

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2019)05-0309-05

综 述

磷素营养诊断技术的发展及其在马铃薯生产中的应用前景

孔 硕¹, 樊明寿¹, 秦永林^{1*}, 贾立国¹, 陈 杨², 于 静¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘 要: 利用磷素营养诊断技术, 科学地指导作物生产中的磷肥施用, 可大幅度提高磷肥利用效率, 减少肥料浪费与降低环境风险。从植株外观诊断、土壤分析诊断、无损测试法、植物组织分析诊断、生理生化分析诊断等方面综述了磷素营养诊断技术的原理、优缺点及其应用, 并在分析马铃薯生产中开展磷素营养诊断意义的基础上, 提出了磷素营养诊断亟待解决的问题, 为马铃薯磷肥高效管理提供参考。

关键词: 磷素; 诊断技术; 马铃薯

Development of Phosphorus Nutrition Diagnosis Technology and Its Application Prospect in Potato Production

KONG Shuo¹, FAN Mingshou¹, QIN Yonglin^{1*}, JIA Ligu¹, CHEN Yang², YU Jing¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2. College of Grassland and Resource Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: Dressing of phosphate fertilizer based on nutrition diagnostic technology could greatly improve the phosphorus utilization efficiency, reduce fertilizer waste and environmental risk in crop production. The principles, advantages and disadvantages of phosphorus nutrition diagnosis technology and its application were reviewed from the aspects of plant appearance diagnosis, soil analysis and diagnosis, non-destructive testing, plant tissue analysis and diagnosis, and physiological and biochemical analysis and diagnosis. Based on the analysis of the significance of phosphorus nutrition diagnosis in potato production, the major problems of phosphorus nutrition diagnosis were put forward, which would provide a reference for efficient management of phosphate fertilizer in potato production.

Key Words: phosphorus; diagnosis method; potato

磷素是植物生长发育必需的营养元素。在农业生产中, 磷肥的施用是作物增产的重要保证, 但施入土壤的磷肥不能完全被植株吸收, 大部分磷肥被土壤固定而无效化, 多数农作物的当季磷肥利用率仅有 10%~20%^[1], 另一方面, 磷肥来源于开采磷矿资源, 而中国高品质磷矿资源可开采年度不超过 10 年^[2]。与此同时, 磷素是地表水体

污染及营养化的决定因子^[3], 土壤中不断大量累积的磷素, 容易造成磷素的淋溶与径流损失而进入水体, 成为严重的生态环境污染问题。因此, 提高农业生产的磷肥利用率是实现农业可持续发展与生态环境安全的必然要求, 此举不仅具有战略意义, 更有现实意义。

磷素营养诊断是通过对土壤或者作物进行磷素

收稿日期: 2019-06-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200, 2018YFD0200801); 内蒙古科技创新引导项目(KCBJ2018010)。

作者简介: 孔硕(1996-), 男, 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, 实验师, 主要从事植物养分高效利用研究, E-mail: qyl3339@163.com。

营养状况的直接或间接评价, 籍此确定作物体系是否需要施用磷肥以及需要多少, 是实现磷肥高效利用的重要途径。本文从外观诊断法、土壤分析诊断法、无损测试法、植物组织分析诊断法、生理生化分析法以及其他诊断方法分别总结了磷素营养诊断技术的原理、特点及其发展, 重点分析了磷素营养诊断在马铃薯生产中应用的意义以及需要解决的研究问题, 旨在为马铃薯的磷肥高效管理提供参考。

1 磷素营养诊断方法的原理与应用

磷素的营养诊断方法主要有外观诊断法、土壤分析诊断法、无损测试法、植物组织分析诊断法、生理生化分析以及其他诊断方法, 分别介绍其原理、优缺点及其应用。

1.1 植株外观诊断法

外观诊断法是依据植株表型判断是否缺磷的方法。由于作物生物学特性的差异, 磷素缺乏后会有不同症状。马铃薯对磷素的需求少于氮、钾矿质元素, 但磷素缺乏后, 生育初期症状明显, 植株生长缓慢, 矮小或细弱僵立, 缺乏弹性, 分枝减少, 叶片和叶柄均向上竖立, 叶片变小而细长, 叶缘向上卷曲, 叶色暗绿而无光泽; 严重缺磷时, 植株基部小叶的叶尖首先退绿变褐, 并逐渐向全叶发展, 最后整个叶片枯萎脱落, 症状从基部叶片开始出现, 逐渐向植株顶部扩展。缺磷还会使根系和匍匐茎数量减少, 根系长度变短, 块茎内部发生锈褐色的创痕, 创痕随着缺磷程度的加重, 分布亦随之扩展^[4]。

