

竹林氮素循环与管理研究综述

叶莉莎, 陈双林, 郭子武

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要: 竹林是森林资源之一, 不仅具有重要的经济价值, 还具有保持土壤、涵养水源、固碳释氧等重要的生态服务功能。竹林培育越来越受到重视。施肥是竹林丰产培育的重要经营措施, 其中, 氮素是竹子生长发育的主要养分限制元素, 竹林氮素输入尤为重要。为了给竹林氮素输入的技术研究及其应用提供参考, 综述了竹子氮素营养诊断、竹林氮素平衡、竹子氮素吸收与利用、竹林氮素输入的环境行为及影响等方面的研究现状, 提出了竹林氮素循环机制、氮素形态对竹子生长发育的影响、基于竹笋质量安全的竹林土壤硝化抑制、基于环境安全的氮素补充以及竹林氮素控释专用肥研制与应用等重点研究方向。参 52

关键词: 森林生态学; 竹林; 氮素循环; 综述; 氮素管理; 环境意义

中图分类号: S718.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2015)04-0635-08

Research on nitrogen circulation and management of bamboo: a review

YE Lisha, CHEN Shuanglin, GUO Ziwu

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: As one of forest resources, bamboo forest not only has important economic values but also provides important ecosystem services including soil conservation, water conservation, carbon fixation and oxygen release. Bamboo cultivation has been a focus of research in recent years. Fertilizing is an important measure to improve bamboo cultivation. As one of the major factors affecting the growth of bamboo, nitrogen has great influences on the growth and development of bamboo. In order to provide scientific theoretical basis for bamboo nitrogen input, this paper summarized nutrient diagnosis of bamboo, nitrogen balance of bamboo, nitrogen absorption and utilization of bamboo, environmental impacts on bamboo nitrogen, and put forward the following focus areas for further research on bamboo nitrogen: nitrogen cycling of bamboo, the influence of nitrogen forms on bamboo growth, bamboo soil nitrification inhibitors based on the quality assurance of the bamboo shoots, environmental safety based nitrogen input, and development and application of exclusive controlled-release fertilizer of bamboo nitrogen. [Ch, 52 ref.]

Key words: forest ecology; bamboo forest; nitrogen cycle; review; nitrogen management; environmental significance

氮素是影响植物生长最重要的必需营养元素之一, 是合成植物体内蛋白质、核酸、磷脂和生长激素等物质的重要元素, 从光合作用、抗氧化系统以及内源激素等方面影响植物的生长发育, 也是农业生产中对作物生长限制最大的元素之一^[1]。作物的丰产需要重视氮素输入, 氮素对作物最终产量的贡献为40%~50%^[2], 但过量氮肥的施用也会引起土壤酸化^[3]、氮饱和^[4]、水质富营养化^[5-6]、氮氧化气体的排放^[7]、作物中硝酸盐含量超标^[8]等环境与食品安全问题。竹子是森林资源的重要组成部分, 又是区别于

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2014-11-05

基金项目: 浙江省中国林业科学研究院省院合作项目(2013SY04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(RISF61258)

作者简介: 叶莉莎, 从事竹林生态与培育研究。E-mail: 13064798356@163.com。通信作者: 陈双林, 研究员, 博士, 从事竹林生态与培育研究。E-mail: csfbamboo@126.com

一般林木的特殊群体。竹子生长快,从竹笋出土到个体长成只需要十几天到一二月时间,在短时间内集中形成大量的新个体,消耗大量的养分^[9]。竹林经营中以竹材、竹笋为主要经营目标,每年收获大量的竹材、竹笋生物量,势必会直接带走大量养分,造成竹林土壤养分的损失。因此,要获得竹林持续的丰产需要通过施肥来补充养分,其中,氮素补充尤为重要。目前,在竹林氮素补充方面已经开展了较多的研究,取得了一批研究成果,并在实际生产中得到了大规模的推广应用。为了给竹林科学的氮素补充及相关研究提供参考,作者综述了竹子氮素营养诊断、竹林氮素平衡、竹子氮素吸收与利用、竹林氮素补充的环境行为及影响等方面的研究现状,并对相关研究方向进行了展望。

