

不同水氮水平对马铃薯产量和 水氮利用效率的影响

李文婷^{1,2}, 王仕稳^{1,3}, 邓西平^{1,3}, 李红兵^{1,3}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了给马铃薯生产提供科学合理的水氮管理依据, 以品种“大西洋”脱毒组培苗为材料, 通过3个水分水平(90%、70%和50%的土壤田间持水量)和3个氮肥水平(不施氮, 施N 0.2 g·kg⁻¹, 施N 0.4 g·kg⁻¹)完全组合的盆栽试验研究了不同水氮水平对马铃薯产量和水氮利用效率的影响。结果显示: 在同一水分水平下, 中氮处理的块茎产量、整株生物量和水氮利用效率明显高于低氮和高氮处理; 在同一施氮量下, 随着土壤含水量的增加, 马铃薯的块茎产量、整株生物量和氮肥利用率明显提高。在9种水氮组合方式下, 正常水分和中氮处理下的块茎产量、整株生物量、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力最高, 分别为273 g·株⁻¹、359 g·株⁻¹、52.5 g·g⁻¹和143.9 g·g⁻¹。这说明90%的田间持水量和0.2 g·kg⁻¹土有利于马铃薯植株获得较高的产量和水氮利用效率。此外, 中氮下较高的整株生物量和较低的收获指数说明: 适量施用氮肥增加产量主要是因为其增加了整个植株同化物的积累, 而非增加了同化物向块茎的分配。

关键词: 马铃薯; 土壤含水量; 施氮量; 产量; 水分利用效率; 氮肥利用效率

中图分类号: S532 文献标志码: A

Effects of different water and nitrogen levels on tuber yield, water and nitrogen use efficiency of potato

LI Wen-ting^{1,2}, WANG Shi-wen^{1,3}, DENG Xi-ping^{1,3}, LI Hong-bing^{1,3}

(1. *Stata Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using virus-free plantlets of potato (cultivar Atlantic), a pot experiment with three soil water levels (90%, 70% and 50% of field capacity) and three nitrogen fertilizer levels (0, 0.2, 0.4 g·kg⁻¹) was conducted to study the effect of different water and nitrogen levels on tuber yield, water and nitrogen use efficiency of potato in order to provide information for better management of water and nitrogen in potato production. The results showed that, under the same water level, potato tuber yield, biomass, water and nitrogen use efficiency under moderate nitrogen were higher than those of low and high nitrogen. Under the same nitrogen level, potato tuber yield, biomass and nitrogen use efficiency all increased with the increase of soil water content. Among the nine treatments, tuber yield, biomass, nitrogen agronomic efficiency and partial factor productivity under well-watered and moderate nitrogen condition were the highest, and their values were 273 g·plant⁻¹, 359 g·plant⁻¹, 52.5 g·g⁻¹ and 143.9 g·g⁻¹, respectively. It suggests that 90% of field capacity and 0.2 g·kg⁻¹ soil was helpful to higher yield and use efficiency of water and nitrogen. In addition, higher biomass and lower harvest index under moderate nitrogen suggest that moderate nitrogen increase yield mainly through increasing the accumulation of assimilates in plant, but not increasing the allocation of assimilates to tuber.

Keywords: potato; soil water content; nitrogen fertilizer rate; yield; water use efficiency; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家科技支撑计划“黄土高原旱区增粮增效潜力与提升技术研究(2015BAD22B01)”

作者简介: 李文婷(1983—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 研究方向为植物生理生态。E-mail: 34338910@qq.com。

通信作者: 邓西平(1959—), 男, 陕西西安人, 研究员, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: dengxp@ms.iswc.ac.cn。

