

过量施用磷肥和有机肥对土壤磷渗漏的影响

张作新, 廖文华, 刘建玲, 郝小雨

(河北农业大学 农业资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

摘要: 采用土柱培养的模拟试验方法, 研究在不同磷水平土壤上大量施用磷肥和有机肥对土壤测试磷、土壤磷渗漏的影响及机理。结果表明, 不同磷水平土壤施用磷肥和有机肥后, 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、 Olsen-P 和土壤渗漏液中可溶性磷均显著增加; 单位量磷肥或有机肥所增加土壤各形态磷量随土壤磷水平的增加而增大; 随着磷肥和有机肥用量的增加, 单位量磷肥或有机肥所增加各形态磷量也逐渐增大, 差异均达到显著和极显著水平; 施用磷肥和有机肥土壤磷的最大吸磷量(Q_m)和土壤磷吸持指数(PSI)逐渐减少, 土壤磷的吸附饱和度(DPS)逐渐增加; 单位量磷肥或有机肥所增加的土壤磷的吸附饱和度随着土壤磷水平的增加而增加。随磷肥和有机肥用量的增加, 不同磷水平土壤磷的吸附饱和度逐渐增加、土壤磷的吸持指数下降、土壤磷的渗漏量逐渐增大; 土壤磷渗漏量与土壤测试磷呈显著正相关; 单位量磷肥或有机肥所增加的土壤测试磷随着磷肥或有机肥用量以及土壤磷水平的增加而增加。

关键词: 磷肥; 有机肥; 渗漏; 土壤磷水平

中图分类号: S153.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2008)06-0189-06

The Effect of Phosphate Fertilizer and Manure on Phosphorus Leaching

ZHANG Zuo-xin, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling, HAO Xiao-yu

(College of Resource and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: The effect of phosphate fertilizer and manure on soil test phosphorus and phosphorus leaching in different phosphorus levels soil was studied. Soil column was used in the experiment of simulation. The results showed that the content of $\text{CaCl}_2\text{-P}$, Olsen-P and soluble phosphorus in leaching water of soil were all increased significantly after applying phosphate fertilizer and manure in different phosphorus levels soil. The content of the various forms of phosphorus in the soil could be increased by improving soil phosphorus levels. This content was also increased significantly by the increasing phosphate fertilizer and manure. Maximum phosphorus absorption capacity(Q_m) and phosphorus sorption index(PSI) were decreased after applying phosphate fertilizer and manure. The degree of phosphorus sorption saturation(DPS) was increased with the increase of the rate phosphate fertilizer and manure. The degree of phosphorus sorption saturation could be increased by improving soil phosphorus levels. The main conclusions were that the degree of phosphorus sorption saturation and the rate of leached phosphorus from the soil were increased with the increase of the rate phosphate fertilizer and manure in different phosphorus levels soil, however, the phosphorus sorption index was decreased. There was high correlation between the rate of leached phosphorus from the soil and soil test phosphorus. The soil test phosphorus could be increased by increasing phosphate fertilizer or manure and soil phosphorus levels.

Key words: Phosphate fertilizer; Organic manure; Phosphorus leaching; Soils phosphorus levels

近年来, 随着农田土壤磷素的不断积累, 农田非点源磷环境风险逐渐凸显^[1,2]。已有研究表明, 在 20 世纪后 20 年间, 中国土壤全磷含量平均增长了 210 mg/kg, Olsen-P 增加了 6~8 mg/kg, 年均增长

11%^[3]。由于磷肥用量远远超出作物生长对磷素的需要量, 结果导致土壤磷素的大量积累^[4], 盈余的农田磷通过地表径流和渗漏的方式向地表和地下水体迁移, 从而增加了农田磷的环境风险^[5,6]。土壤磷

