

稻田处理养殖场粪便的氮磷动态效应与污染风险研究

黄 卉¹, 王 波^{2,3}, 朱利群², 刘春晓¹, 曹 阳², 卞新民²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2.南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095; 3.北京市知春里中学, 北京 100086)

摘 要:对盆栽水稻施以不同水平的猪粪和牛粪两种有机肥料,结合其本身对氮磷的吸收利用状况及养分在土壤和水体环境下的分解释放规律,研究了水稻对有机粪肥的消纳吸收能力。结果表明,水稻可以有效地处理猪粪和牛粪;综合生态效益与经济效益,在处理猪粪时,P5 水平(猪粪处理量 $120\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,折合纯氮量 $1\,103.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下的处理效果最好,处理牛粪时,C6 水平(牛粪处理量 $300\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,折合纯氮量 $3\,224.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下的处理效果最好,施肥量低于此的植株生长缓慢,高于此则植株的增产效应不明显,并且容易出现受害症状,而有机肥对环境的二次污染风险会加大。

关键词:水稻;养殖场粪便;氮;磷;污染风险

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)04-0736-08

Nitrogen and Phosphorus Dynamics and Pollution Risk of Potted Rice Treated with Manure from Livestock Farm

HUANG Hui¹, WANG Bo^{2,3}, ZHU Li-qun², LIU Chun-xiao¹, CAO Yang², BIAN Xin-min²

(1.College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3.Beijing Zhi chunli Middle School, Beijing 100086, China)

Abstract: Combined with the nitrogen and phosphorus absorption by rice and their decomposing and releasing in water-soil environment, the rice capacity of treating and absorbing organic manure through applying different levels of pig manure and cattle manure to potted rice were studied. The results showed that the rice could deal with pig manure and cattle manure effectively. As ecological and economic benefits were considered comprehensively, P5 level (the amount of pig manure was $120\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which could be converted to $1\,103.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ pure nitrogen) was the best treatment for treating pig manure and C6 (the amount of cattle manure was $300\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which could be converted to $3\,224.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ pure nitrogen) was the best one for cattle manure. When the manure amount was lower than that, rice grew more slowly. When higher than that, yield-increasing effect was not significant and the plants were harmed easily while the risk of manure secondary pollution could increase.

Keywords: rice; manure from livestock farm; nitrogen; phosphorus; pollution risk

近年来,随着畜牧业特别是规模化养殖业的迅猛发展,由其带来的畜禽粪便的环境污染问题日益突出^[1]。虽然畜禽粪便废弃物是一个潜在的环境污染源,但其却可作为生物质资源加以利用^[7-9],如用作肥料、饲料和燃料等^[2]。在诸多利用方法中,将其制作成堆肥,然后将堆肥运输到农业种植区施用是最为有效和经济的方法之一,同时也符合农业可持续发展

需要^[3-5],但是,有关粪肥施用的量化问题及其可能给环境带来的二次污染风险的研究却鲜有报道。为此,本研究采用将规模化养殖场的畜禽粪便作为有机肥料还田的方法,根据不同牲畜粪便的养分释放规律,分析水稻植株对不同牲畜粪便的消纳和处理能力及其对环境的影响,从而确定一个相对合理的处理水平,使其在取得经济效益的同时还确保环境的健康发展,为规模化养殖场废弃物的农业再利用提供相关的理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

水稻品种:日本越光。有机肥来源:猪粪(腐熟),

收稿日期:2008-07-24

基金项目:国家“十五”重大科技专项(2003AA60110-3);江苏省环保厅项目“江苏省农产品环境安全评价与控制对策研究”(2004019)

作者简介:黄 卉(1984—),女,安徽和县人,在读硕士,主要从事农业生态、环境污染检测及防治等方面的研究。

E-mail: huanghui19840620@sohu.com

通讯作者:卞新民

来自南京市六合区竹镇镇一大型养殖户;牛粪(腐熟),来自南京山田奶牛厂。其中:猪粪全氮含量为 0.92%,全磷含量为 0.39%,含水量为 35.6%;牛粪全氮含量为 1.07%,全磷含量为 0.28%,含水量为 21.2%。盆栽所用土壤肥力:全氮 0.046%,全磷 0.032%。

1.2 试验设计

本盆栽试验于 2007 年 7 月在南京农业大学网室内进行,每盆面积相当于耕地 0.1 m²,装过筛土 15 kg,使用猪粪、牛粪两种有机肥,均作为基肥一次性施入,不施用化肥。每种有机肥分别设置 7 个施肥处理水平(表 1),另单独设置一个空白处理,不施用任何肥料,每个水平 3 次重复。每盆栽秧苗 3 穴,每穴 3 株。

表 1 试验设计方案(kg·hm⁻²)

Table 1 Experimental design scheme(kg·hm⁻²)

猪粪				牛粪			
编号	施肥水平	折纯氮量	折纯磷量	编号	施肥水平	折纯氮量	折纯磷量
P1	7 500	68.97	29.37	C1	9 375	100.7	25.9
P2	15 000	137.94	58.74	C2	18 750	201.53	51.8
P3	30 000	275.88	117.48	C3	37 500	403.06	103.6
P4	60 000	551.76	234.96	C4	75 000	806.13	207.21
P5	120 000	1 103.52	469.92	C5	150 000	1 612.25	414.41
P6	240 000	2 207.04	939.84	C6	300 000	3 224.5	828.83
P7	300 000	4 414.08	1 879.68	C7	375 000	6 449	1 657.66
CK	0	0	0		0	0	0

