

畜禽粪便中磷释放运移特征

社会英,袁志华,常玉海,程波

(农业部环境保护科研监测所,农业部/天津市产地环境与农产品安全重点开放实验室,天津 300191)

摘要 随着畜禽粪便农田施用量的增加,畜禽粪便中磷流失也越来越引起人们的重视。采用取样分析和室内土柱模拟的方法,研究了猪粪和鸡粪中磷在水、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 和土体中的释放运移特点。结果表明,猪粪经 H_2O 和 NaHCO_3 连续提取后, H_2O 提取液中无机磷(P_i)占猪粪全磷(TP)的 21.58%, NaHCO_3 提取液中 P_i 占猪粪 TP 的 28.92%;鸡粪经 H_2O 和 NaHCO_3 连续提取后, H_2O 提取液中 P_i 占鸡粪 TP 的 18.09%, NaHCO_3 提取液中 P_i 占鸡粪 TP 的 17.88%;施用猪粪和鸡粪处理土柱淋溶液中水溶性总磷(TDP)、水溶性无机磷(DRP)和水溶性有机磷(DOP)浓度均随着淋溶次数的增加呈先上升后降低的趋势,施用猪粪处理磷释放速率比施用鸡粪处理快,大量施用猪粪和鸡粪后,0~30 cm 土体中土壤全磷(TP)和 0~60 cm 土体中土壤速效磷(Olsen-P)的含量显著增加。

关键词 畜禽粪便 磷释放 磷运移

中图分类号:X502 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)12-2363-05

The Character of Phosphorus Release and Movement in Livestock and Poultry Manure

DU Hui-ying, YUAN Zhi-hua, CHANG Yu-hai, CHENG Bo

(Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Production Environment Agro-product Safety of Ministry of Agriculture and Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Food Safety, Tianjin 300191, China)

Abstract Runoff of dissolved phosphorus in livestock and poultry manure is receiving more attention with the increasing of manure. Phosphorus release and movement of swine manure and chicken manure in the water, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ and soil were analyzed in this study. The results showed that dissolved inorganic phosphorus(P_i) accounted for 21.58% and 28.92% of swine manure in the H_2O and NaHCO_3 , dissolved inorganic phosphorus(P_i) accounted for 18.09% and 17.88% of chicken manure in the H_2O and NaHCO_3 . The content of total dissolved phosphorus(TDP), dissolved reactive phosphorus(DRP) and dissolved organic phosphorus(DOP) in leaching solution first increased and then decreased with the increase of leaching number. The release rate of phosphorus by swine manure was faster than that of chicken manure. The contents of total phosphorus(TP) in 0~30 cm soil and available phosphorus(Olsen-P) in 0~60 cm soil treated by swine and chicken manure were higher than that of no fertilizer significantly.

Keywords swine and chicken manure; phosphorus release; phosphorus movement

随着畜禽养殖业的迅猛发展,畜禽粪便也发挥着越来越重要的作用。磷是粪便中重要的营养元素,施用畜禽粪便引起农田磷素积累与流失,促进水体富营养已引起人们的广泛关注^[1-2]。畜禽粪便中有很大一部分磷为水溶性磷,这部分磷结合能较弱,易流失进入水体^[3]。Ajiboyede^[4]和 He^[5]在 2004 年先后研究证实,牛粪和猪粪中水溶态和 NaHCO_3 提取态磷为粪便中的

主要形态。Vadas^[6]通过土柱试验表明,牛粪中有 40% 左右的磷流失,猪粪中有 60% 左右的磷流失。Schwartz 等^[7]证实,随着牛粪施用量的增加,土壤中水溶性磷含量增加。

土壤磷素水平的提高是增加磷向水体释放量的重要前提,施肥是增加土壤磷水平的主要途径,而施肥对不同土层磷素影响的研究结果不一致。许多研究表明,施入土壤中的磷一般累积在土壤上层(0~30 cm)^[8-9],也有人认为长期施磷肥有利于磷在 50~80 cm 土层中的累积^[10]。Jager 等^[11]认为,长期施用有机肥(腐熟粪便)的土壤,土壤磷素淋溶明显增加。目前,我国有关农田施用畜禽粪便后磷在土壤中释放运移及其对

收稿日期 2010-03-11

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(农业部环境保护科研监测所)资助项目(2007-aepi-6)

