

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.006

侯坤, 荣湘民, 韩永亮, 等. 施肥深度对潮砂土氮磷损失及土壤氮磷含量的影响. 土壤, 2021, 53(4): 707–714.

施肥深度对潮砂土氮磷损失及土壤氮磷含量的影响^①

侯坤, 荣湘民, 韩永亮*, 彭建伟, 张玉平, 谢桂先, 田昌, 潘治宇, 韩磊

(湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410128)

摘要: 以机插精量一次性侧深施肥为背景, 探究施肥深度对氮、磷损失及土壤氮磷养分的影响, 为农业机械化提供科学依据。本研究采用土柱模拟试验, 于 2019 年在湖南农业大学试验基地大棚内进行, 供试土壤为潮砂田水稻土, 肥料为三元复混肥。试验共设置 6 个处理: CK(不施肥)和 0(表施)、5、7.5、10、12.5 cm 五个不同深度施肥处理, 监测氨挥发、田面水和渗漏水氮磷含量的动态变化以及土壤氮磷含量。结果表明: 与表施处理相比, 5、7.5、10、12.5 cm 深施处理的氨挥发累积量分别下降 68.07%、82.40%、99.98%、99.98%。10、12.5 cm 深施处理的田面水总氮平均浓度, 比表施处理分别下降 84.82%、89.07%; 各深度施肥处理的田面水总磷平均浓度较表施处理均大幅下降, 降幅达 92.43%~99.56%。不同深度施肥处理的渗漏水中氮、磷平均浓度与表施处理之间差异不显著。在 0~20 cm 土层中, 5、7.5、10、12.5 cm 深施处理的土壤全氮、全磷含量分别比表施处理提高了 4.63%、12.25%、11.85%、5.69% 和 6.40%、5.90%、6.09%、5.43%; 20~30 cm 和 30~40 cm 土层中, 各处理间的氮磷含量差异不显著。肥料深施能显著降低氮磷损失, 潮砂土的适宜施肥深度为 10 cm。

关键词: 深施肥; 氮磷损失; 潮砂土

中图分类号: S511 **文献标志码:** A

Effects of Fertilization Depth on Nitrogen and Phosphorus Losses and Nitrogen and Phosphorus Contents in Aquic Sandy Soil

HOU Kun, RONG Xiangmin, HAN Yongliang*, PENG Jianwei, ZHANG Yuping, XIE Guixian, TIAN Chang, PAN Zhiyu, HAN Lei
(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources / College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: By using soil column simulation with machine-planting precision one-time deep fertilization as the background, the effects of fertilization depth on the losses and contents of nitrogen and phosphorus were studied by an experiment conducted in 2019 in the greenhouse of the Experimental Base of Hunan Agricultural University in order to provide a scientific basis for agricultural mechanization. The tested soil is aquic sandy soil (paddy soil), the tested fertilizer was ternary compound fertilizer, and six treatments were set which included CK (no fertilization) and five fertilization depths (0, 5, 7.5, 10 cm and 12.5 cm). The changes of nitrogen and phosphorus contents in ammonia volatilization, field surface water and seepage water as well as nitrogen and phosphorus contents in soil were monitored. Compared with the 0 cm treatment, the accumulations of ammonia volatilization in 5, 7.5, 10 cm and 12.5 cm depth treatments decreased by 68.07%, 82.40%, 99.98% and 99.98%, respectively; total nitrogen in field surface water in 10 cm and 12.5 cm depth treatments decreased by 84.82% and 89.07%, respectively; and the average concentration of total phosphorus in field surface water under fertilization treatments decreased by 92.43%–97.56%. Compared with 0 cm treatment, average concentrations of nitrogen and phosphorus in leakage water under different fertilization depth treatments had no significant difference; total nitrogen and total phosphorus contents of 0–10 cm soil layer in 5, 7.5, 10 cm and 12.5 cm depth treatments soil layers increased by 4.63%, 12.25%, 11.85%, 5.69% and 6.40%, 5.90%, 6.09% and 5.43%, respectively. No significant difference existed in nitrogen and phosphorus contents between 20–30 cm and 30–40 cm soil layers. In conclusion, deep fertilization can significantly reduce nitrogen and phosphorus losses, and 10 cm is appropriate fertilization

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800501)、湖南省自然科学基金青年项目(2019JJ50233)和湖南省教育厅创新平台开放基金项目(19K046)资助。

* 通讯作者(xiaohliang@163.com)

作者简介: 侯坤(1994—), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 研究方向为施肥原理与技术。E-mail: 243591457@qq.com

depth for aquic sandy soil.

