

DOI: 10.5846/stxb201411162271

李常诚, 李倩茹, 徐兴良, 欧阳华. 不同林龄杉木氮素的获取策略. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Li C C, Li Q R, Xu X L, Ouyang H. Nitrogen acquisition strategies of *Cunninghamia lanceolata* at different ages. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

不同林龄杉木氮素的获取策略

李常诚^{1,2}, 李倩茹^{1,2}, 徐兴良^{1,*}, 欧阳华¹

¹ 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了探讨不同林龄杉木人工林氮素获取策略, 选择了江西千烟洲森林生态研究站红壤区的 3 种林龄杉木人工林(5 年生幼龄林、13 年生中龄林和 30 年生成熟林)作为研究对象, 利用稳定性同位素¹⁵N 示踪技术研究了它们的氮素吸收策略。结果表明, 杉木对硝态氮的吸收受林龄影响, 成熟林的吸收速率最高, 为 $(5.72 \pm 0.24) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1}$, 而中龄林和幼龄林的吸收速率相当, 分别为 $(1.57 \pm 0.13) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1}$ 和 $(2.36 \pm 0.22) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1}$ 。幼龄林 $((34.33 \pm 1.20) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$ 和成熟林 $((34.18 \pm 2.32) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$ 对铵态氮的吸收速率相似, 均显著高于中龄林 $((23.33 \pm 1.39) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$ 。杉木对甘氨酸的吸收不受林龄的影响。三种年龄的杉木均对铵态氮表现出强的获取能力, 其中成熟林杉木对硝态氮的获取能力明显弱于对铵态氮的获取, 但却强于对甘氨酸的获取。这样的结果反映了林龄能影响杉木人工林对无机氮的吸收, 但未影响对有机氮的吸收; 杉木偏好吸收铵态氮, 对硝态氮和甘氨酸的吸收很少。如果能把氮素形态考虑进对杉木人工林的施肥管理当中, 那么可能会极大地改善杉木的生产力。

关键词: 林龄; 杉木; 氮素获取; ¹⁵N 示踪技术; 无机氮; 有机氮

Nitrogen acquisition strategies of *Cunninghamia lanceolata* at different ages

LI Changcheng^{1,2}, LI Qianru^{1,2}, XU Xingliang^{1,*}, OUYANG Hua¹

¹ Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract: To clarify whether stand age can affect nitrogen (N) acquisition strategies by plants, inorganic and organic N uptake by Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at three growth stages (five-year old for young plantation forest; thirteen-year old for mid-aged plantation forest; thirty-year old for mature plantation forest) was measured in Qianyanzhou Ecological Experimental Station with a short-term ¹⁵N labeling experiment. We found that stand age altered nitrate uptake by Chinese fir, the mature trees demonstrated the highest uptake rate $((5.72 \pm 0.24) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$, while the trees at the middle age $((1.57 \pm 0.13) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$ showed the similar uptake rate to the youngest $(2.36 \pm 0.22 \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$. Uptake rates of ammonium for the mature trees $((34.33 \pm 1.20) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$ and the youngest $((34.18 \pm 2.32) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$ were similar and significantly higher than for the mid-aged trees $((23.33 \pm 1.39) \mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1})$. Uptake of glycine by the Chinese fir was not affected by their ages. We concluded that Chinese fir trees prefer to take up ammonium, and uptake rates of nitrate for the mature trees were significantly lower than ammonium but higher than glycine. These findings reflect that stand ages can affect their uptake of inorganic N not of organic N and Chinese fir preferentially take up ammonium, showing the lower uptake rates of nitrate and

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB416903); 国家自然科学基金重点项目(31130009)

收稿日期: 2014-11-16; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuxingl@hotmail.com

glycine. This suggests that wood production could be greatly improved if N forms are considered for fertilization of Chinese fir.

