

施氮量对马铃薯干物质积累特性和产量的影响

崔亮¹, KRISTIINA Laanemets², 刘冠求¹, TERJE Tähwärv²,
MATI Koppel², 周桦楠¹, 潘家荃¹, 万博¹, 孟令文¹

(1. 辽宁省农业科学院 作物研究所,辽宁 沈阳 110161; 2. 爱沙尼亚作物研究所,爱沙尼亚 耶盖瓦 48309)

摘要: 以辽宁省主推马铃薯品种辽薯6号为试验材料,采取膜下滴灌种植模式,在底施氮磷钾(15:15:15)复合肥750 kg/hm²的基础上,设置5个追施氮水平($N_1:0\text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_2:60\text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_3:105\text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_4:180\text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_5:225\text{ kg}/\text{hm}^2$),以滴施方式追施,研究施氮量对马铃薯干物质积累特性及产量的影响。结果表明,马铃薯叶、茎的干物质积累量和分配比例均随着施氮量的增加而增加,以 N_5 处理最高。块茎的干物质积累量和分配比例随着施氮量的增加先增加后降低,以 N_3 处理最高。马铃薯的干物质转运量、转移率、平均薯块质量、单株薯块质量、产量均以 N_3 处理最高,显著高于其他处理,其中产量为46.5 t/hm²,分别较 N_1 、 N_2 、 N_4 、 N_5 处理提高92.9%、78.2%、9.7%、18.6%。相关分析表明,马铃薯的干物质积累量、积累速率、转运量、转移率与平均薯块质量、单株薯块质量和产量均呈极显著正相关。说明 N_3 处理通过对马铃薯叶、茎及块茎干物质积累量及分配比例的调控,提高了叶和茎干物质向块茎的转运量和转移率,进而增加了平均薯块质量、单株结薯质量和产量。综上,追施氮量以105 kg/hm²最佳。

关键词: 马铃薯; 追施氮量; 干物质积累; 干物质分配; 产量

中图分类号: S532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2020)02-0044-08

Effects of Different Nitrogen Application Rate on Dry Matter Accumulation Characteristic and Yield of Potato

CUI Liang¹, KRISTIINA Laanemets², LIU Guanqiu¹, TERJE Tähwärv², MATI Koppel²,
ZHOU Huanan¹, PAN Jiaquan¹, WAN Bo¹, MENG Lingwen¹

(1. Crop Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China;

2. Estonian Crops Research Institute, Jõgeva 48309, Estonia)

Abstract: Liaoshu No. 6 was used as material to investigate the effects of topdressing rate of N ($N_1:0\text{ kg}/\text{ha}$; $N_2:60\text{ kg}/\text{ha}$; $N_3:105\text{ kg}/\text{ha}$; $N_4:180\text{ kg}/\text{ha}$; $N_5:225\text{ kg}/\text{ha}$) on dry matter accumulation characteristics and yield of potato based on 750 kg/ha NPK (15:15:15) compound fertilizer as the base fertilizer through film mulched drip irrigation. The results showed that the dry matter accumulation and distribution ratio of potato leaf and stem increased with the increase of nitrogen application rate, and N_5 treatment had the highest values; the dry matter accumulation and distribution ratio of potato tuber increased first and then decreased with the increase of nitrogen application rate, and N_3 treatment had the highest values. The translocation amount and ratio of dry matter, average tuber weight, tuber weight per plant and yield of N_3 treatment were the highest. The yield of N_3 treatment was 46.5 t/ha, which increased by 92.9%, 78.2%,

收稿日期:2019-09-20

基金项目:辽宁省博士科研启动基金项目(201601383);沈阳市重点科技研发计划项目(17-154-3-00);中国-爱沙尼亚马铃薯联合育种实验室项目

作者简介:崔亮(1983-),男,辽宁锦州人,助理研究员,博士,主要从事马铃薯育种与高效栽培技术研究。

E-mail: cuiliang2832@126.com

通信作者:孟令文(1963-),男,辽宁沈阳人,研究员,主要从事薯类作物育种与配套栽培技术研究。

E-mail:Lnsmlw2004@163.com

9.7%, 18.6% compared with N_1, N_2, N_4, N_5 treatments. Correlation analysis showed that there were significantly positive relationships between dry matter accumulation, dry matter accumulation rate, dry matter translocation amount, dry matter translocation rate and average tuber weight, tuber weight per plant, yield. The above results indicated that the optimum N topdressing rate was 105 kg/ha.

