

# 太湖流域典型地区水稻土磷库现状及科学施磷初探<sup>①</sup>

王慎强<sup>1</sup>, 赵旭<sup>1</sup>, 邢光熹<sup>2</sup>, 顾益初<sup>2</sup>, 史陶钧<sup>2</sup>, 杨林章<sup>2</sup>

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008;

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

## Phosphorus Pool in Paddy Soil and Scientific Fertilization in Typical Areas of Taihu Lake Watershed, China

WANG Shen-qiang<sup>1</sup>, ZHAO Xu<sup>1</sup>, XING Guang-xi<sup>2</sup>, GU Yi-chu<sup>2</sup>, SHI Tao-jun<sup>2</sup>, YANG Lin-zhang<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

**摘要:** 选择太湖流域宜兴市和常熟市水稻土为研究对象, 在区域采样调查耕层土壤磷库的基础上, 开展田间不同施磷制度的试验。结果表明: 宜兴、常熟两地水稻土速效磷含量达 11.6~37.3 mg/kg 和 8.03~19.8 mg/kg, 与第二次土壤普查结果比较, 不同类型水稻土速效磷的含量均有显著增加, 增幅达 75%~597% 和 15%~95%。全磷含量分别为 0.39~0.72 g/kg 和 0.55~0.76 g/kg, 也有明显的升高, 增幅在 23%~128% 和 4%~19% 之间。在不同施磷制度下, 7 种水稻土类型的产量响应结果显示, 稻季无论施磷与否对水稻产量并无影响。表明目前稻麦轮作制下, 至少一季水稻可以不施磷肥仍能维持目前的产量水平。这一措施兼顾资源节约、环境保护和农业高效的三重意义, 可作为科学施磷制度建立的有效途径之一。

**关键词:** 水稻土; 速效磷; 全磷; 稻季不施磷

**中图分类号:** S158.5; S1143.2

与氮不同, 磷不仅是作物生长的限制因子和水体富营养化的临界因子, 还是重要的不可再生资源<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 80 年代, 我国耕地土壤普遍缺磷, 土壤供磷力极低<sup>[3]</sup>。为了满足日益增长的人口对粮食的需求, 大力发展磷肥工业, 增加磷肥施用量, 从而实现土壤有效磷库的提升和土壤供磷能力提高的当时土壤肥力培育目标<sup>[4-5]</sup>。80 年代后, 我国磷肥工业迅速发展, 化肥磷同氮一样消耗量逐年增加。至 2007 年, 磷肥消耗量已达 1223.9 万 t, 占世界总消耗量的 30%, 是 1980 年的 4.3 倍<sup>[6-7]</sup>。尽管磷肥投入确保了粮食安全, 但也使得农业高产地区土壤磷出现盈余, 造成了施磷经济效益的降低和磷矿资源的浪费, 同时增加了土壤磷向水体流失的风险<sup>[8-11]</sup>。太湖流域是中国农业最发达的地

区之一, 也是化学磷肥投入较高的地区。据调查, 当前该地区农田一个稻麦轮作季投入的化学磷肥就达  $P_2O_5$  120 kg/hm<sup>2</sup><sup>②</sup>。针对该地区农田连年高量施磷和水体严重富营养化的现实, 课题组自 2009 年起, 选择宜兴市和常熟市水稻土为研究对象, 开始了区域土壤磷库调查、不同施磷制度的生物学响应及土壤磷库动态变化等方面的研究工作, 以期建立该地区水稻土既能保障作物对磷素营养的需求, 又能控制农田土壤磷过量累积的科学施磷制度。此研究对指导农业生产具有现实意义, 而且对磷资源节约、水体环境保护也具有重要价值。本文报告了太湖地区宜兴市和常熟市主要类型水稻土土壤磷库的现状, 并与第二次土壤普查的土壤磷库结果进行比较。同时, 结合不同施磷制度多

①基金项目: 农业部行业专项(200903011)、国家科技支撑计划项目(2012BAD15B03)和国家“948”重点项目(2011-G30)资助。

作者简介: 王慎强(1964—), 男, 山东临沂人, 博士, 研究员, 主要从事农田氮、磷循环和面源污染控制研究。E-mail: sqwang@issas.ac.cn

