DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2018.05.003

有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响①

魏 静[1,2]，郭树芳[1]，翟丽梅[1*]，刘宏斌[1]，孙本华[2]，华玲玲[1]，王洪媛[1]，杨 波[1]

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，农业部面源污染控制重点实验室，北京 100081；
2 西北农林科技大学资源环境学院，陕西杨凌 712100)

摘 要：农田土壤–作物系统对畜禽粪便有一定的消纳作用，有机粪肥与无机氮肥配施是未来农业生产中进一步增加产量、减少化肥施用和保护环境的重要生产模式。本研究采用盆栽试验，分析在施用一定量有机粪肥基础上，不同无机氮肥用量对水稻产量、氮素利用率和氮流失风险的影响，探讨有机肥与无机氮肥的最优比例，为有机肥施用条件下稻田无机氮肥的合理施用提供科学依据。结果表明：与单施有机肥（M）相比，配施 0.8 倍的无机氮肥效果最佳，水稻产量、株高、分蘖数、籽粒吸氮量和氮肥利用率达最高。有机肥作底肥时，水稻生长前期田面水无机氮浓度随配施无机氮肥量的增加而增加，而后期配施无机氮肥各处理田面水氮素浓度则随着氮肥施用量的增加呈现先降低后升高趋势，其中，增施 0.4 倍、0.6 倍和 0.8 倍无机氮肥时稻田田面水氮素浓度较单施有机肥处理分别降低 17.5%、11.9% 和 9.3%，差异达显著水平（$P<0.05$）。与单施无机氮肥处理（N）相比，同样以 0.8 倍无机氮肥+有机肥处理作物产量和氮肥利用率最高，田面水氮浓度降低了 30.2%，差异达显著水平（$P<0.05$）。综上，消纳有机肥基础上，在满足作物需氮量的前提下，无机氮肥与其配比为 1∶1 时，既可以提高水稻增产潜力，又降低稻田氮素流失风险和适当减少稻田无机氮肥施用量。

关键词：产量；氮肥利用率；有机无机肥；田面水

中图分类号：S511 文献标识码：A

近年来，随着我国规模化养殖业的迅猛发展，畜禽数量猛增，产生了大量畜禽粪便[1]。据统计，2010 年全国畜禽粪便有机肥排放总量为 22.35 亿 t[2]，有研究预测，2020 年我国畜禽粪便排放量将会比 2007 年增加 37%[3]。水稻是我国种植面积最大的粮食作物，在保障国家的粮食安全方面发挥着重要作用[4-5]，研究水稻的合理施肥仍然是农业生产和环境保护中的重要问题。因此，依靠稻田消纳畜禽粪便有机肥对于实现畜禽粪便资源化利用，促进农牧良性循环、维持生态平衡和降低农业环境压力具有重要意义[6]。

目前，我国畜禽粪便有机肥利用率不足 50%[7]，而我国传统农业十分重视畜禽有机肥的使用，施用有机肥不但能够有效地改善土壤地力、提高作物产量[8-9]，适量施用还可以增加土壤固碳，减少温室气体 CO_2 的排放[10]，对改善农产品品质、减轻环境污染、减少化肥投入和节本增效方面具有重要作用。相关研究表明，有机无机肥配施有利于作物增产、稳产性能增强、氮素利用率显著增加，对于减少氮素损失带来的环境负荷、改善土壤环境具有重要意义[11-15]。李冬初等[14]研究发现，在红壤稻田上有机无机肥配合施用水稻产量较单施有机肥处理增加 5.2%，比单施化肥处理增加 16.4%，且水稻田面水全氮含量比单施化肥的处理下降了 32.0 mg/L。张发明等[15]通过化肥与不同用量牛粪配施对水稻产量的影响研究表明，不同量有机肥与无机肥配施，显著提高了水稻产量、植株吸氮量和水稻氮素利用率。目前关于有机无机肥配施的研究大多集中在基于一定量无机氮肥条件下寻求有机肥最佳配施量，但对有机粪肥一定消纳量条件下，适宜无机氮肥配施量的研究还较少见。因此，本研究综合考虑粪肥适宜消纳量(欧盟农业政策规定，粪肥年施氮量的限量标准定为 170 kg/hm^2[16])的前提下，通过分析配施不同量无机氮肥对水稻产量、氮素利用率及氮流失风险的影响，确定在施用有机肥条件下，稻田无机氮肥的最佳施用量和比例，以达到有效

