

土壤磷素淋溶预测指标研究

孙宏飞, 吕家珑, 刘利花, 张翠荣

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 对西北农林科技大学农作一站长期肥料试验地 0—20 cm 耕层土壤研究表明: (1) 易释放的各形态磷与全磷呈正相关关系; (2) 土壤磷素的释放能力随 pH 值的增大而减小, 不同处理的缓冲能力不同。释放能力的大小也与全磷的多少有关; (3) 土壤全磷与 PSD(土壤磷饱和度)有很好的正相关性。因此, 基于以土壤饱和度为 25% 作为预测指标, 把土壤全磷环境敏感指标(TP)为 1.92 g/kg 作为关中磷淋溶的环境敏感指标。

关键词: 土壤磷饱和度(PSD); 全磷(TP); 预测; 释放

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2006)03—0055—04

中图分类号: S153.61

Research on Predicting Index of Phosphorus Leaching from Soil

SUN Hong-fei, LU Jia-long, LIU Li-hua, ZHANG Cui-rong
(College of Resources and Environmental Science, Northwest University of
Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Researches on the 0—20 cm surface soil in a long-term experiment of soil and fertilizer at the First Station of Agricultural Cultivation of Northwest University of Agricultural and Forestry showed that easily released phosphorus of various fractions had a close positive correlation with total phosphorus (TP). The ability of soil releasing phosphorus reduced as pH increased, and the buffer capacity differed in different treatments. The releasing ability was also related to TP. Total phosphorus of surface soil had a significantly positive relation with PSD. So, the PSD of 25% of the soil was considered to be a predicting index, and TP of 1.92g/kg could be used as sensitive environmental index which would predicted phosphate leaching in Guanzhong Plain soil.

Keywords: phosphate saturation degree (PSD); total phosphorus (TP); prediction; releasing

农业土壤磷进入地表和地下水体的途径主要有: 侵蚀、地表径流和淋溶。由于耕层以下的土壤(含磷很低)是吸持磷素的巨大容量库, 且磷难以移动, 多数人认为土壤磷向下淋溶的可能性不大。所以早在 1976 年, Williams 虽在排水中测得磷的浓度高达 1.45 mg/L, 他也没有从土壤磷角度作出解释^[1]。Cook 认为, 排水中磷浓度非常小, 且和磷肥施用无关, 由自然、pH、母质、气候决定而与人的社会活动无关^[1]。Sharpey & Menzel 认为, 磷的亚表层径流(淋溶)和施肥关系特别小^[1]; 但 Van der Zee(1988) 却证明出土壤饱和度(phosphate saturation degree; PSD)与淋溶出耕层的磷最大浓度关系, 并表示出 Olsen-P 与 PSD 的正相关关系^[2]。G. Heckrath 等在对英国洛桑实验站著名长期肥料试验地—Broadbalk 地表 65 cm 下排水管中排出水研究发现, 水中磷浓度很高, 甚至达近 2 mg/kg, 远远超过水质磷含量标准^[3], 认为其原因主要是长期施肥土壤累积磷含量很高, 土

壤固磷能力达到饱和, 水溶性磷和吸附磷通过土壤孔隙下移。近年来, 国外有关磷素有土壤淋溶进入水体的报道逐年增加, 国外有关的研究主要集中在如何预测和防治方面, 但没有统一认识。

Heckrath 等(1995) 提出用排水中反应性无机磷含量和与之对应的土壤耕层 Olsen-P 含量来找出土壤磷素淋溶的土壤耕层 Olsen-P 含量的“突变点”以预测土壤磷素的淋溶趋势^[3]。N. Hesketh 等提出用 CaCl₂-P 和 Olsen-P 含量之间关系曲线的 Olsen-P 含量“拐点”作为土壤磷素淋溶的“突变点”^[4]。吕家珑、Fortune S 和 Brookes P C 对 Broadbalk 试验地测定的土壤磷素淋溶“突变点”Olsen-P 含量与 Hesketh 等 2000 年的结果完全一致, 再一次证明该方法的可靠性^[5]。本试验以长期不同施肥(24 a)的土壤为材料, 测定不同形态的磷, 不同 pH 磷的释放能力, 观察其与全磷关系, 并尝试找出长期不同施肥土壤中全磷的环境敏感指标, 以预测西北地区土壤磷淋溶潜力。

