

不同草本层三倍体毛白杨根际与非根际土壤化学特性及其对C/N的影响

刘朔^{1,2},袁渭阳¹,李贤伟¹,荣丽¹,杨渺¹,李德会¹,王巧¹

(1. 四川农业大学生态林业工程重点实验室,四川雅安 625014;2. 四川林业调查规划院营调队,成都 610081)

摘要:采用剥落分离法对三倍体毛白杨+黑麦草与三倍体毛白杨+自然草2种模式的根际与非根际土化学特性进行研究,结果表明:两模式林地非根际土C/N值和pH值均大于其对应的根际土。自然草模式根际与非根际土C/N值大于黑麦草模式根际与非根际土,而pH值却相反,黑麦草模式根际(或非根际)土pH值大于的自然草模式根际(或非根际);两模式根际与非根际土N/P值(有效N与有效P的比值)接近14:1;两模式根际与非根际土速效K在4—5月均处于低谷,10—11月处于高峰;黑麦草模式根际土C/N值与速效K呈现较显著正相关,自然草模式根际土C/N值与N/P值呈现较显著正相关。

关键词:三倍体毛白杨;黑麦草;根际;非根际;C/N值

中图分类号:S714.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)02-0107-04

Soil Chemical Characteristics and Their Effects on C : N Ratio of Rhizosphere and Non-rhizosphere of Different Herbages in Triploid of *Populus tomentosa* Woodland

LIU Shuo^{1,2}, YUAN Wei-yang¹, LI Xian-wei¹, RONG Li¹, YANG Miao¹, LI De-hui¹, WANG Qiao¹

(1. State Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. Sichuan Forestry Exploration and Design Institute, Chengdu 610081, China)

Abstract: The rhizosphere and non-rhizosphere soils were sampled by peeling the adhering soil of the tree roots in two types of herbages, planted in the triploid of *Populus tomentosa* woodland, which was converted from cropland to forest. The results showed that C : N ratio and pH in non-rhizosphere were bigger than those in rhizosphere in the corresponding patterns. The C : N ratio of rhizosphere and non-rhizosphere in natural herb pattern was bigger than that in ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) pattern, while the pH was reverse. The N : P ratio (the ratio of available nitrogen to available phosphorus) of rhizosphere and non-rhizosphere soils in two types approached the Red field ratio (14 : 1). And the available potassium was the lowest from April to May, while maximal from October to November. The correlation between C : N ratio and available potassium in ryegrass type, C : N and N : P ratio in natural herb type of rhizosphere soils of *Populus tomentosa* was positive significant, with the correlation coefficients 0.639 7 and 0.712 5 respectively.

Key words: Triploid of *Populus tomentosa*; *Lolium multiflorum* L.; rhizosphere; non-rhizosphere; C : N ratio

1 引言

地下生态系统的变动是近年来国际关注的焦点^[1]。土壤内的“生物小循环”是局部地下生态系统物质和能量贮存、流动、转换的枢纽和表象地上、地下生物多样性的内在机制。C/N值限制着大气—植物—土壤之间的重要元素循环^[2-4],对其影响因素的分析,有助于在适当的时间段缓和这种限制,从而提高退耕还林(草)地的生产力,增加森林土壤碳汇潜力^[3-5]。碳(C)、氮(N)循环在生物地球化学过程中是紧密联系的,土壤C库与N库的变动显著相关^[6-7]。植物体、凋落物、土壤的C/N值是研究系统C、N循环过程和分库C、

N周转、库容的有力工具,陆地生态系统C、N循环模型通常利用各库的C/N值作为模型基本结构^[4-8]。且C/N值是整合地下生态系统的生物—物理系统,综合阐述系统内部各种形态的能量、物质、信息与生物的相互作用、传输和转化较为敏感的指标^[4]。

根际(Rhizosphere)是围绕于植物活根的土壤微域,由于受根系生理活动的影响,在物理、化学和生物特性上有不同于原土体(非根际(Non-rhizosphere)土壤)的特殊土区,是土壤—根系—微生物三者相互作用的场所^[9]。根际不但是土壤水分和矿物质进入根系参与生物循环的门户,还是根系自