Key words: Potato; Nitrogen topdressing rate; Dry matter accumulation; Dry matter distribution; Yield

马铃薯是我国第四大粮食作物,具有耐旱、耐贫瘠、适应性广等特点。氮素是马铃薯生长发育过程中必需的营养元素,在干物质积累和转运方面起着决定性作用,也是制约其生长和产量提高的主要因素^[1-3]。氮素供应过多,易导致马铃薯地上部徒长,延迟块茎的形成,抑制块茎膨大,造成贪青晚熟,产量降低;氮素供应过少,易导致生长中心过早由茎叶转向块茎,茎叶生长量不够,从而光合生产“源”不足,干物质合成减少,块茎产量降低,也会影响对其他养分的吸收^[4]。在一定范围内增加氮肥用量可增加作物干物质积累速率,提高产量^[5]。适宜的施氮比例有利于提高作物生育后期的根系活力、形成有效利用养分的根系特征、促进叶片光合能力的发挥,最终实现高产^[6]。近年来,随着国家马铃薯主粮化发展战略的提出,其种植面积逐年增加,由于追求高产而导致的过施氮肥,诱发了土壤酸碱度的失衡,使得氮积累导致的负面生态效应大于产量增益^[7-9]。同时,栽培技术的滞后使马铃薯氮肥利用率显著下降^[10],造成氮素淋失对水资源和土壤的高污染风险^[11],影响马铃薯正常的生长发育及干物质积累^[12],严重限制了产量潜力的发挥^[13]。因此,根据马铃薯需肥特性,使氮肥施用量与马铃薯需肥规律相一致,量化马铃薯干物质分配和产量对氮肥施用的响应规律,是实现氮肥优化管理的重要前提。

目前,关于氮肥施用比例、施用量、施用时期以及氮素形态对玉米^[14-15]、水稻^[16-17]、小麦^[18-19]、棉花^[20-21]等作物产量影响的研究比较系统。关于氮肥运筹对马铃薯产量和品质的影响研究主要集中在水氮互作、氮磷钾肥互作、氮肥和密度互作等多因素互作对马铃薯块茎生长发育特性、淀粉积累特性等产量和品质性状的影响方面^[22-24]。也有许多学者通过施氮量的调控,研究马铃薯生长发育及氮代谢特征对氮肥盈缺的响应机制,以及施氮量对根际土壤生物活性和晚疫病发生程度的影响^[25-26]。前人的研究多是关于马铃薯生长发育及产量和品质特性对农业生产因素互作的响应规律,对氮肥施用量调控马铃薯干物质积累及产量差异形成的机制研究缺乏系统性。辽宁省作为我国重要的马铃薯主产区之一,常年过施氮肥及窄行裸地漫水灌溉等栽培技术

导致水肥利用率低,影响土壤有机碳组分构成,致使土壤板结问题突出,降低了土壤的供氮能力,制约马铃薯生长发育和产量提升^[27-28]。因此,开展氮肥运筹技术对该地马铃薯干物质积累及产量的影响研究具有重要意义。为此,采用马铃薯大垄双行膜下滴灌栽培技术,根据马铃薯不同生育时期的氮肥需求特性,通过大田试验,以不施氮肥为对照,在基施氮磷钾复合肥的基础上,设置5个氮肥追施量,并采用分期滴施方式进行追施,研究施氮量对马铃薯干物质积累和产量的影响,以确定最佳施氮量,为辽宁省马铃薯种植区减氮增效、发展环境友好型农业种植模式提供科学依据和理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验于2018年在辽宁省沈阳市康平县文华村进行,该区海拔446.7 m,年平均气温6.9 °C,年太阳辐射总量4 916.78 MJ/m²,年日照时数2 867.8 h,≥10 °C积温3 283.3 °C,无霜期150 d。

供试土壤为砂壤土,含有机质26.5 g/kg、全氮0.115 g/kg、碱解氮99.0 mg/kg、速效磷20.5 mg/kg、速效钾103.5 mg/kg,pH值为5.5。

供试马铃薯品种为辽宁省主栽的辽薯6号,生育期70 d,属早熟型品种。

1.2 试验设计

大田试验采用单因素随机区组设计,设置5个追施氮水平,分别为0 kg/hm²(N_1)、60 kg/hm²(N_2)、105 kg/hm²(N_3)、180 kg/hm²(N_4)和225 kg/hm²(N_5)。各施肥处理分别在出苗后10、20、30、40、50 d进行滴施追肥,每次施肥量为相应处理的1/5。底肥施用氮磷钾(15:15:15)复合肥750 kg/hm²。小区面积为30 m²,重复3次,随机区组排列,采用大垄双行膜下滴灌种植模式,幅宽120 cm,大行距80 cm,小行距40 cm,株距20 cm,密度为8.25万株/hm²。于2018年4月10日播种,7月20日收获,其他田间管理措施按照实际生产田进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 干物质积累量及干物质转运量、转移率 在出苗后10、20、30、40、50 d,每小区选取长势均匀的