②根据 2011 年太湖流域常熟和宜兴市调查数据整理, 未发表结果。

点田间试验的第一个稻麦轮作季的产量数据，初步论证和讨论了“稻季不施磷”可行性及其意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

宜兴市位于太湖流域西北部，119°31′~120°03′E，31°07′~31°37′N，是苏、浙、皖三省交界处。东临太湖，北濒隔湖，西北距南京约150 km。全市面积2038.7 km<sup>2</sup>（其中太湖208.7 km<sup>2</sup>），耕地面积66093 hm<sup>2</sup>，水稻土占51%。一年稻-麦（油菜）两季作物<sup>[12]</sup>。

常熟市位于太湖流域北部，120°33′~121°03′E，北纬31°30′~31°50′N，地处长江三角洲前沿，北临长江，西南连无锡和苏州，东距上海约100 km，全市面积1158 km<sup>2</sup>，耕地面积35987 hm<sup>2</sup>，其中水稻土占76%。一年稻-麦（油菜）两季作物<sup>[13]</sup>。

### 1.2 样品采集和试验分析

根据宜兴县土壤志（1988年）<sup>[14]</sup>和常熟市土壤志（1985年）<sup>[15]</sup>中所述水稻土类型、分布和面积指导本次土壤样品采样。两地各采集200个水稻土耕层土壤（0~15 cm），于2009年5月末至6月初，小麦收获后至水稻种植前的田闲时间完成采样。各种水稻土类型采集样本数量按照其所占该县市水稻土总面积的百分数进行分配，详见表1。

表1 宜兴和常熟采集水稻土种类及样本数

地点	水稻土种类	占全市水稻土 面积 (%)	样本数量 (个)
宜兴	白土	32.2	76
	黄泥土	18.2	43
	灰黄泥土	14.1	33
	乌泥土	5.41	13
	乌底黄泥土	4.46	11
	小粉土	3.87	9
	湖白土	3.27	8
	滩湖土	1.87	4
	马肝土	1.09	3
	合计	84.5	200
常熟	乌黄泥土	26.2	54
	黄泥土	19.4	41
	乌沙土	16.0	35
	乌栅土	15.6	32
	白土	10.2	20
	灰黄泥土	8.41	18
	合计	95.8	200

土壤样品经风干处理后，过1 mm和0.15 mm筛

后分别用于土壤速效磷和全磷分析。土壤速效磷含量测定方法，与第二次土壤普查时所用方法一致，均用NaHCO<sub>3</sub>提取、钼梯抗比色法测定（即Oslen法）<sup>[16]</sup>。该方法适用于各种类型的水稻土<sup>[17]</sup>。土壤全磷用HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消解、钼梯抗比色法测定<sup>[16]</sup>。数据处理和作图通过Origin 7.5完成。

不同施磷制度田间小区试验参考第二次土壤普查资料中关于各种类型水稻土典型剖面采集地选点<sup>[14-15]</sup>进行布置，从2010年6月稻季开始，选择了宜兴市的白土、黄泥土、湖白土和常熟市的白土、黄泥土、乌黄泥土和乌栅土进行产量响应试验。各试验点土壤类型初始速效磷含量分别为12.9、21.7、16.3、10.2、17.8、18.9和7.05 mg/kg。小区面积在20~70 m<sup>2</sup>之间。设置稻麦均不施磷、稻季施磷、麦季施磷和稻麦均施磷4个处理，随机排列，3次重复。所有试验磷肥水平均为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>40 kg/hm<sup>2</sup>，氮肥水平为240 kg/hm<sup>2</sup>，钾肥水平为60 kg/hm<sup>2</sup>。作物收获时单打单收，统计产量。

## 2 结果和分析

### 2.1 宜兴和常熟市水稻土磷库变化分析

第二次土壤普查时，宜兴和常熟水稻土速效磷平均含量在5.00~9.80 mg/kg和7.00~10.7 mg/kg之间，常熟略高于宜兴，但均低于10 mg/kg（表2），表明施磷对作物具有增产效果，尤其是旱季<sup>[17]</sup>。2009年的调查结果显示，两地水稻土类型速效磷平均含量在11.6~37.3 mg/kg和8.03~19.8 mg/kg之间。表明近30年来宜兴和常熟主要类型水稻土上速效磷含量已有明显增加，增幅分别达75%~579%和15%~95%。尽管不同土壤类型速效磷含量和增加程度各异，除常熟乌黄泥土外，两地其余水稻土类型速效磷平均含量均高于10 mg/kg（表2），说明作物对施磷的产量响应不再明显<sup>[17]</sup>。

