

闽西北烟-稻轮作系统地表氮、磷流失特征研究

张玉树, 丁 洪*, 郑祥洲, 陈静蕊

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013)

摘 要:为了明确福建省高温多雨气候条件下烟-稻轮作系统中地表氮、磷流失情况,在连续 3 a 定位试验条件下研究了不同施肥措施对烟-稻轮作系统中地表氮、磷流失的影响。研究表明,福建省烟-稻轮作系统中氮、磷流失主要集中在上半年(烟季),而且氮、磷流失总量主要受降水量的影响,与产流降雨量呈显著或极显著相关关系。当地习惯施肥条件下,烟-稻轮作系统中氮、磷的流失量分别为 $4.71\sim 14.86\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.93\sim 2.20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,流失系数分别为 0.76%~1.27%和 0.47%~1.71%。与习惯施肥相比,优化施肥处理氮、磷的流失量分别减少了 1.25%~13.82%和 8.82%~14.99%,流失系数分别为 0.76%~1.43%和 0.41%~1.54%。增施 50%氮肥和增施 50%磷肥的氮和磷流失量分别比优化施肥处理提高 7.6%~37.6%和 21.5%~27.4%。此外,同等施肥量条件下,稻草还田的氮、磷流失量分别提高 6.4%~16.4%和-3.4%~14.0%,流失系数分别达到 0.86%~1.91%和 0.36%~2.00%。综上所述,优化施肥处理可以减少氮、磷的流失量,而增量施肥明显增加肥料流失量,稻草还田也提高了氮、磷流失的风险。

关键词:烟-稻轮作;氮流失;磷流失;流失系数

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)05-0969-08

Nitrogen and Phosphorus Losses from Surface Runoff in Tobacco – rice Rotation System in Northwest of Fujian Province, China

ZHANG Yu-shu, DING Hong*, ZHENG Xiang-zhou, CHEN Jing-rui

(Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract:To investigate the losses of nitrogen(N) and phosphorus(P) from surface runoff in the tobacco-rice rotation system in Fujian Province, a located field experiment was conducted to study the effect of different fertilization measures on the losses. The results indicated that the N & P losses mainly occurred in tobacco growing season, and the loss amounts were significantly correlated with the rainfall which conducted runoff. With conventional fertilization, the loss amounts of N and P were $4.71\sim 14.86\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and $0.93\sim 2.20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, whose loss coefficients were 0.76%~1.27% and 0.47%~1.71%, respectively. Compared to conventional fertilization, the loss amounts in optimized fertilization treatment decreased 1.25%~13.82% for N and 8.82%~14.99% for P, whose loss coefficients were 0.76%~1.43% and 0.41%~1.54%, respectively. And the N & P losses with the treatment that increasing 50% nitrogen and phosphorus fertilizer applied would bring about increase of 7.6%~37.6% and 21.5%~27.4% than that with optimized fertilization. Compared to optimized fertilization, the treatment that rice straw returning increased the N & P runoff losses of 6.4%~16.4% and -3.4%~14.0%, whose loss coefficients reached 0.86%~1.91% and 0.36%~2.00%, respectively. Based on the analysis results it was considered that the optimized fertilization could reduce N & P runoff losses amount, more application of N & P increased the losses, and the rice straw returning also increased the risk of N & P runoff losses.

Keywords: tobacco-rice rotation system; nitrogen loss; phosphorus loss; loss coefficient

收稿日期:2011-11-09

基金项目:农业部科技项目(WX-Z-07-08);公益性行业(农业)科研专项(201003014-6-1-2);福建省公益类科研院所专项(2010R1024-2);福建省农业科学院创新团队重点科研项目

作者简介:张玉树(1980—),男,福建安溪人,硕士,助理研究员,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail:ZY3505@126.com

* 通讯作者:丁 洪 E-mail:hongding@china.com

化肥是农业生产中不可缺少的物质资料,在作物增产中具有不可替代的作用。近年来我国氮肥和磷肥用量不断增加,已是世界上肥料用量最多的国家,化肥的年使用量达 5 404.4 万 t^[1-2]。按播种面积计算,单位面积化肥使用量为 495.9 kg·hm⁻²,远远超过发达国家为防止化肥对水体造成污染而设置的 225 kg·hm⁻² 的上限。化肥的大量施用增加了农田氮、磷流失的风险,而农田流失的氮、磷是水体富营养化的主要原因。从世界范围来看,农业非点源污染已经成为水体污染的主要形式。丹麦 270 条河流中 94% 的氮负荷、52% 的磷负荷来源于农业非点源,荷兰水环境污染的 TN、TP 中分别有 60% 和 40%~50% 来源于农业非点源排放^[3-4]。我国农业污染源引起的水体污染也非常严重,近年来蓝藻大面积爆发。据统计,江苏太湖地区各河流总氮含量超标率 88%~100%,太湖 97% 面积的水体已经呈中富营养状态,湖水样总 N 含量超标率 100%;在进入太湖的污染物中有 32% 来自农田排水,通过农田输入湖泊的氮量占输入湖泊氮总量的 7%~35%^[5-7]。近年来,我国水体富营养化日益严重,农田营养源流失所引起的环境污染问题已经引起了广泛的关注。

