

# 潮棕壤速效磷产量临界值和淋溶临界值的计算

王月立<sup>1,2</sup>, 马强<sup>1</sup>, 姜春明<sup>1</sup>, 宇万太<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 辽宁环宇矿业咨询有限公司, 辽宁 沈阳 110032)

**摘要:** 确定合理磷肥用量对取得高产、提高经济收益和保护环境都有重要意义, 而明确土壤速效磷产量临界值与淋溶临界值是界定施肥量适宜与否的必要前提。本文基于下辽河平原长期定位试验, 使用直线-平台、双直线和米氏模型计算土壤速效磷产量临界值, 通过土柱淋溶试验确定土壤速效磷淋溶临界值。结果表明: 该地区玉米和大豆的速效磷产量临界值分别为  $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $10.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 三个模型中以米氏模型计算的值最高, 以直线-平台模型计算的值最低; 通过 6 次淋溶试验, 计算的土壤速效磷淋溶临界值在  $74.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  到  $82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 均值为  $80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在农业生产中应将土壤速效磷控制在  $12.0 \sim 80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 可据此指导施肥, 达到保证作物生长所需养分, 并减少施肥对环境的影响的目标。

**关键词:** 速效磷临界值; 长期定位试验; 淋溶试验; 下辽河平原

**中图分类号:** S158.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0171-06

## Calculating the critical value for yield and leaching of Olsen-P in aquic brown soil

WANG Yue-li<sup>1,2</sup>, MA Qiang<sup>1</sup>, JIANG Chun-ming<sup>1</sup>, YU Wan-tai<sup>1</sup>

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Liaoning Huanyu Mining Consulting Ltd., CO, Shenyang 110032, China)

**Abstract:** For achieving high yield and economic benefits, as well as protecting the environment, it was necessary to clarify the relevant thresholds to optimize application of fertilizer phosphorus (P). Based on the long-term experiments in lower reach of Liaohe River Plain, the thresholds of soil Olsen-P for yield (TPY) were calculated by linear-linear (LL), linear-plateau (LP) and Mitscherlich type exponential (Exp) models. In addition, the thresholds of soil Olsen-P for leaching (TPL) were determined by soil column leaching experiment. Results showed that the TPY was  $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $10.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  for maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max*), respectively. Furthermore, the TPY was the highest as calculated by the Exp model, whereas the least was obtained with the LP model. The TPLs ranged from  $74.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , with the mean value of  $80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . It was recommended that Olsen-P concentration should be maintained within the range from  $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  in the target area, in order to sustain crop production and avoid environmental contamination.

**Keywords:** threshold of soil Olsen-P; long-term fertilization experiment; soil column leaching experiment; lower reach of Liaohe River Plain

磷是植物生长必需的营养元素之一, 磷肥施用对粮食增产有巨大贡献, 但盲目过量的施用磷肥也可引起水体富营养化和生物多样性流失等环境问题<sup>[1-2]</sup>。通过磷收支平衡可知, 从 1980 年到 2007 年, 我国农田土壤磷平均累积增量达  $242.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 导致了表层土壤速效磷含量从  $7.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  增加到  $24.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有 9.3% 的土壤速效磷含量超过  $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 已存在淋溶风险<sup>[3]</sup>。湛润生等<sup>[4]</sup>研究表明,

晋北设施菜地表层土壤速效磷含量最高达  $286.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 远远超过蔬菜对磷的需求, 在有大量水分输入时, 土壤中累积的磷可能随水进入地表或地下水中, 对水体构成威胁。有研究表明农田生态系统输入的氮、磷已成为水体富营养化的主要原因, 而且其贡献在逐年增加<sup>[5]</sup>; 同时, 由于施肥不当导致的养分淋溶也已成为地下水污染的主要原因<sup>[6]</sup>。因此, 农业生产中需优化施肥量, 在确保作物产量前提下,

收稿日期: 2013-10-15

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(2012BAD05B01); 国家自然科学基金项目(41171242); 辽宁省自然科学基金项目(201102225)

