

施肥对浙北平原桑园地表径流中氮磷流失的影响

石艳平, 黄锦法, 倪雄伟, 谢建萍, 任佳佳

(浙江省嘉兴市土壤肥料工作站, 浙江 嘉兴 314050)

摘要:为了研究浙北平原区桑园氮磷径流流失负荷与肥料流失系数,开展了典型桑园原位定位试验,设置了常规施肥区和不施肥区对照处理,通过一个施肥周期(2年)内的径流氮磷流失量监测分析,研究了桑园氮磷养分的径流流失负荷与肥料氮磷流失率。结果表明,桑园年平均降雨径流系数约为0.253,一次施肥周期内常规施肥区TN和TP累积流失总负荷达到36.13 kg·hm⁻²和3.49 kg·hm⁻²,其中由施肥引起的N、P养分径流流失量分别达到6.415 kg·hm⁻²和1.090 kg·hm⁻²,肥料N、P径流流失系数分别为0.744%和3.047%。常规施肥区径流氮流失以可溶态为主,其中NO₃-N和NH₄-N分别占比约38.3%和14.4%;而常规施肥区径流液磷的流失以颗粒态为主,占比约为68.9%。施肥后前期的肥料氮磷养分流失较为严重,且磷流失风险比氮更大,施肥周期内桑园由降雨地表径流引起的氮、磷养分累计流失量与产流次数呈幂函数增加(R²>0.95)。

关键词:施肥;径流;桑园;氮磷流失量;流失系数

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)06-0518-07

doi: 10.13254/j.jare.2016.0160

引用格式:

石艳平, 黄锦法, 倪雄伟, 等. 施肥对浙北平原桑园地表径流中氮磷流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 518-524.

SHI Yan-ping, HUANG Jin-fa, NI Xiong-wei, et al. Effects of Fertilization on Surface Runoff Loss of Nitrogen and Phosphorus from Mulberry in the Northern Zhejiang Plain, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 518-524.

Effects of Fertilization on Surface Runoff Loss of Nitrogen and Phosphorus from Mulberry in the Northern Zhejiang Plain, China

SHI Yan-ping, HUANG Jin-fa, NI Xiong-wei, XIE Jian-ping, REN Jia-jia

(Soil and Fertilizer Station of Jiaying City, Jiaying 314050, China)

Abstract: In 2012 and 2013, the situ experimental plots in mulberry under two different kinds of treatment (control fertilization and farmer's conventional fertilization) were conducted, and the runoff water in each plot were collected and tested in a period of two years to investigate the law of runoff, the regular pattern and the influential factors of nitrogen and phosphorus losses, and to study the coefficient of fertilizer loss—es from mulberry in northern Zhejiang plain. The results showed that the annual rainfall runoff coefficient was about 0.253 in mulberry field in northern Zhejiang plain. In those two years, TN and TP cumulative loss load in the conventional fertilization area reached 36.13 kg·hm⁻² and 3.49 kg·hm⁻², of which the N, P nutrient losses of fertilizer reached 6.415 kg·hm⁻² and 1.090 kg·hm⁻², respectively. N, P loss coefficients of fertilizer (the difference of nitrogen or phosphorus loss in the conventional fertilization area and the control area was divided by the total amount of fertilizer application) were 0.744% and 3.047%. Nitrogen loss were mainly in soluble form, in which the NO₃-N and NH₄-N, accounting for about 38.3% and 14.4% respectively; while the phosphorus loss were in particulate form, accounting for about 68.9%. The larger amount of nitrogen and phosphorus nutrient loss, were within the first year of the fertilization period, and the P loss was more serious than N. Within a period of fertilization, the cumulative loss of nitrogen and phosphorus caused by rainfall and the occurrence times of runoff increased with power function (R²>0.95).

Keywords: fertilization; runoff; mulberry; nitrogen and phosphorus loss; loss coefficient

太湖流域是我国传统粮、油、桑、果、蔬等农作物种植发达地区。近年来太湖流域水体污染问题已经成

了制约当地经济社会发展的重要因素,而越来越多的学者提出农业面源污染对水体污染的贡献率越来越大,其中化肥流失是面源污染的主要来源之一^[1-3]。而近10年来针对太湖地区主要粮油作物和蔬菜、苗木地等土地利用方式下的氮磷径流流失负荷或流失系

