

耕作模式和滞水时间对稻田中氮磷动态变化的影响研究

冯国禄, 杨仁斌*

(湖南农业大学 资源环境学院, 长沙 410128)

摘要:通过微区模拟稻田试验,分析了免耕、浅耕和深耕3种耕作模式下滞水时间不同的稻田排水中氮磷的动态特征及总氮、总磷流失潜能,研究了稻田夏季施肥耕作模式和滞水时间对氮磷的减排效能。结果表明:(1)深耕有利于土壤固肥作用的发挥,田面水中TN和 NH_4^+-N 浓度呈逐渐下降的趋势。浅耕和深耕土壤中微生物环境利于硝化反应,不易被土壤吸附的 NO_3^--N 得以迅速向田面水中释放。免耕和深耕处理的田面水中TP和DP浓度在第1~5d内浓度较高,3个耕作处理的滞排水中TP和DP在耕作处理5d后均处于较低浓度水平。(2)不同耕作模式滞水5d后TN的绝对流失量均处于较低水平。免耕、浅耕、深耕在滞水5d后可分别减少田面水中TN流失59.55%~65.68%、70.15%~88.20%和65.23%~77.26%。深耕处理的模拟稻田田面水中TN的流失潜能相对较小。不同耕作模式处理相对流失形态与潜能以TN为主。(3)免耕处理田面水中TP的绝对流失量最大,浅耕处理田面水中TP绝对流失量最少。免耕、浅耕、深耕在滞水5d后再排水可分别减少田面水中TP流失54.70%~67.78%、62.99%~85.09%和52.45%~87.99%。浅耕处理模拟稻田田面水中TP的相对流失潜能较小。不同耕作模式处理田面水中磷素的相对流失形态表现出一定的差异性,田面水中磷素流失形态随时间变化呈现出TP与DP交替变化的现象。总之,从减少田面水中氮磷的绝对流失量出发,夏季浅耕不失为最佳清洁耕作模式;同时在滞水5d后排水,能有效减少田面水中氮磷的流失量,减少稻田排水对面源污染的影响。

关键词:耕作模式;滞水;氮;磷;稻田

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)05-0917-08

Effect of Tillage Models and Water Logging Time on Dynamics of Nitrogen and Phosphorus in Paddy Field

FENG Guo-lu, YANG Ren-bin*

(College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The effects of tillage models and water logging time on dynamics of nitrogen and phosphorus in the paddy field were investigated through microcosm simulation experiments in order to provide the scientific basis for reasonable fertilization and rice high yield. The result showed that the total nitrogen and NH_4^+-N in the paddy water gradually decreased with immobilization of fertilizer under the deep plowing condition, and NO_3^--N in soil released into the paddy water under shallow plowing and deep plowing condition. Total phosphorus and dissolved phosphorus (DP) in the paddy water were in the higher level from the first to fifth day under the non-farming and deep plowing condition, and in the lower level at the fifth day after tillage. The loss of total nitrogen was 59.55%~65.68%, 70.15%~88.20% and 65.23%~77.26%, respectively, at the fifth day after water logging under the tillage models such as non-farming, shallow plowing and deep plowing. The loss of the total phosphorus in the paddy water varied with the tillage models, and 54.70%~67.78%, 62.99%~85.09% and 52.45%~87.99%, respectively, at the fifth day after water logging under the non-farming, shallow plowing and deep plowing condition. The loss forms of phosphorus in the paddy water changed with the different tillage models, and exhibited an alternative change between total phosphorus and DP with the water logging time. As loss of nitrogen and phosphorus in the paddy water was concerned, it suggested that shallow plowing should be an optimal and clean tillage model, and meanwhile the drainage at the fifth day after water logging would reduce the loss of nitrogen and phosphorus in the paddy field.

Keywords: tillage model; delaying discharge; nitrogen; phosphorus; paddy field

收稿日期:2010-11-22

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2005AA601010-03);湖南省教育厅科学研究项目(10C1097);国家科技部重大水专项(2008ZX07211-001)

作者简介:冯国禄(1964—),男,湖南永州人,博士生,主要从事农业面源污染控制。E-mail:fengguolu8@163.com

* 通讯作者:杨仁斌 E-mail:yrb4806@yahoo.com.cn

农业面源污染(非点源污染)是指人们在从事农业耕作活动时,由于使用化肥、农药,以及农田水土流失而引起受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)的污染^[1]。其主要污染物质是氮、磷营养元素和农药等,具有以下特征:(1)复杂性。农业面源污染不仅受施肥和降雨的影响,也与许多因素如土壤结构、农作物类型、气候、地质地貌等密切相关。(2)随机性。面源污染受水文循环过程影响和支配,由于降雨的随机性,决定了其产生的随机性。(3)滞后性。农药和化肥存在的时间长短将决定面源污染形成滞后性的长短。(4)广泛性。农业面源污染存在广泛的污染源,其排放途径和排放污染物具有不确定性。

