

# 不同经营方式毛竹林氮流失年动态规律

陆荣杰<sup>1,2,3</sup>, 王 莺<sup>1,2,3</sup>, 吴家森<sup>1,2,3</sup>, 姜培坤<sup>1,2,3</sup>

(1. 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 临安 311300; 2. 浙江省竹资源与高效利用协同创新中心, 临安 311300; 3. 浙江农林大学环境与资源学院, 临安 311300)

**摘要:** 为研究自然降雨条件下不同经营方式毛竹林径流养分流失的年动态变化规律及其差异, 以浙江省杭州市临安区青山毛竹园为试验区, 在粗放经营和集约经营区域, 设置独立观察站。每次连续降雨后采集沉砂池水样, 测定总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、磷酸根离子( $\text{PO}_4^{3-}$ )含量, 同时在动态观测期中采集坡面土壤样品, 测定pH、有机质及有效N、P含量。结果表明: (1) 集约经营和粗放经营毛竹林年单位产流量分别为 $8086.52 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 $4850.95 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。(2) 毛竹林径流水氮流失以硝态氮为主。(3) 毛竹林集约经营增加了氮磷流失风险, 集约经营和粗放经营毛竹林TN年单位流失量分别为 $45.26 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $25.05 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , TP年单位流失量分别为 $0.31 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $0.21 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 与粗放经营相比, 集约经营氮磷流失分别增加了80.68%、47.62%。(4) 毛竹林径流水中TN浓度与土壤碱解氮含量成极显著负相关, 径流水中TP浓度与土壤有效磷成极显著正相关。

**关键词:** 土壤侵蚀; 地表径流; 毛竹林; 土壤养分; 养分流失; 经营方式

浙江省受亚热带季风气候影响, 雨热同期, 夏季高温多雨, 因自然降雨季节分布差异性引起的坡地养分流失、土壤肥力衰退、水体富营养化等问题日益凸显, 林地生态系统中土壤侵蚀及氮、磷等养分随地表径流向水体迁移富集的问题也逐渐引起广泛重视。降雨是土壤侵蚀的重要因子, 径流通过对泥沙的携带从而促使了土壤养分的流失, 是土壤养分流失的载体, 它既能随土粒迁出迟效养分, 又能溶解迁出速效养分, 迁出的数量决定于迁移浓度和径流量。降雨形成的地表径流不仅导致土壤养分的流失和土壤生产力的下降, 同时也引起了水土环境的恶化, 成为水体富营养化的限制因子。目前浙江省竹林种植面积为 $78.29 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 每年因降雨侵蚀产生的氮肥流失总量约为3573~5713 t, 磷肥流失总量约为779~1013 t, 已成为水体富营养化的一个重要来源<sup>[1-2]</sup>。

以施肥、垦复、除草等土壤管理为核心的集约经营措施在毛竹林培育过程中应用越来越广, 这些人工措施一方面提高了经济效益, 但也对竹林土壤理化性质、林地养分分布、肥力指数、水土流失情况均产生了一定的影响。黄承标等<sup>[3]</sup>发现, 采用全垦抚育方式(深度30 cm)所造成的水土流失相对严重。巩万和等<sup>[1]</sup>在对肥料流失率的确定中提到人为因素, 集约程度的提高致使地表径流显著增加, 富含养分的表土层也随之流失, 尤以坡度大的竹林为甚。夏根清等<sup>[4]</sup>通过对杉—竹混交林、粗放经营毛竹林和集约经营毛竹林的研究表明, 粗放经营毛竹纯林具有较好的水文生态功能。

收稿日期: 2019-01-04; 修订日期: 2019-04-03

基金项目: 浙江省水土保持监测中心项目(ZSSJ/CG-201603018)

作者简介: 陆荣杰(1993-), 男, 浙江杭州人, 硕士, 主要从事水土保持研究。E-mail: 472797227@qq.com

通讯作者: 姜培坤(1963-), 男, 浙江嘉兴人, 教授, 主要从事土壤与环境学研究。

E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

为了了解不同经营措施对毛竹 (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) 林水土流失的影响, 本文在毛竹中心产区设置两个相邻的自然坡面 (集约经营和粗放经营), 建立独立自然坡面径流卡口观测站, 通过一年的动态监测并分别计算其流失量, 以全面掌握两种经营方式毛竹林水土流失的年动态, 为毛竹林的合理经营和水土保持提供数据支撑。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省杭州市临安区青山街道, 中心地理位置为 (30°19'N, 119°22'E), 海拔为 150~200 m。属中亚热带季风气候区, 温暖湿润, 四季分明, 多年平均降雨量 1628 mm, 降雨时空分布不均匀, 多以暴雨形式集中出现在春夏季节, 占全年降雨量的 70 % 以上。土壤为发育于岩浆岩的红壤土类。