Key words: Deep fertilization; Losses of nitrogen and phosphorus; Aquic sandy soil

我国是化肥消费大国, 2019 年的化肥用量为 5 653.42 万 t, 其中氮肥 2 065.43 万 t, 磷肥 728.88 万 t, 复合肥 2 268.84 万 t^[1]。但我国的肥料当季吸收利用率较低, 远低于西方发达国家, 一般在 30%~35%^[2]。较低的肥料利用率意味着较大的肥料投入才能保证作物的产量。据统计, 我国水稻的平均化肥用量约 180 kg/hm², 高出世界平均水平 75%^[3-4]。大量的肥料投入带来的氮、磷流失, 造成了一系列的环境问题, 如水体富营养化、地下水硝态氮含量超标等, 其中氮的主要损失途径有氨挥发、径流、渗漏、硝化与反硝化等^[5], 如果将农田中化肥氮的径流、渗漏和氨挥发三者之和视作农田化肥氮的损失对水体氮素面源污染的贡献, 其量约为 490 万~500 万 t^[6]。磷由于在土壤中易固定, 所以农田中磷素的流失以颗粒态径流为主。据学者统计, 农业总氮、总磷的流失是水体污染的重要来源, 约占我国水体污染中总氮、总磷的 57.2% 和 67.4%^[7]。

稻田氮素损失以氨挥发损失占主导地位, 占总损失的 9%~60%^[8-9]; 朱兆良先生对苏南太湖流域稻麦轮作区的研究结果表明, 通过径流方式进入水循环的氮占氮总量的 11.4%^[10]; 渗漏损失最小, 占 1.4%~2.78%^[11], 且以硝态氮为主。而在稻田磷素损失中, 地表径流损失是其主要途径, 约占总施肥量的 3.59%, 通过土壤渗漏水流失的磷素较少^[12-13]。

近年来, 随着农业机械化水平的进一步提升, 水稻机插秧同步深施肥模式以其经济高效的特点逐渐成为研究热点。采用机械作业也使肥料深施变得易于操作, 而肥料深施一直被认为是减少肥料损失, 提高肥料利用率的重要方式。已有研究表明, 与农民习惯施肥相比, 双季稻在机插同步一次性侧深施肥条件下以减氮 20%~30% 效果最好^[14], 施肥深度以 6~10 cm 为宜^[15-17]。但在机插同步侧深施肥的背景下不同的地区和土壤类型的最佳施肥深度存在差异。因此, 本研究拟采用土柱模拟的方法, 探究不同施肥深度潮砂泥水稻土的氮磷损失特征, 为构建机插秧同步一次性侧深施肥背景下科学合理的施肥深度提供科学依据, 这对减少农业面源污染、促进农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 4—6 月在湖南农业大学土壤资源

高效利用国家工程实验室校内基地进行。供试土壤为河流冲积物发育的潮砂泥, 采自湖南省长沙市浏阳市永和镇(28°11'0.72", 113°06'23.79")试验基地。土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 16.62、1.21、0.54、11.51 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 48.9、21.2、156 mg/kg, pH 为 5.61。土样采集后风干, 挑去肉眼可见的细根、石块后过 1 cm 筛保存备用。供试肥料为 27.1-7.4-18.5(N-P₂O₅-K₂O)三元机插专用复混肥。

1.2 试验设计

采用土柱模拟试验, 模拟土柱装置为 PVC 圆柱管, 内径 20 cm, 高度 45 cm, 土柱管下面开一小孔, 连接配套的塑料管以便柱内液体流出, 并配备阀门。管内土壤高度 40 cm。根据施肥深度的不同, 分别设置 0(表施)、5、7.5、10、12.5 cm, 5 个不同施肥深度处理, 每土柱施用三元复混肥 25.944 g, 即每公斤土施用 N 0.18 g、P₂O₅ 0.05 g、K₂O 0.12 g。复混肥料的氮源为尿素, 且本试验采用的施肥方法是点施, 用直径 5 cm 的圆柱形透明塑料管打孔, 每个土柱中心打一个孔, 将肥料均匀撒入孔中并用土将孔填至之前状态。每个处理重复 3 次。

1.3 样品的采集与测定方法

1) 氨挥发的采集与测定。氨挥发采用密闭室间歇式抽气法收集。密闭室底面直径 20 cm、高 9 cm, 采用透明有机玻璃制作。挥发氨吸收液为 20 g/L 硼酸, 每次抽气结束后, 用标准稀硫酸((0.01 mol/L H⁺)滴定, 计算土壤中氨挥发量。抽气时, 气室内换气速率控制在 15~20 次/min。施肥后每天上午 9:00—11:00 和下午 15:00—17:00 进行抽气, 作为当天氨挥发的平均通量计算全天氨挥发量, 持续测定直至施氮处理与未施氮处理的氨挥发通量无显著差异为止。

田间土壤氨挥发损失的计算公式为:

$$F=(c \times V \times 14 \times 10^{-2} / S) \times (24 / t)$$

式中: F 为氨挥发通量, 以 NH₃-N 计(kg/(hm²·d)); c 为标准稀硫酸的滴定浓度(mol/L); V 为滴定消耗稀硫酸的体积(ml); 14 为每摩尔 NH₃ 中 N 的质量数(g/mol); S 为捕获装置的截面积(m²); t 为氨挥发收集时间(h)。

