长期施肥条件下栗褐土磷素积累特征*

杨艳菊[1] 王改兰[1**] 张海鹏[1] 赵 旭[1] 黄学芳[2]
([1]湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; [2]山西农业科学院旱地农业研究中心, 太原 030031)

摘 要 2010—2012 年研究了长期施肥条件下(1988—2012 年)栗褐土速效磷、水溶性磷和生物有效磷积累量及三者之间的相关关系,并讨论了水溶性磷与土壤磷饱和度的相关关系。结果表明:长期施用磷肥和有机肥可显著增加栗褐土速效磷、水溶性磷和生物有效磷的含量且以高量有机肥配施化肥处理增加最为显著;P_2O_5 用量为 75 kg·hm^{-2}、有机肥用量为 45000 kg·hm^{-2}的处理在 2012 年时,土壤磷饱和度大于 25%,这显著增加了栗褐土磷素流失风险;速效磷、水溶性磷和生物有效磷的之间的相关性均达到极显著水平,其中速效磷与水溶性磷之间呈指数关系;磷饱和度与水溶性磷呈极显著指数关系。

关键词 长期施肥; 栗褐土; 水溶性磷; 生物有效磷; 磷饱和度
中图分类号 S156 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)5-1215-06

Phosphorus accumulation characteristics in cinnamon soil under long-term fertilization.

YANG Yan-ju[1], WANG Gai-lan[1**], ZHANG Hai-peng[1], ZHAO Xu[1], Huang Xue-fang[2] ([1]*College of Resources and Environment*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*; [2]*Institute of Dryland Farming*, *Shanxi Academy of Agricultural Sciences*, *Taiyuan* 030031, *Shanxi*, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1215-1220.

Abstract: In 2010-2012, this paper studied the accumulated amounts of available phosphorus (P), water-soluble P, and bioavailable P in a cinnamon soil under long-term (1988-2012) fertilization, and analyzed the correlation between the soil water-soluble P and P saturation degree. Long-term application of P fertilizer and organic fertilizer increased the contents of the soil available P, water-soluble P, and bioavailable P significantly, which was most significant in the treatment of applying high amount organic fertilizer combined with chemical P fertilizer. In treatment 45000 kg·hm^{-2} of organic fertilizer plus 75 kg·hm^{-2} of P_2O_5, the soil P saturation degree in 2012 was >25%, which enhanced the P loss risk of cinnamon soil remarkably. There existed extremely significant correlations between the soil available P, water-soluble P, and bioavailable P, of which, the first two were of exponential relationship. In addition, there was an extremely significant exponential relationship between the soil P saturation degree and water-soluble P.

Key words: long-term fertilization; cinnamon soil; water-soluble phosphorus; bioavailable phosphorus; P saturation degree.

土壤中的磷在农业生态系统的物质循环中起着重要作用(海龙等,2006;宋春和韩晓增,2009)。磷肥在农业生产中的长期过量施用,导致农田土壤磷素的大量积累(鲁如坤,2003;Murray *et al*.,2004;周萍等,2007)。当磷素积累超过一定的限度,就会加速农田土壤磷素的流失,进而导致水体富营养化,影响地下水的质量(连彦峰和刘树庆,2008;张慧敏和章明奎,2008)。因此,国内外研究学者开始重视土壤磷素积累特征和土壤磷素饱和度的评价(刘子国等,2008;张国林等,2008)。目前,在旱地长期施肥条件下引起的农田土壤磷素的累积及其相关关系的研究已有相关报道,其中针对磷肥与有机肥配合施用对土壤磷素积累的研究较多,研究结果也表明,有机肥与磷肥配施能够增加土壤磷素的积累(鲁如坤,2003)。一般认为,农田土壤中的磷除作物吸收、土壤固定外,主要以地表径流和渗漏的方式而损失,土壤速效磷、水溶性磷、生物有效磷和土壤磷饱

