长期施肥条件下土壤磷素的研究进展^①

宋春^{1,2}, 韩晓增^{1*}

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 施用磷(P)肥是提高农作物生产的重要措施。P肥施入土壤后易与土壤组分反应生成难溶的、对植物有效性低的化合物,因此P是土壤肥力管理中的一个重要方面。本文综述了国内外长期施肥条件下农田土壤P素的利用与积累状况、土壤P素形态转化及生物有效性的研究概况、长期施肥对土壤P素吸附与解吸的影响以及土壤P素流失的研究现状,并提出了目前在长期施肥条件下土壤P素的研究中存在的一些问题以及今后研究的热点。

关键词: 长期施肥; 磷素; 进展

中图分类号: S158.5; S141; S143.2

磷(P)是植物生长发育必需的三大营养元素之一,植物体所需的P主要是从土壤P库和P肥中获得。P肥施入土壤后容易被土壤固定形成难以被植物利用的形态,当季利用率低,为了维持农业的高产,势必每年向土壤中投入大量的P肥。但长期施肥造成P素在土壤中大量积累,从而给环境带来一系列问题,农田生态系统中P的流失已成为水体富营养化的重要影响因素,因此研究长期施肥条件下土壤P素的肥力特征及界面迁移意义重大。本文基于此目的,综述了国内外长期施肥条件下土壤P素的研究进展,并提出了目前在长期施肥条件下土壤P素研究中存在的一些问题以及今后研究的热点,以期今后这方面的研究提供参考。

1 土壤磷的来源、含量及磷肥施用现状

含P化肥未被应用于农业以前,土壤中可被植物利用的P主要来自地壳表层的风化释放以及成土过程中P在土壤上层的生物富集。地壳中P的平均含量约为1.2 g/kg^[1],而大多数土壤的含P量则远远低于此数,世界土壤全P含量的变幅在0.2~5 g/kg,我国土壤中的全P含量在0.2~1.1 g/kg范围内^[2]。

农业中化肥的应用可在很大程度上改变农田土壤的含P量和土壤对作物的供P能力。由于长期施用P肥,一些农业发达国家耕层土壤中的P有相当部分来自肥料P的积累。Cooke^[3]估计,英国自1850年以来

的130余年中投入农业中的P总量约为1180万t,以致英国农田耕层土壤中的P有1/3~1/2是施用P肥而积累起来的。日本自明治维新以来施入农田的P累计已达每公顷1.6 t,土壤中来自肥料积累的P平均可达440 mg/kg^[4]。这类农田土壤有着巨大的供P潜力,一些施用P肥有悠久历史的欧洲和北美国家已很难找到大片缺P的农田土壤,农业中P肥的施用已大抵进入补偿性或维持性施P时期。

中国农业中普遍施用含P化肥的历史已有三四十年,且P肥施用量逐渐增加。20世纪80年代以来,我国化肥的消费量迅速增加,土壤P素已经由70年代前严重亏缺开始转变为平衡或略有盈余^[5]。近20多年来,我国农田P素平衡的盈余以年增11%的速度不断扩大^[5-6]。据统计,我国2005年P(P₂O₅)肥产量1125万t,位居世界第一,同年我国P肥表观消费量达到1167万t,约占全球P肥消费量的30%^[7]。

2 长期施肥条件下土壤磷素利用与积累的研究

P肥施入土壤后易被土壤吸附固定。石灰性土壤中,P与Ca结合形成难溶态的Ca₈-P及Ca₁₀-P;酸性土壤中,P与Fe、Al结合形成的磷酸盐同样溶解度很低,导致P肥利用效率一直较低。有研究指出P肥的当季作物利用率仅为10%~25%^[8-9]。P肥利用率低是农业生产中一个大问题,在生产中P往往成为提高作物产量的限制因子。因此,多年来农业工作者一直

①基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2005CB121101)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-407)、黑龙江省攻关项目(GB05C201-01)和黑龙江省科技计划项目(GB06B107-2)资助。

* 通讯作者(xzhan@neigaeherb.ac.cn)

作者简介:宋春(1981—),男,黑龙江讷河人,博士研究生,主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: songchun1981@163.com

