

罗泉达, 庄远红, 李延. 福州市蔬菜地土壤磷淋失的“阈值”研究 [J]. 福建农业学报, 2012, 27 (4): 373-378.

LUO Q-D, ZHUANG Y-H, LI Y. Threshold Values on Phosphorous Leaching of Vegetable Soils in Fuzhou [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27 (4): 373-378.

福州市蔬菜地土壤磷淋失的“阈值”研究

罗泉达¹, 庄远红², 李 延³

(1. 福建省农业生态环境与能源技术推广总站, 福建 福州 350003; 2. 漳州师范学院生物科学与技术系,
福建 漳州 363000; 3. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要: 以福州郊区蔬菜地土壤为研究对象, 通过室内模拟试验, 研究 6 种不同土壤测试磷(Olsen-P、CaCl₂-P、H₂O-P、NaOH-P、Bray-P、有机磷)含量与磷素淋失之间的关系, 探讨土壤磷素淋失风险评估的指标。结果表明, CaCl₂-P、有机磷与淋洗液溶解总磷(DTP)的当次释放量及其累积量具有极显著的相关关系, 可作为评价蔬菜地土壤磷淋失风险的指标, 以 DTP 0.05 mg·L⁻¹作为引起水体富营养化的临界值, 获得本试验区域蔬菜地土壤磷素淋失的 CaCl₂-P、有机磷阈值分别为 14.1 mg·kg⁻¹ 和 205.8 mg·kg⁻¹; 以 Hesketh2000 年提出的“突变点”方法预测土壤磷素淋失风险, 得出本试验区域蔬菜地土壤磷发生淋溶的 Olsen-P“突变点”为 96.6 mg·kg⁻¹。

关键词: 蔬菜地; 磷; 淋失; 阈值; 突变点

中图分类号: S151.93; X 820.6

文献标识码: A

Threshold Values on Phosphorous Leaching of Vegetable Soils in Fuzhou

LUO Quan-da¹, ZHUANG Yuan-hong², LI Yan³

(1. Agricultural Ecology Environment and Resource Station of Fujian, Fuzhou, Fujian 350003, China;
2. Department of Biology Science and Technology, Zhangzhou Normal University, Zhangzhou,
Fujian 363000, China; 3. College of Resource and Environment Science, Fujian
Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002)

Abstract: Surface soils of vegetable plots in Fuzhou suburbs were sampled for this study. A simulated continuous leaching test on the soils was conducted to examine the soil-water phosphorus correlation. The results clearly indicated that CaCl₂-P and organic P in the soil correlated very significantly to the concentration and accumulation of dissolved P (DTP). Thus, CaCl₂-P and organic P were considered excellent indices for the risk evaluation on soil phosphorus leaching. At DTP concentration of 0.05 mg L⁻¹ as the critical value for eutrophication, the CaCl₂-P and organic P threshold values for phosphorus leaching in vegetable soils were 14.1 mg·kg⁻¹ and 205.8 mg·kg⁻¹, respectively. According to Hesketh (2000), the “change-point” concentration of the Olsen-P for the vegetable soils was determined to be 96.6 mg·kg⁻¹.

Key words: Vegetable soils; phosphorus; leaching; threshold value; change-point concentration

磷是水体富营养化的主要限制因子^[1], 据 2010 年国家统计年鉴显示, 我国磷肥施用量由 1990 年的 462.4 万 t 增加到 2009 年的 797.7 万 t, 磷肥的大量施用导致土壤磷素富集^[2], 给水环境造成巨大潜在威胁^[3-4]。土壤中磷的流失主要与水分运动有关, 土壤中的磷素主要以径流向水体迁移^[5], 但高磷、高有机质、粗质地土壤, 淋失也是磷向水体迁移重要途径之一^[6]。近几年来我国蔬菜

生产发展迅速。蔬菜地产量高, 效益好, 经济效益驱使菜农大量施用无机和有机肥料, 蔬菜地磷肥使用量是水田、旱地几倍, 蔬菜地土壤磷已出现明显富集现象^[7]。目前我国对土壤磷流失引起的环境影响研究主要集中在磷以径流形式向水体迁移方面^[8-9]。有关蔬菜地土壤磷淋失“阈值”和土-水磷素“突变点”的研究较少, 开展这方面的研究对指导蔬菜生产合理使用磷肥、防止磷素淋失污染水