*国家自然科学基金项目(49971040)和湖南农业大学人才引进资金项目资助。
**通讯作者 E-mail: gailanwang@hotmail.com
收稿日期: 2012-10-11 接受日期: 2013-02-05

和度多被用来作为反映农田土壤磷素环境风险的指标,在环境保护方面具有重要意义(胡鹏飞等,2012)。以上研究内容主要集中在红壤、棕壤等土壤类型上,针对栗褐土,施用不同磷肥与有机肥数量对土壤速效磷、水溶性磷、生物有效磷与土壤磷饱和度及其之间相关关系的研究鲜有报道,因此,本试验以长期施肥的黄土丘陵区典型地带性土壤栗褐土为研究对象,在长期过量施用磷肥与有机肥条件下,对连续3年栗褐土不同形态磷的积累量及相关关系等的影响进行了研究,探讨了长期施肥对栗褐土磷素积累的影响,旨在为当地合理利用土壤和肥料资源及环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于1988年布置在山西省河曲县砖窑沟流域的沙坪村窑家嘴梁顶平地上,供试土壤按山西省第二次土壤普查分类为轻壤黄土质淡栗褐土(土种),以中国土壤系统分类为黄土正常新成土(土类),1988年作物播种前测得试验地耕层(0~20 cm)土壤基本理化性状:有机质、全氮、全磷含量分别为5.64、0.445、1.23 g·kg^{-1},碱解氮、速效磷含量分别为13.95、9.85 mg·kg^{-1},pH值为8.06,$CaCO_3$含量为13.55%。

1.2 试验设计

试验设8个处理:1)不施肥(CK);2)单施氮肥(N);3)氮磷肥合施(NP);4)单施低量有机肥(M_1);5)低量有机肥与氮肥配合施用(M_1N);6)低量有机肥与氮磷肥配合施用(M_1NP);7)高量有机肥与氮肥配合施用(M_2N);8)高量有机肥与氮 磷肥配合施用(M_2NP)。1988年开始施肥处理,所有肥料均作基肥一次性施用,各处理施肥量见表1。试验设3次重复,随机区组排列,小区面积4 m×6 m,每年试验小区的处理不变。氮肥用含氮46%的尿素,磷肥用含P_2O_5 14%的过磷酸钙,有机肥使用当地圈肥,氮含量0.364%,P_2O_5含量平均为0.246%(多年平均值),本试验施有机肥的两种水平下,有机肥料带入的N分别为81.9和163.8 kg·hm^{-2},有机肥带入的P分别为55.38和110.77 kg·hm^{-2}。种植制度为一年一熟制,玉米单作,耕作管理措施与大田相同。2010年各处理土壤基本理化性状见表2。

1.3 土壤样品的采集与测定

试验于2010、2011和2012年作物播种前采集耕层(0~20 cm)土壤样品,风干后过筛,测定速效磷(available P)、水溶性磷(water-soluble P)、生物有效磷(bioavailable P)(均为3次重复取平均值);水溶性磷的测定:用0.01 mol·L^{-1} $CaCl_2$溶液浸提,液土比为10∶1,震荡30 min,钼锑抗比色法测定(张凤华等,2009)。生物有效磷的测定,用0.01 mol·L^{-1} NaOH浸提,液土比为500∶1,震荡24 h,钼锑抗比色法测定。速效磷采用pH 8.5的$NaHCO_3$浸提(鲍士旦,2000)。土壤磷饱和度(DPS)是指土壤可提取磷与最大吸附量之比的百分数(郭胜利等,2005),本文最大吸附量由磷的吸附试验求得。数据使用Excel 2003及DPS 7.05进行分析。

表1 各处理的施肥量(kg·hm^{-2})
Table 1 Fertilization of each treatment

处理	有机肥	氮肥(N)	磷肥(P_2O_5)
CK	0	0	0
N	0	120	0
NP	0	120	75
M_1	22500	0	0
M_1N	22500	120	0
M_1NP	22500	120	75
M_2N	45000	120	0
M_2NP	45000	120	75

