植物营养与肥料学报 2006,12(4):544 - 548
Plant Nutrition and Fertilizer Science

蔬菜地土壤磷饱和度及其对磷释放和水质的影响

章明奎，周 翠，方利平
（浙江大学环境与资源学院资源科学系，浙江杭州 310029）

摘要：为了解蔬菜地土壤磷素的积累对水环境的影响，我们在浙江省选择了33个代表性蔬菜地，采集和分析了土壤、地表水和地下水样的磷素状况，从土壤磷饱和度的角度，研究了浙江省主要蔬菜土壤磷积累状况及其对地表和地下水水质和土壤磷释放潜力的影响。结果表明，半透膜渗析法测得的磷释放量与土壤磷积累呈正相关，磷释放量随土壤磷饱和度的提高而增加。蔬菜地土壤磷饱和度的增加可显著提高地表水体和地下水中磷的浓度，当土壤磷饱和度小于25%左右时，水体中磷浓度随土壤磷饱和度增加较为缓慢；但当磷饱和度大于25%时，水体中磷浓度随土壤磷饱和度提高迅速上升。地表水中磷浓度主要与表层土壤磷饱和度有关；地下水中磷浓度主要受深层土壤磷饱和度的影响，与表层土壤磷饱和度的相关性较小。土壤磷饱和度可很好地表征土壤磷释放和对环境的潜在影响。

关键词：蔬菜地；磷饱和度；磷释放；水质；
中图分类号：S158.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2006)04-0544-05

Phosphorus saturation degree of soils on vegetable farms and its effects on soil phosphorus release potential and water quality

ZHANG Ming-kui, ZHOU Cui, FANG Li-ping
(*College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*)

Abstract: Phosphorus losses from agricultural soils to water can pose a threat to water quality. The concern over P with respect to water quality is its stimulation on algae and other aquatic plant growth. Phosphorus inputs to agricultural soils that are regularly fertilized with mineral P can exceed crop requirement. This over-supplied P often results in excessive P accumulation in the soil, and such soils represent a potential diffuse source of pollution as P for the eutrophication of surface waters. Little information is available on the release intensity of P to water from vegetable soils and its relation to the P saturation degree in the soils. In this study, 33 surface soil samples and 17 soil profiles with a wide range of total P, and runoff and groundwater samples were collected from various vegetable fields in Zhejiang province. Results showed that long-term over application of P could elevate P saturation degree, increased P release potential from the soils. Phosphorus release intensity measured by means of dialysis was positively correlated with soil P accumulation, and increased significantly with P saturation degree of the soils. Increased soil P saturation degree could increase P concentrations in surface waters and groundwater. The P concentration in surface runoff increased slowly with increasing P saturation degree when P saturation degree was below 25%, but it increased rapidly when P saturation degree was over 25%. The P concentration in surface waters was mainly correlated with P saturation degree of the surface soils, whereas the P concentration in groundwater was controlled by P saturation degree of subsurface soils. These results indicated that soil P saturation degree could efficiently characterize soil P release potential and its impaction on the environments.

Key words: vegetable farm; P saturation degree; P release potential; water quality

收稿日期：2005-06-06　　**修改稿收到日期**：2005-08-04
基金项目：浙江省科技计划项目(2004C33061)资助。
作者简介：章明奎(1964—)，男，浙江绍兴人，博士，教授，主要从事土壤与环境方面的研究。

农用地磷素流失污染水体已引起广泛的关注[1-2]。研究表明，磷肥施用量的提高和土壤磷素的积累是导致地表径流中磷浓度增加的主要原因[3-4]。蔬菜地是我国重要的农业用地，种植面积约1600多万 hm^2，占世界蔬菜种植面积的35%[5]。为追求高经济利益，我国蔬菜生产普遍存在超量施用化肥，具有高投入、高产出、高度集约化和高复种指数等特点，蔬菜生产更多地依赖肥料的施用。化肥施用超过作物需要量不仅造成肥料资源的浪费，而且对生态环境构成了潜在的威胁。磷的当季利用率一般在10%—25%，因此连续施用磷肥可使大量的磷积累在土壤中。近年来研究表明，当土壤磷积累到一定程度时，土壤磷的释放潜力可大大增加，相应地有关环境敏感土壤磷水平的研究也是这方面研究的热点，并提出了有关指标用于分析土壤磷积累对环境的影响[6-9]。土壤磷的饱和度是近年来提出的土壤磷环境敏感指标，被认为可较好地指示土壤磷的释放潜力[2,6]。目前有关环境敏感土壤磷水平的研究多集中在北美和欧州国家，我国的这方面研究较少。虽然近年来开始注意到蔬菜生产中不合理的施肥方式可对环境产生不良的影响，但有关蔬菜地土壤磷素的积累程度对环境影响的定量研究很少。为此，从土壤磷饱和度的角度，研究了浙江省主要蔬菜土壤磷积累状况及其对地表和地下水水质和土壤磷释放的影响，为合理施用磷肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试土壤

