

尚二凤, 史书, 林晓, 等. 三峡库区紫色土坡耕地不同桑树-作物配置模式下土壤氮磷的淋溶[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1559-1564.  
SHANG Er-feng, SHI Shu, LIN Xiao, et al. Leaching losses of nitrogen and phosphorus from arable hillslope purple soils under different mulberry-crop combinations in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1559-1564.

## 三峡库区紫色土坡耕地不同桑树-作物配置模式下土壤氮磷的淋溶

尚二凤<sup>1</sup>, 史书<sup>1</sup>, 林晓<sup>1</sup>, 罗柏林<sup>1</sup>, 王法<sup>1</sup>, 木志坚<sup>1,2,3\*</sup>, 倪九派<sup>1,2,3</sup>, 谢德体<sup>1,2,3</sup>

(1.西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2.重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716; 3.教育部三峡库区生态环境重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:**利用混合离子交换树脂埋埋吸附法对重庆市涪陵区王家沟小流域内4种不同桑树-作物配置模式下的坡地土壤氮磷淋溶量进行了量化研究。试验所设置的4个处理分别为横坡农作、横坡农作+三带桑树、横坡农作+四边桑树、横坡农作+等高桑树+四边桑树。各处理耕作、施肥措施均保持一致,作物种植制度为玉米-榨菜轮作。结果表明,玉米季各处理土壤总氮(TN)的淋溶量在10.19~11.37 kg·hm<sup>-2</sup>之间,榨菜季在11.06~12.23 kg·hm<sup>-2</sup>之间,同一季不同处理间或同一处理不同季间土壤TN的淋溶量差异均不显著( $P>0.05$ )。硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub>-N)对TN年淋溶量的平均贡献率分别为63.9%和36.1%,说明NO<sub>3</sub>-N是氮素垂直淋失的主要形式。同一处理土壤在榨菜季的NO<sub>3</sub>-N淋溶量均高于玉米季,NH<sub>4</sub>-N则相反;不同处理土壤总磷(TP)年淋溶量范围为0.19~0.21 kg·hm<sup>-2</sup>,处理间无显著差异( $P>0.05$ )。不同桑树配置模式对土壤氮磷淋溶拦截效果的差异并不明显,可能是由本试验中的桑树种植年限较短及根系还不发达所致。

**关键词:**三峡库区;坡耕地;氮;磷;淋溶

中图分类号:S157.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)08-1559-06 doi:10.11654/jaes.2016-0213

### Leaching losses of nitrogen and phosphorus from arable hillslope purple soils under different mulberry-crop combinations in Three Gorges Reservoir Region

SHANG Er-feng<sup>1</sup>, SHI Shu<sup>1</sup>, LIN Xiao<sup>1</sup>, LUO Bai-lin<sup>1</sup>, WANG Fa<sup>1</sup>, MU Zhi-jian<sup>1,2,3\*</sup>, NI Jiu-pai<sup>1,2,3</sup>, XIE De-ti<sup>1,2,3</sup>

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three-Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China; 3.Key Laboratory of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** A field monitoring was carried out at the Wanjiagou catchment of Fuling District in the Three Gorges Reservoir Region, to quantify the vertical leaching losses of nitrogen (N) and phosphorus (P) from arable hillslope purple soils under different mulberry-crop systems by employing mixed ion exchangeable resin burying and adsorption method. The experiment consisted of four treatments, i.e., contour cultivation, contour cultivation with mulberry trees planted on the upper, middle and lower slopes, contour cultivation with mulberry trees planted on the four sides of the slope, and contour cultivation with mulberry trees planted on the four sides of the slope and the middle slope. All experimental plots received the same tillage and fertilization treatments and were subjected to a maize-mustard rotation system. Results showed that leaching rates of total N (TN) from soils under different treatments varied from 10.19 to 11.37 kg·hm<sup>-2</sup> for the maize-cropping

收稿日期:2016-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41371275,41371301);国家水体污染控制与治理科技重大专项课题:三峡库区及上游流域农村面源污染控制技术与工程示范(2012ZX07104-003)

