

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24290

马铃薯的最佳肥料管理措施—“4Rs”养分策略

李书田, 王秀斌

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 合理施肥对提高马铃薯产量和改善品质至关重要。参照文献资料综述了马铃薯对养分尤其氮、磷、钾的需求量和移走量以及推荐施肥量; 阐述了如何实现马铃薯上最佳肥料管理措施, 即选择正确的肥料品种、用正确的用量、在正确的时期、施在正确的位置的4个正确(4Rs), 即4Rs养分管理策略, 重点阐述马铃薯生产中如何利用4Rs养分管理指导科学施肥, 旨在为马铃薯合理施肥提供参考。

关键词: 马铃薯; 最佳肥料管理; 4Rs养分管理

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是重要的粮食兼蔬菜作物, 2015年国家开始实施马铃薯主粮化战略, 马铃薯成为中国继水稻、小麦和玉米后“第四大主粮”^[1]。马铃薯还是重要的经济作物, 对保证我国粮食安全和农民增收起着重要作用。全球1/3的马铃薯来自发展中国家, 我国是世界上最大的马铃薯生产国, 据统计, 2022年全国马铃薯种植面积为453.5万hm², 产量为8941.5万t^[2]。我国马铃薯种植面积占世界马铃薯种植面积的27.8%, 总产量占世界总产的26.2%, 总产明显高于美国、英国、德国、荷兰和俄罗斯等国家^[3], 然而马铃薯单产水平仍低于欧美国家和世界平均水平^[4]。造成单产差距较大的原因众多, 其中合理的化肥施用是关键因素之一。

东北、华北、长江中下游、东南、西南和西北地区马铃薯播种面积分别占全国马铃薯播种总面积的2.44%、6.82%、8.22%、3.24%、51.71%和27.58%, 产量分别占3.15%、8.40%、7.64%、3.09%、49.89%和27.85%^[2], 因此, 西南和西北两个区域马铃薯面积和产量分别占全国的79.29%和77.74%, 是我国马铃薯主要产区。马铃薯主产区土壤贫瘠、养分含量低、养分投入不平衡是限制马铃薯产量和品质的重要因素, 尤其不合理施肥是限制马铃薯产量的主要因素。马铃薯施肥不合理普遍

存在, 肥料养分总用量普遍较高且施用比例不合理, 有机肥养分所占比例偏低^[5]。内蒙古水浇地马铃薯生产中氮肥投入过高, 磷、钾肥投入过量与不足并存^[6], 乌兰察布水浇地马铃薯过量施肥现象突出, 而旱地马铃薯钾肥施用量低, 旱地马铃薯有77.2%的农户施用有机肥, 而水浇地马铃薯只有20.3%的农户施用有机肥^[7]。云南马铃薯氮、磷、钾施用比例不协调, 钾肥施用明显不足, 基肥比例较大^[8]。青海省半干旱区马铃薯养分投入中存在的主要问题是氮肥和磷肥施用过量, 钾肥重视不足, 化肥偏多、有机肥偏少, 基肥偏多、追肥偏少^[9]。其他马铃薯种植区也存在施肥不合理问题, 如黑龙江省马铃薯上偏施磷、钾肥, 肥料品种单一^[10], 山东省马铃薯主产区施肥过量, 肥料利用率低, 而且导致土壤和水资源富营养化^[11], 广东省马铃薯施肥方法不科学, 化肥用量大, 尤其是氮肥和磷肥投入过多^[12]。当前, 马铃薯实际产量与潜在产量的产量差很大, 达到75%潜在产量时的氮、磷、钾养分需求量与当前养分投入差异也很大^[13], 因此, 充足、均衡、合理的养分投入是缩小产量差的最重要因素。为马铃薯生产提供所需养分需要关注4个主要的施肥因素, 即4Rs养分管理措施。4Rs养分管理的核心概念就是把植物养分的正确品种、用正确用量、在正确的时期、施在正确的位置的4个正确(right)管理措施, 因此称为4Rs养分管理措施。(1) 选择正确的肥料品种(根据土壤、气候、灌溉等条件选择什么肥料品种合适), (2) 确定正确的养分用量(根据土壤养分状况、作物对养分的需求、目标产量等确定应该

收稿日期: 2024-06-02; 录用日期: 2024-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200103)。

作者简介: 李书田(1966-), 研究员, 博士, 从事植物营养与施肥研究。E-mail: lishutian@caas.cn。



用多少养分), (3) 选正确的时期 (根据作物吸收养分规律、水分管理等确定什么时间施用肥料), (4) 施在正确的位置 (根据作物根系形态和分布, 结合耕作和管理措施, 把肥料施在合适的位置, 有利于根系吸收)^[14]。4Rs 养分管理将为作物生产提供充足的营养, 最大限度地提高养分利用率, 同时最大限度地减少养分流失到环境中的风险, 提高产量和收益。本研究将详细介绍马铃薯的养分需求和养分管理, 重点阐述马铃薯养分管理中如何利用 4Rs 养分管理措施指导科学施肥。

1 正确的肥料品种

马铃薯与其他作物一样需要大、中和微量元素, 确定合适的肥料品种要考虑土壤养分状况、气候条件、水分管理措施、当地可供肥料品种等因素。选择正确的肥料品种不仅能提高马铃薯产量和品质, 还能减少养分损失, 提高养分利用效率。

1.1 氮肥

最常用的可溶性氮肥有尿素、硫酸铵、尿素硝铵, 还有缓 (控) 释氮肥。缓 (控) 释氮肥有的添加硝化抑制剂 (如双氰胺) 或脲酶抑制剂 (如正丁基硫代磷酸三胺), 有些用无机材料 (如硫磺) 或有机聚合物 (树脂、聚乙烯等) 包膜。尿素应用最广, 最常见的使用方法是施入土中或土表, 也可通过灌溉施入和叶面喷施。硫酸铵同时含有氮和硫, 能同时满足马铃薯对氮、硫的需求, 尤其适合施用在土壤硫含量低的土壤上。尿素硝铵是一种液体肥料, 含氮 28% ~ 32%, 可与磷、钾和其他营养元素的溶液混合使用, 尿素硝铵可直接施用在土壤表面或通过滴灌或喷灌施用, 还可叶面喷施^[15]。研究表明, 滴灌马铃薯上施用尿素硝铵溶液与普通尿素相比可提高氮素利用率和减少施氮量^[16]。

缓 (控) 释氮肥可以随着时间调节氮素的释放, 通过实现养分释放与作物吸收的同步, 更能满足马铃薯在不同生长时期对氮素的需求, 尤其满足马铃薯块茎形成期对氮素快速吸收的要求, 提高氮肥利用率, 同时减少氮肥用量和施肥次数, 节约劳动力成本。缓 (控) 释氮肥非常适合水浇地马铃薯, 通过土壤水分调节氮素释放, 提高产量和氮肥利用率。试验表明, 在养分用量相同条件下, 控释尿素比普通尿素显著提高块茎产量和氮肥表观利用率^[17]。膜下滴灌技术配合缓释肥与常规施肥相比

可提高马铃薯块茎产量和肥料利用率^[18]。内蒙古水浇地马铃薯上的试验表明, 在相同氮素用量下, 施用控释尿素比普通尿素获得更高的产量和氮素利用率, 75% 推荐氮素用量下的控释尿素与 100% 推荐氮用量下的普通尿素相比, 产量相当, 氮素利用率提高, 说明施用控释尿素可以减少氮素用量 25%^[19]。即使在旱地马铃薯上控释尿素与普通尿素配合施用可使氮素利用率提高 4.4 ~ 4.8 个百分点, 同时促进了磷、钾肥的养分利用率^[20]。

1.2 磷肥

马铃薯上常用的磷肥有磷酸二氢铵 (MAP)、磷酸氢二铵 (DAP)、过磷酸钙 (SSP)、重过磷酸钙 (TSP)、钙镁磷肥等。DAP 和 MAP 对马铃薯而言是两种很好的磷源和氮源, 溶解度都很高, 施入土壤后很快在土壤中溶解释放出有效磷和氮。MAP 施入壤后其颗粒周围溶液呈弱酸性 (pH 4.0 ~ 4.5), 因此, 中性、石灰性土壤和较高 pH 的碱性土壤适合施用 MAP, 以减少氨挥发损失^[21]。颗粒 MAP 一般在土表下根系附近集中条施, 也常常撒施后通过翻耕与表土混合。高纯度的 MAP 可用于叶面喷施或加到灌溉水中施用, 但不能与钙镁肥混合施用。DAP 施入土壤后其颗粒周围呈碱性 (pH 7.5 ~ 8.0), 随着 DAP 颗粒中铵的溶解释放, 挥发的氨可能对直接接触的种子或根系产生毒害, 应避免将高浓度的 DAP 施用在种薯附近。TSP 是最早应用的高浓度磷肥, 其中超过 90% 的磷是水溶性磷, 可快速有效地被作物吸收, TSP 中也含有钙, 特别适用于南方缺钙土壤。SSP 是 3 种植物营养元素的极好肥源, 同时含有磷、硫、钙成分, 特别是对缺硫土壤优势明显。SSP 溶液呈酸性 (pH < 2.0), 适合于石灰性土壤和碱性土壤。钙镁磷肥也含有磷、钙、镁 3 种营养元素, 呈碱性, 适用于酸性土壤和土壤有效钙、镁含量低的土壤。SSP 和钙镁磷肥磷素含量相对较低, 运输和施用成本高于 DAP、MAP 和 TSP。虽然不同磷肥品种各有优缺点, 但磷素营养方面不同种类的磷肥间一般无明显差异。然而, 近年来, 越来越多的三元复合肥 (N-P₂O₅-K₂O) 如 15-15-15、17-17-17、19-19-19 广泛用于马铃薯种植中, 但这些复合肥氮、磷、钾三元素比例不合理, 不符合马铃薯对养分的需求特征, 因而仅施用这些肥料容易造成营养不协调, 应该配合单质肥料施用。