Key Words: stand ages; *Cunninghamia lanceolata*; nitrogen acquisition; ^{15}N labeling technology; inorganic nitrogen; organic nitrogen

土壤氮素是植物生长发育的必需元素,在植物生长发育和形态建成中起着重要作用^[1-3]。然而,氮素缺乏一直是大多数森林生态系统普遍面临的问题,成为限制陆地森林生态系统生产力的重要因素^[3-4]。很多研究已经证实,植物能够吸收利用的氮素主要有铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)以及分子质量小的一些有机态氮^[5-7]。

亚热带森林在中国南方分布广泛,占地面积为 $2.4 \times 10^6 \text{ km}^2$,受季风气候影响,夏季高温多雨,因而土壤可利用性氮素极易通过淋溶损失,加之因土壤高度风化而出现的酸性^[8],更不利于土壤氮素的固持。另外,近数十年来,亚热带森林受氮沉降影响越来越严重,长期而持续的高氮输入可提高土壤矿化速率,对土壤中铵态氮、硝态氮和有机氮含量影响显著^[9]。因此,研究亚热带森林植物氮素获取和保持有助于更深层次地探讨植物对氮沉降增加的响应,对于深入理解森林生态系统养分循环过程以及物种共存机制具有重要意义。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林被认为是人为控制下的偏途顶级群落,是中国亚热带地区特有的优良速生用材树种,种植面积占中国人工林面积的 26.55%。由于其生长快,产量高,用途广,对地区经济发展具有重要作用。然而,随着杉木人工林面积的不断扩大,林地生产力维持问题已经引起了很多学者的关注^[10]。氮素是限制杉木生长的关键因子之一,杉木如何获取氮素,是否受其林龄的影响,目前尚缺乏研究。针对此,我们提出了如下科学假设:林龄能影响杉木对氮素获取,幼年期杉木可能偏好硝态氮,而成熟林杉木则偏好铵态氮和有机态的氮。为验证上面的科学假设,本研究选取江西省千烟洲森林生态试验研究站上三个林龄的杉木林为研究对象,借助于稳定性同位素 ^{15}N 示踪技术标记,量化了它们对铵态氮、硝态氮和甘氨酸的获取能力,尝试揭示不同年龄杉木的氮素吸收模式,为杉木人工林经营和林地生产力的维持提供理论支撑。

1 研究区概况

研究样地设在了江西省泰和县灌溪镇中国科学院千烟洲森林生态试验站($115^\circ 03' 29''\text{E}$, $26^\circ 44' 29''\text{N}$),海拔 102 米左右,为典型的亚热带红壤丘陵地区。该地区年平均气温 17.9°C ,大于 10°C 积温达 5921°C ;年降雨量 1489 mm 左右,最多年份达 1700 mm,而最少年份不足 1000 mm,属于典型的亚热带季风气候;土壤为典型的红壤区,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物^[11]。该地区原始植被已破坏殆尽^[12],现主要为人工林或草、灌丛次生植被,植被属中亚热带常绿阔叶林带,乔木层有马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、木荷(*Schima superba*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、樟(*Cinnamomum camphora*)以及桔(*Citrus reticulata*)等经济林果植物等等;灌丛以白栎(*Quercus fabri*)、欆木(*Loropetalum chinense*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)分布较广^[13];草本植物主要为耐阴蕨类植物生长,以狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、阔鳞鳞毛蕨(*Dryopteris championi*)和扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等为主^[14]。

所选样地均为纯杉木人工林,所以植被类型较为单一,但林下植被复杂,尤其是成熟林和幼龄林,林下植被有狗脊(*Blechnum japonica*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、欆木(*Loropetalum chinense*)、悬钩子(*Rubus palmatus*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、木荷(*Schima superba*)等。

2 研究方法

本实验选取幼龄(5 年生)杉木人工林,中龄(13 年生)杉木人工林和成熟(30 年生)杉木人工林作为研究对象(表 1)。

表 1 样地基本特征

Table 1 General characteristic of the sampling plots

林分类型 Forest types	年龄 Age	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	林下植被覆盖度 Undergrowth vegetation coverage /%	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average diameter at breast height/cm
幼龄林杉木 Young fir plantation	5	97	20	52	3.42	3.47
中龄林杉木 Mid-aged fir plantation	13	110	20	17	8.92	13.34
成熟林杉木 Mature fir plantation	30	102	15	71	20.56	25.82