表2 2010年各处理土壤基本理化性状
Table 2 Properties of original soils used for the long-term experiments in 2010

处理	有机质 (g·kg^{-1})	全氮 (g·kg^{-1})	全磷 (g·kg^{-1})	碱解氮 (mg·kg^{-1})	速效磷 (mg·kg^{-1})	速效钾 (mg·kg^{-1})	pH
CK	10.21	0.47	1.19	30.91	7.69	79.9	8.17
N	9.53	0.51	1.16	33.24	6.48	78.8	8.09
NP	11.37	0.53	1.48	33.63	17.80	94.0	7.99
M_1	15.19	0.69	1.40	46.59	18.20	179.1	8.16
M_1N	15.06	0.73	1.37	56.54	15.93	169.5	8.13
M_1NP	16.19	0.61	1.61	59.49	31.90	140.2	8.00
M_2N	18.07	0.85	1.46	69.14	28.02	238.2	8.11
M_2NP	21.69	0.88	1.75	70.33	50.81	274.3	8.01

2 结果与分析

2.1 连续施肥对栗褐土磷素积累的影响

栗褐土是黄土丘陵地区典型地带性土壤,全磷含量虽较高,但因属石灰性土壤,磷较易被固定,有效磷含量并不高,磷肥的利用率也不高(张亮等,2010)。由表2可以看出,经过20多年施用磷肥可以提高土壤速效磷、水溶性磷和生物有效磷,施用肥料种类的不同增加的幅度不同。

由表3可知,不施磷的处理(CK、N)土壤速效磷、水溶性磷、生物有效磷均呈逐年下降的趋势。有外源磷肥投入的处理(NP、M_1、M_1N、M_1NP、M_2N、M_2NP)土壤3种形态磷的含量呈逐年上升的趋势。NP、M_1、M_1N处理3年的速效磷含量相当,3处理间差异不显著,但与其他处理差异达到显著水平。M_1NP、M_2N两处理间3年的速效磷含量差异不显著,但与其他处理差异显著。M_2NP处理3年间速效磷含量均处于最高状态,是对照处理的6.6倍、15.0倍和26.2倍,累积速度可达平均每年22.04 mg·kg^{-1}速效磷。M_2NP速效磷含量是M_1NP处理的1.59倍、1.56倍和2.03倍,是M_1处理的2.79倍、2.54倍和2.50倍。M_2NP处理虽与M_1NP处理化学磷肥的施用量相同,但3年中两处理的速效磷含量不同,主要是因为M_2NP处理有机肥的施用量是M_1NP处理的2倍,有机肥中含有的磷素会影响土壤速效磷含量。M_2NP处理与M_1处理速效磷含量差异原因在于一是M_1处理没有化学磷肥的投入;二是M_2NP处理有机肥的用量是M_1处理的2倍。

与对照相比,各处理水溶性磷的含量除N处理外均呈增加趋势。NP、M_1和M_1N处理在2010、2011和2012年水溶性磷的含量并没有明显增加。而M_1NP、M_2N和M_2NP处理水溶性磷的增加效果明显,且以M_2NP处理水溶性磷含量最高,分别是对照处理的3.6倍、5.0倍和42.6倍,增加速度为平均每年0.9 mg·kg^{-1}。

生物有效磷在处理间的增长趋势以施用有机肥的处理含量较高且随有机肥用量的增加而增加,以M_2N、M_2NP两个处理增加效果最为显著,分别是对照的3.9倍、6.0倍、6.2倍和5.0倍、8.8倍、9.2倍。增长速度分别为2.3和4.5 mg·kg^{-1}。M_1、M_1N、M_1NP 3个处理增加效果较为明显,NP处理在2010和2011年增加效果与对照相比不显著,2012年与对照相比差异达显著水平。