收稿日期:2016-06-29

作者简介:石艳平(1983—),男,硕士,农艺师,从事土壤与肥料技术推广工作。E-mail:5251499@qq.com

数已有过较系统的研究^[4-8]。但是桑园氮磷养分随降雨径流流失量,以及对农业面源污染的影响至今没有详尽报道。

浙北嘉兴平原,地处环太湖南岸,在苏杭之间,历来有“丝绸之府”之称,是传统桑蚕种养区,目前桑园约占耕地总面积的 10%。嘉兴地区传统桑树种植施肥量较少,且以施用有机肥为主。但是随着化肥工业快速发展,桑树种植中肥料逐渐被化肥所代替。为了研究当地桑园氮磷养分径流流失负荷和肥料流失率,笔者 2012—2013 年在嘉兴市南湖区选取典型桑园,设置了降雨地表径流收集与径流液氮磷浓度监测小区对照试验,测算了由施肥引起的地表径流氮磷流失量和肥料流失率,以期为当地桑园肥料养分管理和氮磷径流流失控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点在嘉兴市南湖区余新镇石埭村嘉兴市蚕种场一分场(东经 120°46'14",北纬 30°42'10"),是比较成熟的桑园,地势平坦,坡度趋近于零,种植桑树品种为农桑 14,树龄为 4 年,树高在 1~1.2 m 之间,树冠丰满,枝叶茂密,长势良好、均匀。各种田间管理方式包括耕种、施肥、施农药、采摘桑叶、剪伐枝条等均按照当地农民习惯方式进行。两处理均采用免耕方式,每年春季 5 月下旬采集 1 次一年生新枝条,春、秋两季即 5 月下旬和 10 月下旬各采集 1 次新鲜桑叶。

试验在 2012 年 2 月 20 日—2013 年 12 月 30 日进行,田间小区试验设置 2 个处理,分别为:

处理 I:对照处理,不施任何肥料。

处理 II:常规处理。

按照当地施肥习惯(表 1),两年为 1 次施肥周期(2012—2013 年),2012 年 2 月 25 日施用牛粪 15 t·hm⁻²作基肥,采用穴施覆土,同时,尿素 300 kg·hm⁻²和过磷酸钙 350 kg·hm⁻²撒施于土表;2012 年 5 月 3

日和 2013 年 5 月 9 日各追施尿素 1 次,直接根部附近地表撒施,施用量分别为 1 000 kg·hm⁻²和 500 kg·hm⁻²。两处理各设 3 次重复,小区随机排列。每个小区长 9.34 m,宽 3.22 m,面积 30 m²,小区之间以地上 20 cm 高且埋入地下 20 cm 深的水泥隔板隔开,防止径流和养分串流。每个小区设置径流唯一出口,地表径流经 15 cm 宽的水泥渠导向对应径流池收集。每个径流池规格为长 170 cm、宽 100 cm、深 90 cm。

1.2 土壤性状分析

试验地为高圩田,土壤性状比较均一,土壤类型为潮泥土,质地为重壤,pH 值 5.84,土壤有机质、全氮和全磷含量分别为 26.9、2.0 g·kg⁻¹和 1.31 g·kg⁻¹,碱解氮、有效磷含量分别为 184、29.5 mg·kg⁻¹。

1.3 样品采集与测试计算方法

试验期间共发生 17 次明显的降水径流产生过程。各小区降雨产生的地表径流由径流收集池自动收集,另设 1 个雨水收集盘收集雨水做空白。每次降雨结束、径流停止注入收集池时,采集径流水样 500 mL。采集样品时,将池中水样搅匀后用 500 mL 塑料瓶倒扣至径流池液面以下中部位置,然后旋转样瓶至瓶口朝上,装满水样后取出,盖紧瓶盖,放置于 4℃冰箱暂存待测。剩下径流样全部用小型泵抽出,并量取每个小区径流池径流水体积,加上 500 mL 待测样即为每个径流池的总径流量。

第 1 年共收集径流 10 次,第 2 年共收集径流 7 次。每批径流水样和雨水样测试硝态氮(NO₃-N)、铵态氮(NH₄-N)、总氮(TN)、可溶磷(DRP)、总磷(TP),测试方法参照文献[9]。

以地表径流流失的氮、磷量分年度计算,为一年中各次径流水中污染物浓度与径流水体积乘积之和。计算公式如下:

$$P=\sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

式中:P 为污染物流失量;C_i 为第 i 次径流水中氮、磷

表 1 常规处理施肥情况
Table 1 Fertilization cases of conventional fertilization area

施肥时间	肥料种类、施用量	折纯量/kg·hm ⁻²	
		N	P ₂ O ₅
2012-02-25	牛粪 15 t·hm ⁻² 、尿素 300 kg·hm ⁻² 、过磷酸钙 350 kg·hm ⁻²	172.0	81.17
2012-05-03	尿素 1 000 kg·hm ⁻²	460.0	0
2013-05-09	尿素 500 kg·hm ⁻²	230.0	0
合计	牛粪 15 t·hm ⁻² 、尿素 1 800 kg·hm ⁻² 、过磷酸钙 350 kg·hm ⁻²	862	81.17