在第二次土壤普查时，宜兴和常熟水稻土全磷含量为0.31~0.44 g/kg和0.46~0.80 g/kg，与速效磷一致，也是常熟高于宜兴（表3）。这与常熟水稻土成土母质多为长江冲积物，本身含磷量高有关。除此之外，与常熟市农业经济相对发达、磷肥投入多也有一定的联系。2009年的调查结果显示，宜兴水稻土全磷含量与20世纪80年代比，有了显著提高，达0.39~0.72 g/kg。不同水稻土类型全磷含量增幅在23%~128%之间。常熟水稻土全磷含量为0.55~0.76 g/kg，除乌沙土和乌黄泥土外，其他土壤类型也均有一定程度增加，增加幅度在4%~19%之间（表3）。调查地区水稻土全磷含量的增加也反映出水稻土磷库处于不断累积之中。

表 2 宜兴和常熟市主要类型水稻土速效磷含量变化 (Olsen-P, mg/kg)

地点	土壤类型	第二次土壤普查结果 (1980s) [14-15]				当前调查结果 (2009 年)			
		样本数	平均值	标准差	变异系数	样本数	平均值	标准差	变异系数
宜兴	灰黄泥土	9	5.00	1.50	30	33	30.7	18.3	60
	黄泥土	9	5.80	2.80	48	43	17.5	9.87	56
	白土	8	7.40	5.40	73	76	21.4	8.68	40
	乌泥土	10	5.00	1.70	34	13	15.3	7.92	52
	小粉土	3	5.70	1.30	23	9	11.6	6.11	53
	马肝土	4	9.80	2.80	29	3	17.1	3.54	21
	乌底黄泥土	-	5.30	-	-	11	24.9	22.5	90
	滩湖土	2	6.40	3.00	47	8	16.5	14.3	87
	湖白土	3	5.50	0.01	2.8	4	37.3	0.06	8.5
常熟	乌沙土	10	10.4	6.82	66	35	19.8	13.0	66
	黄泥土	14	7.55	4.80	64	41	13.5	8.08	60
	乌黄泥土	18	7.00	4.90	70	54	8.03	4.78	60
	白土	12	6.00	4.00	67	20	11.7	7.94	68
	乌栅土	20	9.80	13.4	136	32	12.5	9.56	77
	灰黄泥土	9	10.7	9.80	91	18	15.5	13.5	87

注: 数据为各水稻土类型相应调查样本数的算术平均值, 下表同。

表 3 宜兴和常熟市主要类型水稻土全磷含量变化 (g/kg)

地点	土壤类型	第二次土壤普查结果 (1980s) [14-15]				当前调查结果 (2009 年)			
		样本数	平均值	标准差	变异系数	样本数	平均值	标准差	变异系数
宜兴	灰黄泥土	9	0.41	0.09	22	33	0.64	0.16	25
	黄泥土	9	0.41	0.04	11	43	0.53	0.09	17
	白土	8	0.37	0.11	31	76	0.55	0.10	19
	乌泥土	10	0.41	0.07	16	13	0.59	0.09	16
	小粉土	3	0.32	0.01	4.1	9	0.39	0.02	6.1
	马肝土	4	0.39	0.09	22	3	0.61	0.02	4.0
	乌底黄泥土	-	0.44	-	-	11	0.70	0.10	14
	滩湖土	2	0.34	0.03	47	8	0.57	0.15	87
	湖白土	3	0.31	0.01	2.8	4	0.72	0.06	8.5
常熟	乌沙土	10	0.80	0.08	10	35	0.76	0.15	20
	黄泥土	14	0.52	0.05	8.8	41	0.58	0.12	21
	乌黄泥土	18	0.65	0.11	18	54	0.59	0.07	11
	白土	12	0.46	0.10	23	20	0.55	0.07	13
	乌栅土	20	0.66	0.11	17	32	0.68	0.10	15
	灰黄泥土	9	0.65	0.14	22	18	0.67	0.13	20