综上可知,长期施肥对黄土丘陵区栗褐土磷素积累影响的结果大致可以分为3种结果:一是长期单施氮肥处理导致速效磷、水溶性磷和生物有效磷的含量与对照相比均有所降低;二是有机肥配施化学磷肥处理(M_1NP、M_2NP)、高量有机肥配施氮肥处理(M_2N)使3种磷形态含量均高于对照与其他处理;三是NP处理、M_1处理和M_1N处理3种磷的含量较对照均有所增加,但增加量小于有机肥与化学磷肥配施的处理。

2.2 栗褐土速效磷、水溶性磷和生物有效磷年增长率的变化

由表4可知,连续施肥条件下栗褐土各处理3种形态磷素年增长率有所不同。对照处理与N处理年增长率均为负值,原因是对照处理与N处理没有磷肥的投入,作物生长所需要的磷主要来自于土壤本身的磷库,通过其他途径(灌溉、降雨)所获得的磷很少,所以对照处理与N处理的磷素一直处于耗竭状态。对照处理速效磷年增长率为-21.6%,水溶性磷年增长率为-36.5%,生物有效磷的年增长率为-15.6%。N处理与对照相比3种形态磷的年增长率更小,分别为-38.1%、-39.6%和-29.9%。

表3 连续施肥条件下栗褐土各处理速效磷、水溶性磷及生物有效磷的含量(mg·kg^{-1})

Table 3 Content of available P, water-soluble P and bioavailable P in cinnamon soil under long-term fertilization

处理	2010年			2011年			2012年		
	速效磷	水溶性磷	生物有效磷	速效磷	水溶性磷	生物有效磷	速效磷	水溶性磷	生物有效磷
CK	7.69 d	0.29 c	17.28 d	4.63 d	0.27 de	12.06 d	4.47 d	0.09 c	11.94 e
N	6.48 d	0.25 c	16.14 d	3.32 d	0.21 e	11.26 d	2.41 d	0.08 c	7.93 e
NP	17.80 c	0.37 bc	26.81 d	23.82 c	0.46 bcd	27.83 d	32.48 c	0.54 c	31.98 d
M_1	18.20 c	0.43 bc	52.25 bc	27.31 c	0.46 bcd	51.19 c	46.80 c	1.02 bc	50.81 c
M_1N	15.93 cd	0.35 bc	46.44 c	22.59 c	0.42 cde	51.98 c	46.93 c	0.89 bc	53.07 c
M_1NP	31.90 b	0.53 b	52.25 bc	44.75 b	0.57 bc	66.36 bc	57.46 b	1.74 b	66.44 b
M_2N	28.02 b	0.62 b	67.08 b	39.40 b	0.66 b	71.95 b	52.71 b	1.94 b	74.05 b
M_2NP	50.81 a	1.03 a	95.93 a	69.45 a	1.36 a	105.88 a	116.92 a	3.84 a	109.32 a

注:表中字母不相同的表示同一年不同处理差异达显著,$P<0.05$。

表4 连续施肥条件下栗褐土各处理速效磷、水溶性磷及生物有效磷的增加率(%)

Table 4 Increasing rate of available P, water-soluble P and bioavailable P in cinnamon soil under long-term fertilization

处理	2010—2011年			2011—2012年		
	速效磷	水溶性磷	生物有效磷	速效磷	水溶性磷	生物有效磷
CK	-39.80	-6.32	-30.22	-3.48	-66.67	-0.96
N	-48.70	-16.47	-30.23	-27.40	-62.63	-29.53
NP	33.85	26.36	3.81	36.33	17.19	14.91
M_1	50.05	6.86	0.74	71.37	121.41	2.09
M_1N	41.80	17.96	11.93	107.77	113.82	2.09
M_1NP	40.29	7.11	26.99	28.40	204.59	0.12
M_2N	40.62	6.72	7.25	33.76	191.78	2.93
M_2NP	36.71	31.37	10.37	68.34	182.66	3.24