2) 田面水与渗流水的采集与测定。施肥后, 用自来水灌溉并保持液面 3 cm, 并将土柱底部收集渗流水的阀门关闭。田面水采用针筒吸取, 渗流水是将土

柱底部的阀门打开之后收集，不计渗漏量。于施肥后第 1 天开始取样，此后每 3 d 取 1 次田面水和渗漏水水样。测定水样中总氮、总磷含量，总氮采用碱性过硫酸钾消煮-紫外分光光度法测定，总磷采用过硫酸钾消煮-钼锑抗比色法测定。

3) 土样的采集与测定。于施肥后第 36 天，试验结束后，分别取 0~20、20~30、30~40 cm 土层的混合土样，测定土样中氮磷含量。土壤全氮采用浓硫酸+混合加速剂消煮，蒸馏定氮法测定；全磷采用高氯酸+浓硫酸消煮，钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理

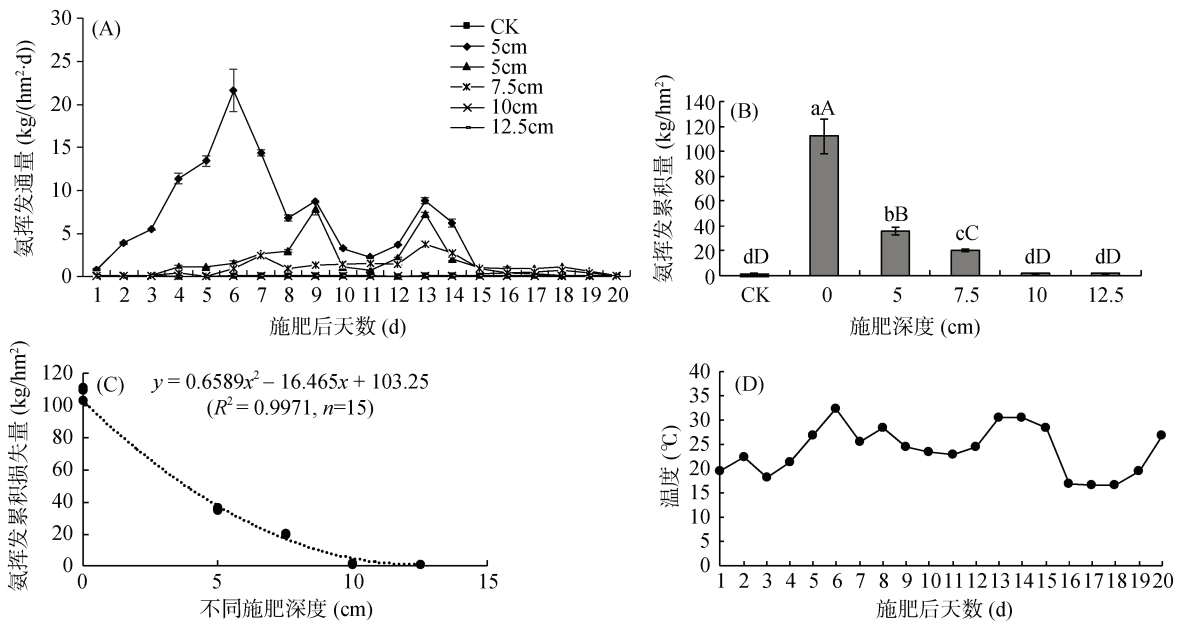
采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 对数据进行处理与统计分析，处理间差异显著性分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同施肥深度对氨挥发的影响

如图 1A 所示，施肥后 1~6 d，表施处理的氨挥发通量迅速升高，于 6 d 时达到峰值，其值为 21.6 kg/

(hm²·d)，随后迅速下降到 6.8 kg/(hm²·d)，至 8~12 d，氨挥发通量缓慢下降，15 d 后，表施与不施肥处理氨挥发量接近；而 5 cm 和 7.5 cm 深施处理分别在施肥后 9 d(7.87 kg/(hm²·d))和 13 d(3.73 kg/(hm²·d))出现峰值。其中，表施、5 cm 和 7.5 cm 深施处理在施肥后 12~13 d 氨挥发通量出现小峰值，这可能是由于环境温度升高所致(图 1D)。与表施处理相比，5 cm 和 7.5 cm 深施处理的氨挥发通量峰值小且滞后，10 cm 和 12.5 cm 深施处理的氨挥发通量与不施肥处理表现一致。由图 1B 可知，不同深度施肥处理的氨挥发累积损失量表现为 0 cm>5 cm>7.5 cm>10 cm≈12.5 cm≈CK，分别占施氮总量的 9.1%、2.97%、1.17%、0.18%、0.07%、0.06%。与表施处理相比，深施处理的氨挥发累积量下降 68.07%~99.98%，其中施肥深度在 0~10 cm 以内，各处理的氨挥发累积量随施肥深度的增加而显著下降，10 cm 和 12.5 cm 深施处理的氨挥发累积量与不施肥处理之间的差异不显著。由图 1B~1C 可知，当施肥深度达到 10 cm 及以下时可基本避免氨挥发带来的肥料氮素损失。



(A: 氨挥发通量; B: 氨挥发累积量; C: 氨挥发累积量与施肥深度的相关性; D: 温度动态变化; 图中不同大、小写字母分别表示处理间差异达 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 显著水平，下同)

