

麦秸还田对水稻产量及地表径流 N P K 流失的影响

刘红江, 陈留根, 周 炜, 郑建初 *

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘 要:在大田试验条件下,以水稻品种运 2645 为供试材料,设置常规处理(A)、麦秸还田(B)、麦秸还田减肥(C)、肥料运筹(D)和旋耕(E)5 个处理组合,研究不同处理对水稻产量及农田地表径流 N P K 流失的影响。结果表明:(1)麦秸还田使水稻产量比常规处理增加 3.0%左右;(2)试验年度稻季农田总地表径流量为 $4.3 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$;(3)麦秸还田减肥和麦秸还田处理比其处理明显降低农田地表径流水体 N P K 流失量,不同处理地表径流总 N 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、常规处理、肥料运筹和旋耕,不同处理地表径流总 P 和 K 的流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕;(4)麦秸还田能够降低稻田地表径流 N P K 的流失率,但麦秸还田减肥处理由于流失量减小幅度远低于肥料施用量的减小幅度,其 N P K 流失率均表现为最高;(5)麦秸还田使水稻产量略有增加,使稻田地表径流水体 N P K 流失量和流失率均明显降低。

关键词:麦秸还田;水稻产量;地表径流;N P K 流失量;NPK 流失率

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)07-1337-07

Effects of Wheat Straw Return on Rice Yield and the N P K Loss with Overland Runoff

LIU Hong-jiang, CHEN Liu-gen, ZHOU Wei, ZHENG Jian-chu*

(Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of wheat straw return on rice yield, total nitrogen (N), total phosphorus (P), Kalium(K) loss quantity and N P K loss rate with overland runoff. The rice cultivar of Yun 2645 was field-grown. Five treatments such as conventional measurement(A), wheat straw return(B), wheat straw return with reducing fertilizer(C), fertilizer application(D), rotational tillage system(E) were conducted. The results showed that: (1) Compared conventional measurement, wheat straw return increased rice yield by 3.0%. (2) Total overland runoff of farmland in rice season was $4.3 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ in this research season. (3) Wheat straw return significantly reduced N P K loss quantity with overland runoff. In terms different treatments, the order of total N loss quantity was $C < B < A < D < E$, and both the order of total P & K loss quantity were $C < B < D < A < E$. (4) Wheat straw return reduced N P K loss rate with overland runoff; for the decreasing rate of NPK loss quantity was far lower than that of the amount of fertilizer application, with reducing fertilizer the N P K loss rate of wheat straw return showed the highest. (5) Wheat straw return slightly increased rice yield, but significantly reduced N P K loss quantity and N P K loss rate with overland runoff in rice season.

Keywords: wheat straw return; rice yield; overland runoff; N P K loss quantity; N P K loss rate

农业面源污染已成为水体污染的重要污染源。氮、磷等养分物质通过农田地表径流、排水和地下渗漏等方式,进入农田周围水体是江河湖泊富营养化的

重要原因^[1-3],其贡献率远超过城市生活污水的点源污染和工业的点源污染^[4]。在过去几十年中,我国粮食产量不断增加,其中很重要的原因就是化肥投入量的增加。过量的农田化肥投入,不仅导致化肥利用效率下降^[5],而且增加农田氮、磷等养分物质流失,使农田周围水体富营养化程度严重,恶化农业生态环境^[6]。太湖流域农业生产水平高,化肥投入量大,农田周围水体富营养化程度严重。目前对该区域地表径流氮、磷流失的研究,主要集中在自然状态下及人工模拟降雨条件下地表径流养分流失情况^[7-10]。而关于秸秆还田、

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAD02A03,2007BAD89B12);
江苏省博士后基金(0902035C);江苏省农业科学院博士后
基金(6510907)

