

畜禽粪肥施加对嘉兴水稻土总磷、有机磷和有效磷分布的影响

刘晓玲, 宋照亮, 单胜道, 叶正钱

(浙江农林大学 环境科技学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 以浙江嘉兴水稻土为例, 讨论不同粪肥施加年限对水稻土总磷、有机磷和有效磷的影响, 阐明粪肥施加影响下磷的积累和流失规律。结果表明: ①磷素是比较容易在土壤中积累的, 且主要积累在土体上部。随着施肥年限的增加, 磷逐渐从表层往下层迁移。施肥 10 a, 磷能迁移到的深度为 40 cm 左右。②表层土壤有机磷也随施肥年限的增加而增加, 从 0 a 的 $212 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 10 a 的 $248 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且土壤有机磷积累与土壤有机质密切相关。③随施肥年限增加, 有效磷也增加, 主要积累在土壤表层。④研究地区土壤磷水平高, 已经超过了磷素向水体释放的环境警戒值, 粪肥施加不仅增加土壤磷素的积累, 同时有利于磷素的迁移, 因而磷素向水体释放的风险加大。图 5 表 1 参 21

关键词: 土壤学; 畜禽粪肥; 水稻土; 磷积累; 磷流失

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)01-0033-07

Total soil P, soil organic P, and soil available P with long-term application of pig manure in paddy soils

LIU Xiao-ling, SONG Zhao-liang, SHAN Sheng-dao, YE Zheng-qian

(School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: The purpose of this study was to clarify the law of phosphorus (P) accumulation and runoff with long-term P fertilization in paddy soils. Total P, soil organic P, and available P with long-term (10 years) pig manure fertilization were studied in Jiaying, Zhejiang Province, China using correlation analysis and significance analysis. Results showed that after 10 years of pig manure fertilization soil total P tended to decrease, and phosphorus moved to the 40 cm soil layer. Also, soil organic P increased from 212 to $248 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ with a significant ($P < 0.05$) correlation ($r = 0.811$) between soil organic matter and soil organic P. Additionally, soil available P increased with pig manure application. In areas with high levels of soil P, pig manure fertilization increased soil P accumulation and movement. Finally, soil P was greater than the vigilance value of the environment implying risk of a soil P release to the water. [Ch, 5 fig. 1 tab. 21 ref.]

Key words: soil science; animal manure; paddy soil; phosphorus; phosphorus accumulation; phosphorus runoff

随着有机肥和磷肥的长期大量施用, 土壤有效磷也随之上升, 但由于作物对磷肥的利用率很低, 因此, 磷流失引起的水体富营养化现象日益显现^[1-2]。如何提高农田磷的生物有效性, 减少磷流失已成为近年来人们关注的焦点^[3]。1994年 Bamett 等^[4]在对 Mcaulife 技术体系做出一定调整的情况下, 研究了家畜和家禽粪便中磷的不同形态, 结果表明不同畜禽粪中不同形态磷含量变化范围较大。在总磷中, 磷脂占 0.4% ~ 2.1%, 无机态磷占 35.0% ~ 63.0%, 酸溶性磷占 8.0% ~ 53.0%, 残留磷占 11.0% ~ 41.0%。而猪粪中的磷主要为水溶性较高的无机磷, 因而对作物的有效性高, 其磷的利用率与化肥相当。因此, 国

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-06-04

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Z5080203, Y5080110)

作者简介: 刘晓玲, 从事环境生态研究。E-mail: lx19840826@hotmail.com。通信作者: 单胜道, 教授, 博士, 博士生导师, 从事循环经济和环境科学研究。E-mail: shanshd@sina.com