根据营林措施不同, 将毛竹林划分为两种类型: 第1类, 集约经营, 每年进行松土垦复, 5月上、中旬结合垦复施肥1次, 肥料采用复合肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 15:15:15), 养分含量指标: N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O≥45%, 施用量为 600 kg/hm<sup>2</sup>, 肥料地表撒施, 不进行翻垦, 每年进行劈山。毛竹平均胸径 10.1 cm, 密度 3000 株·hm<sup>-2</sup>。第2类, 粗放经营, 不施肥, 不进行劈山, 林下植被保存较好, 毛竹平均胸径 9.6 cm, 密度 2400 株·hm<sup>-2</sup>。集约经营小区土壤容重 1.35 g/cm<sup>3</sup>, pH 4.90, 碱解氮 154.95 mg/kg, 有效磷 1.54 mg/kg, 有机质 40.92 g/kg; 粗放经营小区土壤容重 1.28 g/cm<sup>3</sup>, pH 5.07, 碱解氮 174.12 mg/kg, 有效磷 1.45 mg/kg, 有机质 44.37 g/kg。

### 1.2 实验设计与采样

在试验区域范围内, 分别选择相邻集约和粗放经营毛竹林小流域内闭合的“两山夹一沟”集雨区各一个, 面积分别为 2.67 hm<sup>2</sup> 和 3.67 hm<sup>2</sup>, 且所选取的两个相邻集雨区的坡度均为东坡, 坡度 25°, 海拔 160 m。在各试验点毛竹林的下方建立径流点观测站, 考虑到径流水携带的泥沙比较多以及对流失泥沙更好地收集, 选择设置二级沉砂池 (构造如图 1, 每个池子的规格为长 1.5 m, 宽 1 m, 高 1.5 m), 使流失泥沙 (主要为推移质) 沉降在一级沉砂池, 而径流水及少量泥沙 (主要为悬移质) 通过二级沉砂池连接的水表流出, 记录径流量, 水样的取样在二级沉砂池水位线以下 50~60 cm 处。

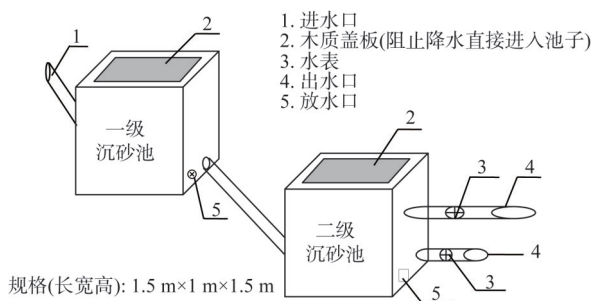


图1 二级沉砂池构造示意图

Fig. 1 Structural diagram of secondary sand sink

2016年6月至2017年5月在每次连续降雨后采集沉砂池水样, 测定径流液中TN、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>含量, 并在采集后清理沉砂池中的泥沙, 避免对下次采样造成干扰。另外为探究径流水中氮磷含量与土壤养分的相关性, 采集了2016年6月至12月自然坡面半年内几场典型降雨后的上、中、下坡0~30 cm混合土壤样品共计11次, 测定土壤养分含量, 供做相关性分析研究。

1.3 样品处理与分析

采集的水样及时运回实验室测定，其总氮测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，总磷采用钼酸铵分光光度法，硝态氮采用紫外分光光度法，铵态氮采用纳氏试剂分光光度法，磷酸根采用钼锑抗分光光度法。土样样品自然阴干后，挑去石砾、根系待测，过2 mm筛测定其pH、碱解氮（碱解扩散法）、有效磷（盐酸氟化铵浸提法），过0.147 mm筛测定其有机质（重铬酸钾容量法）。

所有数据处理与分析通过EXCEL和DPS软件进行。

2 结果分析

2.1 水文年内径流与降水情况分析

径流量大小很大程度上表征了降雨程度，从图2可知，2016年6月-2017年5月整个水文年中，两个径流小区径流高峰出现在2016年的6、8、9月以及2017年的3-5月，其中临安气象站统计的降水量最大值出现在9月为402 mm，粗放与集约径流小区径流量分别为96.08 mm、149.18 mm；降水量最小值在12月为61.4 mm，相应径流量分别为7.93 mm、20.26 mm，且集约经营方式下的径流小区月径流量普遍高于粗放。根据径流小区面积和年径流总量可得粗放和集约经营毛竹林年单位产流量为4850.95 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、8086.52 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

