

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.004

李燕山, 肖石江, 王晓瑞, 等. 氮肥用量对膜下滴灌冬马铃薯产量和经济效益的影响. 土壤, 2020, 52(1): 25–32

氮肥用量对膜下滴灌冬马铃薯产量和经济效益的影响^①

李燕山^{1,2}, 肖石江³, 王晓瑞⁴, 梁淑敏^{1,2}, 高森³, 普红梅^{1,2}, 张磊^{1,2}, 吴琼芬³, 隋启君^{1,2*}

(1 云南省农业科学院经济作物研究所, 昆明 650205; 2 农业部云贵高原马铃薯与油菜科学观测实验站, 昆明 650205; 3 陆良县农业技术推广中心, 云南陆良 655600; 4 昆明医科大学海源学院, 昆明 650101)

摘要: 通过田间试验研究不同氮肥用量对膜下滴灌冬马铃薯生长、产量和经济效益的影响, 通过分析马铃薯产量、经济与农学效益随氮肥用量的变化趋势提出冬马铃薯生产上适宜的氮肥用量范围。结果表明, 膜下滴灌条件下, 马铃薯生育期随氮肥用量的增加逐渐延长, 马铃薯叶面积指数、单株结薯数、单株薯重和块茎产量随氮肥用量的增加呈先增加后降低的趋势, 均在 345 kg/hm² 施氮量时最高, 且株高和大薯重高于其他处理。施氮量在 0~420 kg/hm² 时对马铃薯出苗率影响不大, 而施氮量达 495 kg/hm² 时出苗率和块茎产量显著降低; 施氮效益、施氮纯收入、氮肥产投比和农学效率在施氮量 195~345 kg/hm² 时均随氮肥用量的增加而增加, 超过 345 kg/hm² 施氮量时逐渐下降, 施氮量为 495 kg/hm² 时显著降低。马铃薯产量对氮肥用量的反应通过二次多项式模型分析得出, 马铃薯最高产量施氮量和经济最佳施氮量分别为 341.7、327.1 kg/hm², 而最高产量与经济最佳产量二者相差不大。因此, 在本试验条件下, 膜下滴灌冬马铃薯适宜的氮肥用量应该控制在 270~327.1 kg/hm² 之间, 可获得较高的产量和经济效益。

关键词: 冬马铃薯; 膜下滴灌; 氮肥用量; 产量; 经济效益

中图分类号: S562 **文献标志码:** A

Effects of Nitrogen Fertilizer Rate on Yield and Economic Benefit of Winter Potato with Drip Irrigation Under Mulch

LI Yanshan^{1,2}, XIAO Shijiang³, WANG Xiaorui⁴, LIANG Shumin^{1,2}, GAO Sen³, PU Hongmei^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, WU Qiongfeng³, SUI Qijun^{1,2*}

(1 *Industrial Crops Research Institute, YAAS, Kunming 650205, China*; 2 *Scientific Observing and Experimental Station of Potato and Rapeseed in Yunnan-Guizhou Plateau, Ministry of Agriculture, Kunming 650205, China*; 3 *The Center for Agricultural Technology Extension in Luliang County of Yunnan Province, Luliang, Yunnan 655600, China*; 4 *Hai Yuan School of Kunming Medical College, Kunming 650101, China*)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of different nitrogen (N) fertilizer rates on growth, yield and economic benefit of winter potato with drip irrigation under mulch and to put forward the appropriate rate of N fertilizer in winter potato production. The results showed that under the condition of drip irrigation under mulch, with the increase of N application rate, the growth period of potato was prolonged while the leaf area index of potato and the number of tubers per plant, potato weight per plant and tuber yield increased first and then decreased, all of which were the highest at N application rate of 345 kg/hm², and the plant height and large tuber weight were both higher than those of other treatments. The emergence rate of potato changed little when N application rate ranged from 0–420 kg/hm², while the emergence rate and tuber yield of potato decreased significantly when N application rate reached 495 kg/hm². Benefit and net income of N application, input-output ratio and agronomic efficiency of N fertilizer increased with the increase of N application rate in the range of 195–345 kg/hm², but decreased gradually when nitrogen application rate was beyond 345 kg/hm², and reached the lowest when N application rate was 495 kg/hm². Quadratic polynomial model showed that the maximum yield of N application rate and economic optimum nitrogen application rate were 341.7 kg/hm² and 327.1

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200800), 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-10-P07), 云南省应用基础研究青年项目(2017FD016), 云南省马铃薯工程技术研究中心项目(2011DH018)和云南省重点新产品开发计划项目(2013BB05)资助。

* 通讯作者(suiqijun@foxmail.com)

作者简介: 李燕山(1983—), 男, 云南楚雄人, 硕士, 副研究员, 主要从事马铃薯育种与栽培技术研究。E-mail: 280858009@qq.com

kg/hm², respectively, and showed no significant difference. Therefore, under the condition of the experiment, the suitable application rate of nitrogen fertilizer for winter potato should be controlled within 270–327.1 kg/hm² for the higher yield and economic benefit.

