

# 农田土壤对磷的吸附和解吸特性研究进展

杨燕玲 (中国农业大学, 北京 100094)

**摘要** 磷素是植物生长必需的三大营养元素之一, 在植物生长发育过程中对植物的产量和品质有重要影响。综述了农田土壤对磷的吸附和解吸机制等方面的研究进展, 分析土壤对磷的吸附和解吸影响因素, 包括土壤类型、土地利用方式、施肥水平和土壤理化性质, 旨在为实际生产中磷肥的合理施用、高效利用和防止环境污染提供依据。

**关键词** 磷吸附; 磷解吸; 农田土壤

**中图分类号** S 153 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)01-0004-02

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.01.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Advances in Phosphorus Adsorption and Desorption of Farmland Soils

YANG Yan-ling (China Agriculture University, Beijing 100094)

**Abstract** Phosphorus was one of the three essential nutrients of plant growth. Phosphorus has important influence on yield and quality of plant. The research progress of phosphorus adsorption and desorption mechanism was reviewed in farmland soils. Influencing factors of phosphorus adsorption and desorption were analyzed, including soil type, land use, fertilization level, and soil physical and chemical properties. The aim was to provide basis for rational application and efficient utilization of phosphate fertilizer and prevention of environmental pollution in actual production.

**Key words** Phosphorus adsorption; Phosphorus desorption; Farmland soil

磷素是植物生长必需的三大营养元素之一, 植物体内所需要的磷主要是从土壤磷库和磷肥中获得, 其供给的丰缺可直接影响农作物的产量和品质。近年来, 随着农田施磷水平的逐渐增加, 农田非点源磷对环境污染的威胁日渐凸显<sup>[1]</sup>。当前, 随着工业的发展, 施入土壤的磷肥增加迅速, 大大超出了植物生长所需, 然而植物对这部分施入土壤中的磷肥当季利用率很低<sup>[2]</sup>, 这是因为施入农田的磷肥在进入土壤后, 会产生一系列的反应, 比如化学、生物化学反应, 但大多是物理化学反应, 这个过程中造成很多磷肥生成难溶性甚至不溶性的磷酸盐, 同时还会被土壤或矿物颗粒吸附或者微生物等固持, 施入土壤中的磷素大部分被土壤储备, 导致植物无法利用<sup>[3]</sup>。了解农田土壤中磷吸附和解吸的特性, 不仅可为合理施用磷肥提供理论依据, 而且对提高磷素的利用效率有重要意义。为此, 针对农田土壤对磷的吸附和解吸特性进行综述, 以期优化农田的施肥模式、提高磷肥的利用效率提供参考。

### 1 土壤对磷的吸附与解吸机制

土壤对离子的吸附作用指的是溶液中的溶质(离子或分子)在土壤固相与液相交界面处的富集现象, 它也是指土壤固相与液相交界面附近溶液扩散层部分的离子浓度与自由溶液中离子浓度的差值<sup>[4]</sup>。从微观的角度来看, 吸附现象应该是胶体表面与扩散层之间的离子浓度的差异, 但一般所称的吸附现象多是宏观分析, 它包括整个扩散双电层在内的部分与自由离子浓度的差异。土壤吸附的反方向则为土壤对养分的解吸过程<sup>[5]</sup>。

土壤液相和固相中的磷素处于一个动态平衡的过程, 因

此磷的吸附和解吸也是一个可逆的过程, 二者有着密切的关系。张新明等<sup>[6]</sup>研究广东省酸性水稻土, 结果表明, 在同一供试水稻土的磷, 它的解吸量与相应的吸附量呈现极显著的指数关系, 并且与相应的平衡溶液的浓度呈极显著的线性关系。其研究还表明, 在同一起始磷溶液浓度的条件下, 供试土壤磷解吸量与相应最大磷吸附量呈现显著负相关, 并且同一起始浓度下磷解吸量与相应磷吸附饱和度呈现显著正相关。

**1.1 土壤对磷的吸附机制** Bhatti 等<sup>[7]</sup>研究表明, 根据土壤中释放的 OH<sup>-</sup>与吸附的磷酸根的摩尔比可以得出, 磷主要通过配位体交换而被吸附。夏汉平等<sup>[8]</sup>研究土壤对磷吸附的几种可能机制。目前主要为广大学者接受的是以下 2 种机制: 专性吸附和非专性吸附。

