

淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究

谢学俭 冉 炜 沈其荣*

(南京农业大学资源与环境科学学院 南京 210095)

摘 要 采用地下垂直埋入钢管收集土壤淋溶液的方法,在江苏宜兴对水稻生长季节内稻田土壤中 P 向下迁移作了研究,重点主要集中在淋溶液中 P 的浓度、渗漏速度以及 P 的淋溶量测定几个方面。结果表明,在整个水稻生长季中淋溶液的溶解 P 与全 P 浓度均不高,溶解 P 的浓度维持在 0.02mg/L 以下,全 P 的浓度则在 0.03~0.08mg/L 之间;土壤直渗速度为 0.53cm/天;本实验方法测得的淋溶量中,整个水稻生长季在施 P 量为 30kg/hm² 的条件下,P 的淋溶量为 3.77 kg/hm²,其各土壤层次中土壤表层淋溶量所占比例最大,占各层总淋溶量的 36%。

关键词 溶解 P; 全 P; 淋溶; 迁移

中图分类号 X131.3

磷是重要的生命元素之一,其在农业生产中的地位是不可替代的。但近年来由于 P 肥的不当使用而引起的一系列环境问题愈来愈引起了人们的重视,其焦点主要集中在由于农田 P 素的迁移而引起的水体污染方面。由此,许多研究均集中在 P 肥施入土壤后其迁移情况。我国水田面积广阔,其 P 肥的施用是否合理直接关系到我国的农业生产效益及水环境的保护等问题。对于 P 素向水体迁移方面的研究已进行了很多,主要涉及径流、农田排水及淋失等几个方面^[1,2]。径流受许多自然条件限制,难以定量的径流来说明 P 的流失情况,而由于水田长期处于淹水状态下,其向下淋失过程相对稳定,由此途径引起的 P 淋失可以定量测得,即可研究通过该途径的农田 P 迁移对农业及环境影响的贡献,在水田面积较大的我国对此进行研究对实际的农业生产及农田的养分管理意义重大。本试验选择在近太湖水稻种植集中的苏南宜兴地区,对 P 素的直渗迁

移进行研究,旨在阐明太湖地区水稻土壤 P 素向下垂直迁移特征,为评价农田土壤 P 素对水体富营养化的贡献提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验设在江苏省宜兴市查林村。该地区地处江苏南部,北纬 30°21',东经 119°45',东濒太湖,属亚热带湿润气候。干湿季明显,年均降雨量在 1100mm 左右。夏季光照较充足,有 600 多小时,年均气温在 15.8℃。无霜冻日数为 240 天。由于多年引种水稻,该地区农田土壤大部分为水稻土。耕作制度以稻麦轮作为主。其土壤的一些基本理化性质见表 1。试验季 P 肥作为基肥一次性施入。所用肥料为复合肥,P₂O₅ 含量为 15%。P 肥施用量为 P 30kg/hm²,施肥日期为 6 月 28 日。

表 1 田间试验供试土壤的一些基本理化性状

Table 1 Some physical and chemical properties of the soils

土壤层次 (cm)	Ph (0.01mol/L CaCl ₂)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	有效 P (mg/kg)	颗粒组成 (g/kg)		
						砂粒	粉粒	粘粒
0~10	6.05	17.1	1.72	0.37	6.54	87	612	301
10~20	7.07	9.6	1.05	0.32	6.16	70	630	300
20~40	7.04	4.9	0.59	0.25	5.17	31	690	279
40~60	6.88	1.5	0.30	0.15	1.74	305	329	366
60~80	6.67	1.2	0.20	0.18	2.00	60	555	385

国家重点基础研究发展规划项目 (G1999011806)。

*通讯作者

1.2 试验方法

1.2.1 收集淋溶液的设施及淋溶液的采集 将长度分别为 30、50、70 及 90cm 的不锈钢管垂直埋入土体，每个钢管露出地面 10cm。将其内部的土壤清空，用以收集土壤淋溶液。样品每 1 周采集 1 次。采样前将管内溶液清除干净，而后收集的溶液即为当时土壤 20、40、60、80cm 各土壤深度的淋溶液。样品采集后加少许酸液，用以抑制微生物的活动。

