

塿土磷素淋移的形态研究*

杨学云 古巧珍 马路军 孙本华 李生秀

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 利用设在塿土上的两个长期肥料定位试验所形成的不同土壤磷素水平试验小区的土壤, 用原状土柱模拟灌溉(降水)进行了磷的淋失研究。结果表明, 塿土中磷淋移的主要形态为可溶性磷, 平均占淋失全磷量的 82.5%, 颗粒磷占 17.9%; 在可溶性磷中, 以钼酸盐反应磷居多, 平均占全磷量的 77.1%, 可溶性有机磷只占全磷的 13.8%; 淋失到 20cm 以下的全磷浓度最高可达 3.95 mg L^{-1} , 可溶性全磷最高达 3.57 mg L^{-1} ; 在历时 60d, 相当于 357mm(约为年灌溉降雨总和的 36%) 的灌溉量时, 最大淋失总磷量达到 1082 g hm^{-2} ; 13 次淋滤实验结果显示, 渗滤液中钼酸盐反应磷、可溶性全磷和全磷浓度与土壤耕层 Olsen-P 呈显著正相关。

关键词 原状土柱; 可溶性全磷; 钼酸盐反应磷; 颗粒磷; Olsen-P; 磷淋失

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

磷素向敏感环境区域的输运是一个渐进的难以为人们察觉的过程, 污染一旦形成, 其治理也极其困难, 代价极其昂贵, 耗时极长。有鉴于此, 最近对农业中的磷对环境的影响的评价受到了各国越来越多的关注^[1-3]。磷素向水体迁移的主要途径有地表径流、土壤侵蚀和亚地表径流(淋失)。磷淋失主要形态为可溶性和颗粒磷, 可溶性磷包括钼酸盐反应磷(MRP)和可溶性有机磷(DOP)。磷素以何种形态迁移与其迁移机制有关, 也可能取决于土壤类型, 作物, 土壤磷素水平, 耕作管理等多种因素。一些文献报道磷淋失以钼酸盐反应磷(MRP)为主^[4-6], 另一些则相反, 以颗粒态(PP)为主^[2, 7-10], 也有以可溶性有机磷(DOP)为主的报道, 如有人在缺磷的苏格兰山地(Upland)土壤的研究结果^[11, 12]。Jordan 等^[13]的研究结果是 45% MRP、40% PP 和 15% 的 DOP, 显示出每种形态都有其相当的贡献。因此, 研究磷素淋失的形态, 对正确认识和建立环境友好的磷素管理有重要意义。

利用设在塿土上的两个长期肥料定位试验所形成的不同土壤磷素含量梯度的试验小区的土壤, 用原状土柱模拟灌溉(降水)研究磷素淋移, 目的是验证塿土中是否存在磷淋失和磷淋失的形态及其与耕层土壤磷素状况的关系。

1 材料与方法

1.1 试验原状土柱采集与分析

利用设在塿土上的两个长期肥料试验所形成的磷素浓度梯度, 选择有效磷(Olsen-P)浓度梯度在 $2 \sim 278 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间的处理小区(或重复), 于 2003 年 7 月小麦收获后, 将直径 10 cm, 高 30 cm 的 PVC 管(内壁涂有一层薄石蜡)用特制取样工具小心的打入土中 20 cm, 采集原状土柱共 32 个。样品用 PVC 封盖盖住底部, 在封盖底上打一直径为 0.8 cm 的小孔, 用橡皮塞将排水管固定于小孔, 在排水管顶端加一层细密(200 目)的尼龙布, 其上用经 2.0 mol L^{-1} 稀硫酸浸泡过夜并洗涤的大小为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的细砂覆盖, 在砂粒与土壤接触面也加一层致密的尼龙布。土壤表面与土柱顶端有 6 cm 空间可供灌溉(见图 1)。

取原状土柱的同时, 在该小区用直径为 2.5 cm 的土钻取 0~20 cm 土样 15 钻, 混合均匀, 带回立即风干, 手工拣去根茬、动物残体和石块等杂物, 研磨, 过 0.5 mm 筛。