1.3 取样及分析

1.3.1 取样及测定项目

植株样:收割前,植株取样后称鲜重,然后把茎、叶、穗分开,杀青烘干。烘干后将样品放入干燥器内冷却至恒重,接着用磨样机研磨后过 40 目筛,混匀后装在自封袋中备用。测定全氮、全磷。

水样:在水稻生长期,粪便还田处理后 1、2、3、5、7、9、15、30、60 d 各取一次,共计 9 次。取样时,不扰动水层,随机小心地抽取盆内 5 处水层水样,注入塑料瓶。将样品编号、贴标签,采样后立即带回实验室测定全氮、全磷含量。

土样:盆栽基础土样在粪便施入前采得,水稻收获后再进行一轮取样,取全土层,均采用五点法混合取样获得。风干后将土壤在磨土板上用木棍碾碎,过 100 目筛,将磨好的土样装入自封袋中备用。测定全氮、全磷。

1.3.2 测定方法

土壤全氮、水样全氮及植株全氮的测定采用凯氏定氮法。土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮,钼锑抗比

色法;植株全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法^[6];水样全磷采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法^[6]。

1.3.3 统计分析

本文的数据统计利用 Excel 2003,相关性分析利用 SPSS10.0。

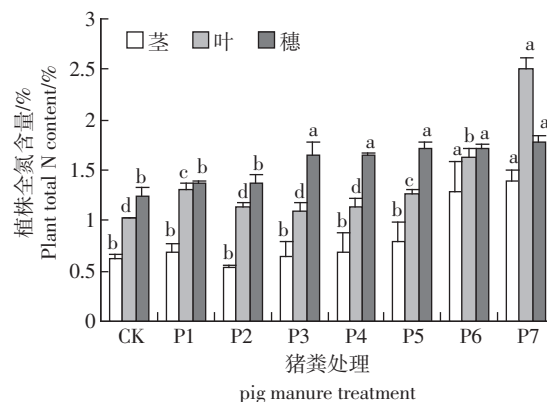
2 结果与分析

2.1 不同施肥水平下水稻植株对氮磷的吸收与转化

2.1.1 不同施肥水平下水稻植株对氮的吸收与转化

2.1.1.1 水稻植株氮含量

图 1 显示,猪粪处理下随着猪粪处理量的增加盆栽水稻植株氮含量呈现了增加的趋势,但增幅不明显,处理之间的差异不显著。由该图结果显示盆栽水稻植株氮含量与猪粪处理量间无明显相关性。



注:图中小写字母不同表示在 0.05 水平上差异显著,下同。

图 1 猪粪处理下盆栽水稻植株氮含量

Figure 1 The amount of plant total N content for potted rice under pig manure

图 2 显示,牛粪处理下盆栽水稻植株氮含量随着牛粪处理量的增加呈现先增加后降低的变化趋势,但

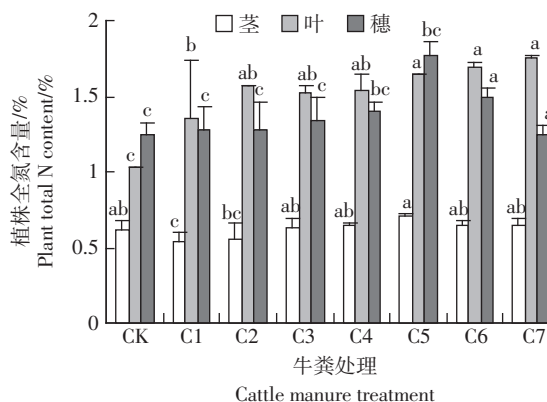


图 2 牛粪处理下盆栽水稻植株氮含量

Figure 2 The amount of plant total N content for potted rice under cattle manure

变化幅度较小,从图中植株含氮量差异性分析,牛粪处理量与植株氮含量间无明显相关性。

猪粪和牛粪不同处理下的水稻各个器官的含氮量只在一个较小的范围内波动,并没有与处理量产生明显的相关性,表明了水稻在正常的生长条件下,含氮量只与其本身的生长特性有关,受外界的环境的影响较小。

2.1.1.2 水稻植株氮吸收量

图 3 所示,猪粪处理下,水稻植株对氮素的吸收呈现出单峰曲线的增长规律(注:水稻植株氮(磷)吸收量=水稻植株干重×水稻植株氮(磷)含量),P5(猪粪处理量 $120\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下的水稻吸氮量达到最大值,P5 氮吸收量比 P4(猪粪处理量 $60\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)高 29%,比 P6(猪粪处理量 $240\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理下高 21%,而 P6 处理比 P7(猪粪处理量 $300\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)猪粪处理量处理高 57%,而且在 P7 处理下的水稻植株出现了明显的受害症状,说明了该处理量已经超过了水稻生理耐受性的极限,再进一步加大施肥量水稻的产量反而下降。