收稿日期: 2008-09-26

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(300130); 河北省农业开发办公室资助项目

作者简介: 张作新(1982-), 男, 河北唐山人, 硕士, 主要从事植物营养、施肥与环境方面的研究。

通讯作者: 刘建玲(1962-), 女, 河北滦南人, 教授, 博士, 主要从事植物营养、施肥与环境研究。

素渗漏作为农田磷素流失的一个重要途径,直接关系到地下水的优劣。同时,农田磷的渗漏势也是影响农田地表径流流失磷的重要因素,是估算农田磷径流流失量的重要参数,因此,研究农田磷的渗漏及影响因素具有重要意义^[7,8]。

关于农田磷渗漏影响因素及评价的资料很多,主要集中在:磷肥和有机肥的用量、土壤磷水平以及土壤磷的吸附-解吸特性等因素对农田磷渗漏的影响和机理。由于大量施用磷肥,我国北方蔬菜保护地中,不仅在 0~ 40 cm 土壤磷素大量积累,40~ 100 cm 土层中的磷素也有明显的增加,反映农田磷素明显渗漏^[9]。大量施用有机肥使沙质土壤的磷素渗漏明显增加^[10]。连纲等^[11]的研究也表明:增施猪粪后土壤磷素迁移能力增强。土壤磷素水平也是影响土壤磷素渗漏的一个重要因素,随着土壤磷素水平的提高,农田磷素的渗漏风险加大^[12-14]。关于农田土壤磷素渗漏风险评价,不少报道提出用土壤测试磷作为评价农田磷淋失风险指标^[15]。鲁如坤^[3]则针对我国土壤类型,提出土壤 Olsen-P 含量 50~ 60 mg/kg 是农田磷通过渗漏污染水源的大致临界指标。此外,由于土壤水溶性磷与土壤速效磷呈正相关关系,Kleinman 等^[16,17]把土壤水溶性磷作为一项反映农田土壤磷素流失的重要监测指标。土壤磷的吸附和解吸特性也是影响农田磷素渗漏的重要因素。因此,近年来也有不少资料提出了一些关于用土壤磷素吸附-解吸特性的评价指标。如:土壤磷吸附饱和度(DPSS)和磷吸持指数(PSI)等表征土壤的固磷能力指标^[18,19]。欧洲一些国家多利用土壤吸附饱和度作为判定土壤磷流失潜力临界值和推荐磷肥和有机肥用量的阈值^[20],美国一些地区也制定了以此类指标为依据限定施肥量的相关标准^[21]。

表 1 供试土壤基本理化性状

Tab. 1 Properties of tested soil

| 土壤 Soils | 全氮/(g/kg) Total N | 全磷/(g/kg) Total P | 有机质 /(g/kg) Organic matter | 碱解氮 /(mg/kg) NaOH- hydrolyzable N | Olsen-P /(mg/kg) | 有效钾 /(mg/kg) Avail K | 质地/% Texture | |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--|---------------------|----------------------------|-----------------|------------|
| | | | | | | | > 0. 01 mm | < 0. 01 mm |
| S ₁ | 1. 26 | 0. 49 | 21. 0 | 112. 0 | 56. 9 | 96. 1 | 73. 0 | 27. 0 |
| S ₂ | 2. 22 | 0. 81 | 22. 6 | 122. 2 | 198. 0 | 265. 3 | 70. 1 | 29. 9 |
| S ₃ | 2. 89 | 1. 50 | 41. 7 | 129. 9 | 332. 5 | 480. 4 | 68. 5 | 31. 5 |

1.2 试验设计

试验处理:土壤磷含量分别为:低磷(S₁)、高磷(S₂)和极高磷(S₃)3种土壤。磷肥用量为3个水平,即P₀,P₁,P₂,分别代表P用量:0,360,1 080 kg/hm²。有机肥用量为3个水平,即M₀,M₁,M₂,分别代表腐熟有机肥用量:0,150,300 t/hm²,每个处理3次重复。

Sims Maguire 等^[8,15,22]还提出用 Mehlich-3-P 浸提所得 P、Al、Fe 的量来计算 Mehlich-3-P 的饱和度,即 M₃P 饱和度= M₃[P/(Al+ Fe)],以此来反映土壤磷素的渗漏势。