我国地表水污染物中,面源污染占很大比重,湖泊50%以上的氮及30%以上的磷来自于农业面源污染,如太湖,农业面源氮量占入湖总氮量的77%,磷占33.4%^[2]。对我国25个湖泊进行调查,水体全氮无一例外超过了富营养化指标,其中92%的湖泊超过全磷富营养化的临界值($0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。由化肥、水土流失等引起的水库的富营养化程度也正在加快。我国农田的氮肥使用量居世界首位,过量使用化肥是产生面源污染的主要原因。太湖流域的化肥使用量已从20世纪80年代中期的 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 扩增至90年代末的 $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[3],几乎翻了一番,而氮肥的利用率只有25%~35%^[4],磷肥的利用率仅为10%~20%^[5];当季使用的氮肥有20%~25%将随降雨径流和渗漏排入地表水^[6],50%~60%的磷肥被土壤颗粒所固定,其余的随降雨径流排入沟渠和大小河流。

由于农业面源污染来源于非特定的、分散的地区,与土壤的侵蚀程度、化肥、农药的使用量、农业耕作方式、地质地貌、区域降水过程等密切相关,因此,和点源污染相比,面源污染危害规模大,且难以监测和控制。

在农业的发展史上,土壤耕作占有十分重要的地位,传统的农业生产以精耕细作为中心,形成了耕、耙、松土、镇压等一整套的耕作技术^[7]。但土壤的翻耕是造成水土流失的主要原因;对土地的过度开发利用,频繁的翻耕造成土壤结构的破坏,土壤质量下降;同时,由于翻耕而加重了氮、磷和农药等农业污染物对塘库江河等水体的污染,生态环境恶化。针对这些问题,许多国家开展了土壤免耕探索。在我国传统的水稻栽培中,春季耕作为必耕,而夏季一般采用免耕或浅耕的耕作模式。免耕是指生产上不翻耕土地直接播种或者栽植作物的方法。我国从上世纪70年代末

开始水田免耕技术的研究,80年代在南方稻区大面积推广过侯光炯的自然免耕法,对减少水土流失、提高土壤肥力、改善稻田生态环境、促进农业持续发展起了重要作用^[8-9]。但对于夏季稻田不同耕作模式对稻田排水中氮、磷的存在特征和流失的影响机理及差异性尚不明确。

控制排水研究始于上世纪90年代中后期,集中在欧美一些国家,主要研究旱作物种植区的暗管控制排水^[10-12],较少涉及稻田,研究的目的是节水保肥。对于稻田而言,由于水稻主要生育期与雨季同步,由灌溉和降雨引起的排水,包括地下排水和地表排水较早作物更为频繁。研究表明,夏季面源污染的氮、磷营养盐输移量最高,这是因为夏季降水较多,高径流量携带大量来自稻田等外源营养物进入江湖水体,故营养盐氮、磷负荷量较大,冬季则最低^[21]。控制排水减少稻田氮磷损失的途径主要有两条:一是减少稻田排水量^[10,13],二是降低排水中氮磷浓度^[14-15]。降低稻田排水中氮磷浓度的主要途径是作物吸收以及硝化、反硝化作用^[10]和泥沙沉淀^[17-20]。在控制排水条件下,地下水位抬高,土壤湿度增加,土壤的厌氧条件加强,更利于微生物的反硝化作用^[21]。

为明确夏季不同耕作模式(免耕、浅耕和深耕)和控制滞水时间对稻田田面水中氮磷的影响和减排效能,在模拟稻田中进行了免耕、浅耕和深耕耕作模式并结合控制滞水时间的实验。通过对3种耕作模式下不同滞水时间的试验稻田排水中氮磷的动态特征及总氮、总磷流失潜能进行分析,为选择稻田夏季耕作模式及确定滞水时间以减轻稻田氮磷排放提供科学依据。优化的耕作模式及合理的滞水时间不但在减少水土流失和减少稻田面源污染物方面具有重要意义,同时也为节约施肥及作物增产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 选点

试验地设在湖南农业大学“耘园”教学科研试验基地。湖南农业大学位于长沙市芙蓉区东端,坐标为东经 $111^{\circ}52'$,北纬 $27^{\circ}91'$,年平均气温 $16.8\sim 17.2^{\circ}\text{C}$,年平均总降水量 1422.4 mm 。供试土壤为湖南农业大学“耘园”教学科研试验基地的红壤稻田土,基本理化性状:有机质 $11.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮(N) $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷(P) $1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $27.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,水解氮(N) $96.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷(P) $70.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾(K) $142.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH5.5。灌溉用水取自试验基地附近井水经蓄水池放置1周

后的地下水。该试验基地一直从事农耕,耕作制度较稳定,不论从农事管理还是自然地理特征来讲,在长沙地区都具有一定的代表性。

1.2 模拟稻田设计

模拟稻田(13 m×18 m×0.7 m)为水泥砖混结构,池中间设有灌水渠,两边设有排水沟,排水沟可收集模拟农田排水。模拟实验池靠近排水沟一侧用PVC板(0.6 m×0.25 m)结构,板上设置不同高度排水孔,试验时通过排水孔取水样。实验稻田为“陆两优996”杂交水稻收割后灌水2 d的模拟稻田。基肥为复合缓释肥,成份是氯化铵、磷酸铵和氯化钾,其N、P、K含量比例分别为21%、8%、11%。

