

不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析

严正娟, 陈 硕, 王敏锋, 宋梓玮, 贾 伟, 陈 清*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:我国规模化养殖业的快速发展导致动物粪肥数量急剧增加,合理利用畜禽粪肥中的大量磷素,不仅可节约磷矿资源,而且避免由于粪肥直接排放和农田过量施用所带来的水体面源污染问题。本研究结合调研工作,采集了52个典型养殖场的76个动物粪肥样品,采用Hedley磷分组方法,系统分析了不同粪肥中磷素含量及其组分特征,评价不同形态磷素在土壤中的移动性及其环境风险,为合理磷素管理提供参考。结果表明:不同动物粪肥的全磷含量差异很大,猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪的平均含量分别为22.5、13.7、12.9、9.6 g P·kg⁻¹和7.5 g P·kg⁻¹,其中粪肥中的有机磷占总磷的比例分别为33.1%、41.5%、66.4%、28.1%和36.8%。非反刍动物粪肥(猪粪、鸡粪、鸭粪)中全磷含量和有机磷含量分别为反刍动物粪肥(牛粪和羊粪)中全磷和有机磷含量的1.7~3.0倍和2.1~3.0倍,以鸡鸭粪肥中有机磷占全磷的比例最高;非反刍动物粪肥C/P比(19~29)明显低于反刍动物粪肥C/P比(38~45),其中的磷素更易矿化;依次采用H₂O、NaHCO₃、NaOH和HCl作为提取剂提取动物粪肥的磷素组分,反刍动物粪肥中H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P和残余态磷分别为总磷的27.8%、32.8%、18.1%、15.2%和6.1%;而非反刍动物粪肥中的各磷素组分的比例分别为24.6%、19.4%、12.7%、34.4%和8.9%;两者主要在NaHCO₃-P和HCl-P组分存在差异。综上所述,反刍动物粪肥中活性磷(H₂O-P和NaHCO₃-P)的比例更高,超过总磷的60%,而非反刍动物粪肥更易矿化分解的特征导致其可以很快释放活性磷,两者均具有很高的磷素有效性。因此,长期而言,在等粪肥磷投入情况下,两者的环境风险差异不大;而在等粪肥用量情况下,非反刍动物粪肥中更高的磷素含量会导致更高的环境风险。

关键词:动物粪肥;磷组分;反刍动物;非反刍动物;磷素移动性

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2015)01-0031-09 doi: 10.13254/j.jare.2014.0283

Characteristics and Availability of Different Forms of Phosphorus in Animal Manures

YAN Zheng-juan, CHEN Shuo, WANG Min-feng, SONG Zi-wei, JIA Wei, CHEN Qing*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The rapid development of intensive livestock industry has greatly increased the discharge of animal manure. Reasonable utilization of large amounts of phosphorus (P) in animal manure can not only save the fertilizer resource, but also avoid water pollution from manure due to direct discharge or excess application in farmland. In this study, P contents and fractionation in 76 animal manures were analyzed using Hedley P fractionation method based on the survey for 52 livestock farms, and P mobility and environmental risks in different manures were evaluated as the reference for manure P management. The results showed that there were significant differences in total P content of animal manures. The mean P contents were 22.5, 13.7, 12.9, 9.6 g P·kg⁻¹ and 7.5 g P·kg⁻¹, in which the proportion of organic P in total P were 33.1%, 41.5%, 66.4%, 28.1% and 36.8% in pig, chicken, duck, cattle and sheep manures, respectively. The contents of total and organic P in non-ruminant animal manure (pig, chicken and duck manures) were 1.7~3.0 times and 2.1~3.0 times greater than that in ruminant manure (cattle and sheep manures) and the proportion of organic P in total P in poultry manure was higher than that in other manures. P mineralization was easier in non-ruminant animal manure with lower C/P ratio (19~29), compared with that in ruminant manure with C/P ratio of 38~45. Manure P was sequentially extracted by deionized water (H₂O-P), NaHCO₃ (NaHCO₃-P), NaOH (NaOH-P) and HCl (HCl-P). The proportion of H₂O-P, NaHCO₃-P, NaOH-P, HCl-P and residual-P in total P in ruminant animal manure were 27.8%, 32.8%, 18.1%, 15.2% and 6.1%, respectively, while that were 24.6%, 19.4%, 12.7%, 34.4% and 8.9% in non-ruminant animal manure. The significant differences were in NaHCO₃-P and HCl-P between ruminant and non-ruminant animal manures. Ruminant manure had greater proportion of liable P

收稿日期:2014-10-18

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD14B04-2, 2012BAD15B01-4)

作者简介:严正娟(1985—),女,四川武武人,博士研究生,从事养分管理与有机废物资源化利用研究。E-mail: juanyz3749@163.com

*通信作者:陈清 E-mail: qchen@cau.edu.cn

($\text{H}_2\text{O-P}$ and $\text{NaHCO}_3\text{-P}$) in total P (>60%), but the characteristics of higher mineralization rate might result in fast release of liable P in non-ruminant animal manure. Both ruminant and non-ruminant animals have high availability of P in manures. Therefore, the contribution of long-term application non-ruminant animal manure to environmental risk is similar to application of ruminant animal manure with application of the same amount of P. However, due to the higher P content, the former may contribute to higher environmental risk, compared with latter based on application of the same amount of manure.

