

太湖地区丘陵旱地土壤磷的吸持解吸特征

高 超¹ 张桃林²

(1: 南京大学城市与资源学系, 南京 210093; 2: 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

提 要 旱地土壤中流失的磷是地表水体中磷的重要来源, 本文通过模拟实验对比太湖地区丘陵旱地土壤和水稻土对磷的吸持解吸特征, 结果表明虽然旱地土壤对磷的固定能力略高于水稻土, 但由于旱地土壤的有效磷水平普遍高于水稻土, 因而前者磷的吸持饱和度(DPS)要大大高于后者, 这就决定了旱地土壤中的磷被淋溶或以溶解态随径流流失的风险和数量也显著高于水稻土. 磷吸持饱和度是土壤磷素水平和土壤固磷能力的综合指标, 更能反映土壤固相中的磷进入液相的难易程度, 可以作为评价水-土界面磷迁移能力的重要指标.

关键词 太湖地区 旱地土壤 磷 吸持解吸

分类号 S156.92

太湖的主要环境问题是水体富营养化, 磷是其主要限制因子^[1,2]. 由于磷肥的施用量普遍高于作物收获所带走的磷, 太湖地区农田土壤磷素近二十年来一直处于积累状态^[3], 这无疑使得农田土壤磷素流失的风险和数量大大增加. 太湖地区以平原为主, 丘陵山地只占总面积的25%左右^[4], 但从非点源磷污染发生的角度看, 后者更值得注意, 因为在太湖地区, 单位面积旱地磷的流失量要远远大于水田^[5,6].

以颗粒态和溶解态磷随径流流失是农田生态系统中的磷进入水体的主要途径之一^[7,8], 溶解态磷虽然往往在数量上低于颗粒态磷, 但主要以正磷酸盐形式存在的溶解态磷可为藻类所直接吸收利用, 对地表水环境质量有着更为直接的影响^[8,9]. 由于土壤对磷的吸持解吸特征可用来评价土壤固相中的磷进入液相进而向水体流失的难易程度, 因而近年来越来越多地被用于研究水-土界面磷的迁移能力^[10-12]. 本文通过研究太湖地区丘陵旱地土壤对磷的吸持解吸特征, 对比不同类型土壤中磷流失的潜在风险, 并探索可用以表征水-土界面磷迁移能力的量化指标.

1 材料与方法

1.1 土壤样品

在太湖流域丘陵区采集旱坡地土壤样品(0-15cm)8个, 土地利用方式主要为旱地、菜地和茶园, 同时在区内采集水旱轮作的水稻土样品8个以作为对比. 样品风干后过2mm筛, 土壤常规农化分析方法如pH、有效磷(Olsen P)、有机质(OM)、活性铁(Fe_{ox})和活性铝(Al_{ox})的测定主要参照《土壤理化分析》^[13]和《土壤农业化学分析方法》^[14]进行. 供试土壤的基本化学性质见表1.

• 中国科学院“九五”重大项目(KZ951-A1-301)和院特别支持项目(KZ95T-04-01)
收稿日期: 2000-12-09; 收到修改稿日期: 2001-04-22. 高 超, 男, 1962年生, 博士.

表 1 供试样品的基本化学性质

Tab. 1 Selected chemical properties of the soils studied

样品 编号	土壤 类型	利用 方式	pH	有机质 (g/kg)	总氮 (g/kg)	总磷 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	Fe _{ox} (g/kg)	Al _{ox} (g/kg)
23	黄棕壤	旱地	7.1	15.7	1.17	0.52	16.1	43.9	3.84	3.10
25	黄棕壤	茶园	4.4	28.5	1.89	0.42	10.1	86.4	2.18	2.77
14	棕红壤	旱地	7.7	22.3	1.40	0.43	13.7	62.8	2.39	3.08
33	棕红壤	茶园	6.6	16.1	1.13	0.38	4.9	91.2	1.66	3.93
38	棕红壤	茶园	4.8	23.8	1.67	0.35	6.3	83.8	2.40	3.43
49	棕红壤	茶园	4.6	21.3	1.60	0.72	45.0	109.7	1.98	3.60
109	棕红壤	菜地	7.8	31.2	1.64	1.00	56.0	91.3	3.59	3.06
110	棕红壤	旱地	6.1	19.1	1.45	0.45	6.2	55.3	2.23	3.44
	旱地土壤平均值		6.1	22.3	1.49	0.53	19.8	78.1	2.53	3.30
	水稻土平均值		6.5	29.3	2.09	0.49	9.7	65.5	7.20	3.27

