

不同施肥对雷竹林渗漏水中可溶性有机碳、氮流失的影响

陈裴裴¹, 吴家森¹, 郑小龙¹, 姜培坤^{1*}, 吴建军²

(1 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300; 2 浙江大学环境与资源学院, 浙江杭州 310058)

摘要:【目的】雷竹(*Phyllostachys praecox f. preveynalis*)是一种在我国亚热带地区被广泛引种栽培的优良笋用竹。为了提高竹笋产量,农民不合理地大量施用化肥,已造成土壤盐化、酸化,地力破坏,导致土壤磷钾大量残留,特别是氮磷的大量流失已造成了周边水体严重污染。虽然土壤 DOC 和 DON 在土壤全碳、全氮含量中所占的比例很小,但却是土壤有机质中最重要和最活跃的部分。因此本研究的目的旨在通过全年动态监测雷竹林渗漏水中溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)浓度的变化,探明减量施用化肥和有机肥对减少雷竹林氮渗漏淋失负荷的作用,以便为解决雷竹生产上的面源污染问题提供理论依据。【方法】试验设置了5个处理为对照(CK)、常规施肥(CF)、减量有机肥(DO)、减量无机肥(DI)和减量有机无机肥(DOI),3次重复,随机区组设计,小区面积为100 m²。试验于5月18日、9月7日、11月9日分别施用肥料总量的40%、30%和30%,施肥后均进行浅翻,深度5 cm左右。【结果】不同施肥雷竹林中 DOC 及 DON 平均浓度为33.7~45.5 mg/L和6.6~12.6 mg/L,DOC 和 DON 的渗漏流失负荷为84.5~138.2 kg/hm²和17.2~46.3 kg/hm²。DOC 渗漏流失负荷大小顺序为常规施肥(138.2 kg/hm²)>减量有机肥(133.7 kg/hm²)>减量无机肥(120.9 kg/hm²)>不施肥(99.8 kg/hm²)>减量有机无机肥(84.5 kg/hm²),而 DON 渗漏流失负荷大小顺序为减量有机肥(46.3 kg/hm²)>常规施肥(35.3 kg/hm²)>减量有机无机肥(34.8 kg/hm²)>减量无机肥(31.1 kg/hm²)>不施肥(17.2 kg/hm²)。渗漏水中 DOC(mg/L)与 DON(mg/L)之间不存在显著相关性。【结论】大幅减少化肥和有机肥用量,并推广有机肥和无机肥配施,不仅维持了雷竹竹笋的较高产量,还能减少土壤养分损失,具有经济和环境双重效益,是雷竹合理施肥的发展方向。

关键词: 溶解性有机碳; 溶解性有机氮; 降雨; 流失负荷; 渗漏水

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2014)05-1303-08

Effects of different fertilization treatments on loss of dissolved organic carbon and nitrogen in seepage water under *phyllostachy praecox* stand

CHEN Pei-pei¹, WU Jia-sen¹, ZHENG Xiao-long¹, JIANG Pei-kun^{1*}, WU Jian-jun²

(1 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;

2 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: 【Objectives】Lei bamboo (*Phyllostachys praecox f. preveynalis*) is an excellent variety for producing bamboo shoots and is widely distributed in the subtropical area of China. In order to improve yields of bamboo shoots, intensive management practices including over-application of chemical fertilizers have been adopted by the farmers. Although the farmers obtain great economic benefits, these practices bring out a serious new problems, such as bamboo grove degradation or even death, water system pollution, decline in soil quality and so on. Although the percentage of dissolved organic carbon(DOC)and organic nitrogen(DON)in soil was very low, they were sensitive for the change of soil environment. Change in DOC and DON concentrations in the seepage water from the soil under *phyllostachy praecox* stand in the whole year was monitored to ascertain the effects of reducing

收稿日期: 2013-08-12

接受日期: 2014-06-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“南方丘陵山地农区农业面源污染防控技术集成与示范”(2012BAD15B04-2)资助。

作者简介: 陈裴裴(1989—), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事土壤与水土保持研究。E-mail: 15868145552@126.com