土壤有效磷(Olsen-P)用 Olsen 法^[14], 钼锑钒比色测定, 含量均以风干土计。

* 国家野外台站试点站“国家土壤肥力与肥料效益监测网络”和西北农林科技大学“优秀人才基金”(04ZR020)资助

作者简介: 杨学云(1967~), 男, 宁夏青铜峡市人, 副教授, 博士, 主要从事土壤肥力监测与环境研究

收稿日期: 2004-09-06; 收到修改稿日期: 2004-12-25

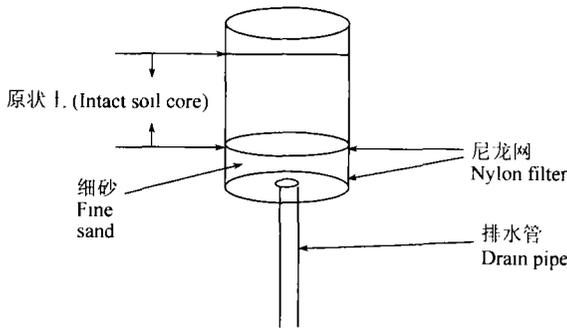


图 1 原状土柱示意图

Fig. 1 Sketch map of the column with intact soil core

两个长期肥料试验地直线距离约为 12 km, 土壤均属褐土类, 垆土亚类。其中之一始于 1990 年, 为油垆土属红油土, 试验开始时耕层土壤的基本理化性状为: 有机质 10.92 g kg^{-1} , 全氮 (N) 0.832 g kg^{-1} , 全磷 (P) 0.607 g kg^{-1} , 有效磷 (P) 9.57 mg kg^{-1} , pH 8.62, 孔隙度 49.63%, 田间持水量 21.12%。另一个始于 1980 年, 为油垆土属黑油土, 试验开始时耕层土壤有机质含量 11.81 g kg^{-1} 、全氮 (N) 0.806 g kg^{-1} 、全磷 (P) 0.787 g kg^{-1} 、有效磷 (P) 15 mg kg^{-1} 、pH 8.60, 详见其他报道^[15,16]。

1.2 渗滤液采集及分析

将土柱置于架子上, 用 200.0 ml 蒸馏水湿润, 放置 2 d, 使其自然排水到田间持水量。在开始的 4 d 中连续每天加相当于 12.74 mm 降雨的蒸馏水 (100 ml), 4 d 收集滤液 1 次; 第 5 天到第 36 天每隔 1 d 加水 1 次 (100 ml), 每 4 d 收集 1 次滤液; 以后改为每 3 d 加水 1 次, 6 d 收集 1 次滤液直至第 60 天结束, 共收集滤液 13 次。渗滤液用 250 ml 塑料瓶收集, 为防止样品中有机磷水解, 在其中加入浓硫酸 0.32 ml, 使得渗滤液 pH 低于 1^[17]。收集到的滤液于每次收集时间完毕后当天分析或于 4℃ 贮存。

取一定量用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后的滤液, 用钼锑抗直接显色分析^[5] 样品磷含量, 所得结果为钼酸盐反应磷 (Molybdate reactive phosphorus, 简称为 MRP), 一般多为无机磷; 取一定体积滤液, 采用改进的 Brookes 等的方法^[18], 即: 加入分析纯高氯酸 (70% ~ 72%) 2 ml 和 0.25 ml 饱和氯化镁溶液, 高温消化至近干, 用 0.6 mol L^{-1} 稀盐酸 5 ml 加热溶解, 然后用钼锑抗法显色分析, 结果为全磷 (Total phosphorus, TP); 滤液经过 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后, 采用与全磷相同的方法消化测定, 所得结果为可溶性全磷 (Total dissolved phosphorus, TDP); 可溶性全磷与钼酸

盐反应磷的差值为可溶性有机磷 (Dissolved organic phosphorus, DOP); 全磷与可溶性全磷的差值为颗粒磷 (Particulate phosphorus, PP)。

2 结果与分析

2.1 渗滤液中各形态磷的浓度与淋失量

2.1.1 渗滤液中磷的形态和浓度 由表 1 中可以看出, 每次淋滤试验中渗滤液各形态磷和全磷的变幅都很大, 13 次淋滤渗滤液中钼酸盐反应磷、可溶性全磷、可溶性有机磷、颗粒磷的平均变幅分别为 $0.01 \sim 2.67$ 、 $0.03 \sim 3.57$ 、 $0 \sim 0.92$ 、 $0 \sim 2.80 \text{ mg L}^{-1}$, 全磷平均变幅为 $0.05 \sim 3.95 \text{ mg L}^{-1}$ 。各个形态平均值分别为 0.70 、 0.80 、 0.10 、 0.20 mg L^{-1} , 全磷为 0.90 mg L^{-1} 。就各个磷形态而言, 以可溶性磷居多, 颗粒磷含量较低, 前者平均浓度为 0.80 mg L^{-1} , 是后者的 4 倍。在可溶性磷中, 钼酸盐反应磷平均浓度高于可溶性有机磷, 前者为后者的 7 倍。