1.2 磷吸附等温线的测定方法

每个样品称取 5g 各 7 份于离心管中,分别加入含磷量为 0、10、20、40、60、100 和 150mg/L 的 0.01mol/L CaCl₂ 溶液 50mL,同时加入 3 滴甲苯以抑制微生物的活动.25℃ 下振荡 24h,过滤后测定平衡溶液中磷浓度,根据其浓度变化计算土壤的吸磷量/解吸量.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,并用 Langmuir 方程

$$C/q = 1/kQ_m + C/Q_m$$

进行拟合.上式中, q 是土壤吸磷量, 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.根据实验结果还可得到易解吸磷(RDP)、磷零吸持平衡浓度(EPC₀)和磷吸持饱和度(DPS)等参数,RDP 是加磷量为 0 时土壤固相磷进入液相部分的数量,即 0.01mol/L CaCl₂ 溶液提取的磷.EPC₀ 是土壤溶液中的磷在达到吸持与解吸动态平衡时的浓度,而磷吸持饱和度(DPS=Olsen P/ $Q_m \times 100$)是土壤有效磷水平和土壤固磷能力的综合指标^[15].

1.3 磷解吸量的测定与累计

为研究供试土壤磷的解吸特征,采用氧化铁试纸法测定供试土壤磷的多次累计解吸量(Σ Pi-P).氧化铁试纸的制备采用 Chardon 等^[16]推荐的方法,其测定方法如下:每个土样称取 5g 于 100mL 离心管中,加蒸馏水 50mL 并放入 10×2cm² 的氧化铁试纸两片,加塞后于 25℃ 下振荡 2h,随之取出试纸并用蒸馏水将沾于试纸上的土粒洗入离心管中,凉干后用 0.1mol/L H₂SO₄ 溶液溶解试纸,测定溶液中的磷浓度并换算为第一次提取时土壤的 Pi-P₁ 值.在取出试纸后用离心机分离离心管中的土样和溶液,小心倒去溶液后将土样于 25℃ 下放置一星期,再测定第二次提取时土壤的 Pi-P₂ 值,提取方法与第一步相同.这一步骤重复 8 次,最后计算 8 次提取的 Pi-P 累计值($\sum_{i=1}^8$ (Pi-P)_i),简作 Σ Pi-P).

2 结果与讨论

2.1 土壤对磷的吸持特征

磷在土壤固、液相间的分配特征,可用 Langmuir 等温式来表征^[17,18].供试土壤样品对磷

的吸持特征用 Langmuir 方程来拟合,其相关性都达到极显著水平 ($r^2 = 0.9793 - 0.9962^{***}$),说明该方程是完全适用的.图 1 和图 2 为供试土壤的等温吸附曲线,表 2 为根据实验结果和 Langmuir 方程得到的土壤最大吸磷量 Q_m 以及反映水土界面磷迁移能力的 RDP、 EPC_0 和 DPS 等相关参数. EPC_0 和 DPS 可用来表征磷从土壤固相进入溶液的风险大小, EPC_0 值越大,固相磷越容易进入土壤溶液^[19,20],而随着 DPS 值的增大,土壤对磷的吸持强度逐渐降低^[15].