已有资料对大量施用磷肥或有机肥导致土壤渗漏磷增加的解释为:土壤磷的吸附能力有限,长期大量施用磷肥或有机肥显著增加了土壤磷的吸附饱和度,从而降低了土壤磷的吸附能力,相应地增加了土壤磷的渗漏率^[15,23]。土壤磷的吸附饱和度受土壤质地、有机质及土壤中氧化铁(铝)、钙含量等因素的影响^[24]。随着土壤有机质的增加,土壤吸磷能力减小^[25-27];通径分析和多元线性函数定量评价各因素在农田磷环境风险中的贡献结果表明:土壤磷的吸附饱和度和 Langmuir 方程中土壤磷的饱和吸附量是评价农田磷环境风险的重要指标^[20]。

综上所述,已有资料中关于在不同磷素水平土壤上施用磷肥和有机肥对农田磷渗漏的影响资料尚少。此内容的研究也可以为准确估算不同磷水平农田磷的径流流失量提供重要参数。针对上述情况,本试验采用室内土柱培养的模拟试验系统研究在不同磷水平上大量施用磷肥和有机肥时土壤磷渗漏及作用机理,旨在准确评价农田非点源磷的环境风险并为安全管理农田磷养分提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自河北省藁城市的蔬菜保护地(高磷和极高磷)及其附近粮田(低磷),为潮褐土,基本理化性状列于表 1。土壤经风干、过 2 mm 筛后备用。

试验装置:用内径 7 cm,长度为 30 cm 的 PVC 管(模拟土柱),管内壁均匀涂抹凡士林,用透性良好的棉布底封住底口,土柱最底层装入 100 g 石英砂(约厚 2 cm),砂上放置一层网孔直径 0.05 mm 的纱网,纱网以上按田间实际土壤容重装入 1 000 g 供试土壤(相当于田间 20 cm 土层厚度土壤),土壤分为 2 层,每层 500 g 土,中间有尼龙网隔开,上层土壤按

试验处理的要求施入磷肥或有机肥, 下层土壤不施肥。将装好的土柱架于白瓷缸上以便收集渗漏液。试验在恒温培养室中进行, 室内的温度为 25℃。用重量法控制灌水量, 首次灌水 550 mL 后, 称量模拟土柱及瓷缸的总重量, 以后每次灌水达到这一重量为止。装柱后 7 d 灌水 1 次, 并收集渗漏液以备化学测定。培养持续 28 d。培养结束后, 分别采集施肥层和不施肥层 2 层土样, 风干、过筛以备化学测定。

1.3 测试项目

主要测定土壤 Olsen-P、土壤水溶性磷、土壤渗漏液中可溶性磷、土壤最大吸磷量、土壤磷的吸附饱和度和磷吸持指数等。常规项目均采用常规农化分析方法。其他项目测定如下:

土壤水溶性磷(CaCl₂-P): 称土样 5.00 g, 加 50 mL 0.01 mol/L CaCl₂(即土液比 1:10), 振荡 1 h, 钼蓝比色法^[18]。

磷吸附等温线的测定: 称取 2.5 g 土壤样品各 7 份于 50 mL 塑料瓶中, 分别加入含磷量为 0, 10, 20, 40, 60, 100 和 150 mg/L 的 0.01 mol/L CaCl₂溶液 25 mL, 同时加入 2 滴甲苯以抑制微生物的活动, (25±1)℃下振荡 1 h, 平衡 23 h, 过滤后用钼蓝比色法测定平衡溶液中磷的浓度。以平衡溶液的磷浓度为横坐标, 以土壤的吸磷量为纵坐标绘制等温吸附曲线。检验曲线与 Langmuir 方程($C/Q = 1/(kQ_m + C/Q_m)$)的吻合性, 式中, Q 是土壤吸附磷量, C 为平衡溶液中

磷的浓度, k 为与吸附能有关的常数, Q_m 是土壤最大吸磷量。根据试验结果及 Langmuir 方程确定土壤的最大吸磷量(Q_m)和磷吸附饱和度等^[19]。