作者简介: 王月立(1987—), 男, 黑龙江黑河人, 硕士, 助理工程师, 主要从事土壤养分迁移研究。E-mail: ylwang221@126.com。

通信作者: 宇万太(1964—), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农田生态系统物质循环研究。E-mail: wtyu@iae.ac.cn。

避免环境污染并实现资源高效利用。

土壤速效磷含量作为土壤供磷能力的一个重要指标,对施肥具有指导作用。土壤内速效磷存在两个临界值:产量临界值和淋溶临界值。当土壤速效磷含量低于产量临界值时,作物产量会随着施磷量的增加而提高,施磷肥可以促进作物增产;当土壤速效磷含量高于产量临界值后,作物产量不再随施磷量的增加而提高,此时施用磷肥几乎没有增产作用。Tang 等<sup>[7]</sup>分析了 15 年的长期定位试验结果,指出郑州、杨凌和昌平 3 地区玉米的产量临界值分别为 12.1、16.4  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 17.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,冬小麦的该值分别为 12.5、17.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 19.0  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤速效磷的淋溶临界值是土壤中磷素是否会大量进入环境的一项重要阈值,当速效磷含量高于淋溶临界值后,随水淋溶的磷素随速效磷含量增加而迅速增加<sup>[8]</sup>,再施磷肥会极大增加磷素的淋溶风险。Hesketh 等<sup>[9]</sup>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,以曲线上转折点所对应的 Olsen-P 含量作为该土壤速效磷淋溶临界值。Maguire 等<sup>[10]</sup>用土壤内 Olsen-P 含量与土柱淋溶液内无机磷浓度分别为横轴和纵轴作图求得临界值。吕家珑等<sup>[11]</sup>研究证明两种方法计算结果相似,而且淋溶临界值预测磷淋溶的可靠性较高。钟晓英等<sup>[12]</sup>对我国 23 种耕地土壤进行研究,得出不同土壤速效磷淋溶临界值差异较大,总体在 29.96 ~ 156.78  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

在农业生产过程中,把速效磷含量控制在两个临界值之间,可实现经济效益与环境效益双赢的目标。本文以下辽河平原长期定位实验为平台,通过模型拟合的方法求得该地区的产量临界值,通过土

柱淋溶试验求得淋溶临界值,为当地今后的农业生产与合理施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国科学院沈阳生态实验站进行,该站位于沈阳市以南 35 km(E 123°24', N 41°31'),地处下辽河平原,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明、雨热同季、夏季炎热、冬季寒冷,年平均温度为 7℃ ~ 8℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  活动积温为 3 300℃ ~ 3 400℃,年降雨量为 650 ~ 700 mm,无霜期为 147 ~ 164 d。供试土壤为潮棕壤,基本理化性质为:有机质 19.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮 1.0  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷 0.47  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全钾 17.4  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷 10.1  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 101.4  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pH6.4。

### 1.2 试验设计

本文以长期定位试验为平台,通过磷肥试验计算土壤速效磷产量临界值,通过土柱淋溶试验计算淋溶临界值。长期定位试验始于 2002 年,包括不同氮肥、磷肥和有机肥用量 3 组长期试验,每组试验独立设计且包含高、中、低和不施肥 4 个水平,3 次重复,小区面积 108  $\text{m}^2$ ,试验采取大豆 - 玉米 - 玉米依次轮作方式,同年内 3 种作物分别出现于 3 个重复内。具体处理和肥料用量见表 1。化学肥料品种分别为尿素,重过磷酸钙和硫酸钾;有机肥为腐熟猪粪(M),其施用量以鲜重计分别为每年 10  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M1)、25  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M2)和 50  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (M3),由于有机肥年际间的干率与养分浓度差异,每年通过有机肥进入农田的养分量并不相同,表 1 列出了年均肥料养分输入量(10 年平均)。

表 1 长期定位试验的施肥量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Table 1 Application rates of fertilizers in the long-term experiments

试验设计 Treatment	施肥量 Rate of fertilizer			试验设计 Treatment	施肥量 Rate of fertilizer		
	N	P	K		N	P	K
N0	0	50	60	P2	150	50	60
N1	100	50	60	P3	150	100	60
N2	150	50	60	CK	0	0	0
N3	250	50	60	M1	75	64.9	76.6
P0	150	0	60	M2	187.5	162.2	191.4
P1	150	25	60	M3	375	324.3	382.8

注:上述化肥氮用量为种植玉米年份用量,种植大豆年份,氮肥用量为 25  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

Note: Rates of fertilizer N was 150  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  for maize, whereas being 25  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  for soybean.