根据浙江省蔬菜地的分布，在杭州(13个点)、绍兴(4个点)、嘉兴(3个点)、湖州(5个点)、宁波(5个点)和温州(3个点)等地(市)共选择了33个田块进行土壤样品、田间水样的采集。土壤样品包括33个表层土样和17个剖面的68个分层土样。表层土样为多点混合样，每一研究田块各采1个混合样(由田块内不同位置的5～10采样点采样混合而成)，采样深度为0—20 cm。剖面土样采自33个田块的其中17个田块(其中，杭州6个点、绍兴2个点、嘉兴2个点、湖州3个点、宁波2个点和温州2个点)，深度分别为0—20、20—40、40—60和60—100 cm。研究土壤的类型包括潮土和水稻土二类，蔬菜种植时间有较大的变化，在4年至50年之间(表1)。地表水样在雨季采集，为田间排水沟水样，采自与土样一致的以上33个田块中，每个采样田块各采集3～5次，每次由田内不同位置采集的5～10个样混合而成；地下水水样在采集土壤剖面样时采集，共14个地下水样(其它3个剖面因地下水埋藏较深，没有采集)。水样经过滤后，用钼兰比色法测定可溶态磷的浓度。土壤样品经混匀后分为二部分，一部分经室内风干，过2 mm土筛，部分土样进一步过0.125 mm土筛，分析pH等基本性质和总磷及磷的形态；另一部分冷藏，分析磷的吸附及释放特征，结果经含水量校正。

1.2　分析测定方法

土壤基本性质用常规法测定[9]；土样的全磷用 H_2SO_4—$HClO_4$ 消化，比色法测定[9]。

土壤磷分级采用Hedley等的方法[10]，即称0.5 g风干土样置于100 mL离心管中，顺次用30 mL去离子水、0.5 mol/L $NaHCO_3$(pH8.2)、0.1mol/L NaOH和1 mol/L HCl分别提取。每次提取振动荡时间为16 h，每次提取后用离心和过滤分离悬液。去离子水和HCl提取物中的P用比色法直接测定；$NaHCO_3$和NaOH的提取物中P经过硫酸铵—硫酸消化后用比色法测定。残余态P用土壤总P与以上四种可提取P的总和差值计算。

供试土壤潜在的磷最大吸附量(Q_m，mg/kg)用Langmuir方程拟合计算：$Q = KC\,Q_m/(1 + KC)$。式中Q为P的吸附量(mg/kg)，C为吸附平衡时溶液P的浓度(mg/L)，K为平衡常数。

磷等温吸附在25℃下进行，采用的固液比为1∶20(重量比)，初始加入的P浓度分别为0、5、10、20、30、40、50、60和70 mg/L，电介质为0.1 mol/L KCl，滴加2滴苯酚以阻止微生物的活动，振荡平衡时间为24 h。

土壤磷饱和度(Degree of phosphorus saturation，DPS)指土壤胶体上已吸附磷的数量占土壤磷总吸附容量的百分数，本试验按下式计算：

$$DPS\ (\%) = STP \times 100\% / (Q_m + STP)$$[2]

式中 $Q_m + STP$ 为土壤磷总吸附容量，其中 Q_m 为(未被吸附的)潜在的磷最大吸附容量；STP为已被吸附的可解吸的P量，用0.5 mol/L $NaHCO_3$(pH8.5)在固液比为1∶20连续振荡解吸24 h时提取，比色法测定。

磷解吸采用半透膜渗析法测定。称相当于10 g干样的湿样于半透膜中，用绵线扎紧封口，置于250 mL的三角瓶中，加去离子水100 mL，加塞后在振荡机上慢速(20 r/min)间歇摇动48 h(预备试验表明，48 h磷释放量已达到平衡)，分析溶液中磷的浓度。