土壤磷吸附饱和度(DPS%) = Olsen-P/Q_m × 100^[18]。

磷吸持指数(PSI): 在土液比为 1:10 的条件下, 按每 g 土加 1.5 mg P(磷酸盐)的比例使二者充分混合, 平衡后测得的土壤吸磷量 X(mg/100g)与平衡溶液中磷浓度 C(μmol/L)的对数值之比即为 PSI, 即 PSI= X/logC^[19]。

2 结果与分析

2.1 磷肥和有机肥对不同磷水平施肥层土壤 CaCl₂-P 和 Olsen-P 的影响

磷肥和有机肥用量对不同磷水平土壤 CaCl₂-P, Olsen-P 的影响如表 2 所示。结果表明, 施用磷肥和有机肥显著增加施肥土层(0~10 cm)土壤 CaCl₂-P, Olsen-P 含量。随着土壤磷水平的升高, 施用相同量的磷肥各处理的土壤 CaCl₂-P, Olsen-P 含量逐渐增加。与 P₀ 处理相比, P₁ 处理在 S₁, S₂, S₃ 土壤上的 CaCl₂-P 分别增加 10.8, 12.4, 14.7 mg/kg, Olsen-P 分别增长 87.4, 96.8, 108.3 mg/kg。随着磷肥用量增加(P₂)土壤 CaCl₂-P 和 Olsen-P 增加量有相同的趋势, 差异均达到显著和极显著水平。施用有机肥 M₁ 后 S₁ 土壤 CaCl₂-P 和 Olsen-P 显著增加, 但 S₂, S₃ 无显著增加。

表 2 磷肥和有机肥对不同磷水平施肥层土壤 CaCl₂-P 和 Olsen-P 含量的影响

| 处理 Treatments | | CaCl ₂ -P | | | | Olsen-P | | | |
|------------------|---------------------------|----------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|
| | | S ₁ | S ₂ | S ₃ | LSD _{0.05(0.01)} | S ₁ | S ₂ | S ₃ | LSD _{0.05(0.01)} |
| PF | P ₀ | 3.8 | 10.7 | 19.5 | 1.0(1.5) | 56.9 | 197.8 | 332.5 | 21.8(33.0) |
| | P ₁ | 14.6 | 23.1 | 34.2 | 7.1(10.8) | 144.3 | 294.6 | 440.7 | 28.6(43.3) |
| | P ₂ | 50.7 | 59.6 | 70.2 | 1.8(2.8) | 335.9 | 485.9 | 604.8 | 5.1(7.7) |
| | LSD _{0.05(0.01)} | 1.7(2.6) | 2.7(4.0) | 6.7(10.2) | — | 19.9(30.1) | 11.0(16.6) | 28.3(42.9) | — |
| OM | M ₀ | 3.8 | 10.7 | 19.5 | 1.0(1.5) | 56.9 | 197.8 | 332.5 | 21.8(33.0) |
| | M ₁ | 4.4 | 9.9 | 19.2 | 2.0(3.0) | 62.3 | 200.6 | 353.3 | 26.3(39.8) |
| | M ₂ | 5.5 | 11.5 | 22.0 | 4.2(6.3) | 71.0 | 203.8 | 366.4 | 26.2(39.6) |
| | LSD _{0.05(0.01)} | 0.5(0.8) | 1.3(1.9) | 4.5(6.7) | — | 8.7(13.2) | 19.7(29.8) | 37.2(56.4) | — |

注: PF 表示磷肥处理, OM 表示有机肥处理, 同下表。
Note: PF was phosphate fertilizer, OM was manure, as same as follow.