致力于提高 P 肥利用率的研究。黄绍敏等^[10]采用 14 年 28 季长期肥料试验探讨小麦-玉米轮作方式下长期不同施肥方式和施肥量对潮土土壤 P 素积累与利用, 得出 P 素施入越多, 残留在土壤中越多, P 素利用率越低, 有机肥处理 P 的有效化高于无机肥的结论。然而大多数有机肥的含 P 量较低, 且有机 P 需要一定的时间、适当的温度和水分以及相应的微生物分解等条件才能矿化为植物可利用的 P。Gosling 和 Shepherd^[11]比较研究了英国 4 个农场中有机管理和常规管理下的土壤肥力状况, 发现与常规管理下的土壤相比, 有机管理下土壤中的可提取 P 的浓度显著降低; 提出常规管理方式向有机管理方式转变的过程中, 应增加 P 的投入来弥补长期有机管理造成的土壤 P 素肥力的降低。由此可见, 单施有机肥是远远不能满足作物需求的。20 世纪 80 年代开始, 联合国举行了“可持续发展”的系列国际性会议, 中国也随之建立有中国特色的生态农业, 提出以追求高产、优质、高效为目的, 将传统农业的精华和现代科学技术相结合, 在施肥方式上大力提倡有机肥与化肥配合施用。王伯仁等^[12]在红壤上的研究表明, 有机肥与化学肥料配合施用明显提高 P 肥的利用率。Song 等^[13]在黑土上所作的研究表明, 有机肥与化学肥料配合施用可大大提高土壤有效 P 的含量。

也正因为 P 肥利用率低, 且 P 素在土壤中不易移动, 长期施肥导致 P 在土壤耕层中大量积累。Otto 和 Kilian^[14]研究指出, 当施肥量在 P 20 kg/hm² 以上时, 土壤 P 含量迅速提高。Hooda 等^[15]研究得出在集中畜牧农业和耕作农业系统中, 施用动物粪肥常常导致土壤 P 素含量超出作物吸收的 P, 长期施用有机肥导致显著的土壤 P 素流失现象。来璐等^[16]对 18 年连作苜蓿条件下不同施肥处理对黄土 P 素的影响进行了研究, 结果表明施肥可提高土壤耕层全 P 含量。施肥有利于改善耕层土壤 P 素的有效性, 提高有效 P 含量, 导致土壤有效 P 在耕层土壤有一定累积。Han 等^[17]在黑土上所作的研究得出相同的结论。黄庆海等^[18]在红壤性水稻土上进行的肥料长期定位试验表明, 不施 P 处理的土壤 P 素处于耗竭状态, 耕层土壤全 P 含量持续下降, 但耕层以下土层的全 P 尚未耗损; 连年施 P 的土壤耕层全 P 含量提高, 提高的幅度呈现明显量级关系。谢林花等^[19]研究表明, 23 年的不同施肥处理, 与无肥处理相比, 各处理土壤全 P 增量剖面分布可为 3 层: 耕层 (0 ~ 20 cm) 为显著累积层, 20 ~ 60 cm 土层为微增-亏损层, 60 ~ 100 cm 土层为轻度累积层。速效 P 增量剖面分布趋势与全 P 增量分布趋势基本相同。段立珍等^[20]以皖北地区菜地土壤为供试土壤, 以其相邻粮田为对照, 研究了菜地土

壤 N、P、K 含量变化及其分布特征。结果表明经过长时间种植蔬菜, 菜地土壤 P 素积累特别明显, 主要积累于 0 ~ 40 cm 土层中, 菜地土壤全 P 积累量为粮田的 1 ~ 5 倍, 有效 P 积累量为粮田的 7 ~ 20 倍。

残留在土壤中的 P 有后效作用。中国科学院沈阳应用生态研究所于 1983 年开展了一组有关 P 肥残效和 P 素循环的研究, 沈善敏等^[21]发表了该项研究的首篇报道, 报道中阐述在碳酸盐褐色土上一次施 P 的残效至少可维持 5 年以上。张素君等^[22]在东北黑土区所作的研究表明, 作物产量随施入 P 肥剂量增加呈上升趋势, 其当年利用率与剂量呈负相关。P 肥 6 年累加利用率为第一年的 5 ~ 6 倍。耕层土壤残留 P 量随施用量的增加而提高。一次大剂量施入, 可维持较持久的 P 肥残效。谢佳贵等^[23]在吉林黑土区研究得出, P 肥对玉米具有 12 年的后效作用, 后效生物统计显著时期约为 2 年。

