

不同施肥条件下雷竹林水溶性有机碳氮的流失特征

吴家森^{1,2}, 许开平³, 叶 晶², 姜培坤², 李永夫², 张金池^{1*}

(1.南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2.浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 3.浙江省水利河口研究院, 杭州 310020)

摘 要:通过建立径流场和土壤渗漏水收集装置,研究了不同施肥(常规施肥、减量施肥、微生物肥和不施肥)条件下雷竹林径流和渗漏水中水溶性有机碳(WSOC)和水溶性有机氮(WSON)的流失规律。结果表明:雷竹林地表径流(土壤渗滤)水量与降雨量之间呈极显著正相关($P<0.01$),WSOC、WSON的流失以渗滤迁移为主,分别占流失总量的97%和94%左右。不同施肥雷竹林WSOC流失量的大小顺序表现为常规施肥($66.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>微生物肥($63.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>减量施肥($61.06\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>不施肥($56.58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),WSON的流失量则表现为常规施肥($37.48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>减量施肥($24.40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>微生物肥($21.41\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>不施肥($17.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。与常规施肥相比,微生物肥和氮肥减量40%的雷竹林地WSOC、WSON流失量分别减少4.5%、8.4%和42.9%、34.9%;不同施肥雷竹林地表径流、土壤渗滤中WSON流失量分别占总氮流失量的49.2%~52.7%和26.6%~35.9%。

关键词:水溶性有机碳;水溶性有机氮;流失;雷竹林

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)01-0128-06 doi:10.11654/jaes.2014.01.016

Losses of Water Soluble Organic Carbon and Nitrogen in Soils Under *Phyllostachys praecox* Stands with Different Fertilization

WU Jia-sen^{1,2}, XU Kai-ping³, YE Jing², JIANG Pei-kun², LI Yong-fu², ZHANG Jin-chi^{1*}

(1.College of Forest Resources and Environment,Nanjing Forestry University,Nanjing 210037,China; 2.School of Environmental and Resource Sciences,Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China; 3.Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Soil water soluble organic matter (WSOM) was one of the major sources of pollution to waterways in the production region of *Phyllostachys praecox* stands where excessive chemical fertilizers and heavy winter mulch were applied. Losses of water soluble organic carbon (WSOC) and water soluble organic nitrogen (WSON) in *Phyllostachys praecox* stands with different fertilization treatments, including the control (CK, no fertilizer treatment), conventional fertilizer (CF), decreased inorganic fertilizer (DF), and microbial fertilizer (MF), were investigated using a field runoff and soil filtration collecting device in 2011. Amounts of soil surface runoff and water leakage were significantly correlated with rainfall ($P<0.01$). Losses of WSOC and WSON were mainly caused by leaching, which accounted for 97% and 94% of the total losses, respectively. During the experiment period, the loss of WSOC was in order of CF ($66.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>MF ($63.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>DF ($61.06\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>CK ($56.58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), and that of WSON was CF ($37.48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>DF ($24.40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>MF ($21.41\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>CK ($17.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). Compared with the conventional fertilizer treatment, microbial fertilizer and 40% nitrogen reduction decreased WSOC loss by 4.5% and 8.4%, and WSON loss by 42.9% and 34.9%, respectively. Losses of WSON in the surface runoff and leachate accounted for 49.2%~52.7% and 26.6%~35.9% of total N loss, respectively.

