

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2022)04-0370-06

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.04.010

土壤磷活化剂在马铃薯生产中的应用潜力

张娇娇, 秦永林*, 樊明寿, 贾立国

(内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 基于农田土壤磷素累积的持续性及普遍性, 土壤磷活化剂的应用成为作物生产减磷增效的关键措施。从土壤磷素的形态及主要转化过程、土壤磷活化剂(低分子量有机酸、高分子量有机酸、磷酸酶及其激活剂、微生物菌肥、复杂有机质、高表面积与高表面活性物质以及其他类物质)在农业中的应用研究及在马铃薯生产上的应用潜力3个方面进行了综述, 以期马铃薯磷肥减施增效提供参考。

关键词: 马铃薯; 磷素形态; 磷素活化剂; 减肥; 增效

Application Potential of Soil Phosphorus Activator in Potato Production

ZHANG Jiaojiao, QIN Yonglin*, FAN Mingshou, JIA Ligu

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: Based on the persistence and universality of phosphorus accumulation in farmland soil, the application of soil phosphorus activator has become a key measure to reduce phosphorus and increase efficiency in crop production. The form and main transformation process of soil phosphorus, soil phosphorus activator, including low molecular weight organic acids, high molecular weight organic acids, phosphatase and its activation agent, microbial fertilizer, complex organic matter, high surface area and high surface active substance and other substances, in agricultural researches, and its application potential in potato production were reviewed, which may provide a reference for reducing the application of potato phosphorus fertilizer and increasing efficiency.

Key Words: potato; phosphorus form; phosphorus activator; fertilizer reduction; benefit increase

磷素是植物生长发育的必需营养元素之一, 亦是肥料的三要素之一。在农业生产中增施磷肥是提高作物产量与品质的重要措施, 多年来, 尽管不断大量施用磷肥来满足作物需求, 但由于磷素在土壤中移动性差、易固定, 致使施入土壤的

磷肥有效性迅速下降, 同时缺乏针对性的磷肥高效利用技术, 多数作物磷肥当季利用率只有10%~20%^[1]。这样就导致农田土壤的总磷量不断积累, 如全国土壤普查显示, 1980年全国农田平均土壤速效磷为7.4 mg/kg, 到2007年已达到24.7 mg/kg,

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060724); 内蒙古自治区科技重大专项(2021SZD0043); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划(NJYT-20-B16); 校企合作项目(马铃薯氮素高效利用技术与应用); 内蒙古自治区2021年研究生科研创新项目(S20210223Z)。

作者简介: 张娇娇(1998-), 女, 硕士研究生, 从事植物营养生理研究。

***通信作者(Corresponding author):** 秦永林, 博士, 高级实验师, 主要从事植物养分高效利用研究, E-mail: imauqyl@163.com。

是1980年的3.3倍, 农田土壤平均磷累积量高达242 kg/hm²^[2]。随时间推移, 农田土壤磷素大量累积, 土壤速效磷含量超过一定临界值时, 磷淋溶风险将大幅增加, 加剧了环境污染风险。另一方面, 磷肥生产依赖于大量开采磷矿资源, 从全球磷矿资源储量来看, 尽管中国磷矿储量有33亿t^[3], 约占世界储量的4.8%^[4], 但磷矿资源更新周期长, 依据目前磷的消费需求与开采速度, 预测磷矿在未来50~400年耗竭^[5-7]。据2020年统计数据显示, 中国农田磷素累积高达1.15亿t, 与中国近10年的磷肥生产总量相当^[8]。因此, 综合兼顾作物高产优质、资源永续利用与环境友好, 活化农田土壤中难以被利用的磷素, 挖掘累积磷素再利用潜力, 是实现作物减磷增效的重要途径。

土壤磷活化剂是将难溶性磷转变为作物可利用磷的外源添加剂总称, 其可降低土壤对磷的吸附固定^[9], 促进土壤磷素形态转化^[10]、增加磷素有效性^[10], 进而提高作物磷素的吸收利用效率。本文概述了农田土壤磷素的形态及转化, 总结了土壤磷活化剂的应用研究, 重点分析了土壤磷活化剂在马铃薯种植中应用的意义及亟待解决的问题, 为马铃薯磷肥减施增效提供参考。

