

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2021)02-0183-08

综 述

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2021.02.012

马铃薯氮素营养特性及氮肥管理

于静, 陈杨, 樊明寿*

(内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 中国马铃薯生产中氮肥的施用量较大, 然而氮肥利用率却相对较低。为进一步认识马铃薯氮肥利用率的提升潜力, 研究制定合理的马铃薯氮肥减施增效技术措施, 从马铃薯氮素营养需求、氮素形态对马铃薯发育的调控等方面系统总结了马铃薯氮素营养规律, 同时分析了马铃薯根系构型特点, 薯田氮素淋洗损失, 并藉此提出了马铃薯氮肥管理原则: 分期调控、前轻后重、形态搭配、实时监测、水肥协调。另外, 为高效回收马铃薯季残留于土壤的氮素, 深根系应是马铃薯轮作体系后茬作物的特征之一。

关键词: 马铃薯; 根系; 氮素淋洗; 氮肥管理; 肥料利用率

Nitrogen Nutrition Characteristics and Nitrogen Fertilizer Management of Potato

YU Jing, CHEN Yang, FAN Mingshou*

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

Abstract: Nitrogen (N) fertilizer are most used presently in potato production, however, N use efficiency is relatively lower. In order to understand the potential of improving potato N use efficiency, and to formulate reasonable technical measures of reducing nitrogen fertilizer input in potato production in China, the research progress in potato N nutrition was summarized from the aspects of potato N demand, N absorption and regulation of N form on potato development. In addition, the research progress in potato root architecture and potato field N leaching were summarized as well in the review. Finally, special principles for potato nitrogen fertilizer management were proposed, which are staged regulation, light application in early stage and heavy application in late stage, proper combination of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$, real time N monitoring, and coupling water with nitrogen. For making up the lower efficiency of nitrogen fertilizer utilization in potato season, the root characteristics of succeeding crops in potato rotation system should be considered as well.

Key Words: potato; root architecture; nitrogen leaching; N fertilizer management; N use efficiency

氮是马铃薯生长发育中需求量较大的营养元素, 土壤中充足的氮素供应是马铃薯高产的基础, 因此, 氮肥是中国不同产区马铃薯生产中施用量最多的肥分之一。但是, 中国马铃薯生产对氮肥依赖性日益增加, 氮肥利用率远低于发达国家。即使在氮肥利

用效率相对较高的东北产区, 马铃薯的氮肥偏生产力也仅为 $\text{N } 180 \text{ kg/kg}^{[1]}$, 远低于欧美发达国家^[2,3], 而在华北集约化经营的马铃薯生产体系, 氮肥的偏生产力不到 $\text{N } 90 \text{ kg/kg}^{[1]}$ 。由于氮肥损失途径多, 极易淋洗、挥发, 过量施用的环境代价日趋严重, 而

收稿日期: 2021-04-07

基金项目: 内蒙古自治区成果转化项目(2019CG030); 国家自然科学基金(31960637); 内蒙古自然科学基金(2019BS03021)。

作者简介: 于静(1986-), 女, 讲师, 从事马铃薯氮素养分管理研究。

*通信作者(Corresponding author): 樊明寿, 教授, 从事马铃薯营养生理及养分管理研究, E-mail: fmswh@126.com。

且过量施氮已导致马铃薯质量下降、生产成本增加等问题, 因此, 减氮增效逐渐成为业界的普遍共识。

在国内, 不同研究团队根据马铃薯生育进程、种植模式、灌溉方法、土壤理化性质等对氮肥的使用数量进行了大量的研究, 提出了许多氮肥推荐方法^[4-8], 对改进马铃薯氮肥管理技术具有重要意义。然而, 上述研究还不能完全满足减氮增效的需求, 关于马铃薯氮肥管理的理论与技术研究仍需进一步深入。马铃薯氮肥管理策略除需考虑上述因素外, 还需要考虑马铃薯根系生物学特性、氮素营养规律、马铃薯产质量形成规律。由于块茎发生发育是马铃薯产量形成的基础和前提, 而且近年来关于氮素营养与马铃薯块茎形成、发育的关系研究取得了重要进展, 因此为进一步研究优化马铃薯氮肥管理技术, 挖掘提升马铃薯氮肥利用率的潜力, 本文对马铃薯氮素营养规律研究进展做一综述, 并针对中国马铃薯生产中氮肥管理存在的问题, 提出马铃薯氮肥管理的原则和研究方向。