收稿日期: 2005-10-31

资助项目: 国家 973 项目(2005CB121102); 教育部博士点基金(20040712001); 西北农林科技大学创新团队项目

作者简介: 孙宏飞(1980—), 女(汉族), 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤化学。E-mail: sunhongfei12423@sina.com。

通讯作者: 吕家珑(1962—), 男(汉族), 博士, 教授, 博士生导师, 从事土壤化学和土壤环境化学科研和教学工作。E-mail: lj111@nwstuf.edu.cn。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验设置于陕西杨凌西北农林科技大学农场, 土壤系土(土垫旱耕人为土), 典型石灰性土壤。小区面积 19.8 m², 每个处理重复 3 次。1977 年 10 月播种小麦试验开始, 采取小麦和玉米(除休闲地外)轮作的方式, 一直未中断持续至今。田间试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

处理	施肥种类			
	尿素	过磷酸钙	玉米秸秆	厩肥
无肥	0	0	0	0
化肥	450	525	0	0
休闲	450	525	9375	0
低秸	450	525	9375	0
中秸	450	525	18750	0
高秸	450	525	37500	0
厩肥	450	525	0	37500

1.2 土样采集及测定方法

1.2.1 土样采集 样品采自不同施肥处理的定位试验地 0—20 cm 耕层, 风干过 1 mm 过筛。测 NaHCO₃-P, NaOH-P, HCl-P 和总 P, 不同 pH 值下 P 的释放, 土壤潜在磷的最大吸附量 Q_m 及可解吸的磷量 STP。

1.2.2 测定方法 NaHCO₃-P, NaOH-P, HCl-P 是用同一土样依次提取, 比色法测定^[6]。具体步骤: 称 0.5 g 风干土样 2 份, 先用蒸馏水浸提, 弃去浸提液; 一份用 0.5 mol/L NaHCO₃ 提取, 另一份用 CHCl₃ 处理后再用 0.5 mol/L NaHCO₃ 处理; 滤渣再用 0.1 mol/L NaOH 提取, 最后用 1 mol/L HCl 提取, 浸提液分别用钼锑抗比色法测定。总 P 则用浓 H₂SO₄-HClO₄ 消化、钼锑抗比色法测定^[7]。

Q_m 是由 PSI(P 吸附指数) 计算得到^[8], 如下式:

$$Q_m = [PSI + 51.8][0.5]^{-1} \quad (1)$$

$$PSI = V \times (P_i - P_f) \quad (2)$$

式中: V ——吸附液体积, $P_i = 300 \text{ mg/L}$ 。称 1.00 g 土样于 100 ml 离心管中, 加入浓度为 300 mg/L 的磷标准液和 0.0125 mol/L CaCl₂, 测上清液中 P 浓度 (P_f)

$$PSD = STP \times 100\% / (Q_m + STP) \quad (3)$$

式中: $Q_m + STP$ ——土壤磷总吸附容量; STP——已被吸附的可解吸的磷量, 用 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 8.5) 在液土比为 1:20 连续震荡 24 h 提取, 比色法测定。

此外, 为了了解土壤磷在不同 pH 条件下的释放, 选择了不同全磷含量的 5 个土样进行了磷在不同 pH 下的溶解释放试验。每个土样用 1 mol/L HNO₃ 调土壤悬液 pH 值 1.5~8.5, 震荡后测 pH 和 P 浓度。