由表中还可以清楚地看出, 随淋滤试验时间的延续, 钼酸盐反应磷有增加的趋势, 到第五次取样, 亦即 20 d 后趋于稳定。原因可能是灌水造成的还原条件导致铁、铝氧化物的还原, 使其固定的磷素释放的结果。可溶性有机磷和颗粒磷则没有随时间变化的趋势。需要说明的是表中有些淋滤中的可溶性有机磷和颗粒磷测量不到, 在其他研究者的结果中也有类似情况^[19]。值得注意的是钼酸盐反应磷最小值为 0.01 mg L^{-1} , 也就是说, 即使多年不施肥的土壤上, 尽管在土壤 Olsen-P 和水溶性磷含量非常低的情况下, 也会有很小一部分磷随水流下移。

2.1.2 渗滤液中各形态磷的份额 为了更清楚的说明土壤磷素淋失的主要形态, 表 2 列出了各次淋滤试验的不同形态磷占淋失总磷量的比例。从表中可以看出, 各次淋滤事件中各形态磷的份额变幅也较大, 钼酸盐反应磷、可溶性全磷、可溶性有机磷和颗粒磷占全磷的比例平均变幅分别为 21.8% ~ 99.6%、19.8% ~ 100.0%、0.0% ~ 61.0%、0.0% ~ 99.1%。平均结果清楚的显示出, 磷素淋失的形态以可溶性磷为主, 占 82.5%, 颗粒形态仅占 18% 左右。在可溶性磷中, 又以钼酸盐反应磷为主, 占到淋失全磷量的 77.1%, 可溶性有机磷只占渗滤液全磷的 13.8%。

颗粒磷或钼酸盐反应磷在不同淋失事件中都有可能是主导形态。Turtola 和 Jaakkola^[20] 研究了芬兰

西北部田间小区的磷损失,比较了大麦与草地磷损失情况,从大麦区损失的颗粒磷占全磷的69%、草地上为35%。Beauchemin发现超过全磷50%的磷素通过颗粒磷形式排出去了,14个磷损失最高的土中有10个是粘土,颗粒磷是主要贡献者^[7]。Brooks等在英国洛桑试验站(Rothamsted)的Broadbalk试验地粉粘壤土上的研究发现,钼酸盐反应磷是磷淋失

的主要成分,处理包括不施肥, P 40 kg hm⁻²的厩肥和 P 17 ~ 35 kg hm⁻²的过磷酸钙,在排水中钼酸盐反应磷占全磷的变幅为66% ~ 86%^[21]。Stamm等发现可溶反应性磷占两个土壤全磷损失的50%与70%^[6]。在瑞典,排水中PO₄-P占全磷的平均比例为34%^[22]。这种磷淋失形态的不同可能与土壤质地、气候如降雨强度有关。

表1 渗滤液中各形态磷的浓度

Table 1 Concentrations of different forms of phosphorus in leachate (mg l⁻¹)