外很早就开始对长期施粪肥磷后,在土壤中的分布进行研究。如英国洛桑试验站长期定位试验表明^[5]:土壤磷收支和有效磷含量呈显著性相关关系,大约有10%~13%的纯累积态磷会转化为有效态。中国也有过红壤性水稻土和壤土长期施肥对土壤磷影响的研究。赖涛等^[6]对长期施肥条件下,不同施肥处理红壤性水稻土耕层土壤的研究发现,有机磷库和无机磷库的耗竭或积累速度是不同的,从而使土壤有机磷和无机磷的比值发生变化。姚炳贵等^[7]对壤土的研究表明,土壤有效磷的积累与消耗呈阶段性,一般开始1~2 a变幅大,其后6~8 a保持稳定的变化,当升降到某一值后,其变化显著变小。刘杏兰等^[8]通过长期定位试验发现,有机肥与氮、磷化肥配施及单施有机肥处理,都能显著提高土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、磷、钾的水平,尤其是速效磷,其增量达到2.8~10.8倍。然而,目前对水网平原地区长期施肥条件下土壤磷有效性及其与总磷、有机磷和有机质等关系的系统研究较少。因此,本研究以嘉兴水稻土为例,结合持续10 a的长期定位施肥试验,讨论不同施肥年限对嘉兴水稻土总磷、有机磷和有效磷的影响,阐明粪肥施加影响下磷的积累和流失规律,为提高嘉兴地区土壤磷素资源的利用效率,减少农业生产对环境造成的负面影响,保护生态环境,实现农业的可持续发展提供参考。

1 材料与方 法

试验地位于浙江嘉兴平湖,属北亚热带季风气候,年平均气温为16.0℃,年平均日照时数2 000 h,年平均降水量1 170 mm,全年无霜期225 d。试验时间为1999年4月至2009年4月,试验地为油菜 *Brassica campestris*,小麦 *Triticum aestivum*,苜蓿 *Medicago sativa* 和马铃薯 *Solanum tuberosum* 轮作地块,施粪肥量为30~45 t·hm⁻²。试验设3个处理,分别为无猪粪肥地块(S₀),施猪粪肥5 a地块(S₅),施猪粪肥10 a的地块(S₁₀),各个处理设3次重复。供试肥料为纯猪粪,其有机碳、全磷、有效磷分别为252.6, 14.70, 870.80 mg·kg⁻¹。于2009年4月开挖土壤剖面到地下水水位为止,自下而上采集土壤剖面样品,并进行编号。样品现场缩分后用聚乙烯塑料袋密封包装。样品自然风干后,去掉植物根须及植物残枝和腐叶,粉碎,过筛。用于测pH值的样品过10目筛,其他测试的过100目筛。

样品的分析测定方法见参考文献[9]。按土水比为1.0:2.5测定土壤pH值。土壤碱熔后,用钼蓝比色法测定总磷。重铬酸钾法测有机碳(organic carbon, OC)质量分数,再将有机碳质量分数转换为土壤有机质(soil organic matter, SOM)。Olsen法测定土壤有效磷。土壤有机磷的测定采用土样经550℃灼烧后,用0.2 mg·L⁻¹硫酸提取,则灼烧前后提取的磷的差值即为有机磷质量分数。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质的剖面变化

土壤基本性质及总磷、有机磷、有效磷受不同施肥处理的影响及随土壤剖面的变化结果见表1。

从pH值来看,不同施肥年限土壤pH值多分布于5.5~8.5。随着施肥年限的增加,土壤的pH值不断升高。土壤有机质、总磷、有效磷质量分数差异较大,施肥10 a的土壤有机质质量分数大大高出未施粪肥的土壤,约为未施粪肥土壤有机质的3倍。

图1是不同施肥年限土壤剖面总磷变化趋势图。从图1中可以看出,总磷质量分数随施肥年限的增加而增加,施5 a粪肥和10 a粪肥的土壤表层总磷最高值分别达到了2 425 mg·kg⁻¹和4 982 mg·kg⁻¹。且不同施肥年限0~10, 10~20, 20~30 cm各土壤剖面总磷变化差异显著,而40~85 cm各土壤剖面总磷没有显著变化,说明经过10 a的粪肥施加处理,磷能迁移到的深度为40 cm左右,并在0~40 cm土壤剖面间积累起来。