马铃薯是世界第四大、我国第五大粮食作物,也是重要的蔬菜、饲料、工业原料和能源作物,其产量直接影响着世界粮食安全^[1]。然而在实际生产中,马铃薯产量的形成是其遗传特性和光、温、水、肥等外在环境因素综合作用的结果,其中水和氮是最易被人所调控的两种环境要素,也是影响马铃薯产量的主要因素^[2-3]。马铃薯是水分敏感型作物,发生在其任何生长阶段的水分亏缺都会引起减产和品质降低,尤其是在马铃薯产量形成的关键时期即块茎形成到收获的这段时间,植株对水分最为敏感^[4-5]。而近年来由于全球气候变化,干旱发生的程度、范围和频率都在不断扩大,水资源日益短缺,严重限制了马铃薯的生产。合理的氮肥供给可协调马铃薯茎叶和块茎的生长,维持光合器官和储存器官的适宜比例,利于养分的积累和产量的提高;氮肥不足则会使植株生长矮小、缓慢,叶片小而薄、早衰,产量降低;而过量施用氮肥会引起植株前期徒长,后期贪青,生长中心不能适时转移,从而降低产量^[6-9]。关于水氮对马铃薯的影响,前人的研究多集中在水分或氮肥单因子对马铃薯产量或水氮利用效率的影响上,关于水氮的交互作用却少有研究。因此,本试验研究了在马铃薯产量形成的关键期不同水氮水平下马铃薯的产量和水氮利用效率的变化,以期为马铃薯的高产、水资源和氮肥的高效利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验概况

本试验在陕西杨凌中国科学院水利部水土保持研究所试验场进行,地理位置为 34°12' ~ 34°20' N, 108° ~ 108°7' E, 海拔 431 ~ 563 m, 多年平均气温 13℃, 平均日照时数 2 163.8 h。试验用土为中国科学院安塞水土保持综合试验站(36°51' N, 109°19' E) 的黄绵土, pH 值为 8.27, 有机质含量为 2.4 g·kg⁻¹,

全氮含量为 0.32 g·kg⁻¹, 全磷(P)含量为 0.68 g·kg⁻¹, 全钾(K)含量为 19.6 g·kg⁻¹, 硝态氮含量为 16.91 mg·kg⁻¹, 铵态氮含量为 38.72 mg·kg⁻¹, 有效磷(P)含量为 24.82 mg·kg⁻¹, 速效钾(K)含量为 276.3 mg·kg⁻¹。以马铃薯品种‘大西洋’无毒组培苗为试材, 以尿素(N 46%), 重过磷酸钙(P₂O₅ 46%) 和硫酸钾(K₂O 51%) 分别作为氮、磷、钾肥。

1.2 试验设计

本试验为 3 个水分水平和 3 个氮肥水平完全组合试验, 共 9 个处理, 具体见表 1。各处理磷肥和钾肥用量相同, 分别是每公斤风干土施 P₂O₅ 0.2 g 和 K₂O 0.1 g。试验用盆为高 30 cm、直径 30 cm 的圆形塑料桶, 在移苗前 3 天按 9.5 kg·桶⁻¹称取风干好的安塞黄绵土, 并与准备好的肥料充分混合后装入桶内。2014 年 4 月 10 日选取苗高约 20 cm、长势一致的组培苗移栽入桶中, 每桶一株, 每个处理 45 桶, 共 405 桶。土壤持水量采用称重法进行计算, 每天称重记录并补充散失的水分。移苗后在土壤表面覆盖约 1.5 cm 厚的蛭石, 防止因浇水产生的土壤板结。5 月 6 日之前桶内一直保持土壤田间持水量的 90%。为防止降雨对盆内水分含量产生影响, 试验在透明遮雨棚下进行。从块茎出现后(5 月 6 日)开始按处理进行水分控制, 直到试验结束(6 月 18 日)。

1.3 测定指标和计算方法

在试验结束时(6 月 18 日)取样, 完整收取植株, 分叶、茎、根和块茎称量鲜重, 块茎产量和整株生物量按每株进行计算。

其余相关指标的计算方法如下:

收获指数 = 块茎产量 / 整株生物量

水分利用效率 = 块茎产量 / 生育期总耗水量

氮肥农学利用率 = (施氮处理产量 - 不施氮产量) / 施氮量

表 1 试验处理设计

Table 1 Experimental design

水分水平 Water level	氮肥水平 Nitrogen fertilizer level
正常水分: 保持 90% 的土壤田间持水量 Well-watered: soil water content was maintained at 90% of field capacity	低氮: 土壤不施氮肥 Low nitrogen: 0 g·kg ⁻¹ 中氮: 每公斤风干土施 0.2 g 纯氮 Moderate nitrogen: 0.2 g·kg ⁻¹ 高氮: 每公斤风干土施 0.4 g 纯氮 High nitrogen: 0.4 g·kg ⁻¹
中度水分胁迫: 保持 70% 的土壤田间持水量 Moderate water stress: soil water content was maintained at 70% of field capacity	低氮: 土壤不施氮肥 Low nitrogen: 0 g·kg ⁻¹ 中氮: 每公斤风干土施 0.2 g 纯氮 Moderate nitrogen: 0.2 g·kg ⁻¹ 高氮: 每公斤风干土施 0.4 g 纯氮 High nitrogen: 0.4 g·kg ⁻¹
重度水分胁迫: 保持 50% 的土壤田间持水量 Serious water stress: soil water content was maintained at 50% of field capacity	低氮: 土壤不施氮肥 Low nitrogen: 0 g·kg ⁻¹ 中氮: 每公斤风干土施 0.2 g 纯氮 Moderate nitrogen: 0.2 g·kg ⁻¹ 高氮: 每公斤风干土施 0.4 g 纯氮 High nitrogen: 0.4 g·kg ⁻¹

氮肥偏生产力 = 施氮处理产量 / 施氮量

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 处理,用 SPSS 19.0 统计分析软件进行方差分析和 Duncan 显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮水平对马铃薯块茎产量的影响

适宜的水分条件和合理的养分供应是作物高产的基础。从图 1 可看出,正常水分和中氮处理下的块茎产量最高,为 $273 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$;重度水分胁迫和高氮处理下的最低,为 $135 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。在各个水分水平下,中氮显著增加了块茎产量,但随着施氮量的增加,高氮处理下的块茎产量却始终低于中氮。这说明适量施氮有助于提高产量,而过量施氮则对产量产生了抑制。在正常水分时,中氮处理的产量比低氮增加了 57.5%,高氮则增加了 24.3%;在中度水分胁迫下,中氮处理的产量比低氮增加了 56.3%,高氮则增加了 21.9%;在重度水分胁迫处理下,中氮产量比低氮增加了 41.2%,高氮却没有增加产量。这说明氮肥的增产与水分水平密切相关,土壤含水量越少越不利于氮肥增产效应的发挥。当施氮量相同时,马铃薯块茎产量随着土壤水分的增多而增加。当水分水平从中度水分胁迫升到正常水分时,低氮下的块茎产量增加了 5.6%,中氮下的增加了 6.4%,高氮下的增加了 7.6%;当水分从重度水分胁迫升到正常水分时,低氮下的块茎产量增加了 18.3%,中氮下的增加了 31.9%,高氮下的增加了 59.7%。这说明较多的水分有利于马铃薯的产量以及氮肥的增产效应。换句话说,也就是充足的水分是保证马铃薯高产及氮肥高效的前提。方差分析表明:不同水分、不同施氮量以及二者的交互作用对马铃薯块茎产量影响显著(表 2)。

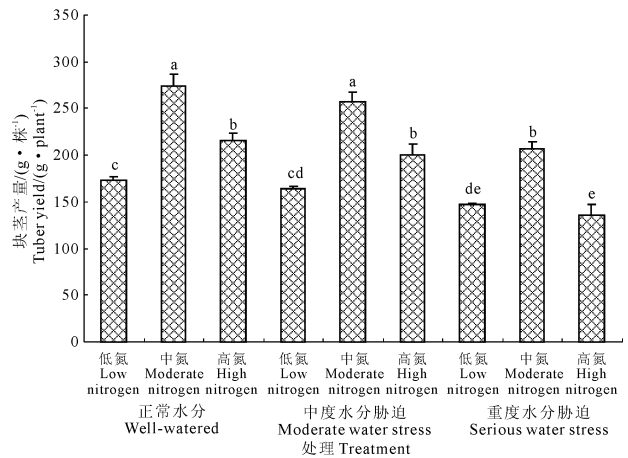
表 2 不同水氮处理下马铃薯块茎产量、整株生物量、收获指数和水氮利用效率的方差分析

Table 1 Variance analysis on effects of different water and nitrogen levels on tuber yield, total plant biomass, harvest index, water and nitrogen use efficiency of potato

因素 Factor	F 值 F value					
	块茎产量 Tuber yield $\text{/(g} \cdot \text{plant}^{-1}\text{)}$	整株生物量 Biomass $\text{/(g} \cdot \text{plant}^{-1}\text{)}$	收获指数 Harvest index	水分利用效率 Water use efficiency $\text{/(g} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	氮肥农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency $\text{/(g} \cdot \text{g}^{-1}\text{)}$	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity $\text{/(g} \cdot \text{g}^{-1}\text{)}$
水分水平 Water level	34.93**	30.08**	0.34	0.37	6.92**	21.69**
氮肥水平 Nitrogen level	72.91**	91.39**	186.69**	6.13**	87.63**	495.42**
水分水平 × 氮肥水平 Water × nitrogen	2.93*	4.27**	5.08**	0.68	0.22	1.20

注: * 和 ** 分别表示 1% 和 5% 水平上的差异显著性。

Note: * and ** indicate significant difference at 1% and 5% level, respectively.