1 土壤磷素的形态及转化

1.1 土壤磷素的形态

土壤磷素包括无机磷和有机磷两种形态, 无机磷占土壤磷总量的60%~80%^[11], 植物根系可直接吸收利用H₂PO₄⁻和HPO₄²⁻两种形式的无机磷, 而不能直接吸收利用被土壤吸附固定的离子态磷。通常施入农田的化学磷肥为无机磷, 大致有3种形态: 水溶态、吸附态和矿物态。采用磷素分级的方法可更加准确研究磷素对植物的有效性, 如, 早在1957年, Chang和Jackson^[12]首次提出较为系统的土壤无机磷分级方法, 适用于酸性和中性土壤的磷素分级, 将无机磷分为Al-P、Fe-P、O-P、Ca-P四级; 1989年, 蒋柏藩和顾益初^[13]改进了磷素分级方法, 将土壤无机磷中的Ca-P分为Ca₂-P、Ca₈-P和Ca₁₀-P, 该方法适用于石灰性土壤的无机磷组分研究; 沈仁芳和蒋柏

藩^[14]研究分析指出无机磷的不同形态间有效性存在较大差异, 其中, Ca₂-P是作物容易吸收的第一有效磷源, Fe-P、Ca₈-P、Al-P是作物的第二有效磷源, 而O-P和Ca₁₀-P在短时间内不易被作物吸收利用, 是作物的潜在磷源。

有机磷主要由肌醇磷酸、核酸、磷脂、微生物磷以及少量磷蛋白和磷酸糖等组成, 其中, 磷酸酯占有机磷总量的1%~5%, 微生物磷占1.4%~5%, 核酸类有机磷占5%~10%, 肌醇磷酸盐的含量最高占20%~50%^[15,16], 还有30%左右的有机磷有待于进一步研究^[17]。土壤有机磷在酶的作用下可矿化分解成无机磷^[18], 部分可溶性有机磷化合物可被植物直接吸收利用。

1.2 土壤磷素的转化

1.2.1 土壤磷素的固定

化学反应固定和吸附固定是磷在土壤中固定主要的2种方式^[19]。化学反应固定指磷吸附在碳酸钙、铁铝矿物表面时, 会与矿物质反应, 形成化学沉淀。如, 磷与土壤中碳酸钙发生化学反应固定过程为: 磷被碳酸钙迅速地吸附, 之后被吸附的磷可进一步生成磷酸二钙, 接着磷酸二钙再慢慢向溶解度更小的磷酸八钙转变, 随后, 磷酸八钙缓慢地转化为稳定的磷酸十钙(即羟基磷灰石)^[20]。

离子交换吸附和配位吸附是土壤对磷的吸附固定2种类型^[21]。离子交换吸附是在土壤矿物或黏粒表面磷酸根通过取代其他吸附态阴离子而被吸附, 与配位吸附相比吸附性弱, 被吸附的磷酸根容易被其他阴离子解吸; 所谓配位吸附, 是指磷酸根与土壤胶体表面上的-OH发生交换形成离子键或共价键, 在配位吸附初期阶段, 磷酸根与土壤胶体表面上的-OH进行配位交换, 放出OH⁻, 形成单键吸附, 随时间的推移被吸附的磷酸根会与相邻的-OH发生第二次配位交换, 进而释放OH⁻, 通过双键吸附最终生成稳定的环状化合物^[22,23]。土壤中磷的有效性大大降低, 通常磷的吸附主体是土壤中的碳酸钙、无定形氧化铁、氧化铝和土壤黏粒^[19]。

1.2.2 土壤磷素的活化

土壤磷的活化是促进土壤有效性低的无机磷

形态向有效性高的形态转变的过程, 主要包括(1)可溶性磷酸盐的释放: 土壤中难溶性磷酸盐在有机酸、碳酸等酸性物质作用下转变为可溶性磷酸盐; (2)无机磷的解吸: 土壤颗粒吸附态磷经过解吸作用重新进入土壤溶液; (3)有机磷的矿化: 有机磷在磷酸酶等作用下转化为无机磷^[24]。