比较不施粪肥和施加5 a粪肥的土壤磷质量分数,发现施加5 a粪肥土壤,磷从表层逐渐迁移到20~30 cm深处,总磷质量分数达到了1 387 mg·kg⁻¹,而30 cm以下的土层磷质量分数变化不大,说明施加5 a粪肥,磷能迁移到的深度为30 cm。

对比施5 a粪肥和施10 a粪肥不同剖面的磷质量分数可以发现,施粪肥5 a磷能迁移到的深度为30 cm,而施粪肥10 a磷能迁移到的深度为40 cm,在40 cm深处总磷质量分数达到1 076 mg·kg⁻¹。

2.2 有机磷剖面变化

图2是不同施肥年限土壤剖面有机磷平均质量分数变化趋势。从图2中可以看出,有机磷随施肥年

表 1 不同施肥处理对土壤基本性质及总磷、有机磷、有效磷的影响

Table 1 Basic soil characteristics and soil phosphorus (P) distribution in soil profile affected by pig manure application

处理地块	深度/cm	pH 值	总磷/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	有机碳：总磷	有机磷/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	有机磷占总磷的比例/%
S ₀	0~10	5.88 a	1.56 c	50.03 c	48.13 a	212.62 c	88.85 c	13.65
	10~20	6.91 c	1.60 c	44.48 b	41.64 b	330.89 a	107.73 c	20.67
	20~30	7.55 c	0.96 c	17.63 c	27.52 b	121.33 c	57.74 c	12.63
	30~40	7.62 c	0.72 c	9.21 b	19.14 a	85.12 b	40.75 c	11.81
	40~55	7.73 c	0.65 a	8.21 a	18.83 b	72.19 b	36.53 b	11.04
	55~70	7.65 c	0.51 b	8.82 b	25.84 b	50.09 b	17.57 c	9.79
	70~85	7.82 b	0.39 b	12.01 a	46.05 a	54.74 b	13.42 c	14.01
S ₅	0~10	6.74 b	2.43 b	62.70 a	38.74 b	229.90 b	309.94 b	9.48
	10~20	7.58 a	1.64 b	56.28 a	51.39 a	177.04 c	198.00 b	10.79
	20~30	8.06 a	1.39 b	27.65 a	29.87 a	159.84 b	111.55 b	11.53
	30~40	8.17 a	0.74 b	7.11 c	14.40 c	65.72 c	60.52 b	8.89
	40~55	8.29 a	0.65 a	6.25 c	14.36 c	85.15 a	48.41 a	13.06
	55~70	8.51 a	0.65 a	6.13 c	14.08 c	86.12 a	48.58 a	13.20
	70~85	8.76 a	0.44 a	6.87 c	23.57 c	112.54 a	67.21 a	25.78
S ₁₀	0~10	7.25 c	4.98 a	61.01 b	18.35 c	248.42 a	1491.40 a	4.99
	10~20	7.33 b	4.93 a	39.26 c	11.92 c	245.45 b	1555.26 a	4.97
	20~30	7.69 b	3.01 a	25.15 b	12.54 c	183.24 a	902.93 a	6.10
	30~40	8.04 b	1.08 a	11.04 a	15.38 b	121.03 a	250.59 a	11.25
	40~55	7.93 b	0.55 b	7.72 b	20.89 a	70.74 b	38.53 b	12.78
	55~70	7.86 b	0.38 c	9.07 a	35.66 a	46.60 c	36.56 b	12.22
	70~85	7.74 c	0.44 a	10.77 b	36.98 b	56.54 b	36.30 b	12.95

说明：所列均值间的差异比较为不同处理同一剖面深度之间的比较，相同字母表示均值间无显著差异($P < 0.05$)。

限的增加而增加，施 5 a 粪肥和 10 a 粪肥的土壤有机磷质量分数最高值分别达到了 230 和 248 mg·kg⁻¹。主要分布在 0~30 cm 的土壤剖面中，犁底层以下有机磷变化不显著。

