

竹林不同界面水文效应研究

刘蔚漪, 范少辉, 苏文会, 刘广路, 余林

(国际竹藤网络中心 国家林业局竹藤科学与技术重点开放实验室, 北京 100102)

摘要: 森林植被层作为水文环境要素, 对降水、蒸散和径流等水文通量在空间上的分布特征有着重要的影响。基于国内外近年来对竹林水文效应的研究成果, 试从竹林林冠层、枯落物层、土壤层等不同层面综合评述最新研究进展, 普遍的研究结论认为竹林具有涵养水源、水土保持、减少径流泥沙、改善水质等功能, 目前国内外对竹林生态系统水文效应的研究还属于起步阶段, 研究对象多以毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林为主, 并局限于单一指标或是单一过程的观测试验, 今后竹林水文研究工作应加强不同竹种水文过程物理机制研究, 对于分析评价不同种类、地带、类型的竹林水文效应具有重要意义。参 55

关键词: 森林水文学; 竹林; 水文; 地表径流; 综述

中图分类号: S715.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)03-0486-08

Research on hydrological effect in different interfaces under bamboo forests

LIU Wei-yi, FAN Shao-hui, SU Wen-hui, LIU Guang-lu, YU Lin

(SFA Key Laboratory of Bamboo and Rattan Science and Technology, International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

Abstract: As an important component in hydrological process, forest vegetation influences critically the spatial distribution of hydrological fluxes such as precipitation, evapo-transpiration, and runoff. Based on the recent research literature at home and abroad, the authors summarized the effects of bamboo forest on the spatial distribution of those hydrological fluxes, from the interfaces of crown layer, litter layer and soil layer of bamboo forest. The results indicated that the main functions of bamboo forest vegetation including protecting water resources, reserving water and soil, controlling erosion and improving water quality. However, the study of hydrological phenomena is still in the initial stage focusing mainly on *Phyllostachys pubescens*, and limited to single index and process. Therefore, the physical mechanisms of hydrological process should be stressed in various bamboo forest hydrology study, which was of great importance for analyzing and evaluating forest hydrology effects in different varieties, zones, and forest types. [Ch, 55 ref.]

Key words: forest hydrology; bamboo forest; hydrological effect; runoff; review

森林和水是人类生存与发展的重要物质基础, 也是森林生态系统的重要组成成分。森林与水之间的关系是当今林学和生态学领域研究的核心问题。自 20 世纪 50 年代以来, 世界各国研究工作者从多方面对森林水文作用进行了探索, 并且取得了许多重要研究成果。竹类植物形态结构、生长发育及繁衍更新不同于一般的乔灌木树种, 有其独特的生物学特性和形态特征^[1], 前人在竹林水文效应的研究上取得了一定的成果, 研究多围绕毛竹 *Phyllostachys pubescens* 开展, 表明毛竹具有较好的水源涵养功能。另外, 谢锦忠对麻竹 *Dendrocalamus latifolius* 人工林的水文效应开展了大量工作。关于竹林不同界面层之间水分传输、水量转换以及竹林水文学过程的系统研究未见报道。基于国内外近年来对竹林水文效应的研究

收稿日期: 2010-06-10; 修回日期: 2010-10-28

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD19B0103); 国际竹藤网络中心专项资金项目(1632009010)

作者简介: 刘蔚漪, 博士研究生, 从事竹林培育学和生态学研究。E-mail: liuweiyi@icbr.ac.cn。通信作者: 范少辉, 研究员, 从事竹林培育研究。E-mail: fansh@icbr.ac.cn

成果, 试从竹林生态系统各个层面上的水分分布, 储蓄以及运动过程中发现其特殊的规律, 对于深入认识竹林对水文过程的调节机制具有极其重要的意义。

1 林冠层水文研究

林冠层是一个特殊的下垫面, 其蒸腾耗水和截留降水的机制涉及土壤、植被和大气等多层界面。繁茂的枝叶组成的粗糙下垫面对森林生态系统的水分进行着调节和分配。森林把降水分为林冠截留量、穿透降水量和干流量等 3 部分^[2]。

1.1 竹林冠层截留研究

林冠截留发生在降水和林冠之间, 是调节降水分配和水分输入林内的重要过程。以往的研究对象以毛竹为主, 研究结果相差不大, 毛竹林林冠截留率为 23.93% ~ 29.93%^[3-11]。和其他树林相比, 毛竹林的树冠截留率属中等水平, 在中国主要的 13 类森林生态系统的林冠水平平均截留率大小排序中列第 6 位, 仅次于亚热带西部高山常绿针叶林的森林类型。南亚热带和热带丛生竹林的林冠水截留率比亚热带散生竹林低, 与南亚热带山地季风常绿阔叶林接近或小于^[12-16]。