注: 图中数值为平均值 ± 标准误差, 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Values were means ± standard errors. Different lowercase letters mean significant difference ($P < 0.05$). The same as below.

图 1 不同水氮条件下马铃薯的块茎产量

Fig. 1 Potato tuber yield under different water and nitrogen levels

2.2 不同水氮水平对马铃薯整株生物量和收获指数的影响

整株生物量可以用来反映植株同化物的积累情况。从图 2 可以看出, 马铃薯整株生物量的变化趋势与块茎产量基本一致。正常水分和中氮处理下的整株生物量最高, 为 $359 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$; 重度水分胁迫和低氮处理下最低, 为 $171 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。在同一水分水平下, 施氮显著增加了马铃薯的整株生物量, 但高氮处理下的始终低于中氮, 这说明高氮对植株生物量的积累也产生了抑制。在同一施氮量下, 随着水分的增多, 整株生物量也随之提高, 这说明较多的水分有利于植株同化物的积累。方差分析表明: 不同水分水平、不同施氮量及二者的交互作用对马铃薯整株生物量的影响均为显著。

收获指数是马铃薯的经济产量与植株同化产物总量之比,可以反映同化物向块茎分配的比率。从表 2 可以看出,不同水分水平对马铃薯的收获指数没有显著影响,施氮量和水氮交互作用则影响显著。从图 3 可以看出,不管在哪个水分水平下,中氮和高氮处理下的收获指数始终低于低氮,中氮和高氮之间则没有显著差异。

2.3 不同水氮水平下马铃薯的水、氮利用效率

水分利用效率反映了作物耗水与其经济产量之间的关系。由表 3 可以看出,在同一水分水平下,中氮处理的马铃薯水分利用效率最高,高氮处理的则低于中氮。这说明水分利用效率并不随着施氮量的

增加而增加,适量施氮才有利于提高水分的利用率。当施氮量相同时,中氮处理下的水分利用效率随着水分的减少而增加,这表明在缺水时适量的施氮可以有效地提高马铃薯对水分的利用。高氮处理下的水分利用效率在中度水分胁迫下最高,重度水分胁迫次之,正常水分最低。这一方面也说明了缺水时施加氮肥可以提高植株的水分利用效率,另一方面则说明严重缺水的环境并不利于高氮作用的发挥。方差分析表明:施氮量对马铃薯水分利用效率的影响显著,而不同水分水平以及水氮交互作用的影响不显著。这说明水分利用效率的变化主要是受施氮量的影响。