2 土壤磷活化剂在农业生产中的应用研究

目前研究的磷素活化物质主要有: 低分子量有机酸、高分子量有机酸、磷酸酶及其激活剂、微生物菌肥、复杂有机物质、高表面积与高表面活性物质以及其他类物质。

2.1 低分子量有机酸

土壤低分子量有机酸主要来源于动植物残体分解、微生物合成及植物根系分泌, 一般具有一至数个羧基的小分子碳水化合物。如, 草酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸、琥珀酸、乳酸、丙酮酸、甲酸、乙酸、丙酸、乙醇酸、草酰乙酸、酚酸、蜡酸、顺-乌头酸、异柠檬酸、延胡索酸、戊酸等^[25]。目前, 对低分子量有机酸活化土壤磷的机理已有共识, 认为低分子量有机酸通过电离 H^+ 、配位交换及络合作用来溶解和转化一些土壤中难溶性含磷矿物, 释放并增加磷素生物有效性。

不同类型低分子量有机酸及其浓度对不同土壤的磷活化效果不同^[26,27]。如, 在红壤无机磷活化室内模拟试验研究中, 相同浓度下土壤磷活化效果为: 柠檬酸 > 酒石酸 > 苹果酸, 且 100 mmol/L 柠檬酸在土壤浸提 10 次的磷素累积活化量可达全磷量的 17.02%^[28]; 草酸在小于 0.5 mmol/L 低浓度时活化能力最小, 高于 5 mmol/L 时活化能力最大^[29]; 在菜地土壤有效磷活化中, 0.1 mol 草酸、柠檬酸处理后对土壤速效磷分别增加 78%、0.5%^[30]。

受农田土壤多因素的影响, 多数低分子量有机酸对土壤磷活化的研究停留在室内与模拟试验, 其对土壤有机磷的活化机制研究深度远不及土壤无机磷方面, 缺乏低分子量有机酸与磷肥施用之间协同增效机制的研究。因此, 开展不同作物体系中磷肥施用与低分子量有机酸活化土壤磷的互作效应及增效评价研究, 有助于低分子量有

机酸在减磷增效绿色农业发展中发挥更大作用。

2.2 高分子量有机酸

关于土壤磷活化研究的高分子量有机酸类物质主要有腐植酸与木质素。高分子量有机酸结构复杂, 通常有多种官能团, 主要有羧基、酚羟基、甲氧基和羟基, 还有含氮的环状化合物等, 属于大分子聚合物^[31,32]。国内外研究将高分子量有机酸活化土壤磷素、保护肥料磷有效性的作用机理主要归纳为: 交换吸附学说、螯(络)合学说、酸效应学说、刺激效应学说、吸附位点消减效应学说、离子桥效应学说几个方面。

施用腐植酸、木质素可增加耕层土壤速效磷含量, 提高磷肥利用效率^[33]。如, 在灰漠土棉田施入腐植酸土壤速效磷含量显著提升, 且随腐植酸用量增加而增加, 腐植酸能使土壤稳定持续供应速效磷^[34]; 在潮土上施用腐植酸磷肥可使玉米表观磷肥利用率提高 5.9%~13.1%^[35]; 张清东^[36]研究表明木质素浓度越高时, 降低土壤对磷的吸附固持能力就越强; 在紫色土上玉米的木质素缓释肥料研究显示, 相比普通无机磷肥, 木质素缓释肥料磷肥利用效率可增加 61.8%^[37]。

目前, 高分子量有机酸的研究报道主要集中在腐植酸, 但从土壤磷活化角度的腐植酸应用研究比例较少, 腐植酸活化土壤磷与减少磷肥固定的双重效应仍未解析清楚, 腐植酸在不同作物上提高磷肥效率的应用技术体系需加强研究。