图 1 不同施肥深度对氨挥发的影响

Fig. 1 Ammonia volatilization under different fertilization depths

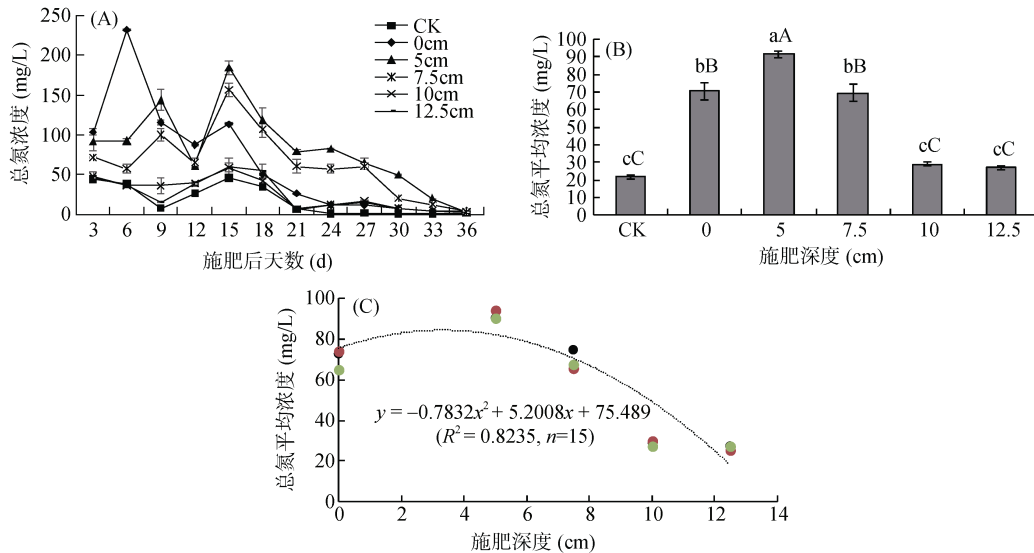
2.2 不同施肥深度对田面水总氮、总磷浓度的影响

如图 2A 所示，表施处理的田面水总氮浓度在第 2 次取样(施肥后 7 d)时达到峰值，其值为 232.2 mg/L，5 cm 和 7.5 cm 深施处理在第 5 次取样(施肥后 15 d)达到峰值，其值为 184.56 mg/L 和 156.95 mg/L；而 10、12.5 cm 深施处理的田面水总氮浓度与不施肥处

理无显著差异。与表施处理相比，深施处理能有效降低田面水的总氮浓度峰值，且推迟峰值出现的时间。如图 2B 所示，0~12.5 cm 不同施肥深度处理田面水总氮平均浓度分别为 70.50、91.52、69.49、29.04、26.96 mg/L，其大小表现为 5 cm>0 cm>7.5 cm>10 cm>12.5 cm，其中 5 cm 深施处理的田面水总氮平均浓度

(91.52 mg/L)最高,且显著高于其他处理。7.5 cm 深施处理的田面水总氮平均浓度与表施处理之间的差异不显著,但显著高于 10、12.5 cm 深施处理和不施

肥处理。施肥深度与田面水总氮平均浓度的相关性如图 2C 所示,两者具有较好的多项式相关性,相关性系数为 R^2 为 0.816 5。



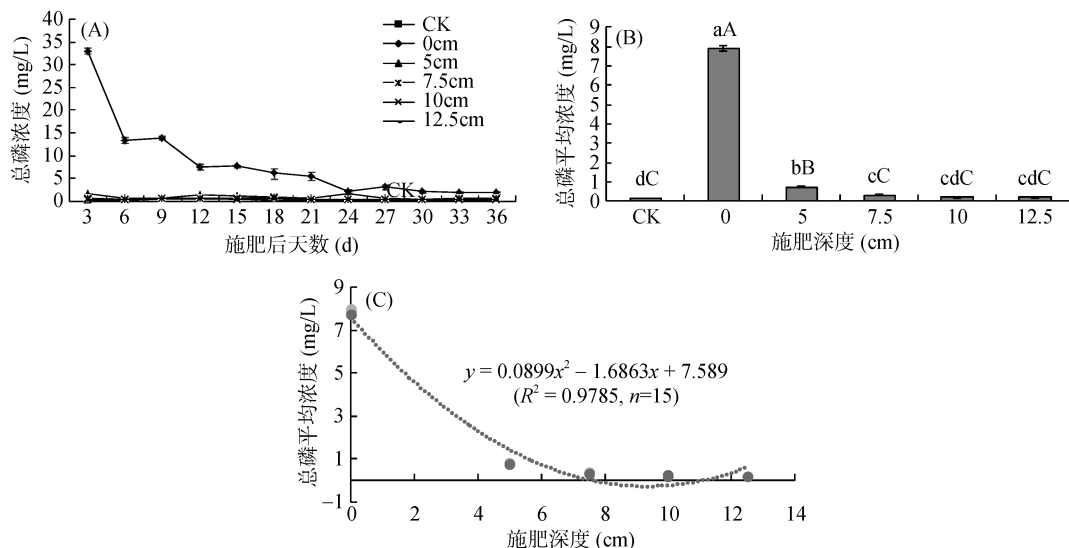
(A: 田面水总氮浓度; B: 田面水总氮平均浓度; C: 田面水总氮平均浓度与施肥深度的相关性)