福建省是我国主要的烟草种植省份之一^[2],2009 年种植面积达 6.9×10⁴ hm²。福建省的烟草主要集中在闽西北地区、以烟-稻轮作制度进行种植,该种植制度是福建省典型的水-旱轮作模式之一,在全国范围内也具有较强的代表性。此外,其他学者的研究结果表明,水-旱轮作制度的氮磷地表流失量高于其他种植模式,但不同区域的流失量差异较大^[8]。本文研究了高温多雨条件下,福建省西北地区烟-稻轮作系统中氮、磷等主要污染物流失系数,旨在为准确测算种植业源污染物流失数量提供基本参数,为控制种植业源污染提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 监测点基本情况

监测点位于福建省三明市将乐县古镛镇张公村,东经 117°26′48″,北纬 26°44′53″,地处福建省西北部山区,属于南方山地丘陵区,为中亚热带季风山地气候,年平均气温 18.9℃,极端低温-5℃,历年平均极端低温 3.8℃,无霜期 270 d 左右,≥10℃年有效积温 5 666℃,年均降水量为 1 667~1 800 mm。土壤大多为典型酸性花岗岩发育的红、黄壤,土壤腐殖质层 15~30 cm,土层大多 1 m 以上。监测点耕层土壤的理化性状为:有机质 25.85 g·kg⁻¹、全氮 1.39 g·kg⁻¹、全磷

0.52 g·kg⁻¹、碱解氮 167.45 mg·kg⁻¹、速效磷 24.63 mg·kg⁻¹、速效钾 89.46 mg·kg⁻¹、pH5.31。

1.2 试验方法

监测试验设置 6 个不同施肥处理,空白(不施肥)、常规施肥(氮、磷、钾肥均采用当地平均施肥量、施肥方式和分配比例)、优化施肥、增量施氮(在优化施肥的肥料用量基础上增施 50%)、增量施磷(在优化施肥的肥料用量基础上增施 50%)和优化施肥加稻草还田(在优化施肥的肥料用量基础上增施稻草干重 240 kg·667 m⁻²)。每个处理设 3 个重复,采用完全随机排列,小区面积为 28 m²。监测时间为 2008 年 3 月 1 日至 2010 年 11 月 30 日,上半年种植烟草,下半年种植水稻。

烟季除常规施肥和增量施氮处理外,其余各处理施用的肥料品种均由烟草专用肥(12-7-22)、钙镁磷(0-12-0)、硫酸钾(0-0-50)和硝酸钾(13-0-44.5)组成,常规施肥处理除上述肥品种外还施入普通复合肥(16-16-16),增量施氮还施入尿素(46-0-0)。各处理的施肥量如表 1 所示。基肥于移栽前采用条施方式施用,施后覆土并盖上地膜;追肥分别于烟草的苗期、团棵期和旺长期采用穴施方式施用。稻季各处理施用的肥料品种为碳铵(17.1-0-0)、尿素(46-0-0)、过钙(0-12-0)和氯化钾(0-0-60),各处理施肥量如表 2

表 1 烟草季试验处理与施肥量(kg·hm⁻²)

Table 1 Treatments and fertilization rates of tobacco experiment(kg·hm⁻²)

处理	基肥	第 1 次追肥	第 2 次追肥	第 3 次追肥	总量
CK	N	0	0	0	0
	P ₂ O ₅	0	0	0	0
	K ₂ O	0	0	0	0
习惯施肥	N	90.0	4.9	20.2	135.4
	P ₂ O ₅	97.5	0	14.4	126.3
	K ₂ O	352.5	16.7	34.4	438.0
优化施肥	N	104.4	3.9	7.6	127.5
	P ₂ O ₅	96.9	0	1.0	99.0
	K ₂ O	266.4	13.3	23.3	377.2
增量施氮	N	156.8	11.5	11.4	191.2
	P ₂ O ₅	96.9	0	1.0	99.0
	K ₂ O	290.9	13.3	36.0	376.9
增量施磷	N	104.4	3.9	7.6	127.5
	P ₂ O ₅	146.4	0	1.0	148.5
	K ₂ O	266.4	13.3	23.3	377.2
优化+稻草	N	104.4	3.9	7.6	127.5
	P ₂ O ₅	96.9	0	1.0	99.0
	K ₂ O	266.4	13.3	23.3	377.2