收稿日期: 2012-02-20 初稿; 2012-04-11 修改稿

作者简介: 罗泉达 (1978—), 男, 硕士, 农艺师, 研究方向: 农业生态环境与农村能源 (E-mail: nytlqd@163.com)

通讯作者: 李延 (1964—) 男, 博士, 教授, 研究方向: 植物营养与施肥 (E-mail: fauliyan@163.com)

体具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

土壤取自福州市蔬菜主产区的洪山镇、盖山镇、新店镇和闽侯荆溪镇的 22 片蔬菜地，所选取的蔬菜地经过充分调查，蔬菜种植年限长且复种指数高，土壤母质类型均为河流冲积物。土样按表层 0~20 cm 采集，采用随机 3 点取样，土样风干，过筛后备用。

1.2 试验方法

采用连续淋洗模拟土壤磷素淋失^[10]，具体方法：称取过 2 mm 筛的土壤 50 g 置于滤纸中（滤纸事先叠成一定角度放置于漏斗上），土壤上盖一张滤纸。加去离子水湿润使土壤达到约田间持水量，在室温下平衡 2 d 后，加去离子水淋洗。试验周期为 2 d 淋洗 1 次，每次加水量为 50 mL，持续 20 d。每天量取淋出液经 0.45 μm 的滤膜过滤后，用作溶解总磷（DTP）含量的测定。

表 1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soils

编 号	采样地点	pH (H ₂ O)	有机质/(g·kg ⁻¹)	碱解 N/(mg·kg ⁻¹)	Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	速效 K/(mg·kg ⁻¹)
1	洪山镇 1	4.88	31.3	174.3	330.1	149.8
2	洪山镇 2	4.91	37.9	189.8	323.5	384.1
3	洪山镇 3	5.51	17.9	110.7	90.1	163.1
4	洪山镇 4	5.31	21.4	111.9	175.0	142.7
5	洪山镇 5	4.65	20.9	123.1	137.8	111.3
6	洪山镇 6	4.19	26.1	157.5	134.8	145.0
7	洪山镇 7	4.94	25.9	144.4	63.1	145.5
8	新店镇 1	5.28	32.9	111.5	321.8	267.4
9	新店镇 2	6.05	29.0	113.2	263.1	100.8
10	新店镇 3	5.85	30.4	136.4	341.5	150.7
11	新店镇 4	5.44	28.6	111.0	372.0	187.7
12	新店镇 5	5.47	39.1	163.6	317.2	173.0
13	新店镇 6	5.69	30.2	110.0	225.1	96.4
14	新店镇 7	6.46	29.7	127.1	252.3	177.9
15*	盖山镇 1	4.94	114.4	255.3	515.1	528.9
16*	盖山镇 2	7.56	95.9	297.2	630.1	444.3
17	盖山镇 3	6.35	33.7	124.0	415.4	323.0
18	闽侯荆溪镇 1	5.77	28.8	142.7	283.1	266.9
19	闽侯荆溪镇 2	5.37	33.8	166.5	333.3	375.9
20	闽侯荆溪镇 3	5.88	31.9	150.0	64.5	143.1
21	闽侯荆溪镇 4	6.21	31.8	152.5	196.8	324.3
22	闽侯荆溪镇 5	6.38	34.1	155.7	226.5	311.2

注：常年采用有机肥客土。

1.3 测定方法

土壤测试磷分别用以下 6 种不同的方法测定：Olsen-P 用 NaHCO₃ 提取（液土比 25:1）；Bray-P 用 HCl-NH₄F 浸提（液土比 25:1）；有机 P 用灼烧法；CaCl₂-P 用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 提取（液土比 5:1），恒温振荡 30 min；H₂O-P 用蒸馏水（液土比 25:1）浸提 1 h；NaOH-P 用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH（液土比 500:1）振荡浸提 16 h，均采用钼锑抗比色法测定^[11]，溶解总磷（DTP）采用过