1.3 实验设计

2009年8月6日—13日在早稻收割后的模拟稻田中进行了不同耕作模式的滞排试验。试验前稻田为晒田后的干裂状态,先对稻田进行灌水处理,待土壤湿润后,再对模拟稻田进行免耕、浅耕和深耕3个耕作处理(分别表示为t-m、t-q和t-sh)。免耕(t-m)是指在不搅动土壤和田水的情况下进行相关农事并伴随表面撒施基肥的活动;浅耕(t-q)是指模拟旋耕或用耙子耙田边耙边撒施基肥的活动;深耕(t-sh)是指深度犁田后再耙田,在耙田的同时撒施基肥的活动。以上3个处理所施基肥均为复合肥,施肥量为750 kg·hm⁻²,折合每个模拟稻田小区1.35 kg。各实验处理设3次重复。

1.4 水样和土样采集与分析

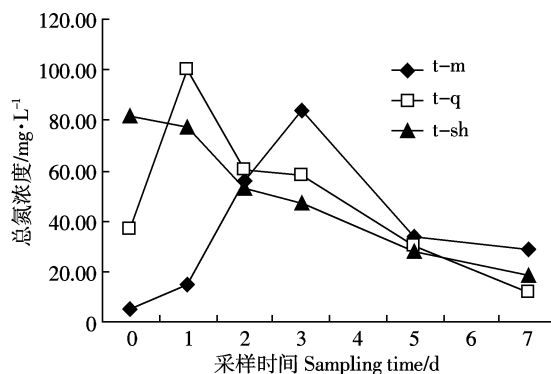
在实验开始后1 h和第1、2、3、5、7 d分别从模拟稻田中采水样和土样带回实验室立即测定各项指标的含量。水样各指标测定方法^[23]如下:总氮(TN):硫酸钾氧化-紫外分光光度法;铵氮(NH₄⁺-N):纳氏试剂光度法(GB 7479—1987);硝氮(NO₃⁻-N):酚二磺酸光度法(GB 7480—1987);总磷(TP)和可溶性磷(DP):钼锑抗分光光度法(GB 11893—1989)。土样指标测定方法为:硝态氮(NO₃⁻-N)和有效磷(AP)指标的具体检测方法均参见《土壤农化分析》^[24]。

2 结果与讨论

2.1 不同耕作模式下稻田田面水中氮素的动态特征

由图1可见,不同耕作模式田面水中TN的浓度变化表现出不同的变化趋势。虽然t-q和t-m处理后都呈升-峰值-降的态势,但t-q较之t-m较早地出现峰值。t-sh的田面水中TN浓度在初期较高,之后随时间推移呈缓慢下降的趋势。田面水中TN的浓度在

施肥耕作处理后1 h时,t-sh最高为81.39 mg·L⁻¹,t-q次之为37.06 mg·L⁻¹,t-m最低为5.00 mg·L⁻¹,表现为t-sh>t-q、t-m,这可能与耕作模式的扰动强度有关。



注:以1 h作为曲线的起点,对应的横坐标为0。下同。

图1 不同耕作模式下稻田田面水中TN浓度动态变化

Figure 1 Dynamics curves of TN concentration in the paddy water after the different summer tillage systems

很显然,深耕对土壤扰动强度较大,土壤中氮素向田面水中释放的TN也较多;免耕对土壤扰动最小,所以在初期,其田面水中TN的浓度最低。复合肥施入稻田后,在微生物的作用下发生复杂的生物转化。可能是由于浅耕的土壤表层微生物的活动,较之免耕的田面水中微生物活动强烈,所以浅耕的田面水中TN浓度早于免耕出现峰值。就深耕而言,由于所施复合肥与土壤充分混合,在土壤中生物转化后的养分大部分被土壤胶粒固定,即所谓的固定作用相对较强,致使田面水中TN浓度呈逐渐下降的趋势。

由图2可知,耕作处理后t-m的田面水中NH₄⁺-N浓度呈低-升-峰值-降的趋势,而t-q和t-sh则表现平稳,处于较低的浓度水平。分析表明,浅耕和深耕的土壤对复合肥在土壤中转化后的养分如NH₄⁺有较强

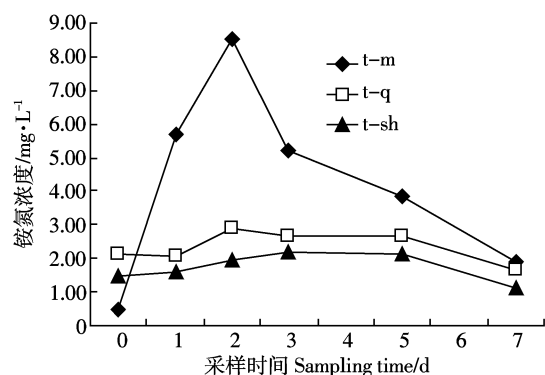


图2 不同耕作模式下稻田田面水中NH₄⁺-N浓度动态变化

Figure 2 Dynamics curves of NH₄⁺-N concentration in the paddy water after the different tillage systems

的固定作用,免耕的土壤对田面水中 NH_4^+ 固定作用相对较弱。从浅耕田面水中 TN 的浓度峰值(图 1)出现时间相对较早可见,夏季气温较高,有利于土壤浅层的微生物生物转化活动,复合肥在田面水中的转化过程在第 2 d 左右已基本完成。