注:有机肥(烘干计)N、P₂O₅含量分别为 0.38%和 0.44%。

浓度; V_i 为第 i 次径流水的体积。

肥料流失系数计算方法参考文献[6],表示方法以流失率(%)表示。计算公式如下:

氮(磷)肥流失系数(%)=(常规处理氮(磷)素流失量-对照处理氮(磷)素流失量)/肥料氮(磷)施用量 $\times 100\%$

1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据分析及图表制作, SPSS13.0 软件进行差异性分析。

2 结果与讨论

2.1 径流系数

图 1 和图 2 可以看出,降雨引起地表径流主要出现在 2 月底至 11 月初,而 6—9 月 4 个月是径流发生最集中的季节,4 个月径流量占全年的 60% 以上。对各次降雨过程中两处理径流量做 t 检验(成对双样本均值分析),两处理间地表径流量没有明显差异。通过 6 个小区收集的平均径流量,计算得出桑园平均径流系数约为 0.253(表 2)。

2.2 氮磷径流流失

考虑到试验期间第 1 年的降雨量与频率符合嘉兴地区常年降雨特征,且降雨地表径流引起养分流失量较大,因此把第一年作为典型年份分析降雨径流量

与氮、磷养分流失特征,结果分别如图 1 和图 2。可以看出,两处理间总氮总磷流失量与降雨引起的径流量没有必然联系。总氮流失量随着时间推移,呈逐渐减少趋势。梁新强等^[8]通过模拟研究得出,与施肥间隔时间越短,降雨径流引起总氮和硝态氮流失越大。而总磷径流流失量随施肥后时间推移呈较平稳的波动趋势,这与杨丽霞等^[10]在太湖稻田研究结果不同,其监测结果显示稻田磷素的流失主要发生在施肥后不久的第 1 次径流,施肥与径流发生的时间间隔是决定径流磷素损失的重要因素。

两处理间各次径流引起的总氮总磷流失量进行 t 检验表明,施肥处理并未明显引起降雨径流氮磷流失量增加。但对全年累计总氮、总磷流失量的比较,施肥后第 1 年常规处理较对照处理总氮、总磷降雨地表径流流失量净增加分别为 $3.646 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.628 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,两年累计净增流失量则分别达到 $6.415 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.090 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。第一年年常规施肥区比对照区总氮、总磷流失量分别高出 5.3% 和 46.6%。综上所述虽然施肥措施不会明显增加每 1 次降雨径流过程中氮磷养分的流失,但是施肥还是明显增加了氮磷径流流失的年负荷,尤其是大幅增加了总磷的年流失量。金树权等^[7]在浙北平原区苗木地研究显示,不论何种施肥方式均显著增加了总氮和总磷的径流流失量;代肖等^[11]也通过模拟试验表明,施肥处理显著增加了太行山地区坡地的氮、磷径流流失量。可见,施肥增加地表径流氮磷流失量的结果是一致的。

2.3 径流中氮磷浓度

一次施肥周期内常规区和对照区产生径流中氮磷浓度变化见图 3 和图 4。常规区处理径流中 N、P 浓度明显要高于对照区。一个施肥周期内,径流中

表 2 一次施肥周期内降雨量与径流系数

Table 2 The rainfall and runoff coefficient in a fertilization period

年份	降雨量/mm	平均径流量/mm	径流系数
第 1 年	1 318.4	362.1	0.275
第 2 年	1 286.8	297.7	0.231
合计	2 605.2	659.8	0.253