作者简介:社会英(1977—),女,河北唐山人,博士,主要从事农业资源与环境方面研究工作。E-mail: zhuhuiying@tom.com

通讯作者:程波

淋溶液中磷影响的研究主要涉及 0~30 cm 的土层^[12-13], 而单施畜禽粪便对 30 cm 以下土壤中磷的释放运移特征及其淋溶液中磷含量的影响研究尚少。

为了了解畜禽粪便中磷的释放运移特征, 本文通过提取试验和土柱淋溶试验, 研究了猪粪和鸡粪经过 H₂O 和 NaHCO₃ 连续提取后提取液中磷的形态特征, 猪粪和鸡粪施入土壤后对深层土壤及其淋溶液中磷的影响, 以便指导田间安全施用畜禽粪肥。

1 材料与方法

1.1 畜禽粪便磷提取试验

(1) 样品采集

在江苏省盐城市盐都区、大丰市和阜宁县规模化养殖场(猪常年存栏量在 500 头左右, 鸡常年存栏量在 5 000 羽) 采集猪粪样品 16 个和鸡粪样品 18 个, 所有样品室内自然风干, 过 0.5 mm 筛备用。

(2) 磷的提取

畜禽粪便磷提取步骤参考 Dou 方法^[14]的 H₂O 和 NaHCO₃ 连续提取。称取 0.5 g 风干样品置于离心管中, 顺次分别用 50 mL 蒸馏水和 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 提取。样品每次振荡浸提 1 h, 然后离心 5 min, 离心后的提取液用孔径为 0.45 μm 滤膜过滤。

(3) 测定方法

粪便全磷(TP), 风干粪便样品经 H₂SO₄-HNO₃ 消煮, 钼钒黄比色法测定^[15]; 提取液中溶解性总磷(P_i), 经滤膜过滤后采用 K₂S₂O₈ 氧化, 钼蓝比色法测定^[16]; 提取液中溶解性无机磷(P_i), 经滤膜过滤后用钼蓝比色法直接测定^[16]。

1.2 土柱模拟磷释放试验

(1) 供试土壤及试验装置

土样采自江苏省盐城市水稻土, 按表层(0~10 cm)、中层(10~30 cm)和底层(30~60 cm)分层次采集,

分层混匀, 风干, 过 2 mm 筛备用, 其原状土 0~60 cm 土壤理化性状见表 1。

土柱外体由 PVC 管做成, 高 70 cm, 内径 10 cm, 管内壁均匀涂抹凡士林, 防止水沿管壁渗漏, 管底部用微孔塑料布封闭。根据各原状土层土壤容重、各土层的深度等确定各土层所需土量, 室内重建土柱。室内装土前, 先在管内装入 1 cm 厚的石英砂, 然后依次装入底层土样 30 cm 厚、中层土样 20 cm 厚, 表层 10 cm 厚的土壤与畜禽粪便混合后装入。

(2) 试验设计

从所采集的猪粪和鸡粪样品中各选典型样品 1 个(理化性状见表 2), 用于土柱模拟淋溶试验。

试验设对照、施猪粪和施鸡粪 3 个处理, 猪粪和鸡粪的施用量相同, 按照 30 t·hm⁻² 施用量折算。施用畜禽粪便时, 将其与土柱的表层全部土壤充分混匀后置于土柱的最上部。把装好的土柱置于水中, 用水饱和土壤, 平衡 36 h 后, 进行淋溶试验。根据研究地降雨量, 采用间歇淋溶的方法, 每隔 4 d 进行 1 次, 共进行 30 d, 每次收取淋溶液 250 mL, 共淋溶 7 次, 累积淋溶量为 1 750 mL。淋溶结束后, 每个土柱按表层(0~10 cm)、中层(10~30 cm)和底层(30~60 cm)取土, 试验每个处理重复 4 次。

(3) 测定方法

淋溶液中水溶性总磷(TDP), 吸取经过 0.45 μm 滤膜过滤的淋溶液, 用 K₂S₂O₈ 氧化-钼蓝比色法测定^[16]; 淋溶液中水溶性无机磷(DRP), 淋溶液过 0.45 μm 滤膜后, 直接钼蓝比色法测定^[16]; 淋溶液中水溶性有机磷(DOP)为水溶性总磷(TDP)和水溶性无机磷(DRP)的差值。

土壤全磷(TP), 土壤风干样品经 HClO₄-H₂SO₄ 消煮, 钼锑抗比色法测定^[15]; 土壤速效磷(Olsen-P), 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提, 钼锑抗比色测定^[15]。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the soil