1.2.2 渗漏速度的测定 试验设施：按重复数量的要求，将与重复数相等数量（本试验为 5 个）的有底无盖 PVC 箱（40cm×40cm×40cm）埋入地下 10cm，箱内底部用挖出的土壤填平。利用箱内外的水位落差测定渗漏速度（箱内水位下降=蒸发量，箱外水位下降=蒸发量+渗漏量）。渗漏速度的测定：将箱内注入一定量的水，待灌水后水位稳定即可开始读数。各箱即为重复。获取数据后计算取其均值即为渗漏速度。每次读数间隔时间应保持一致，各次测定间隔时间应不少于 24 h。

1.2.3 淋溶量的计算 将淋溶液浓度与渗漏速度相乘，即可得到淋溶量，公式如下：

$$Q = K \cdot V \cdot S \cdot \Delta t \sum_{i=1}^n C_i$$

其中：

Q：淋溶量（kg/hm²），C_i：两次相邻采样时淋溶液样品的平均浓度（mg/L），V：渗漏速度（cm/天），S：水田面积换算（hm²），t：时间（即 7 天），K：单位转换系数。

1.3 分析方法

土壤全 P、速效 P、有机质的测定参见文献[3]。颗粒组成、pH 测定参见文献[4]。土壤深滤液中的溶解 P 与全 P 测定参见文献[5]。

2 结果与讨论

2.1 淋溶液浓度的变化

实验表明，P 肥在施入水稻田后的短时期内存在一个迅速向下迁移的过程。在以本实验方法收集到的淋溶液中，其初期各层次的全 P 与溶解 P 浓度均较高，施肥后仅 1 天土壤底层（60~80cm）的淋溶液中溶解 P 浓度达 0.3mg/L，全 P 浓度则达到 0.6mg/L。而同期表层（0~20cm）淋溶液中溶解 P 与全 P 的浓度则分别为 0.9mg/L 和 2.2mg/L。施肥后的短时期内，土壤下层的 P 浓度已经较高，说明

该时期的 P 肥的迁移主要是随土壤裂隙水的运动而迅速向下移动的。施肥以后的半个月，溶解 P 与全 P 的浓度逐渐降低，到半个月以后则基本稳定，且二者浓度均很低，溶解 P 的浓度维持在 0.01mg/L 以下，全 P 的浓度则在 0.03~0.08mg/L 之间（图 1、2）。在施肥后 1 周采集的样品中，其全 P 与溶解 P 的浓度仍然较高，底层与表层分别为 0.2mg/L，0.5mg/L 及 0.7mg/L，2.0mg/L。土壤各层次淋溶液中溶解 P 与全 P 的浓度均表现为上层高于下层，这在图 1 及图 2 中显现不明显。这是因为土壤溶液中的 P 会逐渐被土壤吸附或与 Fe、Al 等形成沉淀物，同时也表明一旦 P 被土壤固定后，便很难向下迁移，这与非淹水条件下土壤 P 的移动速度慢是一致的，而其结果是导致施入土壤的 P 大部分滞留在土壤表层。当土壤裂隙优势流及土壤对 P 的吸附固定过程基本完成，即土壤对 P 的吸附与解吸过程达到动态平衡时，土壤淋溶液中的溶解 P 与全 P 的浓度即基本保持平稳。

在传统的水稻种植中，苗期有一次田间排水。从本实验结果来看，施肥初期土壤表层淋溶液中的溶解 P 浓度较高，如果在施肥后的半个月内进行苗期排水将增加农田中 P 向水体的迁移量。另外，土壤表层 P 的富集，又增加了暴雨径流导致的颗粒 P 流失的风险。因此，加强施 P 肥后的田间水分管理，对于减少 P 的流失意义重大。

据张水铭等^[6]对苏南太湖地区的 5 种主要水稻土的研究发现，在常规施肥条件下，各种水稻土水田渗漏水中 P 的浓度波动在 0.03~0.1mg/L 之间，该实验是利用 PVC 渗水计和稻田渗漏量测定仪进行的。虽然实验方法不同，但本实验的结果与该实验结果在数值上基本吻合。

另外，本实验还表明，在整个生长季里，溶解 P 与全 P 的浓度均有过小幅度的波动，其中较明显的一次是在 7 月末 8 月初，其溶解 P 与全 P 的浓度均明显增加（图 1、图 2）。结合农事管理来考虑，在此期间，稻田进行了一次烤田，二者浓度的增加可能与在烤田期间，土壤生物的活动加剧，从而促使土壤 P 的有效性提高有关。