表 2 水稻季各试验处理施肥量(kg·hm⁻²)

Table 2 Treatments and fertilization rates of rice experiment(kg·hm⁻²)

处理	基肥	第 1 次追肥	第 2 次追肥	第 3 次追肥	总量
CK	N	0	0	0	0
	P ₂ O ₅	0	0	0	0
	K ₂ O	0	0	0	0
习惯施肥	N	71.8	138.0	0	209.8
	P ₂ O ₅	36.0	0	0	36.0
	K ₂ O	54.0	54.0	0	108.0
优化施肥	N	66.7	66.2	16.6	166.0
	P ₂ O ₅	29.9	0	0	29.9
	K ₂ O	36.0	36.0	0	72.0
增量施氮	N	100.0	99.4	24.8	249.1
	P ₂ O ₅	29.9	0	0	29.9
	K ₂ O	36.0	36.0	0	72.0
增量施磷	N	66.7	66.2	16.6	166.0
	P ₂ O ₅	44.8	0	0	44.8
	K ₂ O	36.0	36.0	0	72.0
优化+稻草	N	66.7	66.2	16.6	166.0
	P ₂ O ₅	29.9	0	0	29.9
	K ₂ O	36.0	36.0	0	72.0

所示。稻季的基肥与追肥均采用撒施方式施用,基肥在整田时施用,追肥时期分别为水稻的返青期、分蘖期和长穗期。

1.3 样品采集与分析

每个小区设置 1 个径流池用于收集径流水,径流池规格为 1.2 m×0.7 m×1.0 m。每次径流产生后先测量径流水体积,然后混匀并采集不同水层的混合水样,水样速冻后带回实验室分析其硝态氮、铵态氮、总氮可溶性总磷及总磷含量。测试方法分别为酚二磺酸分光光度法、水杨酸分光光度法、碱性过硫酸钾消解分

光光度法和钼酸铵分光光度法^[9]。

1.4 流失系数计算方法

地表径流流失的氮、磷量等于整个监测周期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 为氮(或磷)流失量;C_i 为第 i 次径流水中氮(或磷)的浓度;V_i 为第 i 次径流水的体积。

肥料流失系数的表示方法以流失率(%)表示,计算公式如下:

流失率=[施肥处理氮(或磷)流失量-对照处理氮(或磷)流失量]/氮(或磷)投入量×100%

数据分析采用 Origin7.5 和 SPSS13.0 统计软件。

2 结果分析

2.1 不同施肥处理对硝态氮、铵态氮地表径流损失量的影响

从图 1 可以看出,施肥处理的硝态氮流失量高于不施肥处理,其中增量施氮处理明显高于其余各施肥处理。在 2008 年、2009 年和 2010 年,增量施氮处理的硝态氮流失总量分别比其他施氮水平处理增加了 12.4%~45.0%、125.0%~138.3%和 21.1%~53.6%,其中 2009 年、2010 年的增加幅度达到 5%显著水平。而不同施肥处理的铵态氮流失量差异小于硝态氮,不同年份相同处理的铵态氮流失量以 2010 年最高,2008 年次之,2009 年最低。2008 年各处理的铵态氮损失总量差异不显著,这可能与监测设施建设过程中对土壤扰动有关。2009 年和 2010 年呈现出随施氮量增加而提高的趋势,增量施氮处理的铵态氮流失量分别比其他