这说明单施氮肥加速了栗褐土磷素的耗竭。原因是N处理与对照相比,增施了氮肥,氮肥在一定程度上可以促进作物的生长,作物生长过程中从土壤中带走的磷素就会比对照处理多,所以单施氮肥处理与对照相比磷素的耗竭要更快。

有外源磷肥投入的各处理速效磷、水溶性磷和生物有效磷的年增长率均为正值。各处理速效磷的年增长率为34.3%~74.8%,平均年增长率为54.6%。各处理水溶性磷的年增长率为21.8%~107.0%,平均为64.4%。其中以M_2NP处理平均年增长速率最快。各处理生物有效磷的年增长速率为1.4%~13.6%,平均为7.5%。由以上分析可知,速效磷与水溶性磷的增长速率较快,生物有效磷较慢。这说明,长期施肥条件下的栗褐土,速效磷增加的同时生物有效磷也在缓慢增加,对水环境的影响也在加强。

2.3 栗褐土速效磷、水溶性磷和生物有效磷相关性分析

水溶性磷又叫土壤易解析磷,指土壤固相中容易进入液相中的中的磷,也可以反映在一定条件下磷素从土壤固相进入液相和地表径流的难易程度(Jodjic *et al.*,2004)。生物有效磷是指土壤可以供给水藻类生长的有效磷源(Sharpley,1991)。

由表5可知,速效磷、水溶性磷及生物有效磷三者之间的相关系数均达到极显著水平。经过最优方程的选择发现,土壤速效磷与水溶性磷含量之间的关系并不是李延亮(2009)报道的线性相关关系,栗褐土在长期施肥条件下土壤水溶性磷含量随着土壤速效磷含量的增加而呈现出指数增长趋势。赵小蓉等(2006)长期定位试验研究表明,土壤速效磷低于60 mg·kg^{-1}时,60 cm排出水的总磷含量低于0.15 mg·L^{-1},而高于60 mg·kg^{-1}时,水中总磷含量会直线上升,本试验中M_2NP处理的土壤磷素水平在2012年时远远超过这一值,这可能会影响地表径流和下渗水磷素含量从而对环境造成影响,所以在以后的研究中应加强研究栗褐土磷素环境预警值,探讨其环境意义。

2.4 栗褐土磷饱和度与水溶性磷相关性分析

一般认为,土壤磷素的常规测定是为了计算土壤对植物供磷能力的大小,但随着磷素对生态环境造成的影响越来越严重,人们开始探索针对环境污染的土壤磷素的测定方法,从而通过较为简单的数学方式估算土壤磷素对环境造成的影响。土壤水溶性磷和土壤磷素饱和度是估算土壤磷素对环境造成污染的主要参数之一。

由图1可知,2010—2012年土壤磷饱和度变化较大,2010年磷饱和度为2%~16%,而2012年磷饱和度为1%~61%,其中均以处理M_2NP磷饱和度最大,以N处理磷饱和度最低。指数方程可以很好地模拟出水溶性磷与土壤磷饱和度的关系且二者之间相关性极显著。有研究指出,地表水中磷的含量

表5 速效磷、水溶性磷及生物有效磷之间相关性

Table 5 Correlation between available P, water-soluble P and bioavailable P

年份	项目	方程	相关系数	样品数	r显著临界值
2010	速效磷→水溶性磷	$y = 0.2218e^{0.0309x}$	0.979	24	
	速效磷→生物有效磷	$y=1.7282x+8.5755$	0.930	24	
	水溶性磷→生物有效磷	$y=100.09x-1.7523$	0.940	24	
	速效磷→水溶性磷	$y=0.2236e^{0.0256x}$	0.978	24	$r_{0.05}=0.706$
2011	速效磷→生物有效磷	$y=1.4377x+7.5287$	0.968	24	$r_{0.01}=0.834$
	水溶性磷→生物有效磷	$y=81.995x+4.5779$	0.907	24	
	速效磷→水溶性磷	$y=0.1352e^{0.0358x}$	0.906	24	
2012	速效磷→生物有效磷	$y=0.9129x+9.5905$	0.973	24	
	水溶性磷→生物有效磷	$y=26.16x+17.537$	0.967	24	