Key words: Winter potato; Drip irrigation under mulch; Nitrogen fertilizer rate; Yield; Economic benefit

氮素营养供应对马铃薯生长和产量形成具有重要的调节作用。适量施氮可促进马铃薯的生长发育和产量的形成^[1],并且在一定施氮范围内,马铃薯的产量随着氮肥施用量的增加而提高^[2],然而过量施氮虽能使地上部茎叶生长得更加旺盛,但由于生长中心不能适时转移,导致生育期延迟,干物质分配失衡,块茎产量和干物质含量降低^[3-4],且过高的氮肥除被作物吸收利用一部分外,其余则以氨挥发、反硝化、土壤残留、淋失等途径损失,不仅导致氮肥肥效降低,造成资源浪费,而且易对生态环境、食物等造成污染,成为现代农业迫切需要解决的问题^[5]。此外,施氮与马铃薯的经济效益也密切相关,李书田等^[6]研究指出,马铃薯施用氮、磷、钾肥可以获得较高的经济收益,施肥效应和纯收入是氮>钾>磷;张炜等^[3]研究发现,施用适量的氮肥可显著增加农民收入,施氮量 180 kg/hm² 处理的施氮产值和纯增收均显著高于其他处理,纯增收达 13 143.8 元/hm²,施氮量超过 180 kg/hm² 后施氮产值和纯增收均逐步降低。因此合理施用氮肥是兼顾产量、增加经济效益、提高氮素利用效率和控制农业面源污染的重要措施^[7]。

云南省是我国马铃薯生产的第四大省份^[8],陆良县位于云南省东部,是全省冬马铃薯主要生产区之一,近年来随着膜下滴灌技术在云南省马铃薯冬作区迅速推广应用,虽然水资源利用率大大提高,但在生产过程中存在氮肥施用过量的问题,导致马铃薯抗性降低,品质、效益下降,资源浪费、化肥污染等问题日益突出,因此,科学施肥已经成为冬马铃薯产业发展的重要技术支撑。目前,关于氮肥用量对马铃薯产量、品质、氮肥利用效率、干物质积累与分配及生理性状等方面的研究报道很多,但在膜下滴灌条件下氮肥用量对马铃薯产量、施氮效应和经济效益研究报道较少,且多集中在北方作区^[6-9-10],而云南省在这方面的研究尚属空白。为此,本研究在膜下滴灌条件下,通过田间试验研究不同氮肥用量对冬马铃薯产量和经济效益的影响,为确定马铃薯适宜的氮肥用量,提高马铃薯产量和经济效益提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验地点: 试验于 2016 年 12 月至 2017 年 5 月

在云南省陆良县小百户镇中坝村委会 2 组农户代甲林的责任田进行,地理坐标: 103.57°E、25.08°N,海拔: 1 960 m,属北亚热带高原季风型冬干夏湿气候区,年均气温 14.7 °C,≥10 °C 活动积温 4 436.3 °C,无霜期 249 d,年日照时数 2 239.1 h,年太阳辐射量 125.2 kcal/cm²,年均降雨量 976.3 mm。土壤为砂页岩黄红砂土,土壤质地为砂壤土,粒状结构,0~20 cm 土层理化性状为: 土壤有机质 33.9 g/kg、全氮 2.78 g/kg、碱解氮 258 mg/kg、有效磷 84.8 mg/kg、速效钾 248 mg/kg、pH 4.87,土壤容重 1.13 g/cm³,田间持水量 0.426。前作秋马铃薯,施肥情况为: 农家肥 18 000 kg/hm²、纯 N 459.2 kg/hm²、P₂O₅ 234.8 kg/hm²、K₂O 182.6 kg/hm²。

供试品种: 马铃薯品种为丽薯 6 号(原种),种薯由陆良县农技中心提供。

供试肥料: 尿素(N 46%),由四川泸天化股份有限公司生产;普钙(P₂O₅ 16%),由陆良磷肥厂生产;硫酸钾(K₂O 50%),由云南云天化股份有限公司生产。

滴灌施肥设备包括水泵、PVC 管材及相关配件、滴灌管、液体肥料配比罐等,均为大禹节水公司产品。其中滴灌管滴头型号为铁片式,滴头间距为 30 cm,滴头流量为 2.34 L/h,浸润宽度 30~40 cm;地膜为 0.01 mm 厚度黑色地膜,由曲靖市塑料厂生产。

1.2 试验设计

试验在磷、钾肥相同用量(P₂O₅ 150 kg/hm², K₂O 180 kg/hm²)的基础上,氮肥设 0、195、270、345、420 和 495 kg/hm² 6 个纯氮用量处理,分别以 N₀、N₁₉₅、N₂₇₀、N₃₄₅、N₄₂₀ 和 N₄₉₅ 表示。各处理重复 3 次,共 18 个小区,随机区组排列,每个小区长 6.1 m,宽 2.2 m(两垄),小区面积 13.42 m²。

试验采用高垄双行膜下滴灌种植,行距 1.1 m(大行距 70 cm,小行距 40 cm),株距 29 cm。种植密度为 62 700 株/hm²。各处理全部磷、钾肥及农家肥 30 000 kg/hm² 一次性基施,氮肥分两次施入,60% 氮肥基施,40% 氮肥于 3 月 10 日(苗期)进行滴灌追施。试验田间管理一致,播种后及时铺设滴灌带,覆盖地膜,生长期共灌水 6 次,灌水量为 1 050 m³/hm²,防治病虫害 2 次。试验于 2016 年 12 月 29 日播种,2017 年 5 月 16 日收获。