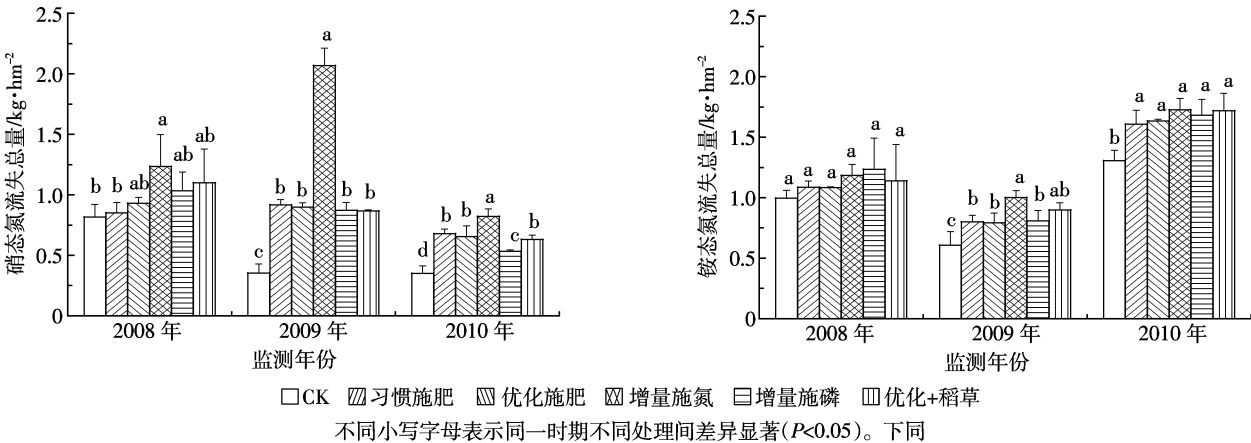


图 1 不同施肥处理硝态氮与铵态氮流失总量

Figure 1 Amount of NO₃-N and NH₄⁺-N loss with different fertilizer application

施肥处理提高了 11.3%~26.3%和0.4%~7.5%，其中 2009 年的差异达到 5%显著水平。此外，稻草还田也在一定程度上增加铵态氮的流失量，但差异不显著。

2.2 不同施肥处理对总氮地表径流损失量的影响

图 2 的监测结果表明，不同施肥处理总氮单次流失量差异明显，但不同年份间单次流失量峰值出现的时期不一样，2008 年各处理的总氮损失高峰出现在 4 月 15 日和 7 月 1 日，2009 年的峰值出现在 3 月 10 日和 11 月 17 日，2010 年的峰值出现在 3 月 10 日、4 月 16 日和 5 月 23 日。从图 2 还可以看出，总氮的流失量主要集中在烟季，2008 年、2009 年和 2010 年烟季流失的总氮量分别占该年份流失总量的 80.1%~86.6%、58.8%~64.1%和 92.7%~95.5%。总氮流失量随产流降雨量(产生单次径流的降雨量之和)的变化而变化，相关分析结果表明(表 3)，各处理的总氮流失量与产流降雨量呈显著或极显著正相关关系。

从图 3 可以看出，不同施肥处理总氮流失量差异

表 3 径流损失量与产流降雨量相关性分析($n=37$)

Table 3 Relationships between different form of nitrogen and phosphorus loss from streamflow and the sum of precipitation derived from streamflow($n=37$)

处理	CK	习惯施肥	优化施肥	增量施氮	增量施磷	优化+稻草
硝态氮	0.362*	0.257	0.257	0.232	0.327*	0.361*
铵态氮	0.132	0.134	0.158	0.224	0.280	0.293
总氮	0.408*	0.459**	0.428**	0.516**	0.398*	0.418**
可溶性磷	0.393*	0.318	0.436**	0.369*	0.345*	0.258
总磷	0.391*	0.406*	0.395*	0.400*	0.519**	0.343*

注：“*”和“**”分别表示 0.05 和 0.01 水平差异显著。

明显，呈现出增量施氮处理最高，增量施磷处理最低的规律。与优化施肥处理相比，2008 年、2009 年和 2010 年增施 50%氮肥处理的总氮流失量分别提高 7.6%、37.6%和 20.6%。此外，稻草还田也会提高总氮的流失量，与相同施氮量的优化施肥处理相比，2008 年、2009 年和 2010 年总氮流失量分别提高 9.5%、