Keywords: water soluble organic carbon; water soluble organic nitrogen; loss; *Phyllostachys praecox*

收稿日期:2013-06-07

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD15B04-2)

作者简介:吴家森(1972—),男,教授级高级工程师,研究方向为水土保持与农业面源污染控制技术。E-mail:jswu@zafu.edu.cn

*通信作者:张金池 E-mail:zhang8811@njfu.edu.cn

水溶性有机物(DOM)是森林生态系统主要的可移动碳库及重要的养分库,主要包括水溶性有机碳(WSOC)和水溶性有机氮(WSON)^[1]。DOM进入水体后,主要是造成水体的富营养化,提高水体中微生物的活性,造成水体的生化耗氧量大幅度增加,从而影响农业生态环境,进而形成面源污染。以往的研究主要注重于DOM的来源、特征、组成及结构等^[2-4],对于DOM在土壤中的迁移流失则报道较少。

雷竹(*Phyllostachys praecox* f. *prevelnalis*)是优良的笋用竹种,主要分布于浙江省临安、德清、余杭等地,面积达60 000 hm²。通过重施肥和冬季覆盖的集约化栽培技术,使雷竹笋实现了反季节生产和产量提高,竹农经济效益可观。但在栽培过程中每年施入化肥3375 kg·hm⁻²,厩肥75~105 t·hm⁻²;冬季覆盖过程中,在雷竹林地表先覆盖一层稻草,再覆盖一层砻糠,稻草用量40 t·hm⁻²,砻糠用量55 t·hm⁻²,次年3、4月揭去未腐烂的砻糠,下层的稻草经过一个冬春已基本腐烂入土。科研人员对雷竹林土壤氮磷流失做了大量的研究^[5-8],对于DOM流失的关注度则较少。

有研究表明,溶解性有机碳、氮从森林土壤的流出量分别可占总损失量的18%和28%^[9-10],为了探究高强度集约经营雷竹林DOM的迁移流失规律,本文通过定位试验,动态监测了不同施肥雷竹林地表径流和土壤渗滤水中WSOC、WSON含量的变化,以揭示雷竹林WSOC、WSON的迁移规律,为面源污染的控制和水环境保护提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在浙江省临安市浙江农林大学试验林场(30°19'N,119°35'E),属中纬度北亚热带季风气候。全年降雨量平均1628 mm,多年平均气温为15.8℃,7月平均温度为28.1℃,1月平均温度为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。试验区土壤类型为发育于砂页岩的红壤,质地为砂壤土。不同处理小区土壤理化性质见表1,不同处理土壤基本理化性质不存在显著性差异。

1.2 试验设计与处理

地表径流:利用径流场法采集地表径流,径流场平行设置在土壤条件和雷竹经营管理一致的同一坡面上。该雷竹园建园15年,密度11 500株·hm⁻²,郁密度0.8,坡度12.5°(西南坡)。面积20 m×6 m,土壤渗滤:在径流场的中心位置埋设自制的自流型土壤渗漏水收集装置^[11],集水槽埋设在离地表30 cm处,集水槽面积为15 cm×80 cm。同时在试验区周边布置雨量筒,测定降雨量。试验于2011年4月开始,共设4个处理(常规施肥、减量施肥、微生物肥和不施肥),3次重复,具体施肥方案参见表2。常规施肥、减量施肥于5月28日、9月1日、12月10日分别施用肥料总量的40%、30%和30%;微生物肥于5月28日和11月8日分别施用肥料总量的50%。施肥后均进行浅翻,深度5 cm左右。

表1 不同处理小区土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils(0~30 cm) under different treatments

处理	pH 值	容重/g·cm ⁻³	有机碳/g·kg ⁻¹	水解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
对照	3.9±0.2a	1.02±0.13a	25.52±2.23a	228.52±21.32a	262.38±28.78a	176.42±15.78a
微生物肥	4.0±0.1a	1.04±0.12a	24.89±2.36a	224.35±23.45a	258.45±26.69a	182.35±20.44a
减量施肥	4.1±0.2a	1.08±0.11a	25.32±2.43a	234.04±20.78a	261.37±24.93a	180.74±19.08a
常规施肥	3.9±0.1a	1.06±0.14a	25.21±2.17a	232.83±24.66a	259.08±26.02a	174.56±18.55a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),数值为平均值±标准差(mean±SD)。