1.3 钾肥

钾肥品种很多,主要包括氯化钾、硫酸钾和硝酸钾 3 种钾肥品种。氯化钾价格相对低,施用经济实惠。硫酸钾虽价格高,但其施用安全还可以提供硫素营养,尤其对缺硫土壤还可解决缺硫问题,所以经常在马铃薯生产上推荐施用。硝酸钾价格相对高,而且由于安全问题不易购买到。充足的土壤钾素供应是提高马铃薯块茎产量和品质不可缺少的,而且钾肥品种的选择也很重要。国内外许多研究比较 3 种钾肥品种和用量对马铃薯块茎产量的影响,如施用硝酸钾比施用氯化钾的马铃薯块茎产量高^[22],施用硫酸钾比施用氯化钾块茎产量高^[23-25]。多数研究表明马铃薯施用氯化钾比施用硫酸钾效果好,如宁夏西吉马铃薯上钾用量不超过 K_2O 90 kg/hm²,硫酸钾与氯化钾分别增产 7.1% 和 12.0%^[26]。山西朔州马铃薯施用氯化钾增产 52.4%、商品率增加 25.7%,施用硫酸钾增产 28.6%、商品率增加 14.3%^[27]。陕西榆林灌溉条件下 5 个马铃薯品种施用氯化钾处理的产量均高于硫酸钾处理,且产量提高 5.28% ~ 24.79%^[28]。辽宁本溪马铃薯上氯化钾和硫酸钾比较试验表明,当 K_2O 用量小于 270 kg/hm²,产量相当,达 315 kg/hm² 时,硫酸钾优于氯化钾^[29]。甘肃中部马铃薯主产区马铃薯生产过程中施用硫酸钾优于氯化钾,在施 N 120 kg/hm² 和 P_2O_5 60 kg/hm² 情况下, K_2O 施用量 105 kg/hm² 时可有效提高马铃薯产量,且纯收益最高^[30]。陕北滴灌马铃薯硝酸钾处理块茎产量、商品薯率和净收益显著高于氯化钾和硫酸钾,硫酸钾和氯化钾处理之间无明显差异^[31]。

钾肥品种对马铃薯品质指标也有一定影响。在四川彭州马铃薯上 K_2O 用量 150 ~ 270 kg/hm² 时,硫酸钾商品薯率高,高钾量时氯化钾的品质效果优于硫酸钾^[32]。在陕西榆林 5 个马铃薯品种上施用氯化钾后块茎还原糖含量均低于施用硫酸钾^[28],还有研究表明, K_2O 用量小于 225 kg/hm² 时,氯化钾在降低还原糖上优于硫酸钾,施肥量高,则相反^[29]。还有研究表明硫酸钾在降低加工薯还原糖方面优于氯化钾^[25]。然而有研究指出,施用氯化钾和硫酸钾提高还原糖含量^[33]或马铃薯块茎还原糖含量与钾肥品种和用量没有显著相关性^[34]。这些不同研究结果也许与钾肥品种外的其他因素有关,马铃薯品种和收获前后的许多因素,如成熟度、生长过程中的温度、矿质营养和灌溉、机械收

获和储存条件,也影响块茎的质量比如含糖量^[35]。马铃薯块茎还原糖含量对马铃薯加工企业很重要,因为马铃薯片炸制过程中会变褐,还原糖含量越低加工薯片品质越好^[36]。

由此可见,马铃薯生产上如何选择合适的钾肥品种需要综合考虑气候条件、水分管理、土壤养分状况、钾肥用量、马铃薯品种和品质要求等。

1.4 中、微量元素肥料

马铃薯和其他作物一样,除需要大量营养元素氮、磷、钾外,也需要中量和微量营养元素。研究表明,马铃薯平均每生产 1000 kg 块茎需吸收钙 1.44 kg、镁 3.56 kg、硫 0.26 kg、硼 5.80 g、锌 5.30 ~ 12.90 g、铁 78.20 g、锰 7.40 g、铜 3.83 g、钼 0.51 g^[1]。因此,补充一定量的中、微量元素对马铃薯高产优质很重要。尤其是南方酸性红壤上钙、镁普遍缺乏,需要施用大量的钙和镁,以满足马铃薯的需求,肥料品种一般为石灰、石膏、硫酸镁、氯化镁和白云石。增施钙、镁肥均可显著提高马铃薯干物质含量,增加单株薯重和块茎产量,同时有效降低疮痂病的发病率,增强马铃薯皮的抗机械损伤能力^[37]。

尽管马铃薯对中、微量元素的需求量很少,但其在提高产量和品质方面却发挥着重要作用。早在 1990 年就报道了微量元素锌对马铃薯产量和品质的影响,种薯拌种和叶面喷施锌肥均可明显提高干物质,改善品质,提高块茎中的淀粉和维生素 C 含量,降低单宁含量^[38]。大、中、微量元素(氮、磷、钾、铁、锰、铜、锌、镁、硫)配施能够增加马铃薯块茎的干物质、粗淀粉积累、维生素 C 和粗蛋白质含量,实现马铃薯的稳产优质^[39]。施用硼、锌不仅可以明显提高马铃薯株高、单株结薯数、大中薯数、单株产量和总产量,还能提高马铃薯块茎中淀粉和蛋白质含量^[40]。马铃薯施用锌肥能够增加各器官锌浓度,提高块茎产量和主要营养品质,降低块茎中还原糖含量^[41]。干拌+叶面喷 3 次微肥+滴灌钙镁肥 2 次能够显著提高产量,并在一定程度上增加马铃薯块茎薯皮厚度,降低马铃薯在窖藏过程中的薯块损失率^[42]。基施锌肥在强化块茎锌营养及改善块茎品质方面有着显著效果^[43],喷施一定浓度的锌肥也有利于提高马铃薯产量和品质^[44]。增施铁肥可提高马铃薯块茎中的淀粉、还原糖、维生素 C 和蛋白质含量^[45]。喷施铁、锌促进了马铃薯的生长,提升了品质,提高了单株产量和商品



薯率^[46]。

施用中、微量元素还有利于提高马铃薯对养分的吸收,提高肥料利用率。研究表明,增施镁肥马铃薯对氮素的吸收较常规施肥增加8%,磷的吸收增加8.3%,增施硼肥和锌肥马铃薯对氮、磷、钾的吸收略有增加,马铃薯产量提高^[47]。无论是基施还是追施硼肥,都能提高植株对氮肥和钾肥的吸收^[48]。由此可见,中、微量元素肥料均不同程度地促进了马铃薯对氮、磷、钾养分的吸收,有利于提高肥料的利用效率。马铃薯专用肥减施15%的同时配施中、微量元素肥能达到稳产效果,块茎的养分累积量提高,肥料利用率提高^[49]。叶面喷施铁、锌、锰微肥不仅增加植株的株高、单株块茎重和商品薯率,还增加了块茎中的淀粉、还原糖、维生素C含量以及铁、锌、锰微量元素的积累量^[50]。

1.5 有机肥

有机肥如畜禽粪肥或堆肥都是马铃薯生产中有效的养分资源,长期施用有机肥和有机无机配施比单施化肥显著促进马铃薯生长发育,增加干物质及产量,增加各器官氮、磷、钾含量和累积量,提高各土层有机质含量和有效氮、磷含量^[51]。然而有机肥与化肥配施的效果往往优于其单独施用,能提高商品薯率、单株结薯数及单薯重,增加块茎淀粉含量、可溶性蛋白质含量及维生素C含量,降低亚硝酸盐的含量,提高氮、磷、钾利用效率^[52-54]。有机无机肥料配施可以改善根际土壤微生物区系,提高土壤酶活性,达到改良土壤、提高土壤肥力、提高作物产量的目的^[55]。生物炭与化肥配合施用能降低块茎的还原糖含量,增加粗蛋白质和维生素C含量,提高产量和商品薯率^[56]。

近年来,在化肥零增长的背景下,有机肥替代部分化肥是实现化肥减施增效和土地可持续利用的主要途径。普通有机肥或生物有机肥替代部分化肥比单施化肥增加马铃薯块茎产量,提高氮肥、磷肥和钾肥的利用率^[49, 57-59]。有机肥等氮替代25%~50%的化肥提高了马铃薯植株的氮素吸收量及块茎产量^[60]。钾肥也是如此,在施用充足氮、磷肥的基础上,秸秆钾与化学钾肥配施显著增加马铃薯产量、品质和养分吸收的同时,有利于钾素的收支平衡,维持土壤钾素肥力,具有稳产作用^[61]。因此,配施有机肥可使养分供应更能满足马铃薯生长对养分的需求,对提高马铃薯块茎产量和肥料利用率具有促进作用。

2 正确的肥料用量

李比希的最小养分律阐明,作物产量受土壤中相对含量最小的养分限制。一种养分的缺失不能用其他养分的过量来弥补,因此,植物必需营养元素必须在数量上充分满足作物生长的需求。确定养分合理用量需要:1)评价马铃薯对养分的需求;2)评价土壤养分供应,方法包括土壤测试和植物分析、肥料效应试验、缺素试验等;3)预测肥料利用效率;4)考虑土壤肥力状况等。推荐施肥量的确定有多种方法,常用的有测土施肥法、养分平衡法、养分专家系统(基于产量反应与农学效率的养分推荐方法)^[62]等。