作者简介:尚二凤(1991—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事水环境保护研究。E-mail:1197331078@qq.com

\*通信作者:木志坚 E-mail:muzj@swu.edu.cn

season and from 11.06 to 12.23 kg·hm<sup>-2</sup> for the mustard-cropping season. The loss of TN was not significantly different among different treatments during the same cropping seasons or between different cropping seasons for the same treatments ( $P>0.05$ ). The contribution of nitrate-N and ammonium-N to the annual TN loss averaged 63.9% and 36.1%, respectively, indicating that nitrate dominated in the N leaching loss. For the same treatments, the leaching loss of nitrate-N was greater during the mustard season than during the maize season, and vice versa for the loss of ammonium-N. The annual leaching loss of total P (TP) from soils ranged from 0.19~0.21 kg·hm<sup>-2</sup>, and no significant differences were found among different treatments ( $P>0.05$ ). The poor development of mulberry-root systems associated with the short planting duration may fail in differentiating the retention capacity of N and P leaching loss among different treatments.

**Keywords:** Three Georges Reservoir Region; upland soil; nitrogen; phosphorus; leaching loss

三峡库区是我国重要的淡水资源库,但自2003年蓄水以来,局部地区水体富营养化频发,目前已有22条支流出现不同程度的“水华”现象<sup>[1]</sup>。氮、磷是水体富营养化的主导因子,降雨和灌溉等会导致土壤中的氮磷通过地表径流和淋溶等方式向水体释放,进而影响库区水质。已有学者<sup>[2-3]</sup>对三峡库区不同水体中氮磷浓度的动态变化及土壤中氮磷的径流流失特征进行了研究,但有关三峡库区农田土壤氮磷淋溶损失的研究仍较少。土壤氮磷淋溶不仅降低肥料利用率,还可造成地下水污染。刘宏斌等<sup>[4]</sup>在北京地区研究发现农田土壤氮素主要通过地下淋溶途径损失;黄沈发等<sup>[5]</sup>研究指出在上海郊区麦地淋溶损失的氮是地表径流的3倍以上,菜地淋溶损失的氮是地表径流的1.5倍左右;袁玲等<sup>[6]</sup>对三峡库区紫色土的研究也表明,氮素径流损失远远低于氮素的淋溶损失。此外,虽然磷在土壤中浓度很低,大多以难溶化合物形态存在,但对农田土壤磷素淋溶的研究中同样发现其淋溶损失量与径流损失量相当或者更大<sup>[7-8]</sup>。因此,无论从农业生产角度,还是环境保护角度,对农田土壤中氮、磷的地下淋溶情况进行研究均显得尤为必要。

土壤养分淋溶研究已成为农业与环境科学工作者关注的热点问题。由于土壤养分具有较大的空间异质性,采用何种方法才能反映农田土壤养分淋溶损失的真实情况,是研究这一热点的关键环节。目前,国内外采用的方法主要有多孔吸盘法<sup>[9-11]</sup>和渗漏计法<sup>[11-18]</sup>。Pampolino等<sup>[11]</sup>利用多孔吸盘法、渗漏计法和离子交换树脂法研究土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的淋溶情况,结果表明,利用混合阴阳离子交换树脂法收集的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度最接近田间真实浓度。混合阴阳离子交换树脂法是一种很有前途的技术,有研究表明该方法不仅可以密集布点、原位定点研究土壤养分动态变化,而且所获得的数据还可以有效反映田间的实际情况<sup>[6,10-12,19-20]</sup>。

桑树在三峡库区拥有较大的种植面积,农作-桑树系统作为一种农林复合模式在西南丘陵地区已经

广泛推广应用<sup>[21]</sup>,其在紫色土坡耕地水土保持及面源污染控制方面有着突出贡献<sup>[22-23]</sup>。谢雪东等<sup>[24]</sup>研究指出,桑-作系统能够有效控制三峡库区坡耕地土壤氮磷的径流流失。那么,不同桑树配置模式是否也会影响土壤氮磷的淋溶损失?哪种桑树配置模式的效果最佳?对此,本研究在三峡库区涪陵珍溪镇王家沟小流域内,通过横坡农作与不同桑树种植方式相结合的方式,利用阴阳离子交换树脂收集土壤淋溶液,旨在了解三峡库区紫色土旱坡地农田氮磷养分渗漏淋失的实际情况,为治理三峡库区农业面源污染及土壤养分资源管理提供更加全面的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 田间试验处理概况