马铃薯植株 5 株, 将茎、叶和块茎洗净后用滤纸擦干, 分别装入纸袋, 在 105 ℃下杀青 30 min 后, 继续在 80 ℃烘至恒质量, 测定干质量, 并计算马铃薯各器官干物质的转运量及转移率^[29-30]。

营养器官干物质转运量=淀粉积累期营养器官干质量-成熟期营养器官干质量;

营养器官干物质转移率=营养器官干物质转运量/淀粉积累期营养器官干质量×100%。

1.3.2 干物质积累速率 通过对 Logistic 方程 $y = k/(1+ae^{-bx})$ 求导可得干物质积累速率方程^[31], 即:

$$y' = \left(\frac{k}{(1+ae^{-bx})} \right)' = \frac{kabe^{-bx}}{(1+ae^{-bx})^2}$$

以马铃薯出苗后时间为横坐标, 做出马铃薯干物质积累速率与出苗后时间的关系曲线。

1.3.3 产量及其构成要素 在马铃薯成熟时, 每个小区连续取 10 株考种, 分别统计单株薯块数、平均薯块质量、单株薯块质量, 计算理论产量。

1.4 数据处理

用 Excel 2007 进行数据整理, 采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行相关分析、方差分析和差异显著性测验 (LSD 法, $\alpha=0.05$), 采用 Origin 8.5 和 SigmaPlot 12.5 软件进行回归分析、作图。

2 结果与分析

2.1 施氮量对马铃薯干物质积累量的影响

由图 1 可知, 马铃薯生育前期 (出苗后 10 d), 干物质积累量较低, 处理间差异不明显; 出苗后 20~40 d 不同处理干物质积累量明显增加, 且处理间差异逐渐加大; 出苗后 40~50 d 干物质积累量增加缓慢。马铃薯干物质积累量随着施氮量的增加而逐渐增加, 总体表现为 $N_5 > N_4 > N_3 > N_2 > N_1$, 出苗后 50 d, N_5 处理分别较 N_4 、 N_3 、 N_2 、 N_1 处理提高 2.3%、5.1%、38.2%、82.9%。

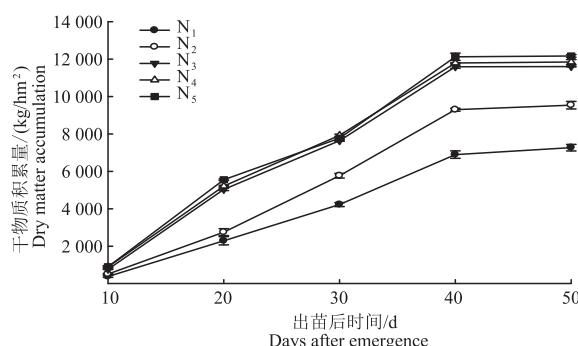


图 1 施氮量对马铃薯干物质积累量的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation of potato

2.2 施氮量对马铃薯干物质积累速率的影响

由表 1 和图 2 可知, 各处理马铃薯干物质积累速率随着时间的推进均呈先增加后降低的趋势, N_3 、 N_4 处理干物质积累速率在出苗后 20 d 达到最大值, 其余处理在出苗后 30 d 达到最大值; 出苗后 30~50 d, 马铃薯干物质积累速率迅速下降。全生育期内, 马铃薯干物质积累速率总体以 N_5 处理最高, N_1 处理最低。

表 1 马铃薯干物质积累速率 (y) 与出苗后时间 (x) 的回归方程
Tab. 1 Regression equations between dry matter accumulation rate (y) and days after emergence (x)

under different treatments

Treatment	Regression equation	R^2
N_1	$y = 7\ 721.68 / (1 + 48.77 e^{-0.14x})$	0.985 4
N_2	$y = 10\ 070.12 / (1 + 68.20 e^{-0.16x})$	0.990 2
N_3	$y = 12\ 180.25 / (1 + 31.23 e^{-0.14x})$	0.971 9
N_4	$y = 12\ 396.60 / (1 + 29.46 e^{-0.14x})$	0.974 9
N_5	$y = 12\ 862.77 / (1 + 25.53 e^{-0.13x})$	0.961 8