3 长期施肥对土壤磷素形态转化及生物有效性的影响

土壤中的 P 素分为有机态和无机态两大类, 不同形态的 P 对植物的有效性是截然不同的。其中土壤有机 P 的形态主要有 3 类: 核酸类、植素类、磷脂类。对土壤有机 P 的分组, 至今没有一个统一标准体系, 土壤有机 P 分组测定方法主要有两种: ①根据化学浸提剂进行土壤有机 P 分组的有机 P 分级体系^[24-25]; ②测定土壤中的有机 P 化合物^[26]。土壤有机 P 对植物有效性分组法的最早研究者是美国的 Bowman 和 Cole^[25], 他们对美国一些地区的石灰性 (个别为酸性) 土壤作了研究, 首先提出了土壤有机 P 对植物有效性的分组法, 他们把土壤有机 P 分为 4 个组分, 即活性有机 P、中度活性有机 P、中稳性有机 P 和高稳性有机 P。贺铁与李世俊^[27]的研究表明, 若干有机 P 化合物, 如核酸、卵磷脂、葡萄糖-6-磷酸和甘油磷酸属于活性有机 P 组分; 植酸钙中度活性有机 P 组分; 植酸铁属于稳定性有机 P 组分。这为检验土壤有机 P 对植物有效性分组法的可靠性提供了重要依据。

马艳梅等^[28]研究了长期定点施肥对白浆土 P 素形态转化的影响, 结果表明施用有机肥 (牛粪厩肥) 土壤有机 P 向各组分有机 P 均有所转化, 转化率的大小顺序为: 中活性有机 P > 活性有机 P > 高稳性有机 P > 中稳性有机 P, 说明施有机肥使土壤有机 P 向着活性较高的有机 P 组分转化的比比较大; 而单施秸秆的处理, 土壤有机 P 主要向中稳性有机 P 和高稳性有机 P 转化; 施化肥处理土壤中的有机 P 主要向中稳性有机 P 转化, 中等活性有机 P、活性有机 P、

高稳性有机 P 的转化率均为负值。另有研究指出长期施肥对红壤性水稻土各组分有机 P 量产生影响：耗 P 处理，主要是中度活性有机 P 和活性有机 P 下降；施 P 主要促进中度稳定性有机 P 和高度稳定性有机 P 的增加^[29]。

根据磷酸根离子所结合的主要阳离子性质的不同，通常将土壤无机 P 的形态分为 4 类：磷酸钙（镁）类化合物（Ca-P）、磷酸铁和磷酸铝类化合物（Fe-P、Al-P）、闭蓄态 P（O-P）以及磷酸铁铝和碱金属、碱土金属复合而成的磷酸盐类。相对于有机 P 来说，无机 P 的有效性较高，因此有关土壤无机 P 的研究较多。王艳玲等^[30]利用相关分析和通径分析相结合的方法，研究比较了黑土中各组无机 P 对有效 P 的相对重要性，它们依次是：Ca₂-P>Al-P>Fe-P>Ca₈-P>O-P>Ca₁₀-P。林德喜等^[31]研究得出，黑土各形态无机 P 的含量大小顺序为：Fe-P>Ca₁₀-P>Al-P>Ca₈-P>Ca₂-P>O-P，土壤中积累的 Al-P、Ca₂-P 量与施 P 量成正相关。黄庆海等^[18]研究发现，红壤性水稻土中各组分无机 P 含量以 Fe-P 和 O-P 为主体，其次是 Al-P 和 Ca₁₀-P，Ca₂-P、Ca₈-P 只有当土壤无机 P 达到一定丰度和供 P 强度时才存在，对水稻 P 素营养的贡献无实际意义。