磷肥试验:共 4 个处理分别为 P0、P1、P2 和 P3,试验从 2002 年至 2011 年共有 10 年数据,但是 2010

年该地发生涝害,在计算产量临界值时不包括该年数据。

土柱淋溶试验: 试验处理包括长期定位试验的 CK、N1、N2、N3、P1、P2、P3、M1、M2 和 M3 处理, 其施肥量见表 1。2012 年春季于各处理上采集 0~20 cm 土壤, 土壤样品经混肥后按容重填装在内径为 24 cm 的不透光 PVC 管内, 其从下到上依次为: 均匀分布 3 个出水口的底座、尼龙网、2 cm 厚酸洗过的石英砂、尼龙网和 20 cm 的土壤。所有土柱于 4 月 13 日播种春小麦于 7 月 7 日收获。试验的水分输入量以 2010 年降雨总量为参照标准, 以半月为时间界限进行划分, 将每半个月的降雨量与 2010 年同期降雨量进行比较, 若是低于 2010 年同期降雨量则浇灌蒸馏水补充, 若高出则将高出的部分累积到下半个月中计算。试验从 4 月 13 日至 9 月 13 日共进行 5 个月, 这期间仅前期有少量的人为灌溉, 大部分水分输入形式都为自然降雨。水分输入总量为 753 mm(图 1), 与 2010 年同期总降雨量 748 mm 相近。在试验期间一共有 9 次淋溶液产生, 本文只采用其所有土柱都有淋溶液产生的 6 次淋溶, 其日期分别为: 5 月 14 日、7 月 12 日、7 月 22 日、8 月 4 日、8 月 29 日和 9 月 4 日。

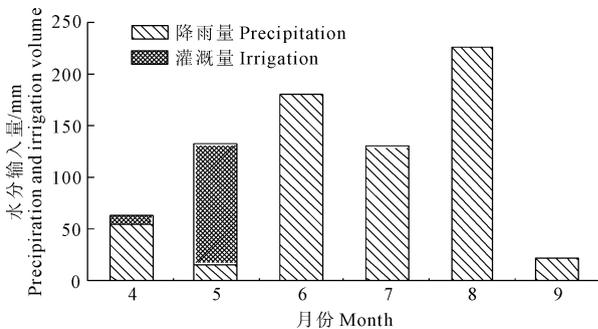


图 1 水分输入分布图

Fig. 1 Distribution of precipitation and irrigation

### 1.3 样品采集与测定

磷肥试验: 土壤样品于每年秋收后, 在各小区内以 S 形选取 5 个点, 用土钻取 0~20 cm 土层的土壤, 并混匀。土样采回后, 经自然风干, 去除石砾、根系, 过 2 mm 筛备用。每年收获时, 各小区按常规方法采集籽实样品并称重。

土柱淋溶试验: 淋溶液样品在每次降雨或灌溉后收集。测量体积, 取其中一部分过滤, 滤液放在冰箱内保存, 统一测定。土壤样品在制作土柱时采集, 经自然风干, 去除石砾、根系, 过 2 mm 筛备用。

土壤速效磷采用  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$  (pH = 8.5) 浸提, 钼锑抗比色法测定; 淋溶液内无机磷采用钼锑抗比色法测定<sup>[13]</sup>。

### 1.4 模型及统计分析

淋溶临界值: 以 0~20 cm 土层的 Olsen-P 含量与土柱淋溶液内无机磷的浓度作图, 用折线模型进行拟合, 计算试验地区的速效磷淋溶临界值, 方程为:

$$y = \begin{cases} A_1 + B_1x & x \leq x_0 \\ A_2 + B_2x & x \geq x_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $y$  表示 20 cm 土柱淋溶液内无机磷的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $A_1$  (或  $A_2$ ) 为截距;  $B_1$  (或  $B_2$ ) 为斜率,  $x$  是 0~20 cm 土层土壤内速效磷含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $x_0$  是土壤速效磷淋溶临界值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