表2 试验各处理的肥料用量及氮、磷、钾比例

Table 2 Fertilizer rates and N:P:K ratios for the different treatments used in the experiment

处理	肥料种类	年施用量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	养分量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹			N:P:K
			N	P	K	
对照	不施肥	0	0	0	0	0:0.00:0.00
微生物肥	微生物肥	6000	20	105	100	1:5.30:5.00
减量施肥	复合肥,尿素	1350,675	513	88.8	168	1:0.17:0.32
常规施肥	复合肥,尿素	2250,1125	855	148	280	1:0.17:0.32

注:复合肥 N:P₂O₅:K₂O=15:15:15;尿素 46%;微生物肥料的 N、P 和 K 含量分别为 3.3、17.5、16.7 g·kg⁻¹,其成分为煤矸石 69%~70%、磷矿石 19%~20%、面粉 9%~10%、菌种 2%~4%(固氮菌、释钾菌、解磷菌)、水分 2%~3%。

1.3 水样采样与测定方法

2011年6月至12月,于每次降雨后迅速采集地表径流和地下渗漏的水样,量测体积后,装入500 mL塑料瓶带回实验室测定相关指标。整个试验期间共采集19次地表径流和12次土壤渗滤水样。

采集的水样经0.45 μm 滤膜抽滤,用于测定总氮(TN)、硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)。TN和WSOC在TOC-VCPH/CPN总有机碳氮分析仪上测定, NO_3^--N 、 NH_4^+-N 在ICS-1500离子色谱分析仪上测定;WSOC由TN减去 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 计算得到。

1.4 数据统计方法

试验数据采用DPS软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥雷竹林 WSOC 的动态变化

2.1.1 雷竹林地表径流 WSOC 的动态变化

不同施肥雷竹林地表径流水WSOC浓度的动态变化如图1a所示。5月份的施肥及翻耕,林地

在持续的降雨作用下,径流水中WSOC浓度较大,随着时间的推移,WSOC浓度呈下降趋势;9月初的施肥,使林地径流水中WSOC浓度又有所增加,而后又降低。不同施肥雷竹林地表径流水中WSOC的浓度总体表现为常规施肥 $\approx$ 微生物肥 $>$ 减量施肥 $>$ 对照。

2.1.2 雷竹林土壤渗滤水 WSOC 的动态变化

不同施肥雷竹林土壤渗滤水WSOC浓度的动态变化如图1b所示。在整个监测过程中,与地表径流水相比,土壤渗滤水中WSOC浓度的变化相对平缓,受施肥和降雨的影响较小,不同施肥处理间没有太大的差异。

2.2 不同施肥雷竹林 WSON 的动态变化

2.2.1 雷竹林地表径流水 WSON 的动态变化

不同施肥雷竹林地表径流水WSON浓度的动态变化如图2a所示。5月份的施肥及翻耕,林地持续的降雨作用下,地表径流水WSON浓度较大,随着时间的推移,WSON浓度呈下降趋势。6月31日和7月24日的强降雨使地表径流水WSON浓度较高,这与该时期的降雨量达到了整个过程的

