

施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响

盛海君, 夏小燕, 杨丽琴, 赵海涛, 栾书荣, 封 克

(扬州大学 环境科学与工程学院 225009)

摘要:在水稻生长季节设置不同施磷水平(0、30、70、150、300 kgP/hm²)田间小区试验,研究施磷对环境及水稻产量的影响。结果表明,施磷量与土壤速效磷含量、土表径流磷含量均呈极显著正相关,随施磷量提高,表层土壤速效磷含量明显增加,径流磷含量也随之增加。早期径流液中的磷以颗粒磷为主,而后期可溶性磷的比例加大。一般施磷水平下径流液的可溶性磷中有机磷占的比例较大,而大施磷量时无机磷占的比例较大。虽然通过径流损失的磷占总施磷量的 0.2% 以下,但径流液中可溶性磷的浓度和总磷浓度均已超过水体富营养化磷浓度的临界值,意味着长期的田间排水存在诱发附近水体富营养化的可能。

关键词:磷;径流;水稻

Effects of phosphorus application on soil available P and different P form in runoff

SHENG Hai-Jun, XIA Xiao-Yan, YANG Li-Qin, ZHAO Hai-Tao, LUAN Shu-Rong, FENG Ke (College of Environmental Science and Engineering, YangZhou University, YangZhou 225009, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2837~2840.

Abstract: Continuous application of large amount of P fertilizer in Taihu Region in recent years has rapidly increased plant available phosphorus in the topsoil. Accumulation of P in an appropriate amount can lead to beneficial effects, while in an excessive amount could cause water pollution. Aimed at the realistic problem on environment protection, this study was carried out field plot experiments in a leaky paddy soil (in Zhangjiagang, Jiangsu province) with different levels of P application rates (0, 30, 70, 150, 300 kgP · hm²). Twenty plots (5m × 6m) were distributed along both sides of an irrigation ditch and with a randomized block design. Plots were separated from each other with ridges between them and a cement cistern on one side of the plot was used to collect run-off after rain. Runoff was analyzed for total phosphorus (TP), particulate phosphorus (PP), total dissolved phosphorus (TDP), dissolved inorganic phosphorus (DIP) and dissolved organic phosphorus (DOP). Topsoil of each plot was also sampled and analyzed for rapidly available P. The results from this study clearly indicated that the amount of P application had significant positive correspondence with the content of rapidly available P and P loss in runoff. The content of available P in the surface soil and the runoff loss of P increased as P application rates increased. The dominant form of P in the runoff was particulate P at first, and then the proportion of dissolved P went up. The leading form of dissolved P was organic P for most levels of P application, while was inorganic P at the highest level. Though the runoff loss of P was even below 0.2 % total P, the concentration of both dissolved P and the total P in the runoff were all above the P threshold of the eutrophication. This suggests that long term field drainage from P applied fields can negatively impact water quality.

Key words: phosphorus; runoff; rice

文章编号: 1000-0933(2004)12-2837-04 中图分类号: S143.2 文献标识码: A

近年来,很多地区由于连年、甚至每季作物都大量施用磷肥,致使土壤速效磷含量明显提高^[1~3]。调查表明,太湖地区农田养分尤其是氮、磷的收支已经有了明显的盈余^[4]。就磷素来说,平均施肥量为 62.8 kg P/(hm² · a),而随作物收获支出的磷平均

基金项目: 国家科技部重大基础研究资助项目(G1999011806)

收稿日期: 2003-10-30; **修订日期:** 2004-08-16

作者简介: 盛海君(1966~),女,江苏宜兴人,高级农艺师,主要从事土壤养分实验教学与土壤环境的研究。E-mail: haijunsheng@sina.com

Foundation item: National Key Basic Research Support Foundation (NKBRF) of China (No. G1999011806)

Received date: 2003-10-30; **Accepted date:** 2004-08-16

Biography: SHENG Hai-Jun, Senior Agronomist, mainly engaged in experimental education of soil nutrient and research of soil environment. E-mail: haijunsheng@sina.com