夏季施肥耕作后田面水中 NO_3^- -N 的动态变化图 3 显示。与 TN 和 NH_4^+ -N 相比,田面水中 NO_3^- -N 在总体上处于较低的浓度水平。田面水中硝态氮主要来自于田面水中硝化作用生成的和土壤中原有 NO_3^- -N 含量。从土壤中硝态氮的含量变化(图 4)可知,免耕的田面水中 NO_3^- -N 浓度总体上之所以低于浅耕和深耕,是因为淹水后随土壤溶液进入田面水的原始 NO_3^- -N 含量相对较少所致。浅耕和深耕的田面水中 NO_3^- -N 浓度呈升-峰值-降-升的趋势,于 5~7 d 后出现反弹上升的现象,这可能与田面水中由于硝化作用生物转化以及土壤中原有的较高含量的 NO_3^- -N 经耕作扰动后进入田面水有关。

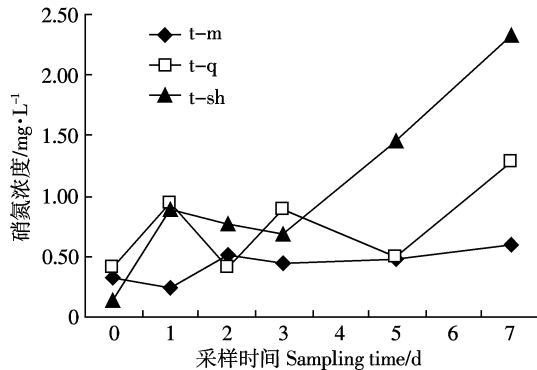


图 3 不同耕作模式下稻田田面水中 NO_3^- -N 浓度动态变化

Figure 3 Dynamics curves of NO_3^- -N concentration in the paddy water after the different tillage systems

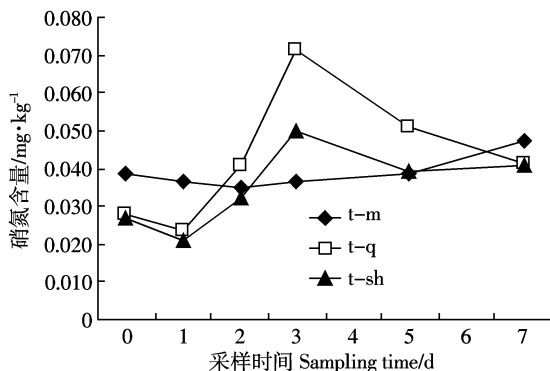


图 4 夏季施肥耕作后土壤 NO_3^- -N 含量的动态变化

Figure 4 Dynamics curves of NO_3^- -N content in the paddy soil after the summer fertilization cultivation

2.2 不同耕作模式下稻田田面水中磷素的动态特征

不同耕作模式下稻田田面水中 TP 和 DP 的动态变化如图 5 和图 6 所示:浅耕和深耕的田面水中 TP 和 DP 的浓度变化近似,在耕作处理后 1 h 最低,分别为 $0.29\sim 1.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.13\sim 0.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第 2 d 最高,分别为 $4.16\sim 5.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.48\sim 3.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,呈低-升-峰值-降-升的趋势。

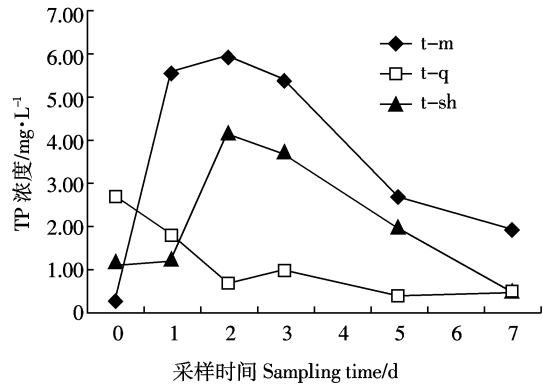


图 5 不同耕作模式下稻田田面水中 TP 动态变化

Figure 5 Dynamics curves of TP concentration in the paddy water after the different tillage systems

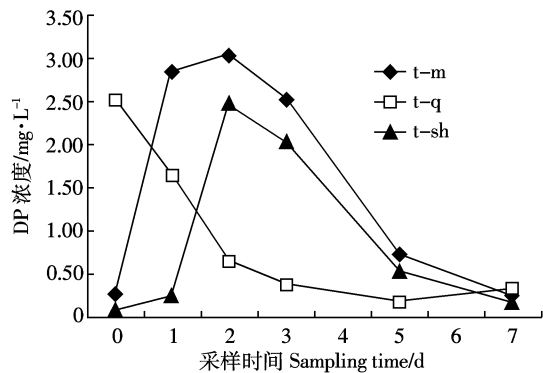


图 6 不同耕作模式下稻田田面水中 DP 动态变化

Figure 6 Dynamics curves of DP concentration in the paddy water after the different tillage systems

浅耕的变化趋势与免耕和深耕不同,但其田面水中 TP 和 DP 的浓度变化相似,在处理 1 h 最高,分别为 $2.68\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后呈逐渐下降的趋势。3 个耕作处理的田面水中 TP 和 DP 在耕作处理 5 d 后均处于较低的浓度水平。