1 竹子氮素营养诊断

植物营养诊断是一种建立在植物营养化学基础上的定性定量手段,通过分析植物的形态或器官中养分含量的变化,反映植物从土壤吸收营养物质的状况。对竹子进行营养诊断可更好地在林业生产中指导竹林科学施肥^[10]。从20世纪80年代开始中国就陆续开展了多种方法的竹林营养诊断相关研究。洪顺山等^[11]和涂淑萍等^[12]应用临界浓度值法分别确定了毛竹 *Phyllostachys edulis*, 黄竹 *Bambusa rigida* 叶片氮临界浓度和最适浓度,都提出当竹叶氮浓度低于临界浓度时进行施肥,可明显提高竹林新竹量。综合营养诊断施肥法(DRIS)确定了氮磷钾配比为2:1:2时毛竹林养分趋于平衡^[13]。矢量诊断法通过向量分析图揭示竹林生长效应、氮素与其他养分浓度的内在联系,可以诊断和预测竹林的氮素及其他养分的丰缺^[14]。叶绿素仪快速诊断法可以通过建立竹林产量对应的叶片叶绿素相对含量(SPAD)值与叶片氮浓度的相关关系,进而来判断竹林氮素的丰缺状况^[13]。对比以上4种营养诊断方法,临界浓度值法受立竹年龄和立地条件的影响较大,难以全面诊断出竹林养分的临界值以及需肥顺序。DRIS法能诊断出竹林的需肥顺序,并可以结合施肥量与产量的效应关系确定施肥量,但当养分相对偏高或偏低时容易出现误诊。矢量法有效地克服了临界浓度值法、DRIS法在生产应用中存在的上述技术问题,而叶绿素仪快速诊断法具有快速、无损、方便、准确等优点,在生产中可以推广应用。

2 竹林氮素平衡

2.1 氮素输入

和森林生态系统一样,竹林氮素循环经历输入、吸收、存留或归还和输出等4个过程。竹林氮素输入形式主要是人工施肥、大气氮沉降、覆盖物分解和生物固氮等。人工经营竹林为避免养分缺失,保障竹子正常的生长发育和丰产,需要对竹林输入养分。施肥是竹林氮素输入的主要途径。毛竹笋用林和材用林^[15],雷竹 *Ph. violascens*^[16-17],麻竹 *Dendrocladus latiflorus*^[18],绿竹 *Bambusa oldhami*^[19]高效培育竹林氮输入量分别约为300.00, 171.00, 1 267.00, 656.00和379.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。大气干湿沉降也是竹林氮输入的重要形式,植物吸收干湿沉降中的氮占植物吸收总氮的10%~30%^[20]。若按总的干沉降量是湿沉降量的3倍计算^[21],通过大气沉降输入雷竹林的平均氮量约为91.96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[16]。雷竹,白哺鸡竹 *Ph. dulcis*,红哺鸡竹 *Ph. iridescens*等中小径散生笋用竹林地覆盖竹笋早出栽培中,有机覆盖物经土壤动物或微生物分解后也会产生一定的氮输入量,雷竹林通过覆盖物腐烂的氮输入量约为295.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[16]。禾本科 Poaceae 植物与固氮螺菌 *Azospirillum* 能联合共生,存在根际联合固氮现象^[22]。有研究^[23]发现,在毛竹和浙江淡竹 *Ph. meyeri*等竹类植物根际也存在联合固氮体系,说明生物固氮也是竹林氮输入的一种形式。

2.2 氮素归还

凋落物是植物养分归还的重要形式,森林通过分解凋落物归还土壤的氮量占其生长所需总氮量的70%~80%^[24]。凋落物是竹林养分归还的主要部分,对竹林物质循环和能量流动具有重要意义。竹林凋落物全年都在发生,凋落量与竹子自身的生物学特性和季节密切相关,其凋落组分中竹叶比例最大^[25]。竹叶分解初期氮素浓度一般随着时间的推移逐渐积累,后阶段为释放归还^[26-27]。叶凋落量和氮素归还量竹种间存在差异,毛竹林平均叶凋落量约为7 440.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[16],叶片平均含氮14.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[28],叶凋落物输入土壤的氮量为106.61 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;雷竹林平均叶凋落量约为1 860.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,叶片平均含氮5.66 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[29],归还土壤氮素为10.53 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.3 氮素输出

竹林氮素输出的主要途径包括生物量产出的输出和土壤输出。不同经营类型毛竹林氮素质量分数均为竹叶>竹枝>竹秆, 地上部分平均氮储量为 $207.75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[30]; 毛竹材用丰产林度(2年生)产竹材 $12\ 000.00\sim 25\ 000.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[15], 竹材平均含氮 $5.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30], 度竹材产出的氮输出量为 $62.28\sim 129.75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。雷竹器官氮含量为竹叶>竹枝>竹秆, 地上部分平均氮储量为 $115.29 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[31]。雷竹林竹材产量为 $8\ 000.00\sim 12\ 000.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[32], 竹材平均含氮 $2.81 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16], 竹材产出的氮输出量为 $22.48\sim 33.72 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。雷竹丰产林产竹笋为 $37\ 500.00\sim 45\ 000.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[16], 竹笋平均含氮量 $4.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[33], 竹笋产出的氮输出量为 $161.25\sim 193.50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。可见, 竹林生物量产出从林地中输出了大量的氮素。