作者简介:刘红江(1979—),男,江苏盐城人,博士,主要从事农业生态
和水稻栽培生理生态研究。

E-mail:Liuhongjiang2004@sohu.com

* 通讯作者:郑建初 E-mail:zjc@jaas.ac.cn

施肥水平和耕作方式等可调控的农艺管理措施对农田养分流失影响研究的报道较少。为此,笔者于 2010 年在江苏省无锡市安镇太湖水稻示范园农田($31^{\circ}37'N, 120^{\circ}28'E$),设计常规处理、麦秸还田、麦秸还田减肥、肥料运筹和旋耕 5 个处理,研究了麦秸还田对稻田地表径流 NPK 流失情况及水稻产量的影响。以期为我国农业生产节能减排和农业生态环境健康提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2010 年 6 月—2010 年 11 月在江苏省无锡市安镇太湖水稻示范园实验田($31^{\circ}37'N, 120^{\circ}28'E$)中进行,土壤类型为黄泥土,年降水量 1 100~1 200 mm,试验期间的降水量为 683 mm;年平均温度约 $16^{\circ}C$,年日照时间大于 2 000 h,年无霜期大于 230 d,耕作方式为水稻、冬小麦轮作。土壤基本理化性质为:总 N $2.7 g \cdot kg^{-1}$,速效 N $21.7 mg \cdot kg^{-1}$,总 P $0.52 g \cdot kg^{-1}$,速效 P $17.8 mg \cdot kg^{-1}$,速效 K $137.4 mg \cdot kg^{-1}$,容重 $1.21 g \cdot cm^{-3}$,有机 C $15.3 g \cdot kg^{-1}$,pH 6.8。

1.2 供试材料

试验共设 5 个组合处理。

常规处理(A):常规施肥量;麦秸不还田;N 肥水稻基肥:穗肥=6:4;耕翻+旋耕。

麦秸还田(B):常规施肥量;麦秸全量还田;N 肥水稻基肥:穗肥=6:4;耕翻+旋耕。

麦秸还田减肥(C):减少 20%施肥量;麦秸全量还田;N 肥水稻基肥:穗肥=6:4;耕翻+旋耕。

肥料运筹(D):常规施肥量;麦秸不还田;N 肥水稻基肥:穗肥=4:6;耕翻+旋耕。

旋耕(E):常规施肥量;麦秸不还田;N 肥水稻基肥:穗肥=6:4;旋耕。

常规施肥 N、P、K 分别为 270、67.5、135 $kg \cdot hm^{-2}$;减少 20%施肥量 N、P、K 分别为 216、54、108 $kg \cdot hm^{-2}$ 。N 肥根据以上处理方式施用,P 肥全部作为基肥施用,K 肥分基肥和穗肥施用,施用量各占 50%。供试水稻品种为运 2645,机插秧,2010 年 6 月 15 日插秧,2010 年 10 月 30 日收获;水分管理为 6 月 15 日至 7 月 10 日保持浅水层(约 5 cm),7 月 11 日至 8 月 4 日进行多次轻搁田,8 月 5 日至收割前 7 日进行间隙灌溉。适时进行病虫草害防治,水稻正常生长发育。选择地力相对一致的平整试验田 15 块,每块田面积在 1 000 m^2 左右,每块田都有独立的灌排水沟,每次

灌水单位面积的灌水量大致相当,农田排水口采用宽约 5 cm 的平水口,让径流自由发生,每块田四周有宽约 50 cm 的土埂。当有地表径流发生时,在径流的前、中、后分别取水样 8~10 次,将它们混合带到实验室测定。试验重复 3 次。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 水稻产量及产量构成

在水稻成熟期,每小区调查 100 穴植株的穗数,根据调查的平均穗数取代表性植株 10 穴,测定每穗颖花数,用水漂法区分饱粒(沉入水底者)和空瘪粒,计算饱粒结实率和饱粒千粒重。

1.3.2 地表径流流量和水中 N、P、K 含量

水稻季每次降雨,当农田发生地表径流时,通过明渠流量计测定径流流量,并采集各小区水体样品,随即带回实验室测定水中 N、P、K 含量^[1]。

全 N:硫酸钾于 $120^{\circ}C$ 高温消煮 30 min,经预处理后将全氮转为硝态氮,将消化液直接在紫外分光光度计上比色。

全 P:在水样中加入过硫酸钾,高温高压下,将水中有机磷转化成正磷酸盐,显色后用比色法测定磷浓度。

全 K:将水样喷入火焰光度计的火焰中,直接测定水样中的钾浓度,同时测定钾标准溶液工作曲线。

1.3.3 农田地表径流 NPK 流失率

农田地表径流 NPK 流失率=地表径流 NPK 流失量÷当季所施化肥 NPK 含量

1.4 统计分析方法

采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,作图采用 Excel 作图软件。各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法,凡 $P < 0.05$ (或 $P < 0.01$) 水平的视为差异显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 麦秸还田对水稻产量及产量构成的影响