免耕和深耕处理的田面水中 TP 和 DP 浓度在第 1~5 d 内浓度较高,并且均表现为 $t-m > t-sh$ 。就免耕而言,田面水中磷素主要来自田面水中复合肥溶解释放的磷素,较之浅耕和深耕较易释放于田面水中,之后部分磷素又随田面水中的悬浮物沉降等是导致免耕田面水中 TP 和 DP 高于深耕的原因。就深耕而言,可

能与耕作扰动使土壤的部分磷素如 AP 向田面水释放(图 7),以及施入土壤中的复合肥,其溶解于土壤溶液的 PO_3 的一部分向田面水释放等密切关联。就浅耕而言,由于浅层扰动致使土壤中磷素释放至田面水中的磷素浓度在初期相对较高,后期由于田面水中磷素随悬浮物下沉等,可能是浅耕的田面水中 TP 和 DP 的浓度呈逐渐下降的原因所在。

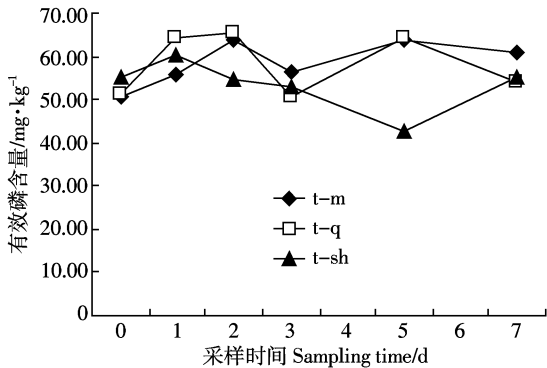


图 7 夏季施肥耕作后土壤 AP 含量的动态变化
Figure 7 Dynamics curves of AP content in the paddy soil after the summer fertilization cultivation

2.3 田面水中总氮减排降污效能分析

瞬时氮流失量 $\Delta Q_i = A \times C_i \times X_i$
式中: A 为模拟稻田面积, C_i 为各采样时间的氮浓度, X_i 为控水高度(设常规控水高度为 3 cm)。

假定在各采样时间点模拟稻田田面水中短时内迅速全部排干,此时模拟稻田田面水中总氮的绝对流失量如表 1 显示:免耕处理较之浅耕和深耕,在耕作后 2 d 内田面水中 TN 的绝对流失量要少,但在第 2 d 即表现出 $\Delta(q \rightarrow 0) > \Delta(m \rightarrow 0) > \Delta(sh \rightarrow 0)$,且第 3 d 其绝对流失量最大,为 $25.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,具有较大的绝对流失潜能。就浅耕而言,在处理 1 h 时,其田面水中 TN 的绝对流失量表现为 $\Delta(sh \rightarrow 0) > \Delta(q \rightarrow 0)$

表 1 不同耕作模式田面水中 TN 的绝对流失量动态($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Table 1 Dynamics of the absolute losses of TN in the paddy water after the different tillage systems($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

* 排水强度	排水时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
$\Delta(m \rightarrow 0)$	1.50	4.31	16.84	25.19	10.19	8.64
$\Delta(q \rightarrow 0)$	11.12	30.00	18.08	17.46	8.95	3.54
$\Delta(sh \rightarrow 0)$	24.42	23.18	15.91	14.21	8.49	5.55

* $\Delta(m \rightarrow 0)$ 表示免耕处理后在不同时间排干田面水时 TN 的绝对流失量; $\Delta(q \rightarrow 0)$ 表示浅耕处理后在不同时间排干田面水时 TN 的绝对流失量; $\Delta(sh \rightarrow 0)$ 表示深耕处理后在不同时间排干田面水时 TN 的绝对流失量。下同。

$0) > \Delta(m \rightarrow 0)$, 第 1 d 其绝对流失量最大,为 $30.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,之后田面水中 TN 的绝对流失量表现为 $\Delta(q \rightarrow 0) > \Delta(sh \rightarrow 0)$ 。就深耕而言,其田面水中 TN 的绝对流失量在耕作后 1 h 最大,为 $24.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,之后呈逐渐减少的趋势,于第 5 d 后田面水中 TN 的绝对流失量处于较低的流失水平。

表 2 显示:免耕处理在 3 d 后排水与在第 3 d 时排水相比,可减少田面水中 TN 流失 $59.55\% \sim 65.68\%$ 。对浅耕而言,在 1 d 后排水与在第 1 d 时排水相比,可减少田面水中 TN 流失 $39.74\% \sim 88.20\%$;若在第 5~7 d 排水,可减少田面水中排放 TN $70.15\% \sim 88.20\%$ 。对深耕而言,在 1 h 后排水,其减排效果较好,在 5~7 d 排水,与其在 1 h 时排水相比,可减少排放田面水中 TN $65.23\% \sim 77.26\%$ 。由此可见,夏季耕作后,不同的耕作模式应根据实际情况选择合适的排水时间,以实现田面水的最佳减排效能。

表 2 相对排水时间的田面水中 TN 减排效能(%)
Table 2 Emission performance of TN in the paddy water at relative to the drainage time after the different tillage systems(%)