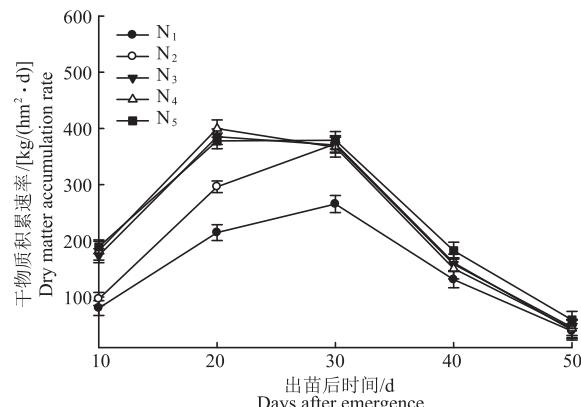


图 2 施氮量对马铃薯干物质积累速率的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation rate of potato

2.3 施氮量对马铃薯干物质积累与分配的影响

由表 2 可知, 马铃薯叶、茎的干物质积累量均随着施氮量的增加而增加, 以 N_5 处理最高, N_5 处理叶和茎分别较 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 处理提高 147.6%、70.1%、36.2%、12.5% 和 87.9%、72.6%、29.3%、5.3%; 块茎的干物质积累量随着施氮量的增加先增加后降低, 以 N_3 处理最高, 分别比 N_1 、 N_2 、 N_4 、 N_5 处理提高 82.9%、33.1%、6.1%、7.2%。马铃薯干物质在各器官中的分配比例表现为块茎>茎>叶; 马铃薯叶、茎的干物质分配比例总体上均随着施氮量的增加而增加, 以 N_5 处理最高; 块茎的干物质分配比例随着施氮量的增加先增加后降低, 以 N_3 处理最高。

表2 施氮量对马铃薯干物质积累与分配的影响

Tab. 2 Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation and distribution of potato

处理 Treatment	干物质积累量/(kg/hm ²)				干物质分配比例/%			
	Dry matter accumulation				Allocation proportion of dry matter			
	叶 Leaf	茎 Stem	块茎 Tuber		叶 Leaf	茎 Stem	块茎 Tuber	
N ₁	2 676.7±197.6e	4 518.8±154.9e	13 819.5±67.5d		12.7±0.7c	21.5±0.4a	65.8±1.0b	
N ₂	3 895.6±109.3d	4 918.4±29.8d	18 993.5±205.4c		13.9±0.2c	17.7±0.1b	68.3±0.1a	
N ₃	4 866.9±59.1c	6 566.1±54.5c	25 280.0±76.3a		13.2±0.1c	17.9±0.1b	68.9±0.2a	
N ₄	5 893.6±45.9b	8 061.4±119.9b	23 821.1±64.6b		15.6±0.1b	21.3±0.2a	63.1±0.3c	
N ₅	6 628.0±71.8a	8 491.2±64.3a	23 584.0±72.9b		17.1±0.1a	21.9±0.1a	60.9±0.2d	

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间的差异显著($P<0.05$),下同。

Note: The different lowercase letters after data within a column mean significant differences among different treatments at 0.05 level, the same below.

2.4 施氮量对马铃薯干物质转运的影响

由表3可知,各施氮处理马铃薯营养器官(叶+茎)向块茎转移的干物质均显著高于不施氮处理(N₁),且差异显著。转运量和转移率均以N₃处理

表3 施氮量对马铃薯干物质转运的影响

Tab. 3 Effects of nitrogen application rate on dry matter translocation of potato

处理 Treatment	转运量/(kg/hm ²)	转移率/%
Treatment	Translocation amount	Translocation ratio
N ₁	77.3±8.9d	3.6±0.3d
N ₂	126.2±2.1c	4.9±0.1c
N ₃	260.2±6.5a	8.9±0.3a
N ₄	217.3±3.8b	5.9±0.1b
N ₅	235.8±7.4b	6.2±0.2b

最大,分别为260.2 kg/hm²和8.9%,分别比N₁、N₂、N₄、N₅处理提高236.6%、106.2%、19.7%、10.3%和147.2%、81.6%、50.8%、43.5%。

2.5 施氮量对马铃薯产量及其构成因素的影响

由表4可知,施氮处理马铃薯平均薯块质量、单株薯块质量及产量均显著高于不施氮处理,单株薯块数在处理间差异不显著。随着施氮量增加,平均薯块质量、单株薯块质量和产量均呈先增加后降低的趋势,以N₃处理最高。与N₁、N₂、N₄、N₅处理相比,N₃处理平均薯块质量分别显著提高87.1%、73.1%、10.1%、14.9%,单株薯块质量分别显著提高93.1%、78.1%、9.8%、18.6%,产量分别显著提高92.9%、78.2%、9.7%、18.6%。