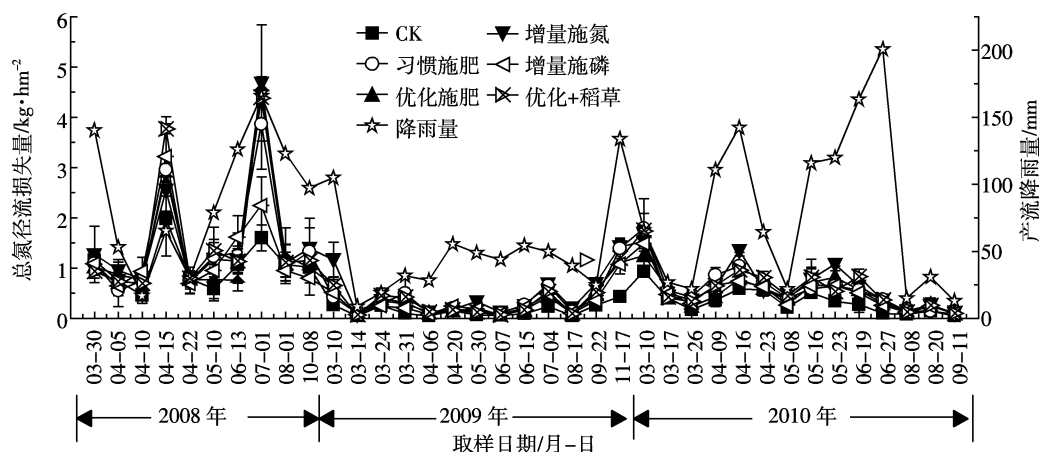


图 2 不同施肥处理总氮流失量变化动态

Figure 2 Dynamic of nitrogen loss amount with different fertilizer application

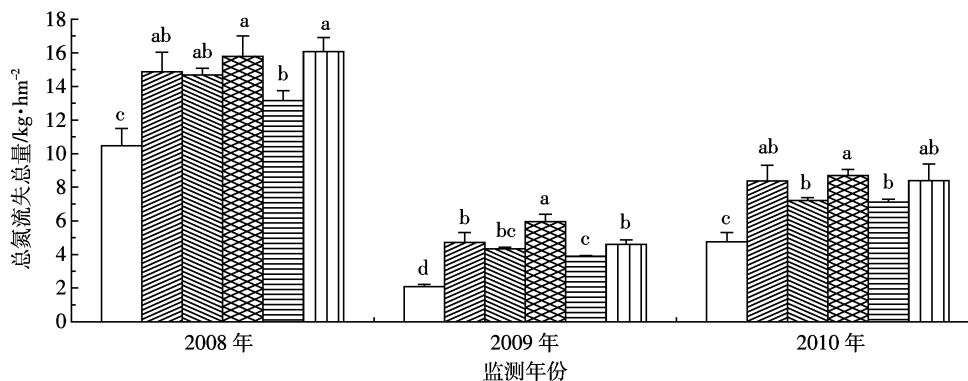


图 3 不同施肥处理总氮流失总量

Figure 3 Total nitrogen loss of different fertilizer application

6.4%和 16.4%。上述结果表明,过量施用氮肥会直接导致氮肥流失量的增加,而增施磷肥有可能提高作物对氮素养分的吸收从而减少氮肥的流失,稻草还田也会增加总氮的流失风险。

2.3 不同施肥处理对可溶性总磷地表径流损失量的影响

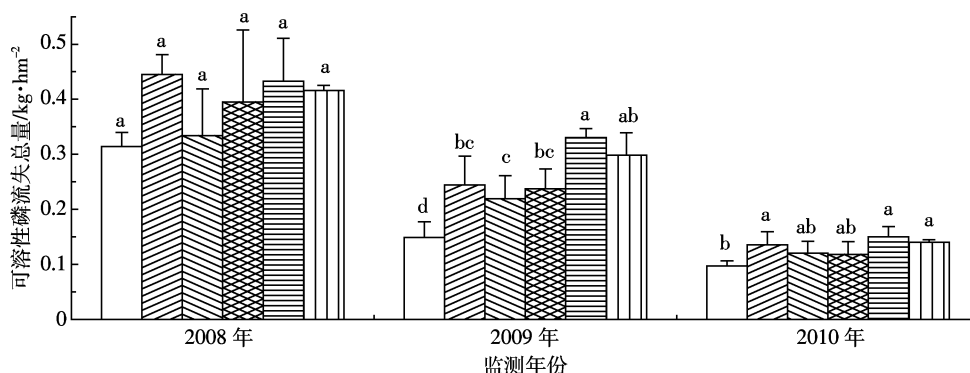
从图 4 可以看出,2009 年和 2010 年,不施肥处理的可溶性磷流失量显著低于其他施肥处理,而 2008 年各处理的差异不显著,这也是由于监测设施建设过程中对土壤的扰动引起的。增量施磷和优化施肥加稻草还田处理提高了可溶性磷的流失风险。与优化施肥处理相比,2008 年、2009 年和 2010 年增量施磷的可溶性磷流失量分别提高了 29.8%、31.9%和 24.7%,优化施肥加稻草还田处理分别提高 24.8%、33.5%和 16.5%。

2.4 不同施肥处理对总磷地表径流损失量的影响

与总氮径流损失量的变化规律相似,总磷的径流损失也随产流降雨量的变化而变化(图 5)。相关分析

结果表明(表 3),各处理的总磷流失量与产流降雨量呈显著或极显著正相关关系。不同年份总磷的径流损失高峰出现时期也不一样,2008 年各处理的总磷损失高峰出现在 3 月 30 日、4 月 15 日和 7 月 1 日,2009 年出现在 3 月 10 日、7 月 4 日和 11 月 17 日,2010 年出现在 3 月 10 日、4 月 23 日和 6 月 27 日。2008 年、2009 年和 2010 年度烟季流失的总磷量分别占该年份流失总量的 88.4%~92.1%、62.5%~78.7%和 95.0%~97.0%。

从图 6 可以看出,增量施磷处理的总磷流失总量明显高于其他施肥处理,而增量施氮处理则有减少总磷流失的趋势。2008 年、2009 年和 2010 年,增量施磷处理的总磷流失量分别比其他施肥处理高 14.3%~41.7%、10.6%~28.9%和 3.3%~24.6%。与同等施磷量的优化施肥处理相比,增量施氮处理总磷流失量分别降低了 10.1%、4.9%和 2.5%。上述结果表明,过量施用磷肥会直接导致磷素养分流失量的增加,而增施氮肥有可能提高作物的磷素养分的吸收从而减少磷素



