

滴灌施肥对内蒙古沙地马铃薯生长 和水肥利用的影响

冯志文^{1,2}, 康跃虎¹, 万书勤¹, 刘士平¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对内蒙古沙地马铃薯滴灌水肥管理的需求, 本研究以养分平衡法估计的施肥量作为推荐值, 布置了 5 个施肥量比例的滴灌施肥灌溉试验, 2012 年分别为推荐施肥量的 10% (10% NPK)、30% (30% NPK)、50% (50% NPK)、70% (70% NPK) 和 90% (90% NPK), 2013 年分别为推荐施肥量的 10% (10% NPK)、35% (35% NPK)、60% (60% NPK)、85% (85% NPK) 和 110% (110% NPK)。通过控制滴头正下方 20 cm 处的土壤水基质势下限在 -25 kPa 时进行滴灌施肥灌溉。结果表明, 采用负压计指导滴灌施肥灌溉时, 土壤水分状况良好, N、K 的施肥时期与马铃薯植株对 N、K 的吸收时期基本一致。2012 年和 2013 年马铃薯的株高、茎粗、叶面积指数、鲜生物量和产量随着施肥量的增加呈先增加后下降的趋势, 当施肥量比例为 70% ~ 85% 时达到最大值, 并且收获指数相对较低, 有效延长了地上部养分向块茎转移的时间, 促进更多养分向块茎积累。当施肥量比例为 60% ~ 70% 时, 灌溉水利用效率最高。马铃薯的产量在 2012 年和 2013 年分别以 70% NPK 和 85% NPK 时产量最高, 与当地马铃薯生产企业的产量持平, 但节约肥料 30% ~ 40%, 平均节肥 N $157 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $187 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此, 内蒙古沙地滴灌施肥灌溉条件下, 当滴头正下方 20 cm 处的土壤水基质势下限在 -25 kPa 时进行施肥灌溉, 且施肥总量为当地推荐施肥量的 85% 左右时, 既能获得马铃薯高产, 又可保证较高的水肥利用效率。

关键词: 滴灌施肥灌溉; 土壤水基质势; 施肥量比例; 肥料偏生产力; 灌溉水利用效率

中图分类号: S275.6; S532 文献标志码: A

Effects of drip fertigation levels on potato growth and the water and fertilizer efficiency on sandy soil in Inner Mongolia

FENG Zhi-wen^{1,2}, KANG Yao-hu¹, WAN Shu-qin¹, LIU Shi-ping¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences
and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In view of the demand for water-fertilizer management of potato on sandy soil in Inner Mongolia, a 2-year field experiment comparing five fertigation levels on potato yield, irrigation water use efficiency and partial fertilizer productivity was carried out. The treatments included five fertigation levels, 10% (10% NPK), 30% (30% NPK), 50% (50% NPK), 70% (70% NPK) and 90% (90% NPK) of the recommended fertilizer dose ($420:105:495 \text{ N:P:K kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$) in 2012 and 10% (10% NPK), 35% (35% NPK), 60% (60% NPK), 85% (85% NPK) and 110% (110% NPK) of the recommended fertilizer dose ($390:150:465 \text{ N:P:K kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$) in 2013, respectively, and the recommended fertilizer dose was estimated based on the nutrient balance method. The soil matric potential at 20 cm depth under the emitters was controlled above -25 kPa for drip fertigation. The results showed that fertilization period with N and K was basically in line with principal periods with potato plants on absorption of N and K when tensiometer was applied to guide drip fertigation. Potato plant height, stem diameter, leaf area index, total biomass fresh weight and yield first increased and then decreased, and got the maximum under 70% ~ 85% of fertilization in two years

收稿日期: 2016-06-17

修回日期: 2016-10-26

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2012BAD06B01; 2012BAD08B02)

作者简介: 冯志文 (1987—), 男, 内蒙赤峰人, 博士研究生, 主要从事农田水循环与节水灌溉研究。E-mail: fengzw.12b@igsrr.ac.cn。

通信作者: 康跃虎 (1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农田水循环与节水灌溉研究。E-mail: kangyh@igsrr.ac.cn。

with the increase in the proportion of fertilization. The harvest index was relatively low, which can effectively extend the nutrient transfer period from aboveground to tuber, and accelerate to accumulate more nutrients in the tubers. The highest irrigation water use efficiency was gotten under 60% ~ 70% of fertilization. The highest tuber yield in 2012 and 2013 were 32.2 and 32.4 t·hm⁻² for 70% NPK and 85% NPK, respectively, which on par with the average yield of local enterprises using center-pivot irrigation system, while 157, 52 kg·hm⁻² and 187 kg·hm⁻² for N, P₂O₅ and K₂O were saved, respectively. The potato yield, irrigation water and fertilizer use efficiency were high on sandy soil in Inner Mongolia when the amount of fertilization was about 85% of the recommended fertilizer dose and soil matric potential at 20 cm depth under the emitters was controlled above -25 kPa for drip fertigation.