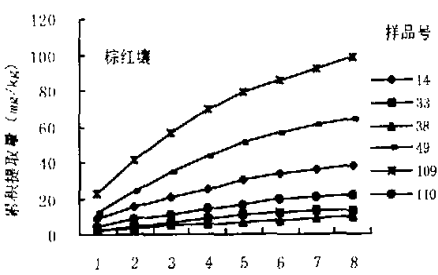


图 1 棕红壤对磷的等温吸附曲线

Fig.1 P-sorption isotherm in red brown soils

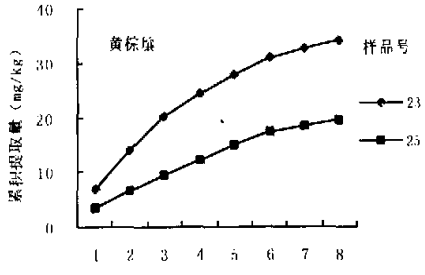


图 2 黄棕壤对磷的等温吸附曲线

Fig.2 P-sorption isotherm in yellow brown soils

大部分供试旱地土壤样品的最大吸磷量在 400 – 800mg/kg(表 2),少数样品可达到 1000mg/kg 以上,旱地土壤样品的 Q_m 平均值(763.3mg/kg)略大于水稻土(707.8mg/kg),但其变异性要比水稻土大得多,二者的标准差分别为 232.0mg/kg 和 83.7mg/kg,说明旱地土壤的固磷能力差异较大.由于区内旱地土壤很多被用来种植经济作物,磷肥施用量较大,土壤磷素积累较多,因而旱地土壤的有效磷水平大大高于水稻土(表 1),尽管旱地土壤的固磷能力稍大于水稻土,但前者磷的吸持饱和度要比后者高得多(旱地土壤和水稻土的 DPS 平均值分别为 2.8 和 1.4).土壤对磷的吸持饱和度越高,则土壤中固磷能力较强的吸附位多已被占据,土壤固相中的磷越容易向液相释放.实测结果也表明旱地土壤的 RDP 和 EPC_0 平均值(分别为和)要比水稻土(和)大得多,说明在一定条件下旱地土壤中的磷由固相转入液相而被淋溶或以溶解态随径流流失的风险和数量要大大高于水稻土.

表 2 供试土壤对磷的基本吸持解吸特征

Tab.2 P sorption and desorption characteristics of the soils

样 号	土 壤	Q_m (mg/kg)	DPS	EPC_0 ($\mu\text{g/L}$)	RDP (mg/kg)	ΣP -P (mg/kg)
23	黄棕壤	460.8	3.49	71.5	0.62	34.2
25	黄棕壤	1041.7	0.97	19.9	0.20	19.3
14	棕红壤	565.0	2.42	67.1	0.60	37.9
33	棕红壤	657.9	0.75	20.7	0.20	13.2
38	棕红壤	1149.4	0.54	11.9	0.12	9.4
49	棕红壤	813.0	5.53	72.4	0.70	63.4
109	棕红壤	719.4	7.78	263.0	2.29	97.8
110	棕红壤	699.3	0.89	18.1	0.18	21.6
旱地土壤	平均值	763.3	2.80	68.1	0.61	37.1
	标准差	232.0	2.65	83.0	0.72	30.0
水稻土	平均值	707.8	1.40	25.7	0.25	25.4
	标准差	83.7	0.62	11.0	0.11	5.6

2.2 磷从旱地土壤中的解吸

表 2 列出了用氧化铁试纸从供试旱地土壤样品中累计提取(共提取 8 次)的磷的数量(Σ Pi-P),同时还列出了 8 个水稻土样品的 Σ Pi-P 平均值以作为对比,图 3 是供试样品磷的累计解吸曲线.对于稻-麦(油)轮作的水稻土来说, Σ Pi-P 值差异不大,其平均值为 25.4mg/kg,标准差为 5.6mg/kg,而旱地土壤的 Σ Pi-P 不仅明显高于水稻土,而且样品之间的差异十分显著,其平均值为 37.1mg/kg,标准差为 30.0mg/kg,如对于棕红壤样品来说, Σ Pi-P 最大值是最小值的 10 倍以上(图 3)

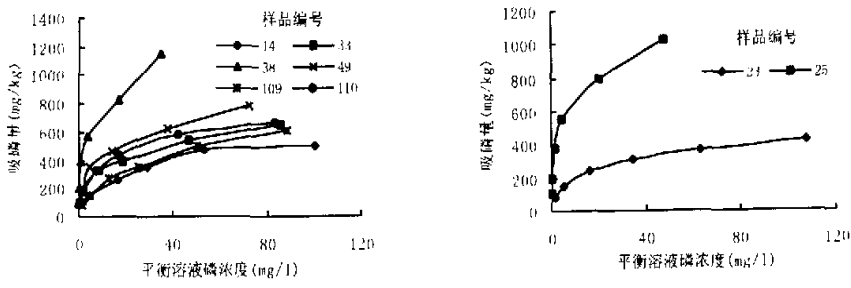


图 3 氧化铁试纸法从棕红壤和黄棕壤中累计提取的磷的数量

Fig. 3 Cumulative P release from the soils

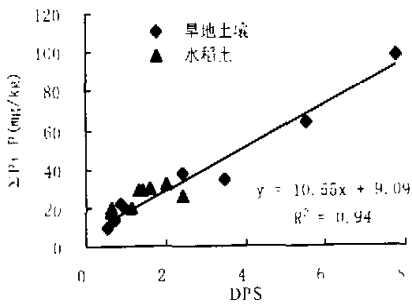


图 4 磷的累计解吸量与磷吸持饱和度之间的关系

Fig. 4 Relationship between Σ Pi-P and DPS of the soils

磷累计解吸量的多少与土壤有效磷水平有着直接的关系,因为土壤有效磷水平表征了土壤中可交换性磷的数量.在供试土壤中有有效磷含量最高的 109 和 49 号样品其 Σ Pi-P 值分别达 97.8mg/kg 和 63.4mg/kg,而有效磷含量较低的土壤其 Σ Pi-P 值仅为 10mg/kg 左右(表 1、2、图 3).同时,磷累计解吸量的多少还决定于土壤的固磷能力,土壤固磷能力弱则磷就容易从固相向液相释放,反之亦然.由于磷吸持饱和度是土壤磷素水平和土壤固磷能力的综合指标,因而更能反映土壤固相中的磷向液相释放的难易程度,这在本次实验中也已得到证实.图 4 显示了磷的累计解吸量与磷吸持饱和度之间的关系,二者的相关性达到极显著水平($r^2 = 0.94^{***}$),说明土

壤的 DPS 值可以作为可靠的指标,来评价农田土壤中的磷向水体释放的风险.