耕作模式	相对排水时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
t-m(3 d 后排水)				0.00	59.55	65.68
t-q(1 d 后排水)		0.00	39.74	41.80	70.15	88.20
t-sh(1 h 后排水)	0.00	5.07	34.83	41.80	65.23	77.26

表 3 显示:与深耕相比,免耕和浅耕后在第 2~5 d 排水,其田面水中 TN 的相对流失潜能较大,其流失潜能分别为 $5.51\% \sim 16.69\%$ 和 $5.18\% \sim 18.60\%$ 。这表明,深耕后模拟稻田田面水中 TN 的流失潜能相对较小。

表 4 显示:不同耕作模式下田面水中 $[\text{NH}_4\text{-N}]/[\text{TN}]$ 比值,以 t-m 为最大,t-q 次之,t-sh 最小。由于

表 3 浅耕和免耕相对于深耕的田面水中 TN 流失潜能(%)
Figure 3 Loss potential compared with shallow tillage of TN in the paddy water from deep plowing and shallow plowing(%)

比较	排水时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
*m/sh	-1527.84	-437.28	5.51	43.59	16.69	35.78
*q/sh	-119.61	22.73	11.98	18.60	5.18	-56.77

注: $*m/sh = ([t-m] - [t-sh]) / [t-m] \times 100$; 计算的值为负值,则表示免耕与深耕相比较的相对流失潜能较小,为正值则表示免耕与深耕相比较的相对流失潜能较大。 $*q/sh = ([t-q] - [t-sh]) / [t-q] \times 100$; 计算的值为负值,则表示浅耕与深耕相比较的相对流失潜能较小,为正值则表示浅耕与深耕相比较的相对流失潜能较大。下同。

表 4 耕作处理后田面水中[NH₄⁺-N]/[TN]的动态变化
Table 4 Dynamic ratios of [NH₄⁺-N]/[TN] in the paddy water after the different tillage systems

耕作模式	采样时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
t-m	0.10	0.40	0.15	0.06	0.11	0.07
t-q	0.06	0.02	0.05	0.05	0.09	0.14
t-sh	0.02	0.02	0.04	0.05	0.08	0.06

[NH₄⁺-N]/[TN]值小于 0.5,田面水中表现为以 TN 为主的相对流失形态与潜能。

2.4 田面水中总磷减排降污效能分析

表 5 显示:在耕作处理 1 d 前,田面水中 TP 的绝对流失量表现为 $\Delta t-q>\Delta t-sh>\Delta t-m$;在处理 1 d 后则表现为 $\Delta t-m>\Delta t-sh>\Delta t-q$ 。显然,免耕处理田面水中 TP 的绝对流失量最大,范围在 0.57~1.78 kg·hm⁻²;深耕处理田面水中 TP 的绝对流失量次之,范围在 0.15~0.21 kg·hm⁻²;浅耕处理田面水中 TP 绝对流失量最少,范围在 0.59~1.25 kg·hm⁻²。因此,从减少田面水中 TP 的绝对流失量出发,夏季浅耕不失为最佳清洁耕作模式。

表 5 耕作处理后田面水中 TP 的绝对流失量动态(kg·hm⁻²)
Table 5 Dynamics of TP concentration in the paddy water after the different tillage systems(kg·hm⁻²)

* 排水强度	采样时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
$\Delta(m\rightarrow 0)$	0.09	1.67	1.78	1.61	0.80	0.57
$\Delta(q\rightarrow 0)$	0.80	0.54	0.21	0.30	0.12	0.15
$\Delta(sh\rightarrow 0)$	0.35	0.38	1.25	1.12	0.59	0.15

注:* $\Delta(m\rightarrow 0)$ 表示免耕处理后排干田面水中时 TP 的绝对流失量; $\Delta(q\rightarrow 0)$ 表示浅耕处理后排干田面水中时 TP 的绝对流失量; $\Delta(sh\rightarrow 0)$ 表示深耕处理后排干田面水中时 TP 的绝对流失量。

表 6 显示:免耕处理在第 5 d 后排水,与其第 2 d 排水时相比,可以减少田面水中 TP 流失 54.70%~67.78%。对浅耕处理而言,在 1 d 后排水,与其在 1 h 排水时相比,田面水中 TP 的减排效果明显,若在第

表 6 相对排水时间的田面水中 TP 减排效能(%)
Table 6 Emission performance of TP in the paddy water at the relative to the drainage time(%)

耕作模式	排水时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
t-m(2 d 后)			0.00	9.38	54.70	67.78
t-q(1 h 后)	0.00	32.91	73.91	62.99	85.09	81.36
t-sh(2 d 后)			0.00	10.15	52.45	87.99

2~7 d 排水,可减少田面水中排放 TP 62.99%~85.09%。对深耕处理而言,在处理 2 d 前排水,田面水中 TP 的流失量较大,在 2 d 后排水,其减排效果较好,若在第 5~7 d 排水,与其在第 2 d 排水时相比,可减少排放田面水中 TP 52.45%~87.99%。