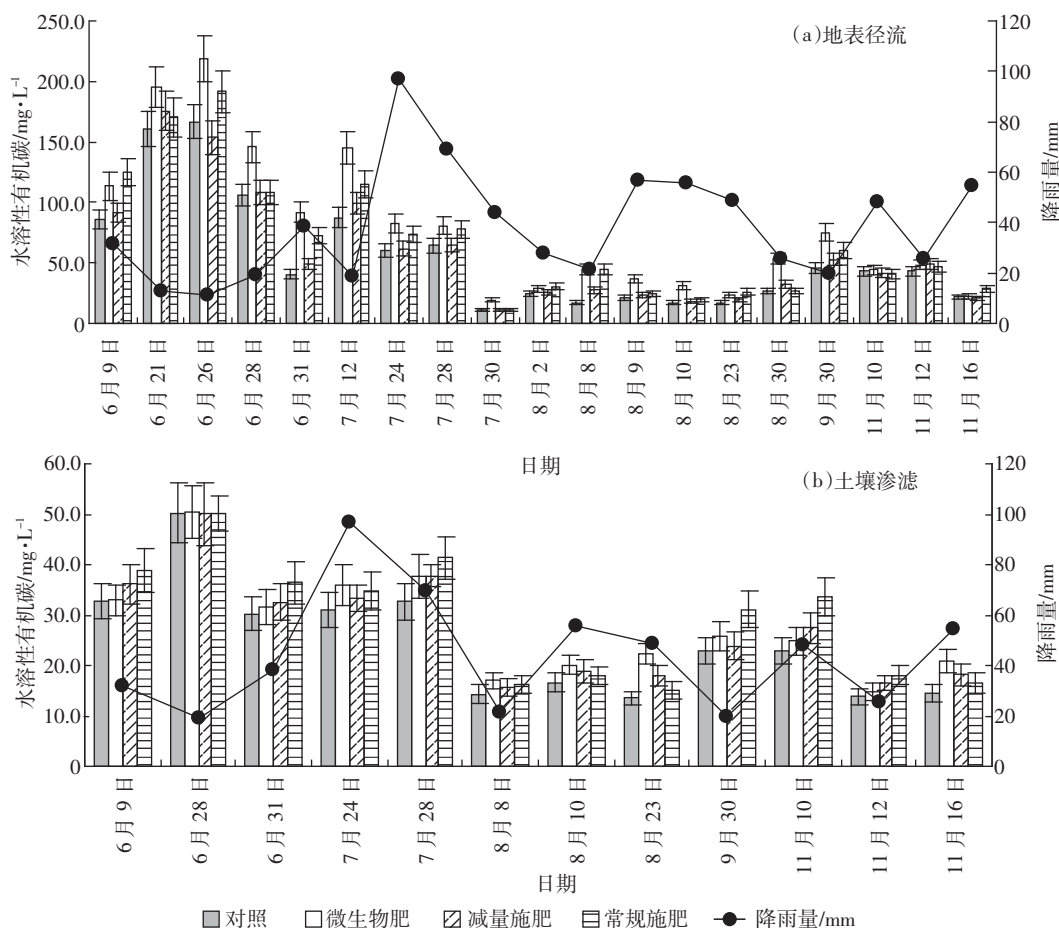


图1 不同施肥雷竹林水溶性有机碳的动态变化

Figure 1 Changes in soil WSOC under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

处于水饱和状况,土壤中的氮素大量溶解有关。雷竹林地表径流水中 WSON 的浓度在监测过程中总体表现为常规施肥>减量施肥>微生物肥≈对照。

2.2.2 雷竹林土壤渗滤水 WSON 的动态变化

不同施肥雷竹林土壤渗滤水 WSON 浓度的动态变化如图 2b 所示。在整个监测过程中,土壤渗滤水 WSON 浓度的变化相对平缓,受降雨的影响较小。土壤渗滤水 WSON 浓度的变化总体表现为常规施肥>减量施肥>微生物肥>对照,平均浓度分别为 17.51、

10.99、8.92、7.12 mg·L⁻¹。

2.3 不同施肥雷竹林水溶性碳氮迁移负荷

林地土壤 WSOC、WSON 主要是通过地表径流和地下渗漏的形式而产生迁移、流失,雷竹林 WSOC、WSON 的流失负荷分别等于 WSOC、WSON 浓度×径流(渗漏)水量。不同施肥雷竹林 WSOC、WSON 的迁移流失负荷见表 3。