Keywords: animal manure; P fractions; ruminant animal; non-ruminant animal; P mobility

在过去 20 多年时间里,我国畜牧业得到了迅猛发展,规模化程度显著提高。2010 年我国生猪、肉牛、奶牛、羊、蛋鸡、肉鸡的规模化比率分别为 51%、23%、46%、22%、78% 和 85%^[1],已经从传统的副业发展为农业主导产业;与此同时,规模化养殖业的发展导致了大量粪肥的产生,其总量超过 768 百万 t(干重),含磷(P)量为 3.1 百万 t^[2]。畜牧业的快速发展和粪肥在农田中的施用改变了全球磷素循环,增加了对水体环境污染的风险。据全国第 1 次污染源普查公报数据显示农业源是总氮、总磷排放的主要来源,其排放量分别占排放总量的 57% 和 67%,其中畜禽养殖业的总氮和总磷排放分别占农业源的 38% 和 56%。粪肥施用于农田是磷素主要循环途径,长期连续大量施用粪肥所导致的磷素在土壤的累积及其对水体的污染问题已经成为全球关注的焦点。相对于化肥而言,在相同磷投入下,施用粪肥对活性态磷的累积贡献更大^[3-5],而当前农田土壤中,尤其是菜田土壤中磷素过量累积导致了极高的磷素损失风险。

粪肥中的磷素包括无机磷和有机磷,其中一部分可溶于水,另外部分可与矿物结合或与有机体和重金属形成复合体^[6]。不同的磷素形态对作物的有效性和环境影响不同。一般认为,无机磷能够直接被作物和水生生物利用,具有更高的作物有效性和环境风险性;然而近年来,有机磷在土壤有效磷供应和增加水体污染方面受到了更多的关注^[7-8]。有研究表明,水溶性有机磷是可以直接为作物所吸收利用的形态,即使是难溶于水的有机磷经矿化后可持续释放出无机磷,对作物生长也极为有利^[9]。在水生环境中,短期内无机磷是水生生物最容易利用的形态,是有效磷的主要组成,而有机磷则是长期的有效磷源^[10],对环境的影响不容忽视。许多研究指出了粪肥中有机磷的生物有效性^[11-13]。

影响粪肥中磷素形态的因素很多,主要包括粪肥种类、固液分离状况、清粪方式和处理方式等^[6]。其中粪肥种类是影响粪肥中磷素形态的一个关键因素,不同粪肥由于动物消化系统以及饲料构成的差异^[6,14],可

能导致磷的含量及其形态特征存在很大的差异,进而导致进入土壤和水体环境中后对磷素累积、转化和移动性的影响不同,影响生物利用和环境污染。采用土壤磷素分级方法研究有机物料中的磷素形态,有助于研究有机物料施入土壤后对土壤磷库和作物吸磷,以及环境风险的影响。Hedley 于 1982 年通过连续添加浸提剂,提出了一种新的土壤磷素分级方法,弥补了传统磷素分级方法不能及时反映土壤中磷素形态动态变化,以及不能兼顾无机磷和有机磷分组的不足,是目前公认的较为合理的磷素分级方法^[15],该方法及其改进的方法在土壤研究中得到了广泛的研究。国外研究者将该方法引入到了粪肥磷素的研究中,并得到了很好的应用^[16-17]。该方法将粪肥磷分为 5 组,依次采用 H_2O 、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 、 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 提取,每个组分中又分为无机态和有机态 2 个部分,最后用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮提取残余态磷。

探明粪肥中的磷素形态对于正确评价粪肥对作物的有效性及其环境效应,提出合理的粪肥管理策略,具有非常重要的意义。因此本研究基于对典型养殖场的调研,采用 Hedley 磷分组方法,系统收集不同粪肥样品进行分析,研究不同粪肥中磷素形态特征及其有效性,为粪肥的合理管理、降低环境污染,提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 典型养殖场粪肥采集与调研

2012 年 8 月,通过随机抽样选择对北京市 52 个规模化养殖场进行了粪肥样品采集。所调查的养殖场养殖规模分别为:猪 500~30 000 头,奶牛 200~3 700 头,肉牛 200~5 000 头,肉鸡 5 000~300 000 只,蛋鸡 3 000~3 000 000 只,羊 200~24 000 头。确定 52 个规模化养殖场数量,是按照中国畜牧年鉴 2011 年不同饲养规模水平,把北京市的畜禽养殖场进行分类,并计算出每种畜禽不同饲养规模下的畜禽粪肥量及相应的猪粪当量。在此基础上,依据占总粪肥量比重最小的畜禽粪肥量确定北京市畜禽养殖场调研总数,并

根据每种畜禽不同规模水平下粪肥的猪粪当量比例来确定其调研的养殖场数量。再按照随机抽样方法,确定每种畜禽不同规模水平下进行样品采集的具体养殖场。通过对北京市典型的23个猪场、7个奶牛场、4个肉牛场、3个肉鸡场、8个蛋鸡场、2个羊场和5个鸭场进行采样,共获取76个固体粪肥样品,包括48个猪粪、7个奶牛粪、4个肉牛粪、3个肉鸡粪、7个蛋鸡粪、2个羊粪和5个鸭粪。部分猪场分别获取了育肥猪、仔猪以及母猪的3种粪肥,而其他畜禽养殖场取了1个有代表性的粪肥混合样品。固体粪便的采集采用多点取样法,直接从畜舍不同位置采集新鲜样品,混合成1个有代表性1kg的样品。

1.2 样品处理与测定方法

将采集的样品带回实验室进行风干处理后,分别过2mm和1mm筛,置于封口袋中保存,备用。有机碳测定按照有机肥行业标准(NY 525—2002)进行,采用重铬酸钾容量法^[18]。粪肥磷分组采用修正的Hedley磷分级方法。称取0.3g过2mm筛的风干样品置于50mL离心管中,依次采用30mL去离子水(H₂O-P)、0.5mol·L⁻¹NaHCO₃(NaHCO₃-P)、0.1mol·L⁻¹NaOH(NaOH-P)和1mol·L⁻¹HCl(HCl-P)浸提。每一步加入浸提液后,震荡16h后(25℃,200r·min⁻¹),离心(18000g,10min,4℃),之后收集上层清液并过0.45μm滤膜^[13,16,19]。各部分提取中无机磷(Pi)含量的测定采用钼锑抗比色法测定,全磷(Pt)含量采用过硫酸铵氧化-钼锑抗比色法测定。有机磷(Po)的含量为全磷和无机磷的差值。HCl浸提后的土壤,采用浓H₂SO₄-H₂O₂消化-钼锑抗比色法测定获取残余态磷(Residual-P)。总无机磷含量为各部分无机磷的总和,总有机磷含量为各部分有机磷之和加上残余态磷。