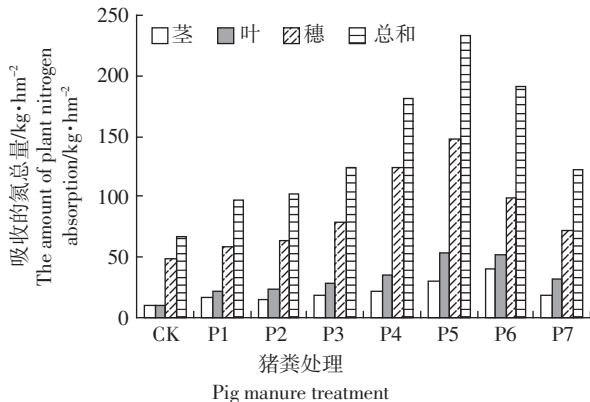


图 3 猪粪处理盆栽水稻植株吸收的氮总量

Figure 3 The amount of plant total N content for potted rice under pig manure

图 4 所示,牛粪处理下,水稻植株吸氮量随着施肥水平的增加而增加。根据方差分析的结果,C5(牛粪处理量 $150\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)之前的处理下的植株吸氮量差异均不显著,C5 较 C4(牛粪处理量 $75\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)增长了 40%,而 C5 到 C7(牛粪处理量 $375\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下的差异又开始不显著,C6 比 C5 下仅提高了 8%,C7 较 C6 也只是提高了 6%,说明了较高施肥状态下,施肥水平越高,其增长幅度越小,因而水稻植株在处理牛粪时对氮的吸收能力也是有限的。

猪粪处理与牛粪处理下植株含氮量随施氮量的

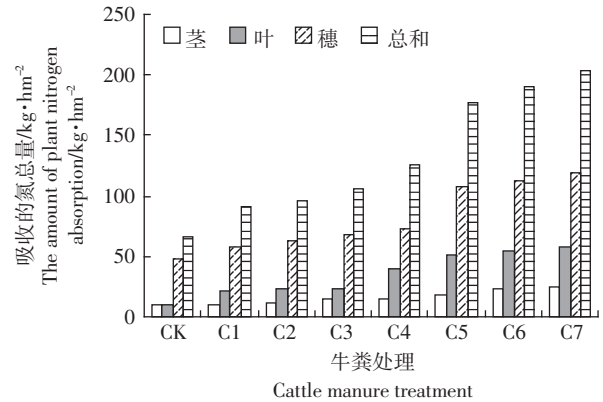


图 4 牛粪处理盆栽水稻植株吸收的氮总量

Figure 4 The amount of plant total N content for potted rice under cattle manure

增加呈现不同的变化规律,其原因可能与肥料本身对养分的释放能力有一定的关系,较之与猪粪,牛粪的缓释性更强一些,影响了植株对营养元素的吸收。

2.1.2 不同施肥水平下水稻植株对磷的吸收与转化

2.1.2.1 水稻植株全磷含量

图 5 显示,盆栽水稻植株磷含量随着猪粪处理水平的提高呈现单峰曲线的增长趋势。P6(猪粪处理量 $240\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理植株磷含量达到最大值。P7(猪粪处理量 $300\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理植株磷含量有所下降,分析其原因关键在于 P7 处理猪粪处理量使得水稻植株达到了生理耐受性的极限,植株已经明显出现了受害症状,植株生长状况不佳,导致植株对磷的吸收受到了影响。

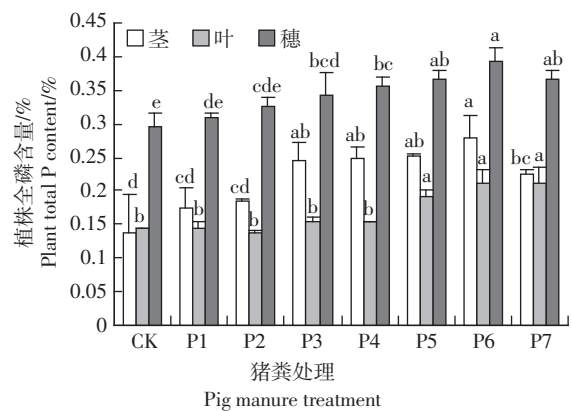


图 5 猪粪处理下盆栽水稻植株磷含量

Figure 5 The amount of plant total P content for potted rice under pig manure

图 6 显示,盆栽水稻植株磷含量随着牛粪处理水平的提高而呈现单峰曲线的增长趋势,这与猪粪处理盆栽水稻植株磷含量变化情况一致。C6(牛粪处理量

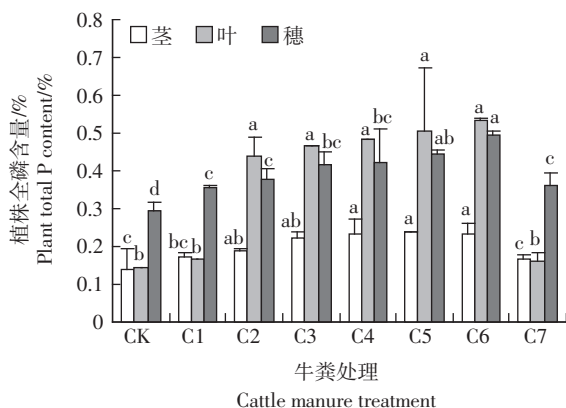


图 6 牛粪处理下盆栽水稻植株磷含量

Figure 6 The amount of plant total P content for potted rice under cattle manure

300 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 植株磷含量达到最大值, C7(牛粪处理量 375 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 植株磷含量有所下降, 但从水稻植株生长情况来看, 该施肥水平下植株生长情况依然较好, 这可能是该条件下牛粪处理量尽管接近了水稻植株生理耐受性的极限, 但并没有达到使其能明显表现出受害症状的程度, 只是影响了植株对磷的吸收。