土层/cm	质地	容重/g·cm ⁻³	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	孔隙度/%
0~10	粘壤土	1.25	19.81	1.74	1.01	54
10~30	粘壤土	1.31	9.12	1.08	0.74	41
30~60	粘壤土	1.43	7.06	0.30	0.45	38

表 2 供试猪粪和鸡粪理化性质

Table 2 The physical and chemical properties of experimental swine and chicken manure

项目	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/g·kg ⁻¹	水溶总磷/g·kg ⁻¹	含水量/%
猪粪	627.65	23.61	18.61	9.38	4.92	74.08
鸡粪	539.11	20.84	16.49	7.76	2.03	76.52

1.3 数据分析方法

试验数据用 Excel 和 SAS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 畜禽粪便中磷的释放

畜禽粪便经 H₂O 和 NaHCO₃ 连续提取后磷的释放如表 3 所示。猪粪水提取和水滤残渣 NaHCO₃ 提取液中 P_i 平均值分别为 3.51 g·kg⁻¹ 和 4.53 g·kg⁻¹ P_i 平均值分别为 4.14 g·kg⁻¹ 和 5.12 g·kg⁻¹ P_i 分别占猪粪 TP 的 21.58% 和 28.92% ; 鸡粪水提取和水滤残渣 NaHCO₃ 提取液中 P_i 平均值分别为 2.23 g·kg⁻¹ 和 1.79 g·kg⁻¹ P_i 平均值分别为 2.62 g·kg⁻¹ 和 2.06 g·kg⁻¹ P_i 分别占鸡粪 TP 的 18.09% 和 17.88%。猪粪和鸡粪在 H₂O 和 NaHCO₃ 提取液中 P_i 均是 P_i 的主要形态 P_i 占 P_i 的 68%~98%。猪粪在 H₂O 和 NaHCO₃ 提取液中 P_i 和 P_i 含量均显著高于鸡粪。

2.2 畜禽粪便施用对土壤淋溶液中磷含量的影响

对照处理淋溶液中磷未检测出,猪粪与鸡粪处理淋溶液中 TDP 变化见图 1。由于猪粪处理施磷量高于鸡粪处理施磷量,整个淋溶过程中,施用猪粪处理淋溶液中水溶性总磷(TDP_z)浓度显著高于鸡粪处理淋溶液中水溶性总磷(TDP_j)浓度,猪粪中磷较鸡粪中磷易于释放进入水体。从图 1 可以看出,猪粪处理磷释放速率较鸡粪处理快,在试验第 5 d 时淋溶液中 TDP_z

含量达到最高,之后淋溶液中 TDP_z 含量迅速下降,到 30 d 时施猪粪处理淋溶液中 TDP_z 浓度达到整个试验过程的最低值。施用鸡粪处理在试验第 10 d 时 TDP_j 含量达到峰值,然后随着淋溶次数的增加,淋溶液中 TDP_j 含量降低,到 30 d 时达到最低。

施用猪粪和鸡粪后,淋溶液中 DRP 和 DOP 含量变化趋势与 TDP 变化趋势相同,均呈现先升高后降低的趋势(图 2),施用同种粪便处理中,在同一次淋溶液中 DOP 浓度明显高于 DRP 含量。整个淋溶过程中,施猪粪处理淋溶液中无机磷含量介于 0.08~0.48 mg·L⁻¹ 之间,有机磷含量介于 0.10~0.60 mg·L⁻¹ 之间,施鸡粪处理淋溶液中无机磷浓度介于 0.03~0.32 mg·L⁻¹ 之间,有机磷浓度介于 0.08~0.39 mg·L⁻¹ 之间。

已有研究表明^[17],当土壤吸附磷的能力达到最大时,会加速磷剖面垂直运输。本研究畜禽粪便施用量 30 t·hm⁻²,施用量较高,试验进行初期,土体中的磷向下迁移,通过土壤裂隙使含磷物质进入淋溶液中,初期淋溶液中总磷浓度上升。施用畜禽粪便可增加土壤 中草酸、乳酸、柠檬酸等有机酸的含量,它们对土壤中难溶性磷酸盐的溶解有促进作用,又可以络合 Ca、Mg、Fe 等有机酸,减少 P 的固定,促进可溶性磷酸根向土壤深层移动^[18]。