研究基地修建于重庆市三峡库区涪陵珍溪镇王家沟小流域(29°30'N,107°18'E,海拔330m)的坡腰位置。该流域属亚热带季风气候区,年均气温22.1℃,年均降水量1130mm,夏秋季降雨量多,冬春季次之。

试验共设4个处理:横坡农作(CT);横坡农作+三带桑树(T1);横坡农作+四边桑树+等高桑树(T2);横坡农作+四边桑树(T3)。每个处理设2个重复(对照处理CT除外),共7个小区,各处理小区统一修建坡度为9°,坡向西北,四周用水泥墙分割,长、宽、高分别为12、4、0.75m的斜坡。四边桑带宽0.5m,横坡桑树带间距5.25m,具体设计见参考文献[24]。各处理桑树均为2011年10月种植。各处理的农作方式均为玉米-榨菜轮作,各试验田的化肥施用量均相同,即:玉米季氮肥(N)313 kg·hm<sup>-2</sup>,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)94 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)131 kg·hm<sup>-2</sup>;榨菜季N 341 kg·hm<sup>-2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 206 kg·hm<sup>-2</sup>,K<sub>2</sub>O 184 kg·hm<sup>-2</sup>。其他田间管理措施与当地农民一致。

试验区土壤类型为紫色土,试验开始前对试验区土壤基本理化性质进行测定,结果见表1。

### 1.2 氮磷淋失量的测定

考虑到桑树与农作物对土壤氮磷淋溶的整体影

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of tested soil

处理 Treatment	pH	有机质 Organic Matter/g·kg <sup>-1</sup>	全氮 Total nitrogen/g·kg <sup>-1</sup>	全磷 Total phosphorus/g·kg <sup>-1</sup>	有效氮 Available nitrogen/mg·kg <sup>-1</sup>	硝态氮 Nitrate nitrogen/mg·kg <sup>-1</sup>	铵态氮 Ammonium nitrogen/mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷 Available phosphorus/mg·kg <sup>-1</sup>
CT	5.5	17.67	1.49	0.76	91.04	8.70	13.13	27.35
T1	5.4	17.63	1.39	0.78	91.34	8.05	12.39	27.20
T2	5.5	17.77	1.36	0.79	90.96	7.87	12.69	27.19
T3	5.4	17.89	1.42	0.75	91.06	8.51	11.75	27.16

响,采样点并没有刻意设置在桑树植株附近,而是在小区内部采用“S”型布点。每个采样点安装1个氮磷收集装置,共安装42个。埋设收集装置时,从样点侧面移开土壤,于60 cm深度处将收集装置由侧面水平放入,然后将土壤恢复原状。于2013年3月埋入第一批收集装置,9月玉米收获后挖出,随后埋入第二批收集装置,并于2014年2月榨菜收获后挖出。土壤下渗液中氮磷收集装置的外部为内径×高=5 cm×10 cm的塑料管,中间放置12 g 阴阳离子交换树脂(Dowen<sup>TM</sup> Marathon<sup>TM</sup> MR-3 Mixed Ion Exchange Resin),在其两端用尼龙纱布拦截,树脂两边填充清洁的石英砂(砂粒直径约为3 mm),最后将装置的上下端用尼龙纱布封口(图1)。