图 2 不同施肥深度对田面水总氮浓度的影响

Fig. 2 Total nitrogen concentrations under different fertilization depths in field surface water

如图 3A 所示,施肥后,表施和 5 cm 深施处理的田面水总磷浓度随时间推移和施肥深度的加深而迅速下降,但 7.5 ~ 12.5 cm 深施处理的变化趋势与不施肥处理相当。表施处理的田面水总磷浓度显著高于其他处理,施肥后的第 1 次取样田面水总磷浓度达到最大值 32.98 mg/L,且在第 1 ~ 4 次取样间(施肥后 12 d 内),其总磷浓度下降到 7.44 mg/L,浓度下降 77.4%,随后下降速度趋于平缓,最后在 3.0 ~ 1.7 mg/L 波动。

在整个取样周期内,各施肥处理的田面水总磷平均浓度如图 3B 所示,表施处理的田面水总磷平均浓度均极显著高于其他各处理,为 7.9 mg/L; 5 cm 深施处理的田面水总磷平均浓度极显著高于 7.5 cm 深施处理,后者与 10、12.5 cm 深施处理之间的差异不显著,但显著高于不施肥处理; 10、12.5 cm 深施处理与不施肥处理之间的差异不显著。深施处理(5 ~ 12.5 cm)的田面水总磷平均浓度分别比表施处理降低 92.43% ~ 99.56%。



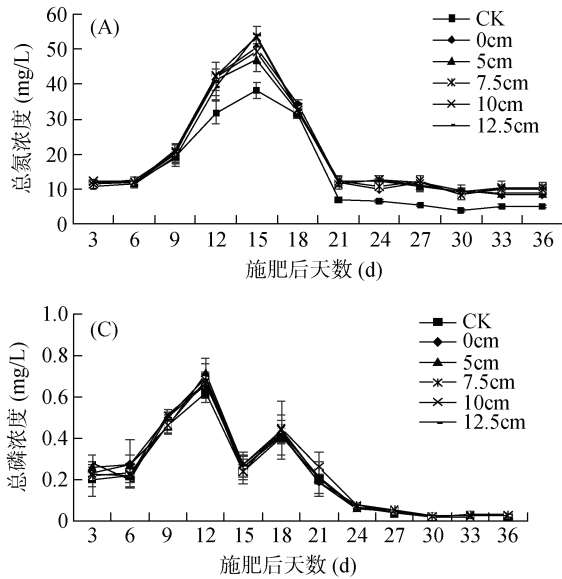
(A: 田面水总磷浓度; B: 田面水总磷平均浓度; C: 田面水总磷平均浓度与施肥深度的相关性)

图 3 不同施肥深度对田面水总磷浓度的影响

Fig. 3 Total phosphorus concentrations under different fertilization depths in field surface water

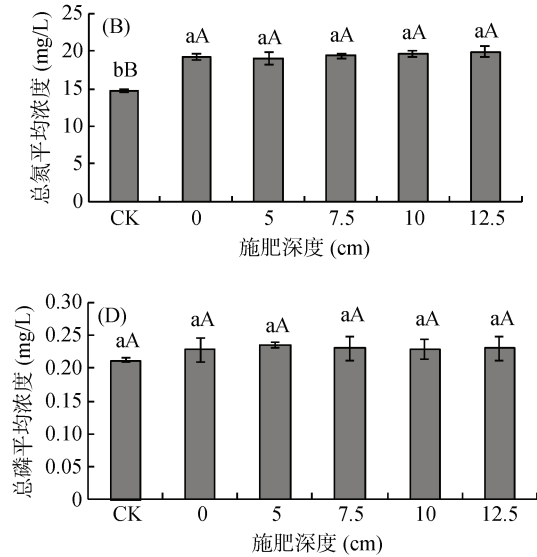
2.3 不同施肥深度对渗漏水总氮、总磷浓度的影响

如图 4A、B 所示，各处理的渗漏水总氮浓度均呈先升高后下降的趋势，各处理均在第 5 次取样时(施肥后 15 d)达到最大值。各施肥处理的渗漏水总氮平均浓度与不施肥处理间差异均达极显著水平，比不施肥处理提高了 29.4% ~ 35.7%，但各施肥处理间差异不显著。



异不显著。

如图 4C、D 所示，各处理的渗漏水总磷浓度均呈先升高后降低趋势，且各处理的渗漏水总磷平均浓度差异不显著。磷在土壤中极易被固定，施肥量控制在 P_2O_5 0.05 g/kg 以内，施肥及施肥深度对磷素渗漏损失的影响不显著。



(A: 渗漏水总氮浓度; B: 渗漏水总氮平均浓度; C: 渗漏水总磷浓度; D: 渗漏水总磷平均浓度)