2.1 马铃薯对养分的需求

马铃薯对养分的需求是制定最佳养分管理的基础,马铃薯整个生育期对氮、钾的需求量较大,其次是磷、钙和镁^[63]。马铃薯作为一种典型的喜钾作物,充足的钾素供应不仅能维持马铃薯的正常生长,还有利于减免马铃薯病害的发生,提高植株的抗逆能力^[17]。在美国和加拿大,每生产1000 kg马铃薯平均需要吸收4.19 kg N、1.26 kg P₂O₅和7.20 kg K₂O^[64]。表1总结了我国马铃薯主产区每生产1000 kg马铃薯需要吸收的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)量和比例,平均需要4.52 kg N、1.69 kg P₂O₅和7.38 kg K₂O, N:P₂O₅:K₂O为1:0.39:1.72,表明马铃薯对钾的需求高于氮和磷,对磷的需求相对较低。如果磷肥过量,马铃薯成熟期会提前,产量和品质也会随之降低^[65]。然而,马铃薯对养分的需求受土壤养分状况、品种和水分管理的影响很大,同一地区不同品种间存在差异,同一品种在不同地区对养分的需求也差异很大。多数情况下水浇地马铃薯比旱地雨养马铃薯产量潜力大,因此需要更多的养分和较高的施肥量。

2.2 测土施肥法

测土施肥方法是依据土壤养分测定确定施肥量的方法,有目标产量法和丰缺指标法等。目标产量法是常用的方法,首先确定目标产量,一般根据近年平均产量,再加上一定比例的增产量来确定,然后再根据土壤有效养分供应量和养分利用率计算施肥量:养分推荐量(kg/hm²)=[目标产量所需养分量(kg/hm²)-土壤养分供应量(kg/hm²)]/肥料当季回收率,其中目标产量所需养分量(kg/hm²)=目标产量(t/hm²)×单位产量养分吸收量(kg/t)。

表 1 每生产 1 t 马铃薯块茎需要吸收氮磷钾养分的数量和比例

地点	品种	水分管理	块茎产量 (t/hm ²)	养分吸收量 (kg/t) 和比例				数据来源
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N : P ₂ O ₅ : K ₂ O	
内蒙古武川	克新 1 号	膜下滴灌	46.7	3.80	1.61	6.55	1 : 0.42 : 1.72	[66]
内蒙古	紫花白等	雨养、灌溉	37.4	5.32	1.42	6.01	1 : 0.27 : 1.13	[67]
内蒙古和甘肃	克新 1 号	雨养	22.4	5.61	1.50	6.10	1 : 0.27 : 1.09	[68]
内蒙古商都	兴佳 2 号	水肥一体	30.0	7.52	4.16	11.81	1 : 0.55 : 1.57	[69]
青海湟中县	青薯 2 号	灌溉	83.0	2.97	1.15	3.73	1 : 0.39 : 1.26	[70]
青海互助	青薯 9 号	雨养	83.3	2.90	1.20	3.70	1 : 0.41 : 1.28	[71]
陕西米脂	紫花白	雨养	26.5	6.40	1.20	6.10	1 : 0.19 : 0.95	[72]
陕西华县	克新 2 号	雨养	47.9	4.9	1.0	4.4	1 : 0.20 : 0.90	[72]
陕西宁强	克新 1 号	雨养	27.1	4.96	2.01	11.03	1 : 0.41 : 2.22	[73]
陕西榆林	紫花白	滴灌	51.7	3.65	1.62	9.06	1 : 0.44 : 2.48	[74]
陕西榆林	紫花白	滴灌	51.3	2.85	1.59	8.12	1 : 0.56 : 2.85	[74]
陕西杨凌	紫花白	滴灌	58.0	3.97	1.97	4.80	1 : 0.50 : 1.21	[75]
宁夏同心	陇薯 3 号	滴灌	36.9	5.10	1.46	8.01	1 : 0.29 : 1.57	[76]
宁夏贺兰山	克新 1 号	雨养	31.1	5.01	2.02	10.60	1 : 0.40 : 2.12	[77]
宁夏 5 县	陇薯 11 等	水地	48.9	3.92	2.31	11.62	1 : 0.59 : 2.96	[78]
宁夏西吉	青薯 9 号	雨养	20.3	7.77	2.09	11.21	1 : 0.27 : 1.44	[79]
宁夏西吉	76 品系	灌溉	41.8	3.23	1.15	5.42	1 : 0.36 : 1.69	[80]
甘肃定西	83 品系	灌溉	40.2	2.71	1.15	4.11	1 : 0.43 : 1.52	[80]
安徽 6 县	主要品种	膜下滴灌	32.4	5.01	1.99	11.03	1 : 0.40 : 2.20	[81]
黑龙江克山	延薯 4 号	雨养	41.0	4.60	2.39	7.02	1 : 0.71 : 1.70	[82]
黑龙江	克新 13	雨养	33.5	6.16	2.86	12.16	1 : 0.46 : 1.97	[83]
黑龙江、内蒙古等 9 省份	克新、紫花白等	雨养和灌溉	30 ~ 60	3.6	1.4	4.5	1 : 0.39 : 1.25	[84]
黑龙江	克新 13	雨养	38.1	6.62	3.02	7.13	1 : 0.46 : 1.07	[85]
河北石家庄	费乌瑞它	雨养	37.6	4.78	1.08	5.57	1 : 0.23 : 1.17	[86]
湖北随州	华薯 1 号	雨养	50.0	2.66	1.03	5.70	1 : 0.39 : 2.14	[49]
湖南	53 品系	雨养	25.9	5.56	2.05	9.89	1 : 0.37 : 1.78	[87]
四川成都	川芋 117	雨养	15.8	5.70	1.44	8.13	1 : 0.25 : 1.43	[88]
云南盈江县	合作 88	灌溉	43.6	3.76	0.91	6.70	1 : 0.24 : 1.78	[89]
贵州锦屏	费乌瑞它	雨养	22.3	2.56	0.93	4.64	1 : 0.36 : 1.81	[90]
平均			38.6	4.52	1.69	7.38	1 : 0.39 : 1.72	

注：文献 [81] 未给出具体品种名称。

马铃薯单位产量养分吸收量和氮、磷、钾肥当季回收率分别参考表 1 和表 2，每生产 1 t 马铃薯块茎平均需要吸收 4.52 kg N、1.69 kg P₂O₅ 和 7.38 kg K₂O，氮、磷、钾肥当季回收率平均分别为 34.0%、21.8% 和 43.3%。范吉梅等^[91]详细阐述了马铃薯测土配方施肥量的计算方法，首先根据地块前 3 年马铃薯的平均产量，再提高 10% ~ 15% 作为马铃薯的目标

产量。土壤养分供应量通过土壤有效养分校正系数确定：土壤养分供应量 (kg/hm²) = 每公顷 0 ~ 20 cm 土层土壤质量 × 土壤有效养分 × 校正系数。

养分丰缺指标法是测土配方施肥最常用的方法，根据田间试验数据确定土壤养分测定值与相对产量（不施某种养分的产量 / 施用某种养分的产量）的相关关系，从而计算一定范围的相对产量对应的土壤养分高、中、低含量范围，即养分丰缺



表 2 马铃薯养分的农学效率和养分的回收率

	农学效率 (kg/kg)			养分回收率 (%)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
样本数	33	18	23	31	21	21
最小	9.0	4.3	9.2	11.4	9.2	9.4
5 th	10.6	4.6	11.5	20.5	10.2	22.2
25 th	31.3	34.4	20.0	31.1	16.5	37.4
50 th	43.0	43.4	29.9	33.3	19.0	48.3
75 th	48.6	48.7	41.2	38.4	22.6	52.3
95 th	110.3	80.4	71.6	45.7	46.4	57.2
最大值	162.3	167.5	92.6	52.7	56.9	60.4
平均值	45.9	47.4	35.0	34.0	21.8	43.3

注：5th、25th、50th、75th、95th 分别表示 5%、25%、50%、75%、95% 分位数。表 4 同。

指标。这样就可以根据试验区域内的多年试验结果，建立马铃薯施肥量与土壤养分测定值的函数关系式，将土壤养分丰缺指标带入函数式中，求出各级丰缺指标下的经济合理施肥量，这样以后就可以根据土壤测定值找到对应的丰缺指标下的合理施肥量。自 2005 年我国进行测土配方施肥行动以来，在马铃薯主产区进行了大量的田间试验^[73, 77, 92-94]，取得了大量数据资料，为马铃薯测土配方施肥作出了巨大贡献。例如，张子义等^[95]通过 198 个田间试验，不仅掌握了内蒙古阴山北麓生态区在 0 ~ 20 cm 土层中全氮、有效磷及速效钾土壤测定值的范围，而且建立了阴山北麓生态区旱地马铃薯土壤养分丰缺指标，并根据丰缺指标等值建立了该区域的旱地马铃薯的经济合理施肥量。

根据土壤测试进行肥料推荐还可以建立在土壤测试值与相对产量关系的基础上，根据农学效

率进行推荐施肥^[96]。首先确定土壤有效养分与相对产量 (%) 的关系模型，然后根据以上模型求出某一土壤养分水平下的相对产量，再根据目标产量 (kg/hm²) 和养分的农学效率 (kg/kg) (单位养分的增产量) 进行推荐：养分用量 (kg/hm²) = (1 - 相对产量) × 目标产量 / 农学效率。马铃薯上氮、磷、钾养分的农学效率平均分别为 45.9 kg/kg N、47.4 kg/kg P₂O₅ 和 35.0 kg/kg K₂O (表 2)。只是这种推荐施肥方法要建立在大量前期田间试验数据的基础上。

2.3 养分平衡法

在大量数据基础上，也可根据养分吸收与产量的关系进行推荐施肥^[96]。根据这一关系可以得出某一目标产量下需要吸收的养分量和土壤基础供应量 (不施某种养分时的吸收量)，二者之差即为需要从肥料中吸收的养分，因此，养分推荐量 = (目标产量下养分吸收量 - 土壤基础供应量) / 当季肥料利用率。然而，磷、钾用量的确定不仅要考虑投入、产出平衡，还要考虑土壤养分水平，如果需保持土壤磷 (或钾) 水平，磷 (或钾) 的用量应与马铃薯吸收量 (即移走量) 一致；如果土壤磷 (或钾) 水平高，施磷 (或钾) 量就可以少于移走量，即施用量为移走量减去土壤基础供应量 (不施磷或钾时的吸钾量)，从而消耗土壤中的磷 (或钾)；如果土壤磷 (或钾) 供应不足，磷 (或钾) 肥推荐量就要高于目标产量下马铃薯移走量，以便提高土壤磷 (或钾) 素肥力。考虑到马铃薯收获后茎叶基本还田，因此，马铃薯的养分移走量实际上就是块茎移走养分的数量。表 3 总结了马铃薯的 N、P₂O₅、K₂O 移走量，平均分别为 116.4、53.6 和 198.5 kg/hm²，与生产地点、马铃薯品种和产量水平有关。