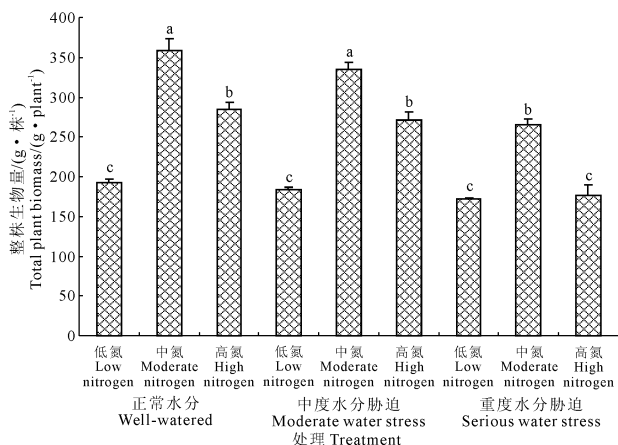


图 2 不同水氮条件下马铃薯的整株生物量

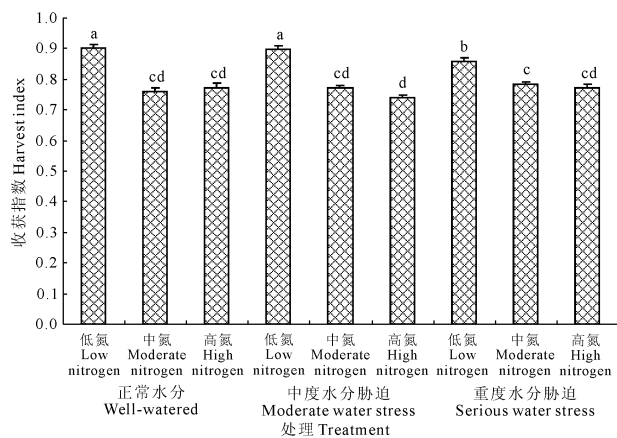


图 3 不同水氮条件下马铃薯的收获指数

Fig.2 Biomass of potato plant under different water and nitrogen levels

Fig.3 Harvest index of potato under different water and nitrogen levels

表 3 不同水氮水平下马铃薯的水分利用效率,氮肥农学利用率和氮肥偏生产力

Table 3 Water use efficiency, nitrogen agronomic efficiency and nitrogen partial factor productivity of potato under different water and nitrogen levels

处理 Treatment		水分利用效率 Water use efficiency $/(g \cdot kg^{-1})$	氮肥农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency $(g \cdot g^{-1})$	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity $(g \cdot g^{-1})$
正常水分 Well-watered	低氮 Low nitrogen	19.0 ± 1.1abc	—	—
	中氮 Moderate nitrogen	20.3 ± 1.5abc	52.5 ± 7.9a	143.9 ± 7.2a
	高氮 High nitrogen	17.3 ± 0.6c	11.1 ± 2.8c	56.8 ± 2.2c
中度水分胁迫 Moderate water stress	低氮 Low nitrogen	18.3 ± 0.3bc	—	—
	中氮 Moderate nitrogen	21.3 ± 1.0ab	48.7 ± 6.4a	135.3 ± 5.2a
	高氮 High nitrogen	19.3 ± 1.4abc	9.5 ± 3.4c	52.8 ± 2.9c
重度水分胁迫 Serious water stress	低氮 Low nitrogen	17.8 ± 0.5bc	—	—
	中氮 Moderate nitrogen	22.4 ± 1.1a	31.8 ± 4.3b	109.1 ± 4.1b
	高氮 High nitrogen	18.5 ± 2.2bc	-3.1 ± 3.4c	35.6 ± 3.2d

注:表中数值为平均值 ± 标准误差,同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Values were means ± standard errors. Different lowercase letters in each column mean significant difference ($P < 0.05$).

氮肥利用率的高低反映了作物在不同氮肥处理下对氮肥吸收利用能力的大小。本试验选取了氮肥

农学利用率和氮肥偏生产力来对马铃薯的氮肥利用率进行研究。氮肥农学利用率是指单位施氮量所增

加的块茎产量,是评价氮肥增产效应较为准确的指标。氮肥偏生产力是指施肥后的作物产量与氮肥施用量的比值,可用来评价氮肥施用的投资效益。从表3中可以看出,在同一水分水平下,中氮处理下的马铃薯氮肥农学利用率和氮肥偏生产力明显高于高氮。这说明氮肥的利用效率并不是施用量越多越高。在同一施氮量下,氮肥农学利用率和氮肥偏生产力都随着土壤水分的增加而增加,这表明较多的土壤水分更有利于氮肥作用的发挥。在不同的水氮水平下,正常水分和中氮处理下植株的氮肥农学利用率和氮肥偏生产力最高,分别为 $52.5 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $143.9 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$; 重度水分胁迫和高氮处理下的最低,分别为 $-3.1 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $35.6 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。因此,表3表明,充足的水分和适量的氮肥才有利于马铃薯氮肥利用率的提高。而在重度水分胁迫和高氮的环境条件下,作物的氮肥利用率较低可能是由于作物受到了环境胁迫,比如高氮使土壤渗透势加大,从而不利于根系对养分的吸收。