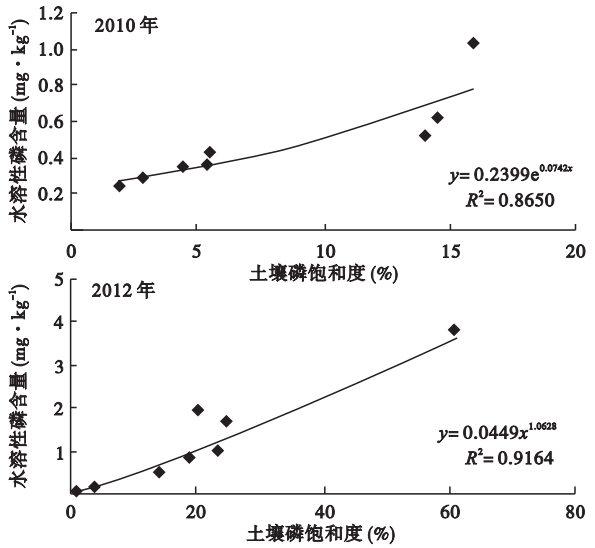

图 1 2010 年和 2012 年磷饱和度与水溶性磷相关性
Fig. 1 Correlation of P saturation and water-soluble P in 2010 and 2012

与表层土壤的磷饱和度密切相关,当土壤磷饱和度<25%时,土壤向水体中释放磷的速度较为缓慢,当土壤磷饱和度>25%时,水体中的磷含量随土壤磷饱和度上升而迅速增加(鲁如坤等,2000)。本试验中,2010 年各处理土壤磷的饱和度并未达到这一临界值,而 2012 年 M_2NP 已超过这一临界值,这就意味着连续大量施用有机肥和化学磷肥存在一定的环境风险。在以后的试验中应更加注重这方面的研究。

3 讨 论

鲁如坤等(2000)提出,当土壤速效磷达到 40 ~ 60 mg · kg^{-1},水溶性磷为 0.1 mg · kg^{-1}时,农田磷通过渗漏污染水源的临界标准为速效磷 50 ~ 70 mg · kg^{-1}。英国洛桑试验站通过试验证明,当土壤中速效磷的含量超过 60 mg · kg^{-1}时,灌溉水中可溶性磷的含量与土壤速效磷的含量呈线性相关关系。从本试验结果可以看出,磷肥与有机肥配施土壤速效磷增加明显高于其他处理,而长期不施磷肥的处理(CK、N),3 种形态的均呈逐年减少的趋势且 N 处理下降的趋势大于对照处理;有外源磷肥施入的处理,3 种形态的磷均呈逐年增加的趋势且以 M_2NP 处理增加最为显著,这与前人(刘子国等,2008;徐永刚等,2011)的研究结果一致。其中 M_2NP 处理(P_2O_5用量为 75 kg · hm^{-2},有机肥用量为 45000 kg · hm^{-2}),2012 年的土壤速效磷含量已增加到 116.92 mg · kg^{-1},这一结果已超过鲁如坤(2000)提出的土壤速效磷 50 ~ 70 mg · kg^{-1}的临界值,由于土壤速效磷与水溶性磷、水溶性磷与生物有效磷之间呈极显著正相关关系,随着土壤速效磷的增加,会导致水溶性磷和生物有效磷的增加,使栗褐土磷素积累的环境风险明增大。所以在栗褐土上同时施用磷肥与有机肥时,磷肥的用量不应超过 75 kg · hm^{-2},有机肥用量不应超过 45000 kg · hm^{-2}。