产量临界值: 使用三个模型对数据进行拟合, 分别为: 直线-平台、双直线和米氏 (Mitscherlich) 模型。

直线-平台模型方程为:

$$y = \begin{cases} a + bx & x \leq xc \\ P & x \geq xc \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $y$  表示预测的作物产量 (kg);  $a$  为截距;  $b$  为斜率;  $x$  是土壤速效磷含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $xc$  是土壤速效磷产量临界值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $P$  是预测的平台产量 (kg)。

双直线模型方程为:

$$y = \begin{cases} a_1 + b_1x & x \leq xc \\ a_2 + b_2x & x \geq xc \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $y$  表示预测的作物产量 (kg);  $a_1$  (或  $a_2$ ) 为截距;  $b_1$  (或  $b_2$ ) 为斜率;  $x$  是土壤速效磷含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $xc$  是土壤速效磷临界值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

米氏 (Mitscherlich) 模型方程为:

$$y = A[1 - e^{-k(x+c)}] \quad (4)$$

式中,  $y$  表示预测的作物产量 (kg);  $A$  是可获得的最大作物产量 (kg);  $k$  是效应因子;  $x$  是土壤速效磷含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $c$  在数学上可以反映出土壤的供磷能力。

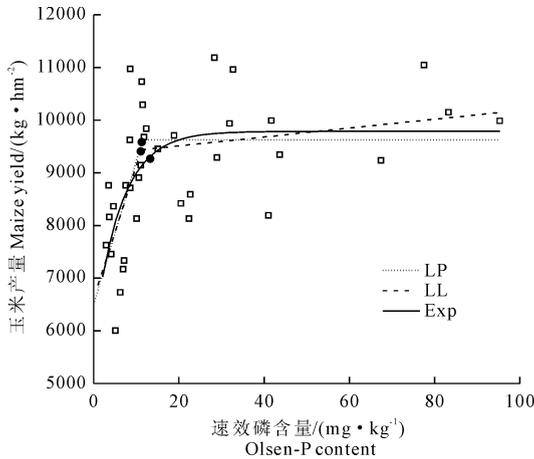
对于线性模型 (双直线和直线-平台), 土壤速效磷产量临界值在结合点处, 也就是两条直线的交叉点。当曲线模型 (米氏模型) 被拟合时, 土壤速效磷临界值是 95% 的最大作物产量对应的速效磷含量。

应用 Microsoft Excel 2003 对数据进行整理, Origin 8.0 软件绘图, 采用 SAS 9.1 软件的非线性 (NLIN) 程序中马夸特 (Marquardt) 方法对模型进行统计分析<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤速效磷产量临界值

在农业生产中应该将土壤速效磷控制在产量临界值之上,消除磷素对产量的限制。以磷肥试验 10 年的作物产量数据与土壤速效磷含量作图,通过三个模型进行模拟,计算土壤速效磷产量临界值(图 2)。玉米通过三个模型计算的产量临界值分别为: 11.5、11.3  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 13.1  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均值为 12.0



$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 三者之间差异很小,变异系数仅为 8.4%, 其中以米氏模型计算的最高,以直线-平台模型计算结果最低。大豆通过三个模型计算的产量临界值分别为 10.6、8.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 13.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均值为 10.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 相对玉米而言变异系数较大,为 21.6%, 同样是以米氏模型计算的值最高,以直线-平台模型计算的值最低(表 2)。玉米产量临界值稍高于大豆的。

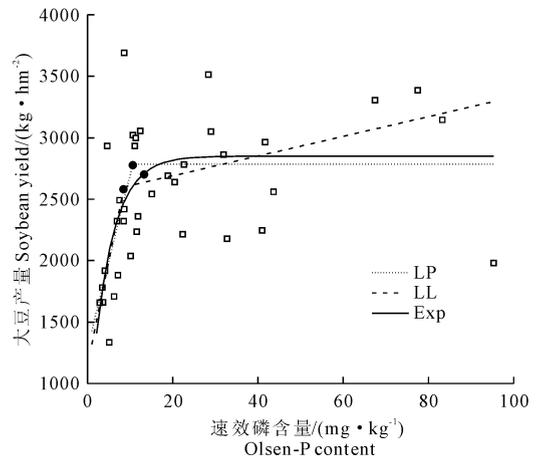


图 2 玉米和大豆产量对土壤 Olsen-P 的响应

Fig. 2 Responses of maize and soybean yield to soil Olsen-P

注:其中 LP、LL 和 Exp 分别表示直线-平台、双直线和米氏(Mitscherlich)模型,下同。

Note: LP, LL and Exp represent the linear-plateau, linear-linear and Mitscherlich type exponential model, respectively. The same below.