1.3 数据处理

采用Excel 2011和Sigmaplot 10.0进行数据处理和图表制作。

2 结果与分析

2.1 全磷含量与C/P比

不同粪肥全磷含量存在较大差异,猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪中全磷的平均含量分别为22.5、13.7、12.9、9.6g P·kg⁻¹和7.5g P·kg⁻¹(图1)。总体而言,非反刍动物(猪、鸡和鸭)粪肥中磷的含量高于反刍动物(牛和羊),其中以猪粪中磷的含量最高,分别为鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪的1.6、1.8、2.4倍和3.0倍。这种趋势与饲料中磷的含量密切相关,一般非反刍动物饲料

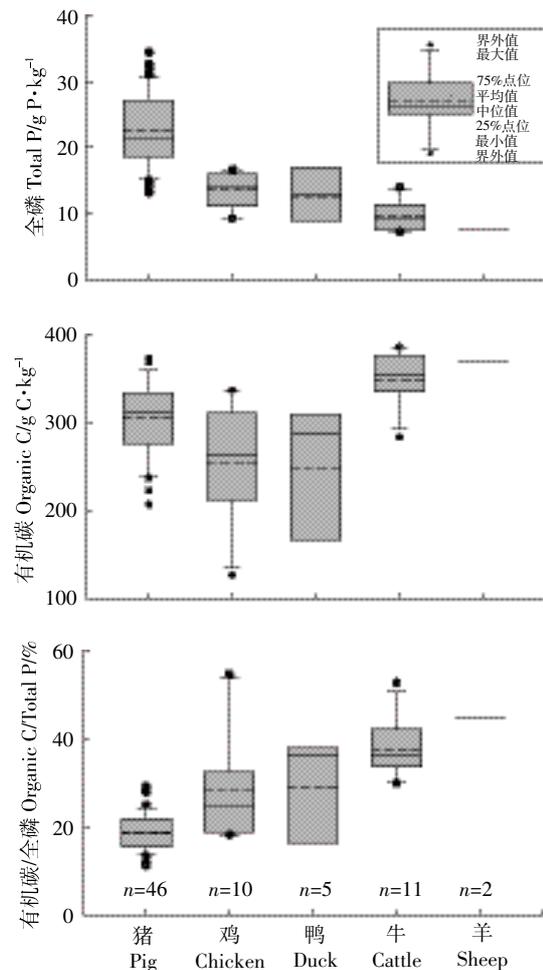


图1 不同动物粪肥中全磷含量及其碳/磷比值

Figure 1 Total P contents and C/P ratio in different animal manures

中磷的含量在4.0~8.0g P·kg⁻¹之间,而反刍动物饲料中磷的含量在2.0~4.0g P·kg⁻¹之间^[20-24]。同一动物粪肥中磷素含量存在很大的变异性,反映出了不同养殖场之间饲料配方的差异性,同时动物生长阶段、粪肥处理方式等也直接影响粪肥中磷素含量^[6]。同样不同粪肥中有机碳的含量也存在很大的差异,猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪中有机碳的平均含量分别为306、253、248、349g C·kg⁻¹和370g C·kg⁻¹。与全磷不同,有机碳的含量以反刍动物粪肥中较高,为非反刍动物粪肥中有机碳的含量的1.2~1.5倍。这可能与反刍动物饲料以秸秆等粗饲料为主,而非反刍动物饲料则以谷物为主有关。粪肥中较低的有机碳含量和高磷含量导致低C/P比,猪粪中C/P比平均仅为18.9,分别为牛粪和羊粪C/P比的50%和42%。

2.2 粪肥中磷素组分特征

2.2.1 有机磷和无机磷

猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪中无机磷的平均含

量分别为 15.2、8.2、4.7、6.9 g P·kg⁻¹ 和 4.8 g P·kg⁻¹ (图 2)。猪粪中无机磷含量最高, 为其他粪肥的 1.9~3.2 倍。猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪中有机磷的平均含量分别为 7.3、5.6、8.0、2.7 g P·kg⁻¹ 和 2.8 g P·kg⁻¹。非反刍动物粪肥中有机磷的含量较高, 为反刍动物粪肥中有机磷含量的 2.1~3.0 倍。总体而言, 粪肥中有机磷的比例较低, 其中鸭粪和鸡粪中有机磷占全磷的比例最高, 平均值超过了 40%, 猪粪和牛粪中有机磷占全磷的比例最低, 平均值分别为 33.1% 和 28.1%。粪肥中有机磷的含量及其在总磷中所占的比例与动物饲料结构以及消化系统密切相关。

2.2.2 磷素形态

水浸提磷(H₂O-P), 主要包括溶于水的无机磷, 也包括部分的有机磷, 是活性最强的磷素形态^[13, 19, 25]。不同粪肥中 H₂O-P 的平均含量为 1.8~4.9 g P·kg⁻¹, 占