硫酸钾氧化—孔雀绿—磷钼杂多酸分光光度法测定^[12]。

2 结果与分析

2.1 蔬菜地土壤测试磷状况

由表 2 可知，不同浸提剂提取的 6 种土壤测试磷含量差别较大，Olsen-P、CaCl₂-P、H₂O-P、NaOH-P、Bray-P、有机磷变化范围分别为 63.1~630.1、0.11~61.54、2.2~215.7、278.8~2

448.2、37.7~1 894.0、115~1 131.9 mg·kg⁻¹, 平均含量依次为 273.3、21.1、66.65、1088.5、675.7、329.0 mg·kg⁻¹。其大小依次为: NaOH-P>Bray-P>有机磷>Olsen-P>H₂O-P>CaCl₂-P。鲁如坤认为蔬菜的需磷量 (Olsen-P) 一般在 60~90 mg·kg⁻¹^[12], 而调查区蔬菜地有 91% 的土壤 Olsen-P 超过 90 mg·kg⁻¹, 远高于 60 mg·kg⁻¹ 这一有可能造成环境污染的临界值^[13]。可见蔬菜地土壤存在较严重的磷富集问题。相关分析表明, Olsen-P、CaCl₂-P、H₂O-P、NaOH-P、Bray-P、有机磷含量均与土壤全磷呈极显著的正相关, 相关系数

分别为 0.930**、0.931**、0.962**、0.880**、0.927** 和 0.882** , 说明 6 种不同方法测定的土壤磷含量均可以代表土壤磷素含量的丰缺状况。本试验中土壤全磷含量与有效磷含量相关性较好, 主要是由于蔬菜地由于长期大量施用磷肥, 土壤中的各形态磷均大量累积, 尤其是在 0~20 cm 的土壤层中, 且各形态磷含量均随施肥量增加而增加, 因此蔬菜地中土壤全磷含量与有效磷含量有比较好的相关性。刘建玲等^[2]在对北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究中同样发现蔬菜保护地土壤全磷含量与有效磷含量之间有较好相关性。

表 2 福州市郊区蔬菜地土壤测试磷含量

Table 2 Phosphorus content of vegetable soils in Fuzhou suburb

编号	采样地点	Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	CaCl ₂ -P/ (mg·kg ⁻¹)	H ₂ O-P/ (mg·kg ⁻¹)	NaOH-P/ (mg·kg ⁻¹)	Bray-P/ (mg·kg ⁻¹)	有机磷/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)
1	洪山镇 1	330.1	24.01	58.4	1516.7	606.6	150.5	2100
2	洪山镇 2	323.5	24.39	55.5	1638.5	447.0	230.9	2250
3	洪山镇 3	90.1	0.26	10.0	470.1	96.4	231.6	1000
4	洪山镇 4	175.0	12.96	37.5	636.7	254.9	275.3	1009
5	洪山镇 5	137.8	7.36	10.7	595.3	207.1	238.7	920
6	洪山镇 6	134.8	7.32	6.6	604.7	181.5	163	820
7	洪山镇 7	63.1	0.11	2.2	375.9	64.1	115	620
8	新店镇 1	321.8	28.09	91.5	1643.8	974.5	590.9	3550
9	新店镇 2	263.1	14.21	66.0	1092.6	716.9	413.6	2810
10	新店镇 3	341.5	19.17	78.0	1311.4	775.8	216.4	3060
11	新店镇 4	372.0	34.24	92.0	1463.0	1156.8	236.3	2610
12	新店镇 5	317.2	32.59	96.3	1213.0	1233.5	331	2440
13	新店镇 6	225.1	16.17	57.7	907.6	804.5	269.2	2050
14	新店镇 7	252.3	16.97	52.5	1168.5	817.4	238.1	2240
15	盖山镇 1	515.1	55.99	187.7	2448.2	1894.0	1131.9	5390
16	盖山镇 2	630.1	61.54	215.7	1833.4	1744.0	1114.5	6400
17	盖山镇 3	415.4	34.86	109.3	1299.2	886.0	234.4	3180
18	闽侯荆溪镇 1	283.1	19.22	63.2	962.4	477.4	254	1530
19	闽侯荆溪镇 2	333.3	29.34	84.9	1189.8	747.7	298.5	1940
20	闽侯荆溪镇 3	64.5	0.13	5.2	278.8	37.7	164.3	570
21	闽侯荆溪镇 4	196.8	14.32	45.4	659.2	401.9	124.1	1140
22	闽侯荆溪镇 5	226.5	10.96	40.0	637.6	340.6	214.8	1210