1 马铃薯氮营养规律

1.1 马铃薯对氮的需求

单位经济产量的氮素需求量是确定作物氮肥施用总量必须考虑的因子^[4]。研究表明, 平均每生产 1 t 块茎, 马铃薯植株需要吸收 N 4~6 kg。但马

铃薯氮素需求量因品种和产量水平有所变化, 而且变化幅度远大于禾本科作物^[9], 这可能是由于马铃薯块茎为营养体的缘故。中国幅员辽阔, 各地生态条件及推广的马铃薯品种差异较大, 因此制定马铃薯施肥方案时, 养分需求量指标应基于当地的研究结果, 不能盲目照搬。

由于氮肥的损失途径较多, 因此氮肥分期调控被普遍接受并已成为作物养分管理技术的重要内容^[4,5,9,10]。基于此, 科学的氮肥管理措施不仅需要了解马铃薯的氮素需求数量, 而且需要深入、准确理解马铃薯的氮素吸收规律。一般而言, 马铃薯的生长发育可分成 5 个不同生育时期: 芽条生长期、苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期或成熟期。本课题组综合国内外不同研究团队的报道, 总结了马铃薯不同生育时期的氮素吸收比例如图 1^[8]。其中, 马铃薯在块茎形成期与块茎膨大期所吸收的氮素占整个生育期吸收量的 80% 左右。因此, 其为氮素营养关键期, 显然这是马铃薯氮肥施用的理论基础。

1.2 氮供应数量对马铃薯块茎发育的影响

早在 20 世纪 80 年代 Krass 和 Marschner^[11]就提出氮素水平是影响马铃薯块茎形成的环境因素之一。之后, 在组培、水培及田间条件下均证明高浓度氮素供应推迟马铃薯结薯, 甚至抑制结薯^[11-13]。敖孟奇

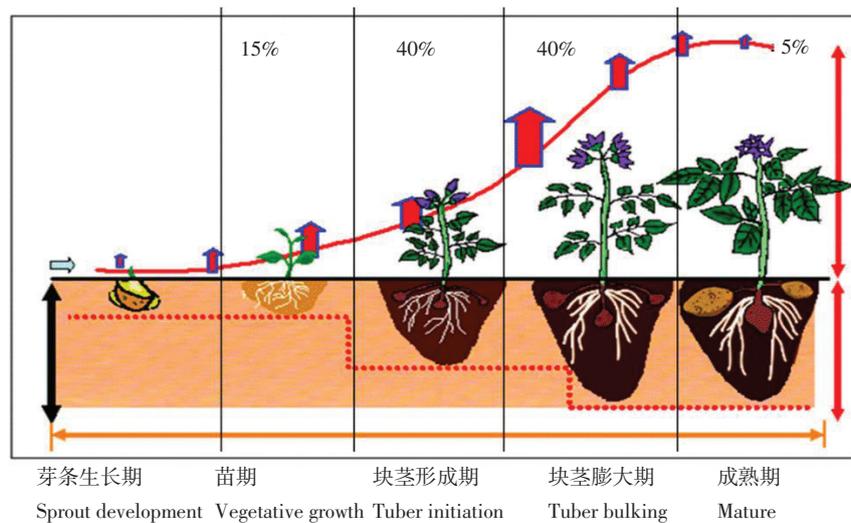


图1 马铃薯不同生育期氮素吸收比例^[8]

Figure 1 Percentage of N absorption by potato plants at different growth stages

等^[13]研究发现, 马铃薯苗期土壤矿质态氮(Nmin)含量在一定范围内时, 马铃薯结薯数随着Nmin而增加, 但当土壤Nmin达到一定程度时, 马铃薯结薯数则表现为随Nmin的增加而降低(图2)。由于单位面积结薯数是重要的产量构成因子, 这意味着要协同

提高马铃薯的产量与氮肥利用率, 氮肥施用时间与数量极为重要。如果种肥氮施用过多, 不仅不利于马铃薯块茎形成, 而且由于马铃薯苗期氮素需求量较小, 氮素淋洗和挥发的风险增加。