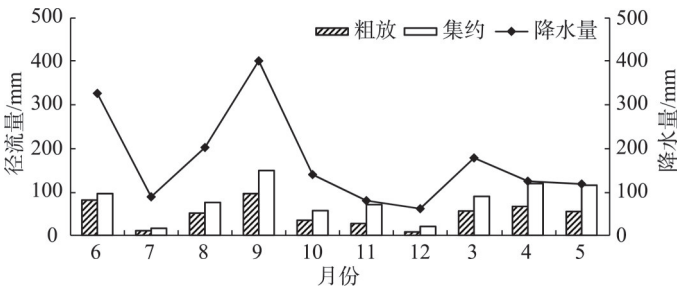


图2 径流小区月径流量与降水量统计  
Fig. 2 Statistics of monthly runoff and precipitation in runoff plot

可以发现，径流小区径流量的年际变化趋势和降水量一致。在2016年6月份的初始统计值都较高，到8月初降水量显著减少，径流量的值也随之大幅减小，8月到9月降水量显著增加，径流量也逐渐增加，到9月中旬达到最大值；之后直至2017年3月降水量和径流量大体呈下降趋势，2017年4月至5月随着降水量的逐渐平稳，径流量大小也变得相对稳定。

通过降水量转化为径流量的比例换算可得（表1），相同月份不同经营方式间径流量占比不同，同月份集约经营径流产生量均高于粗放经营；相同经营方式不同月份间径流量占比也不同。

表1 径流小区月径流量占降水量比例  
Table 1 Ratio of monthly runoff to precipitation in runoff plot

月份	6	7	8	9	10	11	12	3	4	5
粗放经营/%	24.77	11.67	25.40	23.90	24.70	34.15	12.91	31.19	53.25	46.31
集约经营/%	29.31	18.24	37.40	37.11	40.56	88.68	33.00	50.22	95.51	97.59

2.2 毛竹林氮磷养分流失的动态

2.2.1 毛竹林氮素流失动态分析

2016年6月至2017年5月整个水文年内，粗放和集约两毛竹林径流小区径流水中氮

素浓度的动态变化见图3。从图中可知,粗放经营毛竹林在自然降雨条件下形成的径流水样中TN含量为3.983~6.331 mg/L,其中 $\text{NO}_3^-$ -N含量为0.087~5.352 mg/L, $\text{NH}_4^+$ -N含量为0~0.366 mg/L;集约经营径流水样中TN含量为4.100~6.570 mg/L,其中 $\text{NO}_3^-$ -N含量为0.311~5.609 mg/L, $\text{NH}_4^+$ -N含量为0~0.425 mg/L。此外还可看出,三种不同形态氮素随着降雨的动态变化规律各不相同,TN含量比较稳定,其含量没有大的波动,维持在4~6 mg/L含量范围之间,而 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N含量会随着每场降雨情况的不同出现很大的波动,可见不同形态氮素在每场降雨中随径流流失的情况不同,且其流失特征也不同。

两种经营方式下毛竹林径流水样不同形态氮素TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N的平均浓度分别为粗放:4.972 mg/L、2.429 mg/L、0.061 mg/L和集约:5.481 mg/L、2.662 mg/L、0.071 mg/L,加之集约经营小区年单位产流量大于粗放,可知集约经营毛竹林氮素流失量高于粗放,毛竹林极易产生氮流失,造成这一现象的主要原因应是集约经营下除草、开垦、施肥等农业措施的多重作用。

### 2.2.2 毛竹林磷素流失动态分析

根据水文年内,粗放和集约两毛竹林径流小区径流水中磷素浓度的动态变化图(图4),发现粗放经营毛竹林在自然降雨条件下形成的径流水样中TP含量为0~0.190 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}$ 含量普遍低于0.015 mg/L;集约经营径流水样中TP含量为0~0.228 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}$ 含量普遍