2.2 土壤测试磷与单次 DTP 释放量及累积释放量的相关关系

图 1 为 22 个土壤 10 次淋洗的各次 DTP 释放量及累积释放量与土壤测试磷含量之间的相关系数。可以看出, 6 种土壤测试磷与单次淋洗 DTP 释放量及其累积量的相关系数均呈极显著正相关, 说明土壤磷的测试值可以作为土壤磷流失风险和对水环境影响的评估依据, 这与国外一些研究的结论是一致的^[14~15]。从相关系数大小来看, 其大小顺

序依次为: CaCl₂-P>有机磷>H₂O-P>Bray-P>Olsen-P>NaOH-P。

有研究表明蔬菜地长期大量施用磷肥, 土壤中磷素不断累积, 但土壤磷素组成中无机磷、有机磷存在一定的动态平衡, 土壤中的无机磷含量和有机磷含量占全磷的比率并无明显变化, 因此二者存在较好的相关性^[2]。CaCl₂-P 可以表征从土壤固相部分进入液相部分的磷数量, 代表在一定条件下易溶磷从土壤进入溶液或地表径流的难易程度^[11],

$\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与单次淋洗 DTP 释放量及其累积量的相关系数最高, 而且它与 Olsen-P、 $\text{H}_2\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{NaOH}\text{-P}$ 、Bray-P、有机磷之间呈极显著的正相关 (r 分别为 0.868^{**} 、 0.955^{**} 、 0.836^{**} 、 0.928^{**} 、 0.938^{**}), 说明 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 能代表土壤其他测试磷的丰缺情况, 因而是评价土壤磷流失和引起水体富营养化的很好指标。从图中可以看出土壤有机磷含量与单次淋洗 DTP 及其累积量的相关性仅次于 $\text{CaCl}_2\text{-P}$, 有机磷与 Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、 $\text{H}_2\text{O}\text{-P}$ 、 $\text{NaOH}\text{-P}$ 、Bray-P 的相关系数分别达到 0.739^{**} 、 0.938^{**} 、 0.861^{**} 、 0.720^{**} 、 0.811^{**} 。表明 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和有机磷可很好表征土壤磷淋失潜力, 因此, 本研究选择 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和有机磷作为评价蔬菜地

土壤磷淋失风险的指标。

2.3 蔬菜地土壤磷素淋失的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、有机磷“阈值”

研究表明 DTP 浓度 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是引发水体富营养化的临界水平^[16-17]。据此, 建立 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、有机磷与 10 次 DTP 淋洗液平均浓度之间的趋势线(图 2), 按 DTP 浓度 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 通过趋势线方程获得引起蔬菜地土壤磷素淋失的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、有机磷“阈值”分别为 $14.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $205.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。即当蔬菜地表层土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 高于 $14.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或者有机磷高于 $205.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 很可能会引起土壤磷素的淋失。