2.1.2.2 水稻植株磷吸收量

图 7 所示, 猪粪处理下, 水稻植株磷素的吸收量随着处理水平的提高呈现单峰曲线的增长趋势, P5(猪粪处理量 120 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 水稻植株磷吸收量达到了最大值, 为 49 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。P5 处理下磷吸收量比 P4(猪粪处理量 60 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下高 26%, 比 P6(猪粪处理量 240 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下高 29%, P6 下磷吸收量比 P7(猪粪处理量 300 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理下高 88%, 因在水稻生长期 P7 处理下水稻植株已经表现出了受害症状, 上述这些情况都说明当猪粪处理量超过 P6 时,

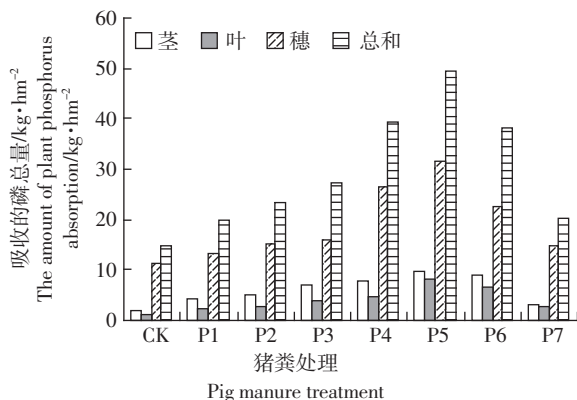


图 7 猪粪处理盆栽水稻植株吸收的磷总量

Figure 7 The amount of plant phosphorus absorption for potted rice under pig manure

再提高施肥水平会逐渐接近水稻生理耐受性的极限, 从而逐渐给植株的生长带来危害并影响水稻植株对磷的吸收。

图 8 所示, 牛粪处理下, 水稻植株磷素的吸收量随着处理水平的提高呈现单峰曲线的增长趋势, 这与猪粪处理盆栽水稻植株磷吸收量的变化情况一致。C6(牛粪处理量 300 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理水稻植株磷吸收量达到了最大值, 为 63 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。C6 处理磷吸收量比 C5(牛粪处理量 150 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理高 28%, 比 C7(牛粪处理量 375 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理高 34%, 上述情况充分说明当牛粪处理量达到一定程度时, 磷素的施入量也已经达到一定程度, 如果继续增加施用量植株磷吸收量反而会下降, 说明水稻植株对磷的吸收能力是有限的, 这与作物的生理特点是吻合的。

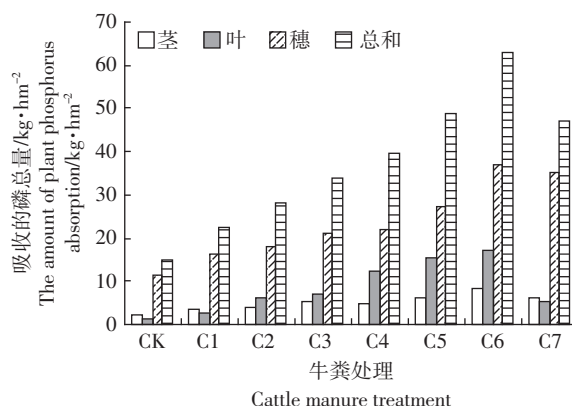


图 8 牛粪处理盆栽水稻植株吸收的磷总量

Figure 8 The amount of plant phosphorus absorption for potted rice under cattle manure

2.2 稻田施用养殖场粪便污染风险分析

2.2.1 水体污染风险分析

2.2.1.1 水体氮素变化趋势

如图 9, 猪粪处理下, 各施肥水平下水稻水全氮含量变化趋势大体一致, 6 d 之内, 其变化态势相对缓慢, 到了第 7 d 之后开始呈现快速增长的趋势, 在第 9 d 到第 15 d 天之间均达到一个峰值, 在此期间中, 施肥水平越高的, 其水体含氮量增长幅度越大, P7(猪粪处理量 300 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理几乎呈直线上升的状态, 第 9 d 之后, 较高施肥水平 P4(猪粪处理量 60 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 到 P7 处理下的水体含氮量开始迅速下降, 而低施肥水平 P1(猪粪处理量 7 500 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ~ P3(猪粪处理量 30 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下降幅度则平缓得多, 如 P3 和 P1 的最大含氮量一直持续了 1 个星期左右, 然后以一个较快的速度降到最低, 随着猪粪施用量的增

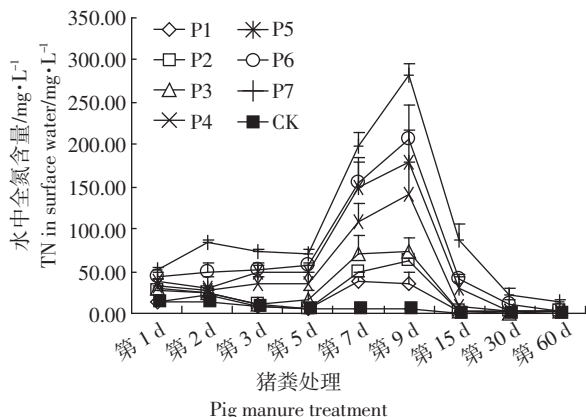


图9 猪粪处理下盆栽水稻田面水中全氮含量

Figure 9 The amount of total N in surface water for potted rice under pig manure

加,水中氮含量也随之增加。其中,P5(猪粪处理量 $120\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)到P7处理下水体的全氮含量60 d后分别达到 0.26 、 0.27 、 $1.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其余的均在 $0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,水体富营养化一般采用的指标是水体中氮含量超过 $0.2\sim 0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,充分说明高猪粪高施肥水平下,水中氮素流失可能性也会加大,从而给环境带来的污染风险也会增加。

