧区高 52%。可见,火烧显著影响了土壤微生物的生长,导致微生物生物量的升高。虽然目前的土壤微生物生物量测定方法不能表征土壤微生物的真实

质量,但仍可从侧面反映土壤微生物质量状况,灵敏地反映土壤肥力质量的情况。重度火烧迹地土壤微生物量碳氮均低于中度火烧迹地(表2),但没有显著差异,可见在火烧迹地恢复6a后火烧程度的差异对微生物生物量碳氮的影响已经很微弱。

虽然重度和中度火烧迹地土壤微生物群落对不同碳源的利用能力存在差异,中度火烧迹地土壤微生物对于糖类和氨基酸的利用能力要高于重度火烧迹地土壤微生物,而在脂类和代谢物的利用能力低于重度火烧迹地的土壤微生物,但通过主成分分析发现,火烧与否是导致火烧样地与对照样地土壤微生物对碳源利用能力差异的主要因素,而火烧程度的大小(重度和中度)对土壤微生物碳源的利用情况影响较小。PC1与TN、TC、AN、SM具有极显著的相关关系,与SOC具有显著的相关关系,而与pH和EC无显著相关关系,这些结果说明火烧后土壤养分和水分的差异是造成土壤微生物代谢能力差异的原因。孟庆杰等^[40]在不同植被覆盖对黑土微生物功能多样性的影响的研究中发现,草地、农田和裸地对不同类型碳源的优先利用顺序存在差异。胡婵娟等^[26]在黄土丘陵沟壑区典型人工林下土壤微生物功能多样性的研究中发现不同人工林对相同碳源的利用上存在明显的差异,并指出这与不同树种对土壤输入的有机物质的组成和根系分泌物质的不同有关。可见地上植被的变化是引起土壤微生物群落对不同碳源的利用能力差异的重要因素。大兴安岭林区火烧迹地恢复初期被旱生和固氮草本所占据^[41],地上植被的生产力大大提高使其盖度、生物量与对照相比都有明显提高^[42]。在本研究区的植被调查发现重度火烧迹地的草本和灌木层也已经恢复到了较好程度,草本植物的盖度达到了90%。火烧迹地草本植物的大量更新生长,使其向土壤中输入的养分种类与对照样地可能存在很大的差别,如有学者认为火烧后本以及草本植物的增加与多年生木质灌丛相比可能会输入更多的易于分解的碳源和氮源^[43]。这种差异引起土壤微生物的代谢功能发生相应的变化。有关火烧迹地地上植被影响土壤微生物群落特征的直接证据还需要未来更深入地研究。

一般来说细菌碳氮比为3—5,真菌为4—15^[11]。因而土壤微生物生物量碳氮比可以反映土壤微生物群落的结构和状态^[44]。土壤微生物生物量碳氮比可以用来反映土壤微生物群落是以细菌为主(较低碳氮比)或真菌为主(较高碳氮比)。由MBC/MBN的结果可知,重度和中度火烧迹地真菌所占比例差异不显著。MBC/MBN与土壤理化性质的相关分析结果发现影响MBC/MBN的因素较为复杂,它与各种土壤理化性质都没有显著相关性,但是与pH值的相关系数最高。土壤酸碱度与土壤微生物的活动、有机质的合成和分解、各种营养元素的转化与释放、土壤保持养分的能力有关。酸性土壤一般不利于细菌的活动,而真菌则较耐酸^[45]。重度火烧迹地pH值为4.12,低于中度火烧样地4.46,也低于对照样地4.68,但总的来说3种类型样地土壤为酸性土壤,这可能导致真菌的比例相对较高的原因。但火烧程度如何影响土壤微生物群落的结构组成,还有待在未来使用磷脂脂肪酸(PLFA)的定量分析方法进一步展开。