2.1 试验设计和处理

本研究采用同位素¹⁵N 示踪技术,选择了铵态氮、硝态氮和甘氨酸态氮三种氮素形态,配制三种¹⁵N 标记溶液和一种未标记溶液。标记物为硫酸铵-¹⁵N、硝酸钾-¹⁵N 和甘氨酸-¹⁵N,未标记物为分析纯的硫酸铵、硝酸钾和甘氨酸。每种溶液是均含有 3 种氮素的混合液,每种氮素含氮量均为 33 μmol N/L。对于标记液而言,每种溶液只有一种氮素被¹⁵N 标记,而其他两种未被¹⁵N 标记,共三种标记液。对于未标记液而言,溶液是由分析纯的三种未标记物配置的,每种氮素含氮量均为 33 μmol N/L,所以只有一种未标记液。将配置好的四种溶液分别倒入 15 ml 的离心管里,做好标签备用。为了防止氮素形态被微生物转化和保持根系细胞膜的稳定性,溶液中还添加了 10 mg/L 的盘尼西林和 100 μmol N/L 的 CaCl₂·2H₂O^[15]。

2013 年 8 月份,在所选择的处于三个发育阶段的杉木做如下相同的处理:在每个发育阶段的杉木人工林林分中,随机选择五株目标树,在每株目标树的四个方位沿着树干基部向外分别挖掘出一对细根(直径<2 mm),保持根系处于原位状态及其完整性,实验只用幼根。然后用水轻柔地将根系上的土壤冲洗掉,将盛有标记液的离心管压进毗邻根系的土壤内,然后将根系小心放入溶液中,每个方位的一对根系分别放入同一种处理溶液中,一棵树的四个方位分别对应一种处理。2 h 后,将根系剪下,先用 50 mmol/L KCl 冲洗,然后用蒸馏水洗涤。置于 70℃ 烘箱内 48 小时,烘干至恒重,然后称量,用球磨机研磨至粉末状后,用 MAT253 质谱仪测定氮含量和同位素¹⁵N/¹⁴N 比值。

2.2 数据分析

$N \text{ 吸收速率} (\mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1}) = APE_{\text{sample}} \times \text{根系干重(g)} \times \text{根系氮含量(%)}/\text{根系干重(g)}/APE_{\text{added}}/\text{标记时间(h)}$,其中 APE_{sample} 为标记植物的¹⁵N 原子百分超,等于标记处理组植物¹⁵N 的原子百分含量减去对照组植物¹⁵N 的原子百分含量, APE_{added} 为添加标记物的¹⁵N 原子百分超,等于标记物¹⁵N 的原子百分含量减去大气¹⁵N 的原子百分含量。 N 吸收速率表示每小时每克干重根吸收多少微克的 N 。氮源贡献率=所求氮源的吸收速率/三种氮源吸收速率之和×100%。

不同林龄杉木分别对不同形态氮吸收速率间的差异分析以及不同形态氮分别对不同林龄杉木贡献率间的差异分析均采用单因素方差分析,多重比较方法为 LSD,显著性水平选择 0.05;采用 SPSS20.0 和 Excel2010 进行统计分析,采用 Sigmaplot12.5 进行绘图。

3 结果

3.1 不同林龄杉木的氮吸收速率

幼龄林杉木与成熟林杉木对铵态氮的吸收相似,但均显著高于中龄林(表 2),成熟林杉木对硝态氮的吸收显著高于幼龄林与中龄林($F=86.87, P<0.05$),而林龄未显著改变杉木对甘氨酸的吸收速率($F=1.60, P>0.05$)。

表 2 不同林龄杉木氮素吸收速率以及不同形态氮对不同林龄杉木总氮吸收的贡献率

Table 2 Uptake rate of nitrogen by Chinese fir at three stand ages and their corresponding contribution to total nitrogen uptake

吸收参数 Uptake parameters	氮形态 Nitrogen form	幼龄林 Young fir plantation	中龄林 Mid-aged fir plantation	成熟林 Mature fir plantation
吸收速率 Uptake rate/($\mu\text{g N g}^{-1} \text{ d.w. root h}^{-1}$)	铵态氮	34.33 $\pm$ 1.20a	23.33 $\pm$ 1.39b	34.18 $\pm$ 2.32a
	硝态氮	2.36 $\pm$ 0.22b	1.57 $\pm$ 0.13b	5.72 $\pm$ 0.24a
	甘氨酸	2.32 $\pm$ 0.21	2.29 $\pm$ 0.14	1.87 $\pm$ 0.17
贡献率 Contribution/%	铵态氮	87.48 $\pm$ 2.11	87.86 $\pm$ 1.88	81.34 $\pm$ 4.50
	硝态氮	5.48 $\pm$ 0.32b	4.23 $\pm$ 0.23b	13.95 $\pm$ 0.26a
	甘氨酸	7.03 $\pm$ 0.40	7.90 $\pm$ 0.14	4.69 $\pm$ 0.28