P 肥施入土壤后首先转化为各种形态无机 P，土壤中的无机 P 在一定条件下也发生相互转化。周宝库等^[32]研究表明，长期施用 P 肥使黑土全 P 增加 53.9%~65.7%、速效 P 增加 6~15 倍。积累的 P 素大部分以有效性较高的 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 形态积累在土壤中。李莉等^[33]研究表明，长期不施 P 肥处理褐潮土的全 P、速效 P、无机 P 总量以及各组分含量较长期休闲处理均明显降低；施用 P 肥的处理则相应提高。施肥对 Ca₂-P 含量的影响最大，其次是 Ca₈-P 和 Al-P。有机肥配施 P 肥更有利于土壤中积累 P 素的有效性转化。王平等^[34]研究表明，长期施肥对黑垆土无机 P 各组分相对含量有影响，耗 P 处理主要是 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 的降低，而施 P 处理是 Ca₁₀-P 的降解和 Ca₂-P 的积累；不同处理对土壤有效 P 和缓效态 P 均有不同程度的影响，而与无效态 P 关系不大；在各级无机 P 与产量的相关性中，Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 都达到了极显著水平。王伯仁等^[12]研究表明，连续施用化学 P 肥和化肥加有机肥，均可提高红壤全 P、有机 P、无机 P 数量；施用有机肥料（猪粪）土壤中的 P 以 Ca-P 和 Al-P 积累为主要表现形式，化学 P 肥的施用能够提高土壤的全 P 含量，并以 Al-P 增幅为最大，在所有处理中均表现为土壤 O-P 相对稳定。马艳梅等^[28]在白浆土上研究表明，长期施用有机

肥（牛粪厩肥）土壤无机 P 主要向 Fe-P、Al-P 和 Ca₂-P 转化；长期施用化肥土壤无机 P 主要向 Fe-P、O-P 和 Al-P 转化。另有研究指出，化学 P 肥与有机肥配合施用可以降低积累态 P 转化为 O-P 和 Ca₁₀-P 的比率^[13,18,35]。中国农业科学院农业资源与农业区划研究所通过对我国具有代表性的几个典型土类 15 年长期定位试验的 CK 和 NPK 处理以及原始土壤中无机 P 组分的分析，研究施 P 肥对土壤无机 P 形态的影响及有效性，结果表明长期施用 P 肥提高了土壤无机 P 总量和各组分的含量，其中以 Ca₂-P、Al-P 和 Fe-P 提高比例显著，而 O-P 和 Ca₁₀-P 提高的比例少^[36]。

Shen 等^[37]研究了水稻单作条件下长期施肥对石灰性土壤的 P 素组分的影响，发现不施 P 处理土壤有效 P 显著降低，而施 P 处理却保持在一个稳定水平。Lee 等^[38]研究发现，长期施肥增加了水稻土耕层土壤全 P 和无机 P 含量。长期化肥配施腐熟秸秆处理加速了土壤有机 P 组分的降低，却显著增加了无机 P 组分。长期单施化肥无机 P 组分变化不大，有机 P 含量显著增加，而长期单施腐熟秸秆减低了土壤残留 P 和 Fe-P，并增加了无机 P 组分。Romanyà 等^[39]研究表明雨养农业区，与常规管理方式下的土壤相比，有机管理方式下的土壤中 P 的有效性较低；而在灌溉条件下有机管理土壤中 NaHCO₃ 提取无机 P 含量比常规管理的土壤高。总之，长期施肥能够保持或提高土壤 P 的有效性。施肥方式中以化肥配施有机肥并配合良好的耕作灌溉等管理措施效果最好。

4 长期施肥对土壤磷素吸附与解吸的影响

土壤 P 素的吸附-解吸与许多因素有关。土壤的 pH 值、碳酸盐含量、铁铝化合物含量、土壤有机质等会显著影响土壤对 P 的吸附^[40-41]。此外，土壤质地、交换性离子种类和盐基饱和度、土壤干湿交替情况和微生物活性等因素都对土壤 P 的吸附解吸有一定影响。施肥通过直接或间接影响这些因素进而影响土壤 P 的吸附解吸。施肥历史、施肥方式和施肥种类的不同都会对土壤 P 的吸附解吸造成不同程度的影响。一般说来，施有机肥的处理土壤吸附 P 能力降低，但解吸 P 能力增强；长期不施肥土壤固 P 能力增强。王伯仁等^[12]研究表明，有机肥料处理土壤对外源 P 的吸附强度明显少于施用化学 P 肥和不施用 P 肥的处理，有机肥料能够显著提高吸附 P 的再利用。郭胜利等^[42]研究了石灰性土壤 P 素吸附特性的演变，结果表明长期不施 P 肥提高了 P 素的最高吸附量，相反长期施用 P 肥的处理降低了 P 素的最高吸附量。Song