1.3 样品的采集与测定

播种前按照“随机”、“等量”和“多点混合”的原则采用“S”形布点采集基础土样，风干晾晒后采用土壤农化分析方法^[11]测定土壤养分。

出苗达 75% 左右时，对每小区标定 5 株进行株高和叶绿素含量测定，用 SPAD-502 叶绿素仪对马铃薯倒 4 叶的顶小叶进行 SPAD 值的测定，每片叶测 3 个位点，取平均值。同时对各处理马铃薯的生育时期、生物学性状进行观察记载。

在马铃薯生育期间，分别于 3 月 16 日(苗期)、4 月 13 日(块茎膨大期)、4 月 28 日(淀粉积累初期)、5 月 15 日(收获期)共进行 4 次取样，各处理每次在第一重复小区随机取 3 株植株，擦净叶片，用打孔器打取叶片不同部位 10 圆片，间接称重法测定叶面积指数^[12]。收获时，马铃薯成熟期各小区单收进行测产，同时调查各小区大薯(>150 g)、中薯(75 ~ 150 g)、小薯(<75 g)的个数和重量，折算成单位产量，商品率为大中薯重量的百分比。

1.4 计算方法与数据处理

马铃薯叶面积指数的计算参照姜丽雨等^[13]的方法，施氮效应、效益及效率参照李书田等^[6]的方法，具体计算方法如下：

$$\text{叶面积} = \text{叶重} / \text{打孔叶重} \times \text{打孔叶面积}$$

$$\text{叶面积指数} = \text{叶面积} / \text{土地面积}$$

$$\text{施氮效应}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{施氮处理块茎产量} - \text{不施氮处理块茎产量}$$

$$\text{氮肥农学效率(AE)}(\text{kg}/\text{kg}) = \text{施氮效应} / \text{施氮量}$$

$$\text{施氮效益}(\text{元}/\text{hm}^2) = \text{施氮效应} \times \text{块茎价格}$$

$$\text{氮肥投入}(\text{元}/\text{hm}^2) = \text{施氮量} \times \text{氮肥价格}$$

$$\text{施氮纯收入} = \text{施氮效益} - \text{氮肥投入}$$

$$\text{氮肥产投比(VCR)}(\text{元}/\text{元}) = \text{施氮效益} / \text{氮肥投入}$$

试验数据用 Excel 2010 数据处理软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥用量对马铃薯生育期的影响

由表 1 可见，马铃薯生育期随氮肥用量的增加有逐渐延长的趋势，从马铃薯生育进程来看，出苗期到现蕾期不同处理的生育期变化范围在 20 ~ 22 d，相比 N₀ 处理，N₁₉₅ 处理缩短了 1 d，N₂₇₀ 处理延长了 1 d，其他处理无明显差异；现蕾期到成熟期不同处理的生育期变化范围在 65 ~ 68 d，相比 N₀ 处理，N₂₇₀、N₁₉₅ 处理分别延长了 2 d、3 d，N₄₂₀ 和 N₃₄₅ 处理均延长了 4 d，N₄₉₅ 处理延长了 5 d。说明从出苗期到现蕾期氮肥用量对马铃薯生育期影响较小，现蕾期后影响较大，且随氮肥用量的增加，盛花期和成熟期延迟。

表 1 氮肥用量对马铃薯生育期的影响

Table 1 Effect of nitrogen application rate on period of potato growth

处理	播种期(月-日)	出苗期(月-日)	现蕾期(月-日)	盛花期(月-日)	成熟期(月-日)	生育期(d)
N ₀	12-29	2-21	3-14	4-6	5-16	84
N ₁₉₅	12-29	2-22	3-14	4-7	5-19	86
N ₂₇₀	12-29	2-22	3-16	4-8	5-20	87
N ₃₄₅	12-29	2-21	3-14	4-8	5-20	88
N ₄₂₀	12-29	2-21	3-14	4-9	5-20	88
N ₄₉₅	12-29	2-22	3-15	4-9	5-22	89

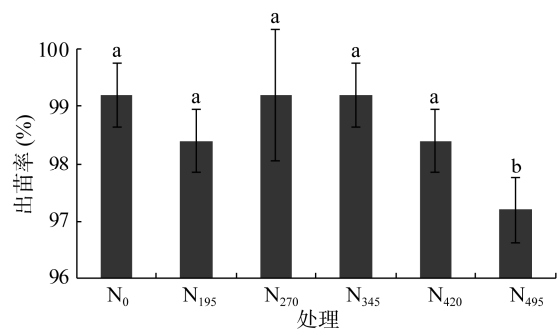
2.2 氮肥用量对马铃薯出苗率的影响

氮肥用量对马铃薯出苗率产生影响(图 1)。不同处理的马铃薯出苗率变化范围为 97.2% ~ 99.2%，N₀、N₂₇₀ 和 N₃₄₅ 处理均达最大值，但与 N₁₉₅ 和 N₄₂₀ 处理无显著差异，而 N₄₉₅ 处理的出苗率显著下降，达最小值，比其他处理降低 1.2 ~ 2.0 个百分点。说明氮肥用量在一定范围内对马铃薯的出苗率影响不大，超过此范围会显著降低马铃薯的出苗率。

2.3 氮肥用量对马铃薯株高的影响

氮肥用量对马铃薯株高的影响因不同生育时期表现了不同差异(图 2)。各处理马铃薯株高在整个生育期呈慢-快-慢的“S”型增长趋势，在出苗后 17 ~ 31 d

(苗期到块茎形成中期)株高增长较慢，从出苗后 31 ~



(图中小写字母不同表示处理间差异达 P<0.05 显著水平，下同)