不同处理对水稻产量及其产量构成的影响如表 1 所示。在其他条件相同的情况下,麦秸还田的 B 处理水稻产量明显高于常规处理的 A 处理。增产 27.4 $g \cdot m^{-2}$,增产幅度为 3.0%,差异未达到显著水平。从不同处理看,B 处理水稻产量最高,且显著高于 C、D、E 处理,说明麦秸还田能够提高水稻产量。从水稻产量构成因素看,麦秸还田的 B 和 C 处理水稻单位面积穗数明显少于其他处理;麦秸还田的 B 处理水稻每穗粒数和结实率均为最高,处理间的差异多达到显著

水平;麦秸还田对水稻的千粒重影响不大。说明麦秸还田提高水稻产量主要是因为麦秸还田提高了水稻的每穗粒数和结实率。

表 1 麦秸还田对水稻产量及产量构成的影响($n=3$)

Table 1 Effect of wheat straw return to rice yield and yield components($n=3$)

处理	穗数/个 $\cdot$ m $^{-2}$	每穗粒数/粒	结实率/%	千粒重/g	产量/g $\cdot$ m $^{-2}$
A	275.8 cd	126.4 bc	95.2 bc	27.9 a	925.0 cd
B	268.0 ab	131.2 c	97.0 d	27.9 a	952.4 d
C	262.9 a	127.7 bc	93.9 a	28.0 a	882.4 ab
D	281.8 d	115.5 a	94.2 ab	27.9 a	855.1 a
E	272.4 bc	124.9 b	95.7 c	27.9 a	910.4 bc

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 稻季农田地表径流量

在农田的排水口安装明渠流量计,测定地表径流量。稻季农田地表径流水量的动态变化情况如图 1 所示。本年度稻季农田共发生地表径流或排水 9 次,每次径流量多分布在 $2.5\times 10^2\sim 5.0\times 10^2\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,共出现两次比较高的峰值,分别发生在 7 月和 8 月中旬,可能与这两段时间降雨量较大以及农田需要排水搁田有关。本年度稻季农田最大径流量为 $9.6\times 10^2\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,将稻季每次发生地表径流时的流量相加,稻季农田总地表径流量为 $4.3\times 10^3\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

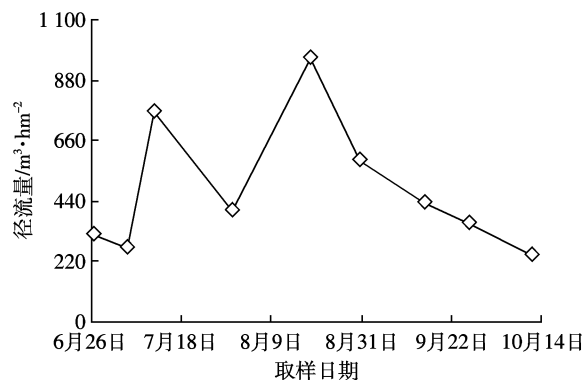


图 1 2010 年稻季农田地表径流量动态变化趋势

Figure 1 Variation of overland runoff in rice season in 2010

2.3 麦秸还田对稻田地表径流水体流失 N P K 浓度和流失量的影响

2.3.1 对流失总 N 浓度和总 N 流失量的影响

麦秸还田对稻田地表径流水体流失总 N 浓度和总 N 流失量的影响如图 2 所示。由图 2(a)可知,不同处理稻田地表径流水体流失总 N 浓度变化趋势呈相似的规律,稻田地表径流水体流失总 N 浓度出现上升的时间与施肥时期密切相关。从整个稻季来看,不