□CK ▨习惯施肥 ▩优化施肥 ▨增量施氮 ▮增量施磷 ▤优化+稻草

图 4 不同施肥处理可溶性磷流失总量

Figure 4 Total amount of dissolved phosphorus loss with different fertilizer application

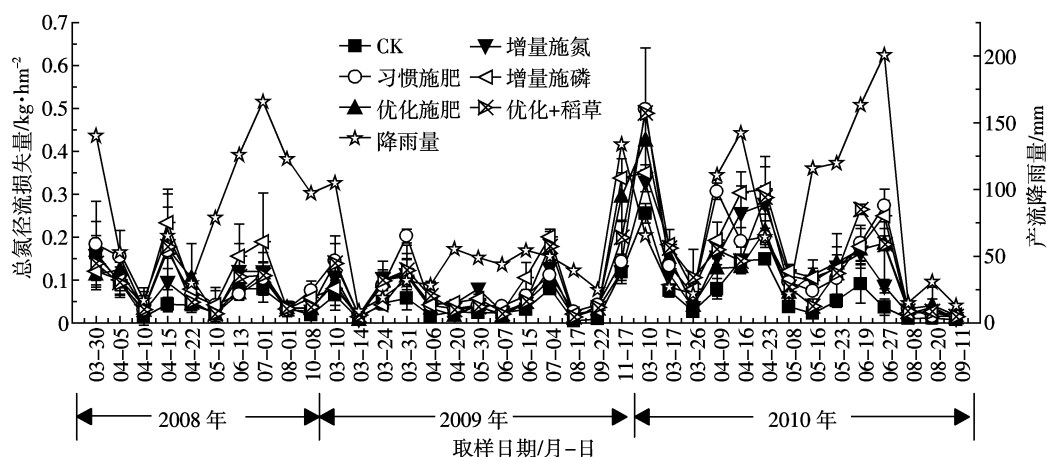


图 5 不同施肥处理总磷流失量变化动态

Figure 5 Dynamic of loss phosphorus amount with different fertilizer application

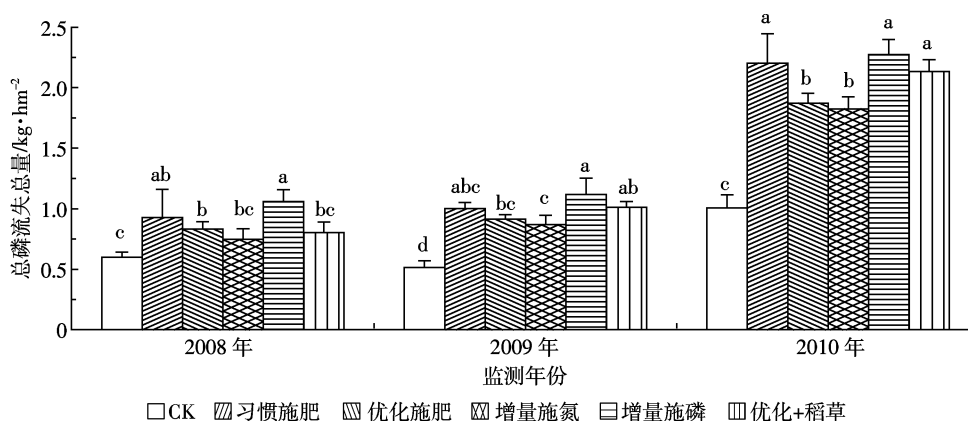


图 6 不同施肥处理总磷流失总量

Figure 6 Total amount of phosphorus loss with different fertilizer application

的流失。

2.5 不同施肥处理对氮、磷地表径流流失系数的影响

从表 4 可以看出, 氮流失系数的年际变化小于磷, 2008—2010 年间各处理氮的流失系数为 0.61%~1.91%, 磷的流失系数为 0.26%~2.00%, 3 a 平均流失系数分别为 0.78%~1.33%和 0.78%~1.08%。稻草还田增加氮、磷流失的风险, 与相同施肥量的优化施肥处理相比, 2008 年、2009 年和 2010 年优化施肥加稻草还田处理的氮流失系数分别提高了 0.48%、0.10%和 0.4%, 磷流失系数分别提高 0.05%、0.08%和 0.46%。增量施氮可以降低磷的流失系数, 增量施磷可以降低氮的流失系数。2008 年、2009 年和 2010 年增量施氮处理的磷流失系数分别比优化施肥处理降低了 0.15%、0.08%和 0.08%, 增量施磷处理的氮流失系数分别比优化施肥处理降低了 0.52%、0.15%和 0.04%。