表 3 马铃薯养分移走量

地点	品种	产量 (t/hm ²)	养分移走量 (kg/hm ²)			资料来源
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
黑龙江克山	延薯 4 号	41.0	144.3	67.0	200.6	[82]
辽宁沈阳	克新 13	38.6	136.5	83.3	241.1	[97]
辽宁沈阳	荷兰 15 号	61.8	93.0	42.3	192.7	[98]
湖北襄阳	早大白	20.2	60.6	34.9	64.3	[99]
云南盈江	合作 88	43.6	127.1	34.0	197.1	[89]
四川彭州	川芋 56	9.4	34.9	11.8	54.4	[100]
四川彭州	白花洋芋	12.1	47.0	15.8	67.8	[100]

续表

地点	品种	产量 (t/hm ²)	养分移走量 (kg/hm ²)			资料来源
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
甘肃定西	新大坪	18.9	70.2	28.1	111.5	[93]
甘肃定西	陇薯 3 号	35.8	132.0	53.7	217.5	[101]
甘肃定西	新大坪	36.1	128.4	63.9	216.1	[101]
甘肃定西	定薯 2 号	32.1	82.1	42.7	185.8	[101]
甘肃定西	主要品系 83 个	40.2	111.9	98.6	201.5	[80]
宁夏海原	青薯 9 号	37.8	150.0	59.5	444.0	[102]
宁夏西吉	主要品系 76 个	41.8	95.9	109.8	275.2	[80]
宁夏固原	庄薯 3 号	27.4	167.6	51.1	376.1	[103]
陕西米脂	紫花白	26.5	108.4	20.2	99.3	[72]
陕西华县	克新 2 号	47.9	210.2	41.5	185.1	[72]
陕西榆林	紫花白	51.5	98.8	59.0	238.5	[74]
陕西杨凌	紫花白	58.0	172.5	92.8	228.2	[75]
青海互助	青薯 9 号	83.3	155.8	61.7	173.0	[71]

2.4 养分专家系统推荐施肥法

利用多年多点的肥料效应田间试验获得的数据,建立养分吸收和作物产量数据库,利用 QUE-FTS 模型对作物可获得产量、产量反应、养分的农学效率、土壤基础养分供应等进行分析,获得作物养分需求特征参数,建立基于产量反应和农学效率的养分推荐模型。产量反应指施用某种养分的增产量,农学效率指施用单位养分的增产量。采用计算机软件和取得的相关模型和参数,建立基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法,即养分专家系统 (Nutrient Expert, 简称 NE)^[62]。这种方法中,对于氮素养分推荐施肥主要依据产量反应和农学效率,即施氮量 = 施氮的产量反应 / 氮素农学效率,施氮的产量反应由施氮和不施氮处理的产量差求得。而对于磷、钾肥推荐,除考虑肥效外,还要考虑土壤养分平衡,主要基于产量反应和一定目标产量下作物的移走量给出推荐施肥量 (施磷或钾量 = 作物产量反应施磷或施钾量 + 目标产量收获物移走量)。NE 系统已在我国多种粮食作物和经济作物上开展研究和应用^[84, 104-107]。在马铃薯上利用 NE 推荐施肥与农民习惯施肥相比,优化了氮、磷、钾施用量和比例以及施用方法,获得增产、增收,提高了肥料利用效率^[68, 84],可作为马铃薯推荐施肥的新方法。

2.5 正确的肥料用量—推荐施肥效果

2.5.1 推荐施肥量

依据文献资料总结了马铃薯推荐施肥量和相对应的块茎产量数据分布状况 (表 4)。由于涉及不同地点、不同品种、不同水分管理等,因此推荐施肥量与块茎产量的变异较大。推荐施氮量范围为 N 75 ~ 363 kg/hm²,中值 N 180 kg/hm²,平均 N 178 kg/hm²,变异系数 28.8%。推荐施磷量范围为

表 4 马铃薯氮磷钾推荐施肥量和
推荐施肥量下的块茎产量 (n= 126)

指标	推荐施肥量 (kg/hm ²)				产量 (t/hm ²)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	总量	
最小值	75	45	30	195	10.2
5 th	95	60	53	236	18.9
25 th	147	78	90	343	26.4
50 th	180	90	156	443	33.0
75 th	203	121	236	557	40.1
95 th	270	178	323	689	53.9
最大值	363	245	750	1050	83.3
平均值	178	103	172	453	34.4
标准差	51	35	108	153	11.9
变异系数 (%)	28.8	34.5	63.0	33.8	34.7

P_2O_5 45 ~ 245 kg/hm², 中值 P_2O_5 90 kg/hm², 平均 P_2O_5 103 kg/hm², 变异系数 34.5%。推荐施钾量范围为 K_2O 30 ~ 750 kg/hm², 中值 K_2O 156 kg/hm², 平均 K_2O 172 kg/hm², 变异系数 63.0%。氮磷钾施用总量 195 ~ 1050 kg/hm², 中值 443 kg/hm², 平均 453 kg/hm², 变异系数 33.8%。推荐施肥下马铃薯块茎产量 10.2 ~ 83.3 t/hm², 中值为 33.0 t/hm², 平均 34.4 kg/hm², 变异系数 34.7%。

频数分布状况表明(图1), 推荐施肥施氮量主要在 N 100 ~ 200 kg/hm², 占总样本的 67.5%, N 200 ~ 250 kg/hm² 的样本占 17.5%, 大于 N 250 kg/hm² 的样本占 8.7%, 小于等于 N 100 kg/hm² 占 6.3%。推荐施磷量 54.8% 以上的样本在 P_2O_5 50 ~ 100 kg/hm², 35.7% 的样本在 P_2O_5 100 ~ 150 kg/hm², 因此, 90.5% 的样本施磷量集中在 P_2O_5 50 ~ 150 kg/hm², 小于等

于 P_2O_5 50 kg/hm² 和大于 P_2O_5 150 kg/hm² 的样本分别只有 2.4% 和 7.1%。推荐施钾量分布相对分散, 88.1% 的样本在 K_2O 50 ~ 300 kg/hm² 范围, K_2O 50 ~ 100 kg/hm² 占 26.%, K_2O 100 ~ 150 kg/hm² 占 19%, K_2O 150 ~ 200 kg/hm² 占 11.9%, K_2O 200 ~ 250 kg/hm² 占 16.7%, K_2O 250 ~ 300 kg/hm² 占 14.3%, 大于 K_2O 300 kg/hm² 的样本只有 7.1%, 小于等于 K_2O 50 kg/hm² 占 4.8%。氮、磷、钾推荐总量主要在 400 ~ 500 kg/hm², 占 29.4%, 其次为 300 ~ 400 kg/hm², 占 20.6%, 施用量 500 ~ 600 kg/hm² 占 18.3%, 200 ~ 300 kg/hm² 占 16.7%。马铃薯块茎产量主要集中在 20 ~ 30 和 30 ~ 40 t/hm², 分别占样本总量的 31.0% 和 34.9%, 40 ~ 50 t/hm² 占 15.1%, 小于等于 20 t/hm² 占 7.9%, 大于 50 t/hm² 占 11.1%, 大于 60 t/hm² 只有 2.4%。