图 4 不同施肥深度对渗漏水中总氮、总磷浓度的影响

Fig. 4 Nitrogen and phosphorus concentrations in leaked water under different fertilization depths

2.4 不同施肥深度对氮磷损失的抑制效应

如表 1 所示，相比于表面施肥，不同施肥深度对抑制氮磷损失的效果以施肥深度大于 10 cm 时较好，氨挥发、田面水总氮和总磷分别减少了 99.98%、84.82%、99.37% 以上，而渗漏的总氮、总磷流失差异不显著。考虑施肥机械作业难易，10 cm 为最佳施肥深度。

表 1 不同施肥深度对氮磷损失的抑制效应(%)

Table 1 Inhibition effects of different fertilization depths on nitrogen and phosphorus losses

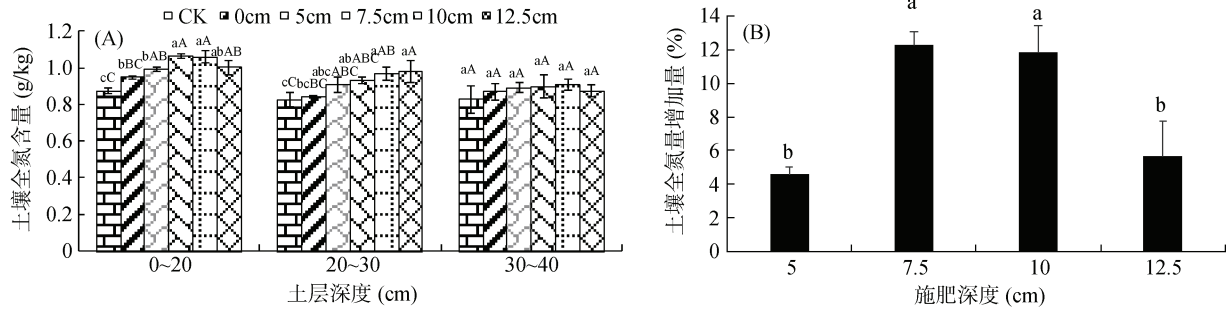
施肥深度(cm)	氨挥发	田面水	
		总氮	总磷
5	68.07%	-43.00%	92.43%
7.5	82.40%	2.07%	97.92%
10	99.98%	84.82%	99.37%
12.5	99.98%	89.07%	99.56%

2.5 不同施肥深度对不同土层全氮、全磷含量的影响

如图 5A 所示，各处理 0 ~ 20、20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 土层全氮含量随施肥深度有依次升高趋势。0 ~

20 cm 土层，全氮含量最高的为 7.5 cm 和 10 cm 深施处理，分别达 1.063、1.060 g/kg，其次为 12.5 cm 深施处理，为 1.00 g/kg；各施肥处理都显著高于不施肥处理，在 7.5、10、12.5 cm 深施处理之间的差异不显著，7.5、10 cm 深施处理的全氮含量显著高于表施和 5 cm 处理深施，表施、5 cm 和 12.5 cm 深施处理之间的差异不显著。20 ~ 30 cm 土层，随施肥深度加深，土壤全氮含量呈上升趋势，表施、5 cm 深施处理与不施肥处理间的差异不显著，7.5、10 cm 和 12.5 cm 深施处理的全氮含量显著高于不施肥处理。30 ~ 40 cm 土层，各处理的全氮含量差异均不显著。在 0 ~ 20 cm 土层，肥料深施能显著提升土壤供氮能力，其中 7.5、10 cm 深施处理表现最佳，相比于表施处理，分别显著提高了 0.116、0.131 g/kg，但 5 cm 和 12.5 cm 深施处理间差异不显著(图 5B)。

如图 6 所示，在 0 ~ 12.5 cm 深度内施肥，各施肥处理 0 ~ 20 cm 土层的全磷含量均极显著高于不施肥处理，但各施肥处理间的差异不显著。在 20 ~ 30 cm 及 30 ~ 40 cm 土层中，各处理全磷含量间的差异均不显著。



(A: 土壤全氮含量; B: 与表施处理相比 0~20 cm 土层全氮的增量)

图 5 不同施肥深度对潮砂土不同土层全氮含量的影响

Fig. 5 Total nitrogen contents in different soil layers of aquatic sandy soil under different fertilization depths

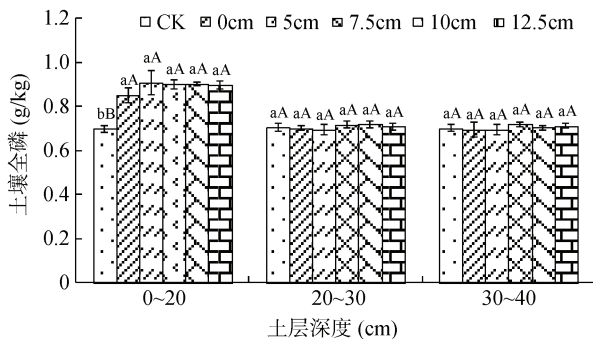


图 6 不同施肥深度对不同土层全磷含量的影响

Fig. 6 Total phosphorus contents in different soil layers under different fertilization depths