据张志剑等^[7]的研究发现，扰动土层在一定程度上可以释放土壤中的 P。扰动土层的结果是使土壤的物理环境发生变化，如土壤孔隙状况及相应的通气状况等。这些变化的结果可以促使好气土壤生物活动加剧，当这个过程与土壤结构的物理性破坏

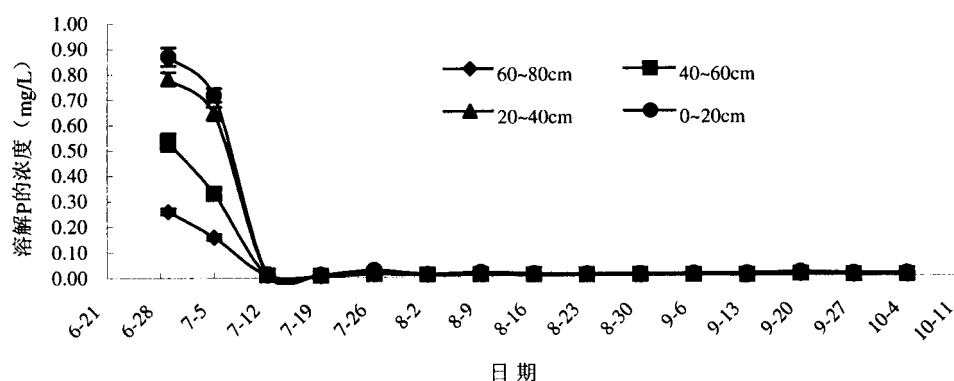


图 1 水稻生长季土壤淋溶液中溶解 P 的浓度变化

Fig. 1 Change in concentration of dissolved P in leachate during the whole rice growing season

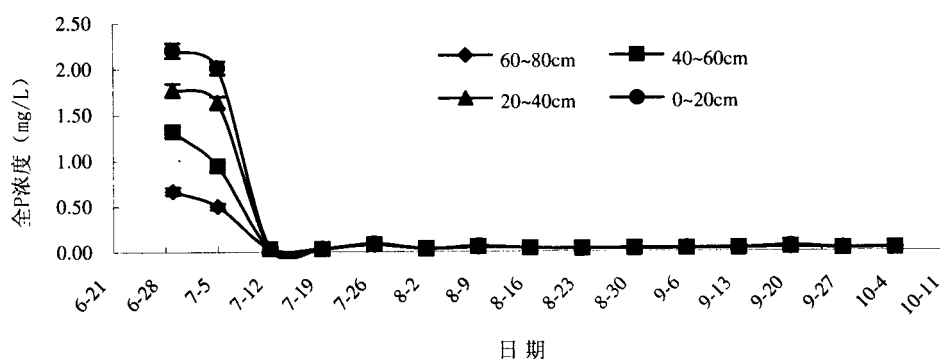


图 2 水稻生长季土壤淋溶液中全 P 的浓度变化

Fig. 2 Change in concentration of total P in leachate during the whole rice growing season

同时作用时,导致一部分土壤 P 得以释放。在烤田期间,由于阳光暴晒,土壤在由淹水状态转为非淹水状态的过程中土壤结构(如土壤孔隙等)发生变化,使得一部分土壤 P 得以释放,这在机理上与扰动土层有异曲同工之处。

在以往的研究中,P 的运移主要是在非淹水条件下进行的,其运移距离很小,在严重缺 P 的红壤上进行试验,当施入 KH_2PO_4 时,大部分 P 被固定,移动困难,试验土柱上 P 在 3~14 天的迁移距离仅为 1.6~2.0cm^[8]。而由本实验的结果可以看出,施 P 肥后的一段时间内,较深土壤层次中其 P 的浓度也较高,说明 P 肥施入淹水土壤后其运移要比在非淹水土壤中的运移活跃。相对于非淹水条件下的实验,这是淹水土壤中的独特现象。正如前面分析所说,这可能与淹水土壤中的优势流有关。但优势流过后,P 的向下迁移还是比较困难,在本实验中的表现就是土壤淋溶液中的 P 浓度低而稳定,而其结果就是

导致水田中施入的 P 肥仍会有大部分滞留于表层土中。P 在表土中的富集从另一个侧面来讲,如果在排水堰较低或遇到暴雨时,会增加农田 P 随排水或径流迁出农田进入水体而造成水体污染的风险性。因此,如何减少 P 在表土中的累积是个很关键的问题。