* 通信作者 E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

chemical and organic fertilizer rates on the concentrations of DOC and DON. **【Methods】** Five treatments were designed: conventional fertilizer (CF), decreased organic fertilizer (DO), decreased inorganic fertilizer (DI), decreased organic and inorganic fertilizer (DOI), no fertilizer (CK). Fertilizers were separately applied in May 18, September 7 and November 9 with respective 40%, 30% and 30% of total amount of fertilizer, and then plowed into soil at the depth of 5 cm. **【Results】** The results showed that the average concentrations of DOC and DON in the seepage water for the different fertilization treatments were 33.7–45.5 mg/L and 6.6–12.6 mg/L, respectively, whereas the average seepage loss loads of DOC and DON for the different fertilization treatments were 84.5–138.2 kg/ha and 17.2–46.3 kg/ha, respectively. The seepage loss loads of DOC from the soil with different fertilization treatments decreased as follows: CF (138.2 kg/ha) > DO (133.7 kg/ha) > DI (120.9 kg/ha) > CK (99.8 kg/ha) > DOI (84.5 kg/ha), whereas the seepage loss loads of DON from the soil with different fertilization treatments decreased as follows: DO (46.3 kg/ha) > CF (35.3 kg/ha) > DOI (34.8 kg/ha) > DI (31.1 kg/ha) > CK (17.2 kg/ha). No significant relationship was found between DOC and DON concentrations in the seepage water. **【Conclusion】** Decreasing inorganic fertilizer or decreasing organic fertilizer, and the combined application of organic and inorganic fertilizer, not only could keep the yield, but also play a remarkable role in reducing the loss loads of nutrient under *Phyllostachys praecox* stands suggesting that reducing inorganic fertilizer rate and applying organic fertilizer were the right direction for *Phyllostachys praecox*.

Key words: dissolved organic carbon (DOC); dissolved organic nitrogen (DON); rainfall; loss load; seepage water

土壤溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是指土壤中有效性较高, 易被土壤微生物分解利用, 对植物养分供应有最直接作用的那部分有机质^[1-2], 主要包括溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、溶解性有机氮 (dissolved organic nitrogen, DON)、溶解性有机磷等。土壤中 DOC 和 DON 是土壤碳、氮循环的重要组成部分^[3], 虽然它们在土壤全碳、全氮含量中所占的比例很小, 但却是土壤有机质中最重要和最活跃的部分^[2-4]。谢秉楼等^[5]研究结果显示, 土壤 DON 占土壤全氮比例达 1.29%~4.83%, 平均为 2.59%。土壤 DOC 浓度和通量是土壤环境变化的敏感指标, 在陆地生态系统碳循环中起着重要作用^[6], 它在环境中的重要性在于参与了 N、P、S 以及重金属和有机污染物的迁移^[7]。土壤 DON 是土壤氮素中活跃的组分之一^[8]。它的移动性相对较强, 能随水分运移而发生径流或淋溶损失, 引起环境污染^[9]。

雷竹 (*Phyllostachys praecox* f. *preveynalis*) 是一种在我国亚热带地区被广泛引种栽培的优良笋用竹。20 世纪 80 年代以来, 以冬季地表增温覆盖和重施化肥为核心的雷竹早产高效栽培技术在生产中得到了广泛应用^[10]。年施入化肥 3375 kg/hm², 其中纯氮 855 kg/hm²、P₂O₅ 337 kg/hm², 有机肥全年用量为 80~100 t/hm², 氮肥用量是国际限量标准的 3 倍以上。该技术的应用, 虽然提高了竹农的经济效益, 但也导致了土壤的酸化, 土壤有机质和速

效氮、磷、钾的大幅增加, 从而导致氮磷等化学元素的大量流失^[11-13] 和雷竹产区周边水体的污染^[14]。本研究旨在通过定位监测雷竹林土壤渗漏水中 DOC 和 DON 随生长季节的变化, 探讨降雨量与渗漏水 DOC 和 DON 浓度之间的关系, 明确减量施肥在减少林地养分渗漏流失中的作用, 以便为解决雷竹生产上的面源污染问题提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区设在浙江省临安市浙江农林大学实验林场, 该区域是我国雷竹分布的中心区, 属中纬度北亚热带季风气候。全年降雨量平均 1628 mm, 年平均气温为 15.8℃, 七月为最热月, 平均为 28.1℃, 1 月为最冷月, 平均为 3.4℃, 极端高温和极端低温分别为 41.9℃和 -13.3℃, 平均日照时数 1939 h, 无霜期 234 d。土壤为红壤, 0~30 cm 土层有效磷、速效钾、碱解氮含量分别为 414 mg/kg、120 mg/kg 和 271 mg/kg, 有机碳和全氮含量分别为 30.3 g/kg 和 2.39 g/kg, pH 值 4.1。

1.2 研究方法

试验设置在已建园 15 a 的地势平坦的雷竹园, 并进行过 6 a 的冬季覆盖, 试验地有大量覆盖物和凋落物未清除。试验始于 2012 年 4 月, 设 5 个处理, 3 次重复, 随机区组设计, 每个小区面积为 100 m²。小区之间用水泥预制板隔离。

雷竹属浅根性植物,据调查显示,雷竹的竹鞭90%分布在5—30 cm 的土层范围内^[15],约81%的竹鞭分布于0—20 cm 的土壤中,其中,10—20 cm 深度处竹鞭分布最多,占41%,超过30 cm 深处分布很少,仅占1.2%^[16]。因此30 cm 深度线作为分淋失的界限,在每个处理小区内的中心位置埋设土壤渗漏水收集装置,收集器的2个集水槽埋设在离地表30 cm 处,面积各为15 cm ×40 cm,一个集水桶收集渗漏水,用100 mL 的针筒接着抽水软管通入出