外观诊断的优点是简单、方便和直观, 在田间可随时进行诊断并给予施肥指导。但此方法只有在作物表现出明显缺素症状后才能做出判断, 时效性差, 不能发挥预防的功能; 同时此诊断方法主要是凭借经验, 判定的结果多为定性, 因人而异, 难以保证准确性。除此之外, 外观诊断有时容易与非营养因素引起的症状混淆, 尤其当两种或两种以上元素盈缺出现相似症状时, 大大增加了做出正确诊断的难度, 故此方法在实际应用中有着严重的局限性。

1.2 土壤分析诊断法

土壤分析诊断法是通过采集土壤样品和标准化制备处理, 再用化学方法或仪器分析等方法测定土

壤样品中的营养元素含量, 通过土壤与植株之间的营养元素吸收、运转和代谢规律分析, 判断出所生长的环境能否提供植株健康生长发育所必需的营养条件, 间接诊断出植株营养水平的方法。磷素在土壤中存在的形式有多种, 对植株的有效性也不同, 植株能够吸收利用土壤中的磷主要是速效磷^[5], 速效磷是限制作物生长的主要因子。目前磷肥推荐主要依据土壤速效磷含量进行^[6-8], 但是土壤速效磷含量的测定结果受很多因素影响, 如土壤pH、提取温度、提取剂等, 因此, 常因测定者使用不同测定方法而使结果不具可比性。

1.3 植株无损测试法

1.3.1 高光谱诊断

高光谱诊断技术利用农作物对某些特定波段光谱吸收与反应特征^[9], 进而反演出植株的属性^[10]。Al-Abbas等^[11]开始将光谱技术应用到磷素诊断之后, 很多学者在不同作物上研究了磷素营养与光谱的关系, 在玉米、小麦、大豆等作物上取得了一定成果^[12-20]。本文总结了表征不同作物磷素营养状况的敏感光谱波段(表1), 从表1中可看出, 敏感波段主要集中在可见光和近红外光, 然而迄今尚未见到基于光谱诊断的磷肥推荐报道。将光谱诊断技术应用作物磷肥管理实践尚有一段距离。

1.3.2 数字图像处理技术

数字图像处理是将图像信号转换成数字信号并利用计算机对其进行增强、除噪、分割、复原、编码、压缩、提取特征的过程。数字图像具有再现性好、处理精度高、适用面宽、灵活性高的优点。借助于数字图像处理技术可以快速、经济、可靠的对植物进行病害识别、植物营养诊断、农作物长势预测^[21-26]。

与氮素营养相比, 磷素营养诊断的数字图像处理技术的研究尚处于起步阶段, 仅在水稻、油菜上有报道^[27-29], 如陈利苏^[27]扫描获取水稻叶片、叶鞘的图像后, 利用机器视觉技术提取水稻叶片和叶鞘的特征, 并根据所获得的特征与水稻氮磷钾营养状况间的关系, 筛选出符合植物营养机理且具有特异性的特征组合来建立识别规则与诊断模型。

1.4 植物组织分析诊断法

作物体内的养分情况直接反映其营养水平, 所

表 1 不同作物的磷素营养敏感光谱波段

Table 1 Sensitive spectral bands of phosphorus nutrition in different crops

序号 No.	作者 Author	作物 Crop	光谱波段 Spectral band	
			可见光(nm) Visible light	近红外光(nm) Near infrared light
1	AL-Abbas 等 ^[11]	玉米	830,940,1 100	
2	Ager 等 ^[12]	大豆	红光区,绿光区表现出增加趋势	
3	程一松等 ^[13]	夏玉米	80~710	
4	Osborne 等 ^[14]	玉米	440~445,730~780	780~930
5	任红艳 ^[15]	小麦	560,760	810~1 100
6	王磊等 ^[16]	春玉米	350~730	1 420~1 800
7	刘炜等 ^[17]	冬小麦	426~435,669~680	
8	刘冰峰等 ^[18]	玉米	(830 和 880),(830 和 940),(880 和 1 100)	
9	王乐辉等 ^[19]	小麦	730~780	780~900
10	师祖姣 ^[20]	冬小麦	450~680,750~770	780~1 330