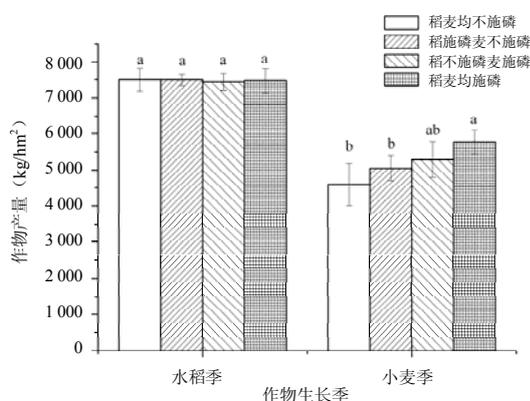
## 2.2 “稻季不施磷”的可行性和科学意义

磷在水稻土中的转化及有效性完全不同于旱地, 因为干湿过程使得土壤磷和肥料磷的有效性在稻季和麦季不同。水稻生长季淹水后土壤有效磷含量增加, 旱作小麦季土壤落干后磷的有效性降低<sup>[18]</sup>。基于此, 早在 20 世纪 60 年代土壤学家就提出了“旱重水轻”, 把磷

肥重点施在旱作上的施磷原则<sup>[17,19]</sup>, 籍此发挥有限磷肥的最大增产效益和经济效益。然而, 在太湖流域半个世纪的生产实践中这一做法并未被普遍采用。农民为了追求产量和省工省时, 仍是盲目性加大磷肥投入, 季季施, 年年施。加上磷肥工业的迅速发展, 也加速了肥料磷大量向农田的投入, 使得土壤磷含量逐渐超

过作物生长的需求，导致土壤磷累积。土壤富磷不仅导致施磷经济效益的下降，而且也造成有限磷矿资源的浪费和增加土壤磷向水体迁移的风险，增加水体富营养化的负荷<sup>[8-11]</sup>。因此，在当前高磷投入和土壤磷富集的新背景下，重新讨论和实践“早重水轻”施磷法，其科学意义已有别于 20 世纪 80 年代前磷肥工业不发达、磷肥不足、土壤普遍贫磷和以增产为唯一目的的农业施磷活动。实践“早重水轻”施磷措施，是科学施磷制度建立和实施的一个重要部分，兼具农业增效、资源节约和环境保护三重意义。

根据水稻土上 Olsen-P 的临界意义<sup>[20]</sup>，当土壤速效磷含量大于 6 mg/kg 以上后，水稻施磷就不增产了。2009 年调查结果显示宜兴和常熟水稻土速效磷含量在 5 mg/kg 以上已达 98% 和 83%，10 mg/kg 以上也达到了 87% 和 42%。应该说当前大多水稻土施磷后水稻产量已无响应。我们选择两地 7 个水稻土类型，设置稻麦都不施磷、稻季施磷、麦季施磷、稻麦都施磷 4 个处理进行产量响应的试验。第一个轮作周期结果显示稻季施磷确实没能提高水稻产量，其后效也不能维持小麦产量，导致减产，而麦季施磷却可以提高小麦产量，与稻麦均施磷的产量相当（图 1）。初步结果说明“稻季不施磷”是可行的。仅从节约施肥成本来看，太湖流域一个稻季不施磷（按课题组调查结果每季  $P_2O_5$  60 kg/hm<sup>2</sup>；约 1 540 万亩稻田<sup>[21]</sup>），就可节约 6.16 万 t  $P_2O_5$ ，再按过磷酸钙（12%  $P_2O_5$ ，600 元/t）折算，每年可直接节约肥料投入成本 3.06 亿元。如按复合肥计算，成本节约更为可观。这还不包括节约的磷矿资源、磷肥工业生产和运输中 CO<sub>2</sub> 能耗减排、减少向水环境排放负荷以及施肥中产生的人力成本等。



（2010—2011 年田间小区试验结果；稻麦产量为 7 种土壤上的平均值 ± 标准差；不同小写字母代表水稻和小麦产量不同处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平）