雷竹林 WSOC、WSON 的流失负荷以渗漏迁移为主,分别占迁移总量的 97%和 94%左右。不同施肥雷

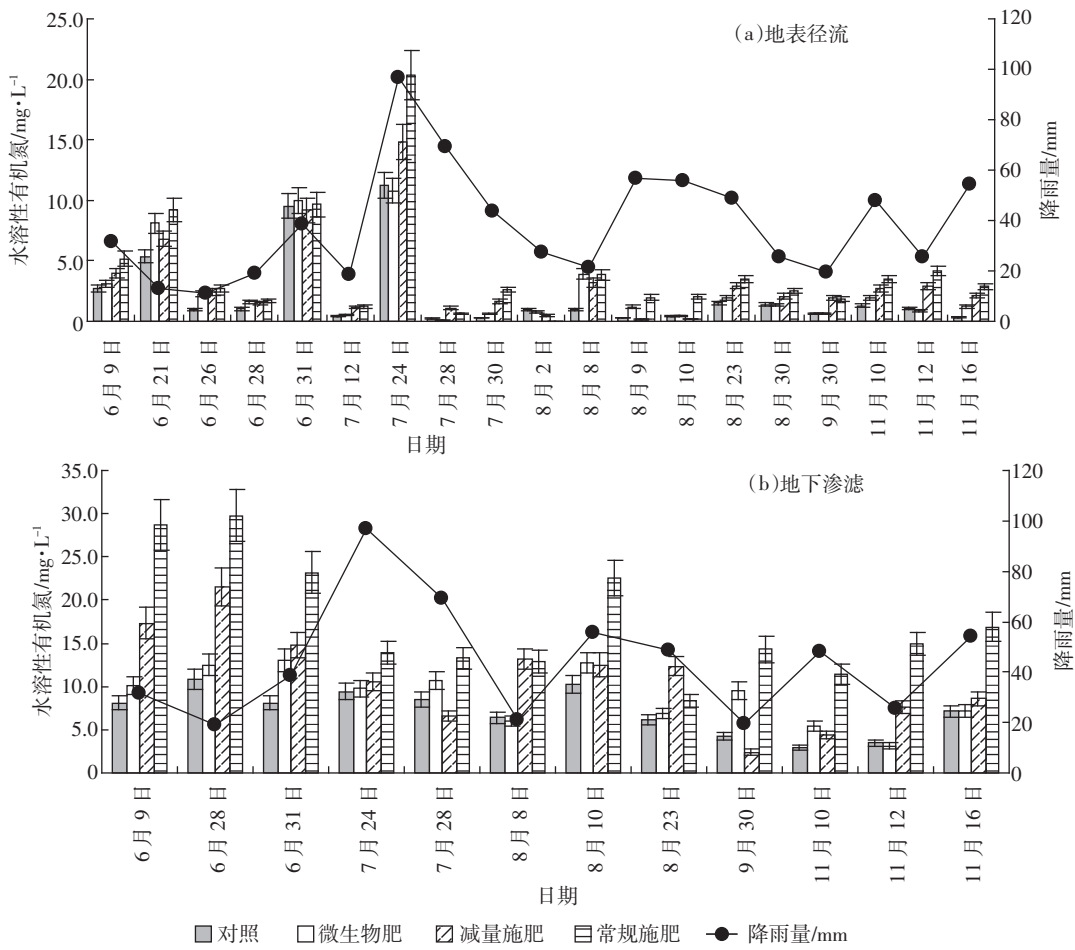


图 2 不同施肥雷竹林水溶性有机氮的动态变化

Figure 2 Changes in soil WSON under *Phyllostachys praecox* stand with different fertilization treatments

表 3 不同施肥雷竹林水溶性碳氮流失负荷(kg·hm⁻²)

Table 3 Load of WSOC and WSON losses in different fertilization treatments(kg·hm⁻²)