3 讨论与结论

作物高产和水肥利用效率的提高是现代高效节水农业水肥管理的重要目标。但在实际生产中,水分和养分对作物生长的作用并不是孤立的,而是相互影响相互制约^[10]。作物对养分的吸收利用依赖于土壤水分,因此土壤的水分状况在很大程度上决定着养分的有效性^[11];施肥则能提高旱地土壤水分的有效性,使植株能吸收利用更多的土壤水分,改善植株的生理功能,提高水分利用效率^[12-13]。因此,水肥协调才有利于植株的生长,提高产量和水肥利用效率^[14-17]。沈荣开等^[18]研究了不同水分和氮肥条件下冬小麦和夏玉米的产量以及水分利用效率,结果发现,氮肥效益的发挥与农田水分状况密切相关,合理的配施水氮才能获得更高的产量与水分利用效率。本研究结果显示:不同的水氮处理下马铃薯的块茎产量和水氮利用效率明显不同。在同一施氮量下,随着水分的增加,马铃薯的块茎产量和氮肥利用率明显提高;而在同一水分水平下,随着施氮量的增加,高氮处理下的块茎产量和水氮利用效率却始终低于中氮。这一方面说明了水分影响着氮肥效应的发挥,另一方面则说明马铃薯的生长发育对氮肥的吸收利用存在一定范围,超过这个范围氮肥反而不利于植株生长和产量形成。前人的一些研究显示水分水平对水分利用效率影响显著^[19]。而我们的试验结果显示水分对水分利用效率没有显著影响,Costa 等^[20]和宋娜等^[21]的研究也显示了类似的

结果,Costa 等^[20]认为这可能是由于随着土壤含水量的减少,块茎产量和植株耗水量也相应减少所导致。在我们的试验中,这可能是由于盆栽种植植株耗水量过大所导致。此外,正常水分和中氮处理下的块茎产量最高,重度水分胁迫和高氮处理下的块茎产量最低,表明只有在较充足的水分和适量的氮肥供应下马铃薯才能获得较高的产量。

马铃薯块茎产量 90% 以上来自于光合同化物^[22]。植株生育期间同化物的积累和分配直接影响到块茎产量的形成^[23]。一般来说,植株同化物积累的越多,块茎产量越高;同化物向块茎分配的越多,块茎产量也越高。我们的试验结果显示:随着水分的增加植株积累的同化物(整株生物量)明显增多,但收获指数没有显著变化;随着施氮量的增加,整株生物量在中氮处理下的最高,高氮处理的次之,低氮处理的最低,而收获指数却是低氮处理的始终高于中氮和高氮,中氮和高氮处理之间则没有显著差异。这说明在中氮条件下马铃薯块茎产量的提高主要是由于中氮增加了整个植株同化物的积累,而不是增加了同化物向块茎的分配。

总之,我们的试验结果表明:充足的水分供给是保证马铃薯高产和氮肥高效利用的前提。适量氮肥的施加主要是通过提高植株同化物的积累来增加产量,并提高水分利用效率。马铃薯植株对氮肥的吸收利用量存在一定的范围,过量施加氮肥并不利于马铃薯的产量积累和水氮利用效率的提高。所以,因地制宜地调节水分和养分,使其满足植株生长的需求,是实现马铃薯生产高产高效的主要途径。然而,由于本试验所在地与马铃薯种植区的气候条件有所差异,试验结果还需要做大田试验进一步的验证。

参考文献:

- [1] Birch P R J, Bryan G, Fenton B, et al. Crops that feed the world 8: Potato: are the trends of increased global production sustainable? [J]. Food Security, 2012, 4(4):477-508.
- [2] Monneveux P, Ramirez D A, Pino M T. Drought tolerance in potato (*S. tuberosum* L.): Can we learn from drought tolerance research in cereals? [J]. Plant Science, 2013, 205 - 206:76-86.
- [3] Vos J. Nitrogen responses and nitrogen management in potato [J]. Potato Research, 2009, 52(4):305-317.
- [4] Ierna A, Mauromicale G. Tuber yield and irrigation water productivity in early potatoes as affected by irrigation regime [J]. Agricultural Water Management, 2012, 115:276-284.
- [5] van Loon C D. The effect of water stress on potato growth, development, and yield [J]. American Potato Journal, 1981, 58(1):51-69.
- [6] Joern B C, Vitosh M L. Influence of applied nitrogen on potato. 1.