表4 施氮量对马铃薯产量及其构成因素的影响

Tab. 4 Effect of nitrogen application rate on the yield and yield components of potato

处理 Treatment	单株薯块数/个	平均薯块质量/(g/个)	单株薯块质量/g	产量/(t/hm ²)
Treatment	Tuber number per plant	Average tuber weight	Tuber weight per plant	Yield
N ₁	1.98±0.02a	147.5±1.5e	292.0±2.2e	24.1±0.2e
N ₂	1.99±0.02a	159.4±1.3d	316.6±4.9d	26.1±0.4d
N ₃	2.04±0.03a	275.9±2.1a	563.8±7.8a	46.5±0.6a
N ₄	2.05±0.05a	250.6±1.2b	513.7±10.2b	42.4±0.8b
N ₅	1.98±0.01a	240.1±1.8c	475.4±0.7c	39.2±0.1c

2.6 马铃薯干物质积累和产量的关系

由表5可以看出,马铃薯干物质积累量与干物质积累速率、转运量、转移率、平均薯块质量、单株薯块质量、产量均呈极显著正相关,与单株薯块数呈显著正相关。干物质积累速率与平均薯块质量、单株薯块质量、产量、干物质转运量、干物质转移率均呈极显著正相关,与单株薯块数呈显著正相关。干物质转运量与平均薯块质量、单株薯块质量、产量、干物质转移率均呈极显著正相关,与单株薯块数呈显著正相关。干物质转移率与平均薯块质量、单株薯块质量、产量均呈极显著正相关。平均薯块质量与单株薯块质量和产量均呈极显著正相关。单株薯块质量与产量呈极显著正相关。

3 结论与讨论

氮素是干物质形成的重要物质基础,干物质积累过程不仅取决于作物品种自身的遗传特性,也与氮肥施用量密切相关^[32-35]。陈瑞英^[36]研究表明,马铃薯干物质积累量随施氮量的增加而增大,当施氮量高于360 kg/hm²时,会降低干物质的积累量。本研究结果表明,不施氮肥处理马铃薯干物质积累量和积累速率最低,这主要是由于氮肥的缺失,无法满足马铃薯生长发育的氮素需求,难以保证植物干物质的积累所致。当追施氮肥量在60~225 kg/hm²时,马铃薯干物质积累量和积累速率总体上均随着施氮量的增加而增加,出苗后30~50 d,马铃薯干物

表 5 马铃薯干物质积累与产量及其构成因素的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients of dry matter accumulation with yield and yield components of potato

指标 Index	干物质 积累量 Dry matter accumulation	干物质积 累速率 Dry matter accumulation rate	干物质 转运量 Translocation amount of dry matter	干物质 转移率 Translocation ratio of dry matter	单株薯 块数 Tuber number per plant	平均薯块 质量 Average tuber weight	单株薯块 质量 Tuber weight per plant	产量 Yield
干物质积累量 Dry matter accumulation	1							
干物质积累速率 Dry matter accumulation rate	0.989 **	1						
干物质转运量 Translocation amount of dry matter	0.954 **	0.931 **	1					
干物质转移率 Translocation ratio of dry matter	0.743 **	0.735 **	0.896 **	1				
单株薯块数 Tuber number per plant	0.610 *	0.599 *	0.519 *	0.377	1			
平均薯块质量 Average tuber weight	0.920 **	0.884 **	0.967 **	0.876 **	0.602 *	1		
单株薯块质量 Tuber weight per plant	0.902 **	0.859 **	0.953 **	0.865 **	0.622 *	0.995 **	1	
产量 Yield	0.908 **	0.881 **	0.957 **	0.888 **	0.619 *	0.990 **	0.987 **	1

注: *、** 分别表示相关性在 0.05、0.01 水平上显著、极显著。

Note: * and ** indicate significant and extremely significant correlation at the level of 0.05 and 0.01, respectively.