①基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFD0800500)资助。

* 通讯作者(zhailimei@caas.cn)

作者简介：魏静(1992—)，女，内蒙古阿左旗人，硕士研究生，主要从事农田面源污染防控方面研究。E-mail: weijing0330@163.com

利用有机肥、增加作物产量和减少氮流失风险的目的，为水稻优质高产、生态环境友好和集约化生产条件下制定最佳施肥策略提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试土壤采自北京市昌平区国家褐潮土土壤肥力与肥料效益监测站，土壤为潮褐土，采样深度 0 ~ 20 cm。土壤 pH 为 8.4，有机质含量 13.2 g/kg，全氮 0.7 g/kg，碱解氮 55.2 mg/kg，全磷 0.6 g/kg，有效磷 5.6 mg/kg，全钾 17.7 g/kg，速效钾 78.1 mg/kg。土样收集风干后，过 2 mm 土筛用于盆栽试验；另取部分土样进一步过筛，用于土壤全氮、有机质、全磷和全钾等的测定。

1.2　试验设计

试验采用随机区组设计，共设 8 个处理，分别为：①CK；②N；③M；④0.4N+M；⑤0.6N+M；⑥0.8N+M；⑦N+M；⑧1.2N+M。其中 N 和 M 分别为氮肥和有机肥，N 为单施无机氮肥 2.60 g/盆(约 N 190 kg/hm^2)；M 是指牛粪用量为 65.4 g/盆；折合纯氮 0.955 g/盆。0.4N、0.6N、0.8N、N 和 1.2N 分别指单施无机氮肥的 0.4 倍、0.6 倍、0.8 倍、1.0 倍和 1.2 倍。采用塑料盆钵，每盆装土 7 kg，所有处理均施等量的磷钾肥，具体施肥情况如表 1。牛粪和磷钾肥作基肥一次性施入，尿素分底肥和两次追肥施入土壤，底肥和两次追肥比例为 0.5∶0.25∶0.25，底肥施于种植前(6 月 13 日)、2 次追肥分别施于分蘖前期(7 月 18 日)和孕穗前期(8 月 11 日)。底肥在装盆时与土混匀后一起装盆。氮肥为尿素(含 N 46%)，磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)，钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%)；有机肥为牛粪，鲜基含 N 1.46%，K_2O 0.86% 和 P_2O_5 0.80%，每个处理 3 个重复。供试水稻品种为中作 59，每年 4 月下旬水稻育秧，6 月 14 日定植，每盆移栽 4 株，移栽后，保持水层深度 5 ~ 10 cm，9 月 20 日收获计实产。

表 1　水稻生长季不同处理间肥料施用量**(g/盆)**

Table 1　Fertilizer application rates under different treatments during rice growing season(g/pot)

处理	有机肥	尿素	过磷酸钙	氯化钾
CK	0	0	1.33	0.56
N	0	2.60	1.33	0.56
M	65.4	0	1.33	0.56
0.4N+M	65.4	1.04	1.33	0.56
0.6N+M	65.4	1.56	1.33	0.56
0.8N+M	65.4	2.08	1.33	0.56
N+M	65.4	2.60	1.33	0.56
1.2N+M	65.4	3.12	1.33	0.56

1.3　样品采集与分析

盆栽试验前采集土样，用于土壤基本理化性状的测定。土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾、土壤全氮、全磷、全钾和土壤 pH 的测定参考《土壤农业化学分析方法》[17]和《土壤农化分析与环境监测》[18]。水稻成熟期，分别测定水稻籽粒产量和秸秆产量，同时，测定籽粒和秸秆中的氮含量。采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，靛酚蓝比色法测定植株全氮[17]。

稻田田面水于追肥施用后第 1、5、9、17 天在水面无扰动的条件下用 100 ml 注射器在田面水中随机抽取 3 处，制成混合水样，带回实验室，经定量滤纸过滤后用流动分析仪测定水样的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量。