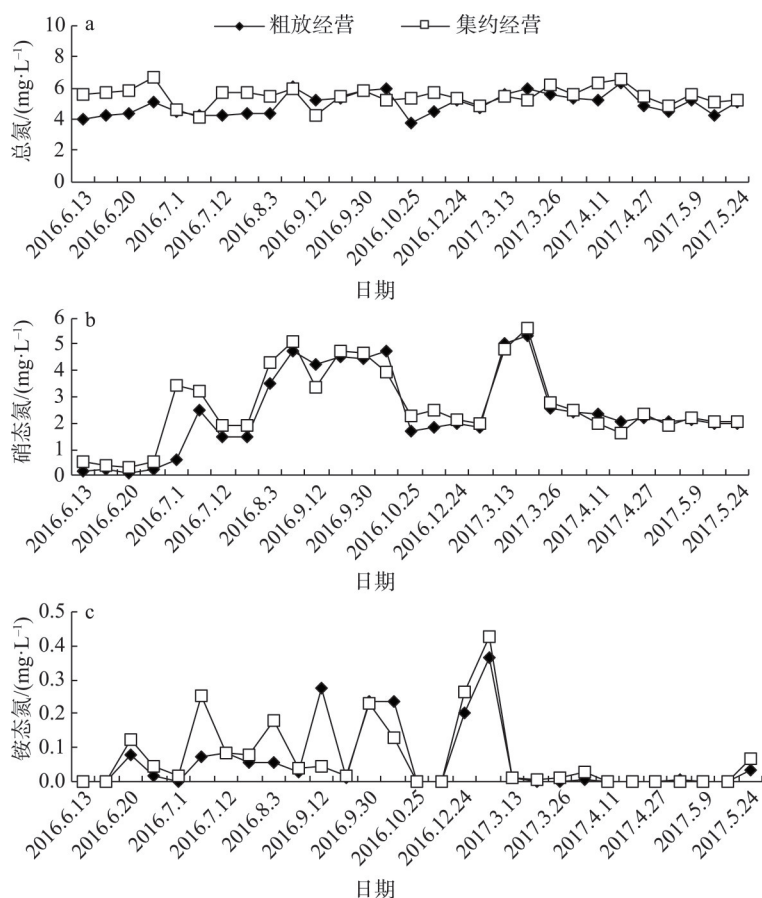


图3 不同经营毛竹林径流水中TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N含量动态变化

Fig. 3 Dynamic change of TN,  $\text{NO}_3^-$ -N, and  $\text{NH}_4^+$ -N contents in runoff water of bamboo forest with different managements



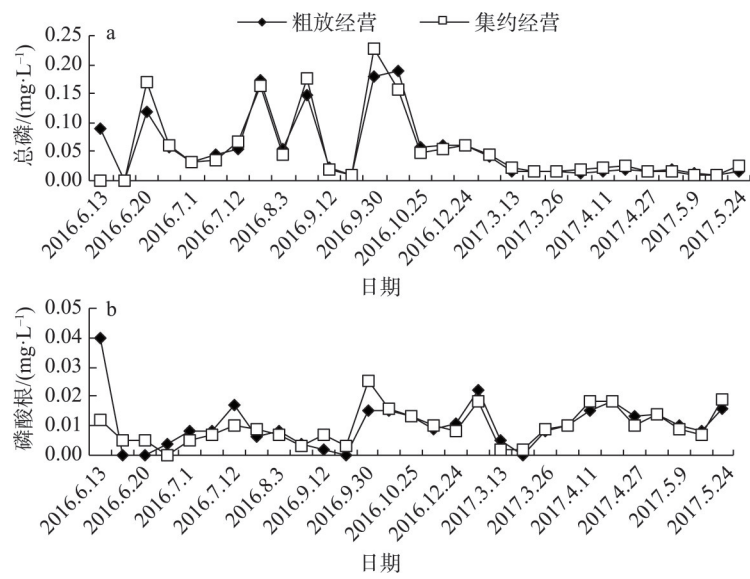


图4 不同经营毛竹林径流水中TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>含量动态变化

Fig. 4 Dynamic change of TP and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> contents in runoff water of bamboo forest with different managements

低于0.018 mg/L。此外也可看出，TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>随着降雨的动态变化规律不同，TP的变化趋势与降水量类似，即总磷流失与水文年内降水存在一定的同步性，而磷酸根浓度含量则很低，考虑到其浓度范围可以认为磷酸根浓度没有变化且基本没有产生径流流失。

两种经营方式下毛竹林水样TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的平均浓度均为0.054 mg/L、0.010 mg/L，但根据集约经营径流小区年单位产流量大于粗放，可知集约经营毛竹林磷素流失量略高于粗放，这与氮素流失量比较结果一致。

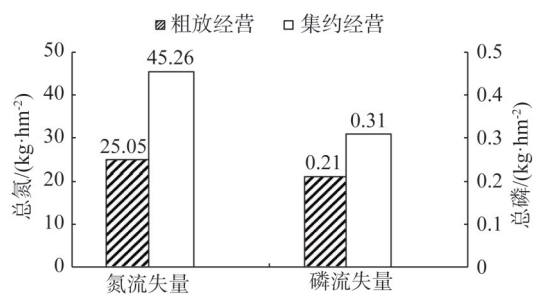
2.3 毛竹林氮磷年际流失量

图5显示了两种经营方式毛竹林在一年内由于降雨产生的氮磷养分径流流失的年单位流失量，以用来估算毛竹林径流养分流失风险。如图所示，粗放经营毛竹林径流水TN年单位流失量为25.05 kg/hm<sup>2</sup>，TP为0.21 kg/hm<sup>2</sup>；集约经营毛竹林径流水TN年单位流失量为45.26 kg/hm<sup>2</sup>，TP为0.31 kg/hm<sup>2</sup>，可见，集约化经营条件下，毛竹林的氮磷流失要高于粗放经营，氮磷流失分别增加80.68%和47.62%。