1.3 氮形态与马铃薯生育

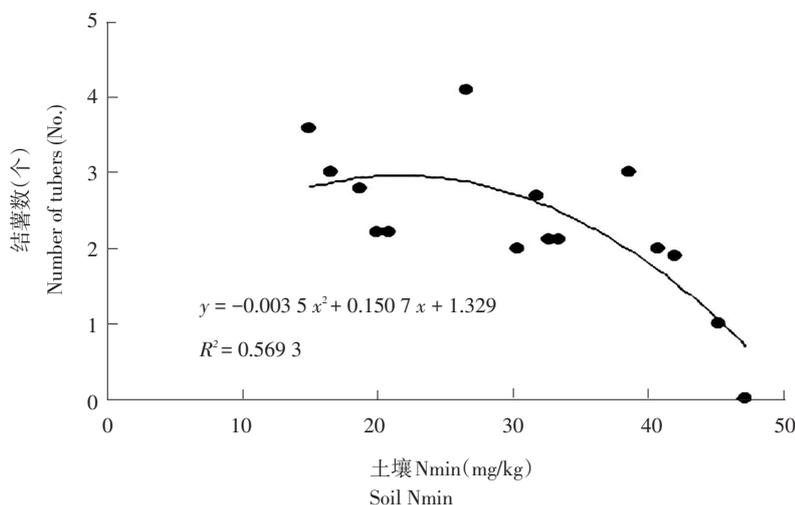


图2 土壤Nmin与马铃薯结薯数的关系^[13]

Figure 2 Relation between soil Nmin and potato tuber number per plant

植物可吸收的氮源主要为硝态氮和铵态氮, 且不同植物对氮素形态的喜好存在差异。1986年, Davis等^[14]研究发现长期供应 $\text{NH}_4\text{-N}$, 马铃薯的生长受到抑制, 因此认为马铃薯为喜硝作物。而苟久兰等^[15]、焦峰等^[16]相继在大田条件下研究发现, $\text{NH}_4\text{-N}$ 供应下马铃薯产量显著高于供应 $\text{NO}_3\text{-N}$, 这可能由于田间 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋洗损失较多的原因。还有田间试验表明, 马铃薯在 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 混合介质中比在其单一介质中生长得更好^[17]。综合分析国内外不同团队的研究结果, 不难发现氮素形态对马铃薯生长发育的影响极其复杂, 不能简单而论。

由于马铃薯产量与块茎形成时间和块茎数量存在天然的联系, 因此马铃薯块茎形成过程及其机理一直是植物生理和农学领域长期的研究热点。Gao等^[18](表1)、Suyala等^[19]在严格控制氮素转化的条件下研究发现, 在块茎形成前持续供应马铃薯植株硝态氮, 植物形成较多的匍匐茎和块茎, 但供应 $\text{NH}_4\text{-N}$ 马铃薯植株形成块茎较早。Gao等^[18]同时也发现整

个生育期供应 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的单株块茎产量并不高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。显然, 这是由于马铃薯最终的产量不仅取决于块茎数(库容), 而且与叶丛光合同化能力(源)密不可分。

块茎虽非生殖器官, 马铃薯的生育阶段也不能表述为块茎形成后的植株由营养生长进入生殖生长阶段, 但块茎形成是马铃薯生长发育的标志性进程, 块茎形成后同化物的分配发生了显著变化^[8]。因此, Suyala等^[19]、苏亚拉其其格等^[20]以块茎形成期为界, 设置块茎形成前、后分别供应 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 两种形态氮素, 观察其对马铃薯生长发育与块茎形成、块茎产量的影响。在块茎形成前供应 $\text{NO}_3\text{-N}$ 或 $\text{NH}_4\text{-N}$ 条件下, 马铃薯植株高度、叶面积、叶片SPAD值、整株干物质积累量无显著差异, 而块茎形成后供应 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的马铃薯叶片SPAD值、植株生长速度均显著高于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 处理。以上结果充分说明氮素形态与马铃薯生育的关系不能简单冠以“喜硝”或“喜铵”, 而应该随马铃薯生育阶段和生长中心的变化系