表 7 显示:与浅耕相比,免耕和深耕处理第 2 d 后排水,田面水中 TP 的相对流失潜能较大,其流失潜能分别为 73.80%~88.18%和 0.00%~83.18%。这也表明,浅耕处理模拟稻田田面水中 TP 的相对流失潜能较小。

表 7 免耕和深耕相对于浅耕的田面水中 TP 的流失潜能(%)
Table 7 Loss potential compared with shallow tillage of TP in the paddy water after deep plowing and shallow plowing(%)

比较	排水时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
*m/q	-829.27	67.69	88.18	81.50	85.09	73.80
*sh/q	-129.91	-44.00	83.18	73.45	79.79	0.00

注:*m/q= $([t-m]-[t-q])/[t-m]\times 100$;计算的值为负值,则表示免耕与浅耕相比较的相对流失潜能较小,为正值则表示免耕与浅耕相比较的相对流失潜能较大。*sh/q= $([t-sh]-[t-q])/[t-sh]\times 100$;计算的值为负值,则表示深耕与浅耕相比较的相对流失潜能较小,为正值则表示深耕与浅耕相比较的相对流失潜能较大。

3 个耕作处理的 DP/TP 值动态变化(表 8)显示:不同耕作模式处理后田面水中磷素的相对流失形态表现出一定的差异性。就免耕处理而言,在实验后的 2 d 内,由于[DP]/[TP]大于 0.5,此时磷素流失形态以 DP 为主,第 3 d 后,[DP]/[TP]小于 0.5,此时田面水中磷素流失形态转化为以 TP 为主。对于浅耕处理,除第 3 d 的[DP]/[TP]小于 0.5 外,其他采样时间田面水中[DP]/[TP]大于 0.5,因此浅耕处理田面水中磷素流失形态在总体上表现为以 DP 为主的流失形态。就深耕处理而言,由于田面水中的[DP]/[TP],在 1 h~2 d 时段为 0.11~0.22,在 2~3 d 时段为 0.60~0.54,在 5~7 d 时段为 0.27~0.40,所以,深耕处理的田面水中磷素流失形态在前期和后期以 TP 为主,在中期则以 DP 为主,

表 8 耕作处理后田面水中[DP]/[TP]值的动态变化
Table 8 Dynamic ratios of [DP]/[TP] in the paddy water after the different tillage systems

耕作处理	采样时间					
	1 h	1 d	2 d	3 d	5 d	7 d
t-m	0.93	0.51	0.51	0.47	0.27	0.13
t-q	0.94	0.92	0.93	0.38	0.50	0.71
t-sh	0.11	0.22	0.60	0.54	0.27	0.40

流失形态呈现 TP 与 DP 交替变化的现象。

3 结论

不同耕作模式模拟滞水中氮磷的动态特征分析及总氮、总磷流失潜能与减排效能研究表明:

(1)深耕有利于土壤固肥作用的发挥,田面水中 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈逐渐下降的趋势。浅耕和深耕土壤中微生物环境利于硝化反应,不易被土壤吸附 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 得以迅速向田面水中释放。免耕和深耕处理的田面水中 TP 和 DP 浓度在第 1~5 d 内浓度较高,3 个耕作处理的滞排水中 TP 和 DP 在耕作处理 5 d 后均处于较低浓度水平。

(2)不同耕作模式滞水 5 d 后 TN 的绝对流失量均处于较低的流失水平。免耕、浅耕、深耕在滞水 5 d 后可分别减少田面水中 TN 流失 59.55%~65.68%、70.15%~88.20%和 65.23%~77.26%。深耕处理的模拟稻田田面水中 TN 的流失潜能相对较小。不同耕作模式处理相对流失形态与潜能以 TN 为主。

(3)免耕处理田面水中 TP 的绝对流失量最大,浅耕处理田面水中 TP 绝对流失量最少。免耕、浅耕、深耕在滞水 5 d 后再排水可分别减少田面水中 TP 流失 54.70%~67.78%、62.99%~85.09%和 52.45%~87.99%。浅耕处理模拟稻田田面水中 TP 的相对流失潜能较小。不同耕作模式处理田面水中磷素的相对流失形态表现出一定的差异性,田面水中磷素流失形态随时间变化呈现出 TP 与 DP 交替变化的现象。

因此,从减少田面水中氮磷的绝对流失量出发,夏季浅耕不失为最佳清洁耕作模式;同时在滞水 5 d 后再排水能有效减少田面水中氮磷的流失量,减少稻田排水对面源污染的影响。

参考文献:

- [1] 朱铁群. 我国水环境农业非点源污染防治研究简述 [J]. 农村生态环境, 2000, 16(3): 55-57.
ZHU Tie-qun. Prevention and control of water pollution caused by agricultural non-point sources in China[J]. *Rural Eco Environment*, 2000, 16(3): 55-57.
- [2] 范成新. 太湖非点源污染负荷与对策研究 [J]. 河海大学学报, 1996, 24, 海洋湖沼专辑: 64-69.
FAN Cheng-xin. Study on Taihu non-point pollution load and counter-measures[J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 1996, 24, Marine lacustrine album: 64-69.
- [3] 高超, 朱建国, 窦贻俭. 农业非点源污染对太湖水质的影响: 发展态势与研究重点[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 260-263.
GAO Chao, ZHU Jian-guo, DOU Yi-jian. Contribution of agricultural non-point source pollution to water quality deterioration in Tai-lake watershed: Recent trends and research priorities[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(3): 260-263.
- [4] 李世鹏, 李建民. 氮肥损失研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 377-379.
LI Shi-juan, LI Jian-min. Research progress on losses of fertilizer nitrogen[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(5): 377-379.
- [5] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 37-40.
LIU Fang, HUANG Chang-yong, HE Teng-bin, et al. Phosphorus loss by runoff in various dry land from yellow soil and its affecting factors[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(2): 37-40.
- [6] 徐谦. 我国化肥和农药非点源污染状况综述 [J]. 农村生态环境, 1996, 12(2): 39-43.
XU Qian. A review on the status of non-point source pollution of chemical fertilizers and pesticides in China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1996, 12(2): 39-43.
- [7] 刘翼浩. 耕作学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 210-247.
LIU Xun-hao. Farming learn [M]. Beijing: China's Agriculture Press, 1994: 210-247.
- [8] 谢德体, 魏朝富, 杨剑虹. 自然免耕下的稻田生态系统[J]. 应用生态学报, 1994, 5(4): 415-421.
XIE De-ti, WEI Chao-fu, YANG Jian-hong. Paddy field ecosystem under natural zero-tillage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(4): 415-421.
- [9] 黄锦法, 俞慧明, 陆建贤, 等. 稻田免耕直播对土壤肥力性状与水稻生长的影响[J]. 浙江农业科学, 1997, 11(5): 226-228.
HUANG Jin-fa, YU Hui-ming, LU Jian-xian, et al. Paddy no-tillage live method on soil fertility character and the influence of rice growth[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 1997, 11(5): 226-228.
- [10] Hideo Nakasone, Muhammad Kantar Abbes, Hsiao Kuroda. Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields [J]. *Paddy and Water Environment*, 2004(23): 115-124.
- [11] Ingrid Western, Ingmar Messing, Harry Liner, et al. Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 47: 85-100.
- [12] Tan C S, Drury C F, Soul Tannin M, et al. Effect of controlled drainage and tillage on soil structure and tile drainage nitrate loss at the field scale[J]. *Water Sci Tech*, 1998, 38(5): 103-110.
- [13] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开, 等. 淹灌稻田的暗管排水中氮素流失的试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(3): 12-16.
ZHANG Yu-fang, ZHANG Wei-zhen, SHEN Rong-kai, et al. Experimental study of leaching losses of nitrogen in effluent from drained paddy rice field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1999, 18(3): 12-16.
- [14] H Y Ng, C S Ta, et al. Controlled drainage and sub irrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002(90): 81-88.
- [15] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J]. 河海大学学报, 2006, 34(1): 21-24.

- YIN Guo-xi, ZHANG Zhan-yu, GUO Xiang-ping, et al. Experimental study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen[J]. *Journal of Hehai University(Natural Sciences)*, 2006, 34(1):21-24.
- [16] 张荣社, 周琪, 张建, 等. 潜流构造湿地去除农田排水中氮的研究[J]. *环境科学*, 2003(1):113-116.
- ZHANG Rong-she, ZHOU Qi, ZHANG Jian, et al. Study on nitrogen removal treating agriculture wastewater in subsurface constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2003(1):113-116.
- [17] 于兴修, 杨桂枝. 西苕溪流域土地利用对氮素径流流失过程的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5):424-427.
- YU Xing-xiu, YANG Gui-zhi. Effects of land use in Xitiao Xi catchment on nitrogen losses from runoff [J]. *Agro-environmental Protection* 2002, 21(5):424-427.
- [18] 晏维金, 尹澄清. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(3):312-316.
- YAN Wei-jin, YIN Cheng-qing. Phosphorus and nitrogen transfers and run off losses from rice field wetlands of Chaohu Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3):312-316.
- [19] 冯绍元, 郑耀泉. 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(6):277-279.
- FENG Shao-yuan, ZHENG Yao-quan. With the transformation of farmland loss and its influence on water environment[J]. *Agricultural Environment Protection*, 1996, 15(6):277-279.
- [20] 章明奎, 方利平. 河岸水稻缓冲带宽度对排水中氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2005(4):9-12.
- ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping. Effects of riparian rice buffers width on concentrations of nitrogen and phosphorus in drainage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005(4):9-12.
- [21] 朱兆良. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1992.
- ZHU Zhao-liang. Chinese soil nitrogen[M]. Nanjing:Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [22] 张志剑, 王兆德, 姚菊祥, 等. 水文因素影响稻田氮磷流失的研究进展[J]. *生态环境*, 2007, 16(6):1789-1794.
- ZHANG Zhi-jian, WANG Zhao-de, YAO Ju-xiang, et al. Effects of hydrological practices on nutrients export from paddy field: A review[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1789-1794.
- [23] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration Water and Wastewater Monitoring Method Board Editor. Water and wastewater monitoring method [M]. 4th edition. Beijing:China Environmental Science Press, 2002.
- [24] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社, 1992:27-36.
- Nanjing Agricultural University. Soil agro-chemistry analysis [M]. Beijing:Agriculture Press, 1992:27-36.