专性吸附是指以 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>为配位体, 与土壤固相表面 -OH 或 -H<sub>2</sub>O 发生配位体交换而保持在土壤胶体表面的过程<sup>[9]</sup>。其具体的反应机理如下: 首先, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>与活性铁铝的 OH<sup>-</sup>进行配位交换, 并释放出 OH<sup>-</sup>, 形成单键吸附; 其次, 被吸附的磷酸根中的另一个 OH<sup>-</sup>, 脱质子化释放出一个 H<sup>+</sup>; 最后, 进行第 2 次配位体交换, 进一步释放出 OH<sup>-</sup>形成六边形结构的双键吸附<sup>[10]</sup>。

非专性吸附是指由带正电荷的土壤胶体通过静电引力的吸附, 其发生在胶体的扩散层, 与氧化物配位壳之间为 1~2 个水分子所隔, 键合弱, 易解吸或水洗出。凡体系的 pH 低于胶体电荷零点时, 均可发生这一吸附<sup>[5]</sup>。

**1.2 土壤对磷的解吸机制** 土壤中磷的解吸过程被认为是吸附的逆向过程, 也是比吸附更加重要的过程, 因为它不仅仅涉及到土壤吸附磷的再利用和提高土壤中磷的有效性, 同时也涉及环境方面的问题<sup>[11]</sup>。当然解吸过程并不是完全可逆的, 被土壤吸附的磷素只是部分从胶体上被解吸到土壤溶液中<sup>[12]</sup>。了解解吸机制和了解吸附机制同等重要, 原因在

**基金项目** “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0200401)。

**作者简介** 杨燕玲(1995—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向: 北方葡萄提质增效。

**收稿日期** 2018-08-21

于解吸的快慢和多少直接关系到磷素从固相补给到液相的快慢和缓冲能力大小,进而影响磷素对植物的有效性<sup>[13]</sup>。大量研究表明,磷酸盐的解吸机制一般分为扩散、竞争和溶解3种。Kuo等<sup>[14]</sup>利用粒子交换树脂的方法研究土壤中磷的解吸时发现它的解吸速率主要由磷酸根离子在树脂粒子之间的扩散控制,而不是受化学反应影响。Singh等<sup>[15]</sup>证明亚硒酸根能与磷和硫酸根离子竞争土壤中的吸附点位,从而加速吸附磷的解吸。

## 2 土壤磷吸附解吸的影响因素

影响土壤对磷吸附解吸的因素有很多,很多学者也对此进行了深入的研究,主要影响因素包括土壤类型和质地、土地利用方式、施肥水平、土壤中的铁铝氧化物、土壤温度、土壤pH等。

**2.1 土壤类型** 大量研究表明土壤对磷的吸附解吸过程受土壤类型的影响。夏瑶等<sup>[16]</sup>研究表明,水稻土吸附磷的最大量与黏粒含量呈正相关。宫春艳等<sup>[17]</sup>采用等温吸附法研究红壤和褐土中磷素的吸附特性,并分析磷吸附后镉离子的吸附—解吸特征,发现在外源磷浓度0~64 mg/L范围内,红壤对磷的最大吸附量及吸附反应常数(K)均高于褐土。曹志洪等<sup>[18]</sup>研究黄土性土壤及作为对照的中性水稻土和酸性红壤对磷的吸附与解吸特性,发现与酸性红壤相比,黄土性土壤是一种弱吸磷能力的土壤,但是其对吸附磷的解吸能力很强。

**2.2 土地利用方式** 秦胜金等<sup>[19]</sup>研究闽江流域土壤对磷的吸附解吸特征,发现蔬菜地土壤的吸附率远低于其他土壤,而水田和林地土壤的吸附能力略强,并且土壤吸附能力越弱对磷的解吸能力越强,不同利用方式土壤磷的解析率表现为菜地>水田和林地>旱地、茶园和果园。肖懿等<sup>[20]</sup>在对丘陵区紫色土堆磷的吸附解吸特征的研究中发现,石灰性林地土壤对磷素吸附容量最大,中性农地和林地的土壤次之,酸性土壤最低。杨小燕等<sup>[21]</sup>研究表明,落叶松人工林土壤吸附磷量和磷的吸附率均高于未经开垦的黑土。邱亚群等<sup>[22]</sup>研究认为,旱地对磷的吸附无论在强度还是容量方面均大于同母质的水田土壤,而解吸率随着吸附量的增加而增大,其大小为旱地<水田,并且不同利用方式土壤磷吸附解吸特性差别较大。