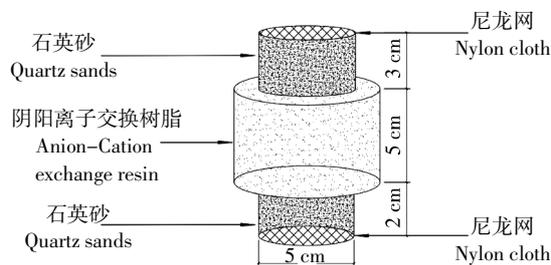


图1 土壤渗液收集吸附装置示意图

Figure 1 Apparatus for collecting leaching solution in soil

将每个采样点收集的阴阳离子交换树脂放置于三角瓶中,加入200 mL浓度为2 mol·L<sup>-1</sup>的KCl,振荡8 h(室温),取出静置后,提取一部分浸提液,经碱性过硫酸钾密闭消化(121 °C,30 min)后,分别采用紫外比色法(于220 nm波长处)和钼蓝比色法(于880 nm波长处)测定溶液中的TN和TP;另一部分经0.2 μm醋酸纤维滤膜(日本东洋滤纸株式会社)过滤,然后分别用流动注射分析法和靛酚蓝比色法测定滤液中的NO<sub>3</sub>-N和NH<sub>4</sub>-N。此外,在实验室将12 g 阴阳离子交换树脂放入收集装置中,然后取两种不同浓度梯度的氮磷标液(氮标液浓度为9、14 mg·L<sup>-1</sup>,磷标液浓度为0.25、0.5 mg·L<sup>-1</sup>)均匀淋于树脂上,3 d后按照上

述方法提取并测定树脂吸附的NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N和TP,计算回收率。其中,硝态氮回收率为0.84,铵态氮回收率为0.9,总磷回收率为0.85。

假设土壤氮磷的淋溶液只通过垂直渗漏的方式进入收集装置,单位面积的氮磷淋失量可按下式计算:

$$Y=100q \times (\alpha \times \pi \times R^2)$$

式中:Y为氮(磷)素淋失量,kg·hm<sup>-2</sup>;q为树脂吸附量,mg;R为收集管上端口半径,cm;α为回收率。

每个处理有2个重复,共计12个采样点。下文中土壤氮、磷淋失量为这12个样点的平均值,对照处理为6个样点的平均值。

### 1.3 数据分析

不同处理间土壤氮、磷淋失量差异性比较采用单因素方差(One-way ANOVA)分析结合Fisher's LSD检验法(SPSS Version 20, IBM)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同桑树配置模式下土壤氮素的渗漏淋失

由图2可见,CT、T1、T2和T3在玉米季土壤TN的淋失量为10.19~11.37 kg·hm<sup>-2</sup>,均值为10.66 kg·hm<sup>-2</sup>。这与黄沈发等<sup>[5]</sup>研究的麦地氮素渗漏淋失量13.98 kg·hm<sup>-2</sup>相近,而高于易时来等<sup>[13]</sup>研究的小麦生长期氮素淋失量4.81 kg·hm<sup>-2</sup>,可能与供试土壤类型、

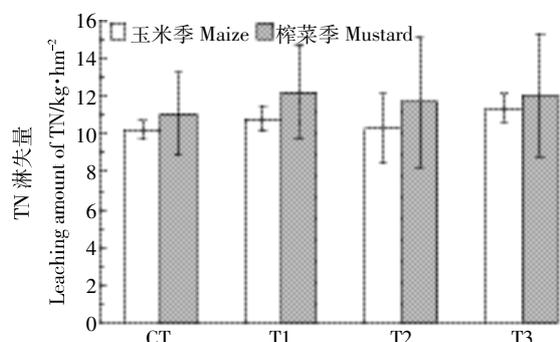


图2 不同桑树配置模式下土壤TN淋失量

Figure 2 Leaching amount of TN in different crop-mulberry systems

肥力特性和作物种类有关。在榨菜季土壤 TN 的淋失量为 11.06~12.23  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 11.76  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 2), 高于易时来等<sup>[14]</sup>研究的油菜季 TN 淋失量 3.35  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 低于黄沈发等<sup>[5]</sup>研究的菜地 TN 渗漏流失量 34.05  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这可能与作物种类、氮肥用量、降雨量、气温以及土壤性质等有关, 因为这些因素均会影响氮素在土壤中的迁移和渗漏淋失。