影响林冠截留的因子有林分立竹度、叶面积指以及降水量等。立竹度大, 叶面积指数高的竹林, 林冠截留量和截留率都会相应增加^[12]。林冠截留量随着降水量的增加而增加, 林冠截留率随降水量的增加而减少^[5]。

随着时间的推移, 林分密度增大, 林冠截留量也会随之增大, Huber 等^[17]对智利不同地点不同林分降水分配研究发现, 智利竹种 *Chusquea quila* 隔 20 ~ 25 a 开花死亡更新 1 次, 更新后的林分, 9 a 后林冠截流率达到最大。

1.2 竹秆茎流研究

竹秆茎流是竹林冠层水量平衡中的重要组成部分, 加剧了竹林内水分分配和养分分配的差异。产生竹秆茎流的前提是竹秆吸水达到饱和。影响竹秆茎流的外部因子有降水强度、风向(风向改变了降水的倾角及方向, 从而影响竹秆茎流)、坡向、坡度和林分密度^[18]。

竹类植物秆、枝、叶部表面光滑, 且被有透水性很差的硅化蜡质层, 从而决定了林冠、竹枝、竹秆达到饱和和所需的降水量相对较小, 产生竹秆茎流所需的降水量比其他林分小得多^[19-20]。不同竹种因生物学特性的差异, 竹秆茎流率的大小也有差异。王冬云^[7]测得毛竹林竹秆茎流率平均为 6.8%, 高于杉木 *Cunninghamia lanceolata* (0.98%) 和马尾松 *Pinus massoniana* (1.4%)^[6], 接近麻竹林竹秆茎流率 (7.74%)^[15], 而笪志祥等^[21]研究得出梁山慈竹 *Dendrocalamus farinosus* 林竹秆茎流率平均为 1.57%, 远远低于毛竹林的竹秆茎流。

竹秆茎流中含有丰富的养分元素, 方敏瑜等^[19]研究发现秆流水中不含钙, 其他氮磷钾镁元素的年输入量分别为 1.855 7, 0.007 2, 0.784 9 和 0.156 9 kg·km⁻²; 增加了竹林地的自肥能力。

竹林具有较高的秆茎流量、秆茎流率, 增加了地表径流量, 这对发挥竹林生态系统的水土保持功能具有不利影响, 而采用竹阔混交林经营模式可以显著降低竹秆茎流量。因此, 竹阔混交林模式是一种值得提倡的经营类型, 不仅能保持林地生产力的持续稳定, 而且能发挥其良好的生态防护功能。

2 凋落物层水文研究

森林凋枝落叶层是重要的水文作用层, 其持水量的动态变化对林冠下大气和土壤之间的水分和能量传输有重要的影响。目前, 国内外对竹子凋落物养分状况和水文性质研究较多, 而对凋落物截留的动态过程的研究报道较少。

2.1 枯落物蓄积量变化研究

竹叶凋落全年均会发生, 其数量随着季节和竹子自身的生长呈现一定的季节和月动态规律。毛竹林每年都有大小 2 个高峰值出现, 第一(大)高峰发生在春季 4 - 5 月, 第二(小)高峰出现在晚秋 11 月^[22]。谢锦忠^[15]研究发现丛生竹种具有相似的凋落物发生规律, 每年的夏初 6 月有一个发生高峰期, 春季 3 - 4 月, 有一个发生次高峰期, 初冬 11-12 月有一个发生低谷期, 但峰与谷的差别不如毛竹林那样明显。

毛竹林凋落物蓄积量和季节变异程度与林分类型和经营措施有关。大型丛生竹林冠面积大, 能产生

大量的凋落物,勃氏甜龙竹 *Dendrocalamus brandisii* 的凋落物年蓄积可达到 $1\ 250.00\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [23]。高志勤等 [24] 研究发现:竹阔混交林季节变幅为 $6\ 674.82 \sim 11\ 883.73\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 未垦复毛竹林为 $3\ 366.46 \sim 7\ 134.83\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 垦复毛竹林为 $1\ 369.71 \sim 5\ 257.11\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 毛竹林垦复后与其他林分凋落物质量差异明显,竹阔混交林凋落物质量无论冬季还是夏季均大于毛竹纯林。