水管中,从集水桶中抽出渗漏水,用量杯测量每次的渗漏水量^[17]。同时在试验地周边空地布置雨量筒,测定降雨量。5个处理的肥料用量及养分量见表1。减量无机肥、减量有机肥以及减量有机无机肥配合处理的施氮量相当于常规施肥处理的60%。本试验于5月18日、9月7日、11月9日分别施用肥料总量的40%、30%和30%,施肥后均进行浅翻,深度5 cm 左右,第三次施肥后没有对雷竹林进行覆盖。

表1 试验各处理肥料用量及养分量 [kg/(hm²·a)]
Table 1 Fertilizer rates and nutrient rates of different treatments

处理 Treatment	施肥量 Fertilizer amount			化肥养分量 Chemical nutrient			有机养分量 Organic fertilizer nutrient		
	复合肥 Compound fertilizer	尿素 Urea	猪粪 Pig manure	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
不施肥 CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
常规施肥 CF	2250	1110	0	848.1	337.5	337.5	0	0	0
减量无机肥 DI	2250	376	0	510.5	337.5	337.5	0	0	0
减量有机肥 DO	0	0	93000	0	0	0	511.2	520.8	325.5
减量有机无机肥 DOI	0	554	46400	254.8	0	0	255.2	259.8	162.4

注 (Note): CK—No fertilizer, CF—Conventional fertilizer, DI—Decreased inorganic fertilizer, DO—Decreased organic fertilizer, DOI—Decreased organic and inorganic fertilizer. 复合肥 Compound fertilizer (15-15-15); 尿素 Urea (46%); 猪粪 Pig manure (N 0.55%、P₂O₅ 0.56%、K₂O 0.35%, 含水量 water 72.0%)。

同年5~11月,降雨后收集渗漏水装置中的水样,测量体积后,及时带回实验室测定水化指标,共采集10次水样。2012年降雨主要集中在5~11月,可基本视为降雨对渗漏水养分影响的全年动态观察。渗漏水经定量滤纸过滤后,用于测试分析。碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定DN, TOC-V_{CPH/CPN}总有机碳氮分析仪测定DOC, NO₃⁻-N、NH₄⁺-N在ICS-1500离子色谱分析仪上测定;DON由DN减去NO₃⁻-N和NH₄⁺-N计算得到。不同施肥雷竹林渗漏水的流失负荷通过以下公式计算得到:总流失负荷=Σ每次浓度的平均值×每次渗漏水量平均值。

养分农学利用率指所施单位养分所增加的作物经济产量,即施用肥料的每千克养分(如N、P、K等)提高作物经济产量的能力,因此它是表征养分利用效率最直观的方法,养分农学利用率可按下式计算^[18]:

养分农学利用率 (kg/kg) = (施肥区作物经济产量 - 无肥区作物经济产量) / 施肥量

2 结果与分析

2.1 不同施肥雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 浓度动态变化

不同施肥雷竹林渗漏水 DOC 动态变化如图1(a)所示。从第一次施肥至第二次施肥前,DOC 浓度整体呈下降趋势,6月28日采集水样时,降雨量的数值最大为130 mm,浓度才有所提高,随后在9月7日和11月9日两次施肥后,浓度再次升高。不同施肥雷竹林渗漏水中的平均浓度为33.7~45.5 mg/L,其顺序为常规施肥>减量无机肥>减量有机肥>不施肥>减量有机无机肥(表2)。从图1(a)中可以看到,6月11日常规施肥(99.6 mg/L)浓度明显高于其他处理。

不同施肥雷竹林渗漏水 DON 动态变化如图1(b)所示。DON 整体的变化趋势和DOC一致,第一次施肥后随着时间的变化逐渐下降,直至9月和11月两次施肥后才有所提高,9月15日样品浓度除以8月30日样品浓度的倍数分别为:不施肥3.8、常

规施肥 20.7、减量有机肥 1.8、减量无机肥 5.7、减量有机无机肥 13.5,但是 11 月 12 日渗漏水中 DON 浓度相对于 9 月 15 日渗漏水 DON 浓度有显著降低。不同施肥的平均浓度大小顺序为常规施肥 > 减量有机肥 > 减量有机无机肥 > 减量无机肥 > 不施肥,并且在 6.6 ~ 12.6 mg/L 之间波动(表 2)。

减量有机肥和减量有机无机肥处理渗漏水中 DON 浓度变化较大,减量有机肥处理在第二次施肥

后相对于 8 月 30 日样品浓度有大幅上升,与其他的施肥处理相比,浓度上升的幅度并不大,减量有机肥处理 11 月与 9 月的渗漏水样 DON 浓度比值仅为 1.8,远低于其他的处理。减量有机无机肥处理的渗漏水中 DON 浓度变化与整体一致,但是在 9 月 15 日水样浓度增加后,11 月 12 日水样浓度从 33.9 mg/L 大幅度下降到 0.6 mg/L。