4 结论

火烧6a后的火烧迹地与对照样地相比较发现土壤微生物群落的生物量、代谢活性和碳源利用能力都有显著差异,这与森林火烧后土壤养分和水分条件的改变密切相关,表明火烧显著促进了土壤微生物的生长,提高了其活性,改变碳源利用能力,是影响火烧迹地土壤微生物群落特征的主要因素,但对土壤微生物群落多样性的影响不显著。而火烧导致火烧迹地土壤养分条件的改变是影响微生物生物量、代谢活动、群落多样性的重要因素。另外火烧迹地土壤微生物群落真菌比例高于对照样地,这可能与火烧迹地较低的土壤pH值有关。

经过6a的恢复,重度和中度火烧迹地的土壤养分和水分、土壤微生物群落的生长、代谢、以及群落多样性存在差异,但均不显著,表明此时火烧程度对土壤微生物群落的影响已趋微弱。

致谢:感谢东北林业大学袁晓颖教授和孙家宝博士,中国科学院生态环境研究中心王淼同学以及大兴安岭新林林业局防火办和林场对野外群落调查、土壤取样所给予的支持。

References:

- [1] Zhang Y P. Study on the Impacts of Climate Change of Forest Fires in Daxing'anling Mountains [D]. Harbin: Master Dissertation of Northeast

Forestry University, 2008.

- [2] Luo D K. Modes of regeneration in Daxing'anling burned area. *Forestry Science and Technology*, 1987, (5): 10-12.
- [3] Shu L F, Zuo J C, Tian W T. Discussion on the modes of regeneration in Daxing'anling burned area by the fire on 6 May 1987. *Forest Resources Management*, 1996, (6): 43-45.
- [4] Zhou Y L. *Vegetation of Da Hinggan Ling in China*. Beijing: Science Press, 1991.
- [5] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [6] Cammeraat L H, Imeson A C. The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain. *Catena*, 1999, 37(1/2): 107-127.
- [7] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils; a review. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1-10.
- [8] Martínez-Sánchez J J, Ferrandis P, de las Heras J, Herranz J M. Effect of burnt wood removal on the natural regeneration of *Pinus halepensis* after fire in a pine forest in Tus valley (SE Spain). *Forest Ecology and Management*, 1999, 123(1): 1-10.
- [9] Vihnanek R E, Ballard T M. Slash burning effects on stocking, growth, and nutrition of young Douglas-fir plantations in salal-dominated ecosystems of eastern Vancouver Island. *Canadian Journal of Forest Research*, 1988, 18(6): 718-722.
- [10] Harris J A, Birch P. Soil microbial activity in opencast coal mine restoration. *Soil Use and Management*, 1989, 5(4): 155-160.
- [11] Clark F E, Paul E A. *Soil Microbiology and Biochemistry*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1996.
- [12] van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, 11(3): 296-310.
- [13] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderón F J, Stromberg M R, Scow K M. Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1599-1611.
- [14] Bucher A E, Lanyon L E. Evaluating soil management with microbial community-level physiological profiles. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(1): 59-71.
- [15] Pascual J A, Garcia C, Hernandez T, Moreno J L, Ros M. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1877-1883.
- [16] Hu C J, Fu B J, Jin T T, Liu G H. Effects of vegetation restoration on soil microbial biomass carbon and nitrogen in hilly areas of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 45-50.
- [17] Kara O, Bolat I. Short-term effects of wildfire on microbial biomass and abundance in black pine plantation soils in Turkey. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1151-1155.
- [18] Xu H C. *Da Hinggan Ling Mountains Forests in China*. Beijing: Science Press, 1998.
- [19] Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, Chaussod R, Brookes P C. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-An automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [21] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [22] Zak J C, Willig M R, Moorhead D L, Wildman H G. Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(9): 1101-1108.
- [23] Staddon W J, Duchesne L C, Trevors J T. Impact of clear-cutting 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.
- [24] Schutter M, Dick R. Shifts in substrate utilization potential and structure of soil microbial communities in response to carbon substrates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(11): 1481-1491.
- [25] He X Y, Wang K L, Xu L L, Chen H S, Zhang W. Soil microbial metabolic diversity and its seasonal variations along a vegetation succession in a karst area: a case study in southwest China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(12): 2590-2596.
- [26] Hu C J, Fu B J, Liu G H, Jin T T, Liu Y. Soil microbial functional and diversity under typical artificial woodlands in the hilly area of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 727-733.
- [27] Kong W D, Liu K X, Liao Z W, Zhu Y G, Wang B L. Effects of organic matters on metabolic functional diversity of soil microbial community under pot incubation conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2291-2296.
- [28] Zhen H, Ouyang Z Y, Wang X K, Fang Z G, Zhao T Q, Miao H. Effects of forest restoration patterns on soil microbial communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2019-2024.
- [29] Xu H Q, Xiao R L, Zou D S, Song T Q, Luo W, Li S H. Effects of long-term fertilization on functional diversity of soil microbial community of the tea plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3355-3361.
- [30] Zhang J S, Guo J F, Chen G S, Qian W. Soil microbial biomass and its controls. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(4): 327-330.