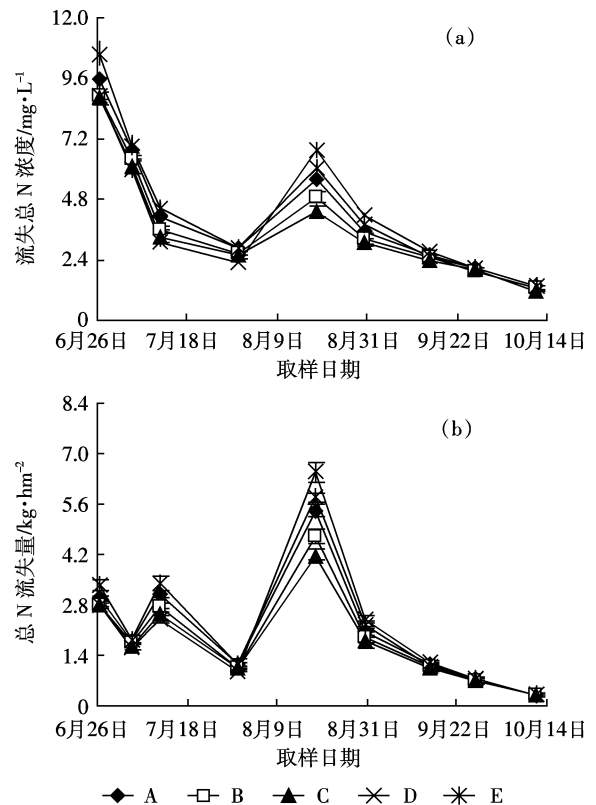


图 2 不同处理对稻季农田地表径流总 N 浓度(a)和总 N 流失量(b)的影响

Figure 2 Different treatments of total nitrogen concentration(a) and total nitrogen loss quantities(b) with overland runoff in rice season

同处理地表径流水体流失总 N 平均浓度由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕,分别为 $3.76, 3.93, 4.15, 4.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图 2(b)可知,不同处理稻田地表径流水体总 N 流失量的峰值均出现在 8 月中旬,这主要是因为该时期要排水搁田和出现了强降雨,以及水稻的穗肥在 8 月上旬施用的缘故。不同处理地表径流水体总 N 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、常规处理、肥料运筹和旋耕,分别为 $16.01, 17.03, 18.75, 18.93\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $19.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。较常规处理,麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹和旋耕处理水体总 N 流失量变化幅度依次为 -14.6% 、 -9.2% 、 1.0% 和 6.4% 。不同处理之间的差异多达到显著水平(表 2)。

2.3.2 对流失总 P 浓度和总 P 流失量的影响

麦秸还田对稻田地表径流水体流失总 P 浓度和总 P 流失量的影响如图 3 所示。由图 3(a)可知,随着水稻的生育进程,不同处理稻田地表径流水体总 P 浓度总体呈逐渐下降的变化趋势,不同处理之间的差异不大。从整个稻季看,不同处理地表径流水体流失总

表 2 不同处理对稻季农田地表径流总 N、总 P 和 K 流失量的影响($n=3$)

Table 2 Different treatments of total nitrogen, total phosphorus and kalium loss quantities with overland runoff in rice season($n=3$)

处理	总 N/kg·hm ⁻²	总 P/kg·hm ⁻²	K/kg·hm ⁻²
A	18.75 b	0.55 cd	10.96 cd
B	17.03 a	0.49 b	10.11 b
C	16.01 a	0.46 a	9.50 a
D	18.93 bc	0.53 c	10.65 bc
E	19.95 c	0.56 d	11.50 d

P 平均浓度由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕,分别为 0.134、0.143、0.155、0.160 mg·L⁻¹ 和 0.163 mg·L⁻¹。由图 3(b)可知,不同处理稻田地表径流水体总 P 流失量也表现出逐渐下降的变化趋势,这主要是因为水稻季磷肥作为基肥施用,随着时间的推移,磷的流失量逐渐减少。不同处理地表径流水体总 P 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕,分

别为 0.46、0.49、0.53、0.55 kg·hm⁻² 和 0.56 kg·hm⁻²。较常规处理,麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹和旋耕处理水体总 P 流失量变化幅度依次为 -16.7%、-10.6%、-3.4% 和 1.7%。不同处理之间的差异多达到显著水平(表 2)。

2.3.3 对流失 K 浓度和 K 流失量的影响

麦秸还田对稻田地表径流水体流失 K 浓度和 K 流失量的影响如图 4 所示。由图 4(a)可知,不同处理稻田地表径流水体 K 浓度除了在水稻生育前期较高外,在 8 月中旬还出现了较高的峰值,这主要与钾肥作为基肥和在 8 月上旬作为穗肥两次施用密切相关。从整个稻季看,不同处理地表径流水体流失 K 平均浓度由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕,分别为 2.17、2.32、2.46、2.50 mg·L⁻¹ 和 2.67 mg·L⁻¹。由图 4(b)可知,不同处理稻田地表径流水体 K 流失量出现了很明显的峰值,这是钾肥作为水稻穗肥在 8 月初大量施用以及 8 月中旬稻田排水搁田共同作用的结果。不同处理地表径流水