以作物某一组织或器官的养分含量常被用来作为推荐施肥的指标。目前关于植物组织磷素营养诊断指标主要有植株全磷含量^[30,31]、叶片全磷含量^[32-34]、植物组织液含磷量^[35-37]。3 种方法皆对植株具有破坏性,其中测定植株或叶片全磷操作繁琐,工程量大,相对时效性差;植物组织液测定能够快速在田间获得结果,但其测定浓度不仅会随土壤肥力变化,而且还会因植物生育期、品种、取样的植物部位和环境而变化。因此,基于测试作物组织液浓度的磷肥推荐,必须筛选作物对磷素敏感的器官或部位,才能建立基于该测试部位的磷素营养诊断指标体系,同时进一步研究消除品种与地域差异的方法,扩大基于组织液磷浓度测试推荐施肥的应用范围。

1.5 植株生理化学分析

早在 1952 年, Brown 和 Hendricks^[38]已经开始用酶活性的强弱作为一种植株营养诊断的指标,之后很多学者也研究发现植物酸性磷酸酶活性与植物的磷营养状况有密切关系,可以将该酶用于检测植株缺磷^[39-41]。现已在番茄^[42,43], 柑桔^[44], 玉米^[45], 小麦^[46]上尝试运用磷酸酶活性来进行磷素缺失的诊断。虽然研究表明叶片酸性磷酸酶测定值与植物缺磷值相近,是一种较好的测定方法,但会受植株生育期和水分的影响,并且在植株初期和中度缺磷时表现不

敏感,该技术还未能成熟地应用到实际生产指导中,仍需要进一步建立一整套完备体系。

1.6 其他诊断方法

除上述提到的磷素诊断方法外, Li 等^[47]还证实了电阻抗法检测番茄缺磷的可行性,并尝试建立了全磷值与电阻抗之间的回归模型;通过转基因技术, Li 等^[48]将从花椰菜中分离出的一个可以用来检测植物磷素状态的紫色基因(*Pr*)转入到烟草中,利用高光谱传感技术建立了基于颜色的视觉报告系统。

2 马铃薯生产中磷素营养诊断技术的应用前景

2.1 开展磷素营养诊断的意义

中国是世界上最大的马铃薯生产国,但马铃薯养分管理技术远远落后于欧美发达国家,加之马铃薯是典型的浅根系作物,吸磷能力弱,是实现马铃薯高产高效的限制性短板。因此提高马铃薯磷肥利用率是目前马铃薯产业的重要任务。

在玉米^[49]、棉花^[50]上的研究表明,借助磷素营养诊断可增加磷肥供应与植株磷素需求的匹配度,大幅度提高磷肥利用率。但关于马铃薯磷素营养诊断的研究目前尚为空白。因此,根据马铃薯磷素营养特点,建立适合马铃薯的磷素营养诊断指标体系,成为磷肥精准施用而大幅提高马铃薯磷肥利用效率的突破口。

2.2 马铃薯磷素营养诊断亟待解决的问题

2.2.1 诊断方式的选择

综合考虑营养诊断对时效性、准确性、操作简便性等方面的要求, 比较以上各种磷素营养诊断法, 植物组织液的测试有望成为马铃薯磷素营养诊断方法。

2.2.2 组织液测试时间和测试部位的确立

植物组织液测定的浓度不仅会随土壤肥力变化, 而且还会因植物生育期、品种、取样的植物部位和环境而变化, 因此必须确定植株最佳测试时间和部位。He等^[51]曾通过水培番茄发现叶柄的磷素养分浓度在一天中变化极小, 且几乎不受天气变化影响, 但在马铃薯上是否如此还不得而知。马铃薯倒4叶是完全展开叶, 且其叶柄已被广泛用于氮素营养诊断, 基于此, Vos^[52]以及Reid和Bielecki^[39]认为倒4叶柄是进行磷素诊断的最佳部位, 但叶柄含磷量的稳定性如何? 对土壤及肥料磷反应的敏感性如何? 其与植株磷素吸收的关系以及与植株生育、产量的关系如何? 这些均为马铃薯磷素营养诊断亟待解决的问题。