图10所示,牛粪处理下,不同施肥水平水稻水全氮含量变化趋势存在少许差异:所有处理从第2 d开始增长到一个较高的水平,到第3 d开始迅速回落,第5~7 d之内含量的变化处于相对静止状态,其中C6(牛粪处理量 $300\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的增长幅度最大;从第7 d开始又以一个较快的速度上升至最高点,然后开始快速降低至最低点,其中高施肥水平处理C5(牛粪处理量 $150\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)~C7(牛粪处理量 $375\,000$

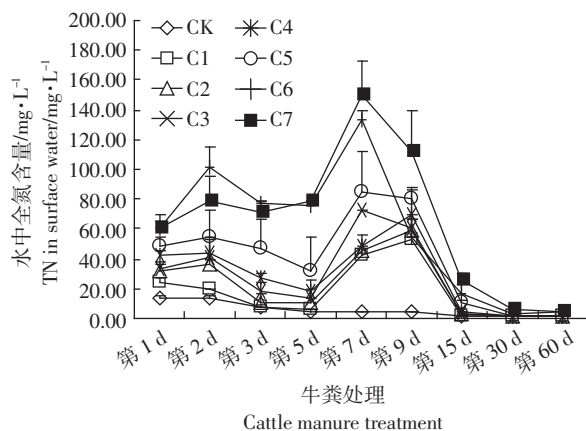


图10 牛粪处理下盆栽水稻田面水中全氮含量

Figure 10 The amount of total N in surface water for potted rice under cattle manure

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)含氮量从第8 d就开始迅速降低,而较低施肥水平从第7~9 d之间的含氮量保持了一个较为稳定的时期,到了13 d左右才开始迅速回落。不同牛粪还田量处理之间,随着牛粪施用量的增加,水中氮含量也随之增加,这一结果与猪粪处理盆栽水稻的结果是一致的。其中,C5到C7处理下水体的全氮含量60 d后分别达到 0.21 、 0.26 、 $0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,充分说明牛粪高施肥水平下,水中氮流失的可能性也会加大,从而给环境带来的污染风险也会增加。

其中,在相同氮处理水平下牛粪处理的水体全氮含量要低于猪粪处理,这与牛粪的较强的缓释性有很大关系,也说明牛粪肥对水体的影响程度要低于猪粪。

2.2.1.2 水体磷素变化趋势

图11显示,猪粪处理下,随着时间的变化,各处理水体磷素含量变化情况是空白处理一直呈现下降的趋势,其余处理在插秧后第3 d时水中磷含量达到第一个峰值,以后逐渐下降(除最后两个高施肥水平以外)至一个较低的水平,这个较低的含量从第7 d持续到第9 d。第9~15 d又会快速升高到一个峰值,然后迅速降低,60 d后达最低点。随着猪粪施肥水平提高,水中磷含量也随之增加,施肥60 d后,各施肥水平下的水体全磷含量均在 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,而磷素含量在 $0.01\sim 0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为水体富营养化的一个判断标准,充分说明随着猪粪施肥水平的增大,水体磷流失的可能性也会加大,从而给环境带来的污染风险也会增加。

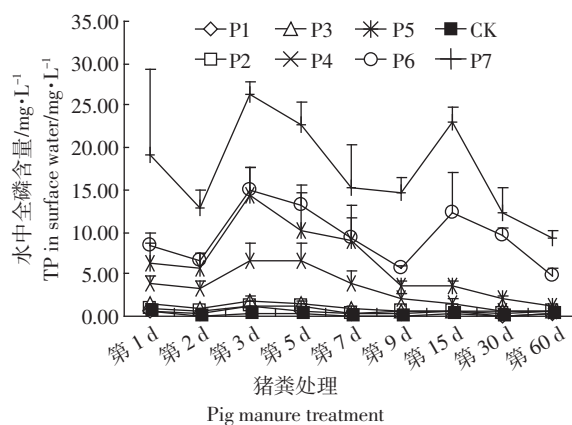


图11 猪粪处理下盆栽水稻田面水中全磷含量

Figure 11 The amount of total P in surface water for potted rice under pig manure

图12显示,牛粪处理下,随着时间的变化,除空白外,其他处理在插秧后的1~2 d水中磷含量有下降的趋势,第3 d时水中磷含量最高,以后逐渐下降,出

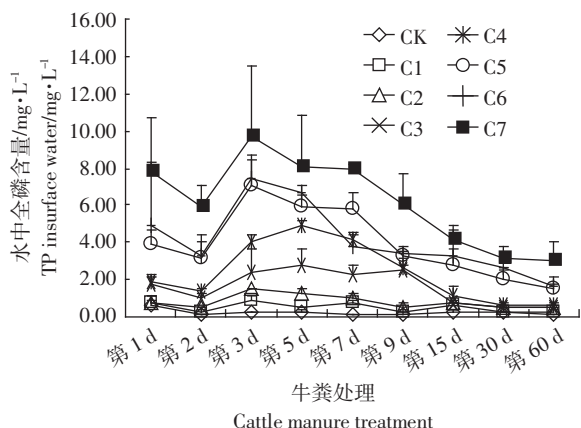


图12 牛粪处理下盆栽水稻田面水中全磷含量

Figure 12 The amount of total P in surface water for potted rice under cattle manure