竹林氮素土壤输出主要包括雨水淋失、径流流失、挥发和反硝化等。竹林土壤中未被利用的氮素一部分会进入地表径流和地下径流, 影响水质。竹林氮素淋溶流失与氮形态及土壤条件有很大关系, 土壤氮素流失的主要形态为颗粒态氮和水溶性氮, 前者在全氮流失量中占 51%, 后者占 49%^[34]。一般情况下竹林氮素径流淋失程度为 硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)>铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)>水溶性有机氮和颗粒态氮, 不同施肥措施对雷竹林径流水中全氮浓度有明显影响^[35], 缓释肥、专用复合肥和微生物肥处理的氮渗漏流失分别比常规施肥减少了 17.56%, 31.76%和 41.22%^[36]。不同类型毛竹林养分淋溶特征也有差异, 毛竹纯林土壤 20 cm 处硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)浓度高于 40 cm 处, 说明毛竹纯林硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)的淋溶率随深度增加而减少, 而毛竹-木荷混交林与之相反, 表明毛竹纯林氨化作用特点与混交林不同, 上层土壤氨化作用强于下层土壤, 可能与不同林分根际微生物区系分布和有机质差异有关^[37]。竹林土壤中氮素会通过挥发和反硝化作用等向大气释放温室气体(N_2 , N_2O)^[16], 这也是竹林土壤氮素输出的重要形式, 但目前相关研究较为薄弱。黄芳等^[16]用差减法估算集约经营雷竹林通过径流、淋溶、挥发、反硝化等的氮素输出损失为氮素输入量的 27.3%。可见, 竹林系统中科学输入氮素, 不仅能提高氮素的利用效率, 还能减少对环境的负面影响。

2.4 氮素平衡

根据物质流分析中“输入=输出+盈亏”的物质守恒原理及养分盈余量(即养分残留量)与输出量之比, 相关研究分析了竹林生态系统中氮素的平衡状况。孟赐福等^[38]发现不同施肥处理的集约经营雷竹林土壤氮素平衡均有盈余, 盈余量为 $422.00\sim 1\ 187.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中高量化肥处理的盈余量最多, 低量化肥配施猪栏肥处理的盈余量最少, 化肥配施有机肥处理的氮素盈余量/氮素输出量比值为 1.10~1.21, 单施化肥处理的为 1.80~2.70, 说明化肥与有机肥配施可以提高氮素利用率。黄芳等^[16]估算的 15 年生集约经营雷竹林表层土壤(0~20 cm) 氮素盈余量达 $9\ 144.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 氮素盈余量/输出量比值为 3.73, 表明试验雷竹林土壤氮素投入远大于需求, 需优化施肥方案, 减少氮素投入, 避免土壤氮素过量积累, 降低对环境的危害。郭子武等^[39]发现随雷竹林地覆盖年限的延长, 土壤氮含量总体呈增加趋势, 且在 0~20 cm 明显积累, 说明林地覆盖经营对雷竹林土壤的扰动主要集中在表层土壤。毛竹林土壤氮含量和储量随施肥时间延长而降低, 施肥 5 a 和 13 a 的氮含量比对照未施肥降低了 20.24%和 27.44%, 氮储量分别比未施肥降低了 59.40%和 37.79%, 这与施肥降低了土壤容重有关^[40]。