下辽河平原玉米和大豆速效磷产量临界值分别为 12.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 10.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。当土壤速效磷含量低于临界值时,产量会随速效磷的提高而增加,这时应该多施磷肥提高速效磷的含量,提高土壤供磷能力。玉米的临界值稍高于大豆,而 Colomb 等<sup>[15]</sup>在法国通过 36 年的长期定位试验结果表明,

磷的产量临界值大豆稍高于玉米,用直线-平台模型计算的结果分别为 4.8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 3.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、米氏模型的结果分别为 7.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 6.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在本研究中土壤速效磷的产量临界值处于以往报道的值域 3.9~20.0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间<sup>[7,15-17]</sup>。

表 2 三种模型模拟大豆和玉米的土壤速效磷产量临界值

Table 2 Yield thresholds of soil Olsen-P for maize and soybean simulated by three models

作物 Crop	模型 Model	方程 Equation	决定系数 $R^2$	产量临界值 Critical value for yield
玉米 Maize	LP	$y = 6502.1 + 271.9x$ $y = 9629.0$	0.392**	11.5
	LL	$y = 6618.4 + 250.5x$ $y = 9344.8 + 8.42x$	0.408**	11.3
	Exp	$y = 9790.5[1 - e^{-0.1574(x+5.93)}]$	0.354**	13.1
大豆 Soybean	LP	$y = 1288.3 + 141.3x$ $y = 2784.5$	0.394**	10.6
	LL	$y = 1149.3 + 170x$ $y = 2531.1 + 8.01x$	0.451**	8.5
	Exp	$y = 2850.4[1 - e^{-0.2087(x+1.16)}]$	0.391**	13.2

### 2.2 土壤速效磷淋溶临界值

对于淋溶临界值,农业生产中应将土壤速效磷控制在淋溶临界值以下,以降低其对环境产生威胁

的风险。本文以 2011 年 0~20 cm 土层内土壤速效磷含量为横轴,以 20 cm 土柱淋溶液内无机磷浓度为纵轴作图,采用折线模型计算淋溶临界值。6 次

淋溶计算的结果表明(图3),淋溶临界值处于  $74.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  到  $82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,均值为  $80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,这与周全来等<sup>[18]</sup>在同一实验站稻田土壤上的研究结果  $81.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  相近。刘畅等<sup>[19]</sup>在沈阳农业大学科研基地温室的棕壤上研究沟灌、渗灌和滴

灌三种灌溉方式下土壤磷的淋溶风险,结果表明,土壤磷淋溶临界值在三种灌溉方式下分别为  $59.4$ 、 $65.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $68.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,略低于本研究结果,这应与土壤类型、灌溉方式、种植模式和种植环境等因素不同有关。