1.4　计算方法

氮肥贡献率(NCR，%)=(施氮区产量－不施氮区产量)/施氮区产量×100%；土壤氮素依存率(SNDR，%)=不施氮区地上部吸氮量/施氮区地上部吸氮量×100%；氮素收获指数(NHI，%)=成熟期植株籽粒氮积累总量/植株氮素积累总量×100%；氮肥农学效率(NAE，kg/kg)=(施氮区产量－不施氮区产量)/施氮量；氮肥吸收利用率(NRE，%)=(施氮区地上部分吸氮量－不施氮区地上部吸氮量)/施氮量×100%；氮肥偏生产力(PFPN，kg/kg)=施氮区产量/施氮量。

1.5　数据处理与分析

采用 Excel 2010 处理数据，Origin 8.5 制图，运用 SPSS 19.0 统计软件进行方差和相关性分析，不同施肥处理间采用 LSD 法进行差异显著性检验。

2　结果与分析

2.1　水稻产量性状指标与氮素吸收量

在有机肥作底肥的条件下，施用无机氮肥显著

(P<0.05)提高了秸秆和籽粒产量(表 2)，且随无机氮肥施用量的增加，水稻籽粒产量、株高和分蘖数呈先升高后降低的趋势；当增施无机氮肥用量的 0.8 倍(0.8N+M 处理)时，籽粒产量和株高最高，分蘖数较多，分别为 52.2 g/盆、97.2 cm 和 32 个，较单施有机肥处理分别提高 283.8%、26.7% 和 166.7%；较单施无机氮肥处理分别提高 45.8%、5.5% 和 23.1%，差异达显著水平(P<0.05)；水稻秸秆产量则随无机氮肥施用量的增加而增加，当超过 0.8 倍无机氮肥施用量时，水稻秸秆产量虽增加但各处理间差异不显著(P<0.05)。随着无机肥配施量增加，0.8N+M 处理籽粒吸氮量提高幅度最大，较单施无机氮肥处理提高 85.0%，秸秆吸氮量随无机氮肥施用量的增加持续增加。有机肥作为底肥配施不同量无机氮肥的水稻氮素收获指数均显著(P<0.05)低于单施有机肥处理(M)。

表 2 氮肥施用量对水稻产量性状指标和氮素吸收量的影响

Table 2 Effects of nitrogen application rates on rice yield character indexes and nitrogen uptake

处理	秸秆产量(g/盆)	籽粒产量(g/盆)	株高(cm)	分蘖数	秸秆吸氮量(g/盆)	籽粒吸氮量(g/盆)	氮素收获指数 NHI(%)
CK	12.7 e	12.1 e	80.4 d	14 de	0.08 f	0.07 f	46.7 c
N	38.2 c	35.8 d	92.1 bc	26 c	0.28 c	0.40 d	59.2 ab
M	10.6 e	13.6 e	76.7 d	12 e	0.06 f	0.11 f	64.9 a
0.4N+M	25.9 d	36.2 d	87.6 c	17 d	0.15 e	0.28 e	63.1 a
0.6N+M	31.9 cd	39.4 c	89.8 bc	27 c	0.22 d	0.37 d	62.4 a
0.8N+M	46.7 b	52.2 a	97.2 a	32 ab	0.40 b	0.74 a	64.6 a
N+M	48.4 ab	47.7 b	94.1 ab	29 b	0.42 ab	0.62 b	59.9 ab
1.2N+M	54.2 a	45.6 b	92.0 bc	34 a	0.46 a	0.55 c	54.3 bc

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 P<0.05 显著水平，下表同。

2.2 水稻氮素利用率

有机肥作为底肥施入农田后，随着无机氮肥施用量的增加，各处理的水稻氮肥农学效率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力和氮肥贡献率均呈先升高后降低的趋势(表 3)。当有机肥配施 0.8 倍无机氮肥时，氮素农学效率、氮肥吸收利用率和氮肥贡献率达到最大，分别为 21.0 kg/kg、51.8% 和 76.9%，继续增施无机氮肥，水稻氮素农学效率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力则呈显著下降趋势(P<0.05)；表明施氮量达到一定水平，继续增施氮肥，提高氮素在水稻秸秆中的比例，不利于作物对氮的吸收利用和作物产量的提高；而与单施无机氮肥相比，0.8N+M 处理氮肥农学效率和氮肥吸收利用率分别提高了 6.0% 和 16.9%。有机肥作底肥，随着无机氮施用量的增加，各处理的土壤氮素依存率逐渐降低，范围为 13.2%～88.8%；最高产量施氮量时(0.8N+M)土壤氮素依存率最低，为 13.2%，说明有机肥作底肥基础上，增施 0.8 倍的无机氮肥时，水稻对土壤氮的依赖性减弱，而对外源投入氮的依赖性增强，施肥保证了水稻的高产；与单施无机氮肥相比，0.8N+M 处理的土壤氮素依存率降低了 40.3%。