表1 砂培条件下氮素形态对‘克新1号’马铃薯块茎形成期匍匐茎、块茎发育的影响^[18]

Table 1 Effects of N form on potato stolon and tuber growth of cultivar 'Kexin 1' at tuber initiation stage under sand culture conditions

年 Year	硝态氮/铵态氮 NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	单株匍匐茎数量(No.) Stolon number per plant	单株块茎数量(No.) Tuber number per plant	结薯匍匐茎比例(%) Ratio of stolons bearing tubers
2010	100:0	11.6 a	4.9 a	42 a
	50:50	ND	ND	ND
	0:100	9.0 b	2.7 b	30 b
2011	100:0	7.1 a	4.0 a	56 b
	50:50	5.9 b	4.0 a	68 a
	0:100	5.1 c	2.9 b	57 b

注: 1. 同年每一列后面不同字母表示在0.05水平上的差异显著性; 2. ND = 未获取数据。

Note: 1. Means followed by different letters in each column in the same year indicate significant difference at 0.05 level. 2. ND = data not obtained.

统理解, 并从协调库-源关系着手进行氮素形态的搭配与调控。

2 马铃薯根系特征

虽然叶面施肥方式早已不再新鲜, 但其仅是根系营养的补充, 而根系始终是作物吸收养分的主要器官, 其地位不可取代, 因此正确认识马铃薯根系的特点是进行合理养分管理的基础和前提。尽管个别晚熟马铃薯品种的单条根轴有时可延伸到土层1 m以下, 但与玉米等大田作物相比, 马铃

薯属于典型的浅根系作物(图3)^[21-23]。日本北海道大学的Iwama^[23]曾对马铃薯、小麦、玉米、水稻、大豆和甜菜进行过观察比较, 马铃薯不仅单根长度远低于其他5种作物, 其根系主要分布在浅层土壤, 而且在土壤中的根系密度也远低于其他作物, 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重要环节, 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^[24], 在相同的田块, 土壤养分对马铃薯的空间有效性会低于其他作物。根系的这一特点决

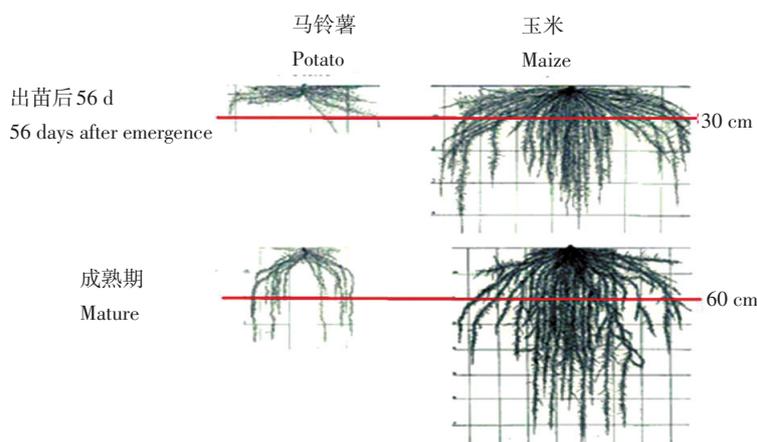


图3 马铃薯与玉米根系的比较^[21]

Figure 3 Comparison of potato roots and maize roots

定了马铃薯的养分管理比其他大田作物要更加精细, 尤其需注意避免养分淋洗到根层以下, 否则不仅养分利用率难以提高, 造成肥料资源浪费、生产成本增加, 而且会增加地下水污染的风险。