同一行数值后面无相同字母者表示两者差异显著

成熟林杉木人工林对 3 种氮源的吸收存在显著差异,趋势为铵态氮>硝态氮>甘氨酸;幼龄林和中龄林杉木对硝态氮和甘氨酸吸收速率相当,都明显低于对铵态氮的吸收(表 2)。

3.2 不同形态氮分别对不同林龄杉木总氮吸收的贡献率

铵态氮对三种林龄杉木总氮吸收的贡献相当,均超过 80%(表 2),硝态氮对幼龄林和中龄林的贡献相当,均明显低于对成熟林的贡献,而甘氨酸对三种林龄杉木总氮吸收的贡献与硝态氮相似,均低于 8%(表 2)。

铵态氮、硝态氮和甘氨酸对三种林龄杉木总氮吸收的贡献率存在显著差异,具体地说,氮源对幼龄林和中龄林总氮吸收的贡献趋势为铵态氮>硝态氮=甘氨酸,对成熟林总氮吸收的贡献趋势为铵态氮>硝态氮>甘氨酸(表 2)。

4 讨论与结论

植物获取可利用性氮素是一个复杂过程,即使在同一生态系统,气候条件相同,不同植被对氮素获取也不相同^[16-18]。本研究是在同一生态系统,气候条件相同,借助于¹⁵N 同位素标记技术,在原位条件下比较研究了幼龄林杉木人工林、中龄林杉木人工林和成熟林杉木人工林对有机氮和无机氮的吸收模式。研究发现,林龄没有影响杉木对甘氨酸的吸收;而林龄却影响了杉木人工林对无机氮的获取,尤其是对硝态氮的吸收。这表明同种植物因年龄不同对氮素获取策略也不相同,这与 Trinder 等^[19-20]和 Simon 等^[21]的结果具有一致性。这些结果部分证实了我们的科学假设,林龄能影响杉木对氮素的获取,但杉木对氮素的偏好未随林龄而改变。

无论哪个林龄阶段的杉木均对铵态氮表现出偏好(图 1),而对硝态氮和甘氨酸的吸收相对很少。先前研究发现铵态氮是该土壤类型中的优势氮素^[22],但章宪等^[23]的研究结果发现不同林龄的杉木人工林土壤中硝态氮的含量远高于铵态氮的含量。其原因可能是由于杉木偏好铵态氮从而导致了土壤中铵态氮含量远低于硝态氮含量,我们的结果很好地解释了杉木林土壤中硝态氮含量为何远高于铵态氮含量这一现象。此外,很多研究结果表明随着杉木林的生长,土壤 pH 会降低。因为植物对铵态氮的吸收常常会导致根际区域 pH 明显下降^[24],那么杉木对铵态氮的偏好吸收可能有助于土壤酸化,但其贡献多大还需要进一步的研究予以量化。

虽然林龄没有影响杉木对甘氨酸的吸收速率,但甘氨酸对杉木的贡献率却受到林龄的影响(图 1 和 2)。这主要是因为中龄林杉木对无机氮的吸收速率较低,而随着杉木从中龄林到成熟林的不断发育,可能加剧了对无机氮的需求,而对有机氮的需求变化不大,从而降低了甘氨酸的贡献率。同时,我们还发现,杉木对甘氨酸的吸收力与对硝态氮的吸收力相当,虽然不强,但甘氨酸对杉木的贡献率也有 8%左右,这表明有机氮也是杉木不可忽视的氮源,这很有可能与杉木有丛枝状菌根密切相关^[25],因为很多研究已经证实了丛枝状菌根能够促进植物对有机氮的获取^[26-29]。此外,硝态氮在土壤溶液中是非常易移动的^[30-31],特别是在高降雨量的亚热带地区,由于杉木对其获取能力较低,这部分硝态氮非常容易流失,对周围的水源造成污染。