CT、T1、T2、T3 四个处理中 TN 的年淋失量变化范围为 21.25~23.43  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 22.42  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 2)。该淋失量低于袁玲等<sup>[6]</sup>对三峡库区坡耕地 40 cm 土层氮素淋失量的研究结果 (46.01  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 可能与收集土壤渗漏液的深度有关。吴家森等<sup>[15]</sup>研究指出不同深度土壤渗漏液中 TN 浓度变化呈上高下低的趋势。土壤渗漏液中 TN 淋失量与其浓度变化具有高度一致性<sup>[6]</sup>, 故本研究结果 (将淋溶至 60 cm 以下的氮素视为淋溶损失) 低于袁玲等的研究结果。

图 3 和图 4 显示的分别是不同桑树配置模式下土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的淋失量。具体表现为: 各处理土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失量在玉米季为 6.11~6.41  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 6.23  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 在榨菜季为 7.63~8.76  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 8.09  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 3); 各处理玉米季  $\text{NH}_4^+$ -N 的淋失量为 3.87~5.26  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 4.44  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 榨菜季为 3.29~4.21  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 3.67  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 4)。从不同作物种植季来看, CT、T1、T2、T3 四个处理中土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失量均为榨菜季高于玉米季 (榨菜季高出玉米季 29.9%), 而土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 则相反 (玉米季高出榨菜季 21%)。这与袁玲等<sup>[6]</sup>的研究结果不同, 其研究表明无论  $\text{NO}_3^-$ -N, 还是  $\text{NH}_4^+$ -N 的淋溶量均为菜地高于玉米-小麦轮作的坡地, 可能与试验田坡度以及土地利用类型有关。

各处理土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的年淋失量为 13.77~14.88

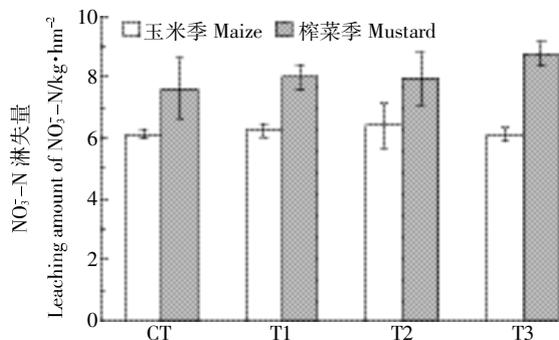


图 3 不同桑树配置模式下土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量

Figure 3 Leaching amount of  $\text{NO}_3^-$ -N in different crop-mulberry systems

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 14.32  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 3);  $\text{NH}_4^+$ -N 的年淋失量为 7.48~8.77  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 均值为 8.10  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 4)。对比图 2 可以看出, 土壤氮素渗漏淋失以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主, 其平均淋失量占 TN 年均淋失量的 63.9%,  $\text{NH}_4^+$ -N 则占 36.1%。这与高忠霞等<sup>[17]</sup>研究结果相似, 但低于习斌等<sup>[18]</sup>研究结果, 可能与土壤性质、施肥水平、管理措施等因素有关。农田土壤中各种形态的氮素通过硝化细菌很容易氧化为  $\text{NO}_3^-$ -N, 因为  $\text{NO}_3^-$ -N 带负电而很难被土壤颗粒吸附<sup>[25]</sup>, 所以比较容易流失;  $\text{NH}_4^+$ -N 在土壤中易被胶体吸附和被矿物质穴固定, 且在一定作用下会发生硝化作用转变为  $\text{NO}_3^-$ -N, 故其淋溶流失不如  $\text{NO}_3^-$ -N 强烈, 但当施肥量超过某一临界值时,  $\text{NH}_4^+$ -N 的淋溶流失量也会显著增加<sup>[26]</sup>。因此, 控制氮肥施用量是降低流域内氮素渗漏淋失的关键。