2.3 磷酸酶及其激活剂

土壤磷酸酶、植酸酶等物质的矿化作用被认为是活化土壤有机磷的主要原因^[38], 许多有机磷在磷酸酶的作用下可转化为无机磷后被植物所利用。例如, 研究发现水稻根际土壤中磷酸酶的活性与有机磷的耗竭度有显著的相关性^[38], 通过外源植酸酶的施加, 可以显著提高甜茶幼苗土壤的磷酸酶活性^[39]。另外, 通过加入还原型谷胱甘肽(GSH)、抗坏血酸等激活磷酸酶的物质, 可强化土壤磷酸酶的酶促反应, 提高磷酸酶活性, 进而改变土壤中的磷有效性^[10]。如, 李亮^[40]在水稻田土壤中施加抗坏血酸和还原型 GSH, 均提高了土壤速效磷含量, 其中抗坏血酸增加土壤速效磷的

量与相同浓度柠檬酸效果相同, 可以认为是抗坏血酸具有还原性, 作为辅酶使磷酸单酯酶活性增强, 从而促进有机磷的矿化。

2.4 微生物菌肥

添加解磷菌株、VAM 菌株等微生物菌肥可将土壤中难溶性磷转化成可溶性磷, 以提高土壤磷素利用率。解磷微生物主要通过分泌酶类矿化有机磷、有机酸溶解无机磷, 发挥土壤磷活化的作用。有机解磷微生物分泌细胞外的酶类, 如磷酸酶、植酸酶、核酸酶和脱氢酶等能够起到使有机磷化合物矿化的作用; 伊鋈^[41]研究解磷菌 PSB28 在溶磷过程获得较多种类和含量的有机酸, 有机酸与难溶性磷酸盐中的金属阳离子螯合而起到解磷的作用。此外, 微生物菌肥还可通过促进植物根系分泌有机酸, 进而促进磷素养分的吸收利用, 提高磷素利用率。

目前, 微生物菌肥中添加的解磷菌株因受土壤环境的影响使得磷活化效果并不稳定, 缺乏适用于多数土壤的解磷菌微生物菌肥。

2.5 复杂有机质

农业生产常用的有机肥可作为磷素活化剂。大量研究发现, 有机肥具有活化磷素和减弱磷肥固定的作用, 如, 唐晓乐等^[42]研究发现低温条件下, 施用有机肥可提高土壤有效磷 111.5%, 能够提高土壤酸性磷酸酶活性。目前, 有机肥活化土壤磷素的机理相对复杂, 没有完全解析清楚, 同时针对不同作物体系, 缺乏基于活化土壤磷素的有机肥减磷增效技术研究。

2.6 高表面积与高表面活性物质

常见的粉煤灰和沸石粉等是高表面积与高表面活性物质, 具有一定的土壤磷活化效果。如, 朱江和周俊^[43]研究结果表明, 不同性质土壤施用粉煤灰后, 可提高有效磷 13.6%~22.6%, 以天然沸石吸附和氨化为交换体再释放土壤中累积的难溶性磷, 磷释放总量是常规施肥的 4.0~8.7 倍; 魏静和周恩湘^[44]报道添加沸石的磷矿粉可使速效磷增加 182.9%。

2.7 其他

生长类激素可促进作物根系生长, 间接提升

根际土壤磷素的活化, 提高作物磷素的吸收利用效率。如, 刘世亮等^[45]研究表明使用 ABT 生根粉浸种后, 小麦根系生长迅速, 小麦吸磷量显著增加, 磷肥利用率可提高 12%。

络合物类物有对金属离子的络合作用及对细胞膜的破坏作用, 可增加土壤磷素的活化。如, 厌氧发酵过程中, 添加 19.5 mmol/L EDTA 可使磷酸盐沉淀中的磷几乎全部被释放, 而未添加组的磷只有 57% 被释放, 同时生物固体释磷率为 82%, 远高于不添加 EDTA 时的 40%^[46]。