采样次数 Times	钼酸盐反应磷	可溶性全磷	可溶性有机磷	颗粒磷 Particulate phosphorus	全磷 Total phosphorus
	Molybdate	Total	Dissolved		
	reactive phosphorus	dissolved phosphorus	organic phosphorus		
1	0.01 ~ 1.29	0.03 ~ 1.44	0.01 ~ 0.16	0.03 ~ 0.06	0.05 ~ 1.38
2	0.05 ~ 1.50	0.12 ~ 1.40	0.00 ~ 0.10	0.03 ~ 1.60	0.15 ~ 3.00
3	0.17 ~ 1.41	0.17 ~ 1.33	0.01 ~ 0.42	0.04 ~ 0.86	0.42 ~ 3.93
4	0.15 ~ 1.59	0.20 ~ 1.67	0.00 ~ 0.78	0.00 ~ 0.37	0.42 ~ 1.83
5	0.27 ~ 1.47	0.30 ~ 1.66	0.06 ~ 0.24	0.01 ~ 0.21	0.34 ~ 1.62
6	0.23 ~ 2.39	0.38 ~ 2.61	0.06 ~ 0.24	0.02 ~ 0.19	0.36 ~ 2.75
7	0.32 ~ 2.30	0.50 ~ 2.70	0.01 ~ 0.4	0.07 ~ 0.53	0.42 ~ 2.60
8	0.37 ~ 2.65	0.44 ~ 3.57	0.10 ~ 0.92	0.03 ~ 0.38	0.69 ~ 3.95
9	0.26 ~ 2.16	0.32 ~ 2.96	0.01 ~ 0.81	0.02 ~ 0.11	0.33 ~ 2.49
10	0.42 ~ 2.54	0.42 ~ 2.91	0.00 ~ 0.36	0.00 ~ 0.47	0.31 ~ 3.38
11	0.41 ~ 2.67	0.48 ~ 2.97	0.03 ~ 0.31	0.00 ~ 0.89	0.48 ~ 3.86
12	0.58 ~ 2.54	0.58 ~ 3.15	0.03 ~ 0.61	0.02 ~ 0.12	0.61 ~ 3.28
13	0.51 ~ 2.54	0.57 ~ 3.15	0.03 ~ 0.61	0.03 ~ 2.80	0.56 ~ 2.82

表2 渗滤液中各形态磷的比重

Table 2 Proportions of different forms of Phosphorus in TP of leachate (%)

采样次数 Times	MRP/TP	TDP/TP	DOP/TP	PP/TP
1	21.80 ~ 93.10	34.70 ~ 92.90	0 ~ 31.60	0 ~ 69.40
2	49.90 ~ 85.00	46.80 ~ 93.90	0 ~ 61.60	6.90 ~ 53.20
3	24.60 ~ 54.90	19.80 ~ 55.20	1.10 ~ 22.90	0 ~ 90.00
4	36.20 ~ 93.20	42.00 ~ 95.10	0 ~ 51.10	0 ~ 49.50
5	71.30 ~ 90.90	85.90 ~ 100.00	7.80 ~ 27.20	0 ~ 28.50
6	74.30 ~ 88.20	77.90 ~ 95.00	9.40 ~ 25.30	2.60 ~ 22.10
7	71.70 ~ 99.00	77.20 ~ 100.00	1.60 ~ 21	0 ~ 61.40
8	54.00 ~ 94.10	63.40 ~ 90.40	14.40 ~ 23.6	3.50 ~ 26.50
9	78.30 ~ 99.60	83.80 ~ 100.00	0 ~ 59.70	0 ~ 11.60
10	75.30 ~ 96.30	85.80 ~ 98.40	0 ~ 17.60	1.60 ~ 14.20
11	69.00 ~ 94.10	76.90 ~ 100.00	3.00 ~ 34.90	0 ~ 23.10
12	71.90 ~ 99.20	88.10 ~ 97.90	4.60 ~ 54.30	0 ~ 11.90
13	78.90 ~ 97.40	83.40 ~ 95.70	4.10 ~ 33.20	0 ~ 99.10

MRP: 钼酸盐反应磷 Molybdate reactive phosphorus; TP: 全磷 Total phosphorus; TDP: 可溶性全磷 Total dissolved phosphorus; DOP: 可溶性有机磷 Dissolved organic phosphorus; PP: 颗粒磷 Particulate phosphorus

有人认为磷在土壤中的移动, 化学上以有机形态, 物理上仅限于微生物残体、细胞与纤维残体, 主要为有机态^[23]。在本试验中可溶性有机磷和颗粒磷形态淋出的磷量平均不到 32%。因为颗粒磷的淋失, 与其说是土壤或微生物残体的量, 不如说是主要受其穿过土体的通道决定的。本实验是模拟灌溉, 以颗粒磷形态损失的磷量很小, 但在田间条件下, 自然降水对耕层土壤的冲刷打击使土壤分散而形成的土壤颗粒是否可以增加颗粒磷的淋失量有待研究。

