

刘 洋, 吴 田, 彭正萍, 等. 褐土区露天菜地和粮田磷素形态及环境风险分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 299–302.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.067

褐土区露天菜地和粮田磷素形态及环境风险分析

刘 洋¹, 吴 田², 彭正萍¹, 王艳群¹, 李迎春³, 门明新¹, 张家铜⁴

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院/河北省粮田生态环境重点实验室, 河北保定 071001; 2. 中国土地勘测规划院, 北京 100081;
3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 河北省保定市环境监控中心, 河北保定 071000)

摘要:为明晰菜地和粮田土壤磷库, 分类合理指导磷肥施用, 减少环境污染, 以北京市、河南省、河北省的露天菜地及相邻粮田为研究对象, 采用石灰性土壤无机磷形态分级方法, 研究不同褐土区菜地与粮田土壤中磷素空间分布、形态变化及其可能引起的环境风险。结果表明, 不同褐土区菜地土壤磷素含量总体大于粮田。相同地区 0~20 cm 土层中磷素含量均大于 20~40 cm 土层。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最易被作物吸收但土壤含量较少, 占土壤无机磷积累量的 3.81%~8.68%; Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 也是土壤中磷素的主要来源, 它们基本均匀分布, 分别占土壤无机磷积累量的 32.82%~37.95%、16.65%~17.14%、27.26%~29.94%; $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 O-P 的含量较少, 分别占土壤无机磷积累量的 4.97%~6.51%、6.45%~7.81%。长期施用磷肥的土壤会导致磷素在土壤中累积, 多余的磷会进入地下水或地表水体, 造成水体污染。因此, 建议各地区菜地和粮田分类采用测土配方施磷肥方法, 以降低土壤磷素环境风险。

关键词: 菜地; 粮田; 磷素; 形态分级; 环境风险

中图分类号: S153.6; S158.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0299-03

磷是植物生长必需的营养元素之一, 土壤中磷只有在营养均衡的状态下才能保证作物正常生长, 不合理施用磷肥会引起环境风险、破坏土壤营养结构和导致水体发生富营养化等。我国耕地面积占全球耕地面积的 7%, 自 2013 年起, 我国 1 hm^2 耕地上的施肥量约是世界平均施肥量的 4 倍, 总面积施肥量约超过世界水平的 35%, 化学磷肥(P_2O_5)施用量高达 2 590 kg/hm^2 , 而磷肥的当季利用率一般只有 10%~25%。长期施用磷肥会导致磷素在土壤中累积, 过量磷素残存导致土壤长期处于富磷状态, 多余的磷会造成水体污染^[1]。

磷在土壤中的存在形态很多, 无机磷形态不同其有效性存在较大差异。国内学者采用顾益初等确定的石灰性土壤无机磷分级方法^[2]在不同土壤类型的磷素组成、不同形态磷的生物有效性、磷肥在不同土壤中的化学行为等方面做了较多研究。土壤无机磷含量一般占全磷含量的 50%~80%, 在我国北方石灰性土壤无机磷中, Ca-P 是主要成分; 华北平原不同褐土区土壤中 Ca-P 平均含量较高, 占土壤中无机磷总量的 80% 左右, 其中以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 较多, 占土壤中无机磷含量的 70% 左右; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 O-P 所占比例相近, 大约都占无机磷总量的 10%; 含量最少的是 $\text{Ca}_2\text{-P}$, 大约占无机磷整体含量的 1%; Al-P 和 Fe-P 所占比例接近, 为 4%~5%^[3-5]。磷素耗竭试验证明, 生物的有效磷源是不稳定形态磷, 其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 最容易被作物吸收, 为最有效磷源, Al-P 和 Fe-P 是不同

土壤中的次要有效磷源, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 会让 O-P 难以在短时间内被植物和土壤利用^[4-5]。

磷素积累是目前我国大部分粮田和菜地土壤存在的共同特征^[6], 摸清菜地和粮田土壤磷库, 明确其磷素空间分布和不同形态, 分析其对环境存在的风险, 对分类合理指导磷肥施用、减少环境污染有重要意义。因此, 本研究采用实地调查取样分析的研究方法, 对不同地区褐土类型的菜地及相邻粮田磷的空间分布特征、耕层磷的各种存在形态及其对环境可能造成的风险等进行研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和研究方法