Keywords: drip-fertigation; soil matric potential; fertilization amount proportion; partial factor productivity from applied fertilizer; irrigation water use efficiency

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是世界上仅次于水稻、小麦和玉米的第四大粮食作物^[1]。合理的水肥管理是马铃薯获得高产、稳产、优质的重要保证^[2]。内蒙古地区是我国主要的马铃薯生产基地,播种面积和总产量居全国前三位,均占到全国的10%以上^[3],其中乌兰察布、鄂尔多斯地区光照充足、昼夜温差大,雨热同季,土壤多为沙地,非常适合马铃薯生长。

近年来,随着“内蒙古新增四个千万亩节水灌溉工程科技支撑”项目的实施,内蒙古马铃薯滴灌得到了快速发展^[4]。滴灌具有对灌水时间、灌水量和土壤湿润范围高度控制的特点,可以将水和肥料直接供应到作物根系分布范围,养分淋失较少,被认为是马铃薯最好的施肥灌溉方式之一^[5-6]。马铃薯滴灌灌溉制度的研究表明,通过控制土壤水基质势来指导滴灌条件下马铃薯的灌溉是一种有效的方法^[7-10],当滴头正下方20 cm深度处的土壤水基质势为-25 kPa时,马铃薯的产量最高,且水分利用效率较高。

目前,国内外对马铃薯滴灌施肥制度的研究大多仅限于单方面研究氮肥,磷肥或者钾肥^[2,11-21]。由于养分迁移是水分驱动的水文过程,滴灌与地面灌溉、大型喷灌机灌溉相比,其养分在土壤中分布特点和运移状况不同,而马铃薯的需肥规律主要由其生物学特点决定,因此,以地面灌溉或者大型喷灌机条件下的推荐施肥量为基准,获得滴灌施肥灌溉条件下的施肥量比例,可有效地指导滴灌条件下的肥料管理。Liu R等^[22]在粉沙壤土上设计了5个滴灌施肥水平(分别为传统施肥量的10%~50%)来确定茶叶最佳施肥量比例,结果表明,随着施肥量的增加,茶叶的相对产量呈现先快速增加而后缓慢增加的趋势,当滴灌施肥量为传统施肥量的33%时,既可保持现在的茶叶产量,又能减少肥料大量投入,增加效益达33%。Bhat等^[23]在砂质黏壤土上研究了

4个滴灌施肥水平对槟榔产量和水肥生产力的影响,结果表明施肥量仅为推荐施肥量的75%时就可获得高产和较高的水肥利用效率。

目前在内蒙古沙地上马铃薯滴灌施肥灌溉条件下水肥综合管理的研究尚少。本论文以养分平衡法估计的施肥量作为推荐值,设计了不同滴灌施肥水平,通过田间试验研究了滴灌施肥灌溉对内蒙古沙地马铃薯生长、产量及水肥利用的影响,以期确定内蒙古沙地马铃薯的最佳施肥量比例和水肥管理方法,为沙地马铃薯的滴灌安全高效生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗白泥井镇(110°28'E,40°18'N),海拔约1 006 m,属于半干旱温带大陆季风气候。昼夜温差大,日照强烈,年均日照时数约3 100 h,年均气温6.1℃~7.1℃,年有效积温(≥10℃)为3 200℃左右,最高气温为35.8℃,最低气温为-32.6℃,无霜期为135~150 d。年均降水量为240~310 mm,主要集中在7—9月份。蒸发量大,年均蒸发量约2 100 mm(约为降水量的6~9倍)。

土壤质地疏松,砂土,以粗砂粒为主,接近于流沙。1.2 m土层平均容重为1.52 g·cm⁻³,田间持水量(质量含水量)为15.5%,透水性强。2012—2013年土壤的基础养分状况见表1。

1.2 试验设计

已有研究发现,当滴头正下方20 cm深度处的土壤水基质势在-25 kPa时,马铃薯的产量和水分利用效率高^[7-10]。基于上述的研究结果,本试验采用负压计来指导马铃薯进行施肥灌溉,并且控制滴头正下方20 cm深度处的土壤水基质势下限在-25 kPa时进行施肥灌溉。

表 1 供试土壤的基础养分状况

Table 1 Basic properties and available nutrient content of initial soil profile

年份 Year	土层 Soil layers /cm	硝态氮 NO ₃ ⁻ - N /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ - N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Olsen - P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	电导率 EC /(dS·m ⁻¹)	pH
2012	0 ~ 40	28.5	12.8	4.8	77.2	0.9	8.2
	0 ~ 120	19.0	10.8	2.8	64.3	0.7	8.2
2013	0 ~ 40	10.0	10.8	3.5	66.4	0.3	8.7
	0 ~ 120	5.2	11.9	1.4	53.7	0.2	8.8