2.2 凋落物持水能力研究

竹林枯枝落叶层具有较大的水分截持能力,从而影响到穿透降雨对土壤水分的补充和植物的水分供应 [25]。大量的凋落物可有效地削减雨滴的能量,腐蚀分解后可改善土壤的理化性质,增强土壤持水能力 [26]。

何汉杏等 [27] 通过 4 a 的定位研究表明:毛竹的凋落物最大吸水率达 33.5%, 最大吸水量达 $29\ 100.00\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。仅就土壤蓄水量与枯落物蓄水量两项相加,毛竹涵养水分的量可达 $1\ 333.10\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 是一个比较理想的水源涵养林树种。王冬云等 [7] 测得毛竹林林下调落物层的最大持水量为 1.406 mm, 大于王彦辉等 [28] 测定的大岗山林区毛竹林凋落物层的最大持水总量 (0.600 mm); 与温远光等 [29] 研究毛竹人工林凋落物层的最大持水量 (1.406 mm) 相同, 接近于麻竹 (1.390 mm) [30]。

与其他树种相比毛竹林凋落物的持水能力的大小, 不同学者研究成果有所不同。王彦辉 [31]、林明磊等 [16] 研究证明, 竹林林下地被物的最大持水力远小于马尾松林和杉木人工林。黄进等 [11] 对栎林、毛竹林、杉木林和马尾松林研究得出不同结论, 他们认为各林分凋落物层最大持水量和有效拦蓄量排序均为栎林 > 为毛竹林 > 杉木林 > 马尾松林。

虽然毛竹林下调落物有很强的持水能力, 但由于毛竹林的特殊经营方式, 每年都要砍伐, 在砍伐的同时也就将大量的枝叶带出林外, 从而减少了林下调落物蓄积量, 间接导致最大持水量的减少。垦复之后的毛竹林地表层凋落物数量急剧减少, 不利于水文效应的发挥 [24]。王云琦等 [32] 研究也验证了这一点, 在凋落物持水作用较强的前 2 h 内毛竹纯林为 $0.809\ \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 比其他林地都小。如果采用毛竹和杉木等其他合适的针叶或阔叶树种混交成林, 结果则会大大改观, 其水源涵养能力将会大大提高 [33-35]。

3 土壤层水文研究

3.1 土壤层储水量研究

土壤层在森林水分循环中具有重要的作用, 植被群落的土壤蓄水能力是植被群落调节水分循环和涵养水源的重要指标。

土壤储水是竹林水源涵养最重的、容量最大的层次, 对竹林水源涵养功能起着决定性的作用。一些研究表明, 竹林土壤的储水能力大于杉木和阔叶林。王彦辉等 [28] 研究得出人工毛竹林 0 ~ 60 cm 土层毛管总持水量为 430.50 mm, 有效储水容量为 312.73 mm, 均大于杉木林和阔叶林。陈开伍 [36] 对杉木和竹杉混交林的土壤储水量进行研究, 发现毛竹纯林和杉木纯林具有较高的生产力和更优的水源涵养功能。也有研究者认为混交林的土壤储水量相对纯林的更大。Griscom 等 [37] 对西南亚马逊古陆的演替森林进行研究发现, 以竹子为主体的演替林 0 ~ 10 cm 的土壤含水量明显比其他林份低。郑郁善等 [34] 研究发现竹杉混交林 (0 ~ 40 cm) 土壤储水量达 $611.2\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 高于杉木纯林和毛竹纯林。混交林中以竹阔混交 (阔叶林 25% ~ 35%) 的土壤储水能力最强, 达 $392.20\ \text{mm}$ [35]。

3.2 土壤理化性质研究

竹林土壤发育于不同岩性的母岩, 其理化性状存在差异, 从而影响土壤的蓄水保水性能。以毛竹纯林为研究对象表明, 紫色砂页岩保水性能优于砂岩的保水蓄水性能 [4]。从适宜毛竹生长的土壤基本条件看, 以有机质多的壤土竹子生长最好, 砂土或黏土次之, 重黏土和石质土上生长最差 [38]。

一般来说, 竹林拥有庞大的根系, 可以改善土壤结构, 增加重力水的入渗和土壤水的根系运动。张昌顺等 [39] 研究发现, 毛竹纯林土壤渗透能力很弱, 尤其是中低产毛竹林地的土壤物理性质很差, 表现为土壤容重大、土层薄、含石量高、土壤不能很好地协调水气热。土壤化学性状也差, 主要表现为土壤养分总储量低, 低产林土壤中有效磷明显缺乏, 尤其是 20 ~ 40 cm 的土层; 氮磷钾三要素的比例严重失调, 氮多磷少 [40]。