3 氮肥淋洗损失

农田土壤氮素损失途径包括氨挥发、淋洗、硝化与反硝化损失。虽然北方石灰性土壤容易发生氨挥发损失, 但由于深施肥理念被广泛接受且技术较为普及, 目前马铃薯田氨挥发损失量较小, 仅占氮肥投入量的1.2%左右^[25]。反硝化损失量更小, 占氮肥投入量的0.6%左右^[25]。氮素的淋洗损失是指土壤中的氮随水向下移动至根系活动层以下, 从而不能被作物根系吸收所造成的氮素损失。这一损失与土壤理化性质、灌水量或降雨量密切相关。在渗滤池试验中, 华北地区小麦玉米氮肥的淋失率为4.4%~18.7%, 在江西红壤旱地上用接水盘法在田间进行的观测表明, 淋洗损失占施氮量的7.2%~18.6%^[26]。不同类型作物对土壤硝态氮的截获能力也不同。Nielsen和Jensen^[27]研究发现, 甜菜、晚栽禾草、白三叶草以及冬季谷类作物能够降低土壤硝态氮淋洗的风险。即使是同类作物不同品种对土壤硝态氮截获能力也不同, 冬小麦比春小麦在1.0~2.5 m土层内多截获约81 kg/hm²的无机态氮, 这主要是由于冬小麦根系较春小麦发达^[28]。马铃薯是典型的浅根系作物, 因此马铃薯田氮素淋洗损失相对较大。杨海波等^[25]在阴山北麓地区的研究发现, 淋洗量占氮肥投入量的17.6%左右。在一些过量灌溉或降雨量大的地区, 薯田氮素淋洗量可能更大。因此, 要提高马铃薯氮肥利用率, 必须充分考虑阻控薯田氮素的淋洗。

4 马铃薯氮肥管理原则

4.1 分期调控

由于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, 且根系密度远低于谷类作物, 养分吸收能力弱^[21-24], 而氮的移动性极强, 当其随水淋洗到根层土壤以下时便成为对马铃薯无效的养分, 转而成为污染因子^[29]。因此, 少量多次的氮肥分期调控原则对马铃薯更为必要。即使在雨养

马铃薯种植区, 也要尽可能实施分次施用。

马铃薯氮肥分期调控是建立在氮肥总量确定基础之上的, 因此确定施氮总量必不可少。粗略而言, 在一定土壤条件、气候条件和空间范围内, 由于土壤有机氮矿化, 农田土壤潜在氮素供应水平在较长时间段内相对稳定, 氮肥施用总量控制到与马铃薯吸收带走的氮素相当。即, 施氮总量 = 产量 × 单位块茎产量需氮量。欲使施氮总量更加精准, 就必须考虑土壤氮素供应水平, 而各地农技部门制定的土壤氮素丰缺指标是重要参考。近年来, 一些研究小组根据耕层土壤NO₃-N含量与马铃薯产量的密切关系提出了基于土壤NO₃-N测试的氮肥推荐方法, 克服了使用全氮和碱解氮含量作为土壤供氮水平的弊端, 值得推广使用。此外, 对于前茬土壤氮素残留较少的区域, 可以利用现有的肥料效应函数求得最佳产量的施氮量, 也可以将多年多点的最佳产量施氮量平均, 获得一定区域马铃薯推荐施氮量^[4]。

氮肥分期调控的根本依据就是马铃薯的氮素吸收规律(图1), 实施时还需考虑土壤质地、种植模式和灌溉方法。近年来, 滴灌技术正在马铃薯生产中大力推广, 为氮肥分期施用提供了便利, 有望使马铃薯的氮素需求与供应实现进一步的时空匹配。

4.2 前轻后重

经过多年的知识普及和技术推广, 全国各地马铃薯生产中氮肥“分期调控”的理念正在被接受, 一次性施肥的现象显著减少^[8], 但施氮次数、比例等仍存在诸多不合理的问题^[29]。本课题组曾在内蒙古自治区阴山北麓进行的大规模调查发现, 即使在使用滴灌、喷灌等设备的马铃薯生产中, 氮肥基追比多数大于3:2^[10]。依据图1所示的马铃薯氮素吸收规律^[8], 并结合考虑内蒙古自治区阴山北麓农田砂质土壤特性^[29], 以及马铃薯根系浅、密度低的构型特点^[23], 不难得出, 前期氮肥施用比例过高是马铃薯氮肥利用率低的重要原因之一。另外, 如前文所述, 前期氮肥施用过多, 会推迟马铃薯块茎形成^[13,14], 虽然后期科学合理的管理可以适当弥补, 但对于生长期有限或无霜期较短的地区, 马铃薯块茎同化物快速积累的时间非常有限, 因此“前重后轻”的氮肥施用存在较大问题。综合分析氮素损失途径、