图 1 氮肥用量对马铃薯出苗率的影响

Fig. 1 Effect of Nitrogen application rate on potato emergence rate

51 d(块茎形成中期到块茎膨大期)增长最快,之后再次进入缓慢增长期,特别是出苗后 66 d(淀粉积累初期)以后趋于平缓,出苗后 79 d(淀粉积累末期)达到最大值。苗期各处理株高差异不明显,块茎形成中期以后 N₃₄₅ 处理的株高迅速增加,高于其他处理,但与其他处理差异并不显著; N₄₉₅、N₁₉₅ 处理的株高在块茎形成末期前(出苗后 43 d 左右)低于其他处理,之后也快速增加,明显高于 N₂₇₀、N₄₂₀ 和 N₀ 处理,但差异不显著;而 N₀、N₂₇₀、N₄₂₀ 处理在各生育时期没有明显差异。说明氮肥不足和过量均会影响马铃薯的生长。

2.4 氮肥用量对马铃薯叶片 SPAD 值的影响

氮肥用量对马铃薯叶片 SPAD 值的影响也因不同生育时期表现了不同差异(图 3)。整个生育期各处理马铃薯叶片 SPAD 值以出苗后 23~36 d 时(苗期到块茎形成中期)最高,以后逐渐下降。在不同生育时期,施氮处理的 SPAD 值除出苗后 36 d(块茎形成中期)外均高于 N₀ 处理,且 N₄₂₀ 处理除出苗后 66 d(淀粉积累初期)外均高于其他施氮处理。出苗后 23 d(苗期)和出苗后 79 d(淀粉积累末期)各处理之间无显著

差异,而出苗后 36 d(块茎形成中期)N₄₂₀ 处理显著高于 N₁₉₅ 处理,但与其他处理差异并不显著;出苗后 51 d(块茎膨大期)N₄₉₅、N₄₂₀、N₂₇₀ 处理显著高于 N₁₉₅、N₀ 处理,但 N₂₇₀~N₄₉₅ 处理间差异不显著;出苗后 66 d(淀粉积累初期)N₃₄₅~N₄₉₅ 处理显著高于 N₀ 处理,但与 N₁₉₅、N₂₇₀ 处理差异并不显著。说明施氮可提高马铃薯叶片 SPAD 值,块茎膨大期氮肥用量对 SPAD 值影响较大,且在施氮量 0~270 kg/hm² 时随氮肥用量的增加而增加,当超出此范围,SPAD 值不会发生明显增加^[12]。

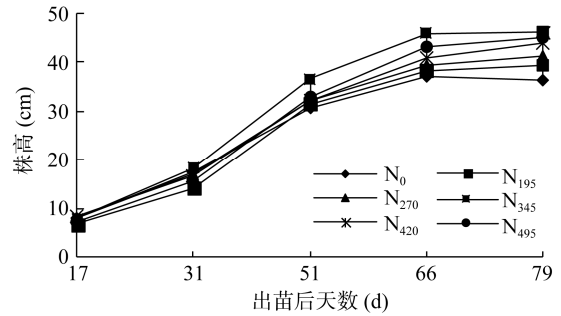


图 2 氮肥用量对马铃薯株高的影响
Fig. 2 Effect of Nitrogen application rate on potato plant height

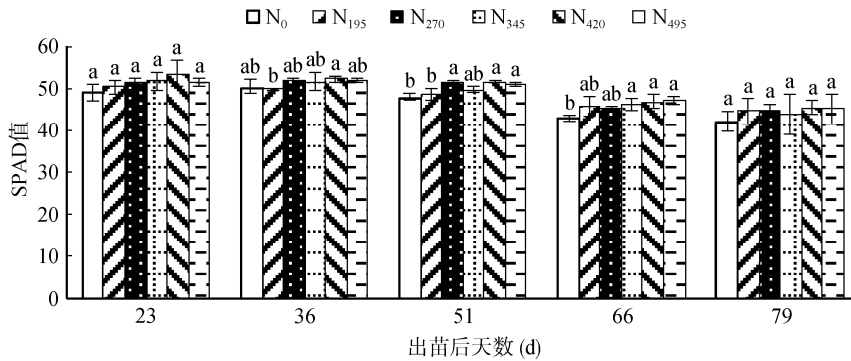


图 3 氮肥用量对马铃薯叶片 SPAD 值的影响
Fig. 3 Effect of Nitrogen application rate on potato leaves SPAD

2.5 氮肥用量对马铃薯叶面积指数的影响

由表 2 可见,马铃薯叶面积指数随生育进程的推进呈先增加后降低的趋势,其中 N₀、N₁₉₅ 处理在出苗后 51 d(块茎膨大期)达到最大值,而 N₂₇₀~N₄₉₅ 处理则在出苗后 66 d(淀粉积累初期)达到最大值。随氮肥用量的增加马铃薯叶面积指数亦呈先增加后降低的趋势,在不同生育时期, N₃₄₅ 处理的叶面积指数均达最大值, N₀ 处理均达最小值。出苗后 23~51 d 各处理间无显著差异,而出苗后 66~83 d, N₃₄₅ 与 N₀、N₁₉₅ 处理差异显著,但 N₂₇₀~N₄₉₅ 处理间差异并不显著。说明适量施氮可提高马铃薯叶面积指数,且在块茎膨大期前氮肥用量对叶面积指数影响差异不明显,