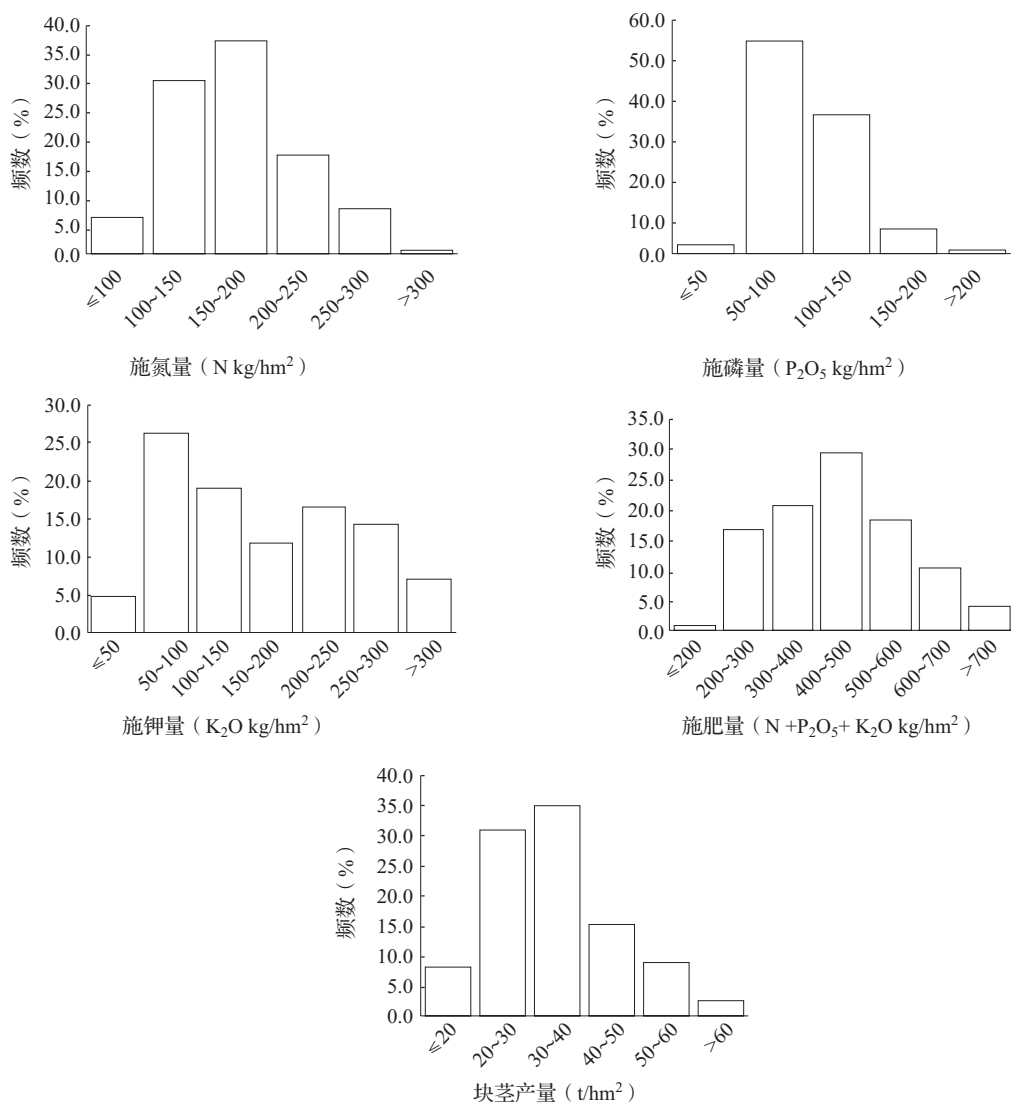


图1 马铃薯推荐施肥量和相应产量的频数分布状况

2.5.2 推荐施肥与农民习惯施肥比较

采用成对比较法分析推荐施肥与农民习惯施肥差异。推荐施肥的氮、磷施用量低于农民习惯施肥的样本数分别占总样本数的 64.3%、53.6%，差异显著（ $P<0.05$ ），推荐施肥施钾量高于农民习惯施肥的样本数占 64.3%，但差异不显著，说明农民习惯施肥多数情况下氮、磷过量，而钾用量略不足。

产量上，推荐施肥大于农民习惯施肥的样本数占 82.1%，差异显著（ $P<0.001$ ）。推荐施肥比农民习惯施肥显著提高了氮（ $P<0.001$ ）、磷（ $P<0.05$ ）、钾（ $P<0.01$ ）的回收率。因此，推荐施肥优化了氮、磷、钾用量和比例，提高了产量和养分利用效率（表 5、表 6）。

表 5 马铃薯推荐施肥与农民习惯施肥施肥量、产量和养分利用率比较

地点	推荐施肥							农民习惯施肥							资料来源
	施肥量（kg/hm ² ）			产量 （t/hm ² ）	养分回收率（%）			施肥量（kg/hm ² ）			产量 （t/hm ² ）	养分回收率（%）			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
黑龙江	166	103	201	31.6	49			133	78	162	28.9	49.5			[84]
吉林	193	127	223	42.5	28.1			268	200	236	40.7	17.4			[85]
辽宁	216	144	264	61.8	39.3	22.6	53.9	78	42	150	46.5	25.4	9.2	45.6	[98]
河北	180	180	225	31.5				300	345	375	32.5				[108]
河北	186	86	212	37.6				318	60	300	35.1				[86]
山东	150	150	750	52.4				495	495	561	53.0				[109]
山西	179	100	129	31.4	30.8			327	95	138	30.1	15.9			[84]
湖北	180	90	210	20.2	31.3	24.4	22.2	465	240	225	18.0	5.0	4.4	14.5	[99]
湖北	210	120	270	50.0				255	255	255	43.9				[49]
江西	142	60	101	16.7	11.4			133	128	127	16.3	13.0			[84]
江西	150	65	116	27.1	15.2	10.2	9.4	109	98	97	24.9				[110]
广东	272	68	351	35.5	38.4	56.9	48.9	245	284	305	31.6	37.6	23.8	51.9	[111]
四川	180	90	180	23.3	31.6			363	225	225	22.4	16.9			[84]
云南	145	80	130	24.2	29.5			215	65	240	23.0	21.6			[84]
贵州	144	135	240	19.5	25.9			249	180	180	20.1	16.1			[84]
陕西	258	82	258	26.5				358	0	0	22.5				[72]
陕西	363	86	301	47.9				194	541	225	45.8				[72]
陕西	150	45	75	27.1	34.3	26.2	60.4	128	90	0	21.9	26.5	11.6		[73]
内蒙古	191	142	196	37.3	32.2			228	140	156	34.9	20.6			[84]
内蒙古	188	105	210	30.0	37.1	22.6	42.6	210	75	225	27.5	28.2	14.1	35.6	[69]
内蒙古	180	180	225	24.5				300	345	375	25.8				[108]
内蒙古	164	79	109	20.9	33.3	16.5	48.3	180	90	75	19.7	27.0	13.1	40.1	[112]
内蒙古	172	132	162	37	36.0	16.7	51.9	195	120	120	35.0	29.2	12.8	45.3	[112]
内蒙古	200	170	205	36.5	33.2	16.8	48.5	225	135	180	33.9	25.9	13.8	42.6	[112]
宁夏	261	126	72	54.3				179	104	0	40.4				[113]
甘肃	188	104	133	33.4	34			145	68	0	29.2	20.8			[84]
甘肃	180	180	225	33.0				300	345	375	35.0				[108]
甘肃	210	105	90	27.4				150	90	0	25.8				[114]



表 6 马铃薯推荐施肥与农民习惯施肥比较

施肥方式		施肥量 (kg/hm ²)			产量 (t/hm ²)	养分回收率 (%)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
推荐施肥	范围	142 ~ 363	45 ~ 180	72 ~ 750	16.7 ~ 61.8	11.4 ~ 49.0	16.5 ~ 56.9	22.2 ~ 53.9
	平均	193 ± 48	112 ± 38	209 ± 127	33.6 ± 11.4	32.7 ± 7.6	25.3 ± 13.3	45.2 ± 10.7
农民习惯施肥	范围	78 ~ 495	0 ~ 541	0 ~ 561	16.3 ~ 53.0	5.0 ~ 49.5	4.4 ~ 23.8	14.5 ~ 51.9
	平均	241 ± 102	176 ± 136	190 ± 136	30.9 ± 9.4	23.3 ± 10.1	12.8 ± 5.5	39.4 ± 12.1
推荐施肥与农民习惯施肥差异	平均	-48	-64	20	2.7	9.3	12.5	5.8
差异显著性	<i>Pr> t </i>	0.0345	0.0125	0.2848	0.0008	<0.0001	0.012	0.009

注: *Pr* 指检验统计概率, *t* 表示配时 *T* 检验的统计量值。

3 正确的施肥时期

在一定的环境条件下, 确定正确的施肥时期需要考虑: 1) 肥料品种、用量和施肥位置, 2) 确定马铃薯吸收养分的时期, 3) 确定土壤养分供应, 4) 了解土壤养分损失, 5) 田间管理措施等。

了解马铃薯整个生育期对养分的吸收特征可为确定正确的施肥时期提供依据。表 7 总结了马铃薯不同生育期吸收的氮、磷、钾养分占整个生育期吸收的氮、磷、钾养分的比例。马铃薯苗期吸收的氮、磷、钾量较少, 分别占整个生育期氮、磷、钾总积累量的 7% ~ 14%、3% ~ 11%、5% ~ 15%。块茎形成期是营养生长与生殖生长并进时期, 对养分需求明显增多, 这一时期吸收的氮、磷、钾量分别占全生育期吸收总量的 23% ~ 36%、15% ~ 26%、15% ~ 31%。块茎膨大期是养分吸收最多的时期, 这一时期吸收的氮、磷、钾量分别占全生育期吸收总量的 34% ~ 49%、39% ~ 51%、41% ~ 55%。淀粉积累期植株吸收的氮、磷、钾量分别占全生育期吸收总量的 7% ~ 25%、19% ~ 36%、6% ~ 28%。可见, 块茎形成期和块茎膨大期养分吸收量多, 两个时期氮、磷、钾吸收量分别占全生育期吸收总量的 62% ~ 85%、54% ~ 77%、60% ~ 79%。可见, 氮、磷、钾吸收最多的时期均为块茎膨大期, 而块茎形成期氮、钾吸收相对较多, 淀粉形成期磷吸收相对较多。由于马铃薯苗期至花期吸收氮、磷占整个生育期吸收总量的 70% 左右, 吸收的钾占整个生育期吸收总量的 95% 左右^[91], 因此, 花期是马铃薯营养生长和生殖生长并存时期, 是薯块膨大的重要时期, 追肥应该主要集中在开花期 (初花、盛花和落花期) 施入^[115-116]。

表 7 马铃薯各生育期养分吸收占整个生育期

养分吸收的比例 (%)					
养分	苗期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	资料来源
氮	11	28	36	25	[135]
	10	30	40	20	[124]
	7 ~ 12	23 ~ 36	39 ~ 49	7 ~ 22	[75]
	14	34	34	18	[67]
磷	8	26	42	24	[126]
	7	23	39	31	[135]
	3 ~ 5	15 ~ 26	39 ~ 51	19 ~ 36	[75]
	11	16	46	27	[67]
钾	8	31	41	20	[135]
	5 ~ 11	15 ~ 22	45 ~ 54	12 ~ 28	[75]
	15	24	55	6	[67]