0~30 cm 土壤有机磷质量分数从 0 a 的 121 mg·kg⁻¹ 增加到 5 a 的 160 mg·kg⁻¹，变化显著，说明粪肥施加对耕层影响较大。施加 10 a 粪肥，表层土壤有机磷质量分数从 5 a 的 230 mg·kg⁻¹，增加到 10 a

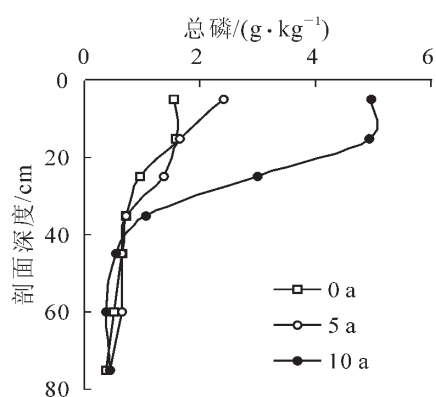


图 1 不同施肥年限不同深度总磷比较

Figure 1 Comparison of soil total phosphorus and its distribution with soil profile affected by long-term application of pig manure

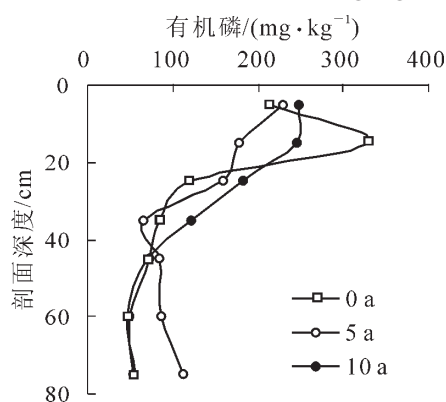


图 2 不同施肥年限不同深度有机磷比较

Figure 2 Comparison of soil organic phosphorus and its distribution with soil profile affected by long-term application of pig manure

的 $248 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明随施肥年限增加土壤有机磷不断积累。

从表 1 中也可以看出, 虽然土壤剖面中各土层土壤有机磷占全磷比例较低, 但长期施用猪粪肥后, 随土层深度增加, 有机磷占全磷的比例逐渐增加。这说明有机磷在土壤中还是较易移动的^[10]。

2.3 有效磷剖面变化

图 3 是不同施肥年限土壤剖面有效磷质量分数变化趋势。从图 3 中可以看出, 随施肥年限增加, 土壤中的有效磷也不断积累。施 5 a 粪肥和 10 a 粪肥的土壤, 表层有效磷质量分数最高值分别达到了 310 和 $1\,555 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 处有效磷质量分数变化差异显著, 30 cm 以下的土层有效磷变化不大。这与前人的有效磷主要集中在耕层的研究一致^[11]。

通过对不施粪肥和施 5 a 粪肥有效磷质量分数进行比较, 可见不施粪肥土壤表层有效磷为 $89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 施 5 a 粪肥表层有效磷达 $310 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明长期施用粪肥能提高土壤有效磷质量分数。但对照地块, 表层土壤有效磷质量分数也很高, 说明无机磷肥用量大。

施粪肥 10 a 表层土壤有效磷质量分数达 $1\,555 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是施粪肥 5 a 土壤有效磷质量分数的 5 倍。施肥年限越长, 土壤有效磷积累越多, 施加 5 a 和 10 a 粪肥的土壤有效磷质量分数最高值出现在 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层, 表层土分别达到 $310 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 和近 $1\,500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与下层土壤相比可以发现, 施肥 5 a 对土壤剖面有效磷的影响到 30 cm 左右, 而施肥 10 a 后到达 40 cm , 说明随着施肥年限的增加, 有效磷向土壤深处不断迁移, 并在更深一层的剖面积累。