2.4 毛竹林土壤养分与径流养分含量的相关性

将水样的TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量与土壤碱解氮、水样的TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>含量与土壤有效磷分别做了XY散点图相关性分析，结果表明水样TN与坡面土壤碱解氮、水样TP与坡面土壤有效磷具有显著相关性<sup>[5]</sup>。

由图6可知，径流水样中TN含量与林地土壤碱解氮含量呈极显著负相关(P<0.01)，水样中TP含量与林地土壤有效磷含量呈极显著正相关(P<0.01)，表明林



注:图中氮磷流失量为水样TN、TP的年单位流失量。

图5 毛竹林氮磷年流失量

Fig. 5 Annual runoff loss of nitrogen and phosphorus in bamboo forest

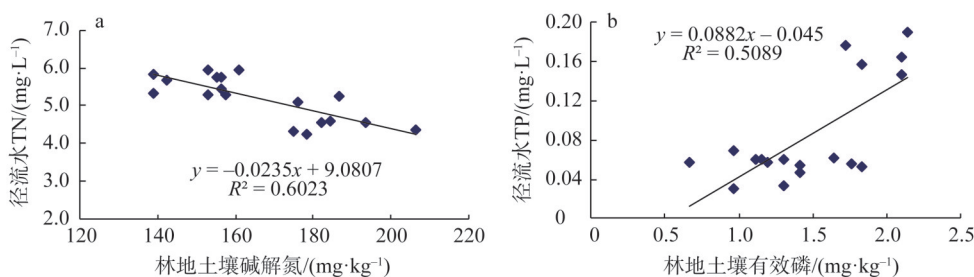


图6 毛竹林水土TN、TP养分相关性

Fig. 6 Correlation of total nitrogen and total phosphorus nutrient in soil and water of bamboo forest

地土壤中碱解氮含量和有效磷含量的变化情况和数值高低能较好地反映径流水中TN、TP的含量情况。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 粗放和集约经营毛竹林2个闭合区单位产流量为4850.95 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、8086.52 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 径流小区径流量的年际动态趋势与降水量一致。

(2) 径流过程中氮素流失比较普遍, 且以硝态氮为主; 粗放经营毛竹林TN年单位流失量为25.05 kg/hm<sup>2</sup>, TP为0.21 kg/hm<sup>2</sup>; 集约经营毛竹林TN年单位流失量为45.26 kg/hm<sup>2</sup>, TP为0.31 kg/hm<sup>2</sup>, 集约经营径流小区氮磷养分流失量相较于粗放经营分别增加了80.68%、47.62%。

(3) 毛竹林林地土壤中碱解氮和有效磷含量能较好地反映径流水中TN、TP, 径流水中TN浓度与土壤碱解氮含量成极显著负相关, 径流水中TP浓度与土壤有效磷含量成极显著正相关。

#### 3.2 讨论

##### 3.2.1 自然降雨下毛竹林氮磷流失特征

自然降雨下土壤氮磷径流流失的研究已有很多。鄧瑞卿等<sup>[6]</sup>对自然降雨下黑土地表氮素流失的研究认为, 雨强对径流养分浓度几乎没有影响, 但径流养分浓度随耕层土壤氮素养分浓度变化一致。傅涛等<sup>[7]</sup>的研究同样认为雨强与径流养分浓度无关, 但可影响其浓度峰值出现时间, 对养分浓度的变化过程有一定的影响, 并与养分流失量呈正相关。张丽萍等<sup>[8]</sup>得出径流中TN、TP流失量随雨强的增加而增加的结论。此外, 已有研究表明氮素流失以溶解态为主, 磷素流失则以泥沙的吸附态为主。刘俏等<sup>[9]</sup>的研究发现氮素流失与降水具有明显的同步性, 氮素流失多发生在梅雨和台风季节。张兴昌等<sup>[10]</sup>认为硝酸铵主要随径流流失, 以泥沙颗粒流失量甚微。左继超等<sup>[11]</sup>对自然降雨下红壤坡地磷素流失的研究表明地表径流、壤中流和地下径流磷素输出均以颗粒态为主, 占磷输出总量的64%~97%。徐国策等<sup>[12]</sup>的模拟实验发现玉米小区和裸地小区的磷素流失总量均随降雨强度的减小而降低。张威等<sup>[13]</sup>对水稻田磷径流流失特征的研究表明, 降雨量与径流量之间呈极显著正相关, 但两者对磷素流失量无明显影响。

毛竹林氮磷流失特征不同, 磷流失总量相对较低, 径流水中PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>含量很低, 表明磷