3 讨论

3.1 烟-稻轮作系统氮磷地表流失特征

福建烟-稻轮作系统氮磷地表径流主要发生在烟季(旱季), 烟季氮、磷流失量平均值分别为 7.76 kg·hm⁻² 和 1.25 kg·hm⁻², 流失系数分别为 5.73%和 1.00%, 而稻季氮、磷流失量平均值仅分别为 1.55

kg·hm⁻² 和 0.13 kg·hm⁻², 流失系数分别为 0.74%和 0.36%。这与福建省的降雨主要集中在上半年有关, 因为降雨过程是造成农田氮磷污染物输出的主要动力^[10]。2008 年、2009 年和 2010 年烟草生长季, 本监测点产生的降雨量分别占全年的 89.15%、67.16%和 82.77%, 由此产生的径流量分别占全年径流总量的 85.9%~87.8%、66.1%~69.1%和 88.9%~89.8%, 氮、磷流失量分别占全年的 58.8%~95.5%和 65.3%~97.1%。烟季氮流失量与流失系数高于其他学者在常规旱地上的研究结果^[10], 但低于蔬菜地的监测结果^[11-12]; 而磷素的流失量与流失系数与其他学者的研究结果相近^[8]; 稻季氮流失量低于其他学者在水田系统研究结果的平均值, 磷素流失量与其他学者的研究结果相近^[15]。

3.2 烟-稻轮作系统氮磷地表流失影响因素

降雨量是烟-稻轮作系统中氮磷地表流失最主要的影响因素之一, 本研究结果表明, 田间施肥处理的总氮和总磷流失量均与产流降雨量呈显著或极显著的正相关关系。梁新强等的研究结果也表明, 降雨量是氮肥流失最主要的影响因素, 在当季降雨量只有 90.1 mm 的情况下, 即使施肥量高达 360 kgN·hm⁻², 氮肥的地表径流流失量只有 0.54 kgN·hm⁻², 只占施肥量

表 4 不同施肥处理氮、磷流失系数(%)

Table 4 Loss rate of nitrogen and phosphorus of different fertilizer application (%)

处理	2008 年		2009 年		2010 年		平均值	
	N	P	N	P	N	P	N	P
习惯施肥	1.27 bc	0.47 a	0.76 ab	0.69 ab	1.05 ab	1.71 ab	1.03 b	0.96 ab
优化施肥	1.43 b	0.41 a	0.76 ab	0.70 ab	0.84 b	1.54 b	1.01 b	0.88 ab
增量施氮	1.21 bc	0.26 a	0.88 a	0.62 b	0.90 ab	1.46 b	0.99 b	0.78 b
增量施磷	0.91 c	0.54 a	0.61 b	0.71 ab	0.80 b	1.50 b	0.78 b	0.92 ab
优化+稻草	1.91 a	0.36 a	0.86 a	0.88 a	1.24 a	2.00 a	1.33 a	1.08 a

的0.18%^[13]。

施肥措施也是影响烟-稻轮作系统中氮磷地表流失主要因素之一,优化施肥可以降低氮磷流失量。与习惯施肥相比,优化施肥的氮、磷的流失量分别减少了1.25%~13.82%和8.82%~14.99%。而增量施氮处理显著提高了氮素的流失量,但有降低磷流失量的趋势。这主要是氮肥的增加促进作物对磷、钾的吸收利用,进而降低了磷素的流失量。增量施磷也出现同样的效果,降低了氮素的流失量,但显著提高了磷的流失量。而王春梅等在蔬菜地上的研究结果则表明,增施氮肥同时提高了氮磷的流失量,增施磷肥同时也提高了氮肥的流失量^[14]。笔者认为,这与监测点的土壤基础肥力有关,蔬菜地的养分含量明显高于常规农作地。

此外,稻草直接还田(翻耕入土)也有增加氮磷地表流失的风险。这与其他学者的研究结果不同。汪涛等的研究结果表明,秸秆还田可以显著降低坡耕地氮素流失量^[15]。这与秸秆还田的形式有关,如果以覆盖的形式还田,降低了雨水对土壤表面的打击与冲刷,减少了氮磷流失^[16]。而笔者认为,如果以翻耕的形式还田,秸秆则增加了土壤孔隙度,提高了土壤内部养分向外渗透能力,提高了氮磷流失量。随着秸秆在土壤中的进一步腐熟,提高氮磷流失的风险可能会随着时间的延长而逐渐减弱。此外,在平原地和坡耕地上还田效果可能也不一样。

4 结论

(1)在福建省湿润气候条件下,当地习惯施肥的烟-稻轮作系统中氮的流失量为4.71~14.86 kg·hm⁻²·a⁻¹,流失系数为0.76%~1.27%;磷的流失量为0.93~2.20 kg·hm⁻²·a⁻¹,流失系数为0.47%~1.71%。