2.1.3 渗滤液中各形态磷的淋失量 表3显示的是各次淋滤试验淋失到 20 cm 以下的磷的淋失量, 表中数据为 60 d 的试验结果, 每个土柱加入水量的

总和相当于 356.72 mm, 约为年灌溉量和降雨量总和的 35.6% (年灌溉 5 次, 灌溉定额 60 m³, 降雨量按 550 mm 计算^[15])。计算得到的钼酸盐反应磷、可溶性全磷、可溶性有机磷、颗粒磷淋失量变幅分别为 0.150 ~ 722、2.38 ~ 109 × 10、0.00 ~ 739 和 0.00 ~ 576 g hm⁻², 淋失总磷量变幅为 0.220 ~ 108 × 10 g hm⁻²。钼酸盐反应磷、可溶性全磷、可溶性有机磷、颗粒磷淋失量算术平均值分别为 188、204、41.7、46.9 g hm⁻², 淋失全磷的平均值为 233 g hm⁻² (包括所有处理)。淋失量变幅大的原因除了渗滤液磷浓度外, 还有一个重要原因是渗滤液量也有较大变幅, 前三次样品变异系数 (CV) 高于 30%, 以后变幅在 5% ~ 22% 之间。

表 3 渗滤液中各形态磷的淋失量

Table 3 Amount of different forms of phosphorus in leachate (g hm⁻²)

采样次数 Times	钼酸盐反应磷	可溶性全磷	可溶性有机磷	颗粒磷	全磷
	Molybdate reactive phosphorus	Total dissolved phosphorus	Dissolved organic phosphorus	Particulate phosphorus	Total phosphorus
1	0.400 ~ 492	2.94 ~ 551	0.00 ~ 85.9	0.00 ~ 144	2.16 ~ 528
2	2.12 ~ 540	3.51 ~ 109 × 10	1.38 ~ 63.4	2.56 ~ 576	6.64 ~ 108 × 10
3	1.45 ~ 326	2.97 ~ 667	0.670 ~ 637	0.00 ~ 232	31.2 ~ 516
4	0.680 ~ 442	7.34 ~ 465	7.86 ~ 168	4.23 ~ 259	56.4 ~ 593
5	4.53 ~ 386	9.43 ~ 417	0.520 ~ 88.7	0.690 ~ 83.6	10.1 ~ 478
6	1.12 ~ 540	2.38 ~ 589	0.860 ~ 77.7	0.500 ~ 76.5	4.41 ~ 620
7	0.830 ~ 580	15.4 ~ 608	2.07 ~ 100	0.620 ~ 135	5.94 ~ 656
8	70.4 ~ 722	73.1 ~ 844	1.62 ~ 199	0.990 ~ 89.6	81.6 ~ 921
9	45.7 ~ 513	53.8 ~ 705	0.530 ~ 739	0.780 ~ 92.8	59.3 ~ 593
10	73.6 ~ 532	71.1 ~ 607	0.200 ~ 79.8	1.09 ~ 98.2	73 ~ 706
11	0.150 ~ 578	22.5 ~ 644	1.44 ~ 106	1.18 ~ 194	10.4 ~ 837
12	16.7 ~ 494	17.6 ~ 613	0.940 ~ 204	0.00 ~ 88.0	0.22 ~ 638
13	17.1 ~ 495	49.4 ~ 613	0.880 ~ 119	3.90 ~ 53.2	42.36 ~ 638

2.2 渗滤液中各形态磷与土壤 Olsen-P 的关系

表 4 为各次试验不同形态磷浓度与土壤 Olsen-P 含量相关关系的决定系数 (R²)。因为部分原状土柱样品是来自相同处理不同重复的小区, 为方便起见在回归方程时, 将相同处理的各个重复的渗滤液中不同形态磷的浓度及耕层 Olsen-P 浓度做了平均, 也就是说, 仍然将其作为重复看待 (实际上, 一些重复之间已经产生了变异, 形成了不同 Olsen-P 浓度梯度)。

由表中可以看出钼酸盐反应磷、可溶性全磷、可溶性有机磷、全磷、颗粒磷与土壤耕层 Olsen-P 含

量的决定系数变幅分别为 0.839 ~ 0.980、0.730 ~ 0.981、0.053 ~ 0.952、0.763 ~ 0.986、0.007 ~ 0.994, 亦即 Olsen-P 可以说明钼酸盐反应磷的 83% ~ 98%、可溶性全磷的 73% ~ 98%、可溶性有机磷的 5.3% ~ 95.2%、全磷的 76.3% ~ 98.6% 和颗粒磷的 0.7% ~ 99.4%。淋失的 MRP、TDP 和 TP (除第一次) 与耕层土壤 Olsen-P 含量均为极显著相关, 其浓度随 Olsen-P 含量的增加而升高。可溶性有机磷和颗粒磷与土壤表层 Olsen-P 含量在多数淋失事件中相关性都较差, 仅在少数时间有很好相关, 例如可溶性有机磷在第 7 ~ 10 次、颗粒磷在第 2、3、10、11、13 次淋