等^[13]在黑土上所作的研究得出,长期施用 P 肥降低了 P 的最大吸附量,提高了 P 的释放量及释放速率,与对照相比,NPM 处理 P 的最大吸附量的降低幅度及 P 的释放量的提高幅度远远大于 NP 处理。王道中等^[43]研究表明,长期施用有机肥可以显著减少砂姜黑土对 P 的吸附;与吸附相反,有机肥能促进土壤 P 的解吸,提高土壤 P 的有效性。马艳梅等^[44]在白浆土上所作的研究也得出相同的结果。Anderson 和 Wu^[45]研究发现,P 的结合能常数与施入土壤中的 P 量呈显著负相关关系,P 的解吸速率系数随粪肥用量的增加显著增大。

5 长期施肥条件下土壤磷素流失的研究

土壤中P素的积累量及P素下移深度与施P量、施肥模式(化肥P、有机肥P;单施、混施)和P素形态有关。众所周知,P在土壤中不易移动。只有土壤中的P素达到一定浓度才会随降水或灌溉水向下层土壤淋失或随地表径流流失。一般来说,水田容易发生土壤P素的流失。因此有关土壤P素流失的研究在水田中研究较多。王建国等^[46]研究得出:施有机肥处理土壤无机P下移深度比施化肥处理深;不同施肥处理对水体环境存在不同的污染风险,其中以有机肥处理下土壤P素对水体环境的污染风险最大;地表水的污染风险大于地下水,稻季的污染风险大于麦季,丰水年的污染风险大于平水年。潘根兴等^[47]对太湖地区水稻土上长达 13 年的长期不同施肥处理的某试验田进行了土壤全P、树脂P和水溶性P的测定分析,结果表明单施化肥下的流失量最大,为配施有机肥处理的 2~4 倍;不同施肥实践对水溶性P的比率的影响不明显,但单施化肥有使亚表层树脂P和水溶性P含量提高的倾向;提出为了防止水稻土P的强烈流失而加剧农业非点源污染,要避免长期单施化肥,而应坚持和推广配施适量有机肥。

随着农田中肥料的长期施用,土壤出现富P化现象。与此同时,旱地P对水环境影响的潜能明显提高。Beck 和Sanchez^[48]研究了施肥对旱稻-玉米-大豆农田土壤P的移动,发现P肥的施用导致耕层以下土壤P发生明显的移动。Sharpley 等^[49]总结了农田生态系统中P从土壤向水流失的现象并提出了几点保护措施。刘方等^[50]研究发现长期施肥下黄壤旱地的P素水平不断提高。杨学云等^[51]利用 12 年长期定位试验研究了灌溉和旱作条件下不同施肥处理对壤土土壤剖面全P与有效P(Olsen-P)分布和移动的影响。结果表明,旱作条件下,施用P肥或化肥配施有机肥提高了 100 cm以上土体全P与Olsen-P含量;而化肥配合有机肥,Olsen-P含量在 100~300 cm土壤剖面中都高于对照(不施肥)

和化肥处理。灌溉条件下,与旱作有相同趋势,但PK、有机肥配施NPK处理,全P和Olsen-P不仅在 0~300 cm剖面中高于对照和NPK处理,而且也高于旱作条件下的相同处理。由此可见,壤土上存在P素的淋失。

6 展望

6.1 长期施肥条件下土壤有机 P 的矿化

土壤有机 P 经过矿化可转化为有效 P,其对土壤 P 库的供 P 水平及植物营养具有重要作用。综上所述,国内外对土壤无机 P 的研究较多,而对有机 P 的研究相对较少,特别是对长期施肥条件下土壤有机 P 的矿化过程研究很少。基于土壤有机 P 的重要性,这一点应在未来的研究中有所侧重。

6.2 长期施肥条件下土壤 P 素的吸附解吸动力学

根据土壤 P 素的吸附解吸动力学估计出的 P 的容量/强度参数对生产上 P 肥的施用量及 P 损失风险评估具有直接的指导意义。然而,目前国内外对土壤 P 素的吸附解吸动力学研究主要集中在实验室内模拟及短期的盆栽试验条件下,而对长期施肥条件下土壤 P 素的吸附解吸的动态监测研究比较缺乏。因此这一方面有待于进一步加强。