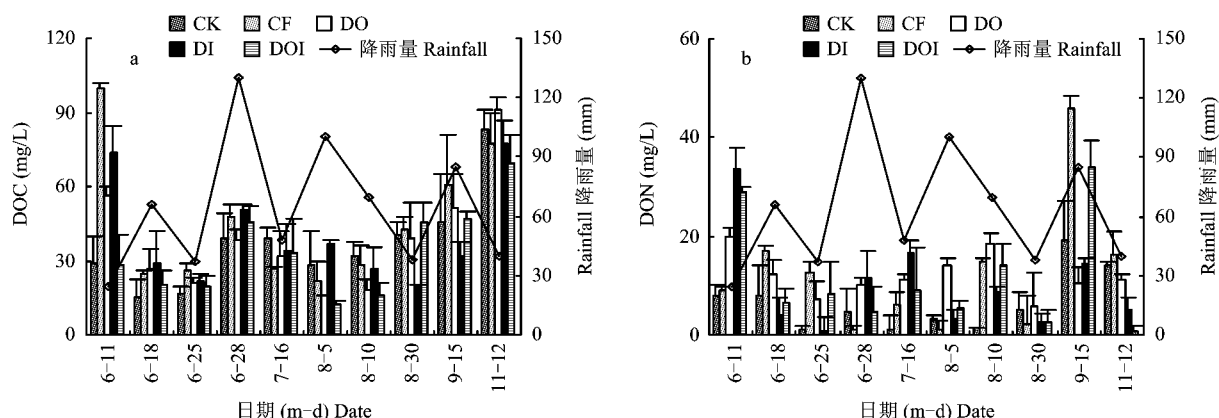


图 1 不同施肥雷竹林渗漏水中 DOC 和 DON 浓度动态变化

Fig.1 Dynamic changes of DOC and DON concentrations in the leakage water from the soil with different fertilization under *Phyllostachy praecox* stand

[注(Note): CK—不施肥 No fertilizer, CF—常规施肥 Conventional fertilizer, DI—减量无机肥 Decreased inorganic fertilizer, DO—减量有机肥 Decreased organic fertilizer, DOI—减量有机无机肥 Decreased organic and inorganic fertilizer.

表 2 不同施肥对雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 平均浓度及总流失负荷的影响

Table 2 Effects of different fertilization on the average concentration of DOC and DON as well as total loss loads in the leakage water from the soil with under *Phyllostachy praecox* stand

处理 Treatment	浓度 Concentration			总流失负荷 Total loss load		
	DOC (mg/L)	DON (mg/L)	DOC/DON	DOC (kg/hm ²)	DON (kg/hm ²)	DOC/DON
不施肥 CK	36.9 ± 4.2 b	6.6 ± 1.7 c	5.6	99.8 ± 13.9 bc	17.2 ± 4.5 c	5.8
常规施肥 CF	45.5 ± 5.7 a	12.6 ± 5.8 a	3.6	138.2 ± 12.8 a	35.3 ± 11.8 b	3.9
减量有机肥 DO	39.0 ± 4.1 ab	12.1 ± 1.0 bc	3.2	133.7 ± 12.6 a	46.3 ± 2.2 a	2.9
减量无机肥 DI	40.1 ± 4.7 ab	10.1 ± 2.6 bc	4.0	120.9 ± 17.7 ab	31.1 ± 9.6 b	3.9
减量有机无机肥 DOI	33.7 ± 3.1 b	11.4 ± 1.8 b	3.0	84.5 ± 8.6 c	34.8 ± 2.7 b	2.4

注(Note): CK—No fertilizer, CF—Conventional fertilizer, DI—Decreased inorganic fertilizer, DO—Decreased organic fertilizer, DOI—Decreased organic and inorganic fertilizer. 数据后不同字母表示不同施肥处理差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters with different fertilization treatments mean significant at 5% level.

2.2 不同施肥雷竹林渗漏水 DOC、DON 相关性

从图 2 可以看出,不同施肥雷竹林渗漏水 DOC 与 DON 之间不存在相关性。不施肥处理浓度的 DOC/DON 最高(5.6),其次是减量无机肥处理(4.0),其他的三个处理的 DOC/DON 在 3.0 ~ 3.6

范围内波动(表 2)。

2.3 不同施肥雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 流失负荷变化

如图 3 所示,不同施肥雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 流失负荷动态变化整体呈梯式上升趋势。不

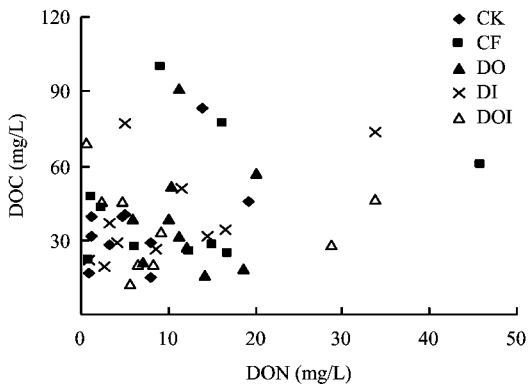


图2 不同施肥雷竹林渗漏水中 DOC 和 DON 浓度之间的相关性

Fig. 2 Correlation between DON and DOC concentrations in the water leakage from the soil with different fertilization under *Phyllostachy praecox* stand

[注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer, CF—常规施肥 Conventional fertilizer, DI—减量无机肥 Decreased inorganic fertilizer, DO—减量有机肥 Decreased organic fertilizer, DOI—减量有机无机肥 Decreased organic and inorganic fertilizer.