3 讨论

3.1 粪肥施加影响水稻土有机磷质量分数的可能机制

本研究结果显示(图 4), 不同施肥年限不同剖面深度有机质与有机磷呈显著线性关系。从表 1 中也可以看出土壤在无粪肥投入的情况下, 有机磷占全磷的比例随剖面深度加深变化不大, 而长期施肥后随着剖面的加深有机磷在全磷中的比例有增加的趋势。以不同形态有机磷占全磷总量的百分数作为分配系数, 研究有机磷各组分对土壤全磷的贡献, 结果表明(表 1), 随施肥年限增加, 耕层土壤有机磷占全磷比例下降; 随施肥年限增加, 犁底层以下土壤有机磷占全磷比例增加。这是因为施用猪粪肥在提高土壤有机磷质量分数的同时, 提高了土壤微生物和土壤磷酸酶活性, 促进了有机磷形态间的转化, 表明长期施用猪粪肥能使土壤有机磷活性加强, 提高土壤的供磷能力。这可能是由于粪肥本身含有较多活性和中度活性的有机磷且可以降低土壤对磷的吸附, 增加对磷的解吸, 通过还原、酸溶、络合溶解作用促进解磷微生物增殖等过程活化土壤中难利用磷为可利用磷^[12]。再者有机肥分解过程产生的有机酸对土壤磷不但能起酸溶、络合溶解作用, 而且还能通过其阴离子的代换和竞争吸附影响土壤对磷的吸附与解吸^[13]。

3.2 粪肥施加影响水稻土有效磷质量分数的可能机制

本研究结果显示(图 5), 不同施肥年限不同剖面深度土壤有机质与有效磷呈显著线性关系。而就水稻 *Oryza sativa* 生长而言, 有效磷大于 $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 土壤可视为高磷, 依此而论, 嘉兴地区被调查的土壤都已达到了高磷水平, 磷肥的增产效果可能不大; 若以土壤有效磷大于 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 视为极高磷水平^[14], 被调查的水稻土都达到了极高磷水平。试验地为油菜、小麦、苜蓿、马铃薯轮作地块, 不同作物对磷的利用为每个生长季 $1 \sim 4 \text{ kg}$, 而粪肥中总磷输入量为 $441.0 \sim 661.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 作物的吸收利用对土壤磷的输入和输出影响不大。对照地块, 土壤有效磷质量分数也很高, 说明无机磷肥用量大, 磷素本身存在盈余。施无机肥增加有效磷在土壤无机磷中的比例, 但增加幅度较缓慢, 施有机肥显著增加了有效磷/无机磷比率, 最高可达 30%。这可能是由于, 一方面长期粪肥的施入有利于耕层土壤有机质的累积; 另一

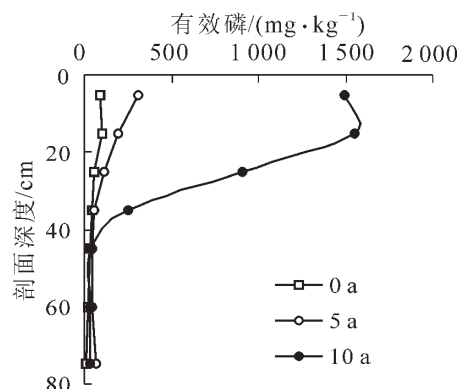


图 3 不同施肥年限不同深度有效磷比较
Figure 3 Comparison of soil available phosphorus and its distribution with soil profile affected by longterm application of pig manure

方面粪肥能提高土壤有机质中可溶性有机物的含量，而这些可溶性有机物对土壤磷素有活化作用^[15]。另外，粪肥还田还增加了磷素向土壤返回的通量，且粪肥磷的有效性远远高于土壤磷。