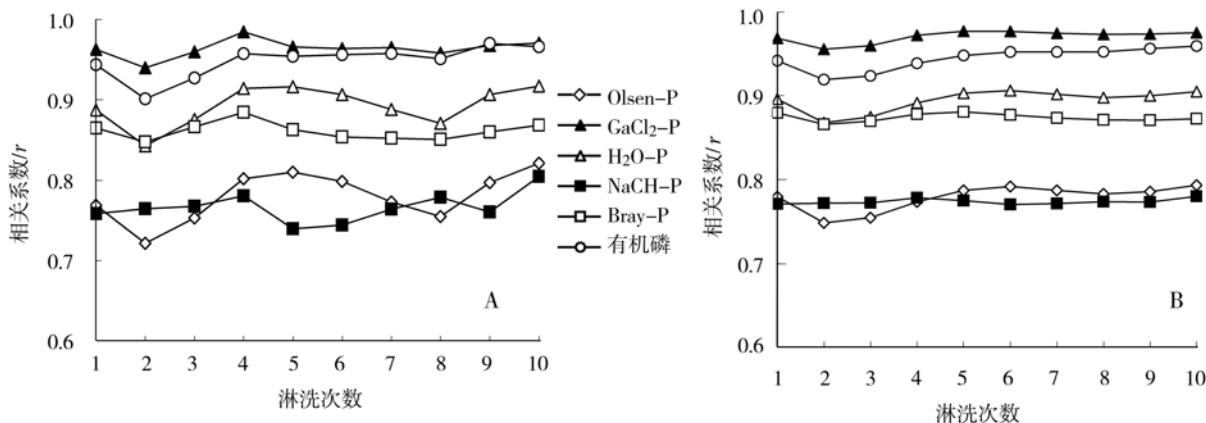


图 1 土壤测试磷与各次 DTP 释放量 (A) 及累积释放量 (B) 之间的相关性

Fig. 1 Correlation between soil phosphorus and released (A) or accumulated DTP (B)

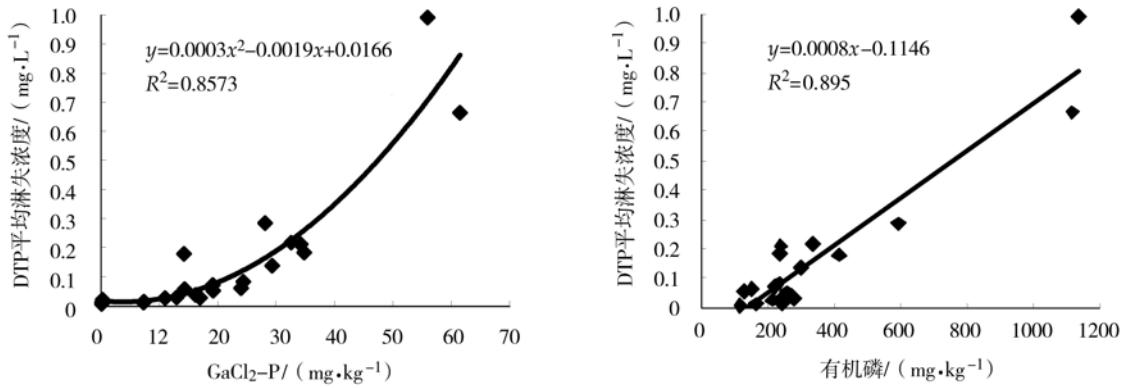


图 2 蔬菜地 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、有机磷与 DTP 平均浓度之间的关系

Fig. 2 Correlation between $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and organic phosphorus in vegetable soils and average DTP

2.4 以土壤磷素淋失“突变点”评估土壤磷素淋失风险

根据 Hesketh 2000 年提出的“突变点”方法^[18], 研究 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与土壤 Olsen-P 关系, 获得研

究区域土壤磷发生淋失时土壤 Olsen-P 临界值。当蔬菜地表层土壤 Olsen-P 低于某一临界值时, 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度几乎为零, 当高于该临界值时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度随 Olsen-P 的增加呈线性增加趋势。

从图3可以看出, 蔬菜地土壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 均呈较好的相关性, 但不是1条直线关系, 而是2条斜率明显不同的直线, 2条直线之间有1个明显的突变转折点, 即“突变点”。建立2直线 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ (y) 与 Olsen-P (x) 的函数关系式如下:

$$y=0.1157x-10.883, R^2=0.9223, n=19 \quad (1)$$

$$y=0.0053x-0.221, R^2=0.9941, n=3 \quad (2)$$

合并方程(1)、(2), 求得 x 的值即可确定研究地土壤磷素淋失的 Olsen-P “突变点”。本研究土壤发生磷素淋失的表层 Olsen-P “突变点”为 $96.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这一结果表明, 对于土壤母质为冲积物发育的水稻土的蔬菜地而言, 当表层土壤 Olsen-P 含量小于 $96.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤中的磷素不淋失或很少发生淋失; 而当土壤 Olsen-P 含量大于 $96.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤中磷素就发生淋失, 并随 Olsen-P 含量的增加淋失量迅速增加。