2.2 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤不施肥层 CaCl₂-P, Olsen-P 含量影响

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤不施肥层 CaCl₂-P, Olsen-P 含量影响如图 1~4 所示。结果表明, 随着磷肥和有机肥施用量的增加, 3 种土壤 10~20 cm(不施肥层)土壤 CaCl₂-P, Olsen-P 含量均显著增加, 说明 3 种土壤上施用磷肥和有机肥后土壤磷素均明显渗漏到不施肥的土层。与对照相比, P₁ 处理

在 S₁, S₂, S₃ 土壤上的 CaCl₂-P 分别增加 1.7, 3.7, 5.3 mg/kg, Olsen-P 分别增长 9.4, 20.2, 26.2 mg/kg。施用 P₂ 处理具有相同趋势。3 种土壤比较, S₂, S₃ 的增加量明显高于 S₁ 土壤, 说明高磷和极高磷土壤上施用相同量的磷肥土壤磷的渗漏量明显高于低磷土壤。

M₁ 处理在 S₁, S₂, S₃ 土壤上的 CaCl₂-P 分别增加 0.5, 0.9, 1.5 mg/kg, Olsen-P 分别增长 3.3, 13.7, 39.4 mg/kg。施用 M₂ 处理具有相同趋势。3 种土壤比

较, S₂, S₃的增加量明显高于 S₁ 土壤, 说明高磷和极高磷土壤上施用相同量的有机肥土壤磷的渗漏量明显高于低磷土壤。

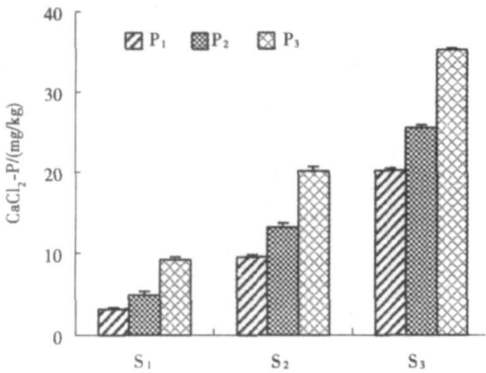


图 1 磷肥对不施肥层土壤 CaCl₂-P 的影响
Fig. 1 The effect of phosphate fertilizer on CaCl₂-P in below layer of soil

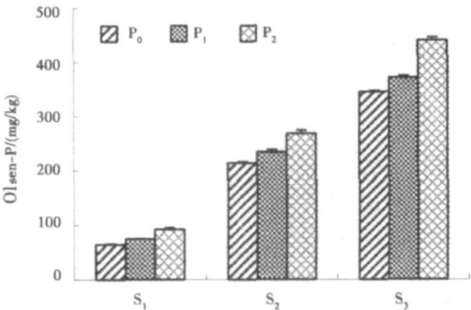


图 2 磷肥对不施肥层土壤 Olsen-P 的影响
Fig. 2 The effect of phosphate fertilizer on Olsen-P in below layer of soil

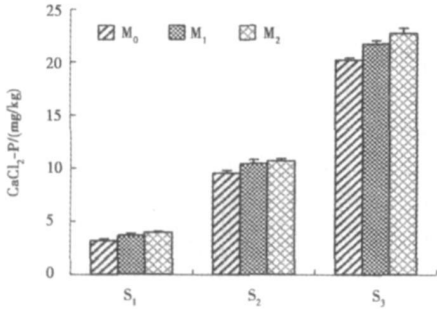


图 3 有机肥对不施肥层土壤 CaCl₂-P 的影响
Fig. 3 The effect of organic manure on CaCl₂-P in below layer of soil

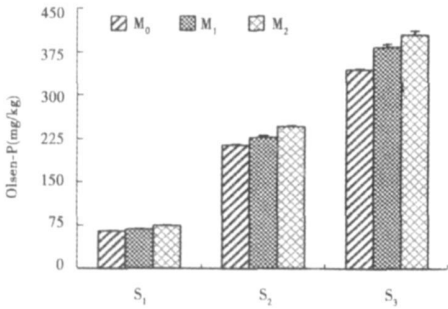


图 4 有机肥对不施肥层土壤 Olsen-P 的影响
Fig. 4 The effect of organic manure on Olsen-P in below layer of soil