为 38.9 kg P/(hm²·a),即后者仅约为前者的 60%,其余的磷绝大部分积累于土壤中^[4]。土壤磷素的积累有其有利的一面,即增加了土壤磷的供应能力,但积累超过一定限度就可能对水体环境产生危害。特别是发生地表径流和土壤侵蚀时,土壤磷向水体迁移,极易造成附近水体的富营养化^[4~9]。因此,从我国农业的可持续发展和环境保护中存在的实际问题出发,解决农业生产中盲目大量施磷,减少或避免土壤磷的流失具有重要意义。本研究试图通过设置不同施磷水平的田间试验,系统研究施磷对土壤速效磷含量、径流磷组成及损失量的影响,以期为合理施用磷肥、维护农业生态环境提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2002 年 6 月至 2002 年 10 月在江苏省张家港市的漏水型水稻土上进行,土壤类型为潜育型人为耕作土。土壤质地为砂质壤土(美国制),砂粒含量为 58.6%、粉砂粒含量 23.2%、粘粒含量为 18.2%。土壤有机质含量为 8.82 g C/kg,全磷 1.0 g P/kg,速效磷 10.04 mg P/kg。试验设 0、30、70、150、300 kg P/hm²共 5 个不同施磷水平。所有处理氮、钾肥用量一致,分别为 300 kg N/hm²、60 kg K₂O/hm²。磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)作基肥一次性撒施于田表,氮肥(尿素)按基肥、分蘖肥、穗肥为 40%、30%、30%的比例施用。每处理设 4 个重复,小区面积为 5m×6m,随机区组排列,分布于灌水渠两侧。小区间田埂宽 30 cm,用塑料薄膜覆盖,埋深 60 cm 以防止串水。各小区另一侧均设有收集径流的水泥蓄水池,蓄水池半径 45 cm,高 85 cm,顶端加盖防止雨水进入。小区与蓄水池之间通过 PVC 管相连。伸入小区内的 PVC 管管口高出田面 7 cm,水稻生长期间由于灌水或降雨超出该水面的部分作为径流液由 PVC 管导入蓄水池。供试水稻品种为武育梗 7 号,6 月 12 日移栽。

1.2 取样与分析

径流于降雨后发生,平时无径流。径流量除了受降雨量影响外,还与降雨前田面水位高度密切相关,田面水超过 7 cm 的部分即被认为可产生径流的部分而收集于蓄水池中。本试验于水稻移栽后的 7 月 5 日、8 月 19 日、9 月 24 日、10 月 16 日共收集到四次径流液,这期间的降雨量分别为 188.5 mm、135.8 mm、85.4 mm 和 56.5 mm(生育期 466.2 mm)。每次采集水样的同时记录所收集的径流水总量。

1.2.1 径流磷分析 径流液全磷(total phosphorus, TP)和总可溶性磷(total dissolved phosphorus, TDP)用过硫酸钾氧化钼锑抗比色法测定;可溶性无机磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)用钼锑抗比色法测定;颗粒磷(particulate phosphorus, PP)和可溶性有机磷(dissolved organic phosphorus, DOP)用差减法算出,即 PP = TP - TDP;DOP = TDP - DIP^[10]。

1.2.2 土壤速效磷测定 在采集径流液的同时取各小区表层(0~15 cm)土样,风干粉碎后用 Olsen 法测定。

2 结果与分析

2.1 施磷对表层土壤速效磷含量的影响

施磷提高了表层土壤速效磷的含量。根据 7 月 5 日、8 月 19 日、9 月 24 日、和 10 月 26 日的土样分析结果,施磷量与表层土壤速效磷含量之间的相关系数(*r*)分别达到 0.987、0.995、0.995 和 0.999,二者呈极显著正相关。随着磷肥用量的增加,土壤速效磷含量明显增加,其中施磷量为 150 kg P/hm²和 300 kg P/hm²的处理,其速效磷含量在 7 月 5 日分别高达 40.48 mg/kg 和 65.63 mg/kg,与对照处理土壤速效磷含量间的差异达到极显著水平,而 30 kg P/hm²和 70 kg P/hm²的处理,其表层土壤速效磷含量与对照处理间的差异不显著(表 1)。

表 1 施磷对表层土壤速效磷含量的影响

Table 1 Effect of phosphorus application on the available P concentration of soil at 0~15 cm depth		速效磷 Available P/(mg/kg)			
施磷量 Rate of P application (kg P/hm ²)		07-05	08-19	09-24	10-26
300		65.63±12.16 A a	59.84±5.90 A a	44.68±30.93 A a	39.39±8.95 A a
150		40.48±11.06 B b	30.98±14.38 B b	27.06±4.49 B b	23.55±10.00 B b
70		14.92±6.84 C c	15.18±6.33 BC c	12.6±3.02 BC c	13.75±1.96 BC bc
30		12.97±8.60 C c	9.52±1.06 C c	8.26±3.92 C c	10.28±3.68 BC c
0		10.04±3.32 C c	8.16±2.70 C c	6.32±2.42 C c	5.95±1.07 C c
LSD _{0.01}		21.57	19.16	16.55	15.17
或 LSD _{0.05}		15.60	13.80	11.87	10.97

a, b 和 c 不同字母表示在 0.05 水平上差异显著; A, B 和 C 不同字母表示在 0.01 水平上差异极显著 Different letters of a, b and c mean significant difference at 0.05 level; Different letters of A, B and C mean significant difference at 0.01 level