影响土壤入渗性能的因素众多, 可以通过经营措施改变土壤的结构和质地, 从而改变土壤渗透能力。如垦复施肥、竹阔混交等措施可以改善土壤的物理性质提高土壤养分含量, 增强林分涵养水源能

力,从而维持或提高林地土壤质量,促进毛竹、阔叶树协调生长发育,达到毛竹可持续经营的目的,取得最佳经济效益^[41-43]。

Wang 等^[44]对不同林地研究发现:竹林的微生物碳含量最高,且不像其他林地一样随着土壤深度的增加而减少。毛竹纯林和混交林相比,毛竹纯林微生物含量高于毛竹混交林的微生物含量,蛋白酶、脲酶、磷酸酶、多酚氧化酶活性在毛竹纯林中更强^[45]。

土壤中微量元素与竹产量密切相关,特别是土壤中碱解氮对毛竹林的产量影响最为显著,与毛竹林产量呈极显著正相关。夏季土壤 0~30 cm 土层中碱解氮达 100.10 mg·kg⁻¹ 时,毛竹林可获得丰产高效^[46]。黎祖尧^[47]在江西毛竹产区研究表明:20 cm 以下土壤中碱解氮含量是影响毛竹粗生长的主导因子,复相关系数为 0.820。新竹平均胸径与土壤养分全氮、全磷呈显著正相关^[48],可以看出氮肥在毛竹的肥料中占主导地位。

目前,人工毛竹林经营长期大量地施用化学肥料和化学除草剂,使竹林地土壤发生物理、化学、生物性劣变,表现为土壤板结、酸化等,竹林地土壤持水能力下降,给毛竹林可持续发展带来了严重的困难。今后应该开展如竹林地免耕技术,竹林自肥机制及合理的土壤养分补充技术等研究,更好地指导竹产业经济快速、健康发展。

4 地表径流

4.1 竹林地表径流量

防止土壤侵蚀及减少地表径流量是竹林重要的水文功能之一。在影响径流量大小方面,前人做了大量研究,发现地表径流除与竹子本身生物学特性有关外,降水量的大小,林分密度以及培养措施也是关键因素。

谢锦忠等^[49]研究发现:麻竹林地表径流量和泥沙流失量的大小与降水量呈正线性相关,地表径流量与降水间隔时间和林分密度呈负相关。密度为 330 丛·hm⁻² 林分年平均地表径流量和土壤侵蚀模数为 38.10 mm 和 16.0 t·hm⁻²·a⁻¹,分别是密度为 825 丛·hm⁻² 林分的 1.80 倍和 2.24 倍。一次降水地表径流,密林是无林地的 17.5%,中林是无林地的 41.5%,疏林是无林地的 61.1%^[31]。

地表径流与培育措施也有很大关系。目前在中国各竹产区广泛应用的竹林丰产技术,如竹林地过度垦复,尤其是陡坡地大面积片状垦复,造成竹林地表阻隔林内降水侵蚀土壤的草本和灌木植物数量和种类的锐减,致使竹林地表径流量显著增大,上层土壤大量流失。不同经营类型的年地表径流量排序为阔叶林<针叶林和集约经营竹林<粗放经营竹林和经济林<农耕地;土壤侵蚀量的排序为阔叶林<针叶林和粗放经营竹林<集约经营竹林和经济林<农耕地^[50-52]。

4.2 水土及养分流失

从泥沙流失量来看,全翻会造成泥沙流失明显加剧,在经营竹林时最好不要采取全翻的方式。如果为了保证竹林生产力而采取土壤垦复措施时,应尽量减少深翻的次数,以带翻的方式较好^[49]。尤志达^[53]研究发现:经过 3 种不同垦复措施的麻竹笋用林,全翻竹林的径流和泥沙含量为最大,流失分别达 30.37 mm·a⁻¹ 和 234.45 kg·hm⁻²·a⁻¹,其次是带翻,常规扩穴,不深翻的竹林地水土流失最小。张学权等^[54]研究认为:“竹+草植被”恢复模式在退耕 3 a 后能有效地减少地表径流,侵蚀性降水量及其降雨场次也明显少于农耕地,退耕地地表径流养分流失量和养分流失浓度也有所降低。

地表径流会导致养分的流失,径流水中各养分物质的浓度及其输出量与土壤立地毛竹生长规律林地土壤微生物活动及人为措施有关。Toky 等^[55]对印度东北的不同年限的次生裸地进行营养流失研究,发现氮元素损失的主要途径是水土流失和灰质损失,10 a 的竹林次生林钾损失最高。