2 结果和分析

2.1 土壤中磷的积累及各形态磷的分布

不同施肥处理中全磷的含量在 1.6~2.2 g/kg 之间。施用厩肥的处理全磷量明显高于其它处理。秸秆处理的全磷稍高于休闲处理, 均大于无肥和化肥处理。这说明肥料的施用有利于全磷的积累。在西北半干旱区, 秸秆不能很好地腐熟, 施用量的多少对全磷的积累并无明显的影响。

0.5 mol/L NaHCO₃ 所提取的磷为植物易利用的有机磷和无机磷的总和, 又称 Olsen-P。从表 2 可知, 随着各施肥处理全磷的提高 NaHCO₃ 释放的活性磷也逐步增加, 即厩肥>高秸、休闲、中秸、低秸>化肥>无肥。施肥处理能提高有效态的磷量, 其中以厩肥的效果最为显著, 休闲处理对有效磷的影响近似于秸秆处理。0.1 mol/L NaOH 提取的则是被铁铝化合物化学吸附的稍稳定的磷。

表 2 不同处理中各形态的磷的浓度

mg/kg

处理	不同形态的磷				
	NaHCO ₃ -P	CHCl ₃ /NaHCO ₃ -P	NaOH-P	HCl-P	TP
无肥	11.24c	14.63d	2.79c	140.03b	1664.3
化肥	37.06bc	29.58cd	6.98bc	201.61b	1847.9
休闲	58.42ab	55.78b	7.59bc	234.97ab	1934.7
低秸	74.47ab	34.79c	6.54bc	214.4b	1940.2
中秸	44.28bc	55.27b	8.89b	215.42b	2091.4
高秸	43.29bc	39.41c	11.69ab	198.7b	1963.7
厩肥	95.36a	85.86a	14.57a	327.82a	2226.4

石灰性土壤以钙结合态磷为主, 而铁铝结合态磷则较少, 所以施肥处理 NaOH—P 的影响并不太明显。化肥处理没有增加铁铝化合物化学吸附的磷量, 而其它处理稍增加了 NaOH 释放的磷量, 且是 厩肥 > 中秸 > 低秸、休闲。1 mol/L HCl 提取的是磷灰石中的磷, HCl—P 在 4 种形态的磷中所占的含量最高。NaHCO₃—P 与 CHCl₃/NaHCO₃—P 之差为约占总微生物磷 40% 的微生物磷。有机肥的施用提高了土壤的团聚性和微生物活性, 使得一部分高稳态有机磷的矿化为易释放态, 并增加了活性态的微生物磷量, 这也可由 NaHCO₃—P 与 CHCl₃/NaHCO₃—P 之差看出。有机肥的施用明显增加了磷灰石形态的磷。高秸处理的 HCl 释放磷量却低于无肥处理, 这可能是由于分解秸秆的微生物释放的有机酸使得一部分易溶态钙磷溶解出来。

2.2 磷在不同 pH 值下的释放能力与全磷的关系

2.2.1 磷在不同 pH 值下的释放能力 选取不同全磷含量的处理的土样时, 由于在秸秆处理中, 土壤施低秸和高秸的土壤全磷含量差异并不显著, 只选中秸处理的土壤进行不同 pH 下磷的释放试验。试验结果如图 1 示。