质积累速率下降,干物质积累量逐渐增加,但在最大追施氮量为 225 kg/hm² 时未出现下降趋势,这可能与本研究最大追施氮肥量较前人^[36]低有关。

马铃薯最终产量的形成除了与干物质积累量有关外,还与干物质在各器官中的转运和分配紧密相关,干物质在各器官的有效分配是产量形成的关键^[37]。马东辉等^[38]研究表明,增施氮肥有利于小麦干物质转移量的增加,当施氮量达到 300 kg/hm² 时则不利于干物质的转移。本研究在干物质积累的基础上,研究了干物质在不同器官中的分配、转运和转移,结果表明,随着追施氮肥量的增加,叶片干物质分配比例逐渐增加,茎秆干物质分配比例先降低后增加,块茎干物质分配比例先增加后降低,这说明不同追施氮肥量影响了光合生产和再生器官内同化物的分布,使叶、茎和块茎的干物质分配比例在不同处理间呈现差异。叶、茎和块茎的干物质转运量和转移率,随着追施氮肥量的增加表现为先增加后降低的变化趋势。当追施氮量为 105 kg/hm² 时,马铃薯茎、叶和块茎的干物质分配比例最协调,增加茎、叶干物质向块茎的转运量和转移率,提高了干物质在块茎中的分配比例。这可能是由于在马铃薯生长期间,随着生长中心的转移,有效调控了开花前茎、叶的干物质积累速率,降低了生长前期的干物质积累量,平衡了干物质在各器官的分配比例,增加了营养物质在开花后向块茎的转运量,为保证生育后期块

茎的膨大提供充足的物质基础。追施氮量 180 kg/hm² 和 225 kg/hm² 造成马铃薯生长前期茎、叶干物质积累过剩,导致茎、叶旺长,降低了光合有机物在开花后向块茎的转运量和转移率,导致生育后期块茎干物质积累量大幅下降,直接影响块茎质量,最终影响产量的形成,这与前人的研究结果基本一致^[9,39-42]。

综上所述,追施氮量 105 kg/hm² 协调了干物质在马铃薯茎、叶和块茎中的分配比例,有效调节了开花后干物质积累的再分配,使干物质向块茎的转运特性达到最优,增加了开花后期块茎的干物质积累量,提升了单株薯块数、平均薯块质量和单株薯块质量,最终提高了产量,可作为马铃薯生产中的最佳追施氮量。

参考文献:

- [1] LI H, PARENT L É, TREMBLAY C, et al. Potato response to crop sequence and nitrogen fertilization following sod breakup in a Gleyed Humo-Ferric Podzol[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1999, 79:439-446.
- [2] VOS J. Split nitrogen application in potato: Effects on accumulation of nitrogen and dry matter in the crop and on the soil nitrogen budget[J]. Journal Agriculture Science, 1999, 133:263-274.
- [3] VOS J. Nitrogen responses and nitrogen management in potato[J]. Potato Research, 2009, 52:305-317.
- [4] 孙磊, 谷浏览, 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.
- SUN L, GU L L, LIU X M, et al. Effects of N fertilizer application time on N accumulation and distribution in potato plants [J]. Chinese Potato Journal, 2011, 25 (6): 350-355.
- [5] 张瑞富,杨恒山,毕文波,等.超高产栽培下氮肥运筹对春玉米干物质积累及转运的影响[J].作物杂志,2011(1):40-44.
- ZHANG R F, YANG H S, BI W B, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and transport of spring maize under super-high yield cultivation [J]. Crops, 2011(1):40-44.
- [6] 胡群,夏敏,张洪程,等.氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2016,42(11):1666-1676.
- HU Q, XIA M, ZHANG H C, et al. Effect of nitrogen application regime on yield, nitrogen absorption and utilization of mechanical pot-seedling transplanting rice with good taste quality [J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42 (11):1666-1676.
- [7] 张永春,汪吉东,沈明星,等.长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J].土壤学报,2010,47(3):465-472.
- ZHANG Y C, WANG J D, SHEN M X, et al. Effects of long-term fertilization of soil acidification in Taihu Lake region, China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (3): 465-472.
- [8] SAPKOTA T B, MAZZONCINI M, BÀRBERI P, et al. Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems[J]. Agronomy Sustainable Development, 2012, 32:853-863.
- [9] FRITSCHI F B, ROBERTS B A, TRAVIS R L, et al. Response of irrigated Acala and Pima cotton to nitrogen fertilization: Growth, dry matter partitioning, and yield [J]. Agronomy Journal, 2003, 95:133-146.
- [10] 张绪成,于显枫,王红丽,等.半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J].中国农业科学,2016,49(5):852-864.
- ZHANG X C, YU X F, WANG H L, et al. Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water-fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5):852-864.
- [11] DORDAS C. Role of nutrients in controlling plant disease in sustainable agriculture: A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28:33-46.
- [12] HAASE T, SCHÜLER C, HEß J. The effect of different N and K sources on tuber nutrient uptake, total and graded yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) for processing [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26: 187-197.
- [13] 王宜伦,刘天学,赵鹏,等.施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2483-2491.
- WANG Y L, LIU T X, ZHAO P, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and soil nitric N in super-high-yield summer maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12):2483-2491.
- [14] 吴兴洪,张爱华,张钦,等.不同控失剂用量的控失尿素对玉米产量及氮肥利用的影响[J].河南农业科学,2019,48(1):24-30.
- WU X H, ZHANG A H, ZHANG Q, et al. Effects of controlled-release urea with different dosages of controlled-release agent on utilization of nitrogen fertilizer and yield of maize [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(1):24-30.
- [15] 胡迎春,韩云良,施成晓,等.氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J].西北农业学报,2019,28(7):1068-1078.
- HU Y C, HAN Y L, SHI C X, et al. Improving nitrogen use efficiencies, yield and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in Loess Plateau [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(7):1068-1078.
- [16] 陈立强,赵海成,赫臣,等.氮肥运筹模式下垄作双深对水稻产量及品质的影响[J].河南农业科学,2018,47(7):20-26.
- CHEN L Q, ZHAO H C, HE C, et al. Effects of dry land regulation and bilateral deep fertilization on ridge on yield and quality of rice under nitrogen fertilizer operation model [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(7):20-26.
- [17] 付景,王越涛,尹海庆,等.施氮量对沿黄粳稻根系形态、生理特性及产量的影响[J].河南农业科学,2017,46(7):18-25.
- FU J, WANG Y T, YIN H Q, et al. Effect of nitrogen application rate on root morphological and physiological characteristics and yield of japonica rice in region along the yellow river [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(7):18-25.
- [18] 张琨,秦毛毛,刘艳喜,等.减量施氮对郑麦101产量及加工品质的影响[J].河南农业科学,2018,47(5):24-27.