本研究选取褐土土类中的主要亚类潮褐土、石灰性褐土、淋溶褐土、褐土性土为研究对象, 根据主要褐土亚类在各区域中分布面积较大且具有代表性, 同一区域有多个褐土亚类的原则进行分别选点。2016 年 10 月在北京、河南、河北地区进行选点调查和取样, 3 个省(市)共设 27 个样区, 其中北京市设 5 个样区, 包括延庆县 2 个、丰台区 1 个、大兴区 1 个、房山区 1 个; 河南省设 9 个样区, 包括伊川县 2 个、嵩县 1 个、栾川县 2 个、卢氏县 1 个、陕州区 1 个、洛宁县 1 个、辉县 1 个; 河北省设 13 个样区, 包括高阳县 1 个、易县 7 个、顺平县 1 个、曲阳县 3 个、清苑县 1 个。每个样区中均包括 1 个露天菜地区 and 1 个相邻粮田区(小麦/玉米轮作或者大田作物单作), 按照“S”形路线在每个地块均匀随机确定 5 个采样点, 每个采样点采集 0~20、20~40 cm 土层土壤, 将取好的样品装入塑料袋带回实验室, 自然风干后磨细过 0.25 mm 筛, 待测定。各样区在取土的同时, 调查农民传统施用磷肥状况, 包括磷肥品种和施肥量。

1.2 测定项目及方法

0~20 cm 土层土壤样品采用顾益初等提出来的石灰性

收稿日期: 2018-06-18

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2016YFD0800105-4); 河北省科技计划(编号: 17226914D); 河北省教育厅百名优秀创新人才计划(编号: 201703020235)。

作者简介: 刘 洋(1994—), 女, 河北阜平人, 硕士, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: 1293216720@qq.com。

通信作者: 门明新, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源利用及土壤改良技术研究。E-mail: menmingxin@sina.com。

土壤无机磷形态分级的方法^[2,7-8]进行磷形态分级,Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P 分别采用 0.25 mol/L Na₂CO₃、0.50 mol/L CH₃COONH₄、0.50 mol/L NH₄F、0.10 mol/L NaOH、0.05 mol/L (Na₂CO₃)、0.30 mol/L 柠檬酸钠溶液浸提。同时,在 0~20、20~40 cm 土层土壤样品风干后,采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法^[9]测定全磷含量。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2003 进行数据的分析、处理和作图。

2 结果与分析

2.1 不同褐土区土壤中全磷含量的空间分布特征

由表 1 可知,0~20 cm 土层,露天菜地及其相邻粮田土

壤全磷含量分别为 1.89~2.87、1.52~2.56 g/kg,平均值分别为 2.37、1.90 g/kg,变异系数分别为 20.7%、30.3%;露天菜地的平均全磷含量较相邻粮田高 24.74%。20~40 cm 土层,菜地及其相邻粮田土壤全磷含量分别 1.28~2.29、1.03~1.93 g/kg,平均值分别为 1.63、1.36 g/kg,变异系数分别为 34.9%、36.4%;露天菜地的平均全磷含量较相邻粮田高 19.85%。0~40 cm 土层土壤露天菜地变异系数较小。

所有区域 0~20 cm 与 20~40 cm 土层全磷平均含量相比,菜地提高幅度 25.3%~76.7%,平均增加 45.4%;粮田增加 32.6%~47.6%,平均提升 39.71%;菜地提升幅度大于粮田。0~20、20~40 cm 土层的菜地全磷含量较粮田分别增加 12.1%~46.0%、18.7%~24.3%。

表 1 褐土区土壤全磷含量

| 地块类型 | 土壤深度 (cm) | 土壤全磷含量(g/kg) | | | | 变异系数 (%) |
|------|--------------|--------------|------|------|------|-------------|
| | | 北京市 | 河南省 | 河北省 | 平均值 | |
| 菜地 | 0~20 | 2.87 | 2.35 | 1.89 | 2.37 | 20.7 |
| | 20~40 | 2.29 | 1.33 | 1.28 | 1.63 | 34.9 |
| 粮田 | 0~20 | 2.56 | 1.61 | 1.52 | 1.90 | 30.3 |
| | 20~40 | 1.93 | 1.12 | 1.03 | 1.36 | 36.4 |