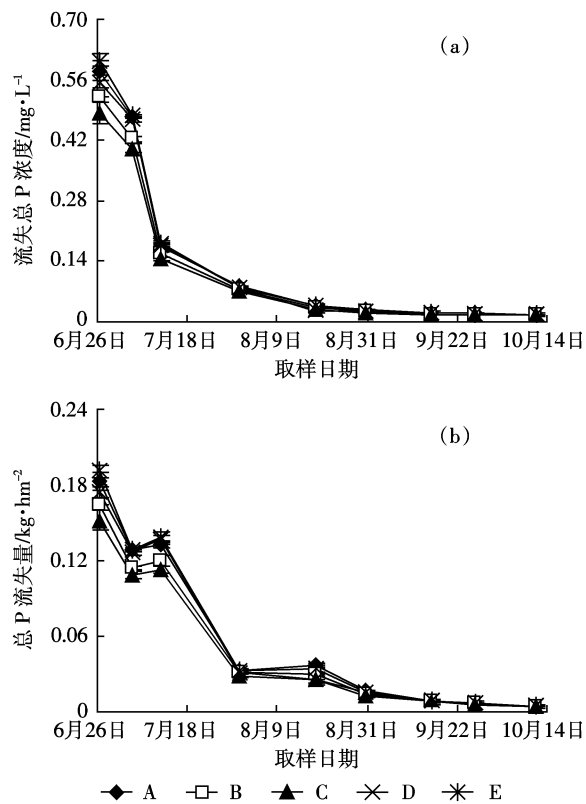


图 3 不同处理对稻季农田地表径流总 P 浓度(a)和总 P 流失量(b)的影响

Figure 3 Different treatments of total phosphorus concentration(a) and total loss phosphorus quantities(b) with overland runoff in rice season

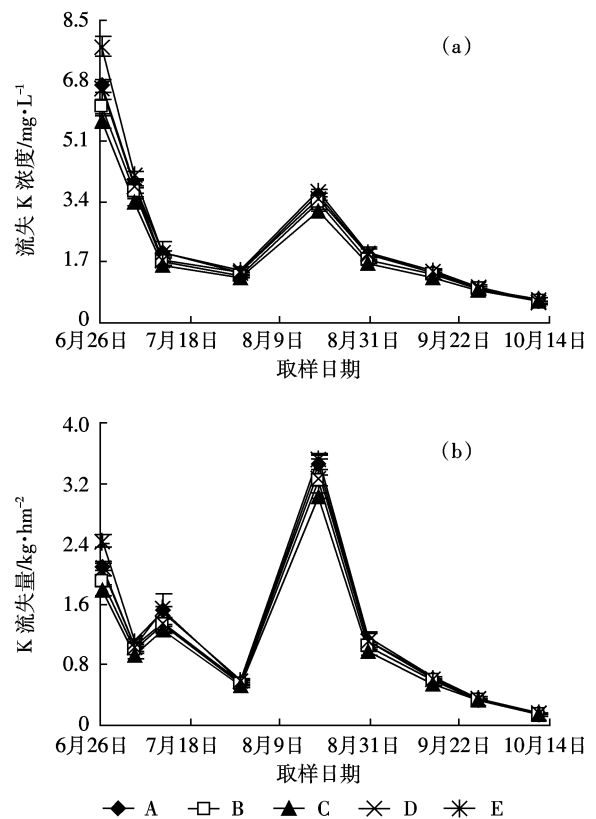


图 4 不同处理对稻季农田地表径流 K 浓度(a)和 K 流失量(b)的影响

Figure 4 Different treatments of kalium concentration(a) and kalium loss quantities(b) with overland runoff in rice season

体 K 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕,分别为 9.50、10.11、10.65、10.96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 11.50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。较常规处理,麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹和旋耕处理水体 K 流失量变化幅度依次为 -13.4%、-7.8%、-2.8% 和 4.9%。不同处理之间的差异多达到显著水平(表 2)。