3 土壤磷活化剂在马铃薯上的应用潜力

3.1 土壤磷活化剂在马铃薯生产中应用的意义

马铃薯是中国第四大主粮作物, 2021 年种植面积约为 460.6 万 hm^2 , 居世界第一。相比其他作物, 马铃薯是一种需磷量较大的作物。马铃薯生产相同干物质所需吸收磷素的数量与玉米相当^[47], 生产 1 000 kg 块茎需 P_2O_5 为 1.00~1.50 kg^[48]。由于马铃薯是典型的浅根系作物, 根长及根系密度小, 养分吸收能力相对较低, 磷肥利用率远低于小麦、玉米等作物^[49], 再加上缺乏高效磷肥利用技术, 马铃薯当季磷肥利用率仅为 11.2%~15.6%^[50], 大部分的磷肥被固定累积到农田土壤中。因此, 通过应用土壤活化剂增加马铃薯田累积磷素的有效性, 进而提高马铃薯磷素吸收利用效率, 将对马铃薯减磷增效、减少磷矿资源浪费及降低环境风险兼具重要意义。

3.2 马铃薯生产应用土壤磷活化剂亟待解决的问题

综上, 土壤磷素活化剂虽种类丰富, 但在马铃薯上的应用研究却很少, 有许多问题待深入研究。

(1) 马铃薯产区土壤类型多样, 需开展不同土壤类型马铃薯田土壤磷素活化剂的筛选试验及其增产增效机理研究。

(2) 解析磷素活化剂对马铃薯田土壤磷活化与减少磷肥固定的双重效应, 定量化马铃薯磷肥减施下的土壤磷活化剂应用技术参数。

(3) 明确不同磷素肥力马铃薯田土壤磷素活化剂应用的种类、时间、位置及用量。

(4)挖掘多种土壤磷素活化剂应用技术组合在马铃薯减磷增效上的潜力。

(5)确立马铃薯土壤磷素活化剂应用的生态效益评价指标和评价方法。

[参 考 文 献]

- [1] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展 [J]. 作物杂志, 2010(1): 12-14.
- [2] Li H, Huang G, Meng Q, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review [J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1): 157-167.
- [3] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries [R]. Commonwealth of Virginia: United States Geological Survey, 2020.
- [4] 鲍荣华, 姜雅. 2015年世界磷矿资源现状及开发利用 [J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(4): 1-4.
- [5] Reijneveld J A, Ehlert P A I, Termorshuizen A J, *et al.* Changes in the soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century [J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(4): 399-411.
- [6] Sattari S Z, Bouwman A F, Giller K E, *et al.* Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(16): 6348-6353.
- [7] 马进川. 我国农田磷素平衡的时空变化与高效利用途径 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [9] Roy P, Tarafdar J C, Singh A P. Enhancing phosphorus release from Mussoorie rock phosphate by blending with organic materials and phosphate solubilizers [J]. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 1999, 47(2): 372-375.
- [10] 朱静. 磷素活化剂对小麦土壤磷形态转化及活化效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [11] Lu R K. Methods of agricultural chemical analysis in soil [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 169-175.
- [12] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus [J]. *Soil Science*, 1957, 84(2): 133-144.
- [13] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究 [J]. *中国农业科学*, 1989, 22(3): 58-66.
- [14] 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(1): 80-86.
- [15] 张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1775-1782.
- [16] 张泽兴. 北方主要农作物种植区典型土壤无机磷形态分布特征及其有效性 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [17] 林开森, 杨智杰, 杨玉盛. 不同更新方式森林土壤磷素形态及有效性分析 [J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 36(1): 96-103.
- [18] 曲博. 湿地土壤磷酸酶活性对土壤有机磷形态转化的影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [19] 安迪, 杨令, 王冠达, 等. 磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用 [J]. *化工进展*, 2013, 32(8): 1967-1973.
- [20] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展 [J]. *土壤学进展*, 1990(6): 1-5, 19.
- [21] 陆文龙, 张福锁, 曹一平. 磷土壤化学行为研究进展 [J]. *天津农业科学*, 1998(4): 3-9.
- [22] 宋付朋. 长期施磷石灰性土壤无机磷形态特征及其有效性研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [23] 夏汉平, 高子勤. 磷酸盐在土壤中的吸附 [J]. *土壤通报*, 1992(6): 283-287.
- [24] Antelo J, Arce F, Avena M, *et al.* Adsorption of a soil humic acid at the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate [J]. *Geoderma*, 2007, 138(1-2): 12-19.
- [25] 莫淑勋. 土壤中有机的产生、转化及对土壤肥力的某些影响 [J]. *土壤学进展*, 1986(4): 1-10.
- [26] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 低分子量有机酸对不同磷酸盐的活化作用 [J]. *华北农学报*, 2001(1): 99-104.
- [27] 刘永红, 马舒威, 岳霞丽, 等. 土壤环境中的小分子有机酸及其环境效应 [J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(2): 133-138.
- [28] 王艳玲, 何园球, 李成亮. 柠檬酸对红壤磷的持续活化效应及其活化机理的探讨 [J]. *土壤学报*, 2007(1): 130-136.
- [29] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 等. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(4): 692-697.
- [30] 梁玉英, 黄益宗, 孟凡乔, 等. 有机酸对菜地土壤磷素活化的影响 [J]. *生态学报*, 2005(5): 1171-1177.
- [31] 蒋柏藩. 土壤磷的化学行为与有效磷的测试 [J]. *土壤*, 1990