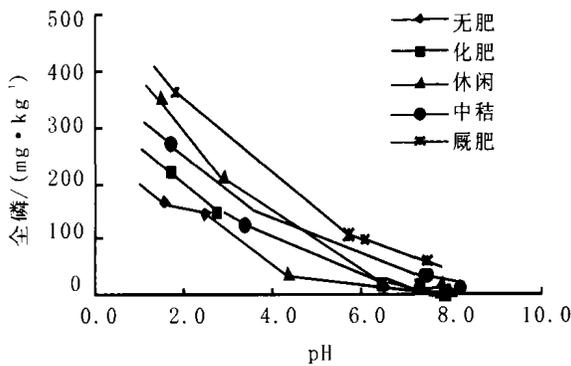


图 1 不同 pH 下土壤磷的释放量

不同处理的土壤都是随酸度的升高土壤释放的磷量明显减少, 也就是说磷的释放能力随 pH 值的增大而减小(图 1)。试验过程中调不同酸度时在各施肥处理土壤中加入的 HNO₃ 量是相同的, 而土壤的表现 pH 却有所不同, 显示出各处理土壤对酸的缓冲能力的不同。休闲处理对酸度的变化最为敏感, 全磷的释放量随 pH 值的升高下降幅度高于其它处理。厩肥和秸秆处理的缓冲能力较好, 这是因为土壤有机质分解时产生了有机胶体和有机—无机复合胶体, 可很好地吸附 H⁺, K⁺, Na⁺ 等多种阳离子, 因而具有很好的缓冲能力。厩肥释放磷的能力最大, 且各处理的磷的释放能力与全磷量一致, 均是 厩肥 > 中秸 > 休闲 > 化肥 > 无肥。说明磷的释放与全磷相关(表 3)。

2.2.2 土壤释放磷量与全磷的关系 如图 1 所示, pH 和磷的释放量有很好的相关性, 达到了显著水平。因此设定几个不同的 pH, 根据其趋势线的公式算出相应的磷的释放量。当然, 算出的理论值与实际释放磷有一定差距, 但基本上可以反应各处理土壤的释放趋势。

用不同酸度下各施肥处理的释放磷与全磷作散点图如下(图 2)。

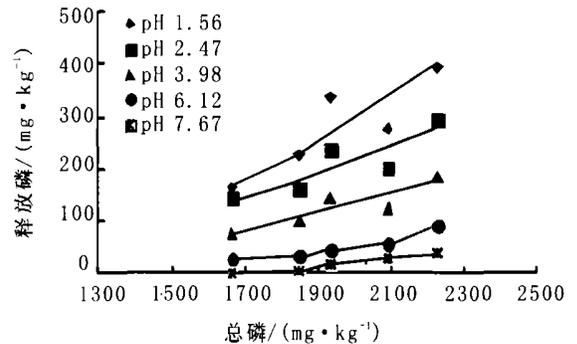


图 2 释放磷与全磷

表 3 不同 pH 下磷理论释放量

mg/kg

pH	处理				
	无肥	化肥	休闲	中秸	厩肥
1.56	164.20	228.00	337.30	275.50	395.50
2.47	146.20	163.50	239.30	201.50	292.70
3.98	75.56	96.65	137.50	124.80	186.00
6.12	28.94	36.31	45.75	55.57	89.74
7.67	1.99	4.66	17.46	29.05	38.24

不同酸度下土壤的释放磷与自身的全磷有很好的相关性, 相关系数都在 0.8 以上。且 pH 越大, 磷的释放量与全磷的相关系数越大, 接近显著水平。石灰性土壤中的磷易被钙固定, 形成 Ca₂—P, Ca₈—P,

直至 Ca₁₀—P, 只要存在影响磷灰石溶解平衡的因子, 都会改变各形态的比例, 使得释放性磷(Ca₂—P)或固定性磷(Ca₁₀—P)增加。当然, 磷的释放与很多其它因素有关, 如土壤质地、阳离子交换量、酸碱性、

地区的年降雨量等。年降雨量大的地区的土壤要比年降雨量小的地区的土壤磷素的淋溶相对要大(D. H. Pote, T. C. Daniel 等人曾做过这方面的研究^[2-9])。

2.2.3 用土壤全磷“突变点”预测磷素淋溶趋势 荷兰及很多国家都已用土壤磷的饱和度为 25% 作为土壤磷环境敏感指标。以上数据也显示了土壤易释放态磷及不同 pH 下释放的磷都与全磷有很大的相关性,且土壤磷饱和度的增加也与土壤全磷的积累有关,因此可以用全磷作为磷淋溶的指标之一。用试验数据求得的 PSD(数据)与全磷作图(图 3)。