针对马铃薯氮、磷、钾养分吸收累积的特点就可以确定正确的施肥时期。在块茎形成初期过量施用氮肥会使营养生长延长而限制块茎的发育, 降低产量。而后期过量施氮会延迟成熟, 降低产量和品质。氮肥的分次施用可以满足马铃薯生育期对氮肥的需求, 提高氮肥利用率, 并可根据生长时期和气候变化灵活掌握施肥时期。在灌溉或降水量高的地区, 氮肥可以分 3 ~ 4 次施用, 以提高产量和氮肥利用率, 在有灌溉的砂质土壤上, 氮肥分次施用可有效减少氮素淋失, 减低环境风险^[117]。研究表明, 增加氮肥的追施比例可获得较高的块茎产量和商品薯率^[85, 118-120], 如 2/3 氮肥基施, 1/3 氮肥在块茎膨大末期追施处理, 有利于了马铃薯前期营养生长和后期块茎光合产物的积累^[121], 等氮量下氮肥分期施用能增加块茎干物质的积累量和分配比例^[122], 氮肥播前和块茎膨大期按 6 : 4 施入时比

氮肥全部基施时增产效果明显^[123], 块茎形成末期追施氮肥, 可满足块茎快速膨大期对氮素的大量需求, 有利于提高块茎的产量、收获指数、商品薯率和块茎品质^[85], 滴灌马铃薯幼苗期、块茎形成期、块茎增长期和淀粉积累期施氮肥比例 10%、30%、40%、20%, 并在幼苗期、块茎形成期和块茎增长期结合补水, 有利于马铃薯生长, 提高产量和品质以及水分利用效率和氮素利用效率^[124]。

马铃薯从出苗到成熟始终保持对磷的吸收, 苗期、块茎膨大期、淀粉积累期磷素吸收量分别占全生育期吸收总量的 17.5%、48.5%、34%^[125]。滴灌条件下马铃薯各阶段所吸收的磷素比例为苗期 8%, 块茎形成期 26%, 块茎膨大期 42%, 淀粉积累期 24%^[126]。这些数据与表 7 中马铃薯不同时期对磷吸收积累的比例基本一致。磷肥在土壤中移动性差, 通常在种植前施用并与土壤混合, 有利于根系吸收。但磷肥施用到土壤中后只有施肥点附近磷可溶性浓度较高, 大多数磷被土壤中铁、铝或钙固定^[127], 有效性下降, 尤其在石灰性土壤和酸性铁铝土壤中, 因此磷肥的分次施用也有利于提高磷的有效性和利用效率。此外, 分期施氮磷钾(基肥+苗肥+结薯肥)较常规施肥提高产量 1.4%~19.7%^[115]。

马铃薯是喜钾作物, 马铃薯一生中钾的需要量都很大, 但马铃薯各器官中钾的积累在块茎膨大期之前, 成熟期 60%~70% 的钾素都贮藏在块茎中^[39, 128-130]。因此, 马铃薯前期充足的钾肥供应对马铃薯生长发育和产量形成至关重要。胡娟等^[131]利用基肥追肥试验设计, 得出钾肥基肥占 60%, 齐苗肥和现蕾肥各占 20% 时马铃薯产量最高。段玉等^[132]研究表明, 施肥时期对产量的影响是基施>基追各半>追施, 但三者差异甚微, 基施钾肥的利用率最高, 其次是基追各半, 追肥效果较差。张彬彬等^[133]在甘薯上研究指出钾肥基施利于甘薯产量的形成。这些研究结果与许世豪^[134]研究结果类似, 基肥施用氯化钾更利于提高马铃薯对钾肥的利用率。

微量元素肥料如铁、锰、锌肥在种植前施用会被氧化或固定为作物不能吸收利用形态, 尤其在石灰性土壤或 pH 高的土壤上更明显, 因此应该生长期喷施。硫磺应该在种植前施用, 以便使其氧化为植物可以吸收利用的硫酸盐, 尤其在冷凉地区和氧化能力低的土壤上更应该早施。

4 正确的施肥位置

正确的施肥位置是指将养分施用在合适的位置上, 使作物易于吸收利用, 实现其潜在产量。作物种类、土壤条件、施肥技术、耕作措施、株行距、水分管理、气候条件等都会影响施肥位置。除易被转化为无效态的养分如锰、锌、铁等不宜提前施用在耕层, 大多数养分都可以在种植前施用到耕层。种植后施肥一般在封垄前进行, 侧施通常距种薯几厘米的侧面施入土壤中。

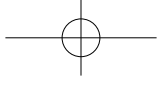
马铃薯属于典型的浅根系作物, 多数根系分布在 30~40 cm 的土层中^[136-138], 单位体积土壤内马铃薯的根系长度不及小麦的 1/4。由于根系截获是植物吸收土壤中养分的主要途径, 因此马铃薯的养分吸收能力较弱, 养分利用率远低于小麦、玉米等作物^[139]。马铃薯根系的这一特点决定了肥料养分要施在其根系范围内。肥料条施可以提高氮肥和磷肥的利用率, 在马铃薯垄上条施可以减少硝酸盐被淋失的风险, 因为水分大都在垄沟中^[140]。由于马铃薯是浅根系, 因此对磷素吸收能力弱^[141-142], 对磷肥的利用率低, 而且在缺磷的土壤上又缺乏吸收磷的能力, 因此磷肥应该条施以增加马铃薯根层磷的浓度。

灌溉施肥是针对易在土壤中移动的养分如硝态氮而进行的施肥方式。当养分在灌溉施肥不会引起养分淋出根系层外时, 其效果优于种植前基施^[143]。当养分易被土壤固定(如磷在石灰性或酸性红壤上施用)时, 不宜采用灌溉施肥。在北方, 每年只有一季作物, 每户都有 100 hm² 以上的马铃薯, 而且具有喷灌设备, 这样氮肥和钾肥可以考虑随水喷施。

近年来, 滴灌技术在马铃薯生产中大力推广, 因为可直接将肥料滴施于作物根部, 增加了根系直接接触肥料的机会, 可有效提高肥料的利用效率, 有望使马铃薯的养分需求与供应实现时空匹配。研究表明, 滴灌施肥比传统灌溉施肥(基施+撒施)增产 47.4%^[144]。在陕北榆林风沙土上, 滴灌施肥不仅获得最高产量和干物质量, 而且水分利用率高, 还能获得较大的经济效益^[145]。

5 结论

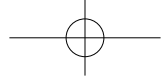
马铃薯的养分管理不但取决于马铃薯对养分的需求量和吸收特征, 还决定于肥料品种和施肥方



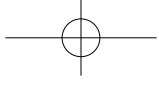
法、水分管理和土壤条件。最佳的养分管理措施是选择正确的肥料品种、用正确的用量、在正确的时期、施在正确的位置(4Rs),以提高产量和养分利用效率。但确定4Rs养分管理也需要因地制宜。

参考文献:

- [1] 王芳,姚彬,黄成东,等.马铃薯养分需求及营养调控研究进展[J].中国马铃薯,2023,37(4):353-359.
- [2] 国家统计局农村社会经济调查总队.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.
- [3] 罗其友,高明杰,张烁,等.中国马铃薯产业国际比较分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(7):1-8.
- [4] 徐宁,张洪亮,张荣华,等.中国马铃薯种植业现状与展望[J].中国马铃薯,2021,35(1):81-96.
- [5] 王西亚,盛寅生,何萍,等.我国马铃薯施肥现状与减肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2023,29(11):2059-2070.
- [6] 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.
- [7] 今芝,胡卫静,梁宏,等.乌兰察布市马铃薯施肥现状研究[J].北方农业学报,2019,47(1):57-62.
- [8] 刘润梅,范茂攀,付云章,等.云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J].土壤学报,2014,51(4):753-760.
- [9] 王亚艺.青海省半干旱区马铃薯施肥调查分析[J].中国马铃薯,2014,28(5):286-291.
- [10] 孙磊,汝甲荣,李庆全,等.黑龙江省及内蒙古自治区东部马铃薯化肥施用现状调查与分析[J].中国马铃薯,2020,34(2):94-102.
- [11] 董道峰,陈广侠,马蕾,等.山东省马铃薯主产区肥料利用效率研究[J].山东农业科学,2014,46(12):72-75.
- [12] 李成晨,安康,索海翠,等.广东省冬种马铃薯施肥现状调查与施肥对策[J].热带作物学报,2019,40(10):2054-2060.
- [13] Liu X Y, Li S T, He P, et al. Yield and nutrient gap analysis for potato in northwest China [J]. The Journal of Agricultural Science, 2018, 156(8): 971-979.
- [14] Hochmuth G J, Mylavarapu R, Hanlon E. The four Rs of fertilizer management [Z/OL]. Gainesville: University of Florida, 2014. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS624?downloadOpen=true>.
- [15] International plant nutrition Institute (IPNI). 4R plant nutrition-A manual for improved the management of plant nutrition [M]. Norcross, GA: IPNI, 2012.
- [16] 段海燕,段玉,张君,等.尿素硝酸铵溶液在马铃薯上的施用效果研究[J].北方农业学报,2017,45(5):28-32.
- [17] 高翔,李成亮,张民,等.钾肥种类及用量对马铃薯生产和品质的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):143-148.
- [18] 赵颖,史书强,何志刚,等.不同灌溉模式下新型缓释肥对马铃薯产量与土壤养分运移的影响[J].江苏农业科学,2016,44(2):130-132.
- [19] 段玉,孙广琴,张君,等.缓释尿素对马铃薯产量和肥料利用效率的影响[J].北方农业学报,2016,44(5):25-30.
- [20] 段海燕,张晓霞,段玉,等.旱地马铃薯氮磷钾肥效应及缓释尿素的效果[J].内蒙古农业科技,2015,43(6):34-36.
- [21] 李书田,黄德明.磷酸一铵与磷酸二铵在石灰性土壤上的行为[J].土壤肥料,1994(4):33-35.
- [22] Mishra M K, Singh J. Effect of source, method and rate of potassium application on potato (Kufri Chandramukhi) [J]. Journal of Potassium Research, 1994, 10(2): 163-166.
- [23] Singh J, Bansal S K. Relative effect of two sources of potassium on yield and economics of potato production in an inceptisol of Western U.P. [J]. Journal of Potassium Research, 2000, 16(1): 52-54.
- [24] Gunadi N. Response of potato to potassium fertilizer sources and application methods in Andisols of West Java [J]. Indonesian Journal of Agricultural Science, 2009, 10(2): 65-72.
- [25] Bansal S K, Trehan S P. Effect of potassium on yield and processing quality attributes of potato [J]. Karnataka Journal Agricultural Science, 2011, 24(1): 48-54.
- [26] 刘汝亮,李友宏,王芳,等.两种钾源对马铃薯养分累积和产量的影响[J].西北农业学报,2009,18(1):143-146.
- [27] 郭玲玲,张雪涌.不同钾肥对马铃薯和胡萝卜产量及商品率的影响[J].山西农业科学,2014,42(3):251-253, 275.
- [28] 王小英,陈占飞,方玉川,等.氯化钾和硫酸钾对不同品种马铃薯农艺性状、产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2021,34(7):50-53.
- [29] 周芳,张振洲,贾景丽,等.不同钾肥品种及用量对马铃薯产量和品质的影响[J].中国马铃薯,2013,27(3):158-161.
- [30] 龚成文,冯守疆,赵欣楠,等.不同钾肥品种对甘肃中部地区马铃薯产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):112-117.
- [31] 孙鑫.钾肥种类和灌水量对陕北滴灌马铃薯生长和水肥利用的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [32] 秦鱼生,涂仕华,冯文强,等.不同钾肥品种及用量对马铃薯产量和品质的影响[J].西南农业学报,2010,23(6):1950-1954.
- [33] Sharma R C, Mukhtar S, Sud K C. Relative response of the potato to three sources of potassium [J]. Indian Journal of Agronomy, 1976, 21(4): 341-348.
- [34] Stanley R, Jewell S. The influence of source and rate of potassium fertilizer on the quality of potatoes for French fry production [J]. Potato Research, 1989, 32(4): 439-446.
- [35] Kumar D, Singh B P, Kumar P. An overview of the factors affecting sugar content of potatoes [J]. Annals of Applied Biology, 2004, 145: 247-256.
- [36] Khan M Z, liangAkhtar M E, Mahmood-UL-Hassan M, et al. Potato tuber yield and quality as affected by rates and sources of