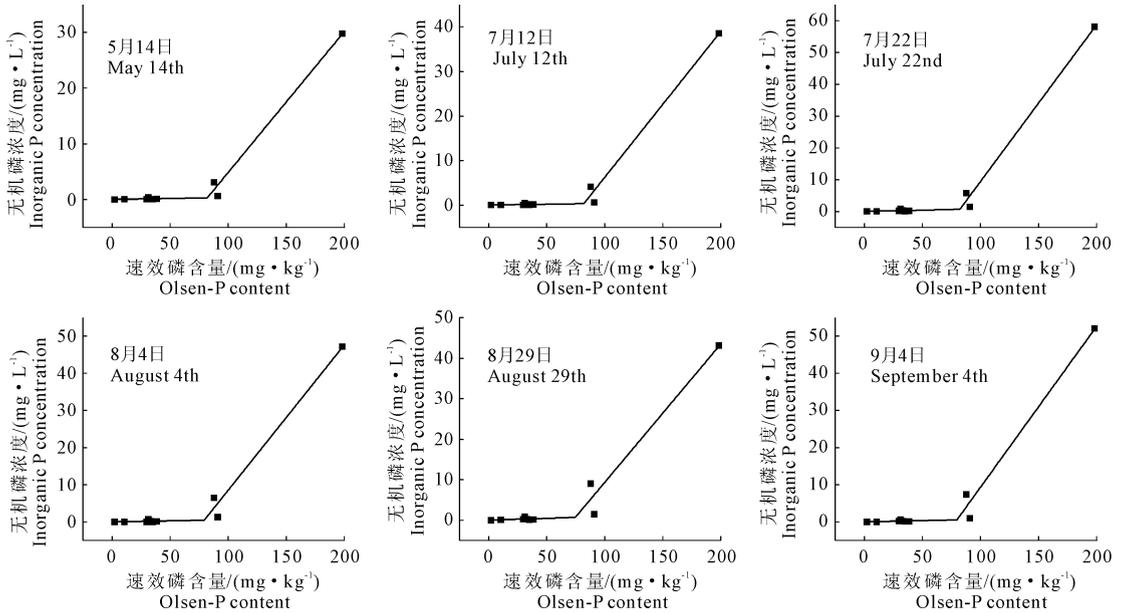


图3 土壤速效磷淋溶临界值

Fig. 3 The thresholds of soil Olsen - P for leaching

淋溶临界值是根据表层土壤内 Olsen - P 和  $\text{Ca-Cl}_2 - \text{P}$  之间的关系<sup>[9,11,12]</sup>或表层土壤淋溶液内无机磷和 Olsen - P 之间关系<sup>[8,20]</sup>而求得的“突变点”,土壤速效磷含量高于该值后磷素向下层土体和地下水中迁移的危险急剧增高。若磷只是迁移到亚耕层这个巨大的吸持磷库的话,尚不至污染地下水,而且该层内磷也可被植物吸收利用,这样由表层土壤确定的淋溶临界值也就没有意义。然而,事实并非如此,由表层土壤向下迁移的磷往往可以通过大孔隙产生的优势流而穿过下层土壤进入地下水中,使淋溶临界值起到预测磷淋溶并预警地下水污染的作用,而且有很多研究表明优势流是下层土壤内水分运动的主要方式,Kohler 等<sup>[21]</sup>研究表明通过优势流迁移的淋溶液量占总量的 73%;蒋小金等<sup>[22]</sup>对黑土耕地水分运动进行了研究,结果显示在 20 ~ 67 cm 土层水分运动以优势流为主; Djodjic 等<sup>[23]</sup>也指出,当优势流是水的主要迁移方式时,可使磷和水绕过高吸附力的亚耕层土壤,直接进入深层土壤或地下水。所以,笔者认为,正是由于在下层土壤中存在优势流的作用才使淋溶临界值预测磷淋溶的作用得以发挥。当然,也有研究者认为,优势流会使淋溶临界值失去预测磷淋溶的能力<sup>[20,24-25]</sup>。

### 3 结论

本文以长期定位试验为平台,通过直线 - 平台模型、双直线模型和米氏模型计算了下辽河平原地区,玉米和大豆的土壤速效磷产量临界值,分别为  $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $10.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。三个模型中以米氏模型计算的值最高,以直线 - 平台模型计算的最低,玉米的产量临界值稍高于大豆。通过 6 次淋溶试验,计算的土壤速效磷淋溶临界值在  $74.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  到  $82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,均值为  $80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。表明在该地区,土壤速效磷处于  $12.0 \sim 80.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,既可以保证作物产量又不会造成环境污染,为土壤磷素养分管理与确定合理施肥量提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] Arrigo K R. Marine microorganisms and global nutrient cycles[J]. Nature, 2005, 437(7057): 349-355.
- [2] Beman J M, Arrigo K R, Matson P A. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean[J]. Nature, 2005, 434(7030): 211-214.
- [3] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China[J]. A review. Plant and Soil, 2011, 349(1-2): 157-167.