表1 采样田块及其表土基本性质

Table 1 Sampling fields and properties of the surface soils

田块号 Field No.	采样地点 Location	土壤类型 Soil type	蔬菜种植年限 Vegetable plantation time (a)	pH	有机C Organic C (g/kg)	质地 Texture	土壤磷饱和度 P saturation degree (%)	土壤P释放强度 Soil P release intensity (mg/L)	地表水P P in runoff (mg/L)
1	HZ	FA	50	6.4	30.6	CL	57.0	4.98	0.87
2	HZ	FA	45	5.3	24.5	CL	55.3	4.32	0.85
3	HZ	FA	35	5.1	21.3	CL	53.1	3.76	0.53
4	HZ	FA	30	5.8	17.3	CL	43.5	2.88	0.52
5	HZ	FA	15	7.8	16.3	L	37.6	1.89	0.36
6	HZ	FA	15	7.3	17.8	CL	33.5	1.34	0.35
7	HZ	FA	15	7.4	13.7	L	28.3	0.78	0.23
8	HZ	PS	10	7.1	18.9	CL	25.7	0.57	0.19
9	HZ	FA	7	7.6	15.5	L	23.9	0.53	0.18
10	HZ	FA	10	7.7	15.3	L	18.7	0.44	0.16
11	HZ	PS	8	6.8	17.8	CL	13.4	0.35	0.15
12	HZ	FA	6	7.5	11.1	L	9.7	0.27	0.14
13	HZ	FA	7	7.8	8.7	L	6.5	0.20	0.15
14	HuZ	FA	25	6.0	29.7	CL	53.6	3.98	0.78
15	HuZ	PS	15	6.5	32.2	LC	38.9	2.12	0.44
16	HuZ	PS	15	6.4	27.3	LC	30.3	1.03	0.26
17	HuZ	PS	12	7.1	25.3	LC	21.4	0.43	0.17
18	HuZ	PS	12	6.6	27.3	LC	17.5	0.36	0.15
19	SX	FA	20	6.1	19.4	CL	48.5	3.24	0.68
20	SX	PS	13	6.7	22.7	LC	28.1	0.76	0.24
21	SX	FA	10	7.3	13.4	LC	21.2	0.48	0.18
22	SX	FA	6	7.3	14.3	L	7.3	0.18	0.16
23	NB	FA	25	6.3	22.1	CL	39.7	2.34	0.51
24	NB	PS	12	6.6	21.9	LC	30.4	1.11	0.28
25	NB	PS	11	6.9	24.8	LC	27.4	0.69	0.22
26	NB	PS	10	7.3	23.6	LC	26.8	0.62	0.20
27	NB	PS	4	6.7	18.9	LC	5.0	0.17	0.13
28	JX	FA	15	6.8	23.4	CL	31.6	1.05	0.29
29	JX	PS	12	6.9	25.8	LC	28.6	0.81	0.25
30	JX	FA	13	6.7	21.3	L	25.3	0.54	0.18
31	WZ	PS	8	6.8	20.6	LC	15.6	0.38	0.16
32	WZ	PS	10	7.1	22.3	LC	13.5	0.31	0.14
33	WZ	PS	6	7.1	21.3	LC	11.3	0.25	0.14

注(Note): HZ—杭州 Hangzhou, HuZ—湖州 Huzhou, SX—绍兴 Shaoxing, NB—宁波 Ningbo, JX—嘉兴 Jiaxing, WZ—温州 Wenzhou; FA—潮土 Fluvo-aquic soil, PS—水稻土 Paddy soil; L—壤土 Loam, CL—粘壤 Clay loam, LC—壤粘 Loam clay.

2 结果与讨论

2.1 土壤磷的积累和饱和度

供试蔬菜地表层土壤pH在5.1～7.8之间,有机碳在8.7～32.2 g/kg之间(表1)。表层土壤总磷含量在0.47～3.96 g/kg之间,平均为1.23 g/kg,最高约为最低的8倍;有效磷(Olsen-P)含量在16～303 mg/kg之间,平均为114 mg/kg,最高约为最低的19倍。总磷和有效磷含量随蔬菜种植时间的增加呈增加的趋势,表明表层土壤磷的积累与长期种植蔬菜和施肥有关。剖面样的分析表明,表土总磷和有效磷含量均明显高于底土层,由表土向底土呈显著下降,表土和底土总磷和有效磷最大差异分别达15和31倍。17个剖面样品分析结果的相关分析看

出,表土与底土总磷和有效磷之间存在一定的相关,表土与20—40、40—60和60—100 cm各土层总磷的相关系数分别为0.8437**、0.8114**和0.7864**(n = 17);表土与20—40、40—60和60—100 cm土层有效磷的相关系数分别为0.8234**、0.8002**和0.7675**(n=17)。表明底土层磷的水平与表土磷积累有联系,这可能与进入表层土壤的磷越多,其向下迁移的磷也较多有关。