综上所述,在今后的研究中,可以发展经营竹林竹阔混交林优化经营模式;人工经营竹林林下植被恢复和生态功能发挥研究等。在经营过程中应采用合理的培育措施和混交模式,减少翻耕次数,将更利于竹林发挥水土保持功能。

5 竹林水文效应研究展望

目前,国内外对竹林生态系统水文效应的研究还属于起步阶段,研究对象多以毛竹为主,并局限于

单一指标或是单一过程的观测试验。虽然在竹林对降水分配作用及枯落物水文性质方面取得了大量的基础数据,但尚未与生态格局、结构与水文过程、功能有机地结合起来。再加上竹类的生物学特殊性,不同竹种,不同用途的林分之间存在很大的差异,并且天然竹林多生长在山区,交通不便,野外试验开展困难,致使中国对竹林水文过程方面的观测试验进展困难。今后的研究可以借鉴国内外以其他树种为研究对象的水文学研究方法,根据竹子的形态特征和生物学特性摸索一套适用竹林水文生态的研究方法,应用先进的科学仪器设备建立生态定位观测站,对竹林水文生态功能的发挥和演变规律进行长期监测,并进行量化评价,同时开展竹林生态系统内水分的分布、蓄持、入渗、蒸散、径流等变量的时空动态规律的研究,深入、系统、定量地描述竹林生态系统对水文过程的调节机制,对于解决水资源的合理开发利用,以及人工竹林的可持续发展具有十分重要的科学意义和应用前景。

参考文献:

- [1] 马乃训,楼一平,张文燕,等. 竹林丰产栽培技术[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
- [2] 高甲荣,肖斌,张东升,等. 国外森林水文研究进展述评[J]. 水土保持学报,2001,5(15):61-75.
GAO Jiarong, XIAO bin, ZHANG Dongsheng, et al. A review on current situation of forest hydrology research and its advances [J]. *J Soil Water Conserv*, 2001, 5(15): 61-75.
- [3] 陈乾富. 毛竹不同经营措施林地土壤肥力的影响[J]. 竹子研究汇刊,1999,7(3):20-24.
CHEN Qianfu. Impacts of different operation patterns of moso (*Phyllostachys pubescens*) on soil fertility [J]. *J Bamboo Res*, 1999, 7(3): 20-24.
- [4] 吴炳生,谢华,谭淑. 毛竹林群落类型水源涵养功能的初步研究[J]. 竹子研究汇刊,1992,11(4):18-24.
WU Bingsheng, XIE Hua, TAN Shu. A preliminary study on the function of water and soil conservation in different community types of *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *J Bamboo Res*, 1992, 11(4): 18-24.
- [5] 骆林川. 毛竹林水文效应的初步研究[D]. 南京:南京林业大学,1988.
LUO Linchuang. *Study on Hydrological Effects in Mao Bamboo Plantation* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 1988.
- [6] 陈双林,萧江华,薛建辉. 竹林水文生态效应研究综述[J]. 林业科学研究,2004,17(3):399-404.
CHEN Shuanglin, XIAO Jianghua, XUE Jianhui. A review on hydrological effects of bamboo stand [J]. *For Res*, 2004, 17(3): 399-404.
- [7] 王冬云,张卓文,苏开君,等. 广州流溪河流域毛竹林的水文生态效应[J]. 浙江林学院学报,2008,25(1):37-41.
WANG Dongyun, ZHANG Zhuowen, SU Kaijun, et al. Hydrology of *Phyllostachys pubescens* in Liuxihe, Guangdong Province [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2008, 25(1): 37-41.
- [8] 黄进,胡海波,张家洋,等. 北亚热带毛竹林林冠截留特征的研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(2):31-34.
HUANG Jin, HU Haibo, ZHANG Jiayang, et al. Canopy interception characteristics of bamboo forests in northern semitropics [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2009, 33(2): 31-34.
- [9] 曹群根. 毛竹林水文效应的初步研究[J]. 竹类研究,1989,8(2):24-45.
CAO Qungen. Study on hydrological effects in Mao bamboo plantation [J]. *Bamboo Res*, 1989, 8(2): 24-45.
- [10] 李香云,王玉杰,朱金兆. 重庆缙云山楠竹林地不同时间尺度降雨量再分配规律研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):101-104.
LI Xiangyun, WANG Yujie, ZHU Jinzhao, et al. Study on the rainfall redistribution of *Phyllostachys edulis* at different time scale in Chongqing Jinyun Mountain [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2008, 15(6): 101-104.
- [11] 黄进,张家洋,张金池,等. 北亚热带次生毛竹林冠生态水文效应及其影响因素分析[J]. 水土保持通报,2009,29(1):23-27.
HUANG Jing, ZHANG Jiayang, ZHANG Jinchi, et al. Eco-hydrological effects of secondary bamboo forest (*Phyllostachys edulis*) canopy and its influence factors in north subtropics [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2009, 29(1): 23-27.
- [12] 黄忠良,孔国辉. 鼎湖山季风常绿阔叶林生态水文功能研究[M]//孙鸿烈. 热带亚热带森林生态系统研究:第8集. 北京:气象出版社,1998:150-155.