2.2 渗漏速度

本实验每次读数的间隔时间为 3 h,将 5 个重复取均值,即为各次测定的渗漏速度(表 2)。

由实验结果可以看出测定的平均渗漏速度为 0.53cm/天。在测定的过程中,发现各次的测定结果差别不大,其速度仅在昼夜有一定差别。这是因为白天蒸发量较大而引起的。根据渗漏量的测定,不同类型水稻土日平均渗漏量为 4~10cm 范围^[9],其渗漏速度受土结构,排灌方式等影响很大。本实验结果正在此范围内,但在该范围偏低,这可能因为宜兴土壤粘粒含量较高的缘故(见表 1)。

表 2 土壤直渗速度 (cm/天)

Table 1 Soil vertical leaching rate (cm/d)

观测次数	8:00~11:00	11:00~14:00	14:00~17:00	17:00~20:00	20:00~23:00	23:00~2:00	2:00~5:00	5:00~8:00
第 1 次	0.51	0.72	0.65	0.57	0.52	0.50	0.45	0.40
第 2 次	0.56	0.73	0.67	0.53	0.51	0.49	0.46	0.41
第 3 次	0.49	0.70	0.60	0.57	0.50	0.50	0.42	0.45
第 4 次	0.54	0.62	0.69	0.56	0.51	0.51	0.45	0.40
第 5 次	0.57	0.70	0.65	0.54	0.50	0.50	0.48	0.46
第 6 次	0.51	0.61	0.60	0.51	0.49	0.50	0.45	0.40
平均值	0.53							
标准偏差	0.09							

2.3 淋溶量

测得淋溶液浓度与渗漏速度后,即可利用 1.2.3 的公式计算 P 的淋溶量(表 3)。本实验对淋溶量的测定是全生育期采样,累加计算即为各层的淋溶总量。

表 3 水稻全生育期内土壤 P 的淋溶量 (kg/hm²)

Table 3 Quantities of P leached down during the whole season

土壤层次 (cm)	P 的淋溶量 (kg/hm ²)		
	施肥前后 2 周	施肥 2 周后	总淋溶量
0~20	1.16	0.20	1.36
20~40	0.94	0.19	1.14
40~60	0.60	0.18	0.78
60~80	0.32	0.17	0.49

在实际的农业生产中,0~20cm 层次的土壤中所淋失的 P 对农业生产的意义不大,因为大部分农作物的根系均集中在 15~20cm 的土壤层次中。但是如果这部分 P 进入地下水或地表水中,其对环境的影响却是不可忽视的。在本实验中,由土壤表层淋失的 P 占各层淋失总量的 36%。这部分 P 的流失不仅是农业上的经济损失,更重要的是其造成的负面的环境效应。由土壤底层(60~80cm)淋失的 P 则可以进入地下水。与土壤直渗液中溶解 P 与全 P 的浓度相对应,淋溶量也为由表层至下逐渐降低。

据吴岳等^[9]在宁夏铜峡县的调查中发现,在 1982 年对该地区的 7 条沟沟水 P 含量测定时发现,若以漫灌方式在春季灌头水以后初冬灌冬水时,其排出的 P 占施肥量的 58.7%。本实验是在稳流状态下测得的淋溶损失,其迁移出的 P 有可能有部分来自土壤原有 P,因此无法确切计算其与当季施 P 量的关系。但就其迁移量来讲,这部分的 P 无论是从农业生产的角度还是从环境效应的角度考虑都是不可忽视的。

3 小 结

(1) 本实验研究了在当地的施肥制度下,在水稻生长季宜兴水稻田中的 P 通过淋溶向水体的迁移状况,证明在水稻生长季通过淋溶方式有相当部分的 P 流出农田进入水体。该结果是通过一种新的实验方法获得的,其适用程度和范围还有待于进一步的研究考证,但本实验结果可以对农田 P 通过淋溶向水体的迁移量化方面作以参考。

(2) 以淋溶的方式由水田向水体迁移的 P,其来源可有两种,一是当季施入土壤的 P 肥,另一个就是土壤中原有的 P。在本实验中只对迁移的 P 作了量的测定,但没有区分其来源。为了使 P 肥的施用更为合理,提高其当季利用率,减少其对环境的威胁,对施入土壤的 P 肥进行示踪研究是非常必要的。通过示踪研究,可以对 P 肥在进入土壤后的各途径行为进行准确的量化,对实际的农业生产意义重大。