[参 考 文 献]

- [1] 尹飞虎, 康金花, 黄子蔚, 等. 棉花滴灌随水施滴灌专用肥中磷素的移动和利用率的研究³²P研究[J]. 西北农业学报, 2005, 14(6): 199-204.
- [2] 杜春丽, 黄曼, 洪诗佳. 我国磷矿资源开发利用研究综述[J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(4): 32-38.
- [3] Van der Wal A, De Boer W, Lubbers I M, *et al.* Concentration and vertical distribution of total soil phosphorus in relation to time of abandonment of arable fields[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(1): 73-79.
- [4] 樊明寿, 贾立国, 邢海峰, 等. 马铃薯矿质营养生理及养分管理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 96-97.
- [5] 高祥照, 胡克林, 郭焱, 等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 660-666.
- [6] 胡伟, 邵华伟, 周建朝. 新疆甜菜营养诊断指标研究[J]. 中国糖料, 2016, 38(2): 12-14.
- [7] 顾明华, 白厚义, 沈方科, 等. 龙眼磷素营养诊断技术的研究[J]. 广西农业生物科学, 2002, 21(1): 32-36.
- [8] 连楚楚, 丁堃, 石阶平. 水稻磷素营养诊断及磷肥施用量模式的研究[J]. 江西农业大学学报, 1989, 11(1): 7-12.
- [9] 常庆瑞, 蒋平安, 周勇, 等. 遥感技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 323.
- [10] 张浩, 姚旭国, 张小斌, 等. 基于多光谱图像的水稻叶片叶绿素和籽粒氮素含量检测研究[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 555-558.
- [11] Al- Abbas A H, Barr R, Hall J D, *et al.* Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves[J]. *Agronomy Journal*, 1974, 66(1): 16-20.
- [12] Ager C M, Milton N M, Eiswerth B A. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36(2): 121-127.
- [13] 程一松, 胡春胜, 王成, 等. 养分胁迫下的夏玉米生理反应与光谱特征[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 54-58.
- [14] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, *et al.* Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(6): 1215-1221.
- [15] 任红艳. 基于冠层光谱的冬小麦N、P营养和水稻Pb污染监测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [16] 王磊, 白由路, 杨俐苹. 春玉米磷素营养的光谱响应及诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 802-808.
- [17] 刘伟, 常庆瑞, 郭曼, 等. 冬小麦导数光谱特征提取与缺磷胁迫神经网络诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 1092-1096.
- [18] 刘冰峰, 李军, 贺佳. 玉米叶片全磷含量高光谱遥感监测诊断模型研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 252-258.
- [19] 王乐辉, 吉宇, 舒芳, 等. 小麦生长及叶片磷含量与高光谱反射率的关系[J]. 广东气象, 2016, 38(1): 61-65.
- [20] 师祖姣. 旱作冬小麦氮磷配施增产效应与氮磷营养遥感诊断研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] 胡敏, 陈红波, 许良凤, 等. 基于颜色和纹理特征的黄瓜病害识别算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 970-977.
- [22] Rorie R L, Purcell L C, Karcher D E, *et al.* The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images[J]. *Crop Science*, 2011, 51(5): 2174-2180.
- [23] Lee K J, Lee B W. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 48: 57-65.
- [24] Jia L L, Chen X P, Zhang F, *et al.* Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China plain[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(3): 441-450.