到总磷含量的 22.8%~34.0%(图 3 和图 4)。其中猪粪和鸡粪中 H₂O-P 的含量最高, 平均值分别为 4.8 g P·kg⁻¹ 和 4.6 g P·kg⁻¹, 羊粪中 H₂O-P 的含量最低, 平均值为 1.8 g P·kg⁻¹; H₂O-P 占总磷的比例则以鸡粪和牛粪较高, 猪粪最低。采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 提取的磷(NaHCO₃-P)是被吸附在矿物表面的这部分磷, 无机磷部分对于作物吸收是有效的, 有机磷部分易于矿化, 短期内也能被植物利用, 是活性较强的磷素形态^[13, 19, 25]。猪粪中 NaHCO₃-P 的含量最高, 平均值达到

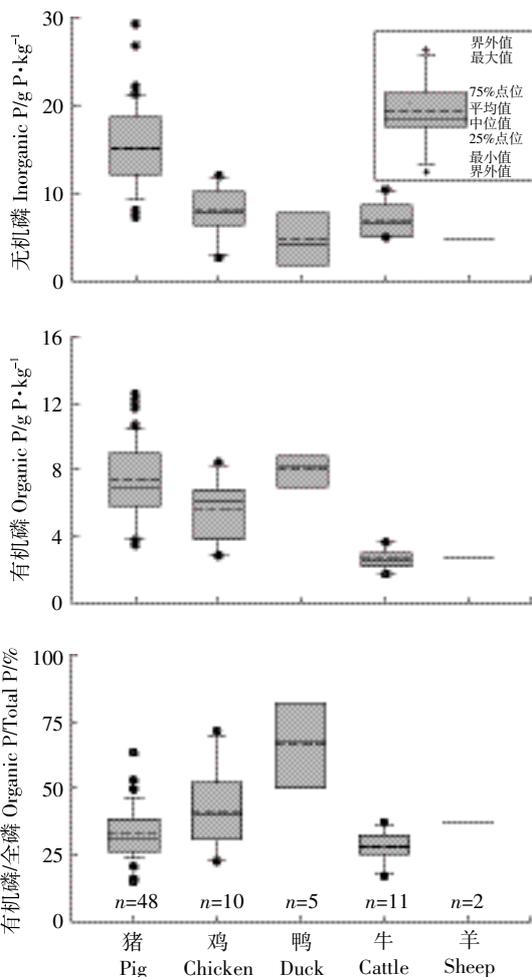


图 2 不同动物粪肥中有机磷和无机磷总量及其有机磷占全磷的比例

Figure 2 Contents of total organic and total inorganic P, and the proportion of total organic P in total P in different animal manures

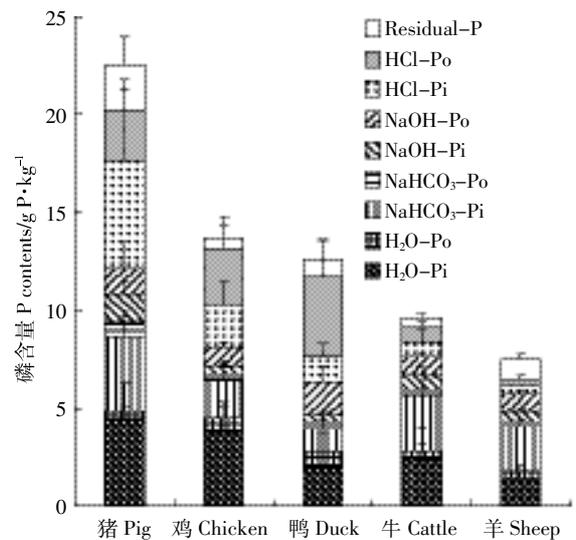


图 3 采用 Hedley 磷分组方法测定的不同动物粪肥各组分中磷的含量

Figure 3 Contents of P at different fractions in different animal manures measured by Hedley sequential P extraction method

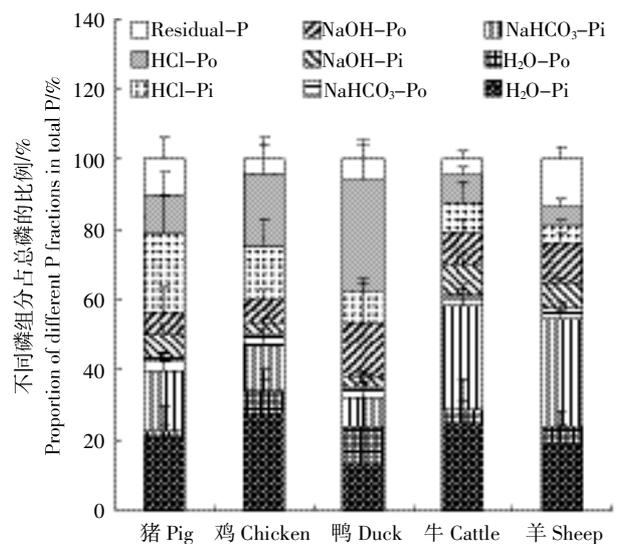


图 4 不同动物粪肥中不同磷素组分占总磷的比例

Figure 4 Proportion of different P fractions in total P in different animal manures

4.6 g P·kg⁻¹, 为其他动物粪肥 NaHCO₃-P 的含量的 1.5~3.0 倍。除去猪粪,其他粪肥中 NaHCO₃-P 的含量,表现为反刍动物粪肥(平均值 2.5~3.1 g P·kg⁻¹)高于非反刍动物粪肥(平均值 1.5~2.2 g P·kg⁻¹)。NaHCO₃-P 占总磷的比例也表现为反刍动物粪肥(平均值 32.8%)高于非反刍动物粪肥(平均值 19.4%)。H₂O-P 和 NaHCO₃-P 是植物和水生生物可利用,为不稳定态磷,其施入土壤后具有更高的因淋洗或径流引起富营养化的风险^[16]。猪粪中不稳定态磷的含量最高,平均值达到 9.5 g P·kg⁻¹,其次为鸡粪和牛粪,鸭粪和羊粪中最低。不稳定态磷占全磷的比例则表现为反刍动物粪肥(平均值 60.6%)高于非反刍动物粪肥(平均值 44.0%)。