以上研究结果表明,在杉木人工林施肥管理中要注意增加有机氮肥料的使用,适量施用无机氮肥料,可有效保持杉木的生产力,降低水环境的污染风险,以及减慢土壤酸化的进程。

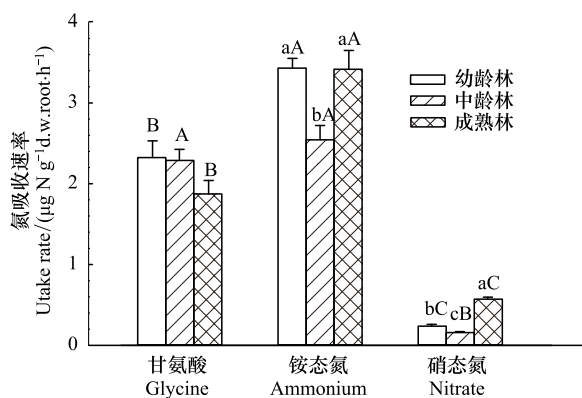


图1 不同林龄杉木氮素吸收速率

Fig. 1 Uptake rates of glycine, ammonium and nitrate by Chinese fir at different ages

不同林龄相同氮源上面无相同小写字母表示林龄间差异显著 ($P < 0.05$); 同一林龄不同氮源上面无相同大写字母表示氮源间的差异显著 ($P < 0.05$)

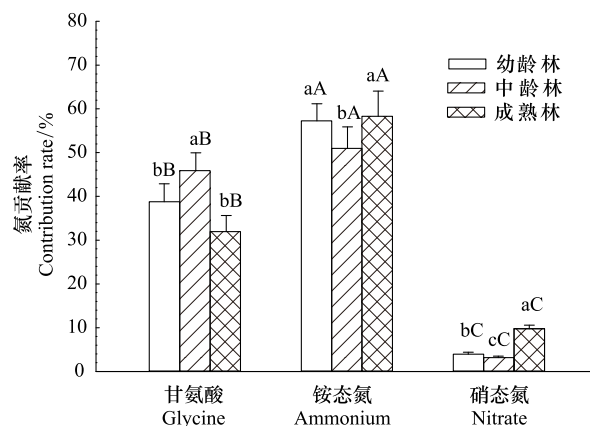


图2 三种氮源对不同林龄杉木总氮吸收的贡献率

Fig. 2 Contribution of glycine, ammonium and nitrate to the total nitrogen uptake by Chinese fir

影响植物氮素获取的因素非常多^[5,32-34],本研究证实了在生长季中植物不同年龄阶段是影响植物氮素获取策略的因素之一,但为了更深入理解林龄对杉木氮素获取策略的影响还需要从时间和空间尺度上进行研究。

参考文献 (References):

- [1] Chapin F S III, Vitousek P M, Van Cleve K. The nature of nutrient limitation in plant communities. *The American Naturalist*, 1986, 127(1): 48-58.
- [2] Mooney H A, Vitousek P M, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, 1987, 238(4829): 926-932.
- [3] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur?. *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115.
- [4] Tilman D. The resource-ratio hypothesis of plant succession. *The American Naturalist*, 1985, 125(6): 827-852.
- [5] Näsholm T, Kielland K, Ganeteg U. Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist*, 2009, 182(1): 31-48.
- [6] 徐兴良, 白洁冰, 欧阳华. 植物吸收土壤有机氮的研究进展. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 715-724.
- [7] Gårdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, Clarholm M, Hallin S, Ineson P, Kätterer T, Knicker H, Nilsson S I, Näsholm T, Ogle S, Paustian K, Persson T, Stendahl J. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-From molecular to global scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 702-717.
- [8] Qafoku N P, Ranst E V, Noble A, Baert G. Variable charge soils: Their mineralogy, chemistry and management. *Advances in Agronomy*, 2004, 84: 159-215.
- [9] 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 廖迎春, 袁颖红, 徐雷. 亚热带杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(11): 4630-4642.
- [10] 陈永瑞, 林耀明, 李家永, 刘允芬, 杨汝荣. 江西千烟洲试区杉木人工林降雨过程及养分动态研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 79-81.
- [11] 中国科学院南方山区综合科学考察队. 红壤丘陵开发和治理—千烟洲综合开发治理试验研究. 北京: 科学出版社, 1989: 1-23.
- [12] 程彤, 李家永. 红壤丘陵生态系统恢复与农业持续发展研究—纪念千烟洲试验站建站十周年. *资源科学*, 1998, 20(增刊): 1-9.
- [13] 马泽清, 刘琪璟, 徐雯佳, 李轩然, 刘迎春. 江西千烟洲人工针叶林下狗脊蕨群落生物. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 88-94.
- [14] 刘琪璟, 胡理乐, 李轩然. 小流域治理 20 年后的千烟洲植物多样性. *植物生态学报*, 2005, 29(5): 766-774.
- [15] Warren C R, Adams P R. Uptake of nitrate, ammonium and glycine by plants of Tasmanian wet eucalypt forests. *Tree Physiology*, 2007, 27(3): 413-419.
- [16] BassiriRad H, Caldwell M M. Temporal changes in root growth and ¹⁵N uptake and water relations of two tussock grass species recovering from water