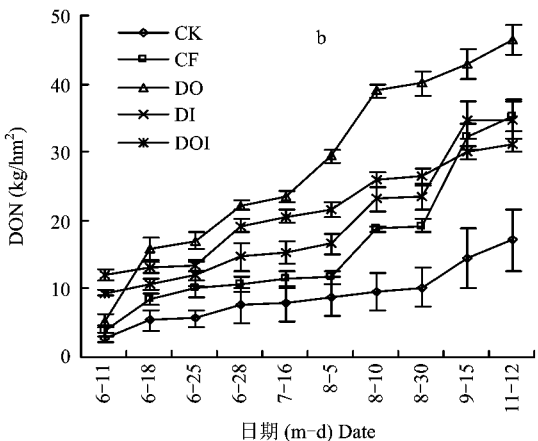
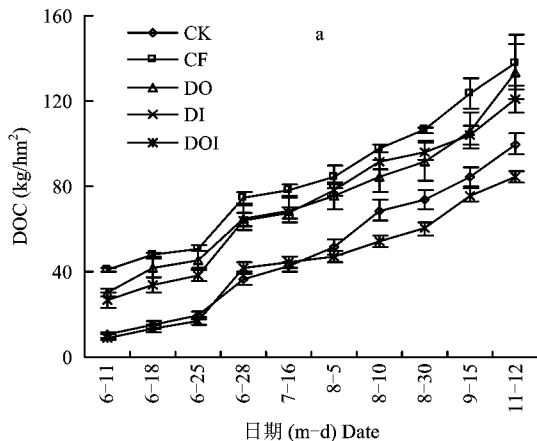


图3 不同施肥雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 累计流失负荷

Fig. 3 The total loss loads of DOC and DON in the leakage water from the soil with different fertilization under *Phyllostachy praecox* stand

[注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer, CF—常规施肥 Conventional fertilizer, DI—减量无机肥 Decreased inorganic fertilizer, DO—减量有机肥 Decreased organic fertilizer, DOI—减量有机无机肥 Decreased organic and inorganic fertilizer.

氮施肥,减量无机肥、减量有机无机肥以及减量有机肥相对于常规施肥减氮 40%。减量无机肥和减量有机无机肥的肥料农学利用率与常规施肥很接近。

3 讨论

3.1 雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 浓度的动态变化

雷竹林渗漏水中 DOC 和 DON 浓度的动态变化取决于降雨量的大小和土壤中碳和氮的浓度。降雨是影响土壤 DOC 迁移的重要因素,侧渗是表土 DOC

同施肥雷竹林渗漏水 DOC 流失负荷在 84.5 ~ 138.2 kg/hm² 之间,大小顺序为常规施肥 > 减量有机肥 > 减量无机肥 > 不施肥 > 减量有机无机肥; DON 流失负荷为 17.2 ~ 46.3 kg/hm²,大小顺序为减量有机肥 > 常规施肥 > 减量有机无机肥 > 减量无机肥 > 不施肥(表 2)。减量有机肥、常规施肥、减量有机无机肥、减量无机肥处理的 DON 流失负荷分别为 46.3、35.3、34.8 和 31.1 kg/hm²,分别占施氮量的 9.1%、4.2%、6.8%、6.1%。渗漏水流失负荷 DOC/DON 的排序为不施肥(5.8) > 常规施肥(3.9) = 减量无机肥(3.9) > 减量有机肥(2.9) > 减量有机无机肥(2.4)(表 2)。

2.4 不同施肥对雷竹林竹笋产量及肥料农学利用率的影响

不同施肥对雷竹林竹笋产量及肥料农学利用率的影响如表 3 所示。减量施肥与常规施肥间产量相差不多,基本保证正常的产量。本次试验主要是进行减

淋溶的主导过程^[19]。在相同土壤碳和氮浓度下,土壤渗漏水愈多,其 DOC 和 DON 浓度就低。本研究的结果表明,雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 浓度与降雨量之间没有明显的相关性。雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 浓度的动态变化更多地取决于土壤中的碳和氮浓度,未施肥前土壤有机碳和全氮含量分别为 30.3 g/kg 和 2.39 g/kg,本研究的雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 浓度在 5 月 18 日、9 月 7 日和 11 月 9 日 3 次施肥后有明显升高就充分说明了这一点。雷