2.3 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤渗漏液中可溶性磷的影响

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤渗漏液中可溶性磷的影响如表 3 所示。结果表明, 大量施用磷肥, 土壤渗漏液中可溶性磷均显著增加。与 P₀ 处理比较, P₁ 处理在 S₁, S₂, S₃ 土壤上的土壤渗漏液中可溶性磷分别增加 0.57, 0.96, 2.49 mg/L, 这表明, 随着土壤磷水平的增加, 土壤渗漏液中的可溶磷浓度逐渐增加, 这与上述不施肥土层 CaCl₂-P 和 Olsen-P 增加的趋势是吻合的。P₂ 处理具有相同趋势。

随有机肥施用量的增加, 3 种土壤上土壤渗漏液中可溶性磷含量均呈增加的趋势。其中, 与 M₀ 相比, M₁ 处理在 S₁, S₂, S₃ 的土壤渗漏液中可溶性磷分别增加 0.14, 0.19, 1.17 mg/L。M₂ 处理具有相同趋势。这些结果也说明高磷土壤上施用有机肥后土壤磷渗漏增加。

表 3 磷肥和有机肥对土壤渗漏液中可溶性磷的影响

| Tab. 3 The effect of phosphate fertilizer and manure on soluble phosphorus in leaching water of soil mg/L | | | | |
|---|---------------------------|----------------|----------------|------------|
| 处理 Treatments | S ₁ | S ₂ | S ₃ | |
| PF | P ₀ | 0.46/ - | 0.93/ - | 1.71/ - |
| | P ₁ | 1.03/ 0.57 | 1.88/ 0.95 | 4.20/ 2.49 |
| | P ₂ | 2.79/ 2.33 | 3.36/ 2.43 | 4.78/ 3.07 |
| | LSD _{0.05(0.01)} | 0.10(0.18) | 0.06(0.11) | 0.53(0.98) |
| OM | M ₀ | 0.46/ - | 0.93/ - | 1.71/ - |
| | M ₁ | 0.59/ 0.13 | 1.12/ 0.19 | 2.88/ 1.17 |
| | M ₂ | 1.08/ 0.62 | 1.96/ 1.03 | 3.47/ 1.76 |
| | LSD _{0.05(0.01)} | 0.05(0.09) | 0.15(0.28) | 0.52(0.95) |

注: “/” 后的数值表示施肥后可溶性磷的增量。
Note: It was increment of soluble phosphorus in leaching water of soil which behind the sign of “/”.

2.4 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸特性的影响

磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸特性的影响如表 4 所示。结果表明: 与 P₀ 处理比较, P₁ 和 P₂ 处理的最大吸磷量和土壤磷吸附指数逐渐减小、土壤磷的吸附饱和度显著增加。其中, S₁ 土壤最大吸磷量分别降低了 34.5, 86.8 mg/kg, S₂ 和 S₃ 土壤上具有相同的趋势。

随着有机肥施用量的增加, 土壤最大吸磷量逐渐减少, 土壤磷的吸附饱和度逐渐增加。与 M₀ 处理相比, M₁ 处理在 S₁, S₂, S₃ 土壤上的土壤磷的吸附饱和度分别增加 9.2%, 12.1%, 37.2%。M₂ 处理具有相同趋势。可见, 施用等量的磷肥或有机肥所增加的土壤磷的吸附饱和度随着土壤磷水平的增加而增加。