3 讨论

3.1 肥料深施对氨挥发和田面水氮磷浓度的影响

在我国南方水稻种植区,氨挥发是氮素损失的主要形式之一。其氨挥发氮损失量可达施氮量的 9%~60%,氨挥发主要发生在施肥后的 7~9 d 内。影响氨挥发的因素有施肥量、肥料类型、气温、pH、土壤类型、施肥方式等,其中田面水氨态氮浓度和田面水的 pH^[18-19]为影响氨挥发的直接因素。在施肥后,尿素迅速水解产生大量的氨氮,田面水 NH₄⁺-N 浓度迅速升高,大量的氮素以 NH₃ 的形式挥发损失。已有研究表明,尿素深施能有效降低田面水 NH₄⁺-N,减少田间 NH₃ 挥发损失^[20]。本研究结果表明,肥料深施能有效减少氨挥发损失,并在不同施肥深度处理间,氨挥发累积损失量随施肥深度加深而减少,当施肥深度达 10 cm 时氨挥发基本与不施肥处理相当。这一结果与徐万里等^[21]的结果基本一致。

在施肥后,田面水总氮含量与 NH₄⁺-N 含量呈显著正相关^[18],且在淹水的条件下田面水总氮以 NH₄⁺-N 为主,约占 80%~90%。本研究中,田面水中的总氮浓度随着施肥深度的增加而下降,且施肥深度和田面水总氮浓度呈显著多项式相关(图 2C)。表施处理

施肥后的田面水总氮浓度迅速达到峰值,一周左右后下降并趋于平稳^[22],深施处理的总氮浓度峰值后移,且峰值小于表施处理(图 2A)。究其本质可能是:氮素施入土壤后,深施处理的氮素在向田面水迁移的过程中, NH₄⁺-N 易被土壤胶体吸附固定,肥料施用越深,氮素向上迁移时经过的土体距离越长,到达土壤表面受到土壤的阻力越大,使得施肥深度越深田面水总氮浓度峰值下降且后移。不同施肥深度处理的田面水总氮平均浓度大小表现为 5 cm>0 cm>7.5 cm>10 cm>12.5 cm。一方面,可能是表施处理的氨挥发显著高于其他各处理,由于较大的氮素损失,导致施肥后期田面水总氮浓度降低;另一方面,不同施肥深度中,5 cm 深施处理的氮素迁移路径和阻力最小,从而导致其田面水总氮平均浓度较高。

农田中的磷素损失途径主要是径流。在农民习惯施肥方式下,田面水总磷浓度在施肥后的 1 d 达到峰值,之后快速下降,一周后趋于稳定^[23]。本研究中的表施处理田面水总磷浓度变化趋势与前人一致。减少施肥后田面水中总磷浓度是减少磷素流失的基本措施。本研究中,不同施肥深度处理的田面水总磷平均浓度分别比表施处理降低 92.43%~99.56%,说明肥料深施能基本消除田面水中磷素损失。而田面水总磷浓度的变化原因可能是,土壤对磷酸根离子具有较强的固定作用,肥料深施后,磷素在达到土壤表面前就已经被土壤固定,部分颗粒态磷深施后要迁移到土表更是受到自身体积、重力和土壤本身的阻力等综合效应而难以移动。本研究结果表明,肥料深施能有效降低田面水的总氮、总磷浓度,减少氮磷流失风险。

3.2 肥料深施对渗漏水氮磷浓度的影响

田间渗漏水中的氮磷浓度受土壤质地、气候条件、作物、耕作方式等影响^[24-25]。孟祥海^[26]研究表明,氮素的渗漏损失会随着施氮量增加而增加,且在表施、深施和混施的不同施肥方式中,深施处理减少了

氮的氨挥发损失,但可能会增加渗漏水中总氮的含量,这一方面说明了深施有减少田间氨挥发损失的优点,另一方面也说明探究合理的施肥深度,在减少氮素的挥发和渗漏损失之间取得一个平衡也有重要意义。在本研究中,不同施肥深度处理的渗漏水实时浓度变化趋势一致,总氮平均浓度随着施肥深度增加有上升趋势,但施肥处理间差异不明显。而渗漏水中总磷平均浓度各施肥处理间没有显著性差异,可能原因是土壤本身对磷素的固定,而土壤对于磷素的固定效果和土壤本身的磷含量有关。顾佳和葛云^[27]研究表明,当土壤中的 Olsen-P 含量小于 25.17 mg/kg 时,20~40 cm 土层渗漏水中总磷浓度基本不随土壤 Olsen-P 含量的变化而变化,其可能原因是试验土壤本身的 Olsen-P 含量没有超过临界值。陈亚宇^[28]研究表明,渗漏水中总氮浓度随着施肥深度的增加有上升趋势,而总磷浓度变化趋势不明显。这可能与肥料深施使得肥料随渗漏水下行,而土壤对磷素的固定强于氮素有关。

