

应用土壤测试磷评估砂土中磷的可淋洗性

章明奎

(浙江大学环境与资源学院资源科学系, 杭州 310029)

EVALUATION OF PHOSPHORUS LEACHABILITY IN SAND SOILS BY MEANS OF SOIL P TEST

Zhang Mingkui

(Department of Natural Resource Sciences, College of Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

关键词 土壤测试磷; 磷的可淋洗性; 预测; 砂土; 富营养化

中图分类号 S153.61

文献标识码 A

河流、湖泊的富营养化是当今水质管理面临的重大问题之一。地表水体的富营养化一般与养分年输入量增加有关^[1], 因此控制地表径流和地下排水中养分(特别是磷)的输出被认为是降低富营养化风险最有效的途径^[2, 3]。以往的研究表明, 地表径流中可溶性磷的浓度与土壤测试磷有关^[4-8], 因过量施用肥料引起的高水平磷积累的土壤常是径流中磷的主要来源^[4]。长期以来, 土壤测试磷一直被用于评价土壤中植物有效磷的数量, 并为确定获得预期的作物产量所需要的化肥用量提供依据。近年来, 土壤磷的测试已被一些国家考虑作为保护水质识别哪些土壤应该禁止使用化肥和粪肥的依据^[9-11]。然而, 至今还没有完全搞清这些被用于评价磷的植物有效性的土壤磷测试方法是否适于评估对水体富营养化有重要贡献的土壤磷形态。田间试验表明, 当土壤测试磷超过作物正常生长范围时, 通过地表径流和地下排水损失的磷可达到较高的水平^[4, 12]。尽管我们通过观测可知道从土壤移向水体的磷负荷, 但这些观测难以反映土壤中哪部分磷被释放。而了解土壤中可释放磷的形态是为降低农田向地表水体的养分输出进行农田养分管理所必需的。砂质农业土壤中积累的磷可直接通过地表径流或淋洗通过亚表径流进入排水沟而影响周围水体的水质^[13]。因此研究砂质土壤中磷的可淋洗性与土壤测试磷、土壤磷的组分的关系, 可搞清何种土壤磷测试方法

最适于评价砂质土壤磷的环境风险。

1 材料与方法

本研究选用的 96 个土样采自美国佛罗里达州商业蔬菜农场和果园, 采样深度为 0~15 cm。供试土壤均为薄层潮灰土(Haplaquods), 分属 Wabasso sand 和 Nettles sand 二个土系。供试土壤均属砂土, 这些土壤表土积累的磷可直接通过地表径流或淋洗进入亚表径流再通过田内排水沟迁移至周围水体^[13]。土样风干后过 2 mm 土筛, 部分土样进一步过 0.125 mm 土筛, 供全量分析。pH(土液比为 1:1)和电导(EC, 土液比为 1:2)用 pH/离子/电导仪测定。有机 C 用 CNS 分析仪测定。土壤颗粒组成用微吸管法测定^[14]。土壤测试磷分别用以下 7 种不同方法提取^[15, 16]: (1) Olsen P, 用 0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃(pH 8.5)溶液提取, 土液比为 1:20, 提取时间 30 min; (2) Mehlich 1-P, 用 0.05 mol L⁻¹ HCl + 0.0125 mol L⁻¹ H₂SO₄ 溶液提取, 土液比为 1:4, 提取时间 5 min; (3) 水溶性 P, 用去离子水提取, 土液比为 1:10, 提取时间 60 min; (4) KCl-P, 用 0.02 mol L⁻¹ KCl(稀盐)提取, 土液比为 1:10, 提取时间 60 min; (5) CaCl₂-P, 用 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂(稀盐)提取, 土液比为 1:10, 提取时间 60 min; (6) Bray 1-P, 用 0.03 mol L⁻¹ NH₄F + 0.025 mol L⁻¹ HCl 溶液提