采用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 提取的磷(NaOH-P),主要是以化学吸附作用吸附于铁铝氧化物,为中稳定态磷,且以有机磷的比例更高^[13,19,25]。NaOH-P 的含量及其在总磷中所占的比例较低。猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪中 NaOH-P 的平均含量分别为 2.7、1.3、2.1、1.7 g P·kg⁻¹ 和 1.4 g P·kg⁻¹,为粪肥中总磷含量的 12.8%、10.0%、18.0%、18.0%和 18.7%。

采用 1.0 mol·L⁻¹ HCl 提取的磷(HCl-P),是与钙结合形成的稳定矿物,为高稳定态磷,此部分磷含量及其比例以非反刍动物粪肥明显高于反刍动物。猪粪、鸡粪和鸭粪中 HCl-P 的平均含量分别为 8.1、5.0 g P·kg⁻¹ 和 5.4 g P·kg⁻¹,分别为总磷含量的 33.6%、35.7%和 40.8%;牛粪和羊粪中 HCl-P 的平均含量分别为 1.6 g P·kg⁻¹ 和 0.8 g P·kg⁻¹,分别为总磷含量的 16.1%和 10.5%。采用 H₄SO₂-H₂O₂ 消煮提取的残余态磷(Residual-P),为最稳定的有机磷部分^[13,19,25]。相对与其他组分,动物粪肥中 Residual-P 的含量及其占总磷的比例最低。猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪中 Residual-P 的平均含量分别为 2.3、0.6、0.9、0.5 g P·kg⁻¹ 和 1.0 g P·kg⁻¹,为粪肥中总磷含量的 10.2%、3.9%、6.0%、4.8%和 13.4%。

从磷组分分布的数据来看,非反刍动物中 HCl-P 占到了总磷的 40%左右,而反刍动物中 HCl-P 的含量低于总磷的 16%;但是反刍动物粪肥中不稳定态磷(H₂O-P 和 NaHCO₃-P)的含量约为总磷含量的 60%,高于非反刍动物(图 4)。从无机磷组分来看,非反刍动物粪肥中不稳定态磷无机磷的含量超过了无机磷总量的 50%,而反刍动物粪肥中超过 70%的无机磷为不稳定态磷;粪肥中 NaOH-Pi 占总无机磷比例较低,反刍动物为 12%,非反刍动物为 5%~10%;不同粪肥

中 HCl-Pi 占总无机磷比例差异很大,以猪粪中最高,占到总无机磷的 33.7%,其次为鸡鸭粪,而牛羊粪中 HCl-Pi 的含量仅为总无机磷的 8.8%~11.7%。从有机磷的组分来看,粪肥中不稳定态有机磷占总有机磷的比例差异不明显,在 18.5%~23.0%之间;NaOH-Po 占总有机磷的比例,反刍动物粪肥为 30.1%~32.7%,非反刍动物为 16.7%~21.2%;HCl-Po 占总有机磷的比例,反刍动物粪肥为 13.2%~27.8%,非反刍动物为 33.4%~50.4%;Residual-P 占总有机磷的比例则以猪粪和羊粪中最高超过了 30%,其他粪肥为 9.4%~16.7%。

3 讨论

3.1 粪肥中磷素含量及其影响因素

本研究中猪粪、鸡粪、牛粪、羊粪中全磷含量范围分别为 13.2~34.3、9.3~16.7、7.2~14.0 g P·kg⁻¹ 和 7.5~7.6 g P·kg⁻¹。Pagliari^[6]汇总不同研究中的结果表明,猪粪、鸡粪、牛粪、羊粪中全磷含量范围分别为 3.9~48.7、8.6~30.4、2.5~18.3 g P·kg⁻¹ 和 7.2~10.7 g P·kg⁻¹。由此可以看出,不同的研究中对粪肥中磷素含量的报道差异很大。但是总体规律是非反刍动物粪肥中磷素含量高于反刍动物^[13,16]。Pagliari 等^[13]的研究表明,非反刍动物粪肥全磷含量平均为 21.3 g P·kg⁻¹,是反刍动物(平均 7.1 g P·kg⁻¹)的 3 倍,非反刍动物粪肥无机磷含量比反刍动物粪肥高 3~5 倍,有机磷含量是反刍动物粪肥的 3.5 倍。本研究的结果也表明,非反刍动物粪肥中全磷的含量和有机磷含量分别为反刍动物粪肥中全磷和有机磷含量的 1.7~3.0 倍和 2.1~3.0 倍;然而除猪粪中无机磷的含量显著高于反刍动物粪肥中无机磷的含量外,鸡鸭粪中无机磷的含量与反刍动物相比,并没有较大的差异。就不同磷组分而言,本研究中的结果显示,反刍动物粪肥中 H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 和 Residual-P 分别占总磷的 28%、33%、18%、15%和 6%;非反刍动物粪肥中 H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 和 Residual-P 分别为总磷的 25%、19%、13%、34%和 9%。这一结果与 Pagliari 等^[13]的研究结果相似,其研究表明,反刍动物粪肥中 H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 和 Residual-P 分别占总磷的 36%、36%、13%、8%和 7%;非反刍动物粪肥中 H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 和 Residual-P 分别为总磷的 34%、17%、5%、41%和 3%。而 Dou 等^[16]的研究结果表明,牛粪中 H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 和 Residual-P 分别占总磷的 70%、14%、6%、

5%和5%;鸡粪中 H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 、 $NaOH-P$ 、 $HCl-P$ 和 $Residual-P$ 分别为总磷的 49%、19%、5%、25% 和 2%。