**2.3 施肥水平** 赵庆雷等<sup>[23]</sup>研究认为长期有机物循环配施化肥显著降低0~20 cm土壤磷的吸附量,无肥基础上的有机物循环利用效果次之,单施化肥无明显效果。各施肥模式对20~40 cm土壤磷的吸附特性影响较小。贺春风等<sup>[24]</sup>研究表明,施加秸秆的改良材料可以显著地提高砂质土壤对磷的吸附效率,同时降低解吸率,可以显著地增加吸附常数(K)和最大缓冲容量(MBC),减小磷的最大吸附量(X<sub>m</sub>)。罗敏等<sup>[25]</sup>研究不同肥力瘠土的颗粒分布以及不同颗粒对磷素的吸附和解吸规律,发现高肥力的瘠土中中等大小的土壤颗粒增多,会使磷的吸附量有所减少,但会使磷的解吸量增大。

## 2.4 土壤理化性质

**2.4.1 土壤中的铁铝氧化物。**铁铝氧化物是广泛存在于中

性和酸性土壤中的矿物,赤铁矿、针铁矿以及无定形的氢氧化铁都具有纳米尺度,而且比表面积都很大,具有很强的吸附能力。更重要的是铁氧化物在土壤中的含量高,具有较高的活性,它的形态会随着环境的改变而转变<sup>[11]</sup>。Young等<sup>[26]</sup>认为淹水条件下,土壤中的三价铁氧化物会被还原为二价铁氧化物,使其吸附能力降低。王慧等<sup>[27]</sup>研究发现,氧化铁—胡敏酸复合物的形成能够增强对磷的吸附能力,并且针铁矿复合物的吸附能力比赤铁矿复合物的吸附能力大,均为多层吸附过程。谢晶晶等<sup>[28]</sup>研究认为,无定形氢氧化铁、合成氧化铁黄、针铁矿和赤铁矿对磷的吸附符合 Freundlich 等温方程,其中无定形氢氧化铁对磷酸根的吸附能力最强,其次是氧化铁黄和针铁矿,赤铁矿的吸附能力最差。

**2.4.2 其他理化性质。**陈波浪等<sup>[29]</sup>研究不同质地棉田土壤对磷素吸附解吸的影响,发现磷吸附指数(PSI)、土壤最大缓冲容量(MBC)和吸附量均随黏粒含量的增加而增大,即黏土>壤土>砂壤土,而易解吸磷(RDP)、解吸量、解吸率和标准需磷量(SPR)呈下降趋势,即砂壤土>壤土>黏土。陈亚东等<sup>[30]</sup>研究表明,氧化还原条件会对土壤磷的吸附解吸产生影响,淹水还原条件下,湿地土壤对磷的最大吸附量和解吸率比淹水前分别降低了9.5%和16.3%,吸附解吸平衡浓度升高,平均增加158.8%。

## 3 展望

迄今为止,学者们已经在土壤对磷的吸附解吸特征方面进行了大量的研究,但是却对磷的吸附解吸特征与磷有效化系数的关系方面的研究很少,对特定地区该方面的研究更少。土壤磷活化系数(PAC)是有效磷与全磷的比值,它可以很好地表征土壤中磷素有效性,PAC越高,表示全磷转化率就越高,这对于研究有效磷效率具有重要意义,也可以从某个侧面反映土壤磷素的有效性。此外,还应该加强长期定位研究对土壤磷素吸附解吸特征的影响。长期定位研究有很多优点,也更具代表性,为农业的可持续发展提供更好的依据。

## 参考文献

- [1] 张海涛,刘建玲,廖文华,等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附—解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(2):284-290.
- [2] 王永壮,陈欣,史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报,2013,24(1):260-268.
- [3] 张景光. 土壤对磷的吸附与解吸的研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [4] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [5] 付海曼,贾黎明. 土壤对氮、磷吸附/解吸特性研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(21):198-203.
- [6] 张新明,李华兴,刘远金. 广东省主要母质发育水稻土对磷的吸附特性[J]. 应用生态学报,2000,11(4):553-556.
- [7] BHATTI J,COMERFORD N B,JOHNSTON C T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a spodic horizon[J]. Soil Sci Soc Am J,1998,62(4):1089-1095.
- [8] 夏汉平,高子勤. 磷酸盐在白浆土中的吸附与解吸特性[J]. 土壤通报,1993,30(2):146-157.
- [9] 于天仁,李国亮,丁昌璞. 可变电荷土壤的电化学[M]. 北京:科学出版社,1996:9-31.
- [10] STRAUSS R,BRÜMMER G W,BARROW N J. Effects of crystallinity of goethite:II. Rates of sorption and desorption of phosphate [J]. Eur J Soil Sci,2005,48(1):101-114.