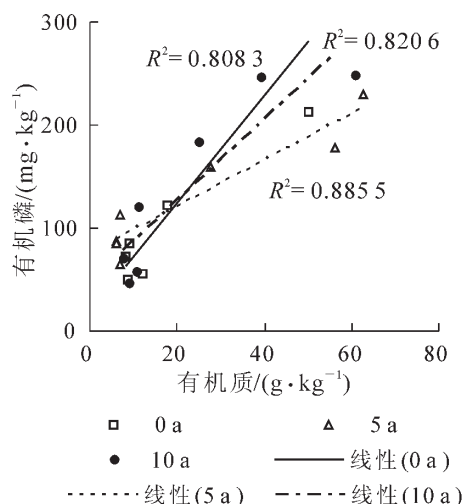


图 4 不同施肥年限不同深度有机质与有机磷的关系

Figure 4 Relationships of different fertilization ages on soil organic matter content and soil organic phosphorus distribution with depth

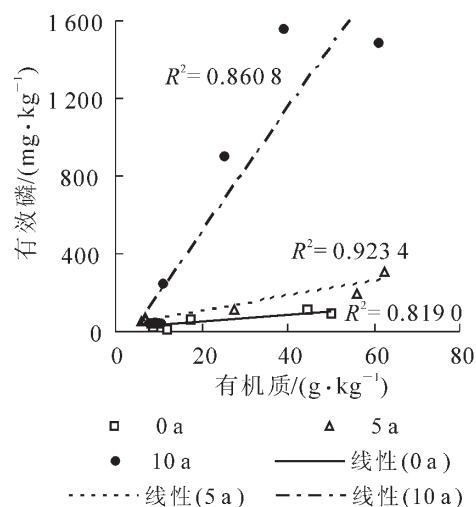


图 5 不同施肥年限不同深度有机质与有效磷的关系

Figure 5 Relationships of different fertilization ages on soil organic matter content and available P distribution with depth

但从图 3 中我们也看到，随着土壤剖面的加深，有效磷质量分数逐渐降低。周建斌等^[15]的研究表明，施粪肥虽然对土壤剖面各层有效磷均有影响，但对上层土壤的影响比下层显著。这可能与农作物的根系比天然杂草的根系粗壮庞大且集中分布在耕层，分泌的有机酸更多；农田土壤经连年耕翻，有利于耗氧微生物及解磷菌的繁衍，因而大大提高了表层土壤的有效磷含量^[16]等多种因素有关。这也说明了土壤对磷有一定的固定能力。研究表明，在旱作时水稻土固磷能力较低，淹水后土壤氧化还原电位(Eh)逐渐降低， Fe^{3+} 还原为溶解度更高的 Fe^{2+} ，部分被氢氧化铁所吸持和闭蓄的磷得以释放，但在合适的 pH 值条件下，溶液中的 Fe^{2+} 能够形成无定形的 Fe^{3+} - Fe^{2+} 混合氢氧化物的再沉淀。这种混合物具有比 Fe^{3+} 氢氧化物更大的表面积和有着更多的磷吸附位，能增强土壤对磷的吸持能力^[17]。且由于供试土壤有机质质量分数较高，因此有效磷质量分数更多地决定于土壤总磷水平和闭蓄态磷的释放，即一个与土壤氧化还原特性(Eh)密切相关的化学过程^[18]。刘方等^[19]对黄壤旱地的研究显示，因不同的作物种植利用实践，土壤磷素在不断升高的同时，易迁移性磷如有效磷、水溶性磷随全磷增加呈指数提高。而本研究发现土壤全磷与有效磷间未见指数增长关系，可能是长期施粪肥处理使土壤磷素的形态分配发生了分异。

3.3 粪肥施加对磷淋洗流失的影响

图 1 和图 3 显示，不施肥土壤、施粪肥 5 a 土壤、施粪肥 10 a 土壤，各自的总磷、有效磷质量分数均随土壤剖面深度增加而减少，这充分说明了磷在土壤中存在迁移行为。