滤事件中决定系数超过 0.9,但总体上没有明显的规律性。

需要说明的是,表 4 中各个形态的回归模型均以一元二次方程的决定系数最高。以第 1 次淋滤试验为例,MRP、TDP 为极显著相关,TP 为显著,DOP 显著性为 94%,PP 不显著。遗憾的是由于本项试验

所用材料没有 Olsen-P 含量为 150~270 mg kg⁻¹范围内试验样品,如果将最高点视为异常值而予以剔除,就完全成为另一种结果。为验证这些点并非异常值,将每个土柱作为一个处理(与前述平均结果相对),将 13 次淋滤实验测定结果平均,然后分别与对应的耕层 Olsen-P 浓度作图,所得结果见图 2。

表 4 渗滤液中各形态磷浓度与土壤耕层 Olsen-P 含量的决定系数(R^2 , $n=9$)

Table 4 Determination coefficients of different forms of phosphorus in leachate and Olsen-P contents of soil plough layers

采样次数 Times	钼酸盐反应磷 Molybdate reactive phosphorus	可溶性全磷 Total dissolved phosphorus	可溶性有机磷 Dissolved organic phosphorus	全磷 Total phosphorus	颗粒磷 Particulate phosphorus
1	0.839 ^{**}	0.909 ^{**}	0.701	0.763 [*]	0.131
2	0.949 ^{**}	0.904 ^{**}	0.198	0.986 ^{**}	0.991 ^{**}
3	0.919 ^{**}	0.838 ^{**}	0.223	0.975 ^{**}	0.919 ^{**}
4	0.889 ^{**}	0.881 ^{**}	0.086	0.856 ^{**}	0.066
5	0.814 ^{**}	0.730 [*]	0.053	0.887 ^{**}	0.007
6	0.942 ^{**}	0.932 ^{**}	0.363	0.929 ^{**}	0.064
7	0.966 ^{**}	0.980 ^{**}	0.929 ^{**}	0.953 ^{**}	0.257
8	0.948 ^{**}	0.950 ^{**}	0.952 ^{**}	0.952 ^{**}	0.540
9	0.909 ^{**}	0.969 ^{**}	0.939 ^{**}	0.939	0.643
10	0.979 ^{**}	0.981 ^{**}	0.903 ^{**}	0.976 ^{**}	0.951 ^{**}
11	0.973 ^{**}	0.972 ^{**}	0.536	0.985 ^{**}	0.994 ^{**}
12	0.920 ^{**}	0.923 ^{**}	0.408	0.941 ^{**}	0.328
13	0.980 ^{**}	0.943 ^{**}	0.519 [*]	0.968 ^{**}	0.988 ^{**}

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ (SPSS 11.0)

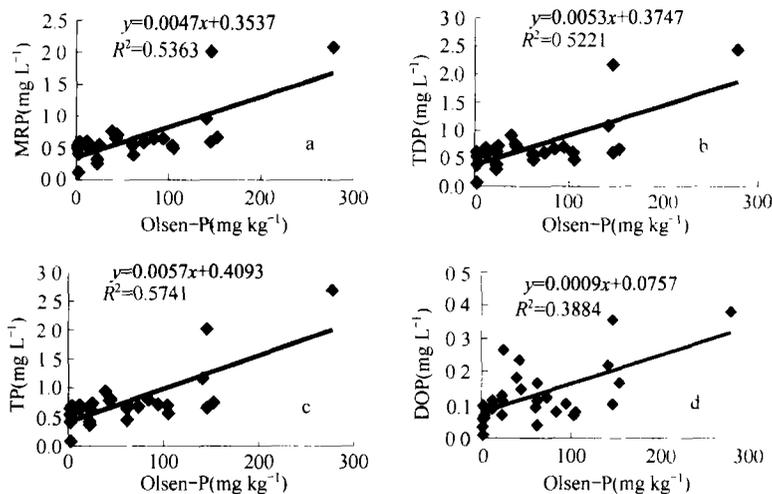


图 2 13 次试验渗滤液中各形态磷浓度平均值与土壤耕层 Olsen-P 含量的关系

Fig. 2 Relationship between mean concentration of different forms of phosphorus in leachate and Olsen-P content of soil plough layers in 13 leaching events (average) ($n=30$; $R(0.01)=0.456$, 对应 $R^2=0.2079$; $R(0.05)=0.355$, 对应 $R^2=0.1260$)