处 理	WSOC			WSON			WSOC/WSON
	径流	渗漏	合计	径流	渗漏	合计	
对照	1.36±0.15ab	55.22±5.67a	56.58±5.78a	1.03±0.11c	16.35±1.79c	17.38±1.87c	3.26
微生物肥	1.91±0.20a	61.75±6.15a	63.66±6.62a	1.27±0.13b	20.15±2.12b	21.41±2.23b	2.97
减量施肥	1.45±0.16ab	59.61±6.08a	61.06±6.24a	1.59±0.17b	22.81±2.35b	24.40±2.49b	2.50
常规施肥	1.79±0.16a	64.87±6.67a	66.66±6.78a	2.12±0.22a	35.36±3.45a	37.48±3.62a	1.78

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05), 数值为平均值±标准差(mean±SD)。

竹林 WSOC 的迁移负荷表现为常规施肥 ($66.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 微生物肥 ($63.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 减量施肥 ($61.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 对照 ($56.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 而 WSON 迁移负荷的排列顺序则表现为常规施肥 ($37.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 减量施肥 ($24.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 微生物肥 ($21.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 对照 ($17.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。不同施肥雷竹林 WSOC/WSON 的比值大小顺序则表现为对照 > 微生物肥 > 减量施肥 > 常规施肥。

3 讨论

降雨是影响土壤 DOM 迁移的重要因素, 降雨过程中雨水的直接作用可使 DOM 随径流而迁移, 其迁移作用与降雨强度、土壤性质、地形地貌和植被类型等因素有关。雨水的垂直下渗或沿坡向的侧渗, 可使 DOM 往土壤深层次迁移^[12-13]。本研究结果表明雷竹林地表径流(土壤渗滤)水量与降雨量之间的回归方程为 $y=ax+b$, 偏相关系数 R^2 介于 0.423 5~0.575 3 之间, 达到极显著正相关 ($P<0.01$)。不同施肥雷竹林 WSOC、WSON 流失负荷以渗滤迁移为主, 分别占迁移总量的 97% 和 94% 左右, 这与山地土壤侧渗是土壤 DOM 淋溶的主导过程相符^[14]。

土壤有机碳是 DOM 的主要来源, 众多研究者指出土壤溶解性有机碳(DOC)含量与土壤总有机碳含量呈较好正相关^[15]。Kaisers 等^[16]对 125 种森林土壤的 DOM 研究发现, 从土壤中释放出来的 DOM 数量取决于土壤本身有机碳含量的高低。DOM 淋失风险的大小与土壤中 DOM 含量有关^[17], 也与土壤中有机碳的含量大小相关。雷竹栽培过程中年施入化肥 $3375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 厩肥 $75\sim 105 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 冬季地表覆盖中稻草用量 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 砻糠用量 $55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 使林地土壤中碳氮大量积累, 土壤有机碳、全氮含量分别达 25.5 、 $2.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此, 雷竹林的集约栽培, 很大程度上增加了林地土壤 DOM 的淋失风险, 本研究结果表明, 不施肥处理的雷竹林地土壤 WSOC 和 WSON 的流失量分别达到 56.58 、 $17.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3)。

肥料的施用影响着土壤中 DOM 的浓度和迁移量, 但不同研究人员的结果不尽相同。氮肥施用实验中, 土壤 WSOC 浓度和通量基本不变, 而 WSON 的浓度则随着氮肥的添加分别增加了 200%~300%^[18]。Cronan^[19]的研究指出施用氮肥后 WSOC 的释放速率降低 20%, 而 Stuanes 等^[20]认为森林土壤中添加氮肥后 WSOC 和 WSON 的浓度和流量均未改变。Corre 等^[21]则认为, 施氮后森林地被物的 DOC 浓度提高

10%~30%, WSON 也显著增加。本研究表明, 与常规施肥相比, 微生物肥和氮肥减量 40% 的雷竹林地 WSOC 流失量仅减少 4.5% 和 8.4%, 而 WSON 流失量则减少了 42.9% 和 34.9%。随着施肥量的增加, WSOC/WSON 的比例从 3.26 降低到 1.78(表 3), 说明施肥对雷竹林地 WSOC 的迁移量影响较小, 而 WSON 的迁移流失则随施肥量的增加而明显增加。