有研究结果显示, 植物篱能很好地改善土壤理化性质, 有效控制水土流失, 对地表径流产生一定的拦截效应<sup>[24]</sup>。然而, 本研究中, 无论在玉米季还是在榨菜季, 各个处理之间土壤 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 及  $\text{NH}_4^+$ -N 的淋失量均无显著差异 ( $P>0.05$ ), 说明不同的桑树配置模式对紫色土旱坡地土壤氮素渗漏淋失的影响效应并不明显。这可能与桑树的种植年限有关, 因为对于 2 年生的幼桑来说, 其根系还不发达, 对土壤氮磷渗漏流失的拦截效果还不明显。

## 2.2 不同桑树配置模式下土壤磷素的渗漏淋失

从不同作物种植季来看, 各个处理中土壤 TP 淋失量均较小 (图 5)。不同处理下土壤 TP 的年淋失量在 0.19~0.21  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间变化, 均值为 0.20  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 该淋失量略低于李学平等<sup>[27]</sup>研究的紫色土稻田磷素淋失量 0.262  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。显著性分析结果表明, 无论玉米季或榨菜季, 不同处理之间土壤 TP 淋失量均无显著差异 ( $P>0.05$ ), 说明不同的桑树配置模式对该流域农田土壤磷

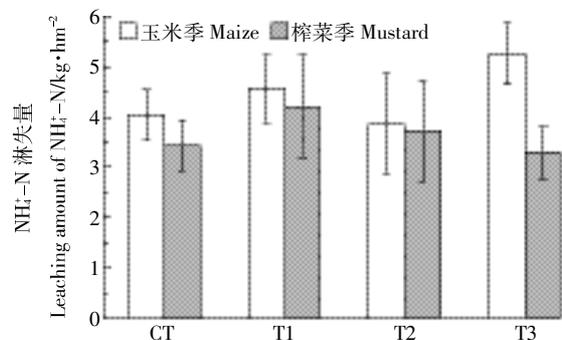


图 4 不同桑树配置模式下土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 淋失量

Figure 4 Leaching amount of  $\text{NH}_4^+$ -N in different crop-mulberry systems

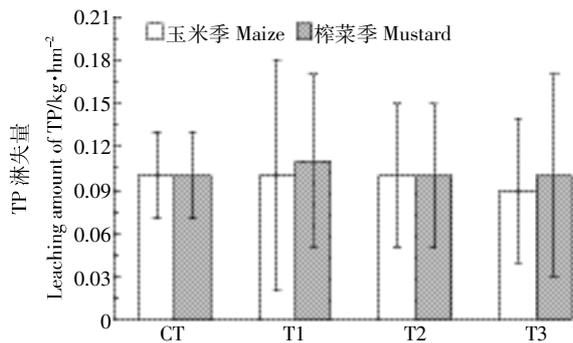


图5 不同桑树配置模式下土壤 TP 渗漏淋失量

Figure 5 Leaching amount of TP in different crop-mulberry systems

素渗漏淋失的影响效应并不明显。土壤对于磷素的固定能力很强,有研究表明磷肥大多施用在耕作层,下层土壤含磷量很低,而且可以吸持和容纳大量磷素,所以磷沿土壤剖面下渗的可能性不大<sup>[28-29]</sup>,即使 60 cm 以下土壤溶液中的磷全部淋溶出来,其淋溶量也很小。

玉米季各处理土壤 TN、TP 淋失量的变异系数分别在 4.90%~17.72%、30.01%~80.03%之间,榨菜季在 19.77%~29.74%、31.62%~70.74%之间,说明土壤 TP 淋失量的变异性大于 TN 淋失量的变异性。这一结果可能是由两种原因产生的:其一、假设土壤氮磷的淋溶液只通过垂直渗漏的方式进入收集装置,那么施肥不均以及氮磷矿化量的不同可能导致不同采样点之间氮磷的淋溶量有差异,而有机氮的矿化量与氮素淋溶量有密切关系<sup>[30]</sup>。紫色土坡耕地氮素矿化量变幅较小<sup>[31]</sup>,可能导致土壤氮素淋失量的变异比较小。其二、变异系数是原始数据标准差与平均数的比值。无论在玉米季还是在榨菜季,各处理土壤 TN、TP 淋失量的标准差均相差不大,但前者的平均值远远大于后者,则可能导致 TP 淋失量的变异性大于 TN 淋失量的变异性。但是具体原因还需要做进一步的研究。