- [25] 李红军, 张立周, 陈曦鸣, 等. 应用数字图像进行小麦氮素营养诊断中图像分析方法的研究 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 155–159.
- [26] 刘洪见. 图像处理技术在获取夏玉米冠层信息和氮肥诊断中的应用 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [27] 陈利苏. 基于机器视觉技术的水稻氮磷钾营养识别和诊断 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [28] 徐胜勇, 林卫国, 伍文兵, 等. 基于颜色特征的油菜缺素症图像诊断 [J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(4): 576–582.
- [29] 孙媛媛. 基于水稻叶片图像时空动态特征的氮磷钾营养诊断 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [30] 姜远茂. 红富士苹果矿质营养特性及营养诊断与施肥研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
- [31] 王永亮, 刘基业, 戴庆林. 荞麦植株氮磷含量与施肥指标的研究 [J]. 华北农学报, 1992, 7(2): 71–76.
- [32] 王艳, 王孝纯, 邓艳红, 等. 寒地水稻氮磷钾营养诊断技术的研究 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 208–211.
- [33] 顾明华, 白厚义, 沈方科, 等. 龙眼的磷素营养诊断 [J]. 广西农学报, 2003(S1): 124–128.
- [34] 罗献宝, 白厚义, 韦翔华, 等. 银杏磷素的营养诊断 [J]. 广西农学报, 2003(S1): 105–109.
- [35] 吴明才, 肖昌珍, 郑普英. 大豆磷素营养研究 [J]. 中国农业科学, 1999, 32(3): 61–67.
- [36] 杨明花. 杂交棉磷素营养诊断指标研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2010.
- [37] Gupta A, Saxena M C. Evaluation of leaf analysis as a guide to nitrogen and phosphorus fertilization of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Plant and Soil, 1976, 44(3): 597–605.
- [38] Brown J C, Hendricks S B. Enzymatic activities as indications of copper and iron deficiencies in plants [J]. Plant physiology, 1952, 27(4): 651–660.
- [39] Reid M S, Bieleski R L. Changes in phosphatase activity in phosphorus deficient *Spirodela* [J]. Planta, 1970, 94(4): 273–281.
- [40] Mclachlan K D. Comparative phosphorus responses in plants to a range of available phosphorus situations [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1976, 27(3): 323–341.
- [41] Besford R T. Nutrient imbalances in tomato plants and acid phosphatase activity in the leaves [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 30(3): 275–280.
- [42] Besford R T. A rapid tissue test for diagnosing phosphorus deficiency in the tomato plant [J]. Annals of Botany, 1980, 45(2): 225–227.
- [43] 林启美, 黄德明. 应用酸性磷酸酶进行番茄磷素诊断 [J]. 华北农学报, 1991, 6(2): 78–83.
- [44] 周家容, 周俊辉. 柑桔磷酸酯酶活性的测定方法探索 [J]. 仲恺农业技术学院学报, 1998, 11(3): 25–29, 36.
- [45] Elliott G C, Läuchli A. Evaluation of an acid phosphatase assay for detection of phosphorus deficiency in leaves of maize (*Zea mays* L.) [J]. Journal of Plant Nutrition, 1986, 9(11): 1469–1477.
- [46] Mclachlan K D, Elliot D E, Marco D, *et al.* Leaf acid phosphatase isozymes in the diagnosis of phosphorus status in field-grown wheat [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1987, 38(1): 1–13.
- [47] Li M, Li J, Mao H, *et al.* Diagnosis and detection of phosphorus nutrition level for *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance spectroscopy [J]. Biosystems Engineering, 2016, 143: 108–118.
- [48] Li Y, Gu M, Zhang X, *et al.* Engineering a sensitive visual-tracking reporter system for real-time monitoring phosphorus deficiency in tobacco [J]. Plant Biotechnology Journal, 2014, 12(6): 674–684.
- [49] 张国桥, 王静, 刘涛, 等. 水肥一体化施磷对滴灌玉米产量、磷素营养及磷肥利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1103–1109.
- [50] 李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 棉花高产和磷高效的磷肥基施追施配合技术研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 146–153.
- [51] He Y, Terabayashi S, Namiki T. The effects of leaf position and time of sampling on nutrient concentration in the petiole sap from tomato plants cultured hydroponically [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2008, 67(67): 331–336.
- [52] Vos J. The effects of nitrogen supply and stem density on leaf attributes and stem branching in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Potato Research, 1995, 38(3): 271–279.