Zech 等^[22]研究表明, 可通过刺激微生物活性提高 WSOC 矿化速率, 从而增加 DOM 的浓度。本研究结果表明, 微生物肥的施用, 增加了 DOM 的迁移与流失, 与不施肥相比, WSOC 和 WSON 流失量分别增加 12.5% 和 23.2%。

WSON 是森林土壤氮流失的主要形式之一, 占总氮比例达 28%。在挪威云杉林中, 土壤溶液中总氮的 62%~83% 为有机形态^[23]。据 Qualls 等^[24]报道, 森林淋滤液中有机态氮比例达 94%。本研究表明(图 3), 不同施肥雷竹林地表径流中水溶性有机氮占总氮流失的比例达 49.2%~52.7%, 而土壤渗滤中水溶性有机氮流失量占总氮的 26.6%~35.9%。

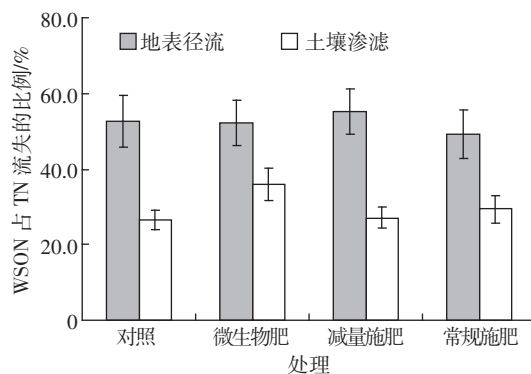


图3 不同施肥雷竹林 WSON 占 TN 流失的比例

Figure 3 Percentages of WSON over TN in different fertilization treatments

4 结论

雷竹林地表径流(土壤渗滤)水量与降雨量之间的回归方程为 $y=ax+b$, 偏相关系数 R^2 介于 0.423 5~0.575 3 之间, 达到极显著正相关 ($P<0.01$)。不同施肥雷竹林 WSOC、WSON 流失负荷以渗滤迁移为主, 分别占迁移总量的 97% 和 94% 左右。

不同施肥雷竹林 DOM 的流失负荷不同, 与常规施肥相比, 微生物肥和氮肥减量 40% 的雷竹林地 WSOC 流失量仅减少 4.5% 和 8.4%, WSON 流失量则减少了 42.9% 和 34.9%。随着施肥量的增加, WSON 的迁

移流失明显增加,而对 WSOC 的影响则相对较小。微生物肥的施用,增加了 DOM 的迁移与流失,与不施肥相比,WSOC 和 WSON 流失量分别增加 12.5%和 23.2%。

不同施肥雷竹林地表径流和土壤渗漏中 WSON 的流失量占总氮比例分别达 49.2%~52.7%和 26.6%~35.9%。

参考文献:

- [1] 刘 微,王树涛. 土壤中溶解性有机物及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4):997-1002.
LIU Wei, WANG Shu-tao. Review of researches on dissolved organic matter in soil and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4):997-1002.
- [2] Hossler K, Bauer J E. Estimation of riverine carbon and organic matter source contributions using time-based isotope mixing models[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117:235-340.
- [3] Kim S W, Kaplan L A, Benner R, et al. Hydrogen-deficient molecules in natural riverine water samples—evidence for the existence of black carbon in DOM[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92:225-234.
- [4] Minor E C, Steinbring C J, Longnecker K, et al. Characterization of dissolved organic matter in lake superior and its watershed using ultrahigh resolution mass spectrometry[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 43:1-11.
- [5] 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 Jia-sen, JING Pei-kun, SHENG Wei-xing, et al. Effect of bamboo intensive cultivation on water quality in water systems[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8):76-81.
- [6] 许开平,吕 军,吴家森,等. 不同施肥雷竹林氮磷径流流失比较研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3):31-34.
XU Kai-ping, LÜ Jun, WU Jia-sen, et al. Comparative study on the nitrogen and phosphorus runoff under phyllostachys praecox stands with different fertilizations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):31-34.
- [7] 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, 44.
WU Jia-sen, CHEN Wen, JIANG Pei-kun, et al. Effects of different fertilization on seepage losses of nitrogen and phosphorus in the soil under phyllostachys praecox stands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):33-37, 44.
- [8] 陈裴裴,吴家森,郑小龙,等. 不同施肥对雷竹林径流及渗漏养分流失规律的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):39-43.
CHEN Pei-pei, WU Jia-sen, ZHENG Xiao-long, et al. Effects of different fertilization on runoff and seepage loss of nutrient under phyllostachys praecox stand[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):39-43.
- [9] 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.
- [10] Qualls R G. Geochemical and biological properties of dissolved organic matter in the soil and stream of a deciduous forest ecosystem: Their influence on retention of N and P[D]. Athens: Univ. of Georgia, 1989.
- [11] 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.
MIN Ju, SHI Wei-ming, WANG Jun-ru, et al. A new installation for collect seepage of greenhouse soil[J]. *Soils*, 2007, 39(6):1013.
- [12] 许中坚,刘广深,刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为[J]. 环境化学, 2003, 22(5):427-433.
XU Zhong-jian, LIU Guang-shen, LIU Wei-ping. Environmental characteristic and behavior of dissolved organic matter in soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(5):427-433.
- [13] 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.
YANG Jia-bo, ZENG Xi-bai. Behavior and environmental impact of soil dissolved organic matter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(5):206-211.
- [14] 陶 澎,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 Shu, CAO Jun. Leachate kinetics of water soluble organic carbon from surface horizon of upland soil[J]. *China Environmental Science*, 1996, 16(6):410-414.
- [15] 林 滨,陶 澎,曹 军,等. 伊春河流域土壤与沉积物中水溶性有机物的含量与吸着系数[J]. 中国环境科学, 1996, 16(4):307-310.
LIN Bin, TAO Shu, CAO Jun, et al. Contents and sorption coefficients of soluble organic compounds in soil and sediment from YI-Chun river catchment[J]. *China Environmental Science*, 1996, 16(4):307-310.
- [16] Kaiser K, Zech W. Rate of dissolved organic matter release and sorption in forest soils[J]. *Soil Science*, 2008, 163(3):714-725.
- [17] Currie W S, Aber J D. Modeling leaching as a decomposition process in humid montane forests[J]. *Ecology*, 1997, 78(6):1844-1860.
- [18] Medowell W H, Currie W S, Aber J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. *Water Air and Soil Pollutant*, 1998, 105:175-182.
- [19] Cronan C S. Comparative effects of precipitation acidity on three forest soils carbon cycling responses[J]. *Plant and Soil*, 2005, 88:101-102.
- [20] Stuanes A O, Kjonass O J. Soil solution chemistry during four years of NH_4NO_3 addition to a forested catchment at Gardsjon, Sweden[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 101:215-226.
- [21] Corre M D, Schnabel R R, Shaffer J A. Evaluation of soil organic carbon under forest, cool-season and warm-season grasses in the north-eastern US[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31:1531-1539.
- [22] Zech W, Guggenberger G, Schulten H R. Budgets and chemistry of dissolved organic carbon in forest soils: Effects of anthropogenic soil acidification[J]. *Science and Total Environment*, 2004, 152:49-62.
- [23] Smolander A, Kitunen V, Priha O, et al. Nitrogen transformations in limed and nitrogen-fertilized soil in Norway spruce stands[J]. *Plant Soil*, 1995, 172:107-115.
- [24] Qualls R G, Haines B L, Swank W T, et al. Soluble organic and inorganic nutrient fluxes in clear-cut and mature deciduous forest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64:1068-1077.