- ZHANG K, QIN M M, LIU Y X, et al. Effects of reducing nitrogen application rate on grain yield and processing quality of Zhengmai 101 [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(5):24-27.
- [19] 张向前,徐云姬,杜世州,等.氮肥运筹对稻茬麦区弱筋小麦生理特性、品质及产量的调控效应[J].麦类作物学报,2019,39(7):810-817.
- ZHANG X Q, XU Y J, DU S Z, et al. Regulation effect of nitrogen application on physiological characteristics, quality and yield of weak gluten wheat in rice-wheat cropping China [J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39 (7):810-817.
- [20] 石洪亮,严青青,张巨松,等.氮肥对非充分灌溉下棉花花铃期光合特性及产量的补偿作用[J].作物学报,2018,44(8):1196-1204.
- SHI H L, YAN Q Q, ZHANG J S, et al. Compensation effect of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield during cotton flowering boll-setting stage under non-sufficient drip irrigation [J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(8):1196-1204.
- [21] 李文娆,范雨龙,冯士珍,等.水氮耦合对棉花幼苗根冠生长和水分利用效率的影响[J].河南农业科学,2017,46(9):18-24.
- LI W R, FAN Y L, FENG S Z, et al. Effect of coupling of water and nitrogen on shoot and root growth and water use efficiency of cotton seedlings [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(9):18-24.
- [22] 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.
- SONG N, WANG F X, YANG C F, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13):98-105.
- [23] 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.
- JIA H, GUO H, WANG J. Effect of combined application of nitrogen, phosphorus, potassium fertilizers on fertilizers utilization and yield of potato [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(2):32-36.
- [24] 吴元奇,李尧权.种植密度和施肥对马铃薯养分吸收及土壤肥力的影响[J].沈阳农业大学学报,1998,29 (4):310-313.
- XU X Q, LI Y Q. Effects of planting density and fertilization on nutrients uptake of potato and soil properties [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1998, 29 (4):310-313.
- [25] 修凤英,朱丽丽,李井会.不同施氮量对马铃薯氮素利用特征的影响[J].中国土壤与肥料,2009(3):36-38.
- XIU F Y, ZHU L L, LI J H. Characteristics of nitrogen utilization under different nitrogen strategies of potato [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(3):36-38.
- [26] 杨瑒,勤学慧,周燕,等.施氮量对寒区盐碱地马铃薯生育期土壤微生物数量和酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2014(3):32-37.
- YANG Y, LE X H, ZHOU Y, et al. Effects of nitrogen application rate on the microorganism and soil enzyme activities with different growth stages of potato plant in the cold saline-alkali soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(3):32-37.
- [27] 陈健,宋春梅,刘云慧.黄淮海平原旱田氮素损失特征及其环境影响研究[J].中国生态农业学报,2006, 14(2):99-102.
- CHEN J, SONG C M, LIU Y H. Characteristics of N loss and its environmental effects in the dryland of Huang-Huai-Hai plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(2):99-102.
- [28] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5):915-924.
- [29] 屈会娟,李金才,沈学善,等.种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J].作物学报,2009,35(1):124-131.
- QU H J, LI J C, SHEN X S, et al. Effects of plant density and seeding date on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in winter wheat cultivar Lankao Aizao 8 [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35 (1): 124-131.
- [30] 马迎辉,王玲敏,叶优良,等.栽培管理模式对冬小麦干物质积累、氮素吸收及产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(10):1282-1288.
- MA Y H, WANG L M, YE Y L, et al. Effects of different cultivation management mode on dry matter accumulation, nitrogen uptake and yield of winter wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10):1282-1288.
- [31] 向达兵,郭凯,杨文钰.不同磷肥处理下套作大豆干物质积累及钾肥利用率的动态变化[J].中国油料作物学报,2012,34(2):163-167.
- XIANG D B, GUO K, YANG W Y. Dynamics of dry matter accumulation and potassium utilization in relay strip intercropped soybean under different phosphorus and po-