表 3 氮肥施用量对水稻氮素利用率的影响

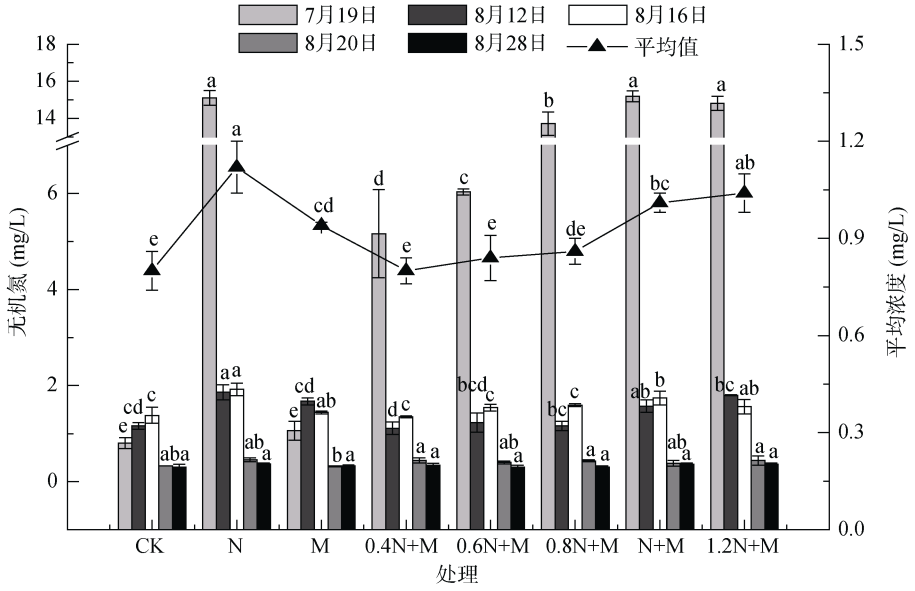
Table 3 Effects of nitrogen application rates on nitrogen utilization efficiencies of rice

处理	氮肥农学效率 NAE(kg/kg)	氮肥吸收利用率 NRE(%)	氮肥偏生产力 PFPN(kg/kg)	氮肥贡献率 NCR(%)	土壤氮素依存率 SNDR(%)
N	19.8 a	44.3 b	29.9 a	66.3 d	22.1 bc
M	1.6 d	2.0 f	14.2 f	11.3 e	88.8 a
0.4N+M	16.9 b	19.7 e	25.3 c	66.7 cd	36.2 b
0.6N+M	16.3 b	26.5 d	23.5 cd	69.4 c	25.4 c
0.8N+M	21.0 a	51.8 a	27.3 b	76.9 a	13.2 d
N+M	16.6 b	41.4 bc	22.2 d	74.7 ab	14.4 d
1.2N+M	14.0 c	36.0 c	19.1 e	73.5 b	14.9 d

2.3 水稻田面水无机氮浓度动态变化

田面水无机氮主要由 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 组成，主要以 NH_4^+-N 为主，浓度比值 NH_4^+-N/ NO_3^--N 为 5.05～14.2。第一次追肥后，有机肥作为底肥施入农田，随着无机氮

肥施用量的增加，田面水无机氮浓度呈显著增高趋势(图1)。第二次追肥时期，施肥后 5 d 内田面水无机氮浓度较高，各施肥处理田面水中无机氮浓度分布在 1.11 ~ 1.92 mg/L 之间，施肥 9 d 以后无机氮浓度降低 68.1% ~ 79.3%，分布在 0.30 ~ 0.45 mg/L 之间。有机肥作为底肥施入农田后，配施 0.4 倍、0.6 倍和 0.8 倍无机氮肥各处理均能够降低田面水无机氮浓度，较单施有机肥分别降低 17.5%、11.9% 和 9.3%，其中，增施 0.4 倍无机氮肥量时田面水氮素浓度降低幅度最大。另外，施用有机肥作底肥时，施氮处理(N+M)田面水中氮含量显著(P<0.05)低于单施无机氮肥处理(N)。由于 0.4N+M 和 0.6N+M 处理水稻产量低于单施无机氮肥处理，因此，综合考虑高产和氮流失风险，0.8N+M 处理既能保证产量又显著(P<0.05)降低了氮流失风险。