- [42] 昌友权, 昌妍希, 郑鸿雁, 等. 超高压电裂解辅助水代法提取油牡丹籽油的研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(7): 70-74.
- [43] 姚茂君, 李静. 牡丹籽油亚临界流体萃取工艺优化[J]. 食品科学, 2014, 31(14): 53-57.
- [44] 杨倩, 祁磊, 王金顺, 等. 亚临界萃取牡丹籽油的工艺研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(5): 15-18.
- [45] 毛善巧, 李西俊. 牡丹籽油的研究进展及油用牡丹综合利用价值分析[J]. 中国油脂, 2017, 42(5): 123-126.
- [46] 白喜婷, 朱文学, 罗磊, 等. 牡丹籽油的精炼及理化特性变化分析[J]. 食品科学, 2009, 29(8): 351-354.
- [47] 王佳. 杨山牡丹遗传多样性与江南牡丹品种资源研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [48] 陈德志. 中国紫斑牡丹[M]. 北京: 金盾出版社, 2003.
- [49] 张钦, 李春燕. 油用牡丹栽植技术[J]. 农业知识: 乡村季风, 2012(10): 58.
- [50] 郑相穆, 周阮宝, 谷丽萍, 等. 凤丹种子的休眠和萌发特性[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(4): 260-262.
- [51] 周仁超, 姚崇怀, 潘俊, 等. 紫斑牡丹种子休眠和萌发特性初步研究[J]. 湖北农业科学, 2002(1): 59-60.
- [52] 康真, 张雪莲, 刘藕莲, 等. 油用牡丹繁育和造林技术研究[J]. 农村经济与科技, 2014, 25(12): 54-55, 178.
- [53] 高见. 紫斑牡丹的繁殖栽培技术[J]. 特种经济动植物, 2007, 10(1): 29-30.
- [54] 刘建平. 浅析油用牡丹苗木繁育技术及发展前景[J]. 现代园艺, 2017(4): 30.
- [55] GENEVE R L. Impact of temperature on seed dormancy[J]. HortScience, 2003, 38(3): 336-341.
- [56] 成仿云, 杜秀娟. 低温与赤霉素处理对“凤丹”牡丹种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35(4): 553-558.
- [57] 范丙友, 高水平, 史国安, 等. 赤霉素和低温打破牡丹上胚轴休眠技术研究[J]. 种子, 2007, 26(3): 1-3.
- [58] 刘秀贤, 张艳丽, 马宏, 等. 滇牡丹种子休眠解除效应研究[J]. 种子, 2013, 32(2): 9-12.
- [59] 沈改霞, 张新义. 浅谈牡丹的繁殖栽培技术[J]. 北方园艺, 2012(8): 63-66.
- [60] 张建华, 刁心军, 刘藕莲, 等. 湖北省野生牡丹的人工繁殖技术研究[J]. 湖北林业科技, 2012(6): 16-19.
- [61] 徐成文. 牡丹分株繁殖法[J]. 花木盆景: 花卉园艺, 2005(4): 25.
- [62] 郭亚珍, 庞静. 影响牡丹嫁接成活率的因素[J]. 中国花卉园艺, 2007(8): 17.
- [63] 王琼英. 紫斑牡丹嫁接育苗技术[J]. 林业实用技术, 2007(10): 45.
- [64] 胡中成, 蒋文娟, 马新乔, 等. 牡丹嫁接繁殖技术[J]. 浙江林业科技, 2006, 25(5): 34-36.
- [65] 刘改秀, 张西方. 牡丹嫁接成活率试验研究[J]. 现代农业科技, 2011(8): 181, 184.
- [66] 柴发喜. 紫斑牡丹快繁技术[J]. 中国林业, 2010(4): 56.
- [67] 杨荣, 王锋. 牡丹的嫁接技术[J]. 绿色科技, 2010(7): 101-102.
- [68] 薛杰, 侯西明. 实用牡丹繁殖技术[J]. 林业实用技术, 2003(1): 44-45.
- [69] 刘文兰, 唐红, 张亮, 等. 甘肃紫斑牡丹茎扦插繁殖技术初探[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(11): 19-22.
- [70] 史倩倩, 王雁, 周琳, 等. 生根粉及不同基质对牡丹传统品种扦插的影响[J]. 北方园艺, 2012(1): 91-96.
- [71] 唐豆豆, 李厚华, 张延龙, 等. “凤丹”牡丹组织培养研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(2): 160-166.
- [72] 王新, 成仿云, 钟原, 等. 凤丹牡丹鳞芽离体培养与快繁技术[J]. 林业科学, 2016, 52(5): 101-110.
- [73] 朱向涛, 王雁, 彭镇华, 等. 牡丹“凤丹”体细胞胚发生技术[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(5): 54-58.
- [74] 张改娜, 黄华, 邢继亮, 等. 牡丹品种凤丹白子叶离体再生研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(4): 68-70.
- [75] 张桂花, 王洪梅, 王连祥. 牡丹组织培养技术研究[J]. 山东农业科学, 2001(5): 16-18.
- [76] 陈怡平, 丁兰, 赵敏桂. 用紫斑牡丹不同外植体诱导愈伤组织的研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 66-69.
- [77] 朱向涛, 王雁, 吴倩, 等. 江南牡丹茎段愈伤组织诱导与植株再生[J]. 核农学报, 2015, 29(1): 56-62.
- [78] 贾文庆, 刘会超. 牡丹“凤丹”胚不定芽诱导和生根研究[J]. 北方园艺, 2009(3): 69-71.
- [79] 李萍, 成仿云. 牡丹组织培养技术的研究进展[J]. 北方园艺, 2007(11): 102-106.
- [80] 陈松. 油用牡丹常见病害与防治[J]. 山东林业科技, 2016(5): 89-93.
- [81] 韩本贵, 徐德平, 汪丽莎, 等. 油用牡丹病虫害综合防治技术[J]. 现代农业科技, 2014(13): 161, 164.
- [82] 杨娜. 油用牡丹栽培技术及主要病虫害防治措施[J]. 中国园艺文摘, 2014(10): 225-226.