土壤质地、马铃薯氮素吸收规律、氮素供应与块茎发育关系、马铃薯根系特征等因素, 可以认为改变目前“前重后轻”的氮肥管理模式势在必行, 因地制宜的“前轻后重”氮肥分配办法应是马铃薯氮肥管理的重要原则。

4.3 实时监测

本研究团队曾为内蒙古自治区马铃薯主产区制定了氮肥分期调控实施明细表, 示范表明显著提高了马铃薯氮肥利用率^[8], 但其是一个区域的普遍办法, 对具体田块的指导性较差。解决之道便是氮素的实时监测, 具体包括根层土壤氮素监测和植株氮素监测, 并根据检测结果进行精准氮肥追施。

所谓根层土壤氮素监测是指在作物关键生长期前和生长期内取一定土层深度的土壤样品测定无机氮 Nmin, 从而给出合理的氮肥推荐施肥用量。目前, 欧美等国广泛采用土壤剖面 Nmin 作为推荐施肥的诊断指标。但由于中国农民种植马铃薯多有施用有机肥的习惯, 该技术在应用中受不同田块有机质矿化差异的影响。另一方面, 分析技术繁琐, 时效性较差。

作物体内的含氮量可以直接反映作物的氮素营养状况, 因此常作为检测对象和推荐施肥的指标。通常包括植株全氮含量、组织汁液含量、植株硝酸盐快速诊断(包括二苯胺法和反射仪法)。这些方法需要样品采集、处理、分析测试、数据处理等一系列过程, 耗费大量人力、物力、财力。随着相关技术的发展, 一些无损氮素快速检测或诊断技术, 如叶绿素仪(SPAD仪)法、遥感技术等相继产生。基于不同诊断方法和仪器的优缺点, 结合中国马铃薯生产的特点, 无损的SPAD叶绿素测定在马铃薯氮素营养诊断具有较大的推广可能性或潜力。早在1993年, 荷兰 Vos 和 Bom^[30]就进行过检测, 发现SPAD值不仅与马铃薯叶片叶绿素高度正相关, 而且与叶片全氮的含量显著正相关。之后, 这一结果被国内外一些小组的研究陆续证明^[31-34]。本课题组多年、多点的研究表明, 尽管马铃薯叶片SPAD值会随地点、品种、年份变化, 但SPAD值与叶片含氮量的正相关趋势不变。基于此, 本研究小组提出了基于SPAD仪诊断的马铃薯氮肥推荐办法^[32]。

4.4 形态搭配

由于氮素形态与马铃薯植株生长发育和块茎形成密切相关^[14-20], 同时其影响随马铃薯生育进程而变化^[19], 因此要协同提高马铃薯产量和氮肥利用率, 在马铃薯氮肥管理中必须充分考虑氮素形态, 而且需动态调整。基于硝态氮对根系的诱导作用^[35]、对匍匐茎及块茎生长的促进作用^[18-20], 在马铃薯生育前期(苗期、块茎形成前期)一定比例的硝态氮肥供应是必需的。特别是在春天气候比较冷凉的北方一作区, 铵态氮在土壤中转化速度极为缓慢, 硝态氮肥的配施显得更为必要, 而作为种肥使用的马铃薯复合肥料所应当含有适当比例的硝态氮。但是, 硝态氮肥容易淋洗, 而且在马铃薯生育中后期铵态氮对马铃薯茎叶生长的促进作用明显优于硝态氮^[18-20], 因此在块茎形成后, 马铃薯的氮肥供应需调整为以铵态氮为主, 同时根据各地的气候条件, 研究氮在土壤中的转化速度, 以此作为氮肥追施频次的重要依据。