注:降雨量由临近试验点的气象监测站提供数据。

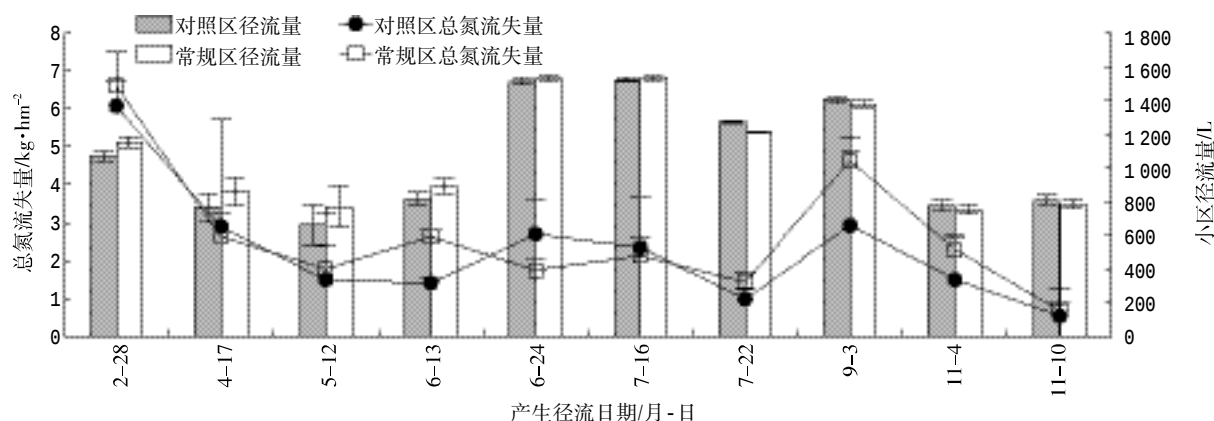


图 1 施肥后第 1 年总氮流失量

Figure 1 The total nitrogen loss in the first year

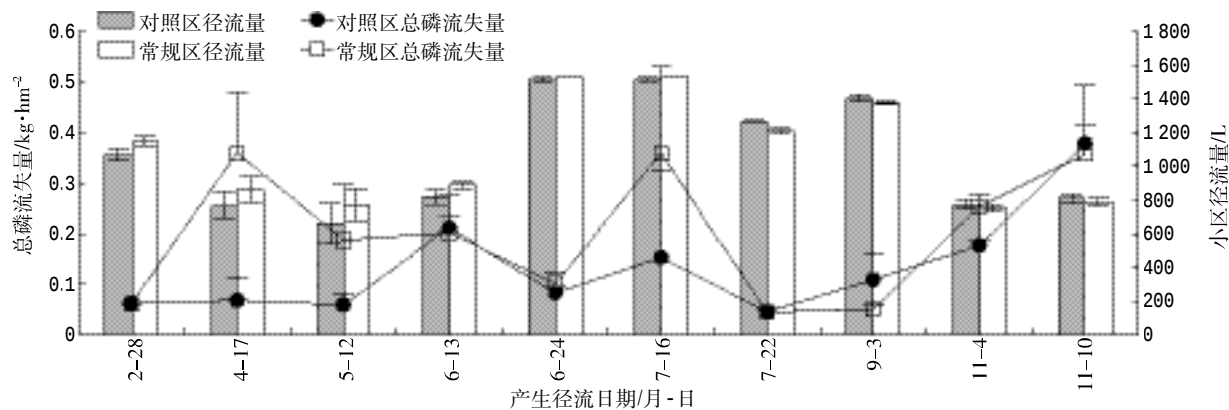


图 2 施肥后第 1 年总磷流失量
Figure 2 The total phosphorus loss in the first year

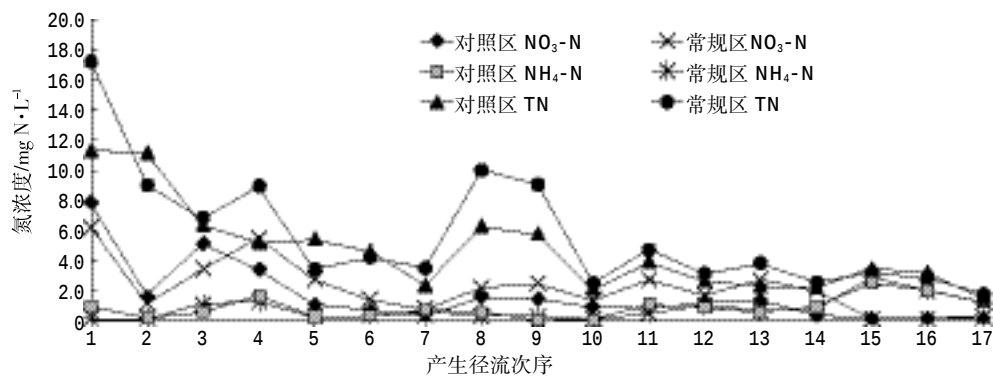


图 3 施肥周期内径流液中氮浓度变化
Figure 3 Dynamic concentration of nitrogen in runoff in fertilization period