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 P<0.05 显著水平，平均值为第二次追肥的均值)

图 1　氮肥施用量对水稻田面水无机氮浓度的影响

Fig. 1　Effects of nitrogen application rates on inorganic nitrogen concentrations in paddy field water

3　讨论

3.1　有机无机肥配施对水稻产量的影响

有机肥中含有丰富的有机质和各种营养元素，但其矿化速度慢，释放的养分少，增产效果不明显。有机肥与无机肥配合施用时，水稻生长前期无机氮肥释放养分供作物吸收，水稻生长中后期，随微生物的死亡，其固持的氮素释放增多，有利于水稻产量的提高[19-20]。

本研究表明，有机肥配施无机氮肥处理较单施有机肥处理均显著提高水稻株高、分蘖数、秸秆和籽粒产量，这可能是由于单施有机肥氮素释放延后使水稻前期缺氮，造成微生物与作物争夺养分[21]，而配施无机氮肥后，不仅满足了微生物活动所需养分，也保障了水稻整个生育期的正常生长，从而增加作物产量。研究还表明，当有机肥与 0.8 倍无机氮肥(有机氮∶无机氮=1∶1)配施的稻谷产量最高，继续增加无机氮肥，水稻籽粒产量降低，稻草产量增加，氮素收获指数下降，且差异达显著水平(P<0.05)，说明氮肥施入量不宜过大，当施肥量超过一定数值后，水稻产量就不再增加甚至可能减产[22-23]。主要是由于氮素会较多地向秸秆转移并积累，导致秸秆含氮量过高，造成水稻贪青晚熟[24]，不利于水稻增产。因此，有机氮∶无机氮=1∶1 条件下可能是保证水稻产量最佳的比例。但是由于不同区域土壤条件和作物品种存在差异，其他研究也得出了不同的比例关系，例如，侯红乾等[25]研究表明红壤稻田系统的增产和稳产性能均以高量有机肥配施无机肥(比例为 7∶3)最佳，较等养分条件下化肥处理高 3.9% ~ 7.8%。因此，根据区域差异，在推荐有机肥施用量条件下，配施一定量的无机氮肥可获得更大程度的增产，同时更好地消纳了有机粪肥，且减少了无机氮肥的施用量。

3.2　有机无机肥配施对水稻氮肥利用率的影响

有机肥配施无机氮肥能较好地保证作物所需养分的均衡供应，促进干物质积累，并通过促进土壤微生物对氮肥的有效调控，改善土壤理化性质，使肥效稳长，在供肥强度和容量上更适于作物生长，从而提高作物的氮肥利用率[15,26]。Nishikawa 等[27]研究表明在适当的施肥条件下，畜禽粪便是一种宝贵的有机资源，

并且连续使用可以代替部分化学肥料，从而提高水稻的氮肥利用率。Dobermann[28]认为粮食作物氮肥偏生产力为 40 ~ 70 kg/kg，氮肥农学效率为 10 ~ 30 kg/kg，氮肥吸收利用率为 30% ~ 50% 范围内比较适宜，该研究氮肥利用率水平与此相当。本研究中，有机肥配施无机氮肥处理的氮肥农学效率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力较单施有机肥处理均显著提高。当有机无机肥各半配合施用时(0.8N+M 处理)，水稻产量、氮肥农学效率和氮肥吸收利用率达到最高，且在此施氮水平上增加或减少无机氮肥投入量都不利于作物产量和氮肥利用率的提高。究其原因，一是有机肥配施无机氮肥较单施有机肥提高了水稻产量和氮素积累量，其中在一定施氮范围内籽粒吸氮量增加幅度高于秸秆吸氮量，表明有机肥配施无机氮肥可以促进水稻对氮的吸收，并促使氮素由茎秆向籽粒迁移[29]，从而提高了氮肥利用率；当超过最佳施氮量后，导致水稻产量和氮素累积量降低，氮素利用率显著下降，说明过量的氮肥不利于作物产量的提高；二是有机肥中养分全面，促进了作物根系生长，且配施无机氮肥减少了氮素的损失，从而促进作物吸收养分[30-31]。此外，在一定施氮范围内，有机无机肥配合程度的增加显著提高了氮肥贡献率，降低了土壤氮素依存率，说明优化施肥措施能够降低水稻对土壤氮的依赖，提高氮肥的利用效率。