蔬菜地土壤中各形态P的组分也有较大的变化。对33个表层土壤分析表明,水可溶性磷(H_2O-P)在1.4～39.3 mg/kg之间变化,其中43%样品的水可溶性磷在10 mg/kg以上。所研究的蔬菜土壤中含有较高的有效磷,$NaHCO_3$-P在7.6～263.2 mg/kg之间。在研究的5种磷形态中,HCl-P是最主要的土壤P形态,但变化较大,其占总P量的21%～59%之间,平均为35.5%。HCl-P在不同土壤中的差异与土壤特性有关,pH较高的土壤中,HCl-P占总磷的比例较高。NaOH-P占总磷的18%～44%,平均为32%;残余态磷占总磷的14%～38%之间,平均占23%。$NaHCO_3$-P占4.6%～16.7%,平均占7.9%;H_2O-P占在0.6%～3.9%之间,平均占1.6%。总可提取态磷(包括H_2O-P、$NaHCO_3$-P、NaOH-P和HCl-P)约占总磷量的77%左右;可提取态P在一定条件下均可被逐渐释放。蔬菜地土壤含较高浓度的可提取态P及可提取态P占总P的比例较高,表明这些土壤中磷有较高的释放潜力。水可提取态P的移动性最大,当地表径流与土壤作用时,这一形态的磷将会被逐渐释放。$NaHCO_3$-P也是一类有效性较高的P库,其可通过微生物矿化或通过水中的阴离子交换而释放。NaOH-P主要包含被Fe、Al氧化物及有机质表面吸附的P和有机组分中的P,其中的无机形态的P(即被Fe、Al氧化物及有机质表面吸附的P)具有中等程度的有效性,在强还原条件下容易释放。而稀酸提取的HCl-P主要为与钙结合的P,在酸性条件下不稳定,长期施用酸性肥料可促使这一形态的磷溶解而释放。从以上分析可知,蔬菜地土壤中的磷主要为不稳定或亚稳定态磷,这些磷在一定条件下可释放进入水体。

土壤磷饱和度(DPS)在5%～57%之间,平均为28%。DPS的大小与土壤总磷含量存在显著的正相关(r = 0.8897**),因此蔬菜地中磷的大量积累是磷饱和度提高的主要原因。磷的释放与对磷的吸附和解吸过程有关,磷饱和度随磷吸附量的增加而增加,随着磷吸附量的增加,磷的解吸(或释放)潜力也随之增加,因此磷的吸附饱和度可用于评价土壤磷的释放潜力。荷兰已把土壤磷饱和度为25%作为土壤环境敏感的临界指标[11]。当土壤磷饱和度超过25%时,土壤磷的释放和流失将明显增加。供试的蔬菜地中有61%的土壤的磷饱和度在25%以上,表明研究的大部分土壤具有较高的土壤磷积累和释放潜力,对周围环境有潜在的影响。总P量含量为0.95 g/kg大致与土壤P饱和度25%相对应,因此当总P量超过0.95 g/kg时土壤向水中释放磷的潜力将大大提高。总的来看,土壤磷的饱和度随蔬菜种植时间的增加而增加(表1)。同一土壤剖面中,土壤磷饱和度随深度的增加而下降,20—40、40—60和60—100 cm土层磷饱和度分别为3%～37%、2%～21%和2%～18%之间,平均分别为17%、14%和12%。

2.2　土壤磷的积累对磷释放的影响

用半透膜技术解吸的磷可代表地表径流中可能出现的最高磷浓度。该值有很大的变化,范围在0.17～4.98 mg/L之间,表明不同土壤之间可释放态磷有较大的差异。相关分析表明,土壤磷释放强度主要与磷积累有关,与总磷含量和磷饱和度的相关系数分别为0.6578**和0.8879**。图1为磷释放随磷饱和度的变化呈曲线关系,横坐标为磷饱和度,纵坐标为半透膜技术解吸平衡液中溶出的磷浓度。当磷饱和度较低时,释放量较低;但当磷饱和度超过25%时,其磷释放量明显地增加。

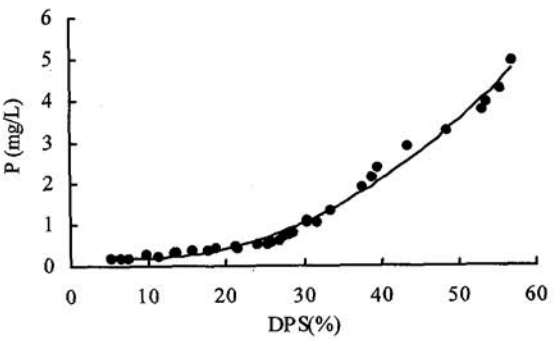

图1　土壤磷饱和度(DPS%)与磷释放的关系

Fig.1　Relationship between soil phosphorus saturation degree and P release intensity from soils