收稿日期:2007-05-06

基金项目:国家教育部重点学科博士点基金(20050626001);国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A11)和四川省教育厅重点实验室项目(2006ZD006)共同资助

作者简介:刘朔(1980—),男,四川开江人,硕士,主要从事生态环境建设和林业可持续发展研究。E-mail:lxw@sicau.edu.cn

通信作者:李贤伟。

身生命活动和代谢对土壤影响最直接、最强烈的区域。对于根际土 C/N 值的研究,有助于更好地理解这一微生态场区的生物地化循环,为探索地下生态系统在全球变化过程中的主要元素循环奠定基础^[8]。

本研究是在四川省雅安市天全县退耕还林(草)地营造的三倍体毛白杨(*Triploid Populus tomentosa*) + 黑麦草(*Lolium multiflorum* L.) (简称 TL, 以下 TL 根际土均简称 TLR, 非根际土简称 TLN) 以及三倍体毛白杨 + 自然草(简称 TN, 以下 TN 根际土简称 TNR, 非根际土简称 TNN, 下同)两种不同复合模式内进行对比研究。以往对这两个模式的细根分布与周转、养分动态、土壤抗蚀性等都有较为系统的研究^[10-13],而对于根际与非根际养分动态还未曾有所涉及。进一步了解各模式地下不同土壤场区(根际与非根际)养分变化及受控机制,可以对退耕区的林分管理、施肥和灌溉措施及进一步相关研究提供参考。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区地处四川盆地西缘,东经 102°16′—102°53′,北纬 29°49′—30°21′。全区属于亚热带湿润气候区。年平均降水量为 1 735.6 mm,年平均蒸发量 922.6 mm,降雨时数累计年平均为 236 d;年平均气温 15.1℃,1 月平均气温 5.1℃,7 月平均气温 24.1℃。地貌属龙门山地区低山丘陵区,系黄土、紫色土分布区域。

研究区自 1999 年 10 月栽植三倍体毛白杨,在研究区的下部林地,人工种植优质 1 a 生黑麦草,上部林地内为自然条件下生长的草本层(以下简称自然草),主要为白茅(*Imperata cylindrica*)、野青茅(*Deyeuxia*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、白三叶(*Trifolium repens*)和中华鳞盖蕨(*Microlepia strigosa*)等。

2.2 试验设计

2004 年 9 月在四川省天全县的 TL 和 TN 两模式试验地中各建立 20 m × 20 m 的固定标准地 3 块。TL 中毛白杨平均高 6.5 m,胸径 6.5 cm,株行距 3 m × 3 m,黑麦草平均高 0.2 m,盖度 100%。TN 中毛白杨平均高 6 m,胸径 5.9 cm,株行距 3 m × 3 m,自然草平均高 0.3 m,盖度 100%。

2.2.1 样品采集

从 2004 年 11 月到 2005 年 10 月,每月初期分别在 TL 和 TN 的 3 块固定标准地各选择 3~5 株平均木,采用剥落分离法^[14](对疏松土壤进行小心剥落;对坚硬土用 10 cm 口径环刀挖成一个土块,用硬质刷子脱落至距根系 1 cm 以内,统一收集距树木根系 1 cm 以内的土壤作为根际土样;将距树木根系 5 cm 以上的土作为非根际土)收集距平均木 50 cm 远的根际与非根际土(根据以往对这两种模式地下树木细根的主要分布区域的研究^[11],统一将深度定为 20~40 cm 土层内),每株树木按不同交叉方向采集 4~5 个重复(根际与非根际皆指三倍体毛白杨的根系)。