3 结论

太湖地区旱地土壤对磷的固定能力略高于水旱轮作的水稻土,但由于旱地土壤的有效磷水平普遍较高,因而其中的磷被淋溶或以溶解态随径流流失的风险和数量要大大高于水稻土.磷吸持饱和度是土壤磷素水平和土壤固磷能力的综合指标,因而更能反映土壤固相中的磷进入液相的难易程度,DPS 值越大,土壤中磷解吸的数量越多.DPS 值的大小在很大程度上决定了土壤中的磷向水体的释放量,因此可以作为评价水土界面磷迁移能力的可靠指标,DPS 值

高的土壤分布区应作为农业非点源磷污染的控制重点。

参 考 文 献

- 1 李荣刚,夏源陵,吴安之等.江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量.湖泊科学,2000,12(2):147-153
- 2 范成新.太湖水体生态环境历史演变.湖泊科学,1996,8(4):297-304
- 3 高 超,张桃林.太湖地区农田土壤磷家动态及其环境影响分析.农村生态环境,2000,16(4):224-227
- 4 孙顺才,黄漪平.太湖.北京:海洋出版社,1993
- 5 张水铭,马杏法,汪祖强.农田排水中磷素对苏南太湖水系的污染.环境科学,1993,14(6):24-30
- 6 马立珊,汪祖强,张水铭等.苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究.环境科学学报,1997,17(1):39-47
- 7 高 超,张桃林.农业非点源磷污染对水体富营养化的影响及对策.湖泊科学,1999,11(4):369-375
- 8 Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, *et al.* Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. *J Environ Qual*, 1994, 23:437-451
- 9 Nash D M, D J Halliwell. Fertiliser and phosphorus loss from productive grazing systems. *Aust J Soil Res*, 1999, 37(3):403-429
- 10 Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, *et al.* Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J Environ Qual*, 1999, 28:170-175
- 11 Mozaffari M, Sims J T. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. *Soil Sci*, 1994, 157:97-107
- 12 Abrams M M, Jarrell W M. Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels. *J Environ Qual*, 1995, 24:132-138
- 13 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978
- 14 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,1999.166-187
- 15 Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, *et al.* Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J Soil & Water Conserv*, 1996, 51(2):160-166
- 16 Chardon W J, Menon R G, Chien S H. Iron oxide impregnated filter paper (Pi test): a review of its development and methodological research. *Nutr Cycl Agroecosystems*, 1996, 46:41-51
- 17 Olsen S R, Watanabe F S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1957, 31:144-149
- 18 何振立,朱祖祥,袁可能等.土壤对磷的吸持特征及其与土壤供磷指标之间的关系.土壤学报,1998,25(4):397-404
- 19 Taylor A W, Kunishi H M. Phosphate equilibria on stream sediment and soil in a watershed draining an agricultural region. *J Agric Food Chem*, 1971, 19:827-831
- 20 Indiat R, Sharpley A N. Soil phosphorus sorption and simulated runoff parameters as affected by fertilizer addition and soil properties. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1995, 26(15 & 16):2319-2321

Phosphorus Sorption and Desorption of Upland Soils in the Hilly Areas of Taihu Lake Watershed

GAO Chao¹ ZHANG Taolin²

(1: *Urban and Resource Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, P. R. China;*

2: *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

Abstract

Phosphate sorption isotherms were determined for representative upland and paddy soils in Taihu Lake watershed. P desorped from the soils were also studied by successive extractions with iron oxide-impregnated paper strips. Although the averaged P sorption maxima of upland soils derived from Langmuir sorption plot was a little higher than that of paddy soils the potential of P loss from upland soils to waterbodies was greater because upland soils usually had a much higher P level. The Degree of Phosphorus Saturation (DPS), an integrated expression of soil P level and soil sorption capacity, can give good estimate of the amount of P desorped from soils so it can be used as a reliable index to assess the potential of soil P loss via leaching or surface runoff.

Key Words Taihu Lake region, upland soils, phosphorus, sorption and desorption