由图 2 可以看出, 钼酸盐反应磷(图 2a)、可溶性全磷(图 2b)、全磷(图 2c)和可溶性有机磷(图 2d)与耕层 Olsen-P 均为极显著相关(PP 没有相关性, 未列出)。剔除 Olsen-P 为 278 mg kg^{-1} 的点时, 以上关系式分别为: $\text{MRP} = 0.0034 \text{ Olsen-P} + 0.4125$ ($R^2 = 0.2844$), $\text{TDP} = 0.0035 \text{ Olsen-P} + 0.4559$ ($R^2 = 0.2494$), $\text{DOP} = 0.0006 \text{ Olsen-P} + 0.0853$ ($R^2 = 0.1795$), $\text{TP} = 0.0035 \text{ Olsen-P} + 0.5084$ ($R^2 = 0.2896$), DOP 显著相关, 其他均为极显著相关。如果将 Olsen-P 为 146 mg kg^{-1} 时的点(图 2 直线上方)也作为异常值剔除, 则 MRP 仍为极显著, TOP 和 TP 显著相关, DOP 没有相关。模拟试验渗滤液中磷浓度与土壤 Olsen-P 的相关性同时也证明塿土磷的淋失损失与土壤磷水平或施肥管理有关。

3 结 论

从 13 次淋滤试验结果中, 可以得到以下结论:

1) 无论施磷肥还是 13 年不施磷肥的塿土, 都可以测度到磷的淋失;

2) 塿土中磷淋移的主要形态为可溶性磷, 平均占淋失全磷量的 82.5%, 颗粒磷占 17.9%; 在可溶性磷中, 以钼酸盐反应磷为主, 平均占全磷量的 77.1%, 可溶性有机磷只占全磷的 13.8%;

3) 淋失到 20cm 以下的磷浓度最高可达到 3.95 mg L^{-1} (全磷 TP), 可溶性全磷达 3.57 mg L^{-1} ; 在历时 60 天, 相当于 357mm(约为灌溉降雨总和的 36%) 的灌溉量时, 最大淋失总磷量达到 1082 g hm^{-2} ;

4) 淋失的钼酸盐反应磷、可溶性全磷和全磷浓度与土壤耕层 Olsen-P 显著正相关, 表明塿土磷淋失与土壤磷水平或施肥管理有关。

参 考 文 献

[1] Behrendt H, Boekhold A. Phosphorus saturation in soils and groundwaters. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1993, (4): 233 ~ 243

[2] Haygarth P M, Chapman P J, Jarvis S C, *et al.* Phosphorus budgets for two contrasting grassland farming systems in the UK. *Soil Use and Management*, 1998, 14: 160 ~ 167

[3] Sharpley A N, Daniel T C, Edwards D R. Phosphorus movement in the landscape. *Journal of Production Agriculture*, 1993, (6): 492 ~ 500

[4] Cully J L B, Bolton E F, Bernyk V. Suspended soils and phosphorus loads from a clay soil: I Plot studies. *J. Environ. Qual.*, 1983, 12: 493 ~ 498

[5] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broad-

balk experiment. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24: 904 ~ 910

[6] Stamm C, Fluhler H, Gächter R, *et al.* Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 515 ~ 522

[7] Beauchemin S, Simard R R, Cluis D. Forms and concentration of phosphorus in drainage waters of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 721 ~ 728

[8] Simard R R, Beauchemin S, Haygarth P M. Potential for preferential pathways of phosphorous transport. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 97 ~ 105

[9] Uusitalo R, Turtola E, Kaupilla T, *et al.* Particulate phosphorus and sediment in surface runoff and drainflow from clayey soils. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30: 589 ~ 595

[10] Lü Jia long, Fortune S, Brookes P. P Fractions in drainage waters from the Broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted. *Pedosphere*, 2004, 14(2): 235 ~ 240

[11] Ron Vaz M D, Edward A C, Shand C A, *et al.* Phosphorus fractions in soil solution: Influence of soil acidity and fertilizer additions. *Plant Soil*, 1993, 148: 175 ~ 183