- [13] 萧江华. 重视发挥竹林的生态功能效益[J]. 林业经济, 2001 (1): 31 - 34.
XIAO Jianghua. Attaching importance to the ecological function of bamboo [J]. *For Econ*, 2001 (1): 31 - 34.
- [14] 刘世荣. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [15] 谢锦忠. 丛生竹笋用林水文生态功能及其土壤肥力动态[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2001.
XIE Jinzhong. *Ecohydrological Functions of Sympodial Bamboo Shoot Stands and Its Dynamics of Soil Fertility* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2001.
- [16] 林明磊. 不同植被类型对溪流河小流域产流产沙影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
LIN Minglei. *Effect of Different Vegetation Types on Runoff and Sediment Yield in Liuxihe Small Watershed* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [17] HUBER A, IROUMÉ A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in China [J]. *Jhydrol*, 2001, **248**: 78 - 92
- [18] 苏开君, 王光, 马红岩, 等. 流溪河小流域针阔混交林林冠降雨截留模型研究[J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2007, **27** (1): 60 - 63.
SU Kaijun, WANG Guang, MA Hongyan, *et al.* Canopy precipitation interception models for the mixed forest of broadleaf and coniferous trees located at Liuxihe small watershed [J]. *J Central South For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **27** (1): 60 - 63.
- [19] 方敏瑜, 傅懋毅, 谢锦忠, 等. 竹林养分循环规律研究(Ⅲ)毛竹纯林竹秆流及其养分输入[J]. 竹子研究汇刊, 1998, **17** (2): 59 - 64.
FANG Minyu, FU Maoyi, XIE Jinzhong, *et al.* Research on nutrient elements cycle in bamboo stands (Ⅲ) bamboo stem run-off and nutrient elements in pure Moso stand [J]. *J Bamboo Res*, 1998, **17** (2): 59 - 64.
- [20] 杨茂瑞. 亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流[J]. 林业科学研究, 1992, **5** (2): 158 - 162.
YANG Maorui. Interrelations of forest precipitation crown interception and trunk stemflow in subtropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* [J]. *For Res*, 1992, **5** (2): 158 - 162.
- [21] 竺志祥, 楼一平, 董文渊, 等. 梁山慈竹在退耕还林中的水土保持效应研究[J]. 浙江林业科技, 2007, **27** (3): 22 - 27.
DA Zhixiang, LOU Yiping, DONG Wenyan, *et al.* Effect of *Dendrocalamus farinosus* plantation on soil and water conservation [J]. *J Zhengjiang For Technol*, 2007, **27** (3): 22 - 27.
- [22] 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, FANG Minyu, XIE Jinzhong, *et al.* Nutrient cycling in bamboo stands(I) leaf litter and its decomposition in pure *Phyllostachys pubescend* stands [J]. *For Res*, 1989, **2** (3): 207 - 213.
- [23] 王艳红, 宋维峰, 李财金. 不同竹林枯落物层水文生态效应研究[J]. 陕西农业科技, 2009 (1): 31 - 34.
WANG Yanhong, SONG Weifeng, LI Caijin. Studies on the hydrological effects of litter under different bamboo forest stands [J]. *J Shannxi Agric Sci Technol*, 2009 (1): 31 - 34.
- [24] 高志勤, 傅懋毅. 毛竹林等不同森林类型枯落物水文特性的研究[J]. 林业科学研究, 2005, **18** (3): 274 - 279.
GAO Zhiqin, FU Maoyi. Studies on the hydrologic characteristics of litter under *Phyllostachys pubescens* in several different forest stands [J]. *For Res*, 2005, **18** (3): 274 - 279.
- [25] PUTUHENA W M, CORDERY I. Estimation of interception capacity of the forest floor [J]. *JHydrol*, 1996, **180**: 283 - 299.
- [26] 温钦舒. 大型丛生竹水土保持效益试验初探[J]. 亚热带水土保持, 2006, **18** (3): 19 - 22.
WEN Qinshu. Study on water and soil conservation effect of large thickly-growing bamboo [J]. *Subtrop Soil Water Conserv*, 2006, **18** (3): 19 - 22.
- [27] 何汉杏, 葛汉栋, 庄昌盛, 等. 张家界市澧水林场毛竹林水文生态效益初步研究(I)生态效益计量[J]. 中南林业学院学报, 2001, **21** (4): 11 - 15.
HE Hanxin, GE Handang, ZHUANG Chansheng, *et al.* Studies of hydrologic benefits of Moso bamboo forests in Xuanshui forest farm of Zhangjiajie district(I) measurement of ecological benefits [J]. *J Central South For Univ*, 2001, **21** (4): 11 - 15.