表 4 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤吸附解吸特性的影响

| Tab 4 The effect of phosphate fertilizer and manure on P sorption parameters in different P levels soil | | | | | |
|--|----|----------------|---|---|-------------------------------------|
| 处理 Treatments | | | 最大吸磷量 Qm/ (mg/ kg) Maximum P sorption | 吸附饱和度 DPS/ % Degree of P sorption saturation | 磷吸持指数 PSI P sorption index |
| S ₁ | PF | P ₀ | 357.1 | 16.7 | 7.7 |
| | | P ₁ | 322.6 | 56.6 | 6.6 |
| | | P ₂ | 270.3 | 214.4 | 5.9 |
| | OM | M ₀ | 357.1 | 16.7 | 7.7 |
| | | M ₁ | 312.5 | 25.9 | 7.0 |
| | | M ₂ | 285.7 | 29.4 | 6.6 |
| S ₂ | PF | P ₀ | 312.5 | 75.2 | 6.9 |
| | | P ₁ | 285.7 | 212.6 | 5.3 |
| | | P ₂ | 256.4 | 243.2 | 5.1 |
| | OM | M ₀ | 312.5 | 75.2 | 6.9 |
| | | M ₁ | 303.0 | 87.3 | 6.4 |
| | | M ₂ | 285.7 | 96.6 | 6.2 |
| S ₃ | PF | P ₀ | 357.1 | 93.1 | 6.7 |
| | | P ₁ | 333.3 | 153.9 | 5.7 |
| | | P ₂ | 285.7 | 263.3 | 5.5 |
| | OM | M ₀ | 357.1 | 93.1 | 6.7 |
| | | M ₁ | 277.8 | 130.3 | 5.6 |
| | | M ₂ | 238.1 | 146.5 | 5.1 |

3 讨论与结论

大量研究认为, 土壤测试磷能够很好的反映农田磷的渗漏淋失风险^[28, 29]。Maguire 等^[15, 22]提出可以用土壤 Mehlich-3 P 作为一个磷渗漏风险的评价指标, 用 Mehlich-3 浸提所得 P, Al, Fe 的量来计算 Mehlich-3 P 的饱和度 ($DPS_{M3} = PM3/[Al + Fe]_{M3}$), DPS_{M3} 反映了土壤磷素的渗漏风险。王新军等^[4]的研究表明, 土壤 Olsen-P 含量高于 55.6~63.0 mg/kg 时, 土壤 $CaCl_2$ -P 显著增加, 此时的 Olsen-P 含量为土壤磷渗漏量显著增加的“突变点”, 吕家珑等^[13]的研究也得到了相近的“突变点”, 他还指出土壤 Olsen-P 高于 60 mg/kg, 土壤磷渗漏明显增加。从本试验的结果看, 在低磷土壤上, 施用磷肥 360, 1 080 kg/hm² 时, 施肥层土壤的 Olsen-P 含量最高可分别达到 156.3, 338.3 mg/kg, 均显著高于 50~60 mg/kg 这一土壤 Olsen-P 临界值^[3]。同时, 与不施肥的对照处理比较, 这 2 种施肥处理土壤渗漏液中可溶性磷含量均显著增加。而且随施肥量增加, 渗漏量加大, 在高磷和极高磷土壤上这一现象更为明显。从有机肥对不同磷水平土壤渗漏的影响看, 随着有机肥施用量的增加, 3 种土壤渗漏液中磷含量及下层土壤 $CaCl_2$ -P, Olsen-P 含量均显著增加, 这可能与有机肥具有降低土壤对磷的吸附量, 从而增加土壤磷素的渗漏率这一特性有关^[15]。

土壤对磷素的吸附能力是有限的, 长期大量施

用磷肥和有机肥, 就会降低土壤对磷的吸附量, 从而增加土壤的渗漏率^[15], 因此, 国外常将一些表征土壤磷吸附解吸特性的指标作为农田磷素的环境风险评价的重要指标^[20]。Nair 等^[30]就研究指出, 当砂土土壤的土壤吸附饱和度高于 16% 时, 则土壤磷素渗漏量明显加强; 美国 Atlantic 地区则将土壤吸附饱和度的环境阈值定为 25%~40%^[21]。从本试验的结果可看出, 在低磷土壤上施用磷肥 360 kg/hm² 时, 土壤磷的吸附饱和度达到 56.6%, 高磷和极高磷土壤上不施磷肥土壤磷的吸附饱和度为 75.2%, 93.1%, 已超出 25%~40% 这一环境阈值。且随磷肥和有机肥用量的增大, 土壤吸附饱和度不断提高, 说明土壤磷素渗漏势增加, 这一结果与 Maguire 等^[15]结果是一致的。从本试验的结果还看出, 磷肥和有机肥的过量施用显著增加施肥层土壤磷素的积累量, 土壤对磷素的吸附达到饱和状态, 从而大大提高了土壤磷素的渗漏风险。土壤 $CaCl_2$ -P, Olsen-P 等土壤测试磷指标及土壤磷素吸附饱和度 (DPS) 等均可用来反映土壤磷素的渗漏状况, 是评价土壤磷素渗漏风险的重要指标。