[12] Shand C A, Macklon A E S, Edwards A C, *et al.* Inorganic and organic P in soil solutions from three upland soils: I Effects of soil solution extraction conditions, soil type and season. *Plant Soil*, 1994, 159: 255 ~ 264

[13] Jordan C, Smith R V. Factors affecting leaching of nutrients from an intensively managed grassland in County Antrim, Northern Ireland. *J. Environ. Manage*, 1985, 20: 1 ~ 15

[14] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Chinese Society of Soil Science. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: Chinese Press of Agricultural Science and Technology, 1999

[15] 杨学云, 孙本华, 马路军, 等. 黄土施肥效应与肥力演变的长期定位监测研究 I. 长期施肥的产量效应. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 66 ~ 70. Yang X Y, Sun B H, Ma L J, *et al.* A study on the effect of fertilization and fertility evolution of loess soil in long-term stationary experiment I. Effects of long-term fertilization on crop yield (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Supplement): 66 ~ 70

[16] 杨学云, 张树兰, 刘杏兰. 有机-无机肥配施增产效应及土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积定位研究. *西北农业学报*, 1998, 7(2): 63 ~ 66. Yang X Y, Zhang S L, Liu X L. Effect of combined application of organic manure and fertilizers on crop yield and accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profile (In Chinese). *Acta Agri. Boreali-Occidentalis Sin.*, 1998, 7(2): 63 ~ 66

[17] Hanaupel R J, Fuller W H, Shirley B, *et al.* Phosphorus movement in a calcareous soil: I Predominance of organic forms of phosphorus in phosphorus movement. *Soil Sci.*, 1964, 97: 350 ~ 357

[18] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14: 319 ~ 321

[19] Gardner C M K, Cooper D M, Hughes S. Phosphorus in soils and field drainage water in the Thame catchment, UK. *The Science of the Total Environment*, 2002, 282/283, 253 ~ 262

- [20] Turtola E, Jaakkola A. Loss of phosphorus by surface and leaching from a heavy clay soil under barley and grass ley in Finland. *Acta Agri. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.*, 1995, 45: 158 ~ 165
- [21] Brookes P C, Heckrath G, Smet J De, et al. Losses of phosphorus in drainage water. In: Tunney H, Carton O T, Brookes P C, et al eds. *Phosphorus Loss from Soil to Water*. Wallingford, UK: CAB International, . 1997. 253 ~ 268
- [22] Rekolainen S, Ekholm P, Ulen B, et al. Phosphorus losses from agriculture to surface waters in the Nordic countries. In: Tunney H, Carton O T, Brookes P C, et al eds. *Phosphorus Loss from Soil to Water*. Wallingford, UK: CAB International, 1997. 77 ~ 93
- [23] Hannapel R J, Fuller W H, Fox R H. Phosphorus movement in a calcareous soil : II Soil microbial activity and organic phosphorus movement. *Soil Sci.*, 1964, 98: 421 ~ 427

FORMS OF PHOSPHORUS LEACHING IN LOESSIAL SOIL

Yang Xueyun Gu Qiaozhen Ma Lujun Sun Benhua Li Shengxiu

(College of Resource and Environment , Northwest Sci-Tech. Uni of Agr. and Fores. , Yangling , Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on the soil phosphorus gradient obtained from two long-term stationary fertilizer experiments on loessial soil, an intact soil cores (20 cm in depth) experiment was conducted to study forms of phosphorus in leachate. The results show that phosphorus leached from loessial soil mainly in dissolved form (TDP), which accounted for 82.5 percent of the total P (TP) in the leachate, and particulate phosphorus (PP) for only 17.9%. Molybdate reactive phosphorus (MRP), being a chief component of the dissolved phosphorus, constituted on average 77.1% of the total P in the leachate, whilst dissolved organic phosphorus (DOP) did 13.8%. The maximum TP concentration of the leachate reached to 3.95 mg L^{-1} and TDP 3.57 mg L^{-1} , during the 60-day experiment with a sum irrigation rate of 357 mm in total, approximately equal to 36% of the total annual precipitation and irrigation. The maximum phosphorus loss by leaching was observed reaching to 1082 g hm^{-2} . The results also indicated that MRP, TDP and TP concentrations of the leachate were significantly correlated with Olsen-P content of the plough layers.

Key words Intact soil core; Total dissolved phosphorus; Molybdate reactive phosphorus; Particulate phosphorus; Olsen-P; Phosphorus leaching