2.2.2 测定与分析

分别测定 TLR, TLN, TNR 和 TNN 的 pH 值、有机质、全 N、水解性 N、全 P、有效 P、全 K 和速效 K,方法采用森林

土壤养分测定国家标准进行^[15]。并用 Excel 2003 进行数据处理与分析。

3 结果与分析

3.1 C/N 值的月动态

两种模式根际与非根际土 C/N 值年际变化如图 1 所示(平均值),主要表现在:(1)除在 6 月有个别波动之外,非根际土 C/N 值均比根际土 C/N 值高;(2)虽存在少量交叉变动(6 月和 12 月),但 C/N 值总的趋势是 TNR > TLR, TNN > TLN。

6 月和 12 月在该研究区是气温和降水变化较大的时期,地下淋溶变动较大(6 月)或分解较慢(12 月),所以存在 C/N 值的一些不规则性。C/N 值的变化受两个元素的影响,由表 1 分析可知,C,N 的变动与 pH 变化分开讨论,其相关性大部分不显著,故将其作为一个整体来讨论(下同),此处将其作为一个相对趋势进行讨论。C/N 值的上述规律说明,(1)非根际土 C 的周转速度(或释放、转移)比根际土慢,而 N 的周转速度比根际土快;TN 的根际和非根际土 C 周转速度分别比 TL 的根际和非根际土慢,而 N 的周转相反;(2)C/N 值高时,微生物活性相对较低,通过土壤呼吸释放到大气中 CO₂ 的较少,土壤矿化作用较弱^[16]。所以,根际土微生物活性较非根际土高,TL 的根际和非根际土微生物活性较 TN 高,即黑麦草模式土壤微生物活性较高。

3.2 pH 值月动态

pH 通过它对阳离子的交换和磷酸盐化合物与微量元素如 Fe, Zn, Cu 和 Mn 等溶解度的作用强烈影响着营养的可利用率,土壤酸碱度对于调节土壤生物群落具有重要的作用。比如地下生态系统的分解者微生物,它们的生命活动和物质代谢与环境的氢离子浓度有着密切的关系,不同的微生物要求不同的 pH 值,而比较适宜的范围是 6.5~7.5。氧化硫硫杆菌(*T. thiooxidans*)和氧化铁硫杆菌(*T. ferrooxidans*)等都喜欢在酸性环境中生活^[17],这对于林下 Fe, S 元素或其化合物的吸收与分解作用巨大。由图 2 知:(1)pH 均值表现为黑麦草模式根际和非根际均大于自然草模式。说明两种模式土壤喜酸性和喜碱性微生物数量有所差异,需要进一步的研究才可验证。(2)两模式内非根际土 pH 值均比其对应模式的根际土 pH 值高。可见,植物对营养的吸收导致根际的 pH 变化,根吸收了过量的阳离子,它就会向根际圈中释放氢离子以维持电中性,这种氢离子使根际圈酸化。(3)两种模式共同之处在于,1~3 与 7~9 月 pH 值达到高峰,6 月处于低谷,且四季 pH 值均落于 5.5~5.8 区间,呈现酸性。

表 1 C, 全 N 与 pH 值的相关性

项目	TLR	TLN	TNR	TNN
C 与 pH	-0.0267	-0.1268	-0.3777	-0.1148
N 与 pH	0.3142	-0.6234*	0.2063	-0.4298

注: * 表示相关性较显著,下同。

3.3 N/P 值的月动态

N/P 值一般称为雷德菲尔德比(Redfield ratio, 一般认为是植物生物体(如叶片)N/P 值在 14 : 1 附近),陆地生态

系统中的实验显示,陆地植物体内的矿质营养也近似地符合雷德菲尔德比^[18]。而植物体内的养分与其根际土的有效养分是否存在一定的关系呢?图3所示为两模式根际与非根际土有效N(水解性N)与有效P的比值关系,从全年均值来看,TLR(12.8) < TLN(16.2),TNR(13.1) < TNN,即非根际土(有效)N/P值比根际土N/P值高,且非根际土(有效)N/P值大于14:1。黑麦草模式N/P值在14:1上下波动较自然草模式大,说明黑麦草模式受植物根系或其他因子干扰较自然草大,但这方面的证据还是相当不足的,而且国际上对于N/P值的研究也主要集中在海洋或陆地植物体(或生物体,如浮游生物)中^[19-22],而对于地下生态系统或植物体的临近空间内物质(或介质)研究却鲜见。