6.3 长期施肥条件下土壤 P 素的迁移流失及其与环境质量的关系

众所周知,某些地区由于 P 素流失导致的水体污染、湖泊富营养化等环境问题已相当严重。目前在水田及水体附近的农田中研究土壤 P 素的迁移流失已成为热点,而在旱田中对于由长期施肥引起的土壤 P 素的迁移流失及其与环境质量关系方面的研究比较欠缺,各地区各类土壤中现阶段施肥量是否会造成土壤 P 素的迁移流失缺乏定量研究,这无疑是未来研究的热点问题。

参考文献:

- [1] Cathcart JB. World phosphate reserves and resources // Khasawneh FE, Sample EC, Kamprath EJ. The Role of Phosphorus in Agriculture Madison, Wisconsin, USA: ASA-CSSA-SSSA, 1980: 1-17
- [2] 鲁如坤. 土壤植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998
- [3] Cooke GW. Long-term fertilizer experiments in England: The significance of their results for agricultural science and for practical farming. *Ann Agron.* 1976, 27: 503-536
- [4] 安藤淳平. 世界磷矿资源和日本磷工业展望. *土壤学进展*, 1983, 13(3): 52-54
- [5] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. *磷肥与复肥*, 2003,

- 18(1): 4-7
- [6] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 钦绳武, 郑剑英, 王周琼. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 III. 全国和典型地区养分循环和平衡现状. 土壤通报, 1996, 27(5): 193-196
- [7] 张永志. 中国磷肥工业现状及发展思路. 中国土壤与肥料, 2007(1): 1-4
- [8] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展. 土壤学进展, 1990, 18(6): 1-5
- [9] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用. 土壤学报, 1998, 36(1): 104-111
- [10] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 张夫道, 徐明岗, 介晓磊. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响. 中国农业科学, 2006, 39(1): 102-108
- [11] Gosling P, Shepherd M. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105: 425-432
- [12] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤旱地磷的影响. 中国农学通报, 2005, (9): 255-259
- [13] Song C, Han XZ, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems. *Biol. Fertil. Soils*, 2007, 44: 37-47
- [14] Otto WM, Kilian WH. Response of soil phosphorus content, growth and yield of wheat to long-term phosphorus fertilization in a conventional cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61: 283-292
- [15] Hooda PS, Truesdale VW, Edwards AC. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications. *Advances in Environmental Research*, 2001, 5: 13-21
- [16] 来璐, 郝明德, 彭令发, 张振明. 黄土区旱地苜蓿连作条件下施肥对土壤磷素的影响. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1471-1474
- [17] Han XZ, Song CY, Wang SY, Tang C. Impact of long-term fertilization on phosphorus status in black soil. *Pedosphere*, 2005, 15(3): 319-326
- [18] 黄庆海, 李茶苟, 赖涛, 吴建华, 魏绪英, 赵美珍. 长期施肥对红壤性水稻土磷素积累与形态分异的影响. 土壤与环境, 2000, 9(4): 290-293
- [19] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 刘选卫, 刘利花. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 I. 有机质、全磷和速效磷. 应用生态学报, 2004, 15(5): 787-789
- [20] 段立珍, 汪建飞, 于群英. 长期施肥对菜地土壤氮磷钾养分积累的影响. 中国农学通报, 2007, 23(3): 293-296
- [21] 沈善敏, 殷秀岩, 张璐. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 I. 作物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化. 应用生态学报, 1992, 3(2): 138-143
- [22] 张素君, 张岫岚, 刘鸿翔, 王德禄. 东北黑土地地区农业中磷肥残效的研究. 土壤通报, 1994, 25(4): 178-180
- [23] 谢佳贵, 张宽, 王秀芳, 王立春, 张国刚, 尹彩侠, 杨锡财, 邹明辉, 李杰. 磷肥在黑土春玉米连作区玉米后效作用的研究. 吉林农业科学, 2006, 31(2): 34-38
- [24] 严旭升. 土壤肥力研究法. 北京: 农业出版社, 1988
- [25] Bowman RA, Cole CV. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus form in grassland soils. *Soil Sci.*, 1978, 125(2): 95-101
- [26] 贺铁. 土壤有机磷研究的新进展. 土壤通报, 1986, 17(3): 141-143
- [27] 贺铁, 李世俊. Bowman-Cole 土壤有机磷分组法的探讨. 土壤学报, 1987, 24(2): 152-159
- [28] 马艳梅. 长期定点施肥对白浆土磷素形态转化的影响. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18 (2): 39-41
- [29] 黄庆海, 赖涛, 吴强, 李茶苟, 吴建华, 赵美珍. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 63-66
- [30] 王艳玲, 王杰, 赵兰坡, 蔡洪光. 黑土无机磷形态及其有效性研究. 水土保持学报, 2004, 18(3): 85-89
- [31] 德喜, 范晓晖, 胡锋, 杨林章, 韩晓增. 长期施肥后筒育湿润均腐土中磷素形态特征的研究. 土壤学报, 2006, 43(4): 605-610
- [32] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 143-147
- [33] 李莉, 李絮花, 李秀英, 李燕婷, 赵秉强. 长期施肥对褐潮土磷素积累、形态转化及其有效性的影响. 土壤肥料, 2005(3): 32-35
- [34] 王平, 李凤民, 刘淑英, 吴银明, 王娟. 长期施肥对黑垆土无机磷形态的影响研究. 土壤, 2005, 37(5): 534-540
- [35] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 荣向农. 长期施肥对石灰性潮土无机磷形态的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 241-248
- [36] 李中阳, 李菊梅, 徐明岗, 吕家珑, 孙楠. 外源磷对土壤无机磷的影响及有效性. 中国土壤与肥料, 2007(3): 32-35, 62
- [37] Shen J, Li R, Zhang F. Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil. *Field Crops Research*, 2004, 86: 225-238
- [38] Lee CH, Park CY, Park KD, Jeon WT, Kim PJ. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere*, 2004, 56: 299-304
- [39] [39] Romanyà J, Rovira P. Labile phosphorus forms in irrigated and rainfed semiarid Mediterranean grassy crops with long-term organic or conventional farming practices. *Europ. J. Agronomy*, 2007, 27: 62-71
- [40] 朱荫湄, Pardini G, Sequi P. 土壤磷盐吸附作用研究. 土壤学报, 1985, 22(2): 127-135