取, 土液比为 1: 7, 提取时间 1 min; (7) Mehlich 3-P, Mehlich-3 溶液(0.2 mol L⁻¹ CH₃COOH+ 0.25 mol L⁻¹ NH₄NO₃+ 0.015 mol L⁻¹ NH₄F+ 0.013 mol L⁻¹ HNO₃+ 0.001 mol L⁻¹ EDTA, pH2.0) 提取, 土液比为 1: 10, 提取时间 5 min。提取物经离心分离 30 min 后过 Whatman 42# 滤纸。方法(1)、(2)、(3)、(4)和(5)提取的上清液中磷直接用钼兰比色法测定^[15]; 方法(6)和(7)提取的上清液中磷用等离子原子发射光谱法测定。

土壤磷分级采用 Hedley 等的方法^[17]。提取步骤简述如下: 称 1.00 g 风干土样置于 50 ml 离心管中, 顺次连续用 30 ml 去离子水、0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃ (pH8.2)、0.1 mol L⁻¹ NaOH 和 1 mol L⁻¹ HCl 提取。每次提取振荡时间为 16 h。每次提取后经离心分离 15 min, 并过 Whatman 42# 滤纸分离悬液。去离子水和 HCl 提取物中的总 P 及 NaHCO₃ 和 NaOH 提取的无机磷(IP)用钼兰比色法直接测定; NaHCO₃ 和 NaOH 的提取物经过硫酸铵-硫酸消化后用比色法测定总磷(TP)^[18]。NaHCO₃ 和 NaOH 的提取的有机磷(OP)用提取物中的 TP 与 IP 的差值计算。土壤全磷用高氯酸消化-比色法测定。残余态 P 用土壤总 P 与以上四种提取剂提取磷总和的差值计算。根据以上提取方法, 可把土壤磷组分划分为水可提取态磷(H₂O-P)、生物有效无机磷(NaHCO₃-IP)、易矿化有机磷(NaHCO₃-OP)、与无定形和部分结晶铝铁氧化物结合的磷(NaOH-IP)、较稳定的有机磷(NaOH-OP)、酸溶性磷(相对稳定的与 Ca 结合态磷, HCl-P)和残余态磷^[17]。

土壤磷的可淋洗性用连续淋洗方法测定。称土 50 g 置于滤纸中(滤纸事先叠成一定角度放置于一塑料漏斗上)。加去离子水湿润使土壤水分达到约田间持水量, 在室温下放置平衡 2 d 后, 连续用去离

子水淋洗 15 d(次), 每天(次)去离子水累计用量为 40 ml, 每次淋洗的淋洗液收集于 125 ml 的塑料瓶中, 淋洗液体积用称重法确定, 磷浓度用比色法测定。每次淋出的磷量用淋洗液体积和磷浓度计算。统计分析在 SAS 软件上进行。

2 结果与讨论

2.1 供试土壤基本性质和土壤磷状况

供试土壤化学性质有较大的变化, pH 从酸性至微碱性(表 1), 土壤有机 C 较低, 平均为 4.3 g kg⁻¹。大部分土壤砂粒含量在 800 g kg⁻¹ 以上, 而粉砂和粘粒含量一般在 60 g kg⁻¹ 以下。供试的 96 个土样总磷和 7 种测试磷均有较大的变化(表 1、表 2), 总磷(P)含量在 23.6~552 mg kg⁻¹ 之间, 平均为 144 mg kg⁻¹。7 种土壤测试磷(P)平均浓度: Mehlich 3-P (84.4 mg kg⁻¹) > Mehlich 1-P (64.4 mg kg⁻¹) > Bray 1-P (50.4 mg kg⁻¹) > Olsen-P (19.7 mg kg⁻¹) > 水溶性 P (7.1 mg kg⁻¹) > KCl-P (5.8 mg kg⁻¹) > CaCl₂-P (2.4 mg kg⁻¹)。水溶性磷、KCl-P 和 CaCl₂-P 的含量较低, 它们仅占土壤总磷的一小部分, 代表了易释放态磷; 而 Olsen-P、Mehlich 3-P、Mehlich 1-P 和 Bray 1-P 的含量较高, 它们占据了土壤总磷的较大部分, 代表了易释放态磷和部分慢释放态的磷。相关分析表明(数据略), 这 7 种提取方法提取的磷含量之间存在明显的相关性($p < 0.001$), 其中水溶性磷、KCl-P、CaCl₂-P 和 Olsen-P 之间的相关系数接近 0.9 或在 0.9 以上。用连续提取方法测定的土壤磷组分也有很大的变化(表 2)。土壤中大部分磷可被去离子水、NaHCO₃、NaOH 和 HCl 提取, 平均提取率为 65%, 可提取态磷的比例平均: NaHCO₃-TP (24.6%) > NaOH-TP (14.9%)、HCl-P (14.7%) > H₂O-P (10.7%)。