2.2 不同褐土区土壤磷素形态分布

由表 2 可知,不同形态磷素在 0~20 cm 土层中平均含量从大到小的顺序为 Al-P>Ca₈-P>Fe-P>Ca₂-P>O-P>Ca₁₀-P。据研究,Ca₂-P 和 Al-P 是最易被土壤转化供给植物生长的,当取样点土壤中 Al-P 与 Ca₂-P 含量较高时,对作物的生长有促进作用,可以有效提高菜地与粮田作物产量。

北京地区的菜地与相邻粮田相比,Ca₂-P、Ca₈-P 含量分别增加 445.72%、88.48%,Al-P、Fe-P 含量分别提高 32.27%、64.66%,O-P、Ca₁₀-P 含量分别提升 30.55%、13.24%,这与菜地土壤全磷含量高于粮田有关。土壤中不同形态磷含量大小顺序分别为菜地:Ca₈-P>Al-P>Ca₂-P>Fe-P>O-P>Ca₁₀-P;相邻粮田:Al-P>Ca₈-P>Fe-P>O-P>Ca₁₀-P>Ca₂-P。北京市菜地中 Ca₈-P 与 Al-P 含

量较高,作物生长状况良好,粮田中 Ca₂-P 含量非常低,建议适量施用磷肥、有机肥等来调节该类土壤有效含磷状况,确保作物产量正常。

河南地区的菜地与相邻粮田相比,Ca₂-P、Ca₈-P 含量分别增加 198.45%、92.11%,Al-P、Fe-P 含量分别提升 55.10%、27.96%,O-P、Ca₁₀-P 含量分别提高 23.10%、32.96%。土壤中的磷元素含量大小依次为菜地:Al-P>Ca₈-P>Fe-P>Ca₂-P>Ca₁₀-P>O-P;相邻粮田:Al-P>Ca₈-P>Fe-P>Ca₁₀-P>O-P>Ca₂-P。粮田土壤中的 Ca₂-P 含量很低。河南省粮田中 Ca₂-P 含量与北京市粮田含量都很低,需要施用磷肥或者有机肥进行土壤磷素含量调节。

表 2 不同褐土区 0~20 cm 土壤不同无机磷形态含量

| 磷形态 | 地点 | 无机磷含量(mg/kg) | | 磷形态 | 地点 | 无机磷含量(mg/kg) | |
|--------------------|-----|--------------|--------|---------------------|-----|--------------|--------|
| | | 菜地 | 粮田 | | | 菜地 | 粮田 |
| Ca ₂ -P | 北京市 | 128.79 | 23.60 | Fe-P | 北京市 | 126.23 | 76.66 |
| | 河南省 | 78.91 | 26.44 | | 河南省 | 189.54 | 148.12 |
| | 河北省 | 60.32 | 18.74 | | 河北省 | 213.64 | 75.99 |
| Ca ₈ -P | 北京市 | 366.01 | 194.19 | O-P | 北京市 | 85.22 | 65.28 |
| | 河南省 | 322.67 | 167.96 | | 河南省 | 48.01 | 39.00 |
| | 河北省 | 236.36 | 130.23 | | 河北省 | 66.06 | 36.75 |
| Al-P | 北京市 | 323.85 | 244.84 | Ca ₁₀ -P | 北京市 | 47.04 | 41.54 |
| | 河南省 | 386.30 | 249.06 | | 河南省 | 55.14 | 41.47 |
| | 河北省 | 303.87 | 191.54 | | 河北省 | 51.23 | 34.52 |

河北地区的菜地与相邻粮田相比,Ca₂-P、Ca₈-P 含量分别增加 221.88%、81.49%,Al-P、Fe-P 含量分别提升 58.65%、181.14%,O-P、Ca₁₀-P 含量分别提高 79.76%、48.41%。土壤中的磷元素含量大小依次为菜地:Al-P>Ca₈-P>Fe-P>O-P>Ca₂-P>Ca₁₀-P;相邻粮田:Al-P>