素流失主要还是以泥沙吸附态及有机结合态为主;通过计算水文年内小区径流各形态氮素流失总量得,粗放和集约小区总氮径流流失量分别为91.93 kg和120.85 kg,硝态氮占总氮的比例分别为52.83%和51.02%,铵态氮占总氮比例分别为1.11%和0.87%,氮流失总量相对较高,铵态氮含量很低,由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 易挥发,易被土壤所吸附或者是在微生物的作用下转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ <sup>[6]</sup>, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不容易受到土壤的吸附,在自然降雨条件下易发生径流流失,表明氮素流失以溶解态为主,并多以硝酸根离子形式存在。

分析发现,径流水中不同形态养分在不同月份的流失情况不同。从图3、图4可知径流水水样 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP在3月份的含量较之前出现明显的降低变化,其中铵态氮含量更是几近于0浓度含量,之后的三个月内含量也没有升高直至6月才开始出现初步的抬升,而 $\text{PO}_4^{3-}$ 、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较之前没有出现明显的反常变化, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的径流流失主要集中在6月后的一段时间或几个月内,而在3月后的几个月内基本不发生径流流失。此外根据各养分流失年动态变化图可以看出,TN浓度含量稳定在一个小范围区域内,没有大的波动,而TP、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量会随着每场降雨情况的不同出现很大的波动。这与已有研究<sup>[14-15]</sup>相类似,但坡地土壤养分流失过程实际上是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程,流失具体情况是降雨强度、降雨时长、气候条件等多种因素共同作用的结果。

### 3.2.2 毛竹林氮磷流失与不同经营方式差异的关系

结果表明:集约经营径流小区氮磷养分流失量相较于粗放经营分别增加了80.68%,47.62%,这与鄧瑞卿等<sup>[6]</sup>、左继超等<sup>[11]</sup>、李恩尧等<sup>[16]</sup>的研究结果一致,即林下植被覆盖可以有效降低径流中氮磷浓度,拦蓄径流,减少氮磷流失量,是影响林地水文生态功能的重要因素之一。但是也有研究得出了相反的结果,胡远安等<sup>[17]</sup>认为,随着植被覆盖增加,氮素流失浓度增大。张兴昌等<sup>[10]</sup>认为植被覆盖增加,矿质氮流失加剧。也有学者认为植被覆盖对可溶性氮素的流失具有“双重作用”,一方面促进了可溶性氮向地表径流释放,另一方面固结土壤,拦蓄径流,减少了氮素流失<sup>[18]</sup>。此外,施肥也会导致林地随径流流失的氮磷养分基数的增大,造成氮磷流失的增加,巩万合等<sup>[1]</sup>确定了竹林氮肥流失率为10%~12%,磷肥流失率为5%。总体来说,集约经营毛竹林每年进行松土垦复、地表撒施施肥、劈山等农业措施,而粗放经营毛竹林林下植被保存较好,因此粗放经营毛竹林具有较好的水文生态功能,竹林径流养分的流失也表明以免耕少耕、测土配方施肥等为核心的生态经营理念在竹林经营上日趋重要<sup>[19-20]</sup>。

### 3.2.3 水土相关性分析

值得注意的是,径流水样中TN含量与林地土壤碱解氮含量为负相关,根据经验普遍认为林地土壤中碱解氮含量高,产生的氮素流失理应也会较高,应是正相关关系,这可能是由于碱解氮含量取决于有机质含量高低<sup>[21]</sup>。我们也通过土壤碱解氮和有机质的相关分析佐证了这一论点(图7)。而有机质含量高的土壤,其土壤结构好,水稳团聚体多,并且氮素主要以溶解态流

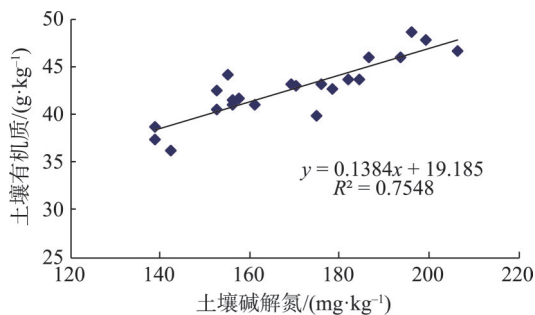


图7 毛竹林土壤碱解氮与有机质相关性

Fig. 7 Correlation between soil alkali hydrolyzed nitrogen and organic matter in bamboo forest

失,从而增强了土壤对氮素的粘结吸附作用<sup>[22-23]</sup>,降低了径流中氮素浓度,而磷素主要以泥沙吸附态流失因此仍与土壤中磷素呈正相关,这与黄程鹏等<sup>[14]</sup>的研究发现一致,此外也可能与农户施用的有机肥效能有一定关系。