3 竹子氮素吸收与利用的影响因素

土壤氮含量与竹子氮素吸收和利用密切相关。毛竹^[11,41]、雷竹^[42]叶片氮与土壤全氮、碱解氮呈显著正相关, 而且土壤碱解氮与竹笋氨基酸总量和各种游离氨基酸含量均存在不同程度的相关性^[43]。毛竹林增施氮肥后新竹数量和产量明显提高^[44], 氮素利用率提高 27%^[45]。雷竹林施用氮肥后氮素农学利用效率提高 40%~53%^[46]。说明土壤氮在没有达到奢侈以前, 土壤有效氮含量与竹子生长发育关系极为密切, 也说明适当地施用氮肥能提高竹林产量和氮素利用率; 竹子氮素吸收与利用存在种间差异。竹子不同器官氮质量分数均为竹叶>竹枝>竹秆, 竹叶、竹枝、竹秆氮质量分数雷竹分别为 5.66, 2.80, $1.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[31], 毛竹分别为 19.85, 5.14, $3.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30], 苦竹 *Pleioblastus amarus* 分别为 22.98, 5.60, $2.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[47], 说明不同种对氮素的需求不同, 在生产中的氮素输入量应有差异; 竹子叶片在衰老凋落前可以把氮素转移到枝或新叶等器官中, 从而改变植株养分供应状况和限制格局, 也即叶片氮素的储存、保持和转移会影响竹子氮素的重吸收与再利用。有研究表明^[48]: 四季竹 1~3 年生立竹叶片氮重吸收率为 44.21%~

55.56%，且随立竹年龄的增大呈增高趋势，说明叶片养分重吸收可明显提高氮的利用效率；竹林立地条件和土壤温度、湿度、微生物等环境因子对竹子氮素吸收与利用也有重要影响。立地条件直接影响竹林土壤有效氮含量，进而会影响竹子对氮素的吸收与利用。微生物对竹林土壤氮矿化与硝化过程有着重要的调控作用，而土壤温度、湿度等气候因子与微生物种群数量和活性密切相关，强烈影响着氮素的释放，也直接影响竹子对氮素的吸收与利用^[49]。

4 竹林氮素输入的环境行为及影响

化学氮肥施用虽然显著提高了竹林经营效益，但不合理使用也带来严重的环境问题。不合理的竹林氮素输入会造成水系富营养化。作物对氮肥的利用率仅为40%~50%，未被利用的氮肥大部分经硝化作用转化成硝态氮(NO_3^- -N)，易随降水或灌溉淋失。目前，集约经营雷竹林化学氮肥使用量已达国际限量标准的3倍以上，超量氮肥的使用，使氮素大量流失，导致周围水体中氮浓度明显升高，一些雷竹产区的地表水总氮、铵态氮(NH_4^+ -N)已超过GB 3838-2002的V类水标准^[50]，说明不合理的施肥造成了竹区水体氮的严重污染，对区域群众生活产生负面影响；不合理的竹林氮素输入会增加温室气体排放。陆地硝化和反硝化过程中产生的一氧化二氮(N_2O)有90%进入大气层，不仅是大气臭氧层的消耗者，也是温室效应最主要的气体之一^[51]。竹林施肥措施会显著影响土壤的理化性质，对土壤的硝化-反硝化过程产生重要影响。有研究表明：随着氮肥施入量的增加，毛竹林土壤一氧化二氮(N_2O)的排放量和排放速率呈增大趋势^[52]；不合理的竹林氮素输入会引起土壤劣变。化学氮肥过量施用会引起竹林土壤发生物理、化学和生物性劣变，表现在竹林土壤机械结构变差、持水能力下降、土壤板结、酸化^[3]，出现“氮饱和”效应^[4]，影响其他养分的吸收与利用，引起土壤养分严重失衡，从而导致竹林地力衰退。过量氮肥施用也会引起竹林土壤酶活性、微生物量氮等的变化，造成土壤微生物区系的混乱^[3,49]。从而导致竹林竹鞭上浮、林分结构不合理、立竹平均胸径和叶面积指数下降等^[7]，不利于竹林可持续经营；不合理的竹林氮素输入也会影响竹笋品质。相关研究表明：大量氮肥的施入会增加竹笋硝酸盐污染，采用重施肥措施的雷竹林竹笋硝酸盐平均质量分数达745.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，超过世界卫生组织和联合国粮农组织(WHO/FAO)卫生标准^[8]。

5 展望

5.1 竹林氮素循环机制

目前，有关竹林氮素循环的研究大多针对氮素不同形态的时空分布、氮素输入对竹林土壤和周边水系环境的影响等方面，而对竹林土壤硝化与反硝化作用、温室气体排放以及竹林氮素循环内在驱动机制等方面涉及较少，需强化该方面的研究。

5.2 氮素形态对竹子生长发育的影响

能够被植物直接吸收利用的氮素主要为铵态氮(NH_4^+ -N)和硝态氮(NO_3^- -N)，氮素形态不同，对植物生理过程的影响也不尽相同，从而对植物的生长发育、品质以及产量形成产生不同的效应。必须开展不同氮素形态及配比施肥对竹子生长发育和丰产的影响，以提高氮素利用率和增产作用。