本研究结果显示,土壤 TN 的年淋失量为 TP 的 101.2~123.3 倍,说明不同桑树配置模式下紫色土旱坡地土壤养分渗漏淋失以氮素为主。因此,控制该流域农业面源污染应着重控制氮肥施用量。氮磷化肥配施有机肥可以提高氮肥利用效率,抑制硝化作用,进而降低氮素淋失量。也可以将研究基地下坡的稻田作为一种缓冲带拦截氮磷的渗漏流失,进而减少三峡库区农业小流域氮磷的面源污染。

尽管目前国内关于土壤氮磷养分淋溶的研究较多,但大多采用渗漏计的方法,利用阴阳离子交换树脂吸附法鲜有报道,因此缺少大量可比较和借鉴的资

料,研究范围有限,故试验结果有待进一步检验。

### 3 结论

(1)不同桑树配置模式下紫色土旱坡地土壤总氮的年淋失量变化范围为 21.25~23.43 kg·hm<sup>-2</sup>,总磷的年淋失量变化范围为 0.19~0.21 kg·hm<sup>-2</sup>。土壤硝态氮和铵态氮对总氮年淋失量的平均贡献率分别为 63.9%和 36.1%,硝态氮是土壤氮素渗漏淋失的主要形式。

(2)不同桑树配置模式对三峡库区紫色土旱坡地土壤氮磷渗漏淋失的影响效应并不明显,可能是因为桑树种植年限较短,其根系还不发达所致。

(3)土壤总氮的年淋失量为总磷的 101.2~123.3 倍,不同桑树配置模式下紫色土旱坡地的养分渗漏淋失以氮素为主。

### 参考文献:

- [1] Fu B J, Wu B F, Lu Y H, et al. Three Gorges Project: Efforts and challenges for the environment[J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, 34(6): 741-754.
- [2] 刘圆圆, 史书, 木志坚, 等. 三峡库区典型农业小流域水体氮磷浓度动态变化[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(11): 158-162. LIU Yuan-yuan, SHI Shu, MU Zhi-jian, et al. Dynamic changes of water nitrogen and phosphorus concentrations in a typical small agricultural watershed of the Three-Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(11): 158-162.
- [3] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3390-3396. ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, et al. Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10): 3390-3396.
- [4] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 405-413. LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 405-413.
- [5] 黄沈发, 陆贻通, 沈根祥, 等. 上海市区旱作农田氮素流失研究[J]. 生态与农村环境学报, 2005, 21(2): 150-153. HUANG Shen-fa, LU Yi-tong, SHEN Gen-xiang, et al. Nitrogen losses from dry farming fields in Shanghai suburbs[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2): 150-153.
- [6] 袁玲, 王容萍, 黄建国. 三峡库区典型农耕地的氮素淋溶与评价[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 674-683. YUAN Ling, WANG Rong-ping, HUANG Jian-guo. Nitrogen leaching from farmlands typical of the Three-Gorges Reservoir Region and its evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 674-683.
- [7] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environ-*