### 参考文献(References):

- [1] 巩万合,顾培,沈仁芳.长江三角洲地区竹林经营中的氮磷流失负荷概算.土壤,2007,39(6): 874-878. [GONG W H, GU P, SHEN R F. Estimation of nitrogen and phosphorus loss load in bamboo forest management in Yangtze River Delta region. Soil, 2007, 39(6): 874-878.]
- [2] 王美慧,周脚根,韩增,等.亚热带典型小流域磷收支及流失特征对比研究.自然资源学报,2016,31(2): 321-330. [WANG M H, ZHOU J G, HAN Z, et al. Comparative study on P budget and loss characteristics of typical subtropical watershed. Journal of Natural Resources, 2016, 31(2): 321-330.]
- [3] 黄承标,尹华田,王凌晖,等.毛竹林不同经营管理措施对土壤理化性质的影响.竹子研究汇刊,2010,29(3): 35-41. [HUANG C B, YIN H T, WANG L H, et al. Effects of different management measures on soil physicochemical properties in bamboo forest. Journal of Bamboo Research, 2010, 29(3): 35-41.]
- [4] 夏根清,李国栋,周燕,等.不同人工经营毛竹林土壤理化性质变化.竹子研究汇刊,2012,31(3): 38-43. [XIA G Q, LI G D, ZHOU Y, et al. Changes of soil physicochemical properties in different artificial management of bamboo forest. Journal of Bamboo Research, 2012, 31(3): 38-43.]
- [5] 明道绪.田间试验与统计分析(第3版).北京:科学出版社,2013. [MING D X. Field Experiment and Statistical Analysis (Edition 3). Beijing: Science Press, 2013.]
- [6] 鄯瑞卿,孙彦君,王继红.自然降雨对黑土地表氮素养分流失的影响.水土保持学报,2005,19(5): 69-72. [QIE R Q, SUN Y J, WANG J H. Effects of natural rainfall on nitrogen loss in black soil. Journal of soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 69-72.]
- [7] 傅涛,倪九派.雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响.水土保持学报,2002,16(2): 33-35. [FU T, NI J P. Effect of rain intensity on nutrient loss of yellow me soil in three Gorges Reservoir Area. Journal of soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 33-35.]
- [8] 张丽萍,张锐波,吴希媛.不同管理方式竹林坡地降雨径流中氮磷流失特性模拟试验.水土保持学报,2011,25(6): 1-6. [ZHANG L P, ZHANG R B, WU X Y. Simulation experiment on characteristics of nitrogen and phosphorus loss in rainfall runoff of bamboo slope land with different management methods. Journal of soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 1-6.]
- [9] 刘俏,张丽萍,聂国辉,等.浙江红壤区经济林坡地氮素径流流失特征研究.农业环境科学学报,2014,33(7): 1388-1393. [LIU Q, ZHANG L P, NIE G H, et al. Study on nitrogen runoff loss characteristics of economic forest sloping land in Zhejiang red soil region. Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2014, 33(7): 1388-1393.]
- [10] 张兴昌,邵明安.水蚀条件下不同土壤氮素和有机质流失规律.应用生态学报,2000,11(2): 231-234. [ZHANG X C, SHAO M A. Loss of nitrogen and organic matter in different soils under water erosion. Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 231-234.]
- [11] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征.环境科学,2017,38(10): 4178-4186. [ZUO J C, ZHENG H J, XI T X, et al. Vertical stratified output characteristics of phosphorus with runoff in red soil sloping land under natural rainfall. Environmental Science, 2017, 38(10): 4178-4186.]
- [12] 徐国策,李鹏,成玉婷,等.模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流磷素流失特征.水土保持学报,2013,27(6): 6-10. [XU G C, LI P, CHENG Y T, et al. Characteristics of phosphorus loss in slope runoff of parrot gully small watershed in Danjiang River under simulated rainfall. Journal of soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 6-10.]
- [13] 张威,艾绍英,姚建武,等.水稻田磷径流流失特征初步研究.中国农学通报,2009,25(16): 237-243. [ZHANG W, AI S Y, YAO J W, et al. A preliminary study on the characteristics of phosphorus runoff loss in paddy field. China Agronomy Bulletin, 2009, 25(16): 237-243.]
- [14] 黄程鹏,吴家森,许开平,等.不同施肥山核桃林氮磷径流流失特征.水土保持学报,2012,26(1): 43-46. [HUANG C P, WU J S, XU K P, et al. Characteristics of runoff loss of nitrogen and phosphorus in pecan forest with different fertil-