但英国洛桑试验站 100 a 的研究结果表明，磷素易被土壤固定，磷每年移动距离不超过 0.1 ~ 0.5 mm，从施肥点向外移动距离不超过 1.0 ~ 3.0 cm，磷的淋溶损失很小。然而，更多的研究表明，长期施用磷肥磷素向下淋洗量增加，晏维金等^[10]的野外试验表明，水稻田施磷处理的磷流失量是不施磷处理的 10 ~ 30 倍。国外在旱地和牧草地上的研究表明结果也表明，土壤磷素径流流失的大小在其他条件(植被、气候、土壤等生态或管理)一致的前提下，随土壤有效磷含量的增加而提高。如果按照曹志洪等^[20]研究，将有效磷质量分数 25 ~ 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为磷素向水体释放的环境警戒值，那么施加 5 a 粪肥的土壤就已经超过了该警戒值，存在着向水体释放磷素的风险。

土壤有效磷的相对含量与土壤总磷间存在较好的相关关系。作为一种易移动的磷形态，有效磷的相对分配与水稻土中磷流失潜能密切相关^[21]。长期施用粪肥会增加土壤有效磷的绝对含量，但由于占总磷的相对含量仍较低，不会使土壤磷活化而促进流失。但由于供试土壤有机质质量分数较高，促进磷的活化，因此长期粪肥投入还是会增加磷的流失风险。

4 结论

在植物营养元素中,磷素是比较容易在土壤中积累的,而且主要积累在土体上部,特别是耕层(0~30 cm)。施5 a粪肥磷能迁移到的深度为30 cm左右,总磷质量分数达1 387 mg·kg⁻¹。施粪肥10 a,磷能迁移到的深度为40 cm左右,总磷质量分数达1 076 mg·kg⁻¹。

表层土壤有机磷质量分数从0 a的121 mg·kg⁻¹增加到10 a的248 mg·kg⁻¹。

施肥年限越长,土壤有效磷积累越多,并对深层土壤发生影响。施加10 a粪肥的土壤,0~30 cm土层有效磷达1 500 mg·kg⁻¹,30~40 cm土层有效磷达250 mg·kg⁻¹,是下层土壤的6倍多。

研究地区土壤就已经超过了磷素向水体释放的环境警戒值,存在着向水体释放磷素的风险。

致谢:感谢陈永根老师的指点。

参考文献:

- [1] ZHANG Y S, WERNER W, SCHERER H W, *et al.* Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils[J]. *Biol Fert Soil*, 1994, **17**: 64 - 68.
- [2] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究(1)有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, **4** (2): 145 - 152.
ZHANG Yongsong, LIN Xianyong, LUO Ancheng, *et al.* The activity and mechanism study on organic fertilizer(1) The activity of organic fertilizer on different forms of soil inorganic phosphorus[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 1998, **4** (2): 145 - 152.
- [3] 莫淑勋. 土壤中有机的产生转化及对土壤肥力的某些影响[J]. *土壤学进展*, 1986, **14** (4): 1 - 10.
MO Shuxun. Effect of soil organic acids production and transformation on soil fertility [J]. *Prog Soil Sci*, 1986, **14** (4): 1 - 10.
- [4] BARNETT G M. Phosphorus forms in animal manure [J]. *Bioresour Technol*, 1994, **49**: 139 - 148.
- [5] HIGGS B, JOHNSTON A E, SALTER J L, *et al.* Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture [J]. *J Environ Qual*, 2000, **29**: 80 - 87.
- [6] 赖涛, 黄庆海, 吴强, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响[J]. *植物营养与土壤学报*, 2003, **9** (1): 63 - 66.
LAI Tao, HUANG Qinghai, WU Qiang, *et al.* Effect of long-term fertilization on the forms of organic phosphorus in paddy soil derived from red earth [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2003, **9** (1): 63 - 66.
- [7] 姚炳贵, 姚丽竹. 津效潮土磷素组成及其演变规律的定位研究[J]. *华北农学报*, 1997, **12** (3): 33 - 35.
YAO Binggui, YAO Lizhu. Long-term experimental study on components and changes of phosphorus in fluvo-aquic soil of Tianjin suburbs [J]. *Acta Agric Boreali-Sin*, 1997, **12** (3): 33 - 35.
- [8] 刘杏兰, 高宗, 刘存寿, 等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. *土壤学报*, 1996, **3** (2): 38 - 147.
LIU Xinglan, GAO Zong, LIU Cunshou, *et al.* Effects of long-term mixed application of organic-inorganic fertilizations on yield increase and soil fertility[J]. *Acta Pedol Sin*, 1996, **3** (2): 38 - 147.
- [9] 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.
- [10] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 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 Weijin, YIN Chengqing, SUN Pu, *et al.* Process of transformation and runoff loss on P and N in paddy wetland [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, **10** (3): 312 - 316.
- [11] 章永松, 林咸永, 倪吾钟. 有机肥对土壤磷吸附解吸的直接影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, **2** (3): 200 - 205.
ZHANG Yongsong, LIN Xianyong, NI Wuzhong. Effects of organic fertilizer on soil phosphorus adsorption and desorption[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 1996, **2** (3): 200 - 205.