5.3 基于竹笋质量安全的竹林土壤硝化抑制

土壤氨氧化微生物通过硝化作用能将铵态氮转化成硝态氮，一方面增加了氮的淋失量和一氧化二氮(N_2O)排放，另一方面可能会使竹笋中硝酸盐含量提高，影响竹笋质量安全。在开展竹林土壤氮素形态转化机制研究的基础上，应着重开展对环境和竹笋质量安全的硝化抑制剂筛选与应用的竹林土壤硝化抑制技术研究。

5.4 基于环境安全的竹林氮素补充

虽然目前已形成了较为系统的包括氮素的竹林施肥技术，但施肥引起的土壤劣变和环境恶化问题日趋严重，为达到竹林丰产与环境保护的目的，需进一步开展提高肥料利用率，显著减少施肥的环境负面影响的竹林施肥技术，包括竹林测土配方平衡施肥技术体系建立和竹林氮素控释专用肥研制与应用等。

6 参考文献

- [1] JONES D L, HEALEY J R, WILLETT V B, *et al.* Dissolved organic nitrogen uptake by plants: an important N uptake pathway? [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**(3): 413 – 423.
- [2] 陆景陵, 胡霭堂. 植物营养学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 陈双林, 萧江华. 现代竹业栽培的土壤生态管理[J]. 林业科学研究, 2005, **18**(3): 351 – 355.
CHEN Shuanglin, XIAO Jianghua. Soil ecological management of cultivated bamboo stand [J]. *For Res*, 2005, **18**(3): 351 – 355.
- [4] 陈双林, 杨伟真. 我国毛竹人工林地力衰退成因分析[J]. 林业科技开发, 2001, **16**(5): 3 – 6.
CHEN Shuanglin, YANG Weizhen. Researches on soil degradation of artificial *Phyllostachys pubescens* in our country [J]. *China For Sci Technol*, 2002, **16**(5): 3 – 6.
- [5] 徐涌, 叶正钱, 姜培坤, 等. 太湖源林区水系源头水质时空变异与原因探析[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(5): 607 – 612.
XU Yong, YE Zhengqian, JIANG Peikun, *et al.* Spatio-temporal variations and cause analysis of headwater quality in forest area of Taihuyuan [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(5): 607 – 612.
- [6] 吴家森, 姜培坤, 盛卫星, 等. 雷竹集约栽培对周边河流水质的影响[J]. 林业科学, 2009, **45**(8): 76 – 81.
WU Jiasen, JIANG Peikun, SHENG Weixing, *et al.* Effect of bamboo (*Phyllostachys praecox* f. *prevernalis*) intensive cultivation on water quality in water systems [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(8): 76 – 81.
- [7] 刘丽, 陈双林. 有机材料林地覆盖对雷竹林生态系统的负面影响研究综述[J]. 广西植物, 2009, **29**(3): 327 – 330.
LIU Li, CHEN Shuanglin. Research summary of the negative influences of the mulched ecosystem of *Phyllostachys praecox* f. *prevernalis* forests with organic materials [J]. *Guihaia*, 2009, **29**(3): 327 – 330.
- [8] 姜培坤, 徐秋芳. 雷竹笋硝酸盐含量及其与施肥关系的研究[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21**(1): 10 – 14.
JIANG Peikun, XU Qiufang. Changes in nitrate content of bamboo shoots responsive to nitrogen fertilizer rate [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21**(1): 10 – 14.
- [9] 邱尔发, 郑郁善, 洪伟. 竹林施肥研究现状及探讨[J]. 江西农业大学学报, 2001, **23**(4): 551 – 555.
QIU Erfa, ZHENG Yushan, HONG Wei. The status quo and approach to fertilization of bamboo plantation [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2001, **23**(4): 551 – 555.
- [10] 石伟勇. 植物营养与诊断[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [11] 洪顺山, 胡炳堂, 江叶根. 毛竹营养诊断的研究[J]. 林业科学研究, 1989, **2**(1): 15 – 24.
HONG Shunshan, HU Bingtang, JIANG Yegen. A study on nutrient diagnoses of *Phyllostachys pubescens* [J]. *For Res*, 1989, **2**(1): 15 – 24.
- [12] 涂淑萍, 叶长娣, 王蕾, 等. 黄竹叶片营养与土壤肥力及产量的相关研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, **33**(5): 918 – 923.
TU Shuping, YE Zhangdi, WANG Lei, *et al.* A study on correlation between leaf nutrition and soil fertility and output of *Bambusa rigida* [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2011, **33**(5): 918 – 923.
- [13] 郭晓敏, 牛德奎, 陈防, 等. 毛竹林平衡施肥与营养管理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 幸潇潇. 黄竹林平衡施肥土壤养分空间变异及叶片养分诊断法研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
XING Xiaoxiao. Study on the Effects of Balanced Soil Nutrients Spatial Variation and the Diagnose Methods of Leaves Nutrient Elements in *Bambusa rigida* [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2011.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20391-2006 毛竹林丰产技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 黄芳, 蔡荣荣, 孙达, 等. 集约经营雷竹林土壤氮素状况及氮平衡的估算[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(6): 1193 – 1196.
HUANG Fang, CAI Rongrong, SUN Da, *et al.* Soil nitrogen status and estimated nitrogen balance budget in an intensive managed *Phyllostachys praecox* stand [J]. *Plant Nutrit Fert Sci*, 2007, **13**(6): 1193 – 1196.
- [17] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响[J]. 林业科学, 2002, **38**(6): 6 – 11.
JIANG Peikun, ZHOU Guomo, XU Qiufang. Effect of intensive cultivation on the carbon pool of soil in *Phyllostachys*