2.2 施磷对径流磷组成及损失量的影响

2.2.1 施磷对径流中各组分磷浓度的影响 本试验于水稻生育期的 7 月 5 日、8 月 19 日、9 月 24 日和 10 月 16 日共收集到 4 次径流。径流液中各组分磷的浓度列于表 2。在第 1 次(7 月 5 日)收集的径流液中,总磷浓度与施磷量间的关系相当明显,即施用量越大,径流液中总磷含量越高。如 P300 处理的径流液中总磷的浓度达到 1.456 mg P/L,而 P30 处理的相应值为 0.220

mg P/L,两者相差近 7 倍。但这种关系随着时间的推移而趋向不明显,在第 4 次(10 月 26 日)取样时,两者间仅相差 1.5 倍。

根据表 2 可知,第 1 次所收集径流液中的磷以不溶解于水的颗粒磷为主。就不同的施磷处理而言,颗粒磷所占径流液中总磷的比例约在 84%~96%之间。随着时间的延长,颗粒磷所占径流液中总磷的比例下降,如第 4 次取样时,该比例处于 34%~64%之间。特别是 P300 处理,从第 1 次取样时的 96%降至第 4 次取样时的 34%。

随径流液中颗粒磷占总磷的比例降低,可溶性磷的比例上升,即在水稻生长中后期,通过径流所迁移的可溶性磷已占有较大的比重。该部分磷由可溶性无机磷和可溶性有机磷构成。从表 2 的数据可以看出,早期(第 1 次取样)可溶性有机磷约占总可溶性磷的 38%~77%,其中施磷量最大的 P300 处理该比例为 41%。第 4 次取样时,各处理可溶性有机磷约占可溶性总磷的 26%~75%,除 P300 处理该比例为 26%外,其余处理的该比例均在 60%以上。这个结果说明,在一般的施磷水平下,径流液所带走的可溶性磷中,有机磷占主要部分,特别是施磷时间较长后更是如此。

表 2 不同时期径流液中各组分磷浓度

Table 2 The concentration of different P form in runoff at different stage					
施磷量 Rate of P application (kg P/hm ²)	溶解无机磷(DIP) Dissol. inorgan. P (mg P/L)	溶解有机磷(DOP) Dissol. organ. P (mg P/L)	总溶解磷(TDP) Total dissol. P (mg P/L)	颗粒磷(PP) Particle P (mg P/L)	总磷(TP) Total P (mg P/L)
07-05	300	0.031±0.005	0.022±0.004	0.054±0.009	1.403±0.168
	150	0.008±0.005	0.027±0.014	0.035±0.017	0.592±0.170
	70	0.019±0.010	0.027±0.020	0.047±0.018	0.291±0.076
	30	0.015±0.010	0.014±0.013	0.029±0.017	0.220±0.115
	0	0.015±0.009	0.009±0.006	0.024±0.004	0.289±0.077
08-19	300	0.202±0.140	0.031±0.007	0.175±0.157	0.288±0.167
	150	0.094±0.037	0.054±0.012	0.148±0.035	0.200±0.038
	70	0.086±0.057	0.057±0.013	0.143±0.065	0.208±0.111
	30	0.028±0.017	0.035±0.008	0.062±0.014	0.121±0.009
	0	0.031±0.018	0.034±0.006	0.065±0.012	0.138±0.015
09-24	300	0.093±0.082	0.086±0.026	0.179±0.060	0.367±0.132
	150	0.056±0.008	0.069±0.039	0.125±0.037	0.301±0.059
	70	0.038±0.027	0.065±0.009	0.103±0.032	0.213±0.090
	30	0.027±0.014	0.053±0.016	0.080±0.014	0.333±0.256
	0	0.058±0.034	0.038±0.018	0.072±0.050	0.257±0.065
10-26	300	0.138±0.062	0.050±0.028	0.188±0.071	0.286±0.100
	150	0.034±0.026	0.095±0.023	0.129±0.021	0.272±0.078
	70	0.038±0.039	0.058±0.019	0.096±0.050	0.270±0.113
	30	0.023±0.013	0.070±0.022	0.093±0.033	0.206±0.044
	0	0.031±0.023	0.061±0.019	0.092±0.031	0.190±0.078