4.5 水氮协调

由于降水不足或降水与马铃薯需求时间不匹配, 灌溉成为许多产区马铃薯高产的必要条件。但是水资源短缺是中国的基本国情, 节水已成为马铃薯业界的普遍共识^[8]。另外, 节水不仅是水资源可持续发展的需要, 也是马铃薯氮肥精准管理的需要。如前文所述, 农田氮素淋洗受灌溉量影响, 随着灌溉量的增加, 氮素淋洗损失显著增加^[25-28]。特别是在土质为砂土或砂壤土的农田中, 淋洗损失更大, 而中国许多马铃薯产区的土壤多为砂质土壤。近年来, 一些地区在推广减氮技术时出现了减产的现象, 重要的原因就是简单减氮, 而过度灌溉的生产习惯没有改变, 造成氮肥淋洗严重, 马铃薯生育后期脱氮。因此水肥协调是减肥增效的基本前提。滴灌设备及技术的应用为水肥一体或水肥协调提供了极大的便利, 但是目前生产中节水设备与节水技术脱节、节水与节肥脱节的问题普遍存在^[8,10], 水分管理基本依赖经验。而不同生态区马铃薯水分与氮素吸收规律、土壤水分运移规律及氮素供应能力的阐明是实现水氮协调的基础, 因此应引起研究人员的关注。

4.6 合理轮作

由于马铃薯连作会引起土传病害加剧等一系列问题, 因此轮作是马铃薯生产的基本常识。但

是, 如何选择轮作作物? 除了考虑阻断病害传播途径外, 还需要考虑氮素回收利用的问题。如图 4 所示, 即便上述氮肥管理原则全部落实, 仍有相当数量的氮素淋溶到马铃薯根层以下^[23], 成为潜在的环境风险因子。在此情况下, 如果轮作作物选择深根系作物, 既可实现传统轮作目的, 又

可回收马铃薯季残留于深层土壤的氮素养分, 使整个轮作体系的氮肥利用效率达到最大。Hu 等^[22]在内蒙古自治区的研究表明, 选择大白菜作为马铃薯的后作, 可以减少 60~160 cm 土层内硝态氮残留 N 7~15 kg/hm²。

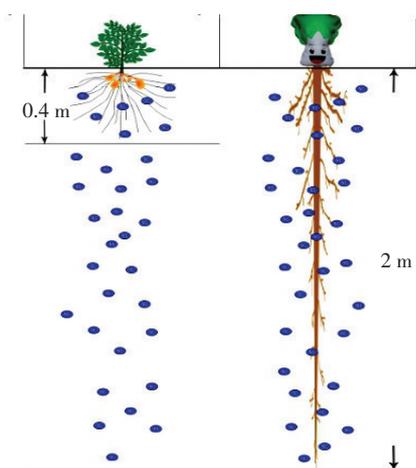


图 4 马铃薯与大白菜根系比较示意图(左: 马铃薯; 右: 大白菜)^[22]

Figure 4 Diagram of cabbage and potato roots (Left: potato; Right: Chinese cabbage)

5 小 结

综上所述, 除了遵循作物养分管理的普遍原则外, 基于马铃薯的氮素吸收规律、根系构型特点、氮素与块茎发生发育的关系等, 马铃薯氮肥管理还需遵循分期调控、前轻后重、实时监测、形态合理搭配、水肥协调及合理轮作的原则。根据上述原则, 结合当地生态条件下马铃薯的生长发育规律、土壤基本性质、种植模式、灌溉方式, 完全可以确立合理的马铃薯氮肥减施增效措施, 实现马铃薯产量和氮肥利用效率的协同提高。

[参 考 文 献]

- [1] 于静, 熊兴耀, 高玉林, 等. 中国马铃薯不同产区氮肥利用率的比较分析 [J]. 中国蔬菜, 2019(7): 43-50.
- [2] Jeff S, D Westermann, B Hopkins. Nutrient management guidelines for Russet Burbank potatoes [G]. Moscow: University of Idaho Extension, 2004: 10.
- [3] Alva A, Fan M, Chen Q, *et al.* Improving nutrient-use efficiency in

Chinese potato production: experiences from the United States [J]. Journal of Crop Improvement, 2011, 25(1): 46-85.

- [4] 秦永林, 樊明寿. 马铃薯氮素管理策略 [J]. 中国蔬菜, 2011(18): 1-5.
- [5] 孙磊, 王弘, 李明月, 等. 马铃薯生产的氮肥管理策略 [J]. 中国马铃薯, 2013, 27(5): 314-318.
- [6] Li R, Chen J, Qin Y, *et al.* Possibility of using a SPAD chlorophyll meter to establish a normalized threshold index of nitrogen status in different potato cultivars [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42 (8): 834-841.
- [7] Zheng H, Liu Y, Qin Y, *et al.* Establishments of dynamical thresholds in potato nitrogen status diagnosis by the chlorophyll meter SPAD-502 [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14 (1): 190-195.
- [8] Jia L, Qin Y, Chen Y, *et al.* Fertigation improves potato production in Inner Mongolia (China) [J]. Journal of Crop Improvement, 2018, 32 (5): 1-9.
- [9] 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.