表 2 氮肥用量对马铃薯叶面积指数的影响

Table 2 Effect of nitrogen application rate on leaf area index of potato

处理	出苗后天数			
	23 d	51 d	66 d	83 d
N ₀	0.10 aA	0.85 aA	0.80 cA	0.73 bA
N ₁₉₅	0.16 aA	1.56 aA	1.00 bcA	0.88 bA
N ₂₇₀	0.17 aA	1.49 aA	2.17 abA	1.43 abA
N ₃₄₅	0.32 aA	1.64 aA	2.44 aA	2.10 aA
N ₄₂₀	0.28 aA	1.30 aA	2.21 abA	1.80 abA
N ₄₉₅	0.31 aA	0.89 aA	1.24 abcA	1.15 abA

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异达 P<0.05 显著水平, 大写字母不同表示差异达 P<0.01 显著水平, 下同。

之后，氮肥不足导致叶片早衰，光合面积下降，而氮肥充足植株生长旺盛，有利于光合面积的维持。

2.6 氮肥用量对马铃薯产量形成的影响

从马铃薯产量构成因子来看(表 3)，马铃薯单株结薯数、单株薯重与块茎产量的变化趋势相同，均以 N₃₄₅ 处理最高，N₀ 处理最低，且 N₃₄₅ 处理的单株结薯数与 N₀、N₁₉₅ 处理差异显著，单株薯重分别与 N₀、N₁₉₅ 处理差异达极显著和显著水平，但 N₂₇₀~N₄₉₅ 处理间的单株结薯数、单株薯重差异不显著；单薯重在 N₂₇₀ 处理下达到最大之后下降，但各处理间差异不显

著。块茎分级结果表明，大薯数以 N₃₄₅ 和 N₄₉₅ 处理最多，N₄₂₀ 处理次之，而 N₀ 处理显著减少；大薯重在 N₃₄₅ 处理下达到最大之后逐步下降，但 N₁₉₅、N₃₄₅、N₄₂₀、N₄₉₅ 处理间差异不显著，而 N₃₄₅ 处理分别较 N₂₇₀、N₀ 处理显著和极显著增加；中薯数和中薯重均在 N₂₇₀ 处理下达最大值，且 N₂₇₀ 处理的中薯数显著高于 N₁₉₅ 处理，中薯重极显著高于其他处理；小薯数和小薯重在不同处理间差异均不显著；商品薯率以 N₄₉₅ 处理最高，但各处理间差异并不显著。

表 3 氮肥用量对马铃薯块茎产量及产量构成因子的影响
Table 3 Effect of nitrogen application rate on tuber yield and yield factor of potato

处理	块茎产量 (kg/hm ²)	单株结 薯数	单株薯重 (g)	大薯(>150 g)		中薯(75 ~ 150 g)		小薯(<75 g)		单薯重 (g)	商品薯率 (%)
				个数	重量(g)	个数	重量(g)	个数	重量(g)		
N ₀	46 893.2 cB	5.1 cA	755.0 cB	2.2 bA	568.8 cB	1.2 abA	124.2 bB	1.6 aA	62.0 aA	148.9 aA	91.8 aA
N ₁₉₅	51 186.4 bcAB	5.2 bcA	831.0 bcAB	2.5 abA	648.4 abcAB	1.1 bA	122.4 bB	1.6 aA	60.1 aA	160.7 aA	92.8 aA
N ₂₇₀	54 962.4 abA	5.5 abcA	885.2 abA	2.4 abA	629.0 bcAB	1.5 aA	177.6 aA	1.5 aA	78.6 aA	161.4 aA	91.2 aA
N ₃₄₅	58 420.1 aA	6.0 aA	940.6 aA	2.7 aA	727.0 aA	1.2 abA	138.6 bB	2.0 aA	75.0 aA	158.2 aA	92.0 aA
N ₄₂₀	54 461.9 abA	5.9 abA	883.9 abA	2.6 aA	677.7 abAB	1.2 abA	129.0 bB	2.0 aA	77.1 aA	151.0 aA	91.3 aA
N ₄₉₅	52 715.9 bAB	5.4 abcA	866.3 abAB	2.7 aA	673.6 abAB	1.2 abA	136.5 bB	1.5 aA	56.1 aA	159.9 aA	93.5 aA

氮肥用量对马铃薯块茎产量产生了显著影响(表 3)。随氮肥用量的增加马铃薯块茎产量呈先增加后降低的趋势，N₃₄₅ 处理产量达最大值，较 N₀ 处理极显著增产 24.58%，较 N₁₉₅ 处理显著增产 14.13%；而 N₄₂₀ 和 N₄₉₅ 处理分别较 N₃₄₅ 处理产量下降 6.78% 和 9.76%，N₄₉₅ 处理减产显著。应用二次多项式模型对马铃薯产量与氮肥用量进行拟合发现(图 4)，氮肥效应曲线为一条抛物线，存在着适宜的施氮幅度，施氮不足或过量均不利于高产，其氮肥效应方程为： $y = -0.078N^2 + 53.315N + 46\ 250.5$ ， $R^2 = 0.778$ ，由该方程可知，当施氮量为 341.7 kg/hm² 时马铃薯块茎产量达到理论最大值 55 359.3 kg/hm²，因此其最高产量施氮量为 341.7 kg/hm²；按 2017 年当地冬马铃薯平均销售价格 2.0 元/kg，氮肥 4.56 元/kg 计算，得出马铃薯经济最佳施氮量为 327.1 kg/hm²，其经济最佳产量为 55 344.3 kg/hm²，这与最高产量相差不大，而施氮量则比最高产量施氮量降低了 4.27%。这表明马铃薯在经济最佳施氮量下不仅能获得较高的产量，而且还能降低氮肥投入，提高经济效益。