如果以磷影响水质(水体富营养化)的临界值(溶解磷 0.05 mg/kg 和总磷 0.1 mg/kg)^[11]为标准来衡量所有测定值,则整个监测过程各处理的径流液中总磷含量均已超标,总溶解磷的浓度除第一次径流中含量稍低外,其余各次也都超过了易引发水体富营养化的临界值。这说明磷随农田径流液损失是造成水质富营养化不容忽视的一个重要因子。

2.2.2 施磷对磷素径流流失量的影响 由表 3 可见,施磷提高了磷素的径流总损失量。除可溶性有机磷($r=0.394$)总量外,磷肥施用量与水稻生长期间通过径流所带出田面的可溶解性无机磷总量、颗粒磷总量以及总磷量的相关系数(r)分别达到 0.944、0.967 和 0.980,均呈极显著正相关。随着磷肥用量的增加,磷素的径流损失量明显增加,如 P300 处理径流中可溶解性无机磷、颗粒磷和总磷的流失量分别达到 96.61、360.99、和 496.32 g/hm²,在分别减去对照(P0)的径流中所含的可溶性无机磷、

表 3 施磷对磷素径流流失量的影响

Table 3 Effects of phosphorus application on the runoff loss of P					
施磷量 P(kg/hm ²)	可溶性无机磷 DIP(g/hm ²)	可溶性有机磷 DOP(g/hm ²)	总可溶性磷 DP(g/hm ²)	颗粒磷 PP(g/hm ²)	总磷 TP(g/hm ²)
300	96.61±51.89a	38.73±6.66a	135.33±50.45a	360.99±43.33A	496.32±90.02A
150	39.43±13.58b	50.44±13.60a	89.87±10.88b	190.41±43.93B	280.27±54.60B
70	38.74±24.71b	43.94±3.94a	82.68±25.01b	128.27±32.95B	208.64±59.19B
30	17.29±5.03b	35.07±7.10a	52.37±10.80b	127.53±70.64B	179.90±71.52B
0	27.03±7.34b	30.30±2.40a	57.33±9.08b	124.13±30.94B	181.46±31.17B
LSD _{0.01} 或 LSD _{0.05}	46.469	13.500	45.953	112.036	154.726

* a, b 和 c 不同字母表示在 0.05 水平上差异显著; A, B 和 C 不同字母表示在 0.01 水平上差异极显著 Different letters of a, b and c mean significant difference at 0.05 level; Different letters of A, B and C mean significant difference at 0.01 level

颗粒磷和总磷量后,净损失量分别占施磷量的 0.023%、0.079%和 0.105%,显著高于其它处理。P150 处理的径流液中,可溶性无机磷、颗粒磷和总磷的流失量也明显高于其它处理,但统计分析结果表明,其与对照之间在 0.01 水平并未呈现极显著差异。P70 处理的径流中,只有可溶性无机磷的流失量明显高于对照,而 P30 处理的径流中各组分磷的流失量与对照处理间无显著差异。各处理随径流液迁移的可溶性有机磷总量除 P300 处理外均高于可溶性无机磷总量,但各处理间的差异不明显。对随径流迁移的颗粒磷总量来说,高磷处理(P300 和 P150)明显高出其他处理,而其它处理间无显著差异。

3 结论

本试验表明,施磷量与表层土壤的速效磷含量间有着极显著的相关性。由于磷素在田间土壤剖面上的垂直移动较小(该方面的数据将另文发表),因此施磷将直接提高表层土壤速效磷的含量。

然而,随着施磷量的增加,由径流所造成的磷的损失量却明显增加。各次径流液中的全磷浓度和整个水稻生长期所收集的 4 次径流所带走的总磷量均与磷肥施用量呈极显著正相关。

在由径流所带走的磷中,其磷的组成随施用量和径流发生的时间而有所不同。径流液中的磷可分为可溶性无机磷、可溶性有机磷和难溶解的颗粒磷。从时间上看,早期的径流液中以颗粒磷的流失为主,其颗粒磷浓度可占径流液总磷浓度的 84%~96%,而可溶性部分仅占 4%~16%。但在后期的径流液中,可溶性磷占有的比例加大到 36%~66%,特别是高磷处理(P300),其可溶性磷占径流液中总磷的比例高达 66%,成为流失的主要部分(表 2)。在可溶性磷中,施磷量大的处理(P300)其径流液中可溶性无机磷占总可溶性磷的比例较大,而其余处理则是可溶性有机磷占有的比例更大(表 2)。其最终结果是,在一般的磷肥用量下,整个水稻生长期径流所造成的磷的流失中首先是颗粒磷,其次是可溶性有机磷,然后是可溶性无机磷(表 3)。而当施磷量很大时,流失量最大的仍是颗粒磷,然后是可溶性无机磷,最后才是可溶性有机磷(表 3)。