- [4] 湛润生, 岳新丽, 韩志平, 等. 晋北地区不同种植年限设施土壤养分含量的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2012, (5): 133-137.
- [5] 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的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, (7): 1008-1017.
- [6] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, (3): 405-413.
- [7] Tang X, Ma Y B, Hao X Y, et al. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China[J]. Plant and Soil, 2009, 323(1-2): 143-151.
- [8] 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(6): 2033-2039.
- [9] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 105-110.
- [10] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching[J]. J Environ Qual, 2002, 31(5): 1601-1609.
- [11] 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, (2): 142-146.
- [12] 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.
- [13] 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: 180-182.
- [14] 高惠璇. SAS 系统 SAS\_ STAT 软件使用手册[M]. 中国统计出版社, 1997: 202-204.
- [15] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, et al. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(2): 154-165.
- [16] Aulakh M S, Garg A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(4): 417-427.
- [17] Mallarino A P, Atia A M. Correlation of a resin membrane soil phosphorus test with corn yield and routine soil tests[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(1): 266-272.
- [18] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. P 肥施入土壤后的变化进程及对 P 淋失的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2006, (3): 80-83.
- [19] 刘畅, 张玉龙, 孙伟. 灌溉方式对保护地土壤磷素淋失风险的影响[J]. 土壤通报, 2012, (4): 923-928.
- [20] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(5): 1601-1609.
- [21] Kohler A, Abbaspour K C, Fritsch M, et al. Using simple bucket models to analyze solute export to subsurface drains by preferential flow[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(1): 68-75.
- [22] 蒋小金, 王恩姮, 陈祥伟, 等. 典型黑土耕地土壤优先流环绕特征[J]. 应用生态学报, 2010, (12): 3127-3132.
- [23] Djodjic F, Borling K, Bergstrom L. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(2): 678-684.
- [24] Heathwaite A L, Dils R M. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways[J]. Science of the Total Environment, 2000, 251: 523-538.
- [25] Simard R R, Beauchemin S, Haygarth P M. Potential for preferential pathways of phosphorus transport[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 97-105.

(上接第 156 页)

酯酶同工酶是基因表达的直接产物, 在不同产地桔梗及不同部位表现出不同的多态性特征, 不同产地桔梗引种到同一环境后经过三年生长, 其酯酶同工酶的酶谱仍然存在差异, 说明酯酶同工酶技术可以鉴别不同产地桔梗之间遗传差异性。也可以作为桔梗科植物亲缘关系鉴定和发育阶段研究的手段。

3) 在本研究中, 引自内蒙赤峰与陕西商洛的桔梗品种显示有非常近的亲缘关系, 疑为同一品种, 经调查曾有药商早年将内蒙赤峰桔梗引种到商洛商州区种植。可能与药源基地引种有关系。

#### 参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2005 版)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2005: 19.

- [2] 刘自刚, 张雁, 王新军, 等. 桔梗育种研究进展[J]. 中草药, 2006, 37(6): 962-964.
- [3] 石俊英, 巩雨丽, 张会敏. 不同产地桔梗的聚丙烯酰胺凝胶电泳指纹图谱鉴别研究[J]. 中国药理学杂志, 2007, (19): 1462-1464.
- [4] 李喜凤, 薛秋萍, 董诚明, 等. 河南不同产地与年限桔梗的聚丙烯酰胺凝胶电泳分析[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(1): 35-36.
- [5] 林兴生, 李开本, 陈体强, 等. 11 个灵芝菌株的栽培性状和酯酶同工酶研究[J]. 江西农业大学学报, 2001, 23(1): 80-83.
- [6] Tao Lin, Ren Jun. Study on relationship and cluster of calligonum by isozyme electrophoresis analysis[J]. Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica, 2004, 24(9): 1708-1713.
- [7] Vaughan J G, Denford K E. An acrylamide gel electrophoretic study of the seed proteins of Brassica, Sinapsis species with special reference to their taxonomic value[J]. J Exp Bxp Bot, 1968, 19: 724-732.
- [8] 林亨芳, 王金英, 江川. 水稻不同部位酯酶同工酶酶带和酶谱分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 1994, 23(3): 262-265.