现这种情况的原因可能与有机肥(牛粪)的缓释性有关。牛粪各处理水平下的水体全磷含量也均在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,随着牛粪施用量的增加,水中磷含量也随之增加,这一结果与猪粪处理盆栽水稻的结果是一致的,充分说明高施肥水平下,水中磷流失的可能性也会加大,从而给环境带来的污染风险也会增加。

相同磷的施入量下牛粪各处理的水体全磷含量均比猪粪处理要低很多,与上述全氮含量是一致的,说明在当季施肥状态下牛粪对水环境的二次污染情况要低于猪粪。

2.2.2 土壤污染风险分析

2.2.2.1 土壤氮素污染分析

如图13所示,随着施肥量的增加,土壤全氮残留量大体呈现上升的趋势。图13猪粪处理中:在低施肥水平P1(猪粪处理量 $7500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)~P5(猪粪处理量 $120000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)下,各施肥水平含氮量升高

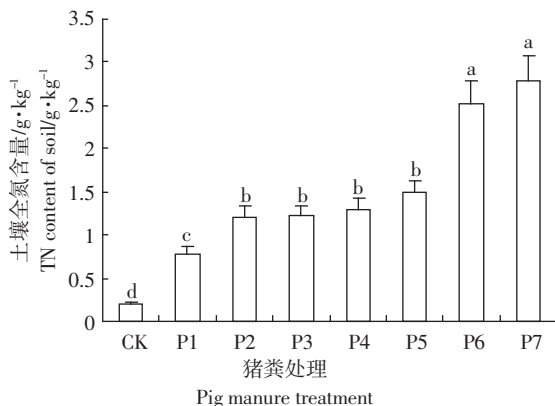


图13 猪粪处理下盆栽水稻土壤全氮含量

Figure 13 The amount of soil total N content for potted rice under pig manure

的幅度相对较小,而当施肥量增加至P6(猪粪处理量 $240000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)水平时,土壤中的含氮量提高的幅度迅速增大,再继续增加施肥量,含氮量的升高幅度又有所降低,P2到P5水平的土壤含氮量与空白之间均无显著性差异,P6、P7与P5之间差异达到极显著水平,其中P6较P5土壤全氮含量增加了151.81%,P7较P5增加了191.05%,P5处理植株氮的吸收量是最大的,这也是在该猪粪处理量条件下,尽管纯氮施入量已经达到 $1103.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但土壤氮残留量仍然相对较低的一个重要原因,P7与P6无显著性差异,与其在水体中的残留量有一定的关系。

图14牛粪处理中,不同施肥水平下土壤含氮量的差异比猪粪处理要明显,根据方差分析的结果C2与C1处理下差异显著,C2较C1增加了37.83%,C1与空白之间差异显著,C1较空白增加了96.74%,C7与C6之间差异显著,C7较C6增加了70.55%,说明土壤全氮含量随牛粪施氮量的增加尚有增大的空间,结合前面盆栽水稻植株氮吸收量的情况,可以说明过高的牛粪处理量导致土壤氮含量升高与植株对氮的吸收能力是密切相关的。

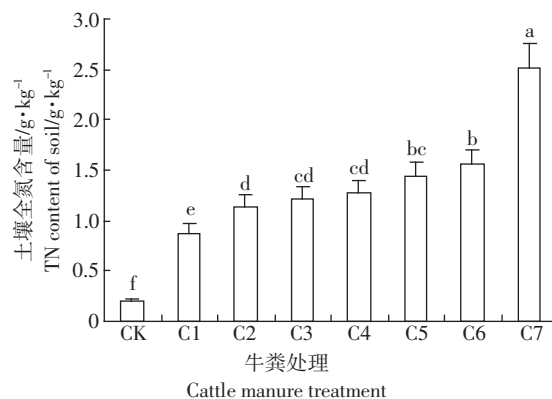


图14 牛粪处理下盆栽水稻土壤全氮含量

Figure 14 The amount of soil total N content for potted rice under cattle manure

图15所示,在相同施氮量条件下,猪粪处理下的土壤含氮量均比牛粪处理低,表明了氮素在土壤中的累积效应没有牛粪明显,结合上节粪肥对水体的影响可以看出,由于猪粪中的养分释放速率较快,在水稻生长期间大量养分分解进入水体,一部分为植株正常生长所利用,其中一部分可能转换为铵态氮随水分的蒸发进入大气中。