## (上接第5页)

- [11] 邵兴华, 张建忠. 红壤磷吸附解吸特性及环境效应研究[J]. 广东农业科学, 2007(11): 85-87.
- [12] 邱亚群. 湖南典型土壤磷的吸附解吸机制及磷流失控制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [13] 夏汉平, 高子勤. 磷酸盐在土壤中的竞争吸附与解吸机制[J]. 应用生态学报, 1993, 4(1): 89-93.
- [14] KUO S, LOTSE E G. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite[J]. Soil Sci, 1973, 116(6): 400-406.
- [15] SINGH B, GILKES R J. Phosphorus sorption in relation to soil properties for the major soil types of South-Western Australia[J]. Aust J, Soil Res, 1991, 29(5): 603-618.
- [16] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1369-1374.
- [17] 宫春艳, 吴英, 徐明岗, 等. 红壤和褐土中磷的吸附及其对镉离子吸附-解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2258-2265.
- [18] 曹志洪, 李庆远. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报, 1988, 25(3): 218-225.
- [19] 秦胜金, 张玉树, 胡晓霞, 等. 不同利用方式下土壤对磷的吸附-解吸特征[J]. 现代农业科技, 2011(24): 285-287, 291.
- [20] 肖懿, 唐家良, 朱波, 等. 丘陵区紫色土不同土地利用方式下磷的吸附解吸特性[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 58-64.
- [21] 杨小燕, 杨淼焱, 王恩旭, 等. 黑土区不同林龄落叶松人工林土壤磷的吸附与解吸特性[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 39-43.
- [22] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 不同利用方式土壤中磷的吸附与解吸特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7): 2757-2762.
- [23] 赵庆雷, 吴修, 袁守江, 等. 长期不同施肥模式水稻田土壤磷吸附与解吸的动态研究[J]. 草业科学, 2014, 23(1): 113-121.
- [24] 贺春风, 杨巍, 王永敏, 等. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对沙质土壤磷素吸附解吸的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(33): 79-84.
- [25] 罗敏, 王旭东. 不同肥力壤土的土壤颗粒分布及其磷素吸附-解吸规律[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(6): 35-45.
- [26] YOUNG E O, ROSS D S. Phosphate release from seasonally flooded soils: A laboratory microcosm study[J]. Journal of environmental quality, 2001, 30(1): 91-101.
- [27] 王慧, 易珊, 付庆灵, 等. 铁氧化物-胡敏酸复合物对磷的吸附[J]. 植物营养与肥料科学, 2012, 18(5): 1144-1152.
- [28] 谢晶晶, 庆承松, 陈天虎, 等. 几种铁(氢)氧化物对溶液中磷的吸附作用对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 535-538.
- [29] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 不同质地棉田土壤对磷吸附与解吸研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 303-307.
- [30] 陈亚东, 梁成华, 王延松, 等. 氧化还原条件对湿地土壤磷吸附与解吸特性的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 724-729.