- mental Quality, 2001, 30(2):508-520.
- [8] McDowell R, Sharpley A N, Brookes P C, et al. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution[J]. *Soil Science*, 2000, 165(2):137-149.
- [9] Barbee G C, Brown K W. Comparison between suction and free - drainage soil solution samplers[J]. *Soil Science*, 1986, 141(2):149-154.
- [10] Li Z M, Skogley E O, Ferguson A H. Resin adsorption for describing bromide transport in soil under continuous or intermittent unsaturated water flow[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(4):715-722.
- [11] Pampolino M F, Urushiyam T, Hatan R. Detection of nitrate leaching through bypass flow using pan lysimeter, suction cup and resin capsule[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(3):703-711.
- [12] Netto A M, Pieritz R A, Gaudet J P. Field study on the local variability of soil water content and solute concentration[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215(1-4):23-37.
- [13] 易时来, 石孝均, 温明霞, 等. 小麦生长季氮素在紫色土中的迁移和淋失[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4):46-49.  
YI Shi-lai, SHI Xiao-jun, WEN Ming-xia, et al. Nitrogen transference and leaching loss in growth period of wheat in purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4):46-49.
- [14] 易时来, 石孝均. 油菜生长季氮素在紫色土中的淋失[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):83-86.  
YI Shi-lai, SHI Xiao-jun. Nitrogen leaching loss in growth period of rape in purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):83-86.
- [15] 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 Jia-sen, JIANG Pei-kun, XIE Bing-lou, 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.
- [16] 丁 燕, 杨宪龙, 同延安, 等. 小麦-玉米轮作体系农田氮素淋失特征及氮素表观平衡[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6):1914-1921.  
DING Yan, YANG Xian-long, TONG Yan-an, et al. Characteristics of N leaching and apparent N budget in cultivated lands under a winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6):1914-1921.
- [17] 高忠霞, 杨学云. 小麦-玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋溶形态及数量[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8):1624-1632.  
GAO Zhong-xia, YANG Xue-yun. Forms and amounts of nitrogen in leachates affected by different fertilizations after one wheat-maize rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8):1624-1632.
- [18] 习 斌, 翟丽梅, 刘 申, 等. 有机无机肥配施对玉米季产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):326-335.  
XI Bin, ZHAI Li-mei, LIU Shen, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2):326-335.
- [19] Reno K. Using resin traps for assessment of nitrogen leaching in agricultural production systems[J]. *Journal of Undergraduate Research*, 2006, 8(1):23-29.
- [20] Ige D V, Sayem S M, Akinremi O O. Nitrogen mineralization in beef- and pig-manure-amended soils measured using anion resin method[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2015, 95:305-319.
- [21] Sun H, Tang Y, Xie J S, et al. Contour hedgerow intercropping in the mountains of China: A review[J]. *Agroforestry Systems*, 2008, 18(2):65-76.
- [22] 郑红丽, 韦 杰, 陈国建, 等. 三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀研究: 进展与方向[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2014, 31(3):42-48.  
ZHENG Hong-li, WEI Jie, CHEN Guo-jian, et al. Review of soil erosion on purple-soil sloping croplands in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)*, 2014, 31(3):42-48.
- [23] 缪驰远, 陈田飞, 何丙辉, 等. 桑树在紫色土水土保持效应方面研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):117-119.  
LIAO Chi-yuan, CHEN Tian-fei, HE Bing-hui, et al. Study on mulberry effect of soil and water conservation applying in purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):117-119.
- [24] 谢雪东, 倪九派, 周 川. 三峡库区坡耕地农桑系统对径流拦截和氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5):66-69.  
XIE Xue-dong, NI Jiu-pai, ZHOU Chuan. Effects of configuration mode of crop-mulberry system in slope cropland runoff interception and loss of nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5):66-69.
- [25] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11):200-205.  
CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11):200-205.
- [26] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2):277-293.
- [27] 李学平, 孙 燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9):1832-1838.  
LI Xue-ping, SUN Yan, SHI Xiao-jun. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on groundwater in purple paddy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(9):1832-1838.
- [28] DeJager P C, Claassens A S. Long-term phosphorus desorption kinetics of an acid sand clay soil from Mpumalanga, South Africa[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36:309-319.
- [29] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):282-285.  
ZHANG Ming-kui, WANG Li-ping. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):282-285.
- [30] Dong S F, Neilsen D, Neilsen G H, et al. Foliar N application reduces soil NO<sub>3</sub>-N leaching loss in apple orchards[J]. *Plant and Soil*, 2005, 268(1):357-366.
- [31] 王荣萍, 余炜敏, 黄建国, 等. 田间条件下氮的矿化及硝态氮淋溶研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):80-82.  
WANG Rong-ping, YU Wei-min, HUANG Jian-guo, et al. Study on nitrogen mineralization and nitrate leaching in fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):80-82.