- [31] Zhou J, Lei T. Review and prospects on methodology and affecting factors of soil microbial diversity. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 306-311.
- [32] Trabaud L. The effects of different fire regimes on soil nutrient levels in *Quercus coccifera* garrigue // Kruger F J, Mitchell D T, Jarvis J U M, eds. *Mediterranean-type Ecosystems: The Role of Nutrients*. New York: Springer-Verlag, 1983: 235-243.
- [33] Monleon VJ, Choromack K Jr, Landsberg J D. Short- and long-term effects of prescribed underburning on nitrogen availability in ponderosa pine stands in central Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27(3): 369-378.
- [34] Song Q L, Dong X B, Li Y, Liu J M. Impacts of burning and logging disturbance on soil chemical properties of forest in Daxing'anling mountain region. *Forest Engineering*, 2010, 26(5): 4-7.
- [35] Sun M X, Jia W W, Wu Y. Effect of forest fire on soil chemical properties in Northern Daxing'an Mountains. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(5): 33-35.
- [36] Neary D G, Klopatek C C, DeBano L F, Ffolliott P F. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 1999, 122(1/2): 51-71.
- [37] Christensen N L, Muller C H. Effects of fire on factors controlling plant growth in *Adenostoma* chaparral. *Ecological Monographs*, 1975, 45(1): 29-55.
- [38] Saetre P, Bååth E. Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce-birch stand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7): 909-917.
- [39] Andersson M, Michelsen A, Jensen M, Kjeller A. Tropical savannah woodland: effects of experimental fire on soil microorganisms and soil emissions of carbon dioxide. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5): 849-858.
- [40] Meng Q J, Xu Y L, Li C J, Han X Z, Pei X C. Effects of different vegetation coverage on microbial functional diversity in black soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1134-1140.
- [41] Wang X G, Li X Z, He H T, Leng W F, Wen Q C. Postfire succession of larch forest on the northern slope of Daxinganling. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 35-41.
- [42] Yang S C, Liu X T, Cao H B, Guo B Y. Vegetation change on burn blank in Daxing'anling forest areas. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(1): 19-23.
- [43] Hart S C, DeLuca T H, Newman G S, MacKenzie M D, Boyle S I. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 166-184.
- [44] Zhong Z K, Makeschin F. Differences of soil microbial biomass and nitrogen transformation under two forest types in central Germany. *Plant and Soil*, 2006, 283(1/2): 287-297.
- [45] Zhou D Q. *Essential Microbiology*. 2nd ed. Beijing: High Education Press, 2002.

参考文献:

- [1] 张艳平. 黑龙江大兴安岭地区气候变化对森林火灾影响的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [2] 罗德昆. 大兴安岭过火迹地更新方式的研讨. *林业科技*, 1987, (5): 10-12.
- [3] 舒立辅, 左继春, 田文涛. 大兴安岭“五·六”大火火烧迹地的天然更新探讨. *林业资源管理*, 1996, (6): 43-45.
- [4] 周以良. *中国大兴安岭植被*. 北京: 科学出版社, 1991.
- [16] 胡婵娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 45-50.
- [18] 徐化成. *中国大兴安岭森林*. 北京: 科学出版社, 1998.
- [19] 鲍士旦. *土壤化学分析* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 何寻阳, 王克林, 徐丽丽, 陈洪松, 张伟. 喀斯特地区植被不同演替阶段土壤细菌代谢多样性及其季节变化. *环境科学学报*, 2008, 28(12): 2590-2596.
- [26] 胡婵娟, 傅伯杰, 刘国华, 靳甜甜, 刘宇. 黄土丘陵沟壑区典型人工林下土壤微生物功能多样性. *生态学报*, 2009, 29(2): 727-733.
- [31] 周桔, 雷霆. 土壤微生物多样性影响因素及研究方法的现状与展望. *生物多样性*, 2007, 15(3): 306-311.
- [34] 宋启亮, 董希斌, 李勇, 刘继明. 采伐干扰和火烧对大兴安岭森林土壤化学性质的影响. *森林工程*, 2010, 26(5): 4-7.
- [35] 孙明学, 贾玮玮, 吴瑶. 大兴安岭北部地区林火对土壤化学性质的影响. *东北林业大学学报*, 2009, 37(5): 33-35.
- [40] 孟庆杰, 许艳丽, 李春杰, 韩晓增, 裴希超. 不同植被覆盖对黑土微生物功能多样性的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1134-1140.
- [41] 王绪高, 李秀珍, 贺红土, 冷文芳, 问青春. 大兴安岭北坡落叶松林火后植被演替过程研究. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 35-41.
- [42] 杨树春, 刘新田, 曹海波, 郭宝英. 大兴安岭林区火烧迹地植被变化研究. *东北林业大学学报*, 1998, 26(1): 19-23.
- [45] 周德庆. *微生物学教程* (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.15 August ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Effects of grazing on litter decomposition in two alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau	4605
Distribution pattern and their influencing factors of invasive alien plants in Beijing	4618
Simulation of CO ₂ and H ₂ O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model	4630
Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake area	4641
Integrated water risk assessment in Daliao River estuary area	4651
Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity	4661
Genetic diversity analysis of different age of a Dalian population of the Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> by EST-SSR	4673
Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) purse seine catch in the western Indian Ocean	4682
Seasonal differences in habitat selection of the Crocodile lizard (<i>Shinisaurus crocodilurus</i>) in Luokeng Nature Reserve, Guangdong	4691
Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu	4700
Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen contents in short-rotation triploid <i>Populus tomentosa</i> plantations	4714
Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia	4722
Effect of elevated ultraviolet-B (UV-B) radiation on CH ₄ emission in herbicide resistant transgenic rice from a paddy soil	4731
NMR spectroscopy based metabolomic analysis of <i>Thellungiella salsuginea</i> under salt stress	4737
Screening and identification of associative nitrogen fixation bacteria in rhizosphere of sugarcane in Guangxi	4745
Effects of different rice-crab production modes on soil labile organic carbon and enzyme activities	4753
The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains	4762
Changes of soil faunal communities during the restoration progress of <i>Abies faxoniana</i> Forests in Northwestern Sichuan	4772
The effects of the endophytic fungus <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 on <i>Fusarium oxysporum</i> in a continuously cropped watermelon field	4784
Population ecology of <i>Aulacoseira granulata</i> in Xijiang River	4793
Evaluation of ecosystem sustainability for large-scale constructed wetlands	4803
MIS3b vegetation and climate changes based on pollen and charcoal on Qianxi Plateau	4811
The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for <i>Haloxylon ammodendron</i> Bge	4819
Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area	4827
Occurrence characteristics of <i>akashiwo sanguinea</i> bloom caused by land source rainwater	4836
Analysis on landscape pattern change and its driving forces of Yancheng National Natural Reserve	4844
Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies: a case study in Futian central district, Shenzhen, China	4852
Analysis of the dynamic coupling processes and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River Delta	4861
The diversity parameters of butterfly for ecological function divisions in Chongqing	4869
Review and Monograph	
Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas	4890
Temperature sensitivity of soil respiration: uncertainties of global warming positive or negative feedback	4902
The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review	4914
The research progresses on biological oxidation and removal of nitrogen in lakes	4924
Scientific Note	
Cutting effects on growth and wastewater purification of <i>Cyperus alternifolius</i> in constructed wetland	4932

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 15 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 15 (August, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元