- praecox* stands [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(6): 6 – 11.
- [18] 邱尔发, 陈卓梅, 郑郁善, 等. 麻竹山地笋用林施用有机肥和生长调节剂的产量效应[J]. 林业科学研究, 2007, **20**(1): 84 – 91.
QIU Erfa, CHEN Zhuomei, ZHENG Yushan, *et al.* Effect of organic fertilizer and growth regulators on shoots yield of *Dendrocalamus latiflorus* Munro plantations planted on hills [J]. *For Res*, 2007, **20**(1): 84 – 91.
- [19] 张文燕, 缪妙青, 林忠平, 等. 绿竹造林及丰产培育技术研究[J]. 林业科学研究, 1999, **12**(2): 146 – 151.
ZHANG Wenyan, MIAO Miaoqing, LIN Zhongping, *et al.* Study on the afforestation and cultivating technologies of high-yielding *Dendrocalamopsis oldhami* plantation [J]. *For Res*, 1999, **12**(2): 146 – 151.
- [20] KRUPA S V. Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review [J]. *Environ Poll*, 2003, **124**(2): 179 – 221.
- [21] GERLOFF G C. Plant efficiencies in the use of nitrogen, phosphorus, and potassium [C]//WRIGHT M J. *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Beltsville: [s. n.], 1996: 161 – 173.
- [22] DÖBERINER J, DAY J M. Associative symbioses and nitrogen-fixing sites [C]//NEWTON W E, NYMAN C J. *International Symposium on Nitrogen Fixation*. Washington: Washington State University, 1975: 518 – 538.
- [23] 顾小平, 吴晓丽. 毛竹及浙江淡竹根际联合固氮的研究[J]. 林业科学研究, 1994, **7**(6): 618 – 623.
GU Xiaoping, WU Xiaoli. A study on associative nitrogen fixation of bamboo rhizosphere [J]. *For Res*, 1994, **7**(6): 618 – 623.
- [24] 周存宇. 凋落物在森林生态系统中的作用及其研究进展[J]. 湖北农学院学报, 2003, **23**(2): 140 – 145.
ZHOU Cunyu. Litter's roles in forest ecosystem and its research progress [J]. *J Hubei Agric Coll*, 2003, **23**(2): 140 – 145.
- [25] 刘亚迪, 范少辉, 蔡春菊, 等. 地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(22): 6955 – 6963.
LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, *et al.* Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for *Phyllostachys praecox* over soil-surface mulching [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(22): 6955 – 6963.
- [26] 傅懋毅, 方敏瑜, 谢锦忠, 等. 竹林养分循环 (I) 毛竹纯林的叶凋落物及其分解[J]. 林业科学研究, 1989, **2**(3): 207 – 213.
FU Maoyi, FAMG Minyu, XIE Jingzhong, *et al.* Nutrient cycling in bamboo stands (I) leaf litter and its decomposition in pure *Phyllostachys pubescens* stands [J]. *For Res*, 1989, **2**(3): 207 – 213.
- [27] 曹群根, 傅懋毅, 李正才. 毛竹林凋落叶分解失重及养分累积归还模式[J]. 林业科学研究, 1997, **10**(3): 303 – 308.
CAO Qungen, FU Maoyi, LI Zhengcai. Patterns of mass-loss, nutrient accumulation and release of leaf litter in the Moso (*Phyllostachys pubescens*) stands [J]. *For Res*, 1997, **10**(3): 303 – 308.
- [28] 刘广路, 范少辉, 官凤英, 等. 不同年龄毛竹营养器官主要养分元素分布及与土壤环境的关系[J]. 林业科学研究, 2010, **23**(2): 252 – 258.
LIU Guanglu, FAN Shaohui, GUAN Fengying, *et al.* Distribution pattern of nutrient elements and its relationship with soil environment in different aged *Phyllostachys edulis* [J]. *For Res*, 2010, **23**(2): 252 – 258.
- [29] 徐秋芳, 钱新标, 桂祖云. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响[J]. 浙江林学院学报, 1998, **15**(1): 27 – 31.
XU Qiufang, QIAN Xinbiao, GUI Zuyun. Effects of litter decomposition of different stands on soil properties [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1998, **15**(1): 27 – 31.
- [30] 吴家森, 周国模, 钱新标, 等. 不同经营类型毛竹林营养元素的空间分布[J]. 浙江林学院学报, 2005, **22**(5): 486 – 489.
WU Jiasen, ZHOU Guomo, QIAN Xinbiao, *et al.* Distribution of nutrient elements in different organs of *Phyllostachys pubescens* under different managements [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2005, **22**(5): 486 – 489.
- [31] 吴家森, 吴夏华, 叶飞. 雷竹林营养元素分配与积累[J]. 竹子研究汇刊, 2005, **24**(1): 29 – 31.
WU Jiasen, WU Xiaohua, YE Fei. Nutrient distribution and accumulation in *Phyllostachys praecox* f. *prevernalis* [J]. *J Bamboo Res*, 2005, **24**(1): 29 – 31.
- [32] 林海萍, 吴家森, 付顺华, 等. 雷竹笋采后贮藏生理的研究[J]. 江苏林业科技, 2002, **19**(4): 16 – 17.