表 1 供试 96 个土样基本性质和测试磷

	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	电导 ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	有机 C (g kg ⁻¹)	砂粒 (g kg ⁻¹)	粉砂 (g kg ⁻¹)	粘粒 (g kg ⁻¹)
范围	3.92~8.80	3.80~8.60	52~867	0.46~27.24	78.84~980.0	0.8~112.6	7.8~143.4
平均	6.67	6.34	245	4.30	927.9	25.5	46.6
标准差	1.27	1.27	160	4.10	35.5	20.8	23.5
	Olsen-P (mg kg ⁻¹)	Mehlich 1-P (mg kg ⁻¹)	水溶性 P (mg kg ⁻¹)	KCl-P (mg kg ⁻¹)	CaCl ₂ -P (mg kg ⁻¹)	Bray-P (mg kg ⁻¹)	Mehlich 3-P (mg kg ⁻¹)
范围	1.0~75.2	1.3~241.2	0.8~23.9	0.1~23.2	0.1~10.8	0.7~243.1	5.2~334.6
平均	19.7	64.6	7.1	5.8	2.4	50.4	84.4
标准差	16.2	71.9	5.4	5.1	2.1	55.8	91.3

表 2 供试 96 个土样的磷组分¹⁾

	总 P	H ₂ O-P	NaHCO ₃			NaOH			HCl-P	残余态 P
			IP	OP	TP	IP	OP	TP		
(P mg kg ⁻¹)										
范围	23.6~ 552	0.9~ 45.5	1.0~ 141	0~ 25.9	1.2~ 150	0.7~ 52.7	0~ 11.4	2.2~ 58.1	0.1~ 162	3.5~ 338
平均	144.5	14.0	34.5	3.2	37.7	17.0	2.8	19.8	29.7	43.2
标准差	108.7	11.1	34.8	4.9	37.3	14.6	2.6	15.2	38.5	46.9
比例 (%)										
(P mg kg ⁻¹)										
范围	100	1.0~ 28.1	1.3~ 42.6	0~ 11.6	1.6~ 45.6	1.5~ 48.7	0~ 10.7	3.5~ 52.3	0.2~ 51.0	1.2~ 89.8
平均	100	10.7	22.2	2.4	24.6	12.7	2.2	14.9	14.7	35.0
标准差		5.6	10.9	3.0	11.7	8.4	2.4	8.4	11.6	21.6

1) IP: 无机 P; OP: 有机 P; TP: 有机 P 和无机 P 的总和

2.2 土壤磷的可淋洗性与土壤测试磷及磷组分的关系

图 1 为 96 个土样 15 次淋洗的各次淋洗的磷淋出量或累计磷淋出量与土壤测试磷、土壤磷组分之间的相关系数随淋洗次数的变化。结果表明, 相关系数大小与土壤磷测试方法和磷组分有关。7 种土壤测试磷均与单次淋洗磷的释放量、累计磷的释放

量呈正相关, 但相关系数大小有较大的变化, 由大至小依次为: 水溶性 P > KCl-P > CaCl₂-P > Olsen-P > Bray-P > Mehlich 1-P > Mehlich 3-P。而土壤磷的组分与土壤磷的淋出量的相关分析表明, 除残余态磷和 NaOH-OP 外, 其他形态的磷均与磷的淋出量存在显著的相关, 但土壤磷的淋出量与磷的组分的相关