参考文献:

[1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008–1017.

[2] Sharpley A N, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of 21st century[J]. Journal of Environmental Qualit, 2000, 29: 176–181.

[3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4–8.

[4] 刘建玲, 李仁岗, 廖文华, 等. 白菜-辣椒轮作中磷肥的产量效应及土壤磷积累研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1616–1620.

[5] 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: 799–804.

[6] 单艳红, 杨林章, 王建国. 土壤磷素流失的途径、环境影响及对策[J]. 土壤, 2004, 36(6): 602–608.

[7] Sharpley A N, Weld J L, Beegle D B, et al. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(3): 137–149.

[8] Sims J T, Maguire R O, Leytem A B, et al. Evaluation of Mehlich 3 as an Agri-environmental soil phosphorus test for the mid-Atlantic United States of America[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 2016–2032.

[9] 刘建玲, 张福锁, 杨奋翮. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2):

- 179– 186.
- [10] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 277– 293.
- [11] 连 纲,王德建,林静慧,等.太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J].应用生态学报,2003,14(11):1879– 1883.
- [12] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 105– 110.
- [13] 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]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):142– 146.
- [14] 王新军, 廖文华, 刘建玲. 菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J]. 华北农学报, 2006, 21(4): 67– 70.
- [15] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 1601– 1609.
- [16] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M, *et al.* Measuring water-extractable phosphorus in manure as an indicator of phosphorus in runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 2009– 2015.
- [17] Biding K, Otabbong E, Barberis E. Soil Variables for Predicting Potential Phosphorus Release in Swedish noncalcareous soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33: 99– 106.
- [18] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(2): 160– 166.
- [19] 高 超,张桃林.面向环境的土壤磷素测定与表征方法研究进展[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 282– 285.
- [20] Zhang H, Schroder J L, Fuhrman J K, *et al.* Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69: 96– 106.
- [21] Cox F A, Hendricks S E. Soil test phosphorus and clay content effects on runoff water quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 1582– 1586.
- [22] Maguire R O, Sims J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich 3[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 2033– 2039.
- [23] Mozaffari M, Sims J T. Phosphorus availability and sorption in an atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture[J]. Soil Science, 1994, 157: 97– 107.
- [24] 何振立, 朱祖祥, 袁可能. 土壤对磷的吸持特性及其与土壤供磷指标之间的关系[J]. 土壤学报, 1988, 25(4): 397– 404.
- [25] Daly K, Jeffrey D, Tunney H. The effect of soil type on phosphorus sorption capacity and desorption dynamics in Irish grassland soils[J]. Soil Use and Management, 2001, 17: 12– 20.
- [26] 杨 芳,何园球,李成亮,等.不同施肥条件下旱地红壤磷固定及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 265– 272.
- [27] 郭胜利,党廷辉,刘守赞,等.磷素吸附特性演变及其与土壤磷形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 33– 39.
- [28] Torbert H A, Daniel T C, Lemunyon J L, *et al.* Relationship of soil test phosphorus and sampling depth to runoff phosphorus in calcareous and Noncalcareous Soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 1380– 1387.
- [29] Vadas P A, Kleinman P J A, Sharpley A N, *et al.* Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: a single extraction coefficient for water quality modeling[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34: 572– 580.
- [30] Nair V D, Portier K M, Graetz D A, *et al.* An environmental threshold for degree of phosphorus saturation in sandy soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33: 107– 113.