动物粪肥中磷的含量及其组分受多因素影响,包括动物种类、生长阶段、饲料构成、清粪方式和粪肥储藏方式等^[6,26]。动物种类不同,其饲料组成和消化能力存在很大的差异。饲料配方,一般包括粗饲料、能量饲料、蛋白质饲料、矿物质饲料、常规饲料添加剂 5 大类。一般对于牛羊等反刍动物,基本都采用上述 5 大类饲料^[27-28],对于鸡鸭饲料配方,基本不包括粗饲料^[29-31],以谷物为主,其中富含植酸,而与此同时鸡鸭等非反刍动物消化系统缺乏植酸酶导致对饲料中磷的消化和吸收效率偏低,排出的粪肥中磷含量较高^[14,32-33],且有机磷含量及其占全磷的比例相对高,而不稳定态磷在总磷中所占的比例低于反刍动物。尽管猪也是非反刍动物,但是其后肠能够消化植酸^[34],进而导致了相对低的有机磷/全磷比。一些研究也报道了通过改变饲料组成改变粪肥中磷素含量和组成。低植酸含量玉米粒饲喂的猪产生的粪肥比饲喂传统玉米粒的猪粪肥含磷量低,含磷量分别为 $20\text{ g P}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $34\text{ g P}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[35];饲料中添加铁铝比钙更易降低奶牛粪肥中磷的溶解性^[36]。不同的动物生长阶段影响粪肥中磷的含量,以猪为例,本研究的结果显示不同生长期猪所排出的粪肥中磷的含量为:母猪>肥猪>仔猪(数据未给出)。同一种动物粪肥中,非常大的变异性反应出了不同养殖场中饲料配方的差异。粪肥的固体和液体部分中磷含量也存在很大的差别。Pagliari 等^[13]的研究表明,猪粪中液体部分磷的含量是固体部分的 2 倍。不同清粪方式下产生的废水含磷量也不同,水泡粪的废水含磷量是干清粪下的废水含磷量的 3 倍。此外,不同的采样方式也影响粪肥中磷含量及其组分,本研究中的粪肥样品均为直接从畜舍采集的新鲜样品,而已有的报道中的一些分析样品为储藏一段时间后的样品,不同的储藏方式和时间均可能影响粪肥中磷的含量和组分。

3.2 粪肥中磷素形态及其农学和环境效应

粪肥中含有丰富的磷素养分,且以无机磷为主,进入土壤溶液后,能够被作物直接吸收利用。Steven-son^[37]的研究结果表明,施入土壤的有机物料的 C/P 比,影响有机磷的矿化,净固定和矿化发生的 C/P 比分别为大于 300 和小于 200。而粪肥中 C/P 比一般都低于 50,因此施入土壤后粪肥的有机磷部分也极易矿化释放。并且,粪肥中磷不稳定态磷 (H_2O-P+

$NaHCO_3-P$)的组分超过了总磷的 40%,反刍动物更超过 60%的磷组分为不稳定态磷,具有很高的活性。而即便是高稳定性的 $HCl-P$,在有充分水分的情况,也能溶于水^[13]。Studnicka 等^[38]的研究表明,粪肥和水的比例由 1:100 增加到 1:1 000,显著提高了水溶性的比例。就目前我国而言,大约 1/3 的粪肥磷进入了设施菜地中^[39],而大水漫灌是目前使用的主要灌溉方式,每次灌溉量为 60~70 mm^[40],每季灌水总量大约为 1 000 mm^[41],这种灌溉方式无疑会进一步促进粪肥中磷的溶解。最近的一些研究已经表明,相比与化肥而言,粪肥磷具有同等甚至更高的作物有效性^[42-44]。因此,粪肥可以被作为主要的磷源,部分或者完全取代化肥磷。而对于不同粪肥而言,由于其磷含量和组分的差异,因此在粪肥施用策略方面应有所不同。非反刍动物粪肥中磷的含量为反刍动物粪肥中磷含量的 1.7~3.0 倍,因此在施用量上应该有所不同。在等量粪肥磷投入情况下,反刍动物粪肥中不稳定态磷的比例更高,在施用初期可能具有更高的有效性,但是非反刍动物粪肥更易矿化分解的特征导致其可以很快释放活性磷。尽管就作物生长的整个生育期而言,粪肥磷和化肥磷的有效性差不多,但是有研究指出粪肥施用后的前一个月其有效性低于化肥磷^[45],而这种效应在非反刍动物粪肥施用后的一个月,可能表现更明显。因此,在等量粪肥磷投入情况下,相对于反刍动物粪肥,非反刍动物粪肥的施用,更需要注意作物生长前期的根层调控,以提高磷的有效性。

动物粪肥含有巨大的磷素资源,如能合理循环利用,将节约大量的化肥资源;然而粪肥直接排放和不合理的农田施用所引起的磷素环境问题已成为目前亟待解决的问题。许多研究已经表明了粪肥施用在土壤磷素累积的作用^[46-48]。相同磷投入下,相对于化肥而言,粪肥对于磷的累积,尤其是活性态磷的累积贡献更大^[3-5]。Li 等^[49]的研究表明,粪肥投入导致的土壤 Olsen-P 增量为相等磷投入量化肥的 3 倍。大量磷的累积导致了极大的磷素损失风险。农田生态系统中,磷的损失包括淋洗和地表损失(土壤侵蚀和地表径流)两大类,据报道一般淋洗的损失仅占总损失的 10%,但是通过淋洗损失的磷素形态主要为可溶性磷,水生生物更容易利用^[50],因此,这部分磷一旦进入水体其环境风险更大。在高磷固定土壤上,与无机磷相比,有机磷被土壤无机矿物的固定程度低,在土壤中具有更大的移动性,是土壤剖面磷素运移的主要形态^[51-53],这种差别在低磷固定(高饱和度)土壤中减