2.3 畜禽粪便对不同土层中磷的影响

土柱模拟试验结果表明(图 3),当淋溶试验结束

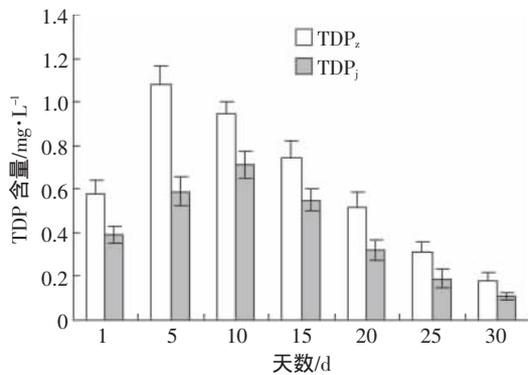


图 1 不同处理淋溶液中 TP 的变化

Figure 1 Variation of dissolved total phosphorus in different manure leaching

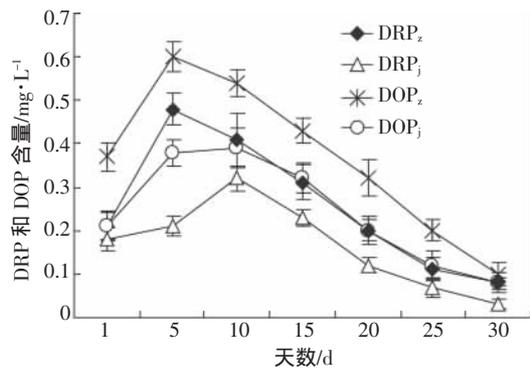


图 2 不同处理淋溶液中磷组分的变化

Figure 2 Variation of dissolved reactive phosphorus and dissolved organic phosphorus in different manure leaching

表 3 H₂O 和 NaHCO₃ 连续提取猪粪和鸡粪磷释放特征

Table 3 The character of phosphorus release through sequential extraction procedures of swine and chicken by H₂O and NaHCO₃

种类	H ₂ O 提取				残渣 NaHCO ₃ 提取			
	P _i /g·kg ⁻¹	P _i /g·kg ⁻¹	P _i /P _t (%)	P _i /TP(%)	P _i /g·kg ⁻¹	P _i /g·kg ⁻¹	P _i /P _t (%)	P _i /TP(%)
猪粪	3.51±0.31a	4.14±0.36a	85.13±1.42a	21.58±1.81a	4.53±0.42a	5.12±0.47a	87.89±1.55a	28.92±2.46a
鸡粪	2.23±0.29b	2.62±0.32b	84.81±2.78a	18.09±1.43a	1.79±0.11b	2.06±0.12b	86.91±1.36a	17.88±2.03b

注:同列中不同字母表示差异达 5% 显著水平。Different letters means significant at 5% level in the same column.

后,各处理中土壤 TP 含量均以 0~10 cm 土壤中为最高,10~30 cm 次之,30~60 cm 最低。施猪粪和鸡粪处理 0~10 cm 土层土壤 TP 含量中分别比对照增加了 38.24% 和 24.51%,施猪粪处理与施鸡粪处理土壤 TP 含量差异不显著。10~30 cm 土层施猪粪和鸡粪处理分别比对照增加了 26.39% 和 16.67%。30~60 cm 土层中,土壤 TP 含量在 3 个处理之间差异不显著。

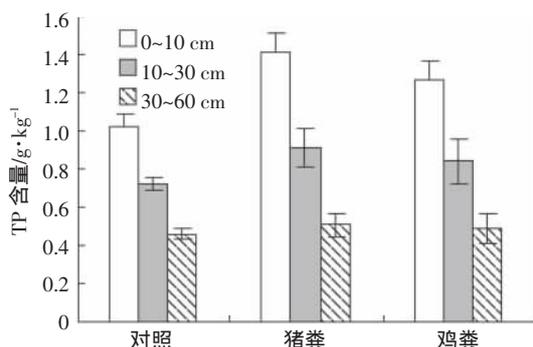


图3 不同处理对各土层中 TP 含量的影响

Figure 3 Effect of applied manure on total phosphorus in different layer of soil

由图 4 可知,施用猪粪和鸡粪处理各土层中土壤 Olsen-P 含量显著高于对照各土层中 Olsen-P 含量,施用猪粪和鸡粪对 30 cm 以下土层中 Olsen-P 含量影响显著。在 0~10 cm 土层中,猪粪处理土壤 Olsen-P 含量最高,比施鸡粪处理增加了 17.15%。施猪粪处理土壤 Olsen-P 含量是对照处理的 2.7 倍,施鸡粪处理土壤 Olsen-P 含量是对照处理的 2.3 倍;10~30 cm 土层中,施用猪粪和鸡粪处理土壤中 Olsen-P 含量分别是对照的 11.3 倍和 9.5 倍。Koopmans 等^[19]认为施用大量有机肥使得磷素在土壤剖面累积,Bulter 等^[20]对不同用量有机肥在土壤剖面上磷流失情况进行研究表明,施有机肥对 30 cm 以下土层中速效磷含量影响