2.2.2.2 土壤磷素污染分析

如图16所示,土壤全磷残留量随着施肥水平的

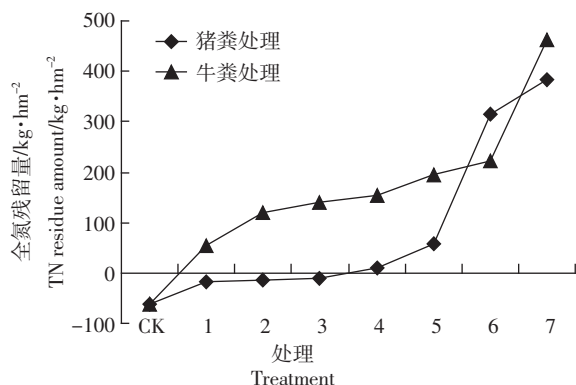


图 15 盆栽水稻处理养殖场废弃物土壤全氮残留量

Figure 15 Total N residue amount of waste for breeding farm in potted paddy soil

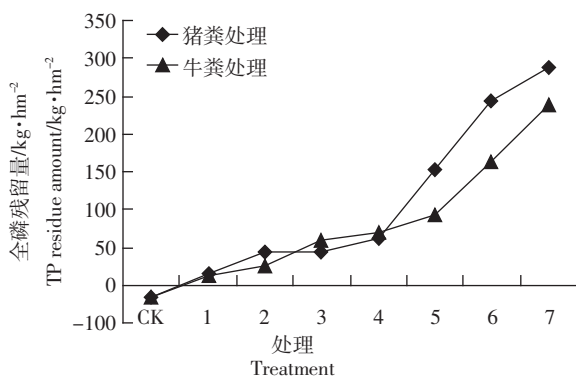


图 16 盆栽水稻处理养殖场废弃物土壤全磷残留量

Figure 16 Total P residue amount of waste for breeding farm in potted paddy soil

增加在逐渐升高。图 17 所示猪粪处理下,处理 P1 到 P4 与空白之间均无显著性差异,施肥量增加至 P5 时,P5 与 P4 之间呈现显著性差异,P5 较 P4 增加了 97.07%,P6 与 P5 之间差异极显著,P6 较 P5 增加了 51.04%,P7 与 P6 之间差异显著,P7 处理土壤磷含量

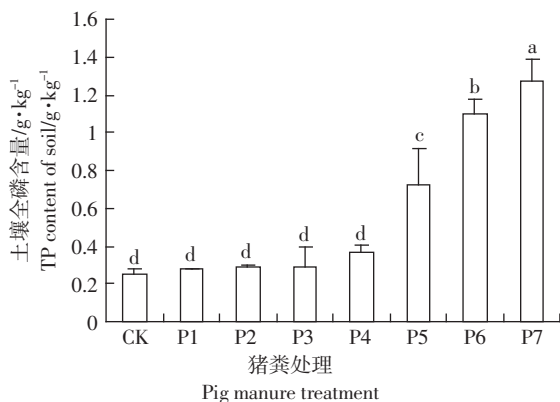


图 17 猪粪处理下盆栽水稻土壤全磷含量

Figure 17 The amount of soil total P content for potted rice under pig manure

比 P6 处理高 16%,P6 处理与 P7 处理土壤磷含量明显升高,与该处理条件下植株磷吸收量下降这一情况是有关的。

图 18 所示牛粪处理下,处理 C1 到 C3 与空白之间均无显著性差异,C4 除与 C3 之间无显著差异外,与前几个处理之间均存在显著性差异,C4 较空白、C1、C2 分别增加了 52.95%、37.34%、20.98%,C5 与 C4 之间差异显著,C5 较 C4 增加了 26.37%,C7 与 C6、C6 与 C5 之间差异均显著,C7 较 C6 增加了 39.63%,C6 较 C5 增加了 55.61%。说明牛粪肥随着含磷量的进一步加大,其土壤含磷量还会有大幅度的上升空间。

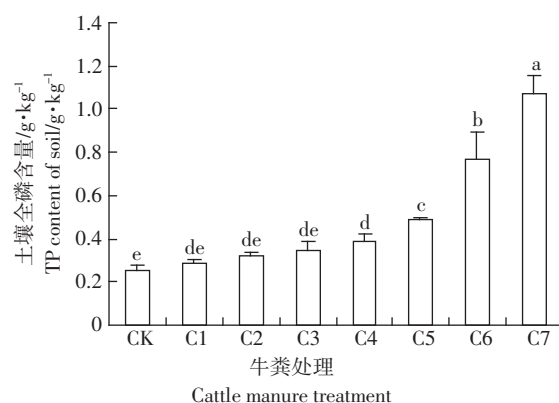


图 18 牛粪处理下盆栽水稻土壤全磷含量

Figure 18 The amount of soil total P content for potted rice under cattle manure

这表明了过量施肥会造成土壤中磷素的累积^[10],从而增加了对环境造成二次污染的风险。

3 结论与讨论

(1)在一定的范围内,水稻对牲畜粪便中的养分具有一定的消纳吸收能力,可有效吸收其中的氮磷元素,促使其生长的同时降低粪肥对环境的污染状况。

(2)各畜禽粪便性质的不同使得水稻对其消纳吸收能力不同。猪粪条件下,水稻植株在 P5(猪粪施入量 120 000 kg·hm⁻²)水平时的氮磷吸收利用率均较好;牛粪条件下,水稻植株在 C6(牛粪施入量 300 000 kg·hm⁻²)水平下的养分利用率较好。同一施氮量,不同肥料水稻生长出现差异跟其自身的消化系统及其喂养的饲料有一定的关系,猪是单胃杂食动物,其饲料通常较细,易消化,因而猪粪也比较细,养分容易释放;而牛是草食性动物,牛粪本身含有的木质纤维素相对较多,其养分的分解释放速率不及猪粪,因而其在土壤中的积累效应会比猪粪大^[11]。