- ization. *Journal of soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 43-46.]
- [15] 刘俏, 张丽萍, 胡响明, 等. 红壤丘陵区经济林地氮磷流失特征. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 185-190. [LIU Q, ZHANG L P, HU X M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in sloping land of economic forest in hilly red soil region. *Journal of soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 185-190.]
- [16] 李恩尧, 彭佩钦, 吴建平, 等. 红壤坡地泡桐林地表径流和养分流失研究. *湖南林业科技*, 2011, 38(2): 21-25. [LI E Y, PENG P Q, WU J P, et al. Study on surface runoff and nutrient loss of paulownia forest on red soil slope. *Hunan Forestry Science and Technology*, 2011, 38(2): 21-25.]
- [17] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律. *环境科学*, 2004, 25(6): 108-112. [HU Y A, CHENG S T, JIA H F. General rules of non-point source pollutant loss in Luxi Basin. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 108-112.]
- [18] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 牧草覆盖对坡面土壤矿质氮素流失的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2297-2301. [ZHANG Y L, LI H E, ZHANG X C, et al. Effect of forage cover on sloping soil mineral nitrogen loss. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2297-2301.]
- [19] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳. 降雨和土地利用对地表径流的影响: 以北京北护城河周边区域为例. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1391-1402. [CHEN X Y, ZHANG N, WU F F. Impacts of rainfall and land use on surface runoff: A case study of the northern moat of Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1391-1402.]
- [20] 张灿, 徐涵秋, 张好, 等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估: 以福建省长汀县为例. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 917-928. [ZHANG C, XU H Q, ZHANG H, et al. Variation of vegetation coverage and its ecological effects in typical soil and water loss areas of Southern China: A case study of Changting county, Fujian province. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 917-928.]
- [21] 李永富, 邓小华, 邹凯, 等. 湖南邵阳烟区耕层土壤碱解氮含量分布及变化趋势. *北京农学院学报*, 2013, 28(4): 22-25. [LI Y F, DENG X H, ZOU K, et al. Distribution and change trend of soil alkali hydrolyzed nitrogen content in cultivated layer of Shaoyang tobacco region, Hunan province. *Journal of Beijing Agricultural College*, 2013, 28(4): 22-25.]
- [22] 史奕, 鲁彩艳, 陈欣. 不同利用方式下黑土团聚体水稳定性与有机质关系//中国土壤学会海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会. 2004. [SHI Y, LU C Y, CHEN X. The relationship between water stability and organic matter of black soil aggregates under different utilization methods // China Earth Soil Society Symposium on Soil and Fertilizer Exchange between the Two Sides of the Taiwan Strait. 2004.]
- [23] 董坤. 不同施肥模式对蔬菜地中氮素流失影响研究. 成都: 西南交通大学, 2017. [DONG K. Effects of different fertilization modes on nitrogen loss in vegetable soil. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.]

## Effect of management intensity on runoff losses of nitrogen and phosphorus in bamboo forests in Zhejiang province

LU Rong-jie<sup>1,2,3</sup>, WANG Ying<sup>1,2,3</sup>, WU Jia-sen<sup>1,2,3</sup>, JIANG Pei-kun<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center for Bamboo Resources and High-efficiency Utilization, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To determine the effect of management intensity on runoff nutrient losses in bamboo forests under natural rainfall conditions, separate field observation stations were set up at the mouths of each field-sized catchment (micro-watershed) in extensively or intensively managed areas, at Qingshan Bamboo Orchard in Lin'an district, Hangzhou city, Zhejiang province. After every successive rainfall during the year, runoff volumes were measured, and water samples from the sand-settling tanks at the observation stations were collected and analyzed for total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+$ -N), and phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) contents. Simultaneously, soil samples were also collected and analyzed for pH, organic matter, effective nitrogen and available phosphorus contents. The results showed that: (1) Annual runoffs from intensively managed and extensively managed bamboo forests were  $8086.52 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  and  $4850.95 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , respectively; (2) Nitrogen loss in runoff from the bamboo forests was dominated by nitrate nitrogen; (3) Intensive management increased the risk of nutrient losses from the bamboo forests; the annual losses of nitrogen and phosphorus from intensively managed areas were  $45.26 \text{ kg}/\text{hm}^2$  and  $25.05 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , respectively; but they were only  $0.31 \text{ kg}/\text{hm}^2$  and  $0.21 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , respectively, from extensively managed area. Compared with losses from extensively managed area, the losses of nitrogen and phosphorus from intensively managed area increased by 80.68% and 47.62%, respectively; (4) The TN content in runoff water had a significant negative correlation with alkali-hydrolyzed nitrogen content of the soil, while the TP content in runoff water had a significant positive correlation with soil available phosphorus.

**Keywords:** soil erosion; surface runoff; bamboo forest; soil nutrient; nutrient loss; management intensity