- [28] 王彦辉, 刘永敏. 江西省大岗山毛竹林水文效应研究[J]. 林业科学研究, 1993, **6** (4): 273 – 279.
WANG Yanhui, LIU Yongmin. Study on hydrological effects in mao bamboo plantation [J]. *For Res*, 1993, **6** (4): 273 – 279.
- [29] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降雨截留规律的数量分析[J]. 林业科学, 1995, **31** (4): 289 – 298.
WEN Yuanguang, LIU Shirong. Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest ecosystems in China [J]. *Sci Silv Sin*, 1995, **31** (4): 289 – 298.
- [30] 谢锦忠, 傅懋毅, 马占兴, 等. 麻竹人工林水文生态效应[J]. 林业科学研究, 2005, **18** (6): 682 – 687.
XIE Jinzhong, FU Maoyi, MA Zhanxing, *et al.* Hydro-ecological effects of *Dendrocalamus latiflorus* stands [J]. *For Res*, 2005, **18** (6): 682 – 687.
- [31] 王彦辉, 刘永敏. 毛竹人工林水文作用的研究[M]//周晓峰. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994: 354 – 363.
- [32] 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山几种典型植被枯落物水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2004, **18** (3): 41 – 44.
WANG Yunqi, WANG Yujie, ZHANG Hongjiang, *et al.* Research on litter hydrology characteristic of typical vegetation in Jinyun Mountain in Chongqing City [J]. *J Soil Water Conserv*, 2004, **18** (3): 41 – 44.
- [33] 李仁吕. 毛竹杉木混交林水源涵养功能研究[J]. 福建林业科技, 2001, **28** (增刊): 5 – 9.
LI Renlü. Study on water conservation function of mixed forests of Chinese fir and *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2001, **28** (supp): 5 – 9.
- [34] 郑郁善, 洪伟. 毛竹经营学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998: 52 – 64.
- [35] 廖军, 薛建辉, 施建敏. 竹阔混交林的水文效应[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, **26** (4): 6 – 10.
LIAO Jun, XUE Jianhui, SHI Jianmin. Hydrological effects of mixed forest of moso bamboo and broad-leaved tree [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2002, **26** (4): 6 – 10.
- [36] 陈开伍. 杉木毛竹混交林水源涵养功能的研究[J]. 福建林学院学报, 2000, **20** (3): 258 – 261.
CHEN Kaiwu. Study on water conservation function of mixed forests of Chinese fir and *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Fujian Coll For*, 2000, **20** (3): 258 – 261.
- [37] GRISCOM B W, ASHTON P M S. Bamboo control of forest succession: *Guadua sarcocarpa* in southeastern Peru [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **175** (1/3): 445 – 454.
- [38] 吴家森, 胡睦荫, 蔡庭付, 等. 毛竹生长与土壤环境[J]. 竹子研究汇刊, 2006, **25** (2): 3 – 6.
WU Jiasen, HU Muyin, CAI Tingfu, *et al.* The relationship between soil environment and the growth of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Bamboo Res*, 2006, **25** (2): 3 – 6.
- [39] 张昌顺, 范少辉, 官凤英, 等. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J]. 林业科学, 2009, **45** (1): 36 – 42.
ZHANG Changshun, FAN Shaohui, GUAN Fengying, *et al.* Soil infiltration characteristics and its influencing factors under *Phyllostachys edulis* forests in northern Fujian Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (1): 36 – 42.
- [40] 徐秋芳, 徐建明, 刘力, 等. 安吉县港口乡低产毛竹林地肥力分析[J]. 浙江林学院学报, 2000, **17** (3): 280 – 284.
XU Qiufang, XU Jianming, LIU Li, *et al.* Analysis on soil fertility of low-yield *Phyllostachys pubescens* forest in Gangkou Town of Anjie County [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2000, **17** (3): 280 – 284.
- [41] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20** (4): 82 – 85, 89.
WANG Gailan, DUAN Jiannan, JIA Ningfeng, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area [J]. *J Soil Water Conserv*, 2006, **20** (4): 82 – 85, 89.
- [42] PERNES-DEBUYSER A, TESSIER D. Soil physical properties affected by long-term fertilization [J]. *Eur J Soil Sci*, 2004, **55** (3): 505 – 512.
- [43] 王洪帆. 毛竹纯林留养阔叶树后土壤理化性质的研究[J]. 安徽农学通报, 2008, **14** (17): 170 – 173.
WANG Hongfan. Effects of remain broad-leaved trees in *Phyllostachys pubescens* forest on physical and chemical properties of the soil [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2008, **14** (17): 170 – 173.
- [44] WANG Feier, CHEN Yingxu, TIAN Guangming. Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China [J].