2.4 不同处理对稻季农田地表径流 N P K 流失率的影响

麦秸还田对稻田地表径流 N P K 流失率的影响如图 5 所示。不同处理稻田地表径流氮肥流失率由低到高依次为麦秸还田、常规处理、肥料运筹、旋耕和麦秸还田减肥,分别为 6.31%、6.94%、7.01%、7.39% 和 7.42%,氮肥的平均流失率为 7.01%;不同处理稻田地表径流磷肥流失率由低到高依次为麦秸还田、肥料运筹、常规处理、旋耕和麦秸还田减肥,分别为 0.73%、0.79%、0.82%、0.83% 和 0.85%,磷肥的平均流失率为 0.80%;不同处理稻田地表径流钾肥流失率由低到高依次为麦秸还田、肥料运筹、常规处理、旋耕和麦秸还田减肥,分别为 7.49%、7.89%、8.12%、8.52% 和 8.79%,钾肥的平均流失率为 8.16%。说明麦秸还田能够减少农田氮磷钾肥的流失率;而麦秸还田减肥处理氮磷钾肥流失率均为最大,是因为氮磷钾肥的施用量减少较多,径流总氮、总磷和钾的流失量有所减少,但与肥料施用量相比减少的幅度不多。

3 讨论

关于麦秸还田对水稻产量的影响,多数研究表明,麦秸还田能够增加水稻产量^[12-14]。本研究表明,麦秸还田使水稻产量增加 3.0% 左右(表 1),与前人的研究结果基本一致。从产量构成因素分析,本研究麦秸还田主要是提高了水稻的每穗粒数和结实率,对千粒重无明显影响,而单位面积穗数则表现为下降。这主要是因为,麦秸还田后,土壤微生物大量增加,它们分解

有机质成腐殖质并释放养分,同时同化土壤碳素和固定无机营养形成更多微生物消耗较多速效氮素^[15-17],影响了水稻生长前期的养分物质供应,直接影响水稻分蘖的发生,导致穗数减少。而在水稻生长中后期,由于麦秸本身进一步降解,其释放养分能够供应水稻生长需要,为稻穗分化和籽粒灌浆提供了物质基础。

秸秆还田对稻田养分地表径流流失的影响报道甚少。本研究结果表明,稻季农田地表径流氮磷钾浓度均是在水稻生育前期较大,到水稻生育中后期,氮磷钾浓度逐渐减小。这与本研究氮磷钾肥作为基肥在水稻生育前期大量施用有关。李瑞玲等^[18]研究表明,暴雨对农田氮素迁移的影响表现为初期冲刷效应,总氮浓度相对较高。王鹏等^[7]对环太湖丘陵地区研究表明,自然降雨条件下径流总 P 浓度峰值均发生在或稍滞后于径流峰值。本研究水稻生育前期农田地表径流氮磷钾流失量较大,可能也与太湖地区水稻生育前期的(6—7月)降雨量大、农田地表径流量大有关。

有关如何减少地表径流对氮磷钾流失量,张刚等^[19]研究表明,在稻田四周种植不施肥的水稻作为缓冲带,能够有效减少农田氮、磷向水体的输入量。本研究结果表明,不同处理地表径流水体总 N 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、常规处理、肥料运筹和旋耕;不同处理地表径流水体总 P 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕;不同处理地表径流水体 K 流失量由低到高依次为麦秸还田减肥、麦秸还田、肥料运筹、常规处理和旋耕。减少农田化肥施用量能够明显降低农田地表径流氮磷钾流失量,这与前人^[19-20]的研究结果一致;麦秸还田减肥、麦秸还田处理农田水体地表径流 N P K 流失量均明显低于其他处理,可能与水稻生育前期分解还田秸秆的微生物需要消耗大量养分^[7],降低了水稻生育前期农田可流失的氮磷钾量有关,同时