小^[54]。NaHCO₃-P 和 H₂O-P 为不稳定态磷,容易通过淋洗等途径损失^[17,55]。反刍动物粪肥中含有更高的不稳定态磷,因此施入土壤后具有非常高的通过径流和淋洗损失风险。而非反刍动物粪肥中更高的有机磷含量,可能促进有机磷在土壤剖面的移动;同时极易矿化分解的特征导致其可以很快释放活性磷。因此,长期而言,在等粪肥磷投入情况下,两者的环境风险差异不大;而在等粪肥用量情况下,非反刍动物粪肥中更高的磷素含量会导致更高的环境风险。

4 结论

(1)不同粪肥全磷含量存在较大差异,猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪和羊粪的平均含量分别为 22.5、13.7、12.9、9.6 g P·kg⁻¹ 和 7.5 g P·kg⁻¹,其中有机磷占总磷的比例分别为 33.1%、41.5%、66.4%、28.1%和 36.8%。非反刍动物粪肥中全磷的含量和有机磷含量分别为反刍动物粪肥中全磷和有机磷含量的 1.7~3.0 倍和 2.1~3.0 倍,鸡鸭粪中有机磷占全磷的比例较高。

(2)非反刍动物粪肥 C/P 比(19~29)明显低于反刍动物粪肥 C/P 比(38~45),磷素更易矿化。

(3)反刍动物粪便中 H₂O-P、NaHCO₃-P、NaOH-P、HCl-P 和残余态磷分别为总磷的 27.8%、32.8%、18.1%、15.2%和 6.1%;而非反刍动物粪肥中的各磷素组分的比例分别为 24.6%、19.4%、12.7%、34.4%和 8.9%;两者主要在 NaHCO₃-P 和 HCl-P 组分存在差异。

(4)综上所述,反刍动物粪肥中活性磷(H₂O-P 和 NaHCO₃-P)的比例更高,超过总磷的 60%,而非反刍动物粪肥更易矿化分解的特征导致其可以很快释放活性磷,两者均具有很高的磷素有效性。因此,长期而言,在等粪肥磷投入情况下,两者的环境风险差异不大;而在等粪肥用量情况下,非反刍动物粪肥中更高的磷素含量会导致更高的环境风险。

参考文献:

- [1] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 中国畜牧业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 176-185.
China Animal Industry Yearbook Editorial Board. China animal industry yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 176-185.(in Chinese)
- [2] 贾 伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 31.
JIA Wei. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 31.(in Chinese)
- [3] Damodar Reddy D, Subba Rao A, Rupa T R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a vertisol[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(2): 113-118.
- [4] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, et al. Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(1-2): 58-66.
- [5] Liu J L, Liao W H, Zhang Z X, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on crop yield, soil P accumulation, and the environmental risk assessment[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1107-1114.
- [6] Pagliari P H. Variety and solubility of phosphorus forms in animal manure and their effects on soil test phosphorus[M]// He Z Q, Zhang H L. Applied manure and nutrient chemistry for sustainable agriculture and environment, Springer, 2014: 141-161.
- [7] Condon L M, Turner B L, Cade-Menun B J. The chemistry and dynamics of soil organic phosphorus[M]// Sims J T, Sharpley A N. Phosphorus: agriculture and the environment. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA. 2005: 87-121.
- [8] Giles C D, Cade-Menun B J. Phytate in animal manure and soils: abundance, cycling and bioavailability[M]// He Z Q, Zhang H L. Applied manure and nutrient chemistry for sustainable agriculture and environment, Springer, 2014: 163-190.
- [9] 向万胜, 黄 敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 663-670.
XIANG Wan-sheng, HUANG Min, LI Xue-yuan. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10(6): 663-670.(in Chinese)
- [10] Sharpley A N, Smith S, Jones O, et al. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21(1): 30-35.
- [11] Vanderzee C, Roelvros N, Chou L. Phosphorus speciation, transformation and retention in the Scheldt estuary (Belgium/The Netherlands) from the freshwater tidal limits to the North Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 106(1-2): 76-91.
- [12] Waldrip H M, He Z, Griffin T S. Effects of organic dairy manure on soil phosphatase activity, available soil phosphorus, and growth of sorghum-sudangrass[J]. *Soil Science*, 2012, 177(11): 629-637.
- [13] Pagliari P H, Laboski C A M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(3): 901-910.
- [14] Ajiboye B, Akinremi O O, Hu Y, et al. Phosphorus speciation of sequential extracts of organic amendments using nuclear magnetic resonance and X-ray absorption near-edge structure spectroscopies[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(6): 1563-1576.
- [15] Hedley M, Stewart J, Chauhan B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 970-976.
- [16] Dou Z, Galligan D, Ramberg C, et al. Laboratory procedures for charac-