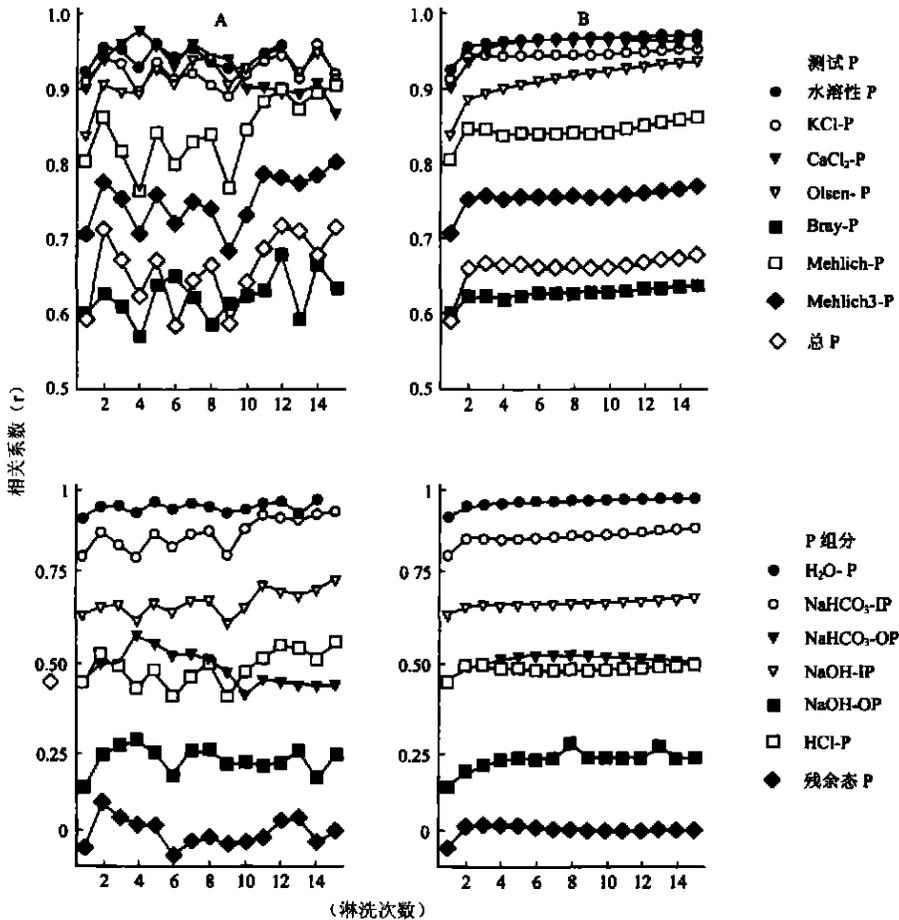


图 1 土壤测试磷、磷组分与淋洗过程中各次磷释放数量(A)及累计磷释放数量(B)之间的相关性(n= 96)

性随组分磷的活性(有效性)的降低而下降, 即: $H_2O-P > NaHCO_3-IP > NaOH-IP > NaHCO_3-OP > HCl-P > NaOH-OP >$ 残余态磷, 这表明淋出的磷主要来自活性较高的磷组分。

从单次淋洗的淋出磷量与土壤测试磷及土壤磷组分相关分析可知(图 1), 水溶性 P、 H_2O-P 、 $KCl-P$ 和 $CaCl_2-P$ 与单次淋洗磷的淋出量的相关系数随淋洗次数的增加保持不变或仅轻微下降, 表明淋洗产生的磷只是这些提取磷的一部分。而 Olsen-P、Bray-P、Mehlich-P、Mehlich3-P、 $NaHCO_3-IP$ 、 $NaOH-IP$ 及 $HCl-P$ 与单次淋洗磷的淋出量的相关系数随淋洗次数的增加而呈轻微的增加, 表明土壤中松结合态或易溶性磷(可溶态磷)先释放; 而弱溶性磷释放较慢, 但它们随时间释放逐渐明显。

根据土壤累计磷淋洗量与淋洗次数的关系模型 $Y = Y_0 + k \ln X$, 式中 X 为淋洗次数; Y 为第 X 次淋洗的累计磷释放量 ($mg \cdot kg^{-1}$); Y_0 为第 1 次淋洗的磷淋出量 ($mg \cdot kg^{-1}$), k 为土壤磷释放的相对速率常数 ($mg \cdot kg^{-1}$)。计算的 96 个土样的相对速率常数为 $0.098 \sim 11.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有很大的变化。相关分析表明, 淋洗过程中磷释放的相对速率常数与大部分土壤测试磷和磷组分呈显著相关(表 3), 其中水溶性磷、