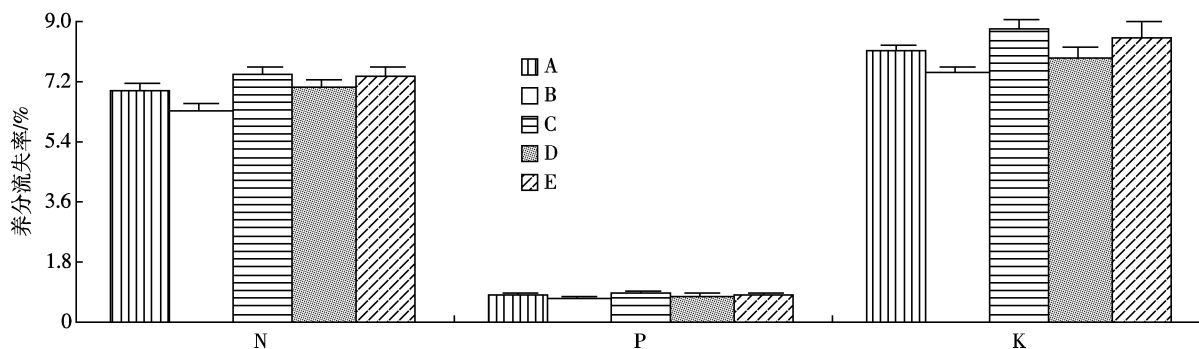


图 5 不同处理对稻季农田地表径流 N P K 流失率的影响

Figure 5 Different treatments of N P K loss rate with overland runoff in rice season

秸秆本身对颗粒态的氮、磷等可能有一定的吸附和拦截作用。说明作物秸秆还田能够减少农田水体 N P K 流失,可以作为源头控制稻田养分流失的较好措施加以推广,减轻农业生产面源污染。

王桂苓等^[20]研究表明,在常规施肥条件下巢湖流域麦稻轮作农田年氮肥流失率在 6.0%左右,年磷肥流失率在 0.45%左右。段亮等^[21]研究表明,自然降雨条件下旱地磷素随地表径流向水体迁移的年负荷为 $4.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,约占全年施磷量的 4.1%。彭树初等^[22]研究表明,长沙市平原蔬菜地土壤氮、磷流失率平均分别为 0.62%、1.44%。本研究表明,稻田地表径流氮肥、磷肥、钾肥的平均流失率分别为 7.01%、0.80%、8.16%,明显大于前人的研究结果。这与本研究氮磷钾的施肥量、农田利用方式、种植制度、以及太湖流域降雨量较大且夏季暴雨多等因素与前人不同有关。本研究还表明,不同处理稻田地表径流氮肥流失率由低到高依次为麦秸还田、常规处理、肥料运筹、旋耕和麦秸还田减肥;不同处理稻田地表径流磷肥和钾肥流失率由低到高依次均为麦秸还田、肥料运筹、常规处理、旋耕和麦秸还田减肥。说明秸秆还田能够减少农田氮磷钾肥的流失率,因而在生产中推广秸秆还田技术,是减少农田氮磷钾肥流失的重要措施之一。麦秸还田减肥处理氮磷钾肥流失率均为最大,并不是麦秸还田减肥处理增加了农田氮磷钾肥的流失量,主要是因为氮磷钾肥的施用量减少较多,地表径流总氮、总磷和钾的流失量虽有所减少,但与肥料施用量相比减少的幅度不多。