3.3 有机无机肥配施对水稻田面水无机氮浓度的影响

有机肥由于本身成分的复杂性及受微生物作用，其氮素释放通常呈现一个长期的波动过程。目前关于氮肥施用对于水稻田面水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的动态变化的研究较多，研究表明[32-34]，不同时期施肥后一周内对田面水中氮的动态变化影响较大，有机肥部分替代无机化肥降低了基肥期无机氮肥施用量，从而降低了田面水的无机氮浓度。本研究第一次追肥后第一天的田面水氮素浓度的结果也表明，不施肥和单施有机肥背景下，第一次追肥时期田面水的无机氮浓度显著(P<0.05)低于施用化肥氮处理，且有机肥作底肥时，随无机氮肥施用量的增加，田面水无机氮浓度逐渐升高，表明这个时期田面水氮素浓度还是主要受化肥氮的影响。朱利群等[35]通过盆栽试验对稻田田面水氮素浓度在不同农业措施条件下动态变化的试验结果表明，在较短时间内有机肥对田面水总氮含量影响不大，田面水总氮含量保持在较低水平，与有机肥氮肥释放缓慢有关。而第二次追肥时期分析田面水氮素浓度变化，该时期单施有机肥条件下田面水浓度变化较大，且有机肥作底肥条件下，施用 0.4 倍、0.6 倍、0.8 倍和 1 倍的无机氮肥处理较单施有机肥和单施无机氮肥处理均能显著降低田面水氮素浓度。其原因可能是有机肥作底肥条件下，配施化肥能显著降低农田生态系统总氮的迁移，降低初始碳氮比，并为异养微生物提供充足的无机氮源，促进有机肥氮素矿化，增加氮素矿化量[36-38]。而试验后期由于水稻对土壤和水体中氮肥的吸收作用，从而加快了田面水总氮含量的降低，且有机肥的施入改善了土壤结构、提高了土壤团聚体对养分的吸持能力[39]，提高了土壤的 C/N，降低氮素在土体中的释放转化速率，提高了土壤的保肥性[40]，进而减少氮素向田面水的迁移。

4 结论

在一定量有机肥作为底肥的基础上，配施不同量无机氮肥可不同程度上提高水稻氮素利用率和氮肥贡献率、增加水稻籽粒秸秆吸氮量，从而提高水稻产量；有机肥作底肥时，释放养分缓慢，因此水稻生长前期田面水无机氮浓度主要随追施化肥氮量的增加而升高，而后期追施无机氮肥并未增加田面水氮流失风险，因此，从降低氮的环境风险角度可以考虑水稻季消纳一定量有机肥的同时增施无机氮肥。综合考虑水稻产量、氮肥利用效率和氮素流失风险等因素，在推荐畜禽粪便有机肥还田条件下，需要配施与有机氮等量的无机氮肥(有机氮与无机氮比为 1∶1)。

参考文献：

[1] 李萌, 王昌全, 李冰, 等. 猪粪替代氮肥对稻麦轮作条件下土壤有机氮组分的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3): 449–454

[2] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171–179

[3] Fischer G, Ermolieva T, Ermoliev Y, et al. Livestock production planning under environmental risks and uncertainties[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2006, 15(4): 399–418

[4] 冀建华, 侯红乾, 刘益仁, 等. 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 607–618

[5] 程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3473–3485

[6] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国, 等. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2837–2845

[7] 卢洪秀, 孙昭军. 畜禽粪便处理的可持续发展研究[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(5): 40–43