(2)增量施氮明显提高烟-稻轮作系统中氮的流失量,增量施磷提高磷的流失量。增施50%氮肥,氮的流失量比优化施肥处理提高7.6%~37.6%;增施50%磷肥,磷的流失量提高21.5%~27.4%。

(3)稻草还田增加了烟-稻轮作系统氮、磷流失的风险。同等施肥量条件下,稻草还田的氮、磷流失量分别提高6.4%~16.4%和-3.4%~14.0%,流失系数分别达到0.86%~1.91%和0.36%~2.00%。

(4)优化施肥可以减少烟-稻轮作系统中氮、磷的流失量,与习惯施肥相比,氮、磷的流失量分别减少了1.25%~13.82%和8.82%~14.99%。

(5)烟-稻轮作系统中氮、磷流失主要发生在烟

季,烟季总氮和总磷的流失量分别占全年总量的58.8%~95.5%和65.3%~97.1%。

参考文献:

- [1] 邱卫国,唐浩,王超.水稻田面水氮素动态径流流失特性及控制技术[J].农业环境科学学报,2004,23(4):740-744.
QIU Wei-guo, TANG Hao, WANG Chao. Rule of lose of nitrogen in the surface water of rice fields and the control technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):740-744.
- [2] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2010年.
National Bureau Statistics of China. China Statistical Yearbooks of 2009 [M]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2010.
- [3] Kronvang B, Graesboll P, Larsen S E, et al. Diffuse nutrient losses in denmark[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(1):81-88.
- [4] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands, causes and remedies[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(4):183-189.
- [5] 熊正琴,邢光熹,沈光裕,等.太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究[J].农业生态环境,2002,18(2):29-33.
XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, SHEN Guang-yu, et al. Non-point source N pollution of lakes, rivers and wells in the Taihu Lake Region [J]. *Rural Eco Environment*, 2002, 18(2):29-33.
- [6] 吕忠贵,杨圆.浅析氮、磷化肥的使用、利用及对农业生态环境污染[J].农业环境与发展,1997(3):30-34.
LÜ Zhong-gui, YANG Yuan. Review on application and utilization of nitrogen, phosphorus fertilizers and their pollution on agricultural ecological environment[J]. *Agro-Environment and Development*, 1997(3):30-34.
- [7] 吕耀.农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J].农业环境保护,1998,17(1):35-39.
LÜ Yao. Non-point pollution of nitrogen in agricultural ecosystem[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, 17(1):35-39.
- [8] 张玉树,丁洪,李兴华,等.我国农田氮、磷流失现状及其控制措施[J].环境污染与防治,2009,31(增刊):27-31.
ZHANG Yu-shu, DING Hong, LI Xing-hua, et al. The loss of nitrogen and phosphorus in farmland of China and its control measures[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, 31(Suppl):27-31.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Soil science and agricultural chemistry[J]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [10] 陈克亮,朱晓东,朱波,等.川中紫色土区旱坡地非点源氮输出特征与污染负荷[J].水土保持学报,2006,20(2):54-58.
CHEN Ke-liang, ZHU Xiao-dong, ZHU Bo, et al. Load and output character on non-point nitrogen from purple soil farmlands in hilly area of central Sichuan basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2):54-58.
- [11] 胡志平,郑祥民,黄宗楚,等.上海地区不同施肥方式氮磷随地表径流流失研究[J].土壤通报,2007,38(2):310-313.
HU Zhi-ping, ZHENG Xiang-min, HUANG Zong-chu, et al. Nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in farmland in Shanghai[J]. *Chinese*

- Journal of Soil Science*, 2007, 38(2):310-313.
- [12] 黄沈发, 陆贻通, 沈根祥, 等. 上海郊区旱作农田氮素流失研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2):50-53.
- 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):50-53.
- [13] 梁新强, 田光明, 李 华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):59-63.
- LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63.
- [14] 王春梅, 蒋治国, 赵言文. 太湖流域典型蔬菜地地表径流氮磷流失[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):36-40.
- WANG Chun-mei, JIANG Zhi-guo, ZHAO Yan-wen. Nitrogen and phosphorus runoff in the typical vegetable fields in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):36-40.
- [15] 汪 涛, 朱 波, 武永锋, 等. 不同施肥制度下紫色土坡耕地氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):65-68.
- WANG Tao, ZHU Bo, WU Yong-feng, et al. Nitrogen loss from slope cropland of purple soil under different fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5):65-68.
- [16] 王 静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与氮肥后移对巢湖流域麦田磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6):1152-1159.
- WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of conservation tillage and postponing N application on phosphorous loss from wheat field in Chaohu Lake Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6):1152-1159.