Ca₈-P>Fe-P>O-P>Ca₁₀-P>Ca₂-P。Al-P 与 Ca₈-P 含量均大于其他磷素含量,Ca₂-P 作为最易被吸收的磷素形态,应根据实际情况作出适当调整,以保持作物产量的稳定。

2.3 褐土区露天菜地和粮田土壤的磷素状况对比

由表 3 可知,褐土区菜地与粮田相比,Ca₂-P、Ca₈-P、

Al - P、Fe - P、O - P、Ca₁₀ - P 含量分别增加 289.62%、87.87%、47.94%、76.01%、41.31%、30.53%。菜地 Ca₂ - P、Ca₈ - P 含量分别占土壤无机磷积累量的 8.68%、29.94%，Al - P、Fe - P 含量分别占土壤无机磷积累量的 32.82%、17.14%，O - P、Ca₁₀ - P 含量分别占土壤无机磷积累量的 6.45%、4.97%；Ca₂ - P、Ca₈ - P、Al - P、Fe - P、O - P、Ca₁₀ - P 含量占土壤全磷的 2.13% ~ 14.08%。粮田 Ca₂ - P、Ca₈ -

P 含量分别占土壤无机磷积累量的 3.81%、27.26%，Al - P、Fe - P 含量分别占土壤无机磷积累量的 37.95%、16.65%，O - P、Ca₁₀ - P 含量分别占土壤无机磷积累量的 7.81%、6.51%；Ca₂ - P、Ca₈ - P、Al - P、Fe - P、O - P、Ca₁₀ - P 含量占土壤全磷含量的 1.21% ~ 12.03%，说明菜地的各种形态磷含量均高于粮田。

表 3 褐土区土壤磷素状况

| 褐土区 | 不同形态磷素含量 (mg/kg) | | | | | | 无机磷积累量 (mg/kg) | 全磷 (mg/kg) |
|-----|---------------------|---------------------|--------|--------|-------|----------------------|-------------------|---------------|
| | Ca ₂ - P | Ca ₈ - P | Al - P | Fe - P | O - P | Ca ₁₀ - P | | |
| 菜地 | 89.34 | 308.35 | 338.01 | 176.47 | 66.43 | 51.14 | 1 029.74 | 2 400.00 |
| 粮田 | 22.93 | 164.13 | 228.48 | 100.26 | 47.01 | 39.18 | 601.99 | 1 900.00 |

2.4 不同褐土区的磷肥施用及其环境风险分析

据实地调查,98%的菜地在施用化肥的同时配施有机肥,所有粮田只施用化肥。将各区域菜地和粮田上一季的有机肥和无机肥施用量按照养分含量转化为纯 P₂O₅ 的用量(表 4)。同一地区露天菜地施肥量远多于相邻粮田,与粮田相比,菜地

P₂O₅ 施用量北京市增加 152.94%、河南省增加 302.22%、河北省增加 15.20%。菜地磷肥用量明显高于粮田这是造成菜地无机磷含量远高于粮田的主要原因,造成淋溶程度更大,环境风险更严重^[10]。各区域由于种植的目标作物类型、施肥种类和习惯不同,造成采样区土壤磷素含量存在差异^[11]。

表 4 不同褐土区施磷量情况调查

| 地点 | 样点数 (个) | 地块类型 | 磷肥 | P ₂ O ₅ 施用量 (kg/hm ²) |
|-----|------------|------|---------------|--|
| 北京市 | 5 | 菜地 | 复合肥、有机肥 | 215 |
| | | 粮田 | 复合肥、磷酸二铵、磷酸一铵 | 85 |
| 河南省 | 9 | 菜地 | 复合肥、有机肥 | 362 |
| | | 粮田 | 复合肥、磷酸二铵 | 90 |
| 河北省 | 13 | 菜地 | 复合肥、有机肥 | 144 |
| | | 粮田 | 复合肥、磷酸二铵、磷酸一铵 | 125 |