- tassium levels [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(2) : 163-167.
- [32] 张均华, 刘建立, 张佳宝, 等. 施氮量对稻麦干物质转运与氮肥利用的影响 [J]. 作物学报, 2010, 36 (10) : 1736-1742.
- ZHANG J H, LIU J L, ZHANG J B, et al. Effects of nitrogen application rates on translocation of dry matter and utilization of nitrogen in rice and wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36 (10) : 1736-1742.
- [33] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化 [J]. 中国农业科学, 2003, 36 (1) : 71-76.
- SONG H X, LI S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36 (1) : 71-76.
- [34] 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) : 132-136.
- SUN L, WANG H, LI M Y, et al. Effects of NPK application rate and time on dry matter accumulation and distribution of potato [J]. Crops, 2014 (1) : 132-136.
- [35] 吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (16) : 5128-5137.
- WU G L, GUO L Y, CUI Z Y, et al. Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (16) : 5128-5137.
- [36] 陈瑞英. 水氮互作对马铃薯产量和氮素吸收利用特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- CHEN R Y. Effects of water and nitrogen coupling on yield and nitrogen absorption utilization characteristic of potato [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [37] 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.
- GU L L, SUN L, SHI Y, et al. Effects of nitrogen application time on dry matter accumulation and translocation and tuber yield of potato [J]. Soils, 2013, 45 (4) : 610-615.
- [38] 马东辉, 王月福, 周华, 等. 氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、转运及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2007, 27 (5) : 847-851.
- MA D H, WANG Y F, ZHOU H, et al. Effects of post-anthesis soil water status and nitrogen on grain yield and canopy biomass accumulation and transportation of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27 (5) : 847-851.
- [39] 杨益花, 张亚洁, 苏祖芳. 施氮量对杂交水稻产量构成因素和干物质积累的影响 [J]. 天津农学院学报, 2005, 12 (1) : 5-8.
- YANG Y H, ZHANG Y J, SU Z F. Effects of amount of Nfertilizer on yield constitution and dry matter accumulation of hybrid rice [J]. Journal of Tianjin Agricultural College, 2005, 12 (1) : 5-8.
- [40] 张杰, 王备战, 冯晓, 等. 氮肥调控对冬小麦干物质量、产量和氮素利用效率的影响 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34 (4) : 516-520.
- ZHANG J, WANG B Z, FENG X, et al. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter quantity, yield and N utilization in winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34 (4) : 516-520.
- [41] 肖云华, 吕婷婷, 唐晓清, 等. 追施氮肥量对菘蓝根的外形品质、干物质积累及活性成分含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (2) : 437-444.
- XIAO Y H, LÜ T T, TANG X Q, et al. Effects of top-dressing nitrogen on apparent quality, dry matter accumulation and contents of active components in the root of *Isatis indigotica* Fort [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20 (2) : 437-444.
- [42] 杨志彬, 陈兵林, 周治国. 施氮量对花铃期棉花果枝生物量积累时空变异特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (10) : 2215-2220.
- YANG Z B, CHEN B L, ZHOU Z G. Effects of nitrogen application rate on spatiotemporal variability of biomass accumulation of cotton's fruiting branch at flower and boll stage [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (10) : 2215-2220.