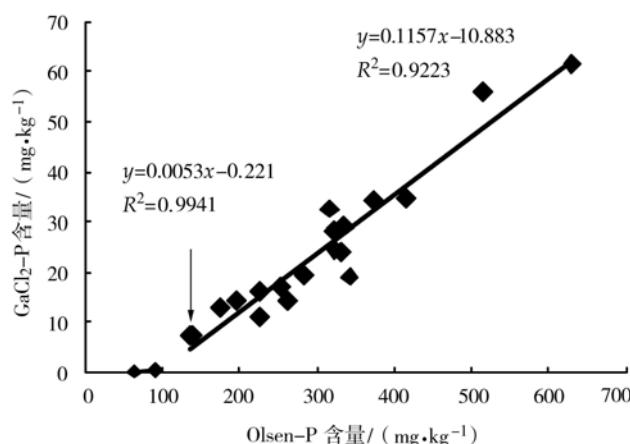


图3 蔬菜地 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量之间的关系

Fig. 3 Correlation between Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in vegetable soils

3 讨 论

评选土壤磷素淋失风险临界指标的方法主要有定位实验法和土壤化学方法。定位试验, 即通过对土壤磷素水平与径流或淋洗液中磷水平的相关分析和水质标准来确定土壤磷素的临界水平。土壤化学方法, 即土壤磷的释放与土壤磷的吸附和解吸关系。土壤过程相磷素的积累增加了土壤磷的吸附饱和度, 土壤磷吸附量的增加, 磷的释放潜力也逐渐增加, 当土壤因磷素积累使磷饱和度增加至一定值时(临界值), 再进一步增加土壤磷素, 可使土壤磷释放明显增加。对比2种方法, 由于定位试验法投入大, 周期长, 因此选用土壤化学法进行评估较为可行。目前对于土壤磷素淋失风险的评估常用方

法有土壤测试磷法、土—水磷素的“转折点”关系法。

学者指出, 按土壤测试磷与作物产量响应程度的关系, 可将土壤含磷量划分为低、中、高以及很高等若干等级, 而存在潜在环境问题的土壤主要是在土壤测试磷超过高磷等级以上的水平^[19]。刘方等研究表明, 黄壤旱地中 Olsen-P 和 NaOH 浸提磷均可作为提示地表径流中磷潜在流失的预警指标, 但 NaOH 浸提磷测定浸提时间长, 不便于大批量样品分析, 由于其与 Olsen-P 有极密切的相关性, 因此可用有效磷来判断黄壤旱地存在磷素非点源污染的可能^[20]。英国学者研究认为, 在 Olsen-P < $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤渗漏水中磷的浓度很低, 但当 > $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 渗漏水磷浓度大大增加, 故认为土壤 Olsen-P 应保持低于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水平, 以保护水环境安全^[21]。近年来, 土壤磷的测试已被一些国家考虑作为保护水质和识别土壤是否应该禁止施用化肥和粪肥的依据^[22-23]。

土—水磷素的“转折点”关系是指通过地表径流、地下渗漏等途径导致的土壤磷素实际流失(或通过模拟研究获得)的浓度与土壤测试磷素水平之间的一种非线性关系, 在数量关系上具有一个较为明显的“转折点”, 并用一个相应的土壤测试值表征此时的“转折点”。因此, 通过确认土—水之间的“转折点”可以评估超过一个特定的土壤测试磷水平(即“转折点”)的土壤磷素流失潜能。土—水磷素的这种“转折点”关系首先被英国研究者证实。Heckrath 等^[21]提出用排水中 MRP(可溶态反应性无机磷)含量(纵轴)和与之相对应的土壤耕层 Olsen-P 含量(横轴)作图来找出土壤磷素淋溶的土壤耕层 Olsen-P “转折点”, 即“突变点”用于预测土壤磷素淋溶趋势, 并经长期定位实验, 将 Olsen-P $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 看作影响地下暗管排水磷素水平的“突变点”。Hesketh^[18]于2000年提出用土壤 Olsen-P 含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量分别为横轴和纵轴作相关曲线, 曲线上的转折点相对应的 Olsen-P 含量即为该土壤磷素淋溶的“突变点”; 吕家珑等^[24]测定英国 Broadbalk 试验地(艳色淋溶土, 质地粉粘壤)土壤磷素淋溶的“突变点” Olsen-P 含量约为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 刘利花^[25]研究表明, 西北农林科技大学试验农场的壤土磷素淋溶的“突变点” Olsen-P 含量为 $23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 钟晓英等^[13]通过室内模拟试验对我国23个耕地土壤进行淋失风险评估, 得出不同土壤淋失临界值差异非常大, Olsen-P 为 $29.96 \sim 156.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 为 $0.14 \sim$