近些年来,磷肥对水体环境的影响备受关注。磷含量超过 0.02 mg/kg 时,水体就会发生富营养化^[12]。过量、长时期施用有机肥和不正确存放肥料都会引起地表土壤和地下水的严重污染^[13-15]。土壤中的磷素有 2 个转化的过程,即沉淀 - 溶解和吸附 - 解吸,土壤含磷量低时,以第 2 种过程为主,土壤含磷量高时,以第 1 个过程为主。磷肥的当季利用率一般是 10% ~ 25%,农民为了提高产量,大面积、长时间、高频率地施用磷肥,导致磷素会以不同形态在土壤中累积^[16],这是表层土壤磷素富集的主要原因之一。表层土壤中的磷素含量长时间较高时,会加快向深层土壤转移速度,同时提升水体磷素含量增加的风险。

3 讨论与结论

本研究分析了北京市、河南省、河北省不同村庄菜地与粮田土壤磷素状况及环境风险。菜地土壤中磷素含量总体比相邻粮田高,不同地区土壤的无机磷组成存在差异。0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 cm 土层磷素含量相比,磷素含量较高,相同地区菜地土壤的磷素含量总体大于粮田。其原因是菜地施肥量远高于粮田,磷肥通过植物的根系作用和地下径流被从地表带入地下,造成地下水的污染。

土壤中磷素含量富集会增加环境风险。不同褐土区菜地土壤磷素含量高于粮田。菜地长时间大量施用磷肥,会使磷肥大量积累,通过降水或者灌溉会造成磷素向下淋洗,并通过

地表径流进入水体导致污染。因此,不同褐土区土壤磷素高度积累使土壤环境面对巨大风险,尤其是菜田存在的风险更大。长期大量施入磷肥会污染土壤和地下水^[17],也会导致土壤重金属积累,磷肥的生产原料是磷矿石,磷矿石中不仅含有钙磷酸盐矿物,还存在杂质。镉在我国磷矿中含量为 0.1 ~ 2.9 mg/kg^[18],磷肥的施用会增加进入土壤的镉^[19-20]。

Ca₂ - P 最易被植物吸收利用,但在土壤中含量很低;Al - P、Fe - P 和 Ca₈ - P 的利用率高,能有效促进农作物生长;Ca₁₀ - P 和 O - P 的含量较少,对于农作物影响不大。本研究表明,菜地磷肥积累量远高于粮田,这与施有机肥较多有关,菜地施肥时应把握有机肥的施用量,做到有机、无机合理配施。粮田可适度增加有机肥和磷肥的施用量,提高有效磷素含量和利用率。也可以通过其他措施促进土壤中磷的转化,提高 Ca₂ - P、Al - P 含量,提高磷肥利用率,从而有效提高农作物产量,减少环境风险。

参考文献:

- [1] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤,2000,32(4):188 - 193.
- [2] 顾益初,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤学报,1990,22(2):101 - 102.
- [3] 袁玲,杨邦俊,郑兰君,等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1997,3(4):300 - 306.

庄娟,单群,张子峰,等. BDE-47 对小鼠肝肾和脑氧化应激及炎症反应的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):302-306.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.068

BDE-47 对小鼠肝肾和脑氧化应激及炎症反应的影响

庄娟¹,单群²,张子峰²,徐建明¹,郑元林²

(1. 淮阴师范学院生命科学学院/江苏省环洪泽湖生态农业生物技术重点实验室/江苏省高校区域现代农业与环境保护协同创新中心,江苏淮安 223300; 2. 江苏师范大学生命科学学院/江苏省药用植物生物技术重点实验室,江苏徐州 221116)