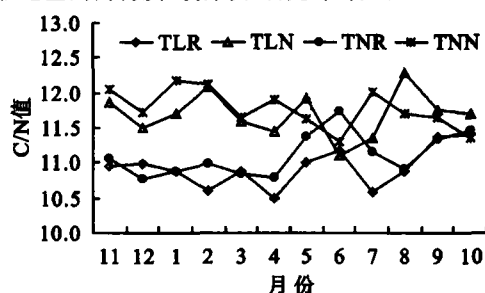


图1 两模式根际与非根际 C/N 月动态

3.4 速效 K 月动态

相关性分析(表2)结果表明,C/N值与速效K相关性基本较好,而与全K基本相关性很小。如图4,4-5月两模式根际与非根际速效K皆处于低谷,10-11月为高峰期。说明林下在4-5月对速效K需求量增大,而在10-11月需求量相对较低。从平均水平差异看,根际土的K皆大于其对应模式的非根际土含量,表明速效K具有生物表聚作用。两模式速效K含量大部分处于100~150 mg/kg内,根据土壤养分含量全国统一分级标准,属于中上水平(3级),说明土壤供K水平较高。

表2 根际与非根际土壤 C/N 值与各因子的相关性

C/N与	TLR	TLN	TNR	TNN
pH	-0.6340* (41.3)	0.6576* (74.4)	-0.6117* (30.0)	0.3672 (28.6)
N/P	-0.1295 (8.4)	0.0806 (9.1)	0.7125* (34.9)	-0.1791 (13.9)
全K	0.1328 (8.6)	0.0865 (9.8)	-0.2701 (13.2)	0.1738 (13.5)
速效K	0.6397* (41.6)	0.0595 (6.7)	0.4448 (21.8)	-0.5711 (44.2)

括号内数据是各因子作为C/N值变化的影响因素时的贡献率(%)。

4 各化学特性对 C/N 的影响

(1)黑麦草模式根际土的pH值与C/N存在显著负相关。说明,随着pH值升高(在5.5~5.8之间),C/N值减小。这可能是因为,随着pH值的升高(在3.5~7.5之间),微生物活性将增强^[11],使根际土中的C被分解释放的机率增大^[16,24-25],也使根系分解速率提高^[26],从而使根际圈N含量增大^[27],故根际土壤的C/N值会减小。一般认为,土壤

本研究结果说明,根际与非根际土N/P值在14:1上下波动,基本上与植物体内N/P值变化接近^[18-19],说明植物体根系在调节着其根际与非根际圈内N/P值动态,使其有效性N,P的比例满足植物体本身的需求。张学利等^[13]研究樟子松(*Pinus sylvestris*)根际与非根际土后认为,树木感病后其正常的生理活动必然发生变化,而这种变化会通过林木—土壤的相互作用对林下土壤,尤其是根际土的性质产生影响(如根际土的pH值随樟子松感病程度的加重而上升,而有机质下降等),可见,植物调节着其根际与非根际圈土壤理化性质。但其调节的途径和方式还有待进一步研究,这将有助于加深适地适树原则的理论指导,特别是在退耕还林(草)地。

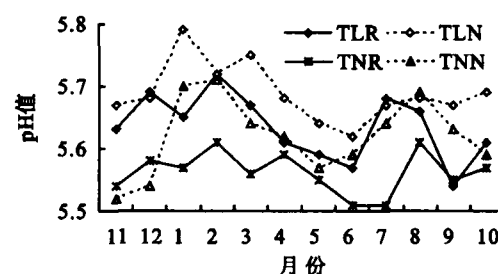


图2 两模式根际与非根际土壤 pH 值月动态

有机碳的保持在很大程度上取决于土壤全氮的含量,即当土壤的C/N高时,普通腐生微生物(如细菌、真菌等)活性提高、繁殖快,产生大量CO₂,硝化细菌处于抑制状态;当土壤的C/N低时,硝化作用旺盛,土壤中的硝酸盐多,而产生CO₂少。而且认为C/N降低说明土壤中的碳库存储减少^[28]。但是有研究指出,森林土壤中C/N的降低不能代表碳库存储的下降,而只能看作大气氮输入的增加,而且认为当土壤微生物量^[29]和细根密度^[30]减少时,氮库存储会下降,从而C/N会上升。