- Yield, quality, and nitrogen uptake[J]. *American Potato Journal*, 1995, 72(1):51-63.
- [7] Vos J, Biemond H. Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. 1. Leaf appearance, expansion growth, life spans of leaves and stem branching[J]. *Annals of Botany*, 1992, 70(1):27-35.
- [8] 门福义, 刘梦芸. 马铃薯栽培生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995:172-178.
- [9] 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.
- [10] 肖自添, 蒋卫杰, 余宏军. 作物水肥耦合效应研究进展[J]. *作物杂志*, 2007, (6):18-22.
- [11] 李世娟, 周殿玺, 李建民. 限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响[J]. *华北农学报*, 2001, 16(3):86-91.
- [12] 赵立新, 荆家海, 王韶唐. 旱地冬小麦施肥效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1991, (4):46-52.
- [13] 关军锋, 李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1):59-61.
- [14] 陈竹君, 刘春光, 周建斌, 等. 不同水肥条件对小麦生长及养分吸收的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(3):30-35.
- [15] 李志勇, 陈建军, 陈明灿. 不同水肥条件下冬小麦的干物质积累、产量及水氮利用效率[J]. *麦类作物学报*, 2005, 25(5):80-83.
- [16] 滕云, 郭亚芬, 张忠学, 等. 东北半干旱区大豆水肥耦合模式试验研究[J]. *东北农业大学学报*, 2005, 36(5):639-644.
- [17] 文宏达, 刘玉柱, 李晓丽, 等. 水肥耦合与旱地农业持续发展[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3):315-318.
- [18] 沈荣开, 王康, 张瑜芳, 等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(5):35-38.
- [19] Badr M A, El-Thhamy W A, Zaghoul A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110:9-15.
- [20] Costa L D, Vedove G D, Gianquinto G, et al. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress[J]. *Potato Research*, 1997, 40(1):19-34.
- [21] 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.
- [22] 高聚林, 刘克礼, 张宝林, 等. 马铃薯干物质积累与分配规律的研究[J]. *中国马铃薯*, 2003, 17(4):209-212.
- [23] 高聚林, 刘克礼, 盛晋华, 等. 马铃薯旱作栽培干物质积累与分配[J]. *中国马铃薯*, 2004, 18(1):9-15.

(上接第 190 页)

- [20] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12):2518-2525.
- [21] Nyamadzawo G, Nyamangara J, Nyamugafata P, et al. Soil microbial biomass and mineralization of aggregate protected carbon in fallow-maize systems under conventional and no-tillage in central Zimbabwe[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 102(1):151-157.
- [22] 孙文泰, 张坤, 刘小勇, 等. 垄膜集雨对陇东旱塬苹果根系分布及土壤性状的影响[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(10):100-105.
- [23] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J]. *地理学报*, 2004, 59(6):1012-1019.
- [24] 闫翠萍, 裴雪霞, 王姣爱, 等. 秸秆还田与施氮对冬小麦生长发育及水肥利用率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2):271-275.
- [25] 林心雄, 程励励, 施书莲, 等. 绿肥和藁秆等在苏南地区土壤中的分解特征[J]. *土壤学报*, 1980, 17(4):319-327.
- [26] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5):526-535.
- [27] 于爱忠, 柴强. 供水与地膜覆盖对于旱灌区玉米产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(5):778-786.
- [28] 陈丽芳, 王莹, 汪景宽. 长期地膜覆盖与施肥对土壤磷素和玉米吸磷量的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1):76-79.
- [29] 刘定辉, 蒲波, 陈尚洪, 等. 秸秆还田循环利用对土壤碳库的影响研究[J]. *西南农业学报*, 2008, 21(5):1316-1319.
- [30] 陆安祥, 赵云龙, 王纪华, 等. 不同土地利用类型下氮、磷在土壤剖面中的分布特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(9):3923-3929.
- [31] Rodrigues M Â, Dimande P, Pereira E L, et al. Early-maturing annual legumes: an option for cover cropping in rainfed olive orchards[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 103:153-166.
- [32] 王建国, 刘鸿翔, 王守宇, 等. 黑土农田养分平衡与养分消长规律[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2):246-251.
- [33] 张桂玲. 秸秆和生草覆盖对桃园土壤养分含量、微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(12):1236-1244.
- [34] 索改弟, 谢永生, 郝明德, 等. 旱地果园双重覆盖对土壤及果树生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(8):142-148.
- [35] 何文清, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3):533-538.