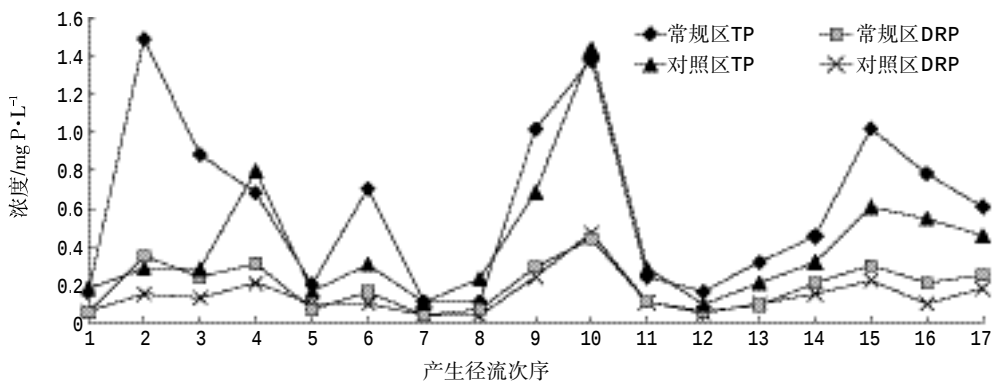


图 4 施肥周期内径流液中磷浓度变化
Figure 4 Dynamic concentration of phosphorus in runoff in a fertilization period

TN 浓度总体均呈下降趋势,而总磷浓度随着降雨强度和降雨间隔时间高低呈波动趋势,雨强越大径流液 TP 浓度越高,两次暴雨间隔时间越长,TP 浓度也越高。TN、TP 浓度在前两次径流产生时最高,主要是基肥施肥量大,而且降雨产流时间离基肥施用间隔较短。

总氮浓度呈波动下降,其中在施基肥和第一次追肥后出现浓度两次峰值,这与降雨施肥间隔和降雨强

度均有关系,段永蕙等^[12]研究结果显示施肥后如遇降雨,流失量会急增,这说明了施肥后短时间内突降暴雨会引起地表径流 TN 浓度的增加,从而增加氮的流失。而总磷浓度下降趋势并不明显,呈较大幅度的波动,出现几次峰值时间均对应了较大降雨强度和较多径流的产生,说明了总磷流失主要集中在强度最大的几次暴雨过程,这与前人的模拟试验结果一致^[8]。另外,有机肥深施可能也是磷浓度波动较大的原因之一^[13]。

通过表 3 可以看出,常规区产生的径流中 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP、DRP 均明显高于对照区,但是两个处理产生径流中氮磷形态较为相近。常规区和对照区径流 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占 TN 比例分别是 38.3%、14.4% 和 35.7%、18.6%, DRP 占 TP 比例分别是 31.1% 和 34.1%。可溶态 N 比例均超过 52%,而可溶态磷均小于 35%,这说明氮流失以可溶态为主,而磷流失以颗粒态为主,这也与前人结论一致^[14-16]。

2.4 肥料养分流失系数

由图 5 和图 6 可以看出,桑园地表径流引起的氮磷养分流失的累计流失量与时间的关系可用幂函数模型拟合,不论施肥与否,养分累积流失量幂函数拟

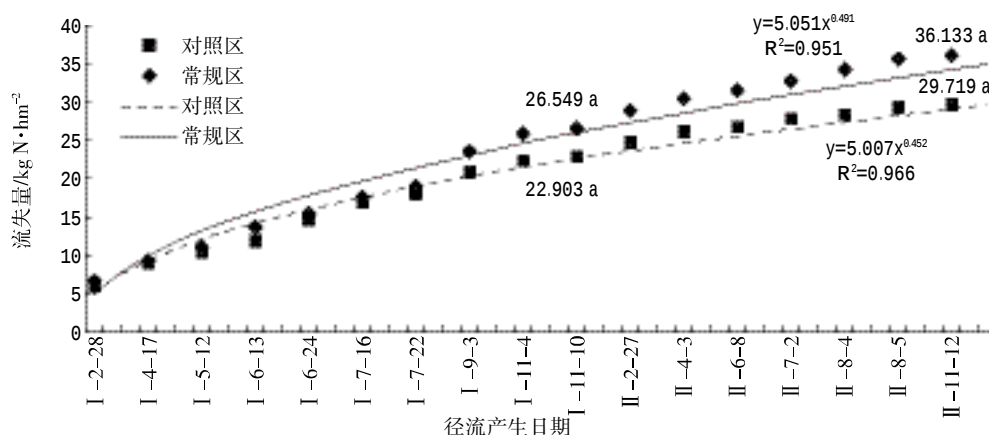
合方程相关系数 R^2 均在 0.95 以上。这表明一个施肥周期内前期氮磷流失强度更大,且施肥后间隔期越短,养分流失量越大。