(3) 由本实验结果看,在 P 肥施入土壤后,全 P 的浓度达到稳定后仍保持在 0.03~0.08mg/L 之间。若以 0.05g/L 作为引起水体富营养化的 P 浓度阈值(据 Archer 等,引自参考文献[10]),那么就长远观点来讲,通过直渗向水体迁移的这部分 P 对环境的影响是不可忽视的。如何更加合理地施用 P 肥,改善并提高 P 肥的当季利用率,减少其在土壤中的累积是我们今后将面临的重要任务。

参考文献

- 1 张志剑,朱荫湄,王珂,王光火,董亮,郑洪福.水稻田土—水系统中磷素行为及其环境影响研究.应用生态学报, 2001, 12(2): 229~232

FERTILITY DEGRADATION OF ORCHARD SOILS IN RED EARTH REGION OF GUANGXI

Jiang Zepu Wei Guangbo Meng Yancheng Tan Hongwei Liu Bin Huang Yuyi

(*Institute of Soil and Fertilizer, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007*)

Abstract Based on the data of the secondary soil survey of Guangxi province, soil fertility of four orchards, Orange, Litchi, Longan and Mango was investigated in Guangxi province. Results showed that the orchards all deteriorated in soil environment, which was mainly expressed generally in the form of acidification, decreasing organic matter content, lowering ECEC and rising density. For instance, soil pH in the four orchards (Orange, Litchi, Longan and Mango) dropped separately by 0.95, 0.70, 0.89 and 0.64 unit; soil organic matter decreased in content, especially in the Orange and Mango orchards, by 50.63% and 22.45% separately; soil ECEC lowered by 43.64% in the Orange orchard, 30.77% in the Mango and 27.27% in the Longan; and soil bulk density increased by 14 to 37%. As a result of increased fertilizer application, soil N, P and K showed an increasing trend in the Orange, Litchi and Longan orchards, But total N, readily available P and readily available K in the Mango orchard dropped significantly. Integrated analysis of the soil environment and nutrient factors of the orchard soils with the mathematical statistic software—SPSS shows that soil fertility degradates in the Orange, Longan and Mango orchards, especially in the Mango orchard. Thanks to higher NPK application in the Litchi orchard, soil fertility there has somewhat improved.

Key words Orchard in red earth region, Soil fertility, Degradation

(上接第 509 页)

- | | |
|--|--|
| 2 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 韩小勇, 夏首先. 氮磷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 | 7 张志剑, 王珂, 朱荫湄, 王光火, 施丹潮. 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 |
| 3 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 第 2 版. 北京: 农业出版社, 1981, 33~35, 68~70, 73~74 | 8 董元彦. 磷钾在红壤中的运移与扩散系数. 华中农业大学学报, 1995, 14 (3): 247~25 |
| 4 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978, 142~150, 500~508 | 9 吴岳, 郭天玲, 白建华等. 灌溉条件下氮磷钾随水流失污染水体的试验初报. 农业环境保护, 1986, 5 (5): 41~43 |
| 5 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999, 133~135 | 10 高超, 张桃林. 农业非点源污染对水体富营养化的影响及对策. 湖泊科学, 1999, 11(4): 369~375 |
| 6 张水铭, 马杏法, 汪祖强. 农田排水中磷素对苏南太湖 | |

P LOSS THROUGH VERTICAL LEACHING FROM PADDY FIELD UNDER SUBMERGED CONDITIONS

Xie Xuejian Ran Wei Shen Qirong

(*College of Natural Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095*)

Abstract A new method was used in the experiment that was focused on vertical leaching of phosphorus in paddy soils during the rice-growing season. Some steel cylinders were inserted into the soil to different depths to collect water samples in Yixing, Jiangsu province. Results showed that neither the concentrations of soluble P nor the total P in the leachate was high, being below 0.02mg/L or between 0.03~0.08mg/L, respectively. The vertical leaching rate was about 0.53cm/day. The total amount of P lost through leaching was 3.77kg/hm², 36% of which was from the depth of 0~20cm, when the P application rate was 30kg/hm² during the rice growing season.

Key words Soluble P, Total P, Vertical leaching, Transport