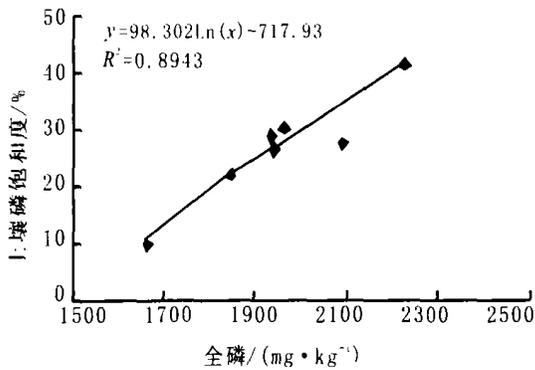


图 3 全磷与饱和度关系

全磷与土壤磷饱和度的相关系数达到 0.95。当土壤磷的饱和度为 25% 时,全磷含量应该有一个“突变点”。依据图 3 中的公式求得土壤全磷“突变点”值为 1.92 g/kg。即对关中土而言,当土壤全磷含量超过 1.92 g/kg 时,土壤磷就会随水向下移动(淋溶),并对环境造成威胁。

3 讨论

关中地区地下水位较深,用 Heckrath 用排水中反应性无机磷含量和对应的土壤耕层 Olsen-P 含量找预测土壤磷素的淋溶趋势“突变点”不太实际;而用 Hesketh 等提出用 CaCl₂-P 和 Olsen-P 的关系曲线上的 Olsen-P 作为“拐点”也不适合石灰性土壤的特性,大量的钙基的存在使得 CaCl₂-P 的测出值远小于本身的含量,进而对应的 Olsen-P 也偏小。荷兰及多数国家把土壤磷饱和度为 25% 作为土壤磷环境预测指标。由图 3 知,该区土壤的 PSD 变化范围较大,在 9.4%~41.6% 之间,按照饱和度指标,则只有

无肥和化肥处理的 PSD 小于 25%,其它处理均有可能发生磷素淋溶。因此,基于上面试验结果,用全磷作为该地区土壤磷淋溶的指标较为可行。

从本试验可知,秸秆、有机肥与化肥的使用增加了土壤磷的可释放态磷和全磷,但也增加了土壤磷淋溶的可能性。长期施用有机肥(厩肥、秸秆)能明显增加土壤的缓冲能力和磷释放的潜力。对于关中土而言,土壤全磷含量超过 1.92 g/kg 时,土壤磷素向下淋溶的几率增加。尽管干旱少雨,淋溶的机会少,但近年来肥料的过量施用却使得这种机会增加。

[参 考 文 献]

- [1] Matthiesen H, Emeis K, Cjensen B T. Evidence for phosphate release from sediment in the Gotland Deep during oxic bottom water condition[J]. *Meynial*, 1998, 50: 175-190.
- [2] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Seasonal and soil drying effects on runoff phosphorus relationships to soil phosphorus[J]. *Soil Sci. Soc Am. J.*, 1999, 63: 1006-1012.
- [3] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *Environ Qual*, 1995, 24: 904-910.
- [4] Heckrath N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Environ Qual*, 2000, 29: 105-110.
- [5] 吕家珑, Fortune S, Brookes P C. 土壤磷淋溶状况及其 Olsen 磷“突变点”研究[J]. *农业环境科学报*, 2003, 22(2): 142-146.
- [6] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Sci. Soc Am. J.*, 1982, 46: 970-976.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 74-76.
- [8] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Seasonal and soil-drying effects on runoff phosphorus relationships to soil phosphorus[J]. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1999, 63: 1006-1012.
- [9] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, et al. Relationship between phosphorus level in three Entisols and phosphorus concentrations in runoff[J]. *Environ Qual*, 1999, 28: 1702-1751.