降雨径流可显著引起桑园土壤养分的流失(表 4),即使不施肥的对照区,第 1 年总氮、总磷流失量也达到 22.90、1.35 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而常规区流失量分别为 26.55、1.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施肥后第二年总氮、总磷养分流失较前一年明显减少,常规区总氮、总磷流失量分别为 9.58、1.52 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而对照区总氮、总磷流失量为 6.82、1.06 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,总氮流失量不到上一年流失量的 1/3。说明桑园由降雨-径流侵蚀引起的养分流失现象比较严重,而施肥又增加了氮磷养分流失量,其中氮

表 3 径流液中氮磷浓度加权平均值

Table 3 Weighted average concentration of nitrogen and phosphorus in runoff in different forms

处理	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DRP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
常规区	5.69	2.18	0.82	0.61	0.19
对照区	4.68	1.67	0.87	0.41	0.14



不同小写字母表示相同横坐标上下两数值差异显著($P<0.05$)。下同

图 5 总氮累计流失量

Figure 5 Accumulated nitrogen loss

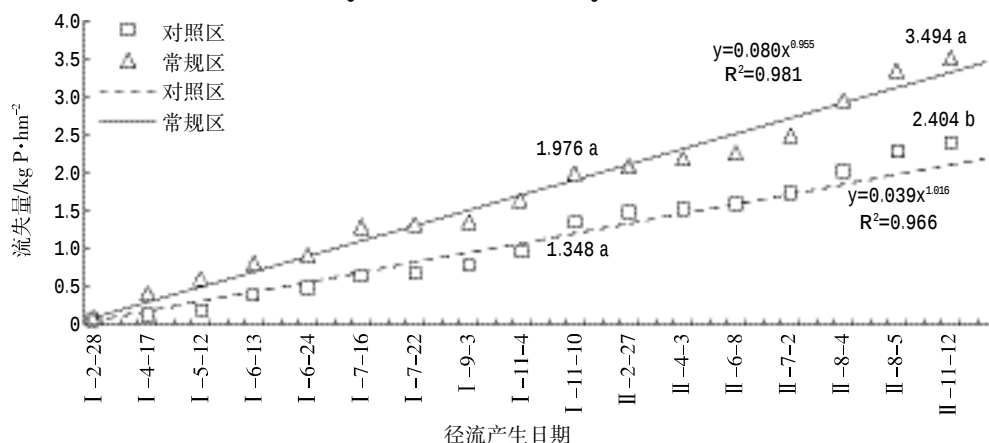


图 6 总磷累计流失量

Figure 6 Accumulated phosphorus loss

表 4 肥料氮、磷流失系数
Table 4 Fertilizer N and P loss coefficient

年份	TN 径流流失量/kg·hm ⁻²		TP 径流流失量/kg·hm ⁻²		肥料 N、P 的流失系数/%	
	对照区	常规区	对照区	常规区	N	P
第 1 年	22.90±1.18a	26.55±2.55a	1.35±0.18a	1.98±0.15a	0.577	1.743
第 2 年	6.82±1.31a	9.58±1.07b	1.06±0.16b	1.52±0.27a	0.321	1.304
合计	29.72a	36.13a	2.40 b	3.49 a	0.744	3.047

注:不同字母表示对照区与常规区差异显著(P<0.05)。

素流失量要远高于磷素的流失量,而第 1 年是氮磷流失的主要风险期。与一个施肥周期内引起肥料氮、磷流失两年总负荷 6.415 kg·hm⁻² 和 1.090 kg·hm⁻² 相比,前人在皖南山区桑园测算结果为连续 3 年内常规施肥区平均每年总氮、总磷流失负荷分别为 8.38、0.26 kg·hm⁻²,而其中肥料氮、磷径流净流失量为 2.37、0.073 kg·hm⁻²[17],江汉平原棉花田研究结果为常规施肥区总氮、总磷年径流流失量达到 62.83、5.245 kg·hm⁻²,其中肥料氮、磷净流失量为 17.78、1.455 kg·hm⁻²[18]。荷兰学者认为环境可接受的磷素流失量为 0.44 kg·hm⁻²·a⁻¹[19]。可见,浙北平原区桑园氮、磷素流失负荷虽然不算大,但仍存在对环境污染风险。