- potassium fertilizer [J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35 (5): 664-677.
- [37] 党宏波. 钙、镁元素对马铃薯产量和品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [38] 吴俊兰, 刘秀珍, 杨忠义, 等. 微量元素锌对马铃薯产量品质影响的初步研究 [J]. 山西农业大学学报, 1990 (2): 140-142, 185-186.
- [39] 罗爱花, 陆立银, 王一航. 大中微量元素配施对陇薯 5 号养分吸收及品质的影响 [J]. 长江蔬菜, 2011, 6: 52-56.
- [40] 田种存, 张洋. 微量元素硼、锌对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 广东农业科学, 2013, 40 (7): 12-13, 21.
- [41] 马振勇, 杜虎林, 刘荣国, 等. 施锌肥对旱作马铃薯植株锌含量及块茎品质的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32 (1): 201-207.
- [42] 刘羽, 刘富强, 李文刚, 等. 微肥对马铃薯产量、品质、薯皮超微结构及块茎耐贮性的影响 [J]. 中国马铃薯, 2018, 32 (6): 351-357.
- [43] 杜平, 张海清, 李磊, 等. 基施锌肥对马铃薯锌含量及块茎品质的影响 [J]. 中国马铃薯, 2020, 34 (5): 275-280.
- [44] 吕军, 高青青, 赵帆, 等. 叶面喷施锌肥对马铃薯农艺性状、产量及品质的影响 [J]. 陕西农业科学, 2021, 67 (9): 5-8.
- [45] 安珍, 张茹艳, 周春涛, 等. 铁肥对马铃薯生理特性、产量及品质的影响 [J]. 江苏农业学报, 2022, 38 (4): 931-938.
- [46] 李丰先, 罗磊, 李亚杰, 等. 铁锌配施对马铃薯植株性状和营养品质的影响 [J]. 中国马铃薯, 2022, 36 (4): 314-321.
- [47] 王秀娟, 娄春荣, 董环, 等. 中微量元素对马铃薯产量和养分吸收的影响 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41 (1): 93-94.
- [48] 王学忠. 马铃薯硼肥肥效试验研究 [J]. 宁夏农林科技, 2013, 54 (4): 37-38.
- [49] 梁玲玲, 周霞, 李志强, 等. 不同减肥技术对马铃薯养分高效利用的影响 [J]. 中国马铃薯, 2020, 34 (3): 150-157.
- [50] 李凯, 张国辉, 郭志乾, 等. 叶面喷施铁锌锰微肥对马铃薯生长、品质与产量的影响 [J]. 作物研究, 2018, 32 (1): 28-30, 34.
- [51] 苏日古嘎. 定位施肥对马铃薯生长生理、土壤特性及产量的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [52] Parmar D K, Sharma A, Chaddha S, et al. Increasing potato productivity and profitability through integrated plant nutrient system in the North-western Himalayas [J]. Potato Journal, 2007, 34 (3-4): 209-215.
- [53] 陈隆通. 减施化肥增施有机肥对土壤肥力及马铃薯生长发育的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [54] 马伟清, 王培伦, 杨元军, 等. 不同类型肥料对马铃薯产量及块茎品质的影响 [J]. 山东农业科学, 2010 (3): 59-60.
- [55] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (1): 144-152.
- [56] 张丽莉, 付春娜, 秦小川, 等. 生物炭对马铃薯品质及产量的影响 [C] // 屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与中国式主食. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2016: 5.
- [57] 高怡安. 有机肥替代部分化肥对马铃薯干物质积累与分配及土壤矿质氮含量的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [58] 史书强, 赵颖, 何志刚, 等. 生物有机肥配施化肥对马铃薯土壤养分运移及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44 (6): 154-158.
- [59] 岳超, 王怀义, 滕松, 等. 马铃薯施用缓控释肥、生物有机肥肥效试验 [J]. 中国马铃薯, 2017, 31 (6): 341-345.
- [60] 付强, 张平良, 刘晓伟, 等. 有机肥替代部分化肥对半干旱区马铃薯产量、水分和氮素利用率的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (10): 143-149.
- [61] 胡岗, 赵欢, 秦松, 等. 有机钾与化学钾肥配施对黔中马铃薯产量、品质及钾素平衡的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (3): 55-62.
- [62] 何萍, 金继运, Mirasol F, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (2): 499-505.
- [63] 张西露. 冬闲田马铃薯需肥规律与肥料效应研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [64] Westermann D T. Nutritional requirements of potatoes [J]. American Journal of Potato Research, 2005, 82: 301-307.
- [65] Jenkins P D, Hakoomat A L I. Growth of potato cultivars in response to application of phosphate fertilizer [J]. Annals of Applied Biology, 2008, 135 (1): 431-438.
- [66] 秦永林. 不同灌溉模式下马铃薯的水肥效率及膜下滴灌的氮肥推荐 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [67] 段玉, 张君, 李焕春, 等. 马铃薯氮磷钾养分吸收规律及施肥肥效的研究 [J]. 土壤, 2014, 46 (2): 212-217.
- [68] 段玉, 张君, 张三粉, 等. 内蒙古马铃薯施肥效应特征参数与施肥推荐 [J]. 中国马铃薯, 2019, 33 (2): 89-100.
- [69] 胡卫静, 今芝, 梁宏, 等. 不同施肥方式对马铃薯产量及肥料利用率的影响 [J]. 北方农业学报, 2019, 47 (1): 63-67.
- [70] 郭恒, 贾豪, 王舰. 氮磷钾肥配施对全膜覆盖马铃薯肥料利用率及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (20): 75-78.
- [71] 贾豪, 郭恒, 王舰. 氮、磷、钾肥配施对马铃薯肥料利用率及产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2018, 47 (2): 32-36.
- [72] 马文娟, 同延安, 高鹏程. 平衡施肥对马铃薯产量和品质的影响 [J]. 园艺与种苗, 2012 (10): 48-52.
- [73] 赵忠东, 杨杰, 李文兵, 等. 不同施肥量对马铃薯产量和肥料利用率的影响 [J]. 陕西农业科学, 2012, 58 (4): 42-44, 85.
- [74] 王海东. 滴灌施肥条件下马铃薯水肥高效利用机制研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [75] 焦婉如. 肥料运筹对滴灌施肥马铃薯生长和养分吸收的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [76] 陈建国, 何文寿, 代晓华, 等. 施肥对旱作马铃薯干物质及养分吸收的影响 [J]. 中国马铃薯, 2016, 30 (5): 282-288.