- LIN Haiping, WU Jiasen, FU Shunhua, *et al.* Study on physiology of bamboo shoot of *Phyllostachys praecox* f. *prevelnalis* under storage [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2002, **19**(4): 16 – 17.
- [33] 徐秋芳, 叶正钱, 姜培坤, 等. 雷竹笋营养元素含量及其与土壤养分的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20**(2): 115 – 118.
- XU Qiufang, YE Zhengqian, JIANG Peikun, *et al.* Relationship between bamboo-shoot nutrition and soil nutrients [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20**(2): 115 – 118.
- [34] 张奇春, 王雪芹, 楼莉萍, 等. 毛竹林生态系统地表径流及其氮素流失形态研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(5): 23 – 26.
- ZHANG Qichun, WANG Xueqin, LOU Liping, *et al.* Studies on surface runoff and nitrogen loss in bamboo forest ecosystem [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24**(5): 23 – 26.
- [35] 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等. 不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5599 – 5607.
- CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, *et al.* Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under *Phyllostachy praecox* stands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(18): 5599 – 5607.
- [36] 吴家森, 陈闻, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤氮磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 33 – 37.
- WU Jiasen, CHEN Wen, JIANG Peikun, *et al.* Effects of different fertilization on seepage loses of nitrogen and phosphorus in the soil under *Phyllostachys praecox* stand [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26**(2): 33 – 37.
- [37] 高志勤, 傅懋毅. 毛竹林渗滤水养分的淋溶特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, **29**(6): 95 – 29.
- GAO Zhiqin, FU Maoyi. Leaching characteristics of nutrients of percolating water in different *Phyllostachys edulis* stands [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, **29**(6): 95 – 29.
- [38] 孟赐福, 沈菁, 姜培坤, 等. 不同施肥处理对雷竹林土壤养分平衡和竹笋产量的影响[J]. 竹子研究汇刊, 2009, **28**(4): 11 – 17.
- MENG Cifu, SHEN Jing, JIANG Peikun, *et al.* Effects of different fertilization on soil nutrient balance and bamboo shoot yield of *Phyllostachys praecox* stands [J]. *J Bamboo Res*, 2009, **28**(4): 11 – 17.
- [39] 郭子武, 王为宇, 杨清平, 等. 林地覆盖对雷竹林土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 广西植物, 2013, **33**(5): 627 – 632.
- GUO Ziwu, WANG Weiyu, YANG Qingping, *et al.* Effects of mulching mangement on stoichiometry of soil C, N, P in *Phyllostachys praecox* plantations [J]. *Guihaia*, 2013, **33**(5): 627 – 632.
- [40] 刘广路, 范少辉, 郭宝华, 等. 经营时间梯度上的毛竹林碳氮动态特征[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1955 – 1962.
- LIU Guanglu, FAN Shaohui, GUO Baohua, *et al.* The dynamic characteristics of carbon and nitrogen storage in *Phyllostachy edulis* forest with operating time [J]. *J Nat Resour*, 2013, **28**(11): 1955 – 1962.
- [41] 吴家森, 周国模, 徐秋芳, 等. 不同年份毛竹营养元素的空间分布及与土壤养分的关系[J]. 林业科学, 2005, **41**(3): 171 – 173.
- WU Jiasen, ZHOU Guomo, XU Qiufang, *et al.* Spatial distribution of nutrition element and its relationship with soil nutrients in different years of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(3): 171 – 173.
- [42] 姜培坤, 俞益武. 雷竹叶营养元素含量与土壤养分之间的关系[J]. 浙江林学院学报, 2000, **17**(4): 360 – 363.
- JIANG Peikun, YU Yiwu. Nutrient elements contained in leaves of *Phyllostachys praecox* f. *preveynalis* and soil nutrients [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2000, **17**(4): 360 – 363.
- [43] 朱元洪, 孙羲, 洪顺山. 施肥和土壤养分对毛竹笋营养成分的影响[J]. 土壤学报, 1991, **28**(1): 40 – 48.
- ZHU Yuanhong, SUN Xi, HONG Shunshan. The effect of fertilization and soil fertility on the nutritive composition of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) shoot [J]. *Acta Pedol Sin*, 1991, **28**(1): 40 – 48.
- [44] 胡亮, 王婷, 郭晓敏. 平衡施肥对毛竹产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(30): 15019 – 15020.
- HU Liang, WANG Ting, GUO Xiao min. Effect of balanced fertilization on the yield of *Phyllostachys heterocyla* cv. *pubescens* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, **37**(30): 15019 – 15020.
- [45] 郑蓉, 郑维鹏, 廖鹏辉, 等. 竹林土壤对毛竹笋材产量的贡献率及肥效分析[J]. 亚热带水土保持, 2013, **25**(4): 23 – 26.