- terizing manure phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(2): 508–514.
- [17] Moyer B, Sharpley A. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(5): 1462–1469.
- [18] 中华人民共和国农业部. NY 525—2012 中华人民共和国农业行业标准 有机肥料[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
Ministry of Agriculture of the PRC. NY 525—2012 Agriculture industry standard: organic fertilizers[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.(in Chinese)
- [19] He Z Q, Senwo Z N, Mankolo R N, et al. Phosphorus fractions in poultry litter characterized by sequential fractionation coupled with phosphatase hydrolysis[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2006, 4(1): 304–312.
- [20] 佟建明, 萨仁娜, 张琪. 饲料配方手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 130–144.
TONG Jian-ming, SA Ren-na, ZHANG Qi. Manual of feed formula[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 130–144.(in Chinese)
- [21] 崔富春, 郭晓红, 刘青. 鸡鸭鹅饲料的配制[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2005: 32–43.
CUI Fu-chun, GUO Xiao-hong, LIU Qing. Formulation of poultry feed [M]. Beijing: China Social Press, 2005: 32–43.(in Chinese)
- [22] 刁其玉, 张学炜, 高腾云. 科学自配牛饲料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 30–31.
DIAO Qi-yu, ZHANG Xue-wei, GAO Teng-yun. Scientific formulation of cattle feed[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 30–31.(in Chinese)
- [23] 熊本海, 张宏福. 国内外畜禽饲养标准与饲料成分表[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010: 40–67.
XIONG Ben-hai, ZHANG Hong-fu. Feeding standards and feed composition tables of animal in domestic and overseas[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010: 40–67.(in Chinese)
- [24] 张文远, 杨保平. 肉羊饲料科学配制与应用[M]. 北京: 金盾出版社, 2013: 146–155.
ZHANG Wen-yuan, YANG Bao-ping. Formulation and application of sheep feed[M]. Beijing: Jindun Publishing House, 2013: 146–155.(in Chinese)
- [25] Hedley M, Stewart J, Chauhan B. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5): 970–976.
- [26] 伍喜林, 杨凤, 郭春华. 调控饲料营养减少畜禽排泄物对环境的污染[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 187–189.
WU Xi-lin, YANG Feng, GUO Chun-hua. The ways of lowering animal environmental pollution through feed nutritional manipulations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 11(3): 187–189.(in Chinese)
- [27] 孙国强, 王世成. 简明养牛手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 75–92.
SUN Guo-qiang, WANG Shi-cheng. Concise manual of feeding cattle [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 75–92.(in Chinese)
- [28] 张英杰. 简明养羊手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 64–69.
ZHANG Ying-jie. Concise manual of feeding sheep[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 64–69.(in Chinese)
- [29] 唐辉, 杜立新. 简明蛋鸡饲养手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 105–118.
TANG Hui, LIN Li-xin. Concise manual of feeding layer[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 105–118.(in Chinese)
- [30] 杨全明, 刁有祥. 简明肉鸡饲养手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 31–40.
YANG Quan-ming, DIAO You-xiang. Concise manual of feeding broiler[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 31–40.(in Chinese)
- [31] 岳永生. 简明养鸭手册[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 125–145.
YUE Yong-sheng. Concise manual of feeding duck[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 125–145.(in Chinese)
- [32] Wodzinski R J, Ulla A H J. Phytase[J]. *Advances in Applied Microbiology*, 1996, 42: 263–303.
- [33] Leytem A B, Maguire R O. Environmental implications of inositol phosphates in animal manure[M]// Turner B L, Richardson A E, Mullaney E J. Inositol phosphates: linking agriculture and the environment. Oxfordshire, CAB International, 2007: 150–168.
- [34] Leytem A B, Thacker P A. Fecal phosphorus excretion and characterization from swine fed diets containing a variety of cereal grains[J]. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 2008, 7(2): 113–120.
- [35] Wienhold B J, Miller P S. Phosphorus fractionation in manure from swine fed traditional and low-phytate corn diets[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(1): 389–393.
- [36] Kalbasi M, Karthikeyan K G. Phosphorus dynamic in soils receiving chemically treated dairy manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2296–2305.
- [37] Stevenson F J. Cycles of soil-carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrient[M]. New York. US: Wiley Press, 1986.
- [38] Studnicka J S, Bundy L G, Andraski T W, et al. Measuring water-extractable phosphorus in manures to predict phosphorus concentrations in runoff[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(9): 1071–1084.
- [39] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42: 982–998.
- [40] Ren T, Christie P, Wang J G, et al. Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(1): 25–33.
- [41] Zhu J H, Li X L, Christie P, et al. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1–4): 70–80.
- [42] Robbins C W, Freeborn L L, Westermann D T. Organic phosphorus source effects on calcareous soil phosphorus and organic carbon [J].

- Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(3): 973–978.
- [43] Sikora L J, Enkiri N K. Comparison of phosphorus uptake from poultry litter compost with triple superphosphate in Codorus soil[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 668–673.
- [44] Zvomuya F, Helgason B L, Larney F J, et al. Predicting phosphorus availability from soil-applied composted and non-composted cattle feedlot manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(3): 928–937.
- [45] Loria E R, Sawyer J E. Extractable soil phosphorus and inorganic nitrogen following application of raw and anaerobically digested swine manure[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 879–885.
- [46] Sharpley A N, Smith S, Bain W. Nitrogen and phosphorus fate from long-term poultry litter applications to Oklahoma soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1131–1137.
- [47] Sims J, Edwards A, Schoumans O, et al. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 60–71.
- [48] Delgado A, Scalenghe R. Aspects of phosphorus transfer from soils in Europe[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4): 552–575.
- [49] Li H, Huang G, Meng Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: a review[J]. *Plant Soil*, 2011, 349(1–2): 157–167.
- [50] Andersson H, Bergström L, Djodjic F, et al. Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from four agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(2): 455–463.
- [51] Tate K R. The biological transformation of P in soil[J]. *Plant Soil*, 1984, 76: 245–256.
- [52] Greaves J, Hobbs P. Prospects for the recovery of phosphorus from animal manures: a review[J]. *Environmental Technology*, 1999, 20(7): 37–41.
- [53] Anderson B H, Magdoff F R. Relative movement and soil fixation of soluble organic and inorganic phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(6): 2228–2233.
- [54] Lehmann J, Lan Z, Hyland C, et al. Long-term dynamics of phosphorus forms and retention in manure-amended soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(17): 6672–6680.
- [55] Ojwhmi A, Ige D, Hao X Y. Phosphorus mobility in soil with long term manure application[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 3(3): 25–38.