- [41] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 氧化还原条件对土壤磷素固定与释放的影响. 土壤学报, 2002, 39(4): 542-549
- [42] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 郝明德. 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, 2005, 11(1): 33-39
- [43] 王道中. 长期施肥对砂姜黑土磷吸附和解吸特性的影响. 安徽农业科学, 2004, 32(4): 701-702
- [44] 马艳梅. 长期施肥对白浆土磷吸附与解吸的影响. 中国土壤与肥料, 2006, (4): 40-42
- [45] Anderson R, Wu YX. Phosphorus quantity-intensity relationships and agronomic measures of P in surface layers of soil from a long-term slurry experiment. Chemosphere, 2001, 42: 161-170
- [46] 王建国, 杨林章, 单艳红, 沈明星, 路长缨. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 88-92
- [47] 潘根兴, 焦少俊, 李恋卿, 徐向东, 邱多生, 徐晓波, 储秋华, 赵洪祥. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响. 环境科学, 2003, 24(3): 91-95
- [48] Beck MA, Sanchez PA. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. Plant and Soil, 1996, 184: 23-31
- [49] Sharpley AN, McDowell RW, Kleinman PJA. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. Plant and Soil, 2001, 237: 287-307
- [50] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 钱晓刚, 刘元生, 罗海波. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价. 土壤学报, 2003, 40(6): 838-844
- [51] 杨学云, 李生秀, Brooke PC. 灌溉与旱作条件下长期施肥壤土剖面磷的分布和移动. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 250-254

Advances in Phosphorus in Long-Term Fertilized Soil

SONG Chun^{1,2}, HAN Xiao-zeng¹

(1 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China;*

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Phosphorus is an important aspect of soil fertility management. This paper reviewed the latest research advances in the world about the utilization and accumulation of phosphorus nutrient, phosphorus form transformation and their bioavailability, phosphate adsorption-desorption characteristic and loss in long-term fertilized soil. The existent problems in this field and its hotspots in future were also discussed.

Key words: Long-term fertilization, Phosphorus, Research advance