- (4): 181–183, 189.
- [32] 贾沙沙, 秦永林, 樊明寿, 等. 腐植酸的农业应用机制及其在马铃薯生产上亟待解决的问题 [J]. 中国马铃薯, 2020, 34(1): 53–57.
- [33] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 腐殖酸和改性木质素对土壤磷有效性影响的研究进展 [J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 1003–1009.
- [34] 王斌, 马兴旺, 许咏梅, 等. 腐植酸对灰漠土棉田土壤无机磷形态的影响 [J]. 新疆农业科学, 2007(3): 312–317.
- [35] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 641–648.
- [36] 张清东. 木质素对土壤-磷吸附作用的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006(1): 152–155.
- [37] 朱启红, 伍钧. 新型木质素缓释肥料氮磷利用率研究 [J]. 农机化研究, 2006(9): 141–143.
- [38] 李永夫. 水稻适应低磷胁迫的营养生理机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [39] 杨萍萍, 杨洪强, 毕润霞, 等. 外源植酸酶对土壤磷酸酶、微生物及平邑甜茶幼苗生长的影响 [J]. 山东农业科学, 2013, 45(10): 81–85.
- [40] 李亮. 稻田土壤遗存磷的赋存形态、微生物酶学转化及活化技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [41] 伊望. 高效解磷细菌的筛选及解磷机理的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [42] 唐晓乐, 李兆君, 马岩, 等. 低温条件下黄腐酸和有机肥活化黑土磷素机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 893–899.
- [43] 朱江, 周俊. 粉煤灰对土壤中有效磷的影响 [J]. 农业环境保护, 1999, 18(4): 189–191.
- [44] 魏静, 周恩湘. 不同活化剂对磷矿粉的活化作用 [J]. 河北农业大学学报, 2001, 24(1): 13–15.
- [45] 刘世亮, 骆永明, 介晓磊, 等. ABT生根粉提高作物磷素利用率的效果探讨 [J]. 土壤, 2002(3): 152–155.
- [46] Zou J, Zhang L, Wang L, *et al.* Enhancing phosphorus release from waste activated sludge containing ferric or aluminum phosphates by EDTA addition during anaerobic fermentation process [J]. Chemosphere, 2017, 171: 601–608.
- [47] 邢海峰. 内蒙古阴山北麓滴灌条件下高产马铃薯群体发育、磷素营养特点及磷肥运筹策略研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [48] 高媛, 韦艳萍, 樊明寿. 马铃薯的养分需求 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(3): 182–187.
- [49] Iwama K. Physiology of the potato: new insights into root system and repercussions for crop management [J]. Potato Research, 2008, 51(3): 333–353.
- [50] 秦永林, 于静, 陈杨, 等. 内蒙古灌溉马铃薯施肥现状及肥料利用效率 [J]. 中国蔬菜, 2019(11): 75–79.