图 1 宜兴和常熟市主要类型水稻土不同施磷处理下的稻麦产量响应

需要说明的是“稻季不施磷”的施磷方法是鉴于当前磷矿资源日趋紧张而土壤磷库富集、太湖地区水环境污染严重和节能减排大背景的迫切需求，仅是科学施磷制度研究的第一步。要真正建立该区域水稻土既能保障作物对磷营养的需求，又能控制农田土壤磷过量累积的科学施磷制度，需要建立长期试验研究确定水稻、小麦高产的不同类型水稻土的有效磷阈值，寻求土壤磷库生物耗竭与化学耗竭的关联性，预测土壤磷的供应能力，探索不同类型水稻土供磷能力差异的化学及生物学机制等。这也是下一步工作的重点内容。

### 3 结论

近 30 年来，由于磷肥不断增加投入，宜兴和常熟市两地水稻土磷库不断累积。速效磷含量与第二次土壤普查结果相比增加显著，不同水稻土类型增幅在 15%~579% 之间。全磷含量也有明显提高，不同水稻土类型增幅在 4%~128% 之间。磷在土壤中大量累积，不仅使施磷无效，而且也导致磷资源、能源的浪费和对水环境产生压力。初步研究目前“稻季不施磷”的施磷措施并不影响水稻产量，具有节约资源、农业增效和环境保护的三重意义。该方法是建立太湖地区稻麦轮作系统既能保障作物对磷营养的需求，又能控制农田土壤磷过量累积的科学施磷制度的重要组成部分。但“稻季不施磷”能否持续保证水稻产量？保证多久？需要进一步试验去验证，最终目的是建立既能满足作物生长的磷营养需求，又不造成土壤磷过量累积的科学施磷制度。

**致谢：**中国科学院南京土壤研究所鲁如坤教授、郑州大学许秀成教授在对科学施磷制度的基础研究中给予我们很多建设性的意见和建议，在此深表感谢！

### 参考文献：

- [1] Tinker PB. Economy and chemistry of phosphorus. *Nature*, 1977, 27: 103-104
- [2] Gilbert N. Environment: The disappearing nutrient. *Nature*, 2009, 461: 716-718
- [3] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 212-273
- [4] 沈善敏. 论我国磷肥生产与应用对策(一). *土壤通报*, 1985, 16(3): 97-103
- [5] 沈善敏. 论我国磷肥生产与应用对策(二). *土壤通报*, 1985,

- 16(4): 145-151
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008
- [7] FAO. Current World Fertilizer Trends and Outlook to 2011/12. FAO Report, Rome, 2008
- [8] Qiu J. Phosphate Fertilizer Warning for China. *Nature News*, 2010
- [9] Zou Q, Lu CA, Zhang WL. Preliminary study of phosphorus runoff and drainage from paddy field in the Taihu Basin. *Chemosphere*, 2003, 50: 689-694
- [10] Zhang HC, Cao ZH, Wang GP, Zhang HG, Wang MH. Winter runoff losses of phosphorus from paddy soils in the Taihu Lake region of south China. *Chemosphere*, 2003, 52: 1461-1466
- [11] Zhang ZJ, Zhang JY, He R, Wang ZD, Zhu YM. Phosphorus interception in floodwater of paddy field during the rice-growing season in Taihu Lake Basin. *Environmental Pollution*, 2007, 145: 425-433
- [12] 宜兴市统计局、国家统计局宜兴调查队. 宜兴统计年鉴. 宜兴: 2011
- [13] 常熟市统计局. 2011 常熟统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2011
- [14] 宜兴县土壤普查办公室. 江苏省宜兴县土壤志. 无锡: 无锡市农业局, 1988
- [15] 常熟市土壤普查办公室. 江苏省常熟市土壤志. 常熟: 常熟市土壤普查办公室, 1985
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [17] 鲁如坤, 谢建昌, 蔡贵信, 朱其清, 宣家祥, 范晓晖, 施卫明, 时正元, 苏彦华. 土壤—植物营养学原理与施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998
- [18] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展. *土壤学进展*, 1990, 18(6): 1-5
- [19] 鲁如坤, 蒋柏藩, 牟润生. 磷肥对水稻和旱作的肥效及其后效的研究. *土壤学报*, 1965, 13(2): 152-160
- [20] 鲁如坤, 史陶钧. 土壤磷素在利用过程中的消耗和累积. *土壤通报*, 1980(5): 6-8
- [21] 王浩. 湖泊流域水环境污染治理的创新思路与关键对策研究. 北京: 科学出版社, 2010