$3.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。众多研究得到不同的结论是因为不同地区土壤磷发生淋失时土壤 Olsen-P 临界值有差异, 土壤类型也对临界值大小有影响。“阈值”与“突变点”都可用于评价土壤磷素流失潜力, 其不同点在于, “阈值”表征有效磷含量较高, 已具备磷素流失潜力且会造成水体的富营养化的土壤的磷含量, 而“突变点”则着重于表征土壤中 Olsen-P 含量达到一个点时, 土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度会随 Olsen-P 的增加呈线性增加趋势, 而此时土壤中磷含量开始具备流失潜力但并不一定会造成水体的富营养化。本研究区域福州郊区土壤母质类型均为河流冲积物, 得到的蔬菜地土壤磷素淋失的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、有机磷“阈值”分别为 $14.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $205.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、土壤磷发生淋溶的土壤 Olsen-P “突变点”为 $96.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本试验数据虽然通过室内模拟得出, 但对于研究同类型土壤磷流失在实际中的研究和应用同样具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] EDWARDS A C, WITHERS P J A. Soil phosphorus management and water quality: a UK perspective [J]. *Soil Use and Manage.*, 1998, 14: 124—129.
- [2] 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.
- [3] 庄远红, 吴一群, 李延. 不同种类磷肥施用对蔬菜地磷素淋失的影响研究 [J]. 漳州师范学院学报: 自然科学版, 2009, 22 (1): 98—100.
- [4] 吴艳春, 庄舜尧, 杨浩, 等. 土壤磷在农业生态系统中的迁移 [J]. 东北农业大学学报, 2003, 34 (2): 210—218.
- [5] 徐爱兰, 王鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (3): 1106—1111.
- [6] 李学平, 邹美玲. 农田土壤磷素流失研究进展 [J]. 中国农学通报, 2010, 26 (11): 173—177.
- [7] 李艾芬, 章明奎. 浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (1): 122—127.
- [8] 梁涛, 王浩, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征 [J]. 环境科学, 2003, 24 (2): 35—40.
- [9] 邬伦, 李佩武. 降雨产流过程与氮磷流失特征研究 [J]. 环境科学学报, 1996, 16 (1): 111—116.
- [10] 章明奎. 应用土壤测试磷评估砂土中磷的可淋洗性 [J]. 土壤学报, 2004, 41 (6): 996—1000.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 133—186.
- [12] 中国环境保护总局. 水和废水监测分析方法: 第 4 版 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243—250.
- [13] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值 [J]. 生态学报, 2004, (10): 2275—2280.
- [14] COX F R. Soil test phosphorus and clay content effects on runoff water quality [J]. *J Environ Qual.*, 2000, 29: 1528—1586.
- [15] SIMS J T. Phosphorus soil testing: innovations for water quality protection [J]. *Commun Soil Sci Plant Qual.*, 1998, 29 (11—14): 1471—1489.
- [16] SHARPLEY A N, CHAPRA S C, WEDEPLHL R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options [J]. *J Environ Qual.*, 1994, 23: 437—451.
- [17] ARCHER J R, MARKS M J. Control of nutrient losses to water from agriculture in Europe [J]. *Proceedings of the Fertilizer Society*, 1997: 405.
- [18] HESKETH N, BROOKES P C. Development of an Indicator for risk of phosphorus leaching [J]. *J Environ Qual.*, 2000, 29: 105—110.
- [19] SHARPLEY A N, WITHERS P J A. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus [J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39: 133—146.
- [20] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施磷对黄壤旱地磷库变化及地表径流中磷浓度的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (2): 196—200.
- [21] 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.
- [22] GBUREK W J, SHARPLEY A N, HEATHWAITE L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index [J]. *J Environ Qual.*, 2000, 29: 130—144.
- [23] MOREL C, TUNNEY H, PLENT D, et al. Transfer of phosphorus ions between soil and solution: perspectives in soil testing [J]. *J Environ Qual.*, 2000, 29: 50—59.
- [24] 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.
- [25] 刘利花, 杨淑英, 吕家珑. 长期不同施肥土壤中磷淋溶“阈值”研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31 (3): 123—125.

(责任编辑: 柯文辉)