就本试验而言,由于试验所在地的土质属于砂性较大的漏水型水稻土,自然条件下发生的径流量小于土质更粘的水稻土,相比之下,所发生的径流次数也较少。因此,通过径流损失的总磷量占施磷量的比例是很小的,最大施磷处理(P300)中通过径流损失的磷也小于施磷量的 0.2%。尽管如此,鉴于径流中可溶性磷和总磷的浓度几乎均已超过水体富营养化时磷的临界值,故来自农田径流的磷在水体的长期累积还是有可能造成附近水体的富营养化。由于颗粒磷难以溶解,不易被生物利用,由此推测,由径流所带走的总磷中,占比例较大的可溶性有机磷在导致农田附近水体的富营养化方面扮演着更为重要的角色。

References:

- [1] Han J J, Ma B G, Han B K, et al. Effect of phosphoric fertilizer application on soil available P and crop yield in wheat-rice crop rotation. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001, **24**(3): 22~26.
- [2] Zhang Z M, Dai L X, Zhang D X. Effects of phosphorus application on rate of soil available phosphorus characters of absorbing phosphorus and wheat yield. *Journal of Hebei Agrotechnical Teachers College*, 1999, **13**(1): 11~15.
- [3] Hu T T, Liu C Y, Li G, et al. Effects of fertilization on soil supply and crop absorption of nitrogen and phosphorus and the yield of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, **19**(3): 36~41.
- [4] Gao C, Zhang T L. Agricultural soil phosphorus dynamics in Taihu Lake watershed and its environmental impact. *Rural Eco-Environment*, 2000, **16**(4): 24~27.
- [5] Zhang Z J, Wang K, Zhu Y M, et al. Dynamic characteristics of phosphorus in surface water of paddy field and its potential environmental impact. *Chinese J. Rice Sci.*, 2000, **14**(1): 55~57.
- [6] Hu Z Y, Guo Z H, Zhou Z M, et al. Application of chemical fertilizer and the loss of nitrogen and phosphorus in paddy soils in Hunan. *Journal of Hu'nan Agricultural University*, 2000, **26**(4): 264~266.
- [7] Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, **18**(1): 4~8.
- [8] Gao C, Zhang T L, Wu W D. Risk evaluation of agricultural soil phosphorus release to the water bodies. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(3): 344~348.
- [9] Yan W J, Yin C Q. Phosphorus and nitrogen transfers and runoff losses from rice field wetlands of Chaohu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(3): 312~316.
- [10] Guo F, Nie X, Zhou S Q, et al. The contents and dynamics of phosphorus in shrimp culture area of Pantu, Tong'an Bay, Xiamen. *Journal of Fisheries of China*, 2001, **25**(5): 443~447.
- [11] Sharpley A N, Charpa S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J. Environ. Qual.*, 1994, **23**: 437~451.

参考文献:

- [1] 韩俊杰, 马保国, 韩宝坤, 等. 麦稻轮作高产条件下施磷对土壤速效磷及作物产量的影响. 河北农业大学学报, 2001, **24**(3): 22~26.
- [2] 张智猛, 戴良香, 张电学. 施磷对土壤有效磷含量、吸磷特征及小麦产量的影响. 河北农业技术师范学报, 1999, **13**(1): 11~15.
- [3] 胡田田, 刘翠英, 李岗, 等. 施肥对土壤供肥和冬小麦养分吸收及其产量的影响. 干旱地区农业研究, 2001, **19**(3): 36~41.
- [4] 高超, 张桃林. 太湖地区农田土壤磷素动态及流失风险分析. 农村生态环境, 2000, **16**(4): 24~27.
- [5] 张志剑, 王珂, 朱荫涓, 等. 水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究. 中国水稻科学, 2000, **14**(1): 55~57.
- [6] 胡泽友, 郭朝晖, 周作明, 等. 湖南省稻田化肥施用与氮磷流失状况的研究. 湖南农业大学学报, 2000, **26**(4): 264~266.
- [7] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, **18**(1): 4~8.
- [8] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价. 环境科学学报, 2001, **21**(3): 344~348.
- [9] 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. 应用生态学报, 1999, **10**(3): 312~316.
- [10] 郭丰, 聂鑫, 周时强, 等. 同安湾潘涂对虾养殖垦区不同形态磷的含量与动态. 水产学报, 2001, **25**(5): 443~447.