猪粪处理,土壤全氮含量在P5水平时相对空白处理升高幅度很小,从P6水平开始迅速上升,全磷含量在P5水平开始迅速提高;水体全氮含量的动态曲线随施肥水平的增高,变化幅度增大,全磷含量的变化趋势与全氮含量基本一致,P7水平下30 d内全磷含量平均值超过了 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而这一值是水体富营养化的临界值,说明高施肥水平下,猪粪处理会对环境产生二次污染,且对水环境的影响作用大于牛粪。

牛粪处理,土壤全氮含量C1之后提高幅度并不明显,到了C6才显著增加,全磷含量在较高施肥水平C4后随着施肥水平的增加显著升高;水体中各施肥水平全氮含量的动态曲线基本上也是随施肥水平增高变化幅度增大,不同施肥水平下全磷含量变化也基本一致,并且均在 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,说明其对水环境的污染风险较小,这可能与其缓释性有关,而其在土壤中的积累大于猪粪。

(3)水稻因自身生长特性使其对肥料的消纳吸收能力只能保持在一定范围内,在此范围内,随着粪便处理量的增加,植株对氮磷的吸收量也随之增加,但增加潜力不大。高量施用养殖场粪肥将导致土壤中全氮含量、全磷含量、氮磷残留量明显增加。猪粪处理量超过P6及牛粪处理量超过C7时,土壤氮磷含量超过了水稻植株的耐受极限,使其生长受到一定程度的限制,并影响其对氮磷的吸收,由此造成环境中的氮磷残留量反而有所增加,导致对环境的二次污染风险加大。

(4)稻田水体氮磷动态研究发现,施用粪肥15 d左右氮磷含量出现峰值,以后有所降低,因此此时期是控制氮磷流失的关键时期^[12]。

综上,一定施肥范围内,水稻有一定的消纳吸收畜禽粪便的能力,在增加经济效益的同时降低养殖场畜禽粪便对环境的污染。超过此范围,营养元素损失量和损失率会大大提高,水稻生长量和养分吸收量反而会降低,经济效益也随之降低,粪便对环境的二次污染状况会更加严重。在利用水稻处理猪粪肥时,应将施肥水平控制在P5(猪粪处理量 $120\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平以内,在处理牛粪肥时,则控制在C6(牛粪处理量 $30\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平以内,既可以获得较高的经济效益,又能降低对环境造成的影响。低于此范围,会增加消纳肥料的农田面积且不利于植株的生长和收获,难以获得较高的经济效益。高于此范围,经济效益反而有所降低且对环境的二次污染风险会加大。

本研究只是一季水稻的种植结果,而有机肥料往往具有缓释性,其对环境的短期影响和长期影响可能

会不同,因此,应该做长期研究来完善我们的认识。

参考文献:

- [1] 彭里. 畜禽粪便环境污染的产生及危害[J]. 家畜生态学报, 2005, 26(4): 103–106.
PENG Li. The producing and damaging of environmental pollution from feces of livestock and poultry[J]. *Acta Ecology of Domestic Animal*, 2005, 26(4): 103–106.
- [2] 相俊红, 胡伟. 我国畜禽粪便废弃物资源化利用现状[J]. 现代农业装备, 2006(2): 59–63.
XIANG Jun-hong, HU Wei. The current resourceful utilization of live-stock manure in China[J]. *Modern Agricultural Equipments*, 2006(2): 59–63.
- [3] Harada Y, Yamaguchi T. Properties of animal wastes compost in Japan [C]// Environmentally friendly management farm animal wastes Ed. T. Matsunaka, Tokyo, 1998: 49–54. (in Japan).
- [4] Hag K. Development of composting technology in animal waste, treatment[J]. *Asian Aug J Anim Sci*, 1998c(12): 604–606.
- [5] Hakamata T, Hirata H. Nutrient cycling considerations for sustainable agriculture[J]. *TERRA*, 1997(15): 39–43.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 39–264.
BAO Shi-dan. The agricultural and chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39–264.
- [7] 单昊书, 吴瑛, 徐越, 等. 畜禽粪便再利用现状和存在的问题探讨[J]. 中国家禽, 2007, 29(6): 44–45.
SHAN Hao-shu, WU Ying, XU Yue, et al. The current reuse and the problems of livestock manure[J]. *China Poultry*, 2007, 29(6): 44–45.
- [8] 李庆康, 吴雷, 刘海琴, 等. 我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状及展望[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 251–254.
LI Qing-kang, WU Lei, LIU Hai-qin, et al. The status and outlook of treatment on excreta from intensive animal farming in China[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4): 251–254.
- [9] 张建华, 赵航, 杨理芳, 等. 洱海湖滨区畜禽粪便污染与资源化利用措施[J]. 土壤肥料, 2006(2): 16–18.
ZHANG Jian-hua, ZHAO Hang, YANG Li-fang, et al. Pollution and utilization of animal manure as natural resources in Erhai Flat Shore Zone[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(2): 16–18.
- [10] 刘建玲, 廖文华, 王新军, 等. 大量施用磷肥和有机肥对白菜产量和土壤磷积累的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2147–2153.
LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, WANG Xin-jun, et al. Effects of phosphate fertilizer and organic manure to the yield of Chinese cabbage and soil phosphorus accumulation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(10): 2147–2153.
- [11] 王岩, 山本克己. 畜禽粪便堆肥养分释放及其合理施用[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 521–524.
WANG Yan, Katusuki Yamamoto. Nutrient release from livestock waste compost and application of the compost in the field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 521–524.
- [12] 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.
JIN Jie, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2): 357–361.