$KCl-P$ 、 $CaCl_2-P$ 、Olsen-P、Mehlich-P、 H_2O-P 、 $NaHCO_3-IP$ 与 k 值的相关性达到很高的水平(表 3)。表明这些测试磷和磷组分可很好地量测供试砂土磷释放的潜力, 这些组分磷是土壤中可移动性磷的主要来源。

表 3 相对速率常数与土壤测试磷、土壤磷组分的相关性($n=96$)¹⁾

测试 P	r	P 组分	r
总 P	0.671***	H_2O-P	0.973***
Olsen-P	0.943***	$NaHCO_3-IP$	0.885***
Mehlich-P	0.850***	$NaHCO_3-OP$	0.509***
水溶性 P	0.966***	$NaOH-IP$	0.678***
0.02M $KCl-P$	0.944***	$NaOH-OP$	0.227*
0.01M $CaCl_2-P$	0.963***	$HCl-P$	0.478***
Bray-P	0.633***	残余态 P	-0.001
Mehlich3-P	0.761***		

*、**、***: 分别达到 $p < 0.05$ 、 < 0.01 和 < 0.0001 的显著水平

1) IP: 无机 P; OP: 有机 P; TP: 有机 P 和无机 P 的总和

虽然以上 7 种土壤测试磷均与土壤磷的淋出量呈显著相关, 但它们在反映土壤磷可淋洗性精度方面有较大的差异。其中水溶性磷、 $KCl-P$ 、 $CaCl_2-P$ 和 Olsen-P 等 4 种土壤测试磷可较精确地反映土壤磷的可淋洗性。图 2 表明, 水溶性磷、 $KCl-P$ 、 $CaCl_2-P$ 和