(2)黑麦草模式根际土速效K与C/N值存在较显著正相关,而自然草模式根际土速效K与C/N值相关性不大。可能由于三倍体毛白杨根际土壤有可能也是草的根际圈内土,从而受草根影响很大。草在同一个土层内能形成一个密度较大和浅薄的根系,从而影响树木根际圈内的养分循环,主要表现为使树木根长减小和根生物量减少^[31];黑麦草根际土壤多糖含量较高,为土壤微生物活动提供了丰富的能源,且黑麦草根际具有较高的土壤酶活性^[32],而且黑麦草是一种重要的重金属富集植物^[33],虽然草根主要分布在0-20 cm土层内,但是其分泌物及对草根根际圈土壤的调节机制,将对20 cm以下土层产生重要影响。可见,不同的草本覆盖,对毛白杨的根际圈土壤的有效性养分的丰缺与变动影响不同,从而造成其与自然草模式的毛白杨根际土有效性养分变化的差异。

(3)自然草模式根际土的pH值与C/N存在较显著负相关,这与黑麦草模式相同。而N/P值与C/N呈现较显著正相关。本文中C/N值是指总有机碳与全N的比值,而N/P值是有效N与有效P的比值,对全N与有效性N的相关性分析显示,两者相关性不大。将其作为一个整体来考虑,可见,N/P值越大,C/N值越大。植物生物量N/P值作为其

初级生产力的养分限制指标已被广泛应用,而且 N/P 值的标准化,是近 10 a 来生物量生产与分解的研究热点^[19]。但

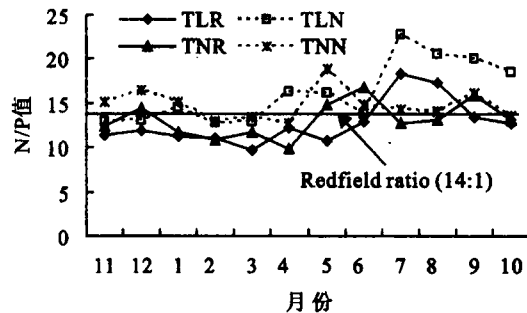


图3 (有效)N/P值及月动态

(4)黑麦草模式非根际土的 C/N 与 pH 值表现出较为显著的正相关性,而自然草模式非根际土的 C/N 值与其他因子相关性表现不明显。说明 pH 值在非根际表现出与根际相反的趋势,这可能是由于植物根系分泌物对根际土影响所致,而非根际与根际土之间养分、水分等的相互流动和传输,对其产生了均衡作用,所以表现出年际之间交替波动的趋势。而这种平衡的过程又是在非连续的时间段上采样测量所不能解释的,但是从其年际上下起伏的表象可以很好地解释。

参考文献:

- [1] Sugden A, Stone R and Ash C. Ecology in the under-world. Science, 2004, 304: 1613.
- [2] Raven J A, Handley L L, Andrews M. Global aspects of C/N interactions determining plant-environment interactions[J]. J. Experi. Bota., 2004, 55(394): 11-25.
- [3] Seixo J, Varela M H, Coutinho J A, et al. Influence of C/N ratio on autotrophic biomass development in a sequencing batch reactor[J]. Biochemi. Engi. J., 2004, 21: 131-139.
- [4] Steltzer H. Soil carbon sequestration with forest expansion in an arctic forest-tundra landscape. Can J Forest Res. 2004, 34: 1538-1542.
- [5] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. Forest. Ecol. Manage, 2005, 220: 242-258.
- [6] Flavel T C, Murphy D V. Carbon and nitrogen mineralization rates after application of organic amendments to soil [J]. J. Environ. Qual., 2006, 35: 183-193.
- [7] Wang Z Y, Gottlein A, Rodenkirchen H, et al. The influence of phytophthora citricola on rhizosphere soil solution chemistry and the nutritional status of European beech seedlings [J]. J. Phytopathology, 2003, 151: 365-368.
- [8] Worgan J A, Bending G D, White P J. Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere [J]. J. Experi. Bota., 2005, 56(417): 1729-1739.
- [9] 郭朝晖, 张杨珠, 黄子蔚. 根际微域营养研究进展[J]. 土壤通报, 1999, 30(1): 46-53.
- [10] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 等. 不同草本层三倍体毛白杨林地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19