3.3 肥料深施对土壤氮磷养分分布的影响

施肥后肥料中的氮磷在土壤中的迁移分布受土壤类型、pH、灌溉方式、施肥方式等多方面影响^[29]。本研究中,不同深度施肥能有效提高 0~20 cm 耕层土壤的全氮含量,且在 5~10 cm 施肥深度中,土壤全氮随着施肥深度增加而提高,当施肥深度大于 10 cm 时,0~20 cm 土壤全氮含量下降。这可能是由于施肥后氮素随水向下迁移而导致,当采用肥料深施后,肥料中氮素的迁移还包括向施肥点周围土壤的迁移,但施肥深度越深,向表土层迁移的阻力越大,而使得肥料养分能最大限度地被土壤吸附,从而提高土壤的供氮能力减少肥料的损失。该结果与陈亚宇^[28]研究结果趋势类似,其研究表明 9 cm 深度施肥处理土壤耕作层(0~20 cm)的供氮、供磷水平分别比不施肥、0~6 cm 深度施肥处理提高 3~20、0.5~0.9 mg/kg。本研究中,在 0~20 cm 土层,5、7.5、10、12.5 cm 深度施肥处理的土壤全氮、全磷含量分别比表施处理提高 4.63%、12.25%、11.85%、5.69% 和 6.4%、5.9%、6.09%、5.43%;在 20~30 cm 和 30~40 cm 土层,各处理间的氮磷含量差异不显著。其原因可能有两点:首先,肥料深施减少了肥料的氨挥发损失和渗漏损失,提高了土壤全氮、全磷含量;其次,本研究中没有种植植物,没有植物对土壤养分的吸收。

4 结论

肥料深施能够显著降低氮磷损失,施肥深度在

5~12.5 cm 间,施肥深度越深,损失越少;在 5~12.5 cm 的深度区间施肥,氮磷的渗漏损失差异不显著。肥料深施能显著提高 0~20 cm 土层的氮含量,但氮素有随施肥深度增加而下移的趋势;不同施肥深度对土壤磷含量的影响不显著。综合考虑氮磷损失、土壤培肥及作业难易问题,10 cm 为潮砂泥水稻土的最佳施肥深度。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 关于 2019 年粮食产量的公告[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181214_1639544.html.
- [2] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J]. 土壤, 1985, 17(1): 2-9.
- [3] FAO. Food and agriculture organization of the United Nations[DB/OL]. Statistical databases, 2004.<http://faostat.fao.org>.
- [4] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [5] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区水稻季氮肥的作物回收和损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 55-61.
- [6] 朱兆良, 孙波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护, 2008, 36(8): 4-6.
- [7] 饶静, 许翔宇, 纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究[J]. 农业经济问题, 2011, 32(8): 81-87.
- [8] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 240-244.
- [9] Zhang Y S, Luan S J, Chen L L, et al. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 480-493.
- [10] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [11] 连纲, 王德建, 林静慧, 等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1879-1883.
- [12] 杨蓓蓓, 刘敏, 张丽佳, 等. 稻麦轮作农田系统中磷素流失研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2009(6): 56-63.
- [13] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3292-3302.
- [14] 钟雪梅, 黄铁平, 彭建伟, 等. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(5): 436-446.
- [15] 刘海东, 唐湘如, 赵烈, 等. 不同施肥深度对直播水稻氮素积累与转移的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(5): 216-221.
- [16] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 1-7.
- [17] 吴敬民, 姚月明, 陈永芳. 水稻基肥机械深施及肥料运筹方式效果研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(3): 110.

- [18] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥科学报, 2019, 25(12): 2102–2112.
- [19] Chen A Q, Lei B K, Hu W L, et al. Characteristics of ammonia volatilization on rice grown under different nitrogen application rates and its quantitative predictions in Erhai Lake Watershed, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 139–152.
- [20] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 254–266.
- [21] 徐万里, 刘骅, 张云舒, 等. 施肥深度、灌水条件和氨挥发监测方法对氮肥氨挥发特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(1): 86–93.
- [22] 柳云龙, 卢小遮, 龚峰景, 等. 稻田施肥后面水氮素动态变化特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 268–271.
- [23] 龚娟. 施磷对稻麦轮作农田磷流失影响及其磷投入阈值研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [24] Xie Y, Tang L, Yang L, et al. Polymer-coated urea effects on maize yield and nitrogen losses for hilly land of Southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 116(3): 299–312.
- [25] 王笑影, 吕国红, 贾庆宇, 等. 稻田水分渗漏研究 I. 渗漏现状及成因分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5763–5766.
- [26] 孟祥海. 施氮水平及施氮方式对稻田土壤渗漏水三氮浓度影响[J]. 黑龙江农业科学, 2014(10): 26–29.
- [27] 顾佳, 葛云. 直播稻田渗漏水磷素动态变化及渗漏流失潜力研究[J]. 四川环境, 2010, 29(6): 28–32.
- [28] 陈亚宇. 不同施肥深度对水稻氮磷钾动态变化及生长和产量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [29] 郝树荣, 王子欣, 潘永春, 等. 稻田总磷迁移规律与最佳灌排模式研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 306–314.