2.7 氮肥用量对马铃薯经济效益的影响

氮肥用量对马铃薯经济效益产生显著影响(表 4)。施氮效应和施氮效益均随氮肥用量的增加先增加后降低，均在 N₃₄₅ 处理下达最大值，N₁₉₅ 处理下达最小值，且 N₃₄₅ 处理与 N₁₉₅、N₄₉₅ 处理差异达显著

水平，与其他处理差异不显著；氮肥投入随氮肥用量的增加而逐步增加，N₃₄₅ 处理的氮肥投入虽然较 N₁₉₅、N₂₇₀ 处理有所增加，但其较高的施氮效益导致施氮纯收入高于其他处理，达 21 516.4 元/hm²，分别比 N₁₉₅、N₂₇₀ 处理高 178.8%、44.1%，且 N₃₄₅ 与 N₁₉₅ 处理差异显著；施氮量超过 345 kg/hm² 后施氮纯收入逐步降低，N₄₉₅ 处理的氮肥投入过多导致施氮纯收入较 N₃₄₅ 处理显著降低。氮肥产投比(VCR)和农学效率(AE)均随氮肥用量的增加先增加后降低，均在 N₃₄₅ 处理下达最大值，但 N₁₉₅~N₄₂₀ 处理间无显著差异，而 N₄₉₅ 处理较 N₃₄₅ 处理显著下降。说明适量施用氮肥可显著提高马铃薯的施氮效应，增加经济效益，但过量施用氮肥增加了肥料投入，并没有提高施氮效应，从而降低了经济效益和氮肥农学效率。

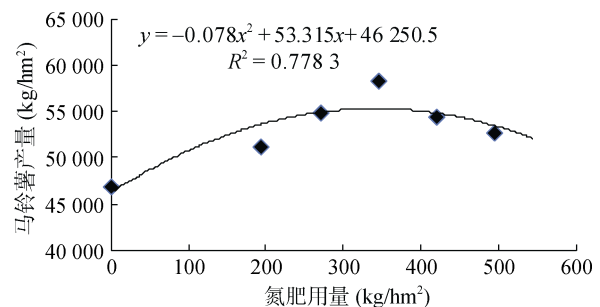


图 4 氮肥用量对马铃薯块茎产量的影响

Fig. 4 Effect of Nitrogen application rate on potato tuber yield

表 4 氮肥用量对马铃薯经济效益的影响
Table 4 Effect of nitrogen application rate on economic benefit of potato

处理	施氮效应(kg/hm ²)	施氮效益(元/hm ²)	氮肥投入(元/hm ²)	施氮纯收入(元/hm ²)	氮肥产投比(元/元)	氮肥农学效率(kg/kg)
N ₀	-	-	-	-	-	-
N ₁₉₅	4 293.1 bA	8 586.3 bA	869.0	7 717.3 bA	9.9 abA	22.0 abA
N ₂₇₀	8 069.2 abA	16 138.3 abA	1 203.3	14 935.1 abA	13.4 abA	29.9 abA
N ₃₄₅	11 526.9 aA	23 053.9 aA	1 537.5	21 516.4 aA	15.0 aA	33.4 aA
N ₄₂₀	7 568.7 abA	15 137.4 abA	1 871.7	13 265.7 abA	8.1 abA	18.0 abA
N ₄₉₅	5 822.7 bA	11 645.4 bA	2 206.0	9 439.4 bA	5.3 bA	11.8 bA

注：当年当地马铃薯平均销售价格 2.0 元/kg；尿素价格 2.05 元/kg，折纯氮为 4.56 元/kg。

3 讨论

在马铃薯生产中,养分平衡供应是获得高产和高效的关键^[12],氮是马铃薯生长发育所必需的营养元素,氮素不足或过量均会导致马铃薯生长发育不良,光合性能下降,源库关系失调,影响块茎产量^[13-15],因此合理的氮素供应可协调马铃薯茎叶生长和块茎生长,维持光合器官和储存器官的适宜比例,增加结薯数和大中薯比例,从而提高块茎产量^[16]。本试验结果表明,马铃薯生育期随氮肥用量的增加逐渐延长,马铃薯叶面积指数、单株结薯数、单株薯重和块茎产量均随氮肥用量的增加呈先升高后降低的趋势,均在 345 kg/hm² 施氮量时最高,同时在该施氮量下马铃薯长势好,株高和大薯重高于其他处理,而施氮量达 495 kg/hm² 时马铃薯出苗率、块茎产量显著下降,这与前人的研究结果基本一致^[5, 17-19]。主要原因可能是,氮肥供应不足时,马铃薯植株生长缓慢,茎叶生长量不够,叶面积减小,光合生产“源”不足,生长中心过早向块茎转移,生育进程缩短,干物质合成量减少,导致块茎产量降低。然而,过量施用氮肥,一方面会抑制马铃薯萌发出苗和块茎的形成^[17, 20],导致出苗率降低,结薯数减少;另一方面在相同灌水量下,过高的氮肥会导致马铃薯根区养分浓度较高,不利于根系对水肥的吸收,抑制了马铃薯的生长^[19],造成叶面积下降,光合效率降低,块茎干物质累积及分配比例下降,从而降低块茎产量。合理施用氮肥可促进马铃薯生长,改善群体光照,提高光合效率,促进光合产物适时向块茎运输和分配,增加单株结薯数^[12]和薯重,同时可避免过多的氮肥降低出苗率,保证单位面积有效株数而获取高产。