- Nutr Cycl Agroecosyst*, 2004, **68**: 181 – 189.
- [45] 潘怡. 不同经营毛竹林土壤生化性质及其变化动态[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2000.
PAN Yi. *Research on the Soil Biological Property and Biological Changes in the stands of Phyllostachys pubescens under Different Management* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2000.
- [46] 陈金林, 张献义, 叶长青, 等. 毛竹林高产施肥技术探讨[J]. 林业科学研究, 1996, **9** (3): 323 – 327.
CHEN Jinlin, ZHANG Xianyi, YE Changqing, *et al.* Study on fertilization practice for high yield *Phyllostachys pubescens* [J]. *For Res*, 1996, **9** (3): 323 – 327.
- [47] 黎祖尧. 土壤对毛竹直径生长影响的研究[J]. 竹子研究汇刊, 1993, **12** (3): 29 – 35.
LI Zuyao. Study on effect of soil on diameter eye-high growth of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Bamboo Res*, 1993, **12** (3): 29 – 35.
- [48] 曹永慧, 萧江华, 陈双林, 等. 竹阔混交林阔叶树下土壤养分对毛竹生长的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, **31** (6): 43 – 47.
CAO Yonghui, XIAO Jianghua, CHEN Shuanglin, *et al.* The Effect of soil nutrient around broad-leaved trees on *Phyllostachys edulis* growth in the mixed forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2007, **31** (6): 43 – 47.
- [49] 谢锦忠, 傅懋毅, 肖基浒, 等. 丛生竹林生态系统的水文效应研究 (I) 麻竹人工林地地表径流规律的初探[J]. 竹子研究汇刊, 2000, **19** (4): 18 – 25.
XIE Jinzhong, FU Maoyi, XIAO Jihu, *et al.* Studies on water effects of biological system of big-cluster bamboo forest (I) exploitation of rules of earth surface stream in man-made forest [J]. *J Bamboo Res*, 2000, **19** (4): 18 – 25.
- [50] 李香云. 绪云山林地坡面径流特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
LI Xiangyun. *Study on the Process of Rain and Runoff of Forests Stand in Jinyun Mountain* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [51] 谢锦忠. 中国不同竹产区土地利用变化对生态环境影响的比较研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
XIE Jinzhong. *A Comparison Study on Landuse Changes and their Environment Influence in China Bamboo Producing Area Along an East-West Gradient* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2006.
- [52] 王维明. 闽北坡地不同土地利用方式的降雨与土壤侵蚀的关系研究[J]. 水土保持研究, 2006, **13** (5): 134 – 137.
WANG Weiming. The relationship between rainfall and soil erosion under different land uses in slope land of northern Fujian [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2006, **13** (5): 134 – 137.
- [53] 尤志达. 垦复措施对山地麻竹笋用林地地表径流影响[J]. 福建林学院学报, 2003, **23** (2): 119 – 123.
YOU Zhida. The overland flow in different soil plough measures of *Dendrocalamus latiflorus* planted on hilly country [J]. *J Fujian Coll For*, 2003, **23** (2): 119 – 123.
- [54] 张学权, 胡庭兴, 李伟. 林(竹) + 草植被恢复初期地表径流及其养分流失特征[J]. 中国水土保持, 2005 (10): 25 – 27.
ZHANG Xuequan, HU Tingxing, LI Wei. Characteristics of surface runoff and its nutrient loss of tress (bamboo) + grass rehabilitation at an early stage [J]. *Soil Water Conserv China*, 2005 (10): 25 – 27.
- [55] TOKY O P, RAMAKRISHNAN P S. Run-off and infiltration losses related to shifting agriculture (JHUM) in northeastern India [J]. *Environ Conserv*, 1981, **8** (4): 313 – 321.