从表 4 可以看出,一个施肥周期内桑园由施肥引起的氮磷养分流失系数并不高。施肥后第 1 年氮流失系数仅为 0.577%,磷流失系数为 1.743%;第 2 年氮、磷养分流失系数则更低,且两年累计氮、磷的降雨地表径流流失系数仅分别为 0.744%和 3.047%。原因可能一是试验地处平原区,坡度很小,降雨产流较慢,不太容易因引起土壤表层肥料养分快速溶解流失和随土壤颗粒的流失而流失,国内外早期的研究也表明农田养分径流流失大部分是因水土流失引起的[20]。另外,基肥施用量占肥料施用总量的比重较大,且基肥施用是采用开沟深施覆土,使桑树根部附近土壤不至于板结而延缓了产流时间,也有利于施于表层的追肥随雨水下渗,减少了肥料的流失率[21];加之土壤为重壤土,相对较粘重的土壤不易引起流失[22];再加上桑树的生物量大,生长速度快,肥料吸收量较大,经实际测算施肥区桑枝和桑叶产量平均每年比对照区高出 14.2%和 15.90%,更加繁茂的枝叶增加了土壤覆盖度,从而减少了养分流失;另外,追施尿素一般在 5 月份,当地强降雨主要集中在 6—8 月份,导致肥料氮素流失量并不算严重,而且施肥用量过高或过低也会加剧土壤矿质氮的流失[23],也是造成常规区(可视为相对施肥量过高)与对照区(视为施肥量过低)径流氮流失相差不大的原因之一,故肥料氮的流失系数更低。

3 结论

(1)降雨相对正常的年份,浙北平原地区桑园全年降雨径流系数为 0.253。

(2)施肥增加了氮磷养分的径流流失,一次施肥周期(2 年)内,浙北桑园常规施肥区 TN 和 TP 累积流失总负荷达到 36.13 kg·hm⁻² 和 3.49 kg·hm⁻²,其中第 1 年 TN 流失量占施肥周期内总氮流失总量的 3/4 以上,这与不同年份降雨特征和施肥量不同均有关系。氮素流失以可溶态为主,其中 NO₃-N、NH₄-N 分别占 38.3%、14.4%;而磷素流失以颗粒态为主,其中 DRP 仅约为 31.1%。

(3)施肥对 N、P 流失贡献量分别为 6.415 kg·hm⁻² 和 1.090 kg·hm⁻²,肥料氮、磷地表径流流失系数分别为 0.744%和 3.047%。肥料养分流失系数较低,主要是由于平原区桑园坡度小、桑树植株吸收肥料量多且对土地覆盖度大、基肥深施、追肥避开雨季等多种因素造成的。

(4)施肥周期内,前期肥料养分流失风险更大,且磷流失较氮更严重一些。桑园地表径流引起的氮磷养分的累计流失量与产流次数呈幂函数增加,相关系数 R²>0.95。

参考文献:

[1] Oenema O, Liere L V, Schoumans O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands[J]. Journal of Hydrology, 2005, 304: 289-301.

[2] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 基于水环境功能区划的农业面源污染源解析及其空间异质性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 103-108.

QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, GUO Chun-xia, et al. Analysis of agricultural non-point source pollution based on water environmental function zoning and its spatial heterogeneity[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 103-108. (in Chinese)

[3] 席远官, 陈瑞冰, 徐 欣, 等. 太湖地区麦季氮磷径流流失规律与控制对策研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(4): 106-109.

XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, XU Xin, et al. Study on N, P loss through runoff in wheat field of Taihu lake region and countermeasures