本试验的创新之处在于,发现了长期施肥条件下栗褐土速效磷、水溶性磷及生物有效磷之间、水溶性磷与土壤磷饱和度之间均呈极显著正相关关系,并发现了土壤水溶性磷与土壤速效磷之间呈指数相关关系,获得了速效磷、水溶性磷及生物有效磷之间的指数方程,修正了前人(李延亮等,2009)所报道的呈线性相关关系,这对今后的不同地域、不同土壤上磷素积累特征的研究具有重要意义。根据本试验的结果,在一定条件下,可以用水溶性磷、生物有效磷作为评价栗褐土土壤磷饱和度及土壤存在磷素污染可能性的指标。

本试验中,针对栗褐土中生物有效磷与土壤磷饱和度之间的具体的数量关系并没有进行更为深入的研究,在评价过程中还应该考虑在严格控制的生境田间和长期重复条件下,各处理的作物产量、土壤微生物、土壤酶、雨水和径流水中磷素含量等影响土壤中磷素积累特征的因素,以便更全面、更准确地评价长期施肥条件下栗褐土磷素积累特征及土壤磷饱和度。

参考文献

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.

郭胜利, 党延辉, 刘守赞, 等. 2005. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系. 植物营养与肥料学报, **11**(1): 33-39.

海 龙, 王 平, 张仁陟, 等. 2006. 不同耕作方式对土壤有机磷形态的影响. 甘肃农业大学学报, **10**(5): 95-99.

胡鹏飞, 何泰蓉, 金慧芳, 等. 2012. 长寿湖表层沉积物中磷的赋存形态及生物有效性分析. 生态学杂志, **33**(1): 9-13.

李延亮, 谢英荷, 田东方, 等. 2009. 山西省磷素积累特征及流失风险分析. 中国生态农业学报, **17**(5): 870-873.

连彦峰, 刘树庆. 2008. 农田土壤中磷素流失与水体富营养化. 河北农业科学, **12**(7): 91-93, 99.

刘子国, 黄 敏, 余 萃. 2008. 表征测试指标分析土壤磷素流失风险的研究. 湖南农业科学, (4): 75-77, 80.

鲁如坤, 时正元, 施建平. 2000. 我国南方6省农田养分平衡状况评价和动态变化研究. 中国农业科学, **33**(2): 63-67.

鲁如坤. 2003. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, **18**(1): 4-7.

宋 春, 韩晓增. 2009. 长期施肥条件下土壤磷素研究进展. 土壤, **41**(1): 21-26.

徐永刚, 宇万太, 马 强, 等. 2011. 不同轮作模式下土壤氮磷淋移和蔬菜硝酸盐、亚硝酸盐积累. 生态学杂志, **30**(6): 1107-1113.

张 亮, 王改兰, 段建南, 等. 2010. 长期施肥对栗褐土腐殖质组分的影响. 山西农业大学学报, **30**(1): 5-8.

张凤华, 廖文华, 刘建玲. 2009. 连续过量施磷和有机肥的产量效应、土壤有机碳含量的关系. 植物营养与肥料学报, **15**(6): 1280-1287.

张国林, 钟继红, 曾 芳, 等. 2007. 土壤磷素的流失风险研究. 农业环境科学学报, **26**(5): 1917-1923.

张慧敏, 章明奎. 2008. 稻田土壤磷淋失潜力与磷积累的关系. 生态与农村环境学报, **24**(1): 59-62.

赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 等. 2006. 我国23个土壤磷素淋失风险评估. Ⅱ. 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系. 生态学报, **26**(9): 3011-3017.

周 萍, 何丙辉, 刘宏斌, 等. 2007. 土壤磷素流失潜能评价研究进展. 湖北农业科学, **46**(3): 469-473.

Jodjic F, Brling K, Bergstrm L. 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality*, **33**: 678-684.

Murray RH, Bert FQ, Nguyen ML. 2004. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: A review. *Journal of Environmental Quality*, **33**: 1957-1972.

Sharpley AN. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, **20**: 235-238.

作者简介 杨艳菊,女,1986年生,硕士研究生,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: tsyangyanju@126.com

责任编辑 李凤芹