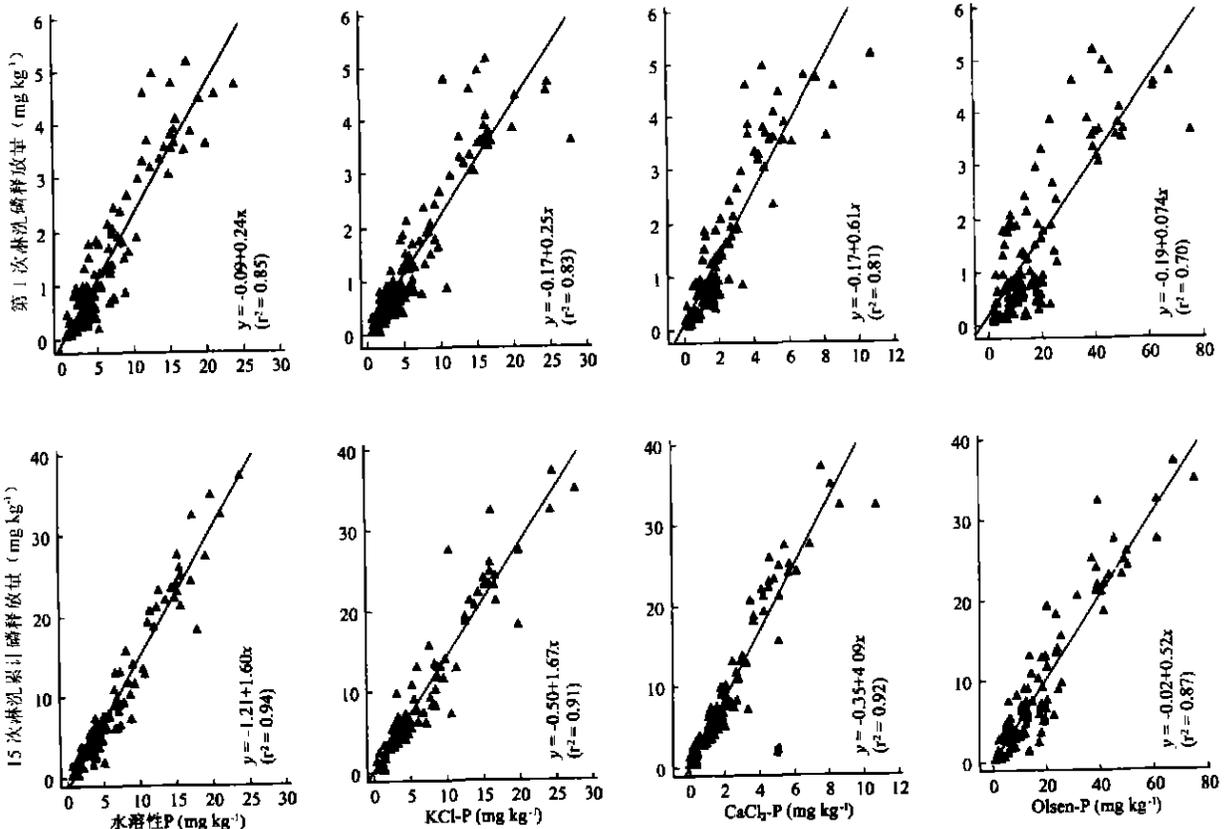


图 2 土壤磷的淋洗量与土壤测试磷的线性关系($n=96$)

Olson-P 等 4 种提取方法可分别解释 85%、83%、81% 和 70% 的第 1 次淋洗磷淋出量的变异及 94%、91%、92% 和 87% 的 15 次总磷淋出量的变异。而其他 3 种提取方法仅分别解释了小于 64% 和 74% 以下的第 1 次和 15 次累计磷淋出量的变异。从图 1 和图 2 还可以看出, 测试土壤磷预测土壤累计磷释放量的精度高于预测第 1 次磷淋出量的精度。这可能是从土壤中最先(第 1 次)淋出的磷是测试磷中与土壤结合最松散、最易释放的部分磷, 只占这些提取磷的小部分。

参 考 文 献

- [1] Zhang G L, Yang J L, Zhao Y G. Nutrient discharges from a typical watershed in the hilly area of subtropical China. *Pedosphere*, 2003, 13:23~ 30
- [2] Sharpley A, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29:176~ 181
- [3] Sims J T, Edwards A C, Schoumans O F, *et al.* Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29:60~ 71
- [4] Pote D H, Daniel T C, Sharpley A N, *et al.* Relating extractable soil phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60:855~ 859
- [5] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, *et al.* Relationship between phosphorus level in three unitsoils and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.*, 1999, 28:170~ 175
- [6] Wood B H, Wood C W, Yoo K H, *et al.* Seasonal surface runoff losses of nutrients and metals from soils fertilized with broiler litter and commercial fertilizer. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29:105~ 110
- [7] Zhang M K, Jiang H, Liu X M. Phosphorus concentration and forms in surface and subsurface drainage water from wetland rice fields in the Shaoxing plain. *Pedosphere*, 2003, 13:239~ 248
- [8] Yang J L, Zhang G L. Quantitative relationship between land use and phosphorus discharge in subtropical hilly regions of China. *Pedosphere*, 2003, 13:67~ 74
- [9] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, *et al.* Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29:130~ 144
- [10] Morel C, Tunney H, Plent D, *et al.* Transfer of phosphorus ions between soil and solution: perspectives in soil testing. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29:50~ 59
- [11] Pautler M C, Sims J T. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus, and phosphorus saturation in Delaware soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64:765~ 773
- [12] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24:904~ 910
- [13] Calvert D C. Nitrate, phosphate, and potassium movement into drainage lines under three soil management systems. *J. Environ. Qual.*, 1975, 4:183~ 186
- [14] Miller W P, Miller D M. A micro-pipette method for soil mechanical analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 1987, 18:1~ 15
- [15] Kuo K. Phosphorus. In: Sparks D L. *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. Wisconsin, USA: Soil Science Society of American, Inc. Madison, 1996. 869~ 919
- [16] Mehlich A. Mehlich No. 3 soil test extractant: A modification of Mehlich No. 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Soc. Plant Anal.*, 1984, 15:1409~ 1416
- [17] Hedley M J, Steward J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46:970~ 976
- [18] Greenberg A E. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington, DC., 1992