- [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(4): 106-109. (in Chinese)
- [4] 王子臣, 邱丹, 堵燕钰, 等. 太湖流域典型菜地地表径流及氮磷流失特征[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(6): 1501-1504.
WANG Zi-chen, QIU Dan, DU Yan-yu, et al. Characteristics of surface runoff and nitrogen and phosphorus losses in typical vegetable field of Taihu lake basin [J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 28(6): 1501-1504. (in Chinese)
- [5] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 21-25.
XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, ZHU Li-qun, et al. Study on dynamic changes of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and runoff loss in Taihu region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 21-25. (in Chinese)
- [6] 席运官, 田伟, 李妍, 等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(3): 534-540.
XI Yun-guan, TIAN Wei, LI Yan, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses and loss coefficients in rice-wheat rotation system in Taihu Lake basin[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 30(3): 534-540. (in Chinese)
- [7] 金树权, 陈若霞, 罗艳, 等. 不同施肥处理对苗木地地表径流氮磷流失的影响[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(3): 412-416.
JIN Shu-quan, CHEN Ruo-xia, LUO Yan, et al. Influence of different fertilization treatments on nitrogen and phosphorus runoff losses from seedling land[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(3): 412-416. (in Chinese)
- [8] 梁新强, 陈英旭, 李华, 等. 雨强及施肥降雨间隔对油菜田氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 14-17.
LIANG Xin-qiang, CHEN Ying-xu, LI Hua, et al. Effect of rainfall intensity and rain-fertilization interval on N export by runoff in oilseed rape land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 14-17. (in Chinese)
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 杨丽霞, 杨桂山. 施磷对太湖流域水稻田磷素径流流失形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 31-34.
YANG Li-xia, YANG Gui-shan. Effects of phosphorus application on P forms in runoff from rice field of Taihu watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 31-34. (in Chinese)
- [11] 代肖, 张海涛, 周大迈. 施肥对太行山区片麻岩山地水土流失和养分流失影响的研究[J]. *河北农业大学学报*, 2014, 37(1): 16-21.
DAI Xiao, ZHANG Hai-tao, ZHOU Da-mai. Study on the effect of fertilization to the sloping surface soil and nutrient loss of Taihang mountainous gneiss area[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2014, 37(1): 16-21. (in Chinese)
- [12] 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J]. *土壤*, 2005, 37(1): 48-51.
DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming, ZHANG Yu-juan. Effects of fertilizer application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff [J]. *Soil*, 2005, 37(1): 48-51. (in Chinese)
- [13] Ahuja L, R Sharply A N. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P [J]. *Water Resour Res*, 1981, 17: 967-974.
- [14] 郭伦, 李佩武. 降雨产流过程与氮、磷流失特征研究[J]. *环境科学学报*, 1996, 16(1): 111-116.
WU Lun, LI Pei-wu. Study on runoff process and characteristics of nitrogen and phosphorus loss[J]. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, 1996, 16(1): 111-116. (in Chinese)
- [15] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 16-19.
MA Kun, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Under different rainfall on slope land of red soil nutrient loss characteristics [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3): 16-19. (in Chinese)
- [16] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. *土壤学报*, 1999, 16(4): 536-543.
KANG Ling-ling, ZHU Xiao-yong, WANG Yun-zhang, et al. Study on soil nutrient loss under different rainfall intensity in loess soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 16(4): 536-543. (in Chinese)
- [17] 王桂琴, 马友华, 孙兴旺, 等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 6-10.
WANG Gui-ling, MA You-hua, SUN Xing-wang, et al. Study on nitrogen and phosphorus loss from wheat rice rotation system in Chaohu River Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 6-10. (in Chinese)
- [18] 段小丽, 张富林, 张继铭. 江汉平原棉田地地表径流氮磷养分流失规律[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 49-53.
DUAN Xiao-li, ZHANG Fu-lin, ZHANG Ji-ming. Regular pattern of nitrogen and phosphorus runoff losses from cotton field in Jiangnan plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 49-53. (in Chinese)
- [19] Van der Molen D F, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 4-11.
- [20] 杨金玲, 张甘霖. 皖南低山丘陵地区流域氮磷径流输出特征[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(3): 34-37.
YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin. Wannan low mountain and hilly region of basin of nitrogen and phosphorus runoff output characteristics [J]. *Rural Ecological Environment*, 2005, 21(3): 34-37. (in Chinese)
- [21] 石艳平, 段增强. 水肥综合管理对减少滇池北岸韭菜地氮磷流失的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 2138-2144.
SHI Yan-ping, DUAN Zeng-qiang. Integrated management of water and fertilizer to reduce the nitrogen and phosphorus loss from vegetable fields on shore of North Dianchi lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2138-2144. (in Chinese)
- [22] 袁东海, 王兆骞, 陈欣. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 189-198.
YUAN Dong-hai, WANG Zhao-qian, CHEN Xin. Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus loss in different land use patterns in red soil watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 189-198. (in Chinese)
- [23] 张兴昌, 郑剑英, 吴瑞俊, 等. 氮磷配合对土壤氮素径流流失的影响[J]. *土壤通报*, 2001, 32(3): 110-112.
ZHANG Xing-chang, ZHENG Jian-ying, WU Rui-jun, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on soil nitrogen runoff loss[J]. *Soil Bulletin*, 2001, 32(3): 110-112. (in Chinese)