4 结论

综上所述,麦秸还田可以增加水稻产量,减少农田地表径流氮磷钾流失量和流失率。因此,麦秸还田不但能够实现作物秸秆的综合利用,解决由于农作物秸秆堆放或焚烧带来的农业生态环境污染问题,同时麦秸还田能有效降低农田地表径流氮磷钾流失量,并能够培肥地力,减少农业生产中的化肥投入量,提高水稻产量,作为农田养分循环利用的一条有效途径,实现农田生态环境安全和农业生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] YAN W J, HUANG M X, ZHANG S, et al. Phosphorus export by runoff from agricultural field plots with different crop cover in Lake Taihu watershed[J]. *Journal of Environmental Science*, 2001, 13(4):502-507.
- [2] TU Q Y, GU D X, YIN C Q, et al. Chaohu Lake eutrophication study[M]. Hefei: University Press of Science and Technology of China, 1990:226.
- [3] JIN X C, TU Q Y, ZHANG Z, et al. Lake eutrophication in China[M]. Beijing: Environmental Sciences Press of China, 1990:1-5.
- [4] 王 鸥, 方 炎. 农业面源污染的综合防治与补偿经济制的建立[J]. 农业面源污染与综合防治, 2004(11):18-19.
WANG Ou, FANG Yan. Study on integrated control of agricultural non-point source pollution and establishment of economic compensation system[J]. *Agricultural Non-point Source Pollution and Integrated Control*, 2004(11):18-19.
- [5] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时、实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12):1456-1461.
LIU Li-jun, SANG Da-zhi, LIU Cui-lian, et al. Effects of real-time and site specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2003, 36(12):1456-1461.
- [6] 郑建初, 常志州, 陈留根, 等. 水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 3:247-250.
ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. Study on feasibility of hyacinth treating water N and P pollution in the Taihu Lake area[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008, 3:247-250.
- [7] 王 鹏, 高 超, 姚 琪, 等. 环太湖丘陵地区农田磷素随地表径流输出特征[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1):165-169.
WANG Peng, GAO Chao, YAO Qi, et al. Agricultural phosphorus losses with overland runoff in hilly area around Tai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):165-169.
- [8] 李恒鹏, 黄文钰, 杨桂山, 等. 太湖上游典型城镇地表径流面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6):1598-1602.
LI Heng-peng, HUANG Wen-yu, YANG Gui-shan, et al. Non-point source pollutant concentration in typical towns of Taihu upriver region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1598-1602.
- [9] 徐爱兰, 王 鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1106-1111.
XU Ai-lan, WANG Peng. Phosphorus losses with surface runoff farm lands in polder area around Taihu Basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1106-1111.
- [10] 李恒鹏, 金 洋, 李 燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2):6-9, 46.
LI Heng-peng, JIN Yang, LI Yan. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farmland under artificial conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2):6-9, 46.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:128-137.
LU Ru-kun. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:128-137.
- [12] 刘世平, 聂新涛, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(1):71-76.
LIU Shi-ping, NIE Xin-tao, DAI Qi-gen, et al. Effects of interplanting with zero tillage and wheat straw manuring on rice growth and grain quality[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2007, 21(1):71-76.
- [13] 罗 明, 庄义庆, 鲁 荣. 全量麦草还田和不同施氮量对水稻的影响[J]. 广西农业科学, 2007, 38(5):522-526.
LUO Ming, ZHUANG Yi-qing, LU Rong. Effects of wheat straw re-turning to field and nitrogen fertilizer application on rice[J]. *Guangxi*

- Agricultural Sciences*, 2007, 38(5):522-526.
- [14] 郝建华, 丁艳锋, 王强盛, 等. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(3):13-18.
HAO Jian-hua, DING Yan-feng, WANG Qiang-sheng, et al. Effect of wheat crop straw application on the quality of rice population and soil properties[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2010, 33(3):13-18.
- [15] 张振江. 长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响 [J]. 土壤通报, 1998, 29(4):154-155.
ZHANG Zhen-jiang. Effect of long-term returning straw on crop yield and soil fertility[J]. *Chin J Soil Sci*, 1998, 29(4):154-155.
- [16] Wit C, Cassman K G, Olk D C. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice system[J]. *Plant Soil*, 2000, 225:263-278.
- [17] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R. Rice yield and nitrogen efficiency under alternative straw management practices[J]. *Agron J*, 2000, 92:1096-1103.
- [18] 李瑞玲, 张永春, 曾 远, 等. 太湖流域丘陵地区暴雨条件下农田氮素随地表径流迁移特征 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1185-1190.
LI Rui-ling, ZHANG Yong-chun, ZENG Yuan, et al. Effects of rain-storm on the export of farmland nitrogen with surface runoff in hilly area of Tai Lake Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6):1185-1190.
- [19] 张 刚, 王德建, 陈效民. 太湖地区稻田缓冲带在减少养分流失中的作用[J]. 土壤学报, 2007, 44(5):873-877.
ZHANG Gang, WANG De-jian, CHEN Xiao-min. Roles of buffer strips in reducing nutrient loss from paddy field in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):873-877.
- [20] 王桂苓, 马友华, 孙兴旺, 等. 巢湖流域稻麦轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2):6-10, 29.
WANG Gui-ling, MA You-hua, SUN Xing-wang, et al. Study of nitrogen and phosphorus runoff in wheat-rice rotation farmland in Chao Lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2):6-10, 29.
- [21] 段 亮, 常 江, 段增强. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):24-28.
DUAN Liang, CHANG Jiang, DUAN Zeng-qiang. Surface managements and fertilization modes on phosphorus runoff from upland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):24-28.
- [22] 彭树初, 陈雄鹰, 胡明勇, 等. 长沙市平原旱地土壤氮磷径流特征研究[J]. 湖南农业科学, 2009(6):61-64.
PENG Shu-chu, CHEN Xiong-ying, HU Ming-yong, et al. Study of nitrogen and phosphorus runoff in plain land in Changsha region[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(6):61-64.