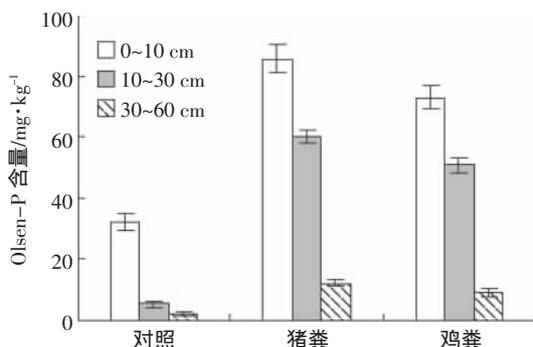


图4 不同处理对各土层中 Olsen-P 含量的影响

Figure 4 Effect of applied manure on Olsen-P in different layer of soil

十分显著。本研究中,30~60 cm 土层中土壤 Olsen-P 含量施猪粪处理是对照的 5.5 倍,施鸡粪处理 Olsen-P 含量是对照的 4.2 倍。

3 讨论

周全来等^[21]研究证实,水稻土施用无机磷肥后立即进行高强度淋洗,施磷对各处理淋出液的磷浓度没有明显影响,各形态的磷淋溶到 60 cm 土层以下的浓度不超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。张作新等^[13]认为,土壤对磷素的吸附能力是有限的,长期大量施用磷肥和腐熟鸡粪,就会降低土壤对磷的吸附量,施用无机磷肥的基础上增施腐熟鸡粪,土壤渗滤液中磷总量有所提高。庄远红等^[18]将无机磷肥(磷酸二氢钙)与腐熟猪粪以不同比例施入土壤,随着腐熟猪粪施入量的增加,TDP 和 DOP 的淋失量增高,且以 DOP 形式渗漏进入水体的 P 的数量增加。有机肥本身含有大量的有效磷,其分解的有机酸可以显著活化土壤磷,减少土壤对磷素的吸附^[22]。本试验一次施用高量猪粪和鸡粪($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),经过 7 次淋洗后,60 cm 土体淋溶液中水溶性总磷浓度均大于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水溶性有机磷浓度大于水溶性无机磷浓度,此结果与庄远红等研究结果一致,表明土壤施用高量畜禽粪便增加了磷的流失风险。

当土柱系统建立时,边际效应对土柱系统有一定影响。土柱边缘反射热量使得土柱内植物比真实情况长的茂盛,模拟土体和土柱壁间缝隙可能加速水分的下渗,引起土壤水分淋失的误差等。赵长盛^[23]研究表明,黄棕壤小土柱(直径 16 cm)与大土柱(直径 63 cm)相比,小土柱在灌溉水分输入与水分淋失量上均高于大土柱。本研究采用模拟土柱的直径较小(10 cm),为了防止土柱的边缘流动,降低土壤水分淋失的误差,在 PVC 管内壁涂凡士林用来防止水的流失,试验未种植作物,不存在作物因素的影响,因此在该直径条件下边际效应误差可忽略。

4 结论

畜禽粪便磷提取试验表明,猪粪和鸡粪在 H_2O 和 NaHCO_3 提取液中 P_i 占 P_t 的 68%~98%, H_2O 和 NaHCO_3 分别提取猪粪中全磷的 21.88% 和 28.92%,提取鸡粪全磷的 18.09% 和 17.88%;猪粪在 H_2O 和 NaHCO_3 提取液中提取出的溶解性无机磷和溶解性总磷含量均显著高于鸡粪。

土柱模拟试验表明,施用同一种畜禽粪便处理淋溶液中 TDP、DRP 和 DOP 含量随淋溶次数的增加变

化规律基本一致,施用猪粪后5 d淋溶液中磷含量最高,施用鸡粪后10 d淋溶液中磷含量最高,施用猪粪处理磷释放速率比施用鸡粪快。大量施用猪粪和鸡粪增强了磷向土壤深层(30~60 cm)迁移的能力,对30 cm以下土壤中 Olsen-P 含量影响显著。