- [10] 陈杨, 秦永林, 于静, 等. 内蒙古灌溉马铃薯氮肥减施依据及措施 [J]. 作物杂志, 2019(6): 90–93.
- [11] Krass A, Marschner H. Influence of nitrogen nutrition, day length and temperature on contents of GA and ABA and on tuberization of potato plants [J]. *Potato Research*, 1982, 25(1): 13–21.
- [12] Zheng H, Wang Y, Zhao J, *et al.* Tuber formation as influenced by C/N ratio in potato plants [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 181: 686–693.
- [13] 敖孟奇, 秦永林, 陈杨, 等. 农田土壤Nmin对马铃薯块茎形成的影响 [J]. 中国马铃薯, 2013, 27(5): 302–307.
- [14] Davis J M, Loeschner W H, Hammond M X, *et al.* Response of potatoes to nitrogen form and to change in nitrogen form at tuber initiation [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1986, 111(1): 70–72.
- [15] 苟久兰, 孙锐锋, 何佳芳, 等. 种植模式和氮肥形态对威芋3号马铃薯产量及品质的影响 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(3): 36–41.
- [16] 焦峰, 王鹏, 翟瑞常. 氮素形态对马铃薯氮素积累与分配的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 39–44.
- [17] 张伟, 高世铭, 王亚宏, 等. 不同形态氮素比对马铃薯氮素分布、光合参数及产量的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(6): 39–43.
- [18] Gao Y, Jia L, Bo H, *et al.* Potato stolon and tuber growth influenced by nitrogen form [J]. *Plant Production Science*, 2014, 17(2): 138–143.
- [19] Suyala Q, Jia L, Qin Y, *et al.* Effects of different nitrogen forms on potato growth and development [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(11): 1151–1159.
- [20] 苏亚拉其其格, 樊明寿, 贾立国. 氮素形态对马铃薯块茎形成的影响 [J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 509–512.
- [21] Fixen P E, Bruulsema T W. Potato management challenges created by phosphorus chemistry and plant roots [J]. *ChemInform*, 2014, 45(2): 121–131.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 杨海波, 杨海明, 孙国梁, 等. 阴山北麓节水灌溉马铃薯田氮素平衡研究 [J]. 北方农业学报, 2018, 46(5): 50–56.
- [26] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–9.
- [27] Nielsen N E, Jensen H E. Nitrate leaching from loamy soils as affected by crop rotation and nitrogen fertilizer application [J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26: 197–207.
- [28] Thorup–Kristensen K, Salmerón Cortasa M, Loges R. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? [J]. *Plant Soil*, 2009, 322: 101–114.
- [29] 樊明寿, 贾立国, 秦永林, 等. 马铃薯丰产高效栽培的养分管管理 [C]//屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与精准扶贫. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2017.
- [30] Vos J, Bom M. Hand–held chlorophyll meter: a promising tool to assess the nitrogen status of potato foliage [J]. *Potato Research*, 1993, 36: 301–308.
- [31] 李井会. 不同氮肥运筹下马铃薯氮素利用特性及营养诊断的研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2006.
- [32] 樊明寿, 聂向荣, 李秀华, 等. 基于叶绿素仪诊断的马铃薯氮肥管理 [J]. 中国马铃薯, 2014, 28(6): 348–353.
- [33] 苏云松, 郭华春, 陈伊里. 马铃薯叶片SPAD值与叶绿素含量及产量的相关性研究 [J]. 西南农业学报, 2007, 20(4): 690–693.
- [34] 陈百翠, 魏峭嵘, 石瑛, 等. SPAD值在马铃薯氮素营养诊断和推荐施肥中的研究与应用 [J]. 吉林农业科学, 2014(4): 26–30.
- [35] Drew M C. Comparison of effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on growth of seminal root system and shoot in barley [J]. *New Phytologist*, 1975, 75(3): 479–490.