马铃薯产量对氮肥用量的反应是由产量构成因子的差异决定的。何万春等^[21]研究认为,施氮量对马铃薯单株结薯重量和平均单薯重有显著影响,单株结薯重量和平均单薯重的变化是导致产量降低的直

接原因。本试验研究表明,氮肥用量对马铃薯小薯数、小薯重、单薯重和商品薯率没有显著影响,而对单株结薯数、单株薯重、大中薯数、大中薯重有显著或极显著影响,且随氮肥用量的增加,马铃薯单株结薯数、单株薯重和大薯重有着与块茎产量相同的变化趋势,说明马铃薯块茎产量的差异主要是由单株结薯数、单株薯重和大薯重的差异造成的,单株结薯数、单株薯重和大薯重的降低直接导致了产量的降低,这与井涛^[9]的研究结果基本相似。

氮素涉及马铃薯植株整个生育期的调控,不仅影响块茎产量的形成,还调控着地上部分生长^[20]。马铃薯生长对氮肥用量的反应不仅与施氮水平有关,还受土壤肥力、供试品种、栽培管理等因素的综合影响。有研究认为,马铃薯的叶面积指数、叶片 SPAD 值随着施氮量的增加而增加,马铃薯的株高在块茎成熟期随施氮量的增加而显著增加^[13, 22-23]。也有研究认为,施氮量在一定范围内可显著促进马铃薯地上部生长,当施氮量达到一定的阈值以后,叶片 SPAD 值与产量的变化相似,不再随施氮量的增加而增加^[3, 5, 12]。本试验研究发现,马铃薯株高在整个生育期呈慢-快-慢的“S”型增长趋势,苗期各处理株高差异不明显,块茎形成中期后 N₃₄₅ 处理的株高明显高于其他处理;马铃薯叶面积指数随氮肥用量的增加呈先增加后降低的变化趋势,而氮肥用量对马铃薯块茎膨大期叶片 SPAD 值影响较大,且在施氮量 0~270 kg/hm² 时随氮肥用量的增加而增加,当超出此范围,SPAD 值不会发生明显增加。这与前人的研究不尽相同,其原因一方面可能与本试验土壤氮素养分含量高,植株对肥料氮的吸收不敏感有关;另一方面可能与品种、研究方法以及栽培管理不同有关。井涛^[9]研究发现在土壤水分适宜供应的条件下,施用氮肥能有效地提高马铃薯的氮素吸收速率,但当施氮量超过时,再增加氮肥用量实际上不能继续提高马铃薯对氮素的吸收利用。戚迎龙等^[24]研究发现,膜下滴灌下低灌水量

不能有效发挥氮对玉米产量的贡献, 灌水 $1\ 800 \sim 2\ 100\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施氮 $250 \sim 280\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 能获得比较高的产量和水氮协同增产效应。本研究也发现, 氮肥用量在相同灌水量下对马铃薯的生长影响较大, 说明水分管理也是影响马铃薯对氮肥吸收利用的重要因素之一, 因此, 在以后的研究中还将结合马铃薯生长期对水分的需求, 考虑氮肥用量与之相适应的水分管理, 进一步研究不同氮肥用量下的适宜灌水量, 寻求合理的水、氮供应方案, 达到以水调氮的目的, 这对于提高马铃薯产量和水、氮利用效率具有重要意义。

经济效益是科学施肥管理的最终目标, 李书田等^[6]研究认为, 不合理的施肥会降低马铃薯的经济效益, 减小产投比。张晓光等^[25]研究表明, 增施少量氮肥不能明显增加白萝卜的生物产量、经济产量、肉质根产量和经济产值, 只有达到一定量时才能促进各项产量和经济产值的增加, 同时过量施用氮肥并不能促进白萝卜生物产量、经济产量、肉质根产量和经济产值的增加。本试验结果表明, 施氮量在 $195 \sim 345\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时施氮效应、施氮效益、施氮纯收入和氮肥产投比均随氮肥用量的增加而增加, 施氮量超过 $345\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时均逐渐下降, 并且施氮量达 $495\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时显著下降, 该结果与张炜等^[3]研究结果基本一致。氮肥农学利用率是单位施肥量对作物产量增加的反应, 是农业生产中最关心的经济指标之一^[26], 井涛^[9]研究表明, 马铃薯的氮素吸收利用率、氮素农学利用率和氮素生理利用率均随着施氮量的增加呈现显著降低的趋势。黄继川等^[5]研究表明, 氮素农学利用效率和氮素生理利用率均在施氮量 $240\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时上升至最大值。本试验结果表明, 氮肥农学效率随氮肥用量的增加呈先增后降的趋势, 在施氮量 $345\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时达最大值, 而施氮量达 $495\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时显著下降, 说明施氮量在 $195 \sim 345\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 范围内, 单位增施氮肥具有较好的增产效果, 而施氮量超过 $345\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 单位增施氮肥增产效果下降, 造成减产。因此控制适宜的氮肥用量是提高马铃薯产量、经济效益和氮肥利用率的重要农艺措施。