- [12] CHENG Luo'an, SUN Xi, ZHANG Y S. Species of inorganic phosphate solubilizing bacteria in red soil and the mechanism of solubilization [J]. *Pedosphere*, 1993, **3** (3): 285 – 288.
- [13] JIANG Baifan, GU Yichu. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 1989, **20** (3): 159 – 165.
- [14] 张志剑, 王光火. 嘉兴地区水稻土磷素状况与环境效应评估[J]. 科技通报, 1999, **9** (15): 379 – 381.
ZHANG Zhijian, WANG Guanghuo. Soil phosphorus status and environmental effects assessment in paddy soil in Jiaxing [J]. *Bull Sci Technol*, 1999, **9** (15): 379 – 381.
- [15] 周建斌, 李昌纬, 赵伯善, 等. 长期施肥对壤土底土养分含量的影响[J]. 土壤通报, 1993, **24** (1): 21 – 23.
ZHOU Jianbin, LI Changwei, ZHAO Boshan, *et al.* Effects of long-term fertilization in Lou subsoil nutrient content [J]. *Chin J Soil Sci*, 1993, **24** (1): 21 – 23.
- [16] 王学东, 李贵宝, 王殿武, 等. 湿地土壤对苯酚的净化能力及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19** (4): 135 – 138.
WANG Xuedong, LI Guibao, WANG Dianwu, *et al.* Phenol purification capacity and its influencing factors in wetland soil [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, **19** (4): 135 – 138.
- [17] SHUKLA S S, SYERS J K, WILLIAMS J D, *et al.* Sorption of inorganic phosphate by lake sediments [J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1971, **35**: 244 – 249.
- [18] 黄懂宁. 城市污泥处置概述[J]. 环境科学动态, 1999 (4): 27 – 29.
HUANG Dongning. Overview of municipal sewage sludge disposal [J]. *Environ Sci Trend*, 1999 (4): 27 – 29.
- [19] 刘方, 何腾兵, 钱晓刚, 等. 不同利用方式下黄壤旱坡地磷素状况及环境影响分析[J]. 土壤与环境, 2002, **11** (3): 232 – 236.
LIU Fang, HE Tengbing, QIAN Xiaogang, *et al.* Yellow soil phosphorus conditions and the environmental impact in different use patterns [J]. *Soil Environ Sci*, 2002, **11** (3): 232 – 236.
- [20] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论稻田圈在保护城乡生态环境中的功能-稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. 土壤学报, 2005, **42** (5): 799 – 804.
CAO Zhihong, LIN Xiangui, YANG Linzhang, *et al.* Function of rice cycle on protection of ecological environment in urban and rural characteristics of soil phosphorus migration and runoff in paddy soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2005, **42** (5): 799 – 804.
- [21] 邵宗臣, 赵美芝. 土壤中积累态磷活化动力学研究 (I) 有机质的影响[J]. 土壤学报, 2002, **39** (3): 318 – 325.
SHAO Zongcheng, ZHAO Meizhi. Activation kinetics study of accumulation phosphorus in soil (I) Effect by soil organic [J]. *Acta Pedol Sin*, 2002, **39** (3): 318 – 325.