- ZHENG Rong, ZHENG Weipeng, LIAO Penghui, *et al.* Analysis of soil condition on the contribution rate to shoot and timber yield and fertilizer effects in Moso bamboo stands [J]. *Subtrop Soil Water Conserv*, 2013, **25**(4): 23 – 26.
- [46] 陈闻, 吴家森, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤肥力及肥料利用率的影响[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 1021 – 1028.
- CHEN Wen, WU Jiasen, JIANG Peikun, *et al.* Effects of different fertilization on soil fertility quality, fertilizer use efficiency, and bamboo shoot yields of *Phyllostachys praecox* stand [J]. *Acta Pedol Sin*, 2011, **48**(5): 1021 – 1028.
- [47] 刘力, 林新春, 金爱武, 等. 苦竹各器官营养元素分析[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21**(2): 172 – 175.
- LIU Li, LIN Xinchun, JIN Aiwu, *et al.* Analysis of nutrient elements in various organs of *Pleioblastus amarus* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21**(2): 172 – 175.
- [48] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 密度对四季竹叶片 C, N, P 化学计量和养分重吸收的影响特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 893 – 899.
- GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, *et al.* Effects of stand density on *Oligotachyum lubricum* leaf carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(4): 893 – 899.
- [49] 杨芳, 吴家森, 钱新标, 等. 不同施肥雷竹林土壤微生物量碳的动态变化[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23**(1): 70 – 74.
- YANG Fang, WU Jiasen, QIAN Xinbiao, *et al.* Dynamic changes of soil microbial biomass carbon in *Phyllostachys praecox* stand with different fertilizers [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23**(1): 70 – 74.
- [50] 吴家森, 姜培坤, 谢秉楼, 等. 不同施肥处理对雷竹林土壤氮、磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 33 – 44.
- WU Jiasen, JIANG Peikun, XIE Binlou, *et al.* Effects of different fertilization on seepage loses of nitrogen and phosphorus in the soil under *Phyllostachys praecox* stand [J]. *J Soil Water Conserve*, 2012, **26**(2): 33 – 44.
- [51] BYMES B H. Environment effects of N fertilizer use: an overview [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 1990, **26**(1/3): 209 – 215.
- [52] 李永夫, 姜培坤, 刘娟, 等. 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响[J]. 林业科学, 2010, **46**(12): 165 – 170.
- LI Yongfu, JIANG Peikun, LIU Juan, *et al.* Effect of fertilization on water-soluble organic C, N, and emission of greenhouse gases in the soil of *Phyllostachys edulis* stands [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46**(12): 165 – 170.