表3 不同施肥处理对雷竹肥料农学利用率的影响 (kg/kg, 鲜笋基)

Table 3 Effects of different treatments on fertilizer agronomic efficiency of *Phyllostachy praecox* stand (Fresh shoot)

处理 Treatment	竹笋产量 Shoot yield (kg/hm ²)	肥料农学利用率 Fertilizer agronomic efficiency (kg/kg)
不施肥 CK	7580	2.42
常规施肥 CF	11267	2.42
减量无机肥 DI	10308	2.30
减量有机无机肥 DOI	10758	2.34
减量有机肥 DO	9325	1.87

注 (Note): CK—No fertilizer, CF—Conventional fertilizer, DI—Decreased inorganic fertilizer, DO—Decreased organic fertilizer, DOI—Decreased organic and inorganic fertilizer.

竹林渗漏水 DON 浓度的动态变化还与雷竹的生长有密切关系,例如第3次施肥(11月9日)后,11月12日渗漏水中 DON 的浓度迅速下降可能是由于此时正是孕笋期,需要吸收大量的养分所致,其中减量有机无机施肥处理变化特别明显,从9月15日水样浓度 33.9 mg/L 大幅度下降到 0.6 mg/L,有可能是因为有机无机肥配施使养分更容易被雷竹吸收,减量有机无机肥的竹笋产量相对其他减量施肥较高。

3.2 不同施肥对雷竹林渗漏水中 DOC 和 DON 平均浓度的影响

施肥量和肥料的种类对雷竹林渗漏水中 DOC 和 DON 平均浓度有显著的影响。雷竹林渗漏水中 DOC 平均浓度以常规施肥处理的最大(45.5 mg/L),该处理虽然没有施用有机肥,但供试土壤的有机质含量很高,再加上化肥用量最高。长期单施高量化肥会破坏土壤团聚体,促进有机质的分解,从而导致碳流失量的增加^[20-21]。减氮 40% 的不同处理中,减量有机肥,减量无机肥以及减量有机肥等3个处理 DOC 的平均浓度相对于常规施肥分别降低了 14.3%、11.9%、25.9%,减量施肥 DON 的平均浓度相对于常规施肥分别降低了 3.97%、19.8%、9.52%,减量施肥 DON 平均浓度降低的百分比相对于 DOC 来说较低,这可能与 DON 所占渗漏水中可溶性氮的百分比不高有关,本次试验中雷竹林不同施肥 DON 占可溶性氮的百分比分别为:不施肥 19.8%、常规施肥 11.3%、减量有机肥 24.7%、减量无机肥 11.2%、减量有机无机肥 20.6%,在

11.2%~24.7% 范围内波动,平均为 17.5%。

DOC 平均浓度顺序为:常规施肥(45.5 mg/L) > 减量无机肥(40.1 mg/L) > 减量有机肥(39.0 mg/L) > 不施肥(36.9 mg/L) > 减量有机无机肥(33.7 mg/L),DON 平均浓度为常规施肥(12.6 mg/L) > 减量有机肥(12.1 mg/L) > 减量有机无机肥(11.4 mg/L) > 减量无机肥(10.1 mg/L) > 不施肥(6.6 mg/L)(表2)。总体上是减量施肥低于常规施肥且高于不施肥,但是减量有机无机肥 DOC 的平均浓度反而比不施肥低,这可能是减量有机无机肥配施有利于竹笋产量的提高,即有利于雷竹生长及出笋过程中对土壤养分的吸收,因而降低了渗漏水中的 DOC 浓度。

3.3 不同施肥对雷竹林渗漏水 DOC 和 DON 流失负荷的影响

雷竹林土壤渗漏水 DOC 和 DON 浓度及淋失量的多少取决于降雨量^[22],而后者又受制于施肥量和肥料种类、施肥时间等因素。随着施肥量的增加,雷竹林土壤渗漏水中 DOC 和 DON 浓度及淋失量明显提高。虽然减量有机肥处理氮用量只有常规施肥处理的 60%,但前者的 DON 流失负荷(46.3 kg/hm²)却比后者(35.3 kg/hm²)高,前者 DON 流失负荷占施氮量的 9.1%,而后者却占施氮量的 4.2%,这说明有机肥中的氮比化肥中的氮更易淋失。

DOC 进入土壤溶液加大了土壤中养分离子被淋失的可能性,从而导致土壤养分损失和水体富营养化^[4],它引起的水体富营养化有时比氮磷污染更严重。水溶性有机氮是森林土壤氮流失的主要形式之一,占总氮比例达 28%^[23]。

雷竹林土壤在氮磷富集过程中,氮磷流失风险比桑园和菜地更大^[24-25]。雷竹林土壤的氮、磷径流和渗漏淋失负荷均很高。本研究中,不同施肥处理雷竹林碳和氮累计渗漏淋失负荷分别高达 84.5~138.2 kg/hm² 和 17.2~46.3 kg/hm²,与其他研究者的结果大致相当^[26-28]。