模拟土柱内土壤的自然水分状况、孔隙度等不同田间土壤,本结论是在室内模拟小直径土柱条件下获得的,没有考虑到土柱直径大小和田间气候条件变化等的影响,因而有必要通过增大土柱直径和野外试验来进一步验证所得结论。

参考文献:

- [1] 周翠,章明奎,方利平. 粪肥对不同水平土壤磷流失潜力的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 706-708.
ZHOU Cui, ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping. Effects of organic manure application on P runoff from soils with different P levels[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 706-709.
- [2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计控制对策. 21世纪初中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in Early 21 Century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [3] Kleinman P J A, Wolf A M, Sharpley A N, et al. Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 701-708.
- [4] Ajiboye B, Akinremi O O, Racz G J. Laboratory characterization of phosphorus in fresh and oven-dried organic amendments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 1062-1069.
- [5] He Z Q, Timothy S, Griffin C, et al. Phosphorus distribution in dairy manures[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(4): 1528-1531.
- [6] Vadas P A. Distribution of phosphorus in manure slurry and its infiltration after application to soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35: 542-547.
- [7] Schwartz R C, Dao T H. Phosphorus extractability of soils amended with stockpiled and composted cattle manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 907-978.
- [8] Sharpley A N, Smith S J, Bain W R. Nitrogen phosphorus fate from long-term poultry litter applications to Oklahoma soils[J]. *Soil Sci Soc Am*, 1993(57): 1131-1137.
- [9] Knaflewski M, Malachowski A, Fiedorow Z. Effects of long-term application of different rates of fertilizers in an asparagus plantation on chemical properties of soil[J]. *Roczniki the Yield and Akademii Rolnicze, WPoznanin, Ogrodnictwo*, 1998(27): 145-149.
- [10] Sekulic P D. Changes of chemical soil properties under the effect of long-term application of mineral fertilizers[J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 1997, 3(6): 705-712.
- [11] Jager P, Claassens A. Long-term phosphorus desorption kinetic of an acid sand clay soil from south Africa[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36: 309-319.
- [12] 王涛,张维理,张怀志. 滇池流域人工模拟降雨条件下农田施用有机肥对磷素流失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1092-1097.
WANG Tao, ZHANG Wei-li, ZHANG Huai-zhi. Effects of swine manure application on P losses from different farmlands under simulated rainfall in Dianchi watershed of Yunnan Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1092-1097.
- [13] 张作新,刘建玲,廖文华,等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷渗漏影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 729-735.
ZHANG Zuo-xin, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, et al. The effect of phosphate fertilizer and manure on phosphorus leaching in different phosphorus levels soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 729-735.
- [14] Dou Z, Toth J D, Galligan D T. Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 508-514.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Analytical method of soil agricultural chemistry [M]. Third Edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of China. Water and wastewater monitoring analysis method [M]. Fourth Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] Schoumans O F, Groenend P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. *J Environ Qual*, 2000, 29: 111-116.
- [18] 庄远红,吴一群,李延. 有机无机磷肥配施对蔬菜地突然磷素淋失的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6): 905-909.
ZHUANG Yuan-hong, WU Yi-qun, LI Yan. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on phosphorus leaching in vegetable soils[J]. *Soil*, 2007, 39(6): 905-909.
- [19] Koopmans G F, Chardon W J, McDowell R W. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36: 305-315.
- [20] Bulter J S, Coale F J. Phosphorus leaching in manure-amended coastal plain soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 370-381.
- [21] 周全来,赵牧秋,鲁彩艳,等. 磷在稻田土壤中的淋溶和迁移模拟研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 734-739.
ZHOU Quan-lai, ZHAO Mu-qiu, LU Cai-yan, et al. Simulation of leaching and transport of P in paddy soil[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 734-739.
- [22] 王婷婷,王俊,赵牧秋,等. 有机肥对设施菜地土壤磷素累积及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 95-100.
WANG Ting-ting, WANG Jun, ZHAO Mu-qiu, et al. Effects of organic manure on phosphorus accumulating and its availability in a greenhouse soil in Shenyang Suburb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 95-100.
- [23] 赵长盛. 武汉城郊菜地土壤氮素的转化与淋失研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
ZHAO Chang-sheng. Studies on nitrogen transformation and leaching of vegetable soil in Wuhan Suburb, China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.