[8] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133–3139
[9] 徐阳春, 沈其荣. 有机肥和化肥长期施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 87–92
[10] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon[J]. Advances in Agronomy, 2001, 71: 145–191
[11] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 121–128
[12] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in Southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88: 341–349
[13] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1/2): 275–290
[14] 李冬初, 李菊梅, 徐明岗, 等. 有机无机肥配施对红壤稻田氮素形态及水稻产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2004, 31(3): 23–25
[15] 张发明, 毛昆明, 刘宏斌, 等. 不同量有机肥与化肥配施对水稻氮素吸收利用的影响[J]. 云南农业大学学报, 2011, 26(5): 694–699
[16] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614–617
[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
[18] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008
[19] 刘益仁, 李想, 郁洁, 等. 有机无机肥配施提高麦–稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 81–86
[20] 付月君, 王昌全, 李冰, 等. 控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 648–652
[21] 鲁耀雄, 崔新卫, 范海珊, 等. 有机无机肥配施对湖南省晚稻生长、产量及土壤生物学特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(5): 50–55
[22] 李勇, 曹红涕, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. 土壤, 2010, 42(43): 569–573
[23] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究[J]. 土壤, 2009, 41(3): 372–376
[24] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51–56
[25] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516–523
[26] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282–288
[27] Nishikawa T, Li K Z, Inoue H, et al. Effects of the long-term application of anaerobically-digested cattle manure on growth, yield and nitrogen uptake of paddy rice, and soil fertility in warmer region of Japan[J]. Plant Production Science, 2012, 15(4): 284–292
[28] Dobermann A. Nitrogen use efficiency-state of the art[C]. IFA international workshop on enhanced-efficiency fertilizers, Germany, 2005
[29] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2221–2232
[30] 李絮花, 杨守祥, 于振文, 等. 有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 467–472
[31] 张广凯, 宋祥云, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对小麦–玉米氮素利用及产量品质的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(4): 157–161
[32] 张志剑, 董亮, 朱荫湄. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报, 2001(4): 475–480
[33] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 357–361
[34] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39–44
[35] 朱利群, 田一丹, 李慧, 等. 不同农艺措施条件下稻田田面水总氮动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 85–89
[36] 张璐, 石林, 蔡泽江, 等. 有机肥与化肥不同比例配施下水稻土铵态氮释放特征[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 15–22
[37] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D, et al. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31(4): 543–550
[38] Sikora L J, Enkiri N K. Efficiency of compost-fertilizer blends compared with fertilizer alone[J]. Soil Science, 2000, 165(5): 444–451
[39] 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
[40] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 947–954

Effects of Combined Application of Organic Manure and Different Levels of Chemical Fertilizers on Nitrogen Use Efficiency and Nitrogen Loss Risk in Rice Growing System

WEI Jing[1,2], GUO Shufang[1], ZHAI Limei[1*], LIU Hongbin[1], SUN Benhua[2], HUA Lingling[1], WANG Hongyuan[1], YANG Bo[1]

(1 *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control*, *Ministry of Agriculture*, *Beijing* 100081, *China*; 2 *College of Natural Resources and Environment*, *Northwest A &F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Soil-crop system plays an important role in the consumption of livestock manure, and the combination of organic manure and inorganic fertilizer is an important agricultural mode in increasing crop production, reducing the application of chemical fertilizer and protecting environment in the future. A pot experiment was conducted to study the effects of different dosages of inorganic nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen utilization and nitrogen loss risk in order to explore the optimal proportion of organic fertilizer and inorganic fertilizer and to provide scientific basis for the rational application of inorganic nitrogen when organic fertilizer used as base fertilizer in paddy fields. The results showed that when organic fertilizer used as base fertilizer in paddy fields, compared to the treatment of single organic fertilizer, crop yield, plant height, tillering number, nitrogen absorption by grains and nitrogen use efficiency all reached the highest when 0.8 times of inorganic nitrogen fertilizer was applied. With the increased application of inorganic nitrogen, nitrogen concentration in surface water of rice fields increased at the early stage of rice growth but decreased and then increased in the later stage of rice. Compared to the treatment of single organic fertilizer, nitrogen concentration in surface water significantly decreased by 17.5%, 11.9% and 9.3%, respectively under the treatments with 0.4, 0.6 and 0.8 times of conventional inorganic N application. Compared with the treatment with single nitrogen application, rice yield and nitrogen use efficiency were the highest under 0.8N+M treatment, and in which nitrogen concentration in surface water decreased by 29.9%. Therefore, based on the consumption of organic fertilizer and meet nitrogen demand of crops, 1:1 of organic nitrogen to inorganic nitrogen can not only increase rice yield, but also reduce nitrogen loss risk and the application rate of nitrogen fertilizer in paddy field.

Key words: Rice yield; Nitrogen use efficiency; Organic and inorganic fertilizer; Surface water