2.3　土壤磷的积累与水质的关系

地表水磷浓度在0.13～0.87 mg/L之间,均超过水体富营养化的标准(0.05 mg/L)。地表水中磷浓度与表土总磷、有效磷和磷饱和度的相关系数分

别为0.8132**、0.8543**和0.9159**，这表明土壤磷饱和度是控制地表水中磷浓度最重要的指标。图2可知，当磷饱和度较低时(< 25%)，地表水中磷浓度随土壤磷饱和度增加呈缓慢增加，增加幅度较小；但当土壤磷饱和度超过25%时，地表水中磷浓度随土壤磷饱和度增加呈显著的指数增加。这表明当土壤磷饱和度超过一定值后，土壤磷释放潜力大大增加，大量的磷进入地表水而增加地表水磷浓度。地下水中磷浓度在0.053～0.34 mg/L之间，一般小于地表水磷浓度，这可能与底层土壤磷饱和度较低、对磷有较大的吸持能力有关。相关分析表明，地下水中磷浓度与0—20、20—40、40—60和60—100 cm土层磷饱度的相关系数分别为0.6546**、0.6987**、0.7328**和0.8976**，表明地下水中磷浓度主要受底土(60—100 cm土层)中磷的积累的控制。由此可知，表土磷积累对地下水磷的影响主要与其向下迁移增加底土磷积累有关。

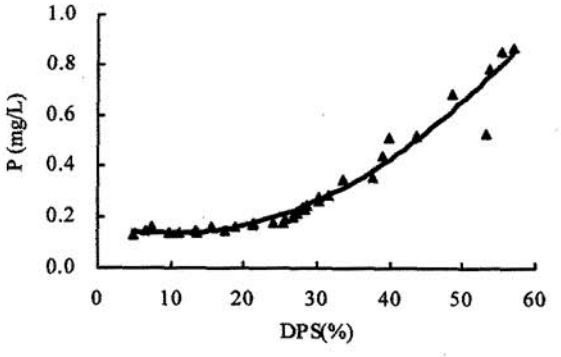

图2 土壤磷饱和度(DPS%)对地表水中磷浓度的影响

Fig.2 Effect of soil phosphorus saturation degree on dissolved P concentration in surface waters

3 结论

浙江省蔬菜地土壤磷素积累明显，表层土壤磷饱和度(DPS)在5%～57%之间，平均为28%。土壤磷的释放量与土壤磷积累呈正相关，并随土壤磷饱和度的提高而增加。土壤磷饱和度可很好地表征土壤磷释放和对环境的潜力影响，蔬菜地土壤磷饱和度的增加可显著提高地表水体和地下水中磷的浓度，当磷饱和度大于25%时，这种影响尤为明显。地表水中磷浓度主要与表层土壤磷饱和度有关，而地下水中磷浓度主要受深层土壤磷饱和度的影响。

参考文献：

[1] Sharpley A, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 176-181.

[2] 章明奎.农业系统中氮磷的最佳管理实践[M].北京：中国农业出版社，2005.185-204.
Zhang M K. Best management practice of nitrogen and phosphorus in agricultural systems[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005. 185-204.

[3] Baker J L, Laflen J M. Effects of corn residue and fertilizer management on soluble nutrient runoff losses[J]. Trans. ASAE. 1982, 25: 344-348.

[4] Mueller D H, Wendt R C, Daniel T C. Phosphorus losses as affected by tillage and manure application[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48: 901-905.

[5] 冯红贤，杨暹，李欣允，等.蔬菜连作对土壤生物化学性质的影响[J].长江蔬菜，2004(11)：40-43.
Feng H X, Yang X, Li X Y *et al*. The effects of continuous cropping of vegetables on the biochemical properties of soil[J]. J.of Changjiang Vegetables, 2004 (11): 40-43.

[6] van der Molen D T, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27: 4-11.

[7] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R *et al*. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. J. Environ Qual., 1995, 24: 904-910.

[8] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J]. J. Environ. Qual., 1995, 24: 920-926.

[9] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海：上海科学技术出版社，1978.132-502.
Institute of Soil Sciences, CAS. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978, 132-502.

[10] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions by cultivation practice and by laboratory incubations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 970-976.

[11] Schoumans O F, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 111-116.