目前关于马铃薯的适宜氮肥用量研究报道较多, 然而, 不同地区由于自然条件、土壤类型、生长季节、栽培管理及品种等差异, 适宜的氮肥用量存在较大差异^[1], 如广西南宁^[14]、内蒙古武川^[27]、珠三角地区^[5]、湖北省襄阳^[3]的适宜施氮量分别为 160 、 185 、 240 、 $261.7\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。而本试验结果表明, 马铃薯最高产量施氮量和经济最佳施氮量分别为 341.7 、 $327.1\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 施氮量偏高, 其原因一方面可

能与供试品种、栽培环境等因素有关, 另一方面可能与本试验土壤 pH 偏低, 影响了马铃薯根系对氮素的吸收, 需要更多的氮肥投入有关。

4 结论

氮是影响马铃薯生长发育和产量形成的重要元素, 膜下滴灌条件下, 适宜的氮肥用量可促进马铃薯生长, 提高出苗率、叶面积指数, 维持良好的光合势, 延长叶片的衰老, 有利于增加单株结薯数、单株薯重和大薯重, 提高块茎产量和经济效益。过高的氮肥用量会抑制马铃薯生长, 出苗率、叶面积指数下降, 生育进程推迟, 不利于单株结薯数、单株薯重和块茎产量的提高, 导致经济效益和氮肥农学效率下降。本试验条件下, 马铃薯产量和经济效益均随氮肥用量的增加先增加后降低, 在 $345\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 施氮量时马铃薯产量、施氮纯收入、氮肥产投比和农学效率最高, 但与施氮量为 $270\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $420\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 的处理无显著差异, 而施氮量增加到 $495\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时显著下降。因此, 按照“增产施肥、经济施肥、环保施肥”理念, 从马铃薯的生长、产量和经济效益方面综合考虑, 膜下滴灌冬马铃薯适宜的氮肥用量应该控制在 $270 \sim 327.1\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 可获得较高的产量和经济效益。

参考文献:

- [1] 韦剑锋, 韦巧云, 梁振华, 等. 供氮水平对冬马铃薯氮肥利用效率及氮素去向的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1483-1488.
- [2] 李梦龙, 何万春, 何昌福, 等. 氮肥施用量对水浇地覆膜马铃薯土壤矿质氮含量及马铃薯产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(31): 60-64.
- [3] 张炜, 杨德桦, 黄小管, 等. 氮肥用量对襄阳地区马铃薯产量、品质 and 经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 72-76.
- [4] Alva A. Potato nitrogen management[J]. Journal of Vegetable Crop Production, 2004, 10(1): 97-132.
- [5] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 不同氮肥用量对冬种马铃薯产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. 热带作物学报, 2014, 35(2): 266-270.
- [6] 李书田, 段玉, 陈占全, 等. 西北地区马铃薯施肥效应和经济效益分析[J]. 中国土壤与肥料, 2014(4): 42-47.
- [7] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23-29.
- [8] 梁淑敏, 王颖, 杨琼芬, 等. 我国云南山区马铃薯周年生产潜力的时空分布特征[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(6): 201-207.
- [9] 井涛. 膜下滴灌马铃薯生长发育规律及其对水氮的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.

- [10] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 98-105.
- [11] 鲁如坤, 朱海舟, 何平安, 等. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 魏峭嵘, 曹敏建, 石瑛, 等. 氮素水平对马铃薯全生育期光合特性及产量的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(1): 324-330.
- [13] 姜丽丽, 王梓全, 尤晗, 等. 施氮量对炸条型马铃薯产量及叶面积的影响[J]. 中国马铃薯, 2014, 28(4): 212-216.
- [14] 韦冬萍, 宋书会, 韦剑锋, 等. 施氮量对冬马铃薯生理性状及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 122-124.
- [15] 张婷婷, 蒙美莲, 陈有君, 等. 氮素水平对马铃薯干物质积累及库活性的影响[J]. 中国马铃薯, 2015, 29(2): 75-79.
- [16] 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.
- [17] 韦剑锋, 韦巧云, 梁振华, 等. 施氮量对冬马铃薯生长发育、产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(12): 61-64.
- [18] 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.
- [19] 张富仓, 高月, 焦婉如, 等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 270-278.
- [20] 高媛, 秦永林, 樊明寿. 马铃薯块茎形成的氮素营养调控[J]. 作物杂志, 2012(6): 14-18.
- [21] 何万春, 何昌福, 邱慧珍, 等. 不同氮水平对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 175-182.
- [22] 何昌福, 张健, 邱慧珍, 等. 不同氮水平对旱地覆膜马铃薯‘青薯 9 号’干物质积累分配及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(2): 19-26.
- [23] 胡新喜, 冯艳青, 雷艳, 等. 不同施氮水平下秋马铃薯的生长以及 StNR 和 StAT 的表达[J]. 园艺学报, 2015, 42(10): 1974-1982.
- [24] 戚迎龙, 史海滨, 王成刚, 等. 滴灌水氮对土壤残留有效氮及玉米产量的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 278-285.
- [25] 张晓光, 田迎宇, 兰富军, 等. 氮肥用量对白萝卜产量与水分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(1): 33-36.
- [26] 周亮, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同氮肥施用对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 971-975.
- [27] 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.