是,对于根际圈内有效性养分在这方面的研究还是较薄弱。

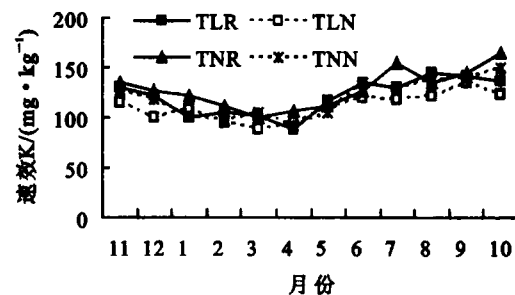


图4 两模式根际与非根际土壤速效 K 月动态

(4): 6-9.

- [11] 李贤伟, 张健, 陈文德, 等. 三倍体毛白杨—黑麦草复合模式根际和草根分布与生长特征[J]. 草业学报, 2005, 14(6): 73-78.
- [12] 李贤伟, 张健, 陈文德, 等. 三倍体毛白杨+黑麦草复合模式根土养分动态研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 6-9.
- [13] 范冰, 李贤伟, 张健, 等. 三倍体毛白杨—黑麦草复合生态系统林木细根与草根的分解及养分动态[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2030-2034.
- [14] 陈永亮, 韩士杰, 周玉梅, 等. 胡桃楸、落叶松纯林及其混交林根际土壤有效磷特性的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 790-794.
- [15] 中华人民共和国国家标准局. 森林土壤分析方法(第二分册)森林土壤物理分析[M]. 1988.
- [16] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学[M]. 四川: 四川科学技术出版社, 2006: 60-62.
- [17] 阎葆瑞, 张锡根 著. 微生物成矿学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 14-15.
- [18] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-Verlag Inc., 2002: 187-189.
- [19] Burkhardt S, Zondervan I, Riebesell U. Effect of CO₂ concentration on C : N : P ratio marine phytoplankton; a species comparison[J]. Limno Oceanogra, 1999, 44(3): 683-690.
- [20] Carrilló P, Villar-Argaiz M, Medina-Sánchez J M. Relationship between N : P ratio and growth rate during the life cycle of calanoid copepods; an in situ measurement[J]. J. Plankton Res., 2001, 23(5): 537-547.
- [21] Ridame C, Moutin T, Guieu C. Does phosphate adsorption onto Sharan dust explain the unusual N/P ratio in the Mediterranean Sea? [J]. Oceanologica Acta, 2003, 26: 629-634.
- [22] Lenton T M, Klausmeier C A. Biotic stoichiometric controls on the deep ocean N : P ratio[J]. Biogeosciences Discuss, 2007(4): 417-454.

(下转第 116 页)