3.4 不同施肥对雷竹林竹笋产量及肥料农学利用率的影响

陈闻等^[29]研究表明,常规施肥的肥料农学利用率最低,氮、磷和钾(鲜笋)农学利用率分别为 4.7%、23.6% 和 14.2% kg/kg,临安作为浙江省雷竹主产区,如需提高肥料利用率,降低养分流失风险,减少 30%~50% 的施肥量是可行和必要的。同时有研究表明,人畜粪与无机化肥进行配合施用,比单施等量肥料增产 10%~15%^[30]。

段然等^[31]研究发现,减量施肥对湖垵旱地玉米、油菜轮作产量无显著影响,不但能降低氮肥投入量的 15%~30%、磷肥投入量的 20%,还有助于提高氮、磷肥料利用率,最高达 13.85% 和 5.13%。赵庆雷等^[32]研究结果显示,减施 15% 氮磷肥对土壤氮磷含量和稻谷产量均影响不大,但是降低了经济成本,显著提高了氮磷肥利用效率,减轻了氮磷流失风险。

本次研究结果显示,减量无机肥和减量有机无机肥(减氮 40%)在不减产的前提下肥料农学利用率与常规施肥接近。

4 结论

雷竹集约化栽培中,由于大量化肥、有机肥、稻草和砻糠的使用,造成了林地土壤氮、磷、可溶性碳等渗漏流失。不同施肥处理的雷竹林渗漏水 DOC 流失负荷为 84.5 kg/hm²~138.2 kg/hm²,而 DON 流失负荷为 17.2 kg/hm²~46.3 kg/hm²。减量有机肥、常规施肥、减量有机无机肥、减量无机肥处理的 DON 流失负荷分别为 46.3、35.3、34.8 和 31.1 kg/hm²,分别占施氮量的 9.1%、4.2%、6.8%、6.1%。减量无机肥和减量有机无机肥(减氮 40%)在不减产的前提下,肥料农学利用率与常规施肥接近,尤其是减量有机无机肥配施的效果最佳。因此,大幅减少化肥和有机肥用量,并推广有机肥和无机肥配施,不仅维持了雷竹竹笋的较高产量和经济效益,还能减少土壤养分损失,具有经济和环境双重效益,是雷竹合理施肥的发展方向。

参考文献:

- [1] Janzen H, Brandt C, Lafond S *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [2] Kalbitz K, Solinger S, Park J H *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [3] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H *et al.* Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen—a synthesis for temperate forests[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52: 173-205.
- [4] 杨佳波, 曾希柏. 水溶性有机物在土壤中的化学行为及其对环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 206-211.
- [5] Yang J B, Zeng X B. Behavior and environmental impact of soil dissolved organic matter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(5): 206-211.
- [6] 谢秉楼, 吴家森, 徐秋芳, 等. 覆盖与施肥处理对雷竹林土壤水溶性有机氮的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1168-1171.
- [7] Xie B L, Wu J S, Xu Q F *et al.* Effect of different fertilization and mulching on water soluble organic N of the soil under *Phyllostachys praecox* stands[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1168-1171.
- [8] Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: compositional changes during the biodegradation of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(6): 595-600.
- [9] Jimenez J J, Lal R. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. Critical review[J]. *Plants Science*. 2006, 25: 337-365.
- [10] Christou M, Avramides E J, Roberts J P *et al.* Dissolved organic nitrogen in contrasting agricultural ecosystems[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2005, 37: 1560-1563.
- [11] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds[J]. *Nature*, 2002, 415(6870): 416-419.
- [12] 方伟, 何钧潮, 卢学可. 雷竹早产高效栽培技术[J]. *浙江林学院学报*, 1994, 11(2): 121-128.
- [13] Fang W, He J C, Lu X K. Cultivation techniques of early shooting and high yielding for lei bamboo sprout[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1994, 11(2): 121-128.
- [14] 蔡荣荣, 黄芳, 孙达, 等. 集约经营雷竹林土壤有机质的时空变化[J]. *浙江林学院学报*, 2007, 24(4): 450-455.
- [15] Cai R R, Huang F, Sun D *et al.* Temporal and spatial variation of soil organic matters in *Phyllostachys praecox* stands with intensive cultivation management[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2007, 24(4): 450-455.
- [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.
- [17] Huang F, Cai R R, Sun D *et al.* Soil nitrogen status and estimated nitrogen balance budget in an intensive managed *Phyllostachys praecox* stand[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1193-1196.
- [18] 姜培坤, 徐秋芳, 周国模, 等. 雷竹林土壤质量及其演变趋势[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [19] Jiang P K, Xu Q F, Zhou G M *et al.* Soil quality and its development in *Phyllostachys praecox* stands[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009.
- [20] 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.
- [21] Wu J S, Jiang P K, Sheng W X *et al.* Effect of bamboo (*Phyllostachys praecox* f. *prevernalis*) intensive cultivation on water quality in water systems[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8): 76-81.
- [22] 蔡富春, 吴志伟, 谢善文, 等. 雷竹地下根系结构分布调查[J]. *江苏林业科技*, 2009, 36(1): 29-33.
- [23] Cai F C, Wu Z W, Xie S W *et al.* Studies on the distribution of bamboo rhizome of *Phyllostachys praecox* f. *prevernalis*[J].

- Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2009, 36(1): 29-33.
- [16] 张卓文, 汤景明, 熊艳平, 等. 雷竹引种后地下鞭生长规律研究[J]. 华中农业大学学报, 2001, 21(1): 77-80.
Zhang Z W, Tang J M, Xiong Y P *et al.* Studies on the bamboo rhizome growth after introduction of *Phyllostachys praecox f. preveynalis* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2001, 21(1): 77-80.
- [17] 闵炬, 施卫明, 王俊儒, 等. 介绍一种采集大棚土壤渗漏水的装置[J]. 土壤, 2007, 39(6): 1013-1013.
Min J, Shi W M, Wang J R *et al.* A new installation for collect seepage of greenhouse Soil [J]. Soils, 2007, 39(6): 1013-1013.
- [18] Jagadeeswaran R, Murugappan V, Govindaswamy M. Effect of slow release NPK fertilizer sources on the nutrient use efficiency in turmeric (*Curcuma longa* L.) [J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2005, 1(1): 65-69.
- [19] 陶澍, 曹军. 山地土壤表层水溶性有机物淋溶动力学模拟研究[J]. 中国环境科学, 1996, 16(6): 410-414.
Tao S, Cao J. Leachation kinetics of water soluble organic carbon from surface horizon of hilly upland soil [J]. China Environmental Science, 1996, 16(6): 410-414.
- [20] Mancinelli R, Campiglia E, Di Tizio A *et al.* Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by conventional and organic cropping systems in Mediterranean environment [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46: 64-72.
- [21] Gong W, Yan X Y, Wang J. The effect of chemical fertilizer on soil organic carbon renewal and CO₂ emission-a pot experiment with maize[J]. Plant Soil, 2012, 353: 85-94.
- [22] Silveira M L A. Dissolved organic carbon and bioavailability of N and P as indicators of soil quality [J]. Science Agriculture (Piracicaba, Brazil), 2005, 62: 502-508.
- [23] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of dissolved organic nutrients in a deciduous forest [J]. Ecology, 1991, 72(1): 254-266.
- [24] 曾招兵, 李盟军, 姚建武, 等. 习惯施肥对菜地氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 34-43.
Zeng Z B, Li M J, Yao J W *et al.* Impacts of conventional fertilization on N and P losses by runoff in vegetable fields [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 34-43.
- [25] 韩建刚, 李占斌. 紫色土小流域种植模式对土壤氮素流失的影响初探[J]. 中国农学通报, 2005, 21(9): 275-278.
Han J G, Li Z B. Effects of planting pattern on N loss by runoff in purple soil agro-watersheds [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(9): 275-278.
- [26] 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]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(3): 60-64.
Wu J S, Jiang P K, Xie B L *et al.* Study on nitrogen and phosphorus leaching at different fertilizer levels in *Phyllostachys praecox* stands [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2009, 33(3): 60-64.
- [27] 吴家森, 姜培坤, 谢秉楼, 等. 缓冲带在减少集约经营雷竹林养分渗漏流失中的作用[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 794-797.
Wu J S, Jiang P K, Xie B L *et al.* Role of buffer strips in reducing nutrient leaching loss from intensively-managed *Phyllostachys praecox* [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 794-797.
- [28] 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): 95-98.
Gao Z Q, Fu M Y. Leaching characteristics of nutrients in percolating water in different *Phyllostachys edulis* stands [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2005, 29(6): 95-98.
- [29] 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 W, Wu J S, Jiang P K *et al.* Effects of different fertilization on soil fertility, fertilizer use efficiency and bamboo shoot yield of *Phyllostachys praecox* stand [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 1021-1028.
- [30] 朱广凯. 提高肥料利用率四招[J]. 新农业, 2010, (4): 22.
Zhu G K. Four methods to improve the fertilizer utilization rate [J]. New Agriculture, 2010, (4): 22.
- [31] 段然, 汤月丰, 文炯, 等. 减量施肥对湖垵旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 536-543.
Duan R, Tang Y F, Wen J *et al.* Effect of reducing fertilizer application on crop yield and nitrogen and phosphorus loss in runoff from embankment upland in Dongting Lake Region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 536-543.
- [32] 赵庆雷, 李彦, 马加清, 等. 不同氮磷水平对南四湖区稻谷产量及肥料吸收利用的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1204-1208.
Zhao Q L, Li Y, Ma J Q *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus with different levels on grains yield and absorption and utilization of fertilizers nutrient in Nansihu Basin [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1204-1208.