摘要:主要探讨了持续性有机环境污染物 2,2',4,4'-四溴联苯醚(2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether, BDE-47)对小鼠肝肾和脑组织氧化应激及炎症反应的毒性效应。将 C57BL/6J 小鼠分为 4 组,即对照组小鼠灌胃玉米油,低剂量组、中剂量组和高剂量组为对小鼠分别灌胃 10、20、40 mg/kg BDE-47,每天处理 1 次,4、6、8 周后称肝肾和脑组织湿质量并计算脏器系数,测定染毒 8 周后的小鼠肝肾和脑组织活性氧水平及炎症因子 IL-6 和 TNF- α 的表达情况。结果发现,BDE-47 可造成肝脏脏器系数增大,肾脏和脑脏器系数减小,BDE-47 可促进肝肾和脑组织活性氧堆积,炎症因子 IL-6 和 TNF- α 表达增强,这可能是造成这些组织损伤的重要机制。

关键词:BDE-47; 肝脏; 肾脏; 脑; 脏器系数; 氧化应激; 炎症反应; 基因表达

中图分类号: X174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0302-05

多溴联苯醚(polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)是一类重要的溴代阻燃物,广泛应用于电子设备、纺织品、塑料及建筑装潢材料中。PBDEs 具有高脂溶性,降解周期长,生物蓄积性强,是一类潜在的持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)^[1]。因为 PBDEs 与载体之间以非化学键相

连,因此在使用和处置过程中, PBDEs 会从产品中释放到环境介质中^[2],可通过饮食、吸入和皮肤接触进入机体^[3-4]。PBDEs 含有 209 种同源物,其中 BDE-47 分布最广,在环境和人体样本中都有较高的检测水平^[5-6]。毒理学研究发现,较其他 PBDEs, BDE-47 在体内代谢周期长,生物蓄积性更强^[7],因此 BDE-47 的毒作用及毒性机制受到越来越多的关注。笔者之前的研究发现,BDE-47 可造成肝肾和脑组织损伤^[8-10],但具体的机制尚不清楚。

脏器系数是毒理学试验评价外源化学物对动物脏器受损的一项常用指标^[8,11],氧化应激和炎症反应是造成组织损伤的重要机制^[12-13],本试验采用 10、20、40 mg/kg BDE-47 对小鼠进行灌胃染毒,探究 BDE-47 对小鼠肝肾和脑组织脏器系数、氧化状态和炎症反应的影响。

收稿日期:2018-07-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:81171012、81570531、31200873);江苏高校品牌专业建设工程(编号:PPZY2015A018);江苏省高校自然科学基金(编号:18KJB330001)。

作者简介:庄娟(1977—),女,江苏南通人,博士,讲师,主要从事环境毒理研究。E-mail:dajiangsky@163.com。

通信作者:郑元林,博士,教授,主要从事抗衰老的分子生物学机制研究。E-mail:zhengyl@jnsu.edu.cn。

[4]王淑英,胡克林,路苹,等. 北京平谷区土壤有效磷的空间变异特征及其环境风险评价[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1290-1298.

[5]王永刚. 我国北方土壤速效磷测定值与植物吸收的相关性研究[D]. 临汾:山西师范大学,2010.

[6]臧玲. 不同磷饱和度土壤中胶体态磷迁移特征及其对磷素流失潜能的影响[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[7]蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷有效性的研究[J]. 土壤学报,1992,24(2):61-64.

[8]沈仁芳,蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. 土壤学报,1992,29(1):80-86.

[9]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.

[10]周艺敏. 小仓宽典. 半干旱地区菜园土壤特征及持续利用[J]. 植物营养与肥料学报,1997,5(4):315-322.

[11]张水铭,马杏法,汪祖强. 农田排水中磷素对苏南太湖水系的污染[J]. 环境科学,1993,14(6):24-29.

[12]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,2004,37(7):1008-1017.

[13]Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 277-293.

[14]Haden V, Ketterings Q M, Kahabka J E. Factors affecting change in soil test phosphorus following manure and fertilizer application[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1225-1232.

[15]刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3596-3605.

[16]卢静,孙宁,夏建新,等. 中国环境风险现状及发展趋势分析[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(1): 10-16.

[17]展晓莹,任意,张淑香,等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4728-4737.

[18]冀宏杰,张怀志,张维理,等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 13(1): 1-8.

[19]Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 125(2): 95-101.

[20]张小明,曾宪楠,孙羽. 磷素对大豆生长发育影响的研究进展[J]. 大豆科学, 2016, 35(1): 176-180.