- stress. *Physiologia Plantarum*, 1992, 86(4): 525-531.
- [17] Fotelli N M, Rennenberg H, Gessler A. Effects of drought on the competitive interference of an early successional species (*Rubus fruticosus*) on *Fagus sylvatica* L. seedlings: ¹⁵N uptake and partitioning, responses of amino acids and other N compounds. *Plant Biology*, 2002, 4(3): 311-320.
- [18] Malhi S S, Soon Y K, Brandt S. Effect of growing season rainfall and tillage on the uptake and recovery of ¹⁵N-labelled urea fertilizer by spring wheat in a semi-arid environment. *Canadian Journal of Soil Science*, 2009, 89(4): 403-411.
- [19] Trinder C J, Brooker R W, Davidson H, Robinson D. Dynamic trajectories of growth and nitrogen capture by competing plants. *New Phytologist*, 2012, 193(4): 948-958.
- [20] Trinder C J, Brooker R W, Robinson D. Plant ecology's guilty little secret: understanding the dynamics of plant competition. *Functional Ecology*, 2013, 27(4): 918-929.
- [21] Simon J, Dannenmann M, Gasche R, Holst J, Mayer H, Papen H, Rennenberg H. Competition for nitrogen between adult European beech and its offspring is reduced by avoidance strategy. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 105-114.
- [22] Kou L, Guo DL, Yang H, Gao WL, Li SG. Growth, morphological traits and mycorrhizal colonization of fine roots respond differently to nitrogen addition in a slash pine plantation in subtropical China. *Plant and Soil*, 2015, 391: 207-218.
- [23] 章宪, 范跃新, 罗茜, 谢锦升, 孙杰. 凋落物和根系处理对杉木人工林土壤氮素的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2014, (2): 39-44.
- [24] Nye P H. Changes of pH across the rhizosphere induced by roots. *Plant and Soil*, 1981, 61(1/2): 7-26.
- [25] Li L, Zhou G Y, Liu J A, Li H. The resource investigation and community structure characteristics of mycorrhizal fungi associated with Chinese fir. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(30): 5719-5724.
- [26] Hawkins H J, Johansen A, George E. Uptake and transport of organic and inorganic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 2000, 226(2): 275-285.
- [27] Hodge A, Campbell C D, Fitter A H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature*, 2001, 413(6853): 297-299.
- [28] Atul-Nayyar A, Hamel C, Hanson K, Germida J. The arbuscular mycorrhizal symbiosis links N mineralization to plant demand. *Mycorrhiza*, 2009, 19(4): 239-246.
- [29] Hodge A, Fitter A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 2010, 107(31): 13754-13759.
- [30] Nye P H, Tinker P B. Solute movement in the soil-root systems. Berkeley: University of California Press, 1977.
- [31] Owen A G, Jones D L. Competition for amino acids between wheat roots and rhizosphere microorganisms and the role of amino acids in plants N composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4/5): 651-657.
- [32] Wade L J, George T, Ladha J K, Singh U, Bhuiyan S I, Pandey S. Opportunities to manipulate nutrient-by-water interactions in rainfed lowland rice systems. *Field Crops Research*, 1998, 56(1/2): 93-112.
- [33] Stoelken G, Simon J, Ehling B, Rennenberg H. The presence of amino acids affects inorganic N uptake in non-mycorrhizal seedlings of European beech (*Fagus sylvatica*). *Tree Physiology*, 2010, 30(9): 1118-1128.
- [34] Simon J, Dong F, Buegger F, Rennenberg H. Rhizospheric NO affects N uptake and metabolism in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings depending on soil N availability and N source. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(5): 1019-1026.