- in the Brazilian Amazon/1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests[J]. *Oecologia*, 1995, 104: 397-408.
- [21] Turekian V C, Macko S, Ballentine D, et al., Causes of bulk carbon and nitrogen isotopic fractionations in the products of vegetation burns: laboratory studies[J]. *Chemical Geology*, 1998, 152: 181-192.
- [22] Robinson D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(3): 153-162.
- [23] Chen X Y, Mulder J, Wang Y H, et al., Atmospheric deposition, mineralization and leaching of nitrogen in subtropical forested catchment, South China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26: 179-186.
- [24] Filoso S, Martinelli L A, Howarth R W, et al. Human activities changing the nitrogen cycle in Brazil[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 79: 61-89.
- [25] Bustamante M M C, Medina E, Asner G P, et al. Nitrogen cycling in tropical and temperate savannas[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 79: 209-237.
- [26] Arora V K, Boer G J. Fire as an interactive component of dynamic vegetation models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110 (G2), G02008, 10. 1029/2005JG000042.
- [27] Ria no D, Ruiz. Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using NOAA—NASA Pathfinder[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 40-50.
- [28] N asholm T, Ekblad A, Nordin A, et al., Boreal forest plants take up organic nitrogen[J]. *Nature*, 1998, 392: 914-916.
- [29] Lamers H, Chapin F S III, Pons T L. Plant physiological ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [30] 李玉中, 祝廷成, 李建东, 等. 火烧对草地土壤氮总矿化、硝化及无机氮消耗速率的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 223-226.
- [31] Alexis M A, Rasse D P, Rumpel C, et al., Fire impact on C and N losses and charcoal production in a scrub oak ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82: 201-216.
- [32] H ögberg P. ^{15}N natural abundance in soil-plant systems[J]. *New Phytol.*, 1997, 137: 179-203.
- [33] Ometto J P H B, Ehleringer J R, Domingues T F, et al. The stable carbon and nitrogen isotopic composition of vegetation in tropical forests of the Amazon Basin, Brazil[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 79: 251-274.
- [34] Logan J A. Nitrogen oxides in the troposphere: global and regional budgets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 10785-10807.
- [35] Werner R A, Schmidt H L. The *in vivo* nitrogen isotope discrimination among organic plant compounds[J]. *Phytochemistry*, 2002, 61: 465-484.
- ~~~~~
- (上接第110页)
- [23] 张学利, 杨树军, 张百习, 等. 不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比[J]. *福建林学院学报*, 2006, 19(1): 88-92.
- [24] Grossmann S, Dieckmann G S. Bacterial standing stock, activity and carbon production during formation and growth of sea ice in the Weddell Sea, Antarctica[J]. *Appl. Environ. Microbio.*, 1994, 60(8): 2746-2753.
- [25] Webster E A, Hopkins D W, Chudek J A, et al. The relationship between microbial carbon and the resource quality of soil carbon[J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30: 147-150.
- [26] Upadhyaya K, Pandey H N, Law P S, et al. Dynamics of fine and coarse roots and nitrogen mineralization in a humid subtropical forest ecosystem of northeast India[J]. *Bio. Fertil. Soils*, 2005, 41: 144-152.
- [27] Majdi H, Pregitzer K, Moren A S, et al. Measuring fine root turnover in forest ecosystems[J]. *Plant Soil*, 2005, 276: 1-8.
- [28] 郭李萍, 林而达. 农田温室气体排放通量与土壤碳汇研究[D]. 北京: 中国农业科学研究院, 2000.
- [29] Bauhus J, Bartsch N. Mechanisms of carbon and nutrient release and retention within beech forest gaps/ I. Microclimate, water balance and seepage water chemistry[J]. *Plant Soil*, 1995, 169: 579-584.
- [30] Bauhus J, Bartsch N. Fine root growth in beech (*Fagussyl vatica* L.) forest gaps[J]. *Can. J. For. Res.*, 1996, 26: 2153-2160.
- [31] Collet C, Lóf M, Pagès L. Root system development of Oak seedlings analysed using an architectural model. Effects of competition with grass[J]. *Plant Soil*, 2006, 279: 367-383.
- [32] 辛国荣, 李雪梅, 杨中艺. “黑麦草—水稻”草田轮作系统根际效应研究 IV: 黑麦草根际土壤性状及其对水稻幼苗生长的影响[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2004, 43(1): 62-66.
- [33] 徐卫红, 王宏信, 李文一, 等. 重金属富集植物黑麦草对 Zn 的响应[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 43-46.
- [34] Güsewell S, Verhoever J T A. Litter N : P ratios indicate whether N or P limits the decomposability of graminoid leaf litter[J]. *Plant Soil*, 2006, 287: 131-143.