- [77] 陈永伟, 马文礼, 张战胜, 等. 宁夏贺兰山东麓马铃薯“3414”田间肥效试验研究[J]. 宁夏农林科技, 2017, 58(4): 30-34.
- [78] 王奥. 宁夏干旱半干旱区马铃薯养分吸收特点研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [79] 白志强, 何文寿, 梁熠, 等. 宁夏雨养区施钾对马铃薯氮磷钾养分积累及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14): 74-78, 99.
- [80] 吴琪滢, 郭志乾, 李德明, 等. 马铃薯产量品质与氮磷钾吸收利用的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 521-529.
- [81] 廖华俊, 闫冲冲, 王前前, 等. 安徽马铃薯肥料利用现状调查[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(15): 154-157.
- [82] 李珺, 刘双全, 仇少君, 等. 典型黑土不同施氮量对马铃薯产量和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 850-857.
- [83] 邢阳洋. 黑龙江省马铃薯氮磷钾养分需求量特性[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [84] 何萍, 徐新朋, 周卫. 肥料养分推荐原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [85] 王弘, 孙磊, 梁杰, 等. 氮肥基追比例及追施时期对马铃薯干物质积累分配及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(24): 224-230.
- [86] 杨云马, 杨军芳, 贾良良, 等. 河北二季作春播马铃薯养分吸收规律及肥料适宜用量[J]. 作物杂志, 2020(6): 170-174.
- [87] 肖欢欢, 陈小虎, 邓海, 等. 马铃薯施肥技术参数及推荐施肥量研究[J]. 中国马铃薯, 2023, 37(6): 514-526.
- [88] 许丽. 氮素形态及氮磷钾配比对春、秋马铃薯养分积累及产量构成的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [89] 李志钦. 冬马铃薯化肥利用率田间试验[J]. 云南农业, 2023(6): 67-70.
- [90] 龙胜碧, 张玉梅, 黄万花, 等. 黔东南低山盆地地区冬种马铃薯肥料利用率分析[J]. 耕作与栽培, 2018(1): 9-11.
- [91] 范吉梅, 杜朝昆. 马铃薯需肥特性及测土配方施肥量计算[J]. 云南农业, 2017(9): 42-43.
- [92] 戴树荣. 应用“3414”试验设计建立二次肥料效应函数寻求马铃薯氮磷钾适宜施肥量的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 154-159.
- [93] 田世龙, 李守强, 葛霞, 等. 氮、磷、钾肥配比对马铃薯“新大坪”产量、品质及其耐贮性的影响[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(3): 155-164.
- [94] 王小英, 陈占飞, 方玉川, 等. 不同氮磷钾配比对马铃薯农艺性状、产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(4): 44-49.
- [95] 张子义, 郑海春, 郜翻身, 等. 内蒙古阴山北麓旱作马铃薯土壤氮、磷、钾丰缺指标研究[J]. 华北农学报, 2011, 26(1): 177-180.
- [96] Li S, Duan Y, Guo TW, et al. Potassium management in potato production in Northwest region of China [J]. Field Crops Research, 2015, 174: 48-54.
- [97] 刘向梅. 氮磷钾施用量及施用时期对马铃薯干物质和养分积累分配的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [98] 李勇, 吕典秋, 胡林双, 等. 不同氮磷钾配比对马铃薯农艺性状、产量和干物质含量的影响[J]. 中国马铃薯, 2013, 27(3): 148-152.
- [99] 杨德桦. 不同施肥量和不同施肥方式对襄阳地区马铃薯产量、养分积累规律和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [100] 秦鱼生, 涂仕华, 冯文强, 等. 氮、钾营养对不同品种马铃薯产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(2): 571-576.
- [101] 苏小娟. 施肥对不同品种马铃薯养分吸收及产量和品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [102] 杨亚亚. 施钾量对旱区马铃薯生理特性及淀粉形成的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [103] 梁锦秀, 郭鑫年, 张国辉, 等. 氮磷钾用量对宁南旱地马铃薯产量及水肥利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 76-81.
- [104] Chuan L M, He P, Jin J Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China [J]. Field Crops Research, 2013, 146: 96-104.
- [105] Xu X, He P, Mirasol F P. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis [J]. Field Crops Research, 2013, 150: 115-125.
- [106] Xu X P, Xie J, Hou Y, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China [J]. Field Crops Research, 2015, 180: 37-45.
- [107] Zhang J J, He P, Ding W C, et al. Estimating nutrient uptake requirements for radish cultivated in China based on QUEFTS model [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 11663.
- [108] 张朝春, 江荣风, 张福锁, 等. 氮磷钾肥对马铃薯营养状况及块茎产量的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(9): 279-283.
- [109] 吴静, 杨小华, 徐宝连, 等. 鲁西南地区减少化肥用量对马铃薯块茎产量、商品薯率和干物质含量的影响[J]. 中国马铃薯, 2021, 35(3): 244-249.
- [110] 宋惠洁, 李大明, 柳开楼, 等. 不同施肥措施对南方冬种马铃薯产量和肥料利用率的影响[J]. 湖南农业科学, 2021(8): 48-51, 55.
- [111] 张新明, 伍尤国, 徐鹏举, 等. 平衡施肥与常规施肥对冬作马铃薯肥效的比较[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(4): 475-479.
- [112] 梁俊梅, 张君, 安昊, 等. 基于养分专家系统的马铃薯推荐施肥效应[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 107-112.
- [113] 耿世杰. 不同肥料配方与覆膜对土壤理化性状、马铃薯生长及产量影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [114] 张平良, 郭天文, 李书田, 等. 不同覆盖种植方式与平衡施肥对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 50-54.
- [115] 吕慧峰, 王小晶, 陈怡, 等. 氮磷钾分期施用对马铃薯产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 197-200.
- [116] 孙磊, 古浏涟, 刘向梅, 等. 氮肥施用时期对马铃薯氮素积

- 累与分配的影响[J]. 中国马铃薯, 2011, 25(6): 350-355.
- [117] Errehhi M, Rosen C J, Gupta S C, et al. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management [J]. *Agronomy Journal*, 1998, 90: 10-15.
- [118] 郑顺林, 袁继超, 马均, 等. 春、秋马铃薯氮肥运筹的对比研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(3): 702-706.
- [119] 郑顺林, 李国培, 杨世民, 等. 施氮量及追肥比例对冬马铃薯生育期及干物质积累的影响[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(3): 270-274.
- [120] 沈宝云, 康小华, 张宗雄, 等. 滴灌条件下不同基追肥比例对马铃薯生长发育、产量及经济效益的影响[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(5): 283-292.
- [121] 谷浏涟, 孙磊, 石瑛, 等. 氮肥施用时期对马铃薯干物质积累转运及产量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(4): 610-615.
- [122] 孙磊, 王弘, 李明月, 等. 氮磷钾肥施用量及施用时期对马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. 作物杂志, 2014(1): 132-137.
- [123] 王娟, 谭伟军, 何小谦, 等. 半干旱区氮肥施用时期及比例对马铃薯产量的影响[J]. 中国马铃薯, 2016, 30(5): 289-295.
- [124] 耿浩杰. 水肥一体化条件下施氮比例分配对马铃薯生长和养分吸收的影响规律试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [125] 卢育华. 蔬菜栽培学各论(北方本)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [126] 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.
- [127] Davenport J R, Milburn P H, Rosen C J, et al. Environmental impacts of potato nutrient management[J]. *American Journal of Potato Research*, 2005, 82: 321-328.
- [128] 盛晋华, 刘克礼, 高聚林, 等. 旱作马铃薯钾素的吸收、积累和分配规律[J]. 中国马铃薯, 2003, 17(6): 331-335.
- [129] 卢建武. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 423-430.
- [130] 孙磊, 刘向梅, 谷浏涟, 等. 施氮时期对马铃薯钾积累分配及块茎级别的影响[J]. 作物杂志, 2013(2): 100-103.
- [131] 胡娟, 杨奎奎. 氮钾不同时期不同比例配施对马铃薯经济性状、产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(11): 4804-4805.
- [132] 段玉, 张君, 王博, 等. 钾肥品种和施钾时期对马铃薯产量和品质的影响[J]. 北方农业学报, 2016, 44(2): 1-6, 12.
- [133] 张彬彬, 史春余, 柳洪鹏, 等. 钾肥基施利于甘薯块根产量的形成[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 208-216.
- [134] 许世豪. 不同钾肥运筹对马铃薯生长、产量和品质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.
- [135] 何文寿, 马琨, 代晓华, 等. 宁夏马铃薯氮、磷、钾养分的吸收累积特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1477-1487.
- [136] Iwama K. Physiology of the potato: new insights into root system and repercussions for crop management [J]. *Potato Research*, 2008, 51(S3-4): 333-353.
- [137] Hu B, Fan M, Hao Y, et al. Potato-cabbage double cropping effect on nitrate leaching and resource-use efficiencies in an irrigated area [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(6): 842-847.
- [138] Fixen P E, Bruulsema T W. Potato management challenges created by phosphorus chemistry and plant roots [J]. *ChemInform*, 2014, 45(2): 121-131.
- [139] 秦永林, 石晓华, 贾立国, 等. 有机肥替代化肥对马铃薯-小麦轮作体系产量及钾肥利用率的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(4): 47-51.
- [140] Zebarth B J, Rosen C J. Research perspective on nitrogen BMP development for potato [J]. *American Journal of Potato Research*, 2007, 84: 3-18.
- [141] Dechassa N, Schenk M K, Claassen N, et al. Phosphorus use efficiency of cabbage, carrot and potato [J]. *Plant and Soil*, 2003, 250: 215-224.
- [142] Thornton M K, Novy R G, Stark J C. Improving phosphorus use efficiency in the future [J]. *American Journal Potato Research*, 2014, 91: 175-179.
- [143] Westermann D T, Kleinkopf G E, Porter L K. Nitrogen fertilizer efficiencies on potatoes [J]. *American Potato Journal*, 1988, 65: 377-386.
- [144] 邓兰生, 林翠兰, 涂攀峰, 等. 滴灌施肥技术在马铃薯生产上的应用效果研究[J]. 中国马铃薯, 2009, 23(6): 321-324.
- [145] 侯翔皓, 张富仓, 胡文慧, 等. 灌水频率和施肥量对滴灌马铃薯生长、产量和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 85-96.

Best management practices for fertilizer — “4Rs” nutrient stewardship for potato

LI Shu-tian, WANG Xiu-bin (Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Rational fertilizer application is crucial for increasing potato yield and improving quality. This article reviewed the demand and removal of nutrients, especially nitrogen, phosphorus, and potassium, as well as recommended rates of fertilizers for potato based on literatures. It also demonstrated how to achieve the best management practices for fertilizers in potato production, including selecting the right fertilizer product, using the right rate at the right time in the right place, i.e. 4 rights (4Rs) nutrient stewardship. The focus was on how to use 4Rs nutrient stewardship to guide scientific fertilization in potato production, aiming to provide references for rational fertilization for potato.

Key words: potato; best nutrient management; 4Rs nutrient stewardship