本试验基于养分平衡法,根据每生产 1 000 kg 马铃薯需要带走 N 5 ~ 6 kg、P₂O₅ 1 ~ 3 kg、K₂O 12 ~ 13 kg 的养分需求特性^[24]和当地土壤肥力状况,参考当地马铃薯企业大型喷灌机条件下的施肥方案进行微调,计算得到马铃薯的推荐施肥量(kg·hm⁻²)。在 2012 年 N:P:K 为 420:105:495,2013 年 N:P:K 为 390:150:465。以此施肥量作为推荐值(施肥量作为 100%),设置 5 个滴灌施肥灌溉处理,施肥量在 2012 年分别为推荐施肥量的 10%(10%NPK,依次类推)、30%、50%、70%和 90%。基于 2012 年的试验结果,2013 年的施肥量调整为推荐施肥量的 10%、35%、60%、85%和 110%。每个处理随机布置,重复 3 次,小区长 5.5 m,宽 5.4 m,小区面积 29.7 m²。

试验所用基肥为常规马铃薯专用复合肥,氮磷钾比例在 2012 年、2013 年分别 16:14:15 和 18:10:7,追肥为尿素(46% N)和硝酸钾(13.9% N,46.5% K)。参考当地马铃薯生产企业大型喷灌机条件下的施肥方案,磷肥作为基肥一次性沟施,氮肥和钾肥除以基肥施入外,其余按马铃薯生育期分配到每天采用滴灌进行追肥。在 2012 年整个生育期内,10% NPK、30% NPK、50% NPK、70% NPK 和 90% NPK 的累计施肥量(氮、磷、钾的总和)分别为 103.8、315.1、525.2、830.8 kg·hm⁻²和 863.6 kg·hm⁻²,其中 1/3 作为基肥,2/3 作为追肥。2013 年,10%、35%、60%、85% NPK 和 110% NPK 的累计施肥量分别为 100.0、368.4、628.1、890.7 kg·hm⁻²和 1159.6 kg·hm⁻²,其中基肥和追肥各占 50%。马铃薯齐苗后开始进行滴灌施肥,每次灌溉前将计算好的尿素和硝酸钾溶解在肥料罐中,随水进行施肥。马铃薯前 35 d 追尿素和硝酸钾,后 40 d 仅追入硝酸钾,马铃薯收获前 20 d 停止施肥灌溉,收获前 10 d 停止灌溉。

1.3 灌溉与农艺措施

马铃薯品种为“克新 1 号”,参考当地马铃薯企业大型喷灌机条件下的种植模式进行起垄栽培,每个试验小区种植 6 垄,垄长 5.5 m,垄间距 0.9 m,垄肩宽 0.3 m,垄高 0.3 m,每条垄上铺设一条滴灌带,垄上种植单行马铃薯,株距 0.2 m。

每个处理(包括 3 个重复)为一个滴灌控制单元,在滴灌控制单元入口安装有闸阀、水表、压力表、网式过滤器和压差式施肥罐。滴灌带滴头间距 0.3 m,滴头流量为 1.38 L·h⁻¹,工作压力均控制在 0.1 MPa。每个滴灌控制单元的灌溉面积为 89.1 m²。

2012 年,马铃薯 5 月 12 日播种,播种后统一灌水 50 mm。6 月 4 日开始出苗,6 月 17 日马铃薯齐苗,开始采用负压计指导施肥灌溉,当土壤水基质势达到 - 25 kPa 时开始施肥灌溉,每次灌水 6 ~ 8 mm。9 月 7 日停止灌溉,9 月 19 日收获。2013 年,5 月 3 日播种,播种后统一灌水 40 mm。5 月 26 日开始出苗,6 月 14 日马铃薯齐苗,开始采用负压计指导施肥灌溉,每次灌水 5 ~ 6 mm。9 月 3 日停止灌溉,9 月 14 日收获。2013 年在降雨超过 10 mm 或者因地下水位抬升而连续 10 d 未进行灌溉时,为避免马铃薯关键生育期缺肥,采用滴灌进行施肥,每次灌水 2 ~ 2.5 mm。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 降雨 在试验区中心位置安装雨量桶和自动气象站,测定日降雨量。

1.4.2 土壤水基质势 每个处理于重复 2 的中间垄上滴头正下方 20 cm 深度处理设一支负压计,监测土壤水基质势。每天 8:00 和 15:00 观测负压计读数,并用来指导灌溉。

1.4.3 生长指标 马铃薯块茎膨大期(2012 年 7 月 28 日,2013 年 8 月 10 日),每小区选取 2 株代表性植株测定马铃薯的株高、茎粗、叶面积和鲜生物量。株高用卷尺拉直测定,茎粗用游标卡尺测定茎基部的最大直径,叶面积是将叶子摘下平铺后用方格法测定。

1.4.4 产量 马铃薯完全成熟后,每小区收获最中间 2 行,称重测产。

1.4.5 灌溉水利用效率 灌溉水利用效率(Irrigation water use efficiency, IWUE) = 马铃薯产量(kg·hm⁻²)/总灌水量(mm)。

1.4.6 肥料偏生产力 肥料偏生产力(Partial factor productivity from applied fertilizer, PFP) = 马铃薯产量

($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/施用肥料的总养分量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)(即 $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ 的养分量)。

1.5 数据处理及分析方法

采用 Origin 9.0 对数据进行处理并绘图,用 SPSS 13.0 统计分析软件进行差异显著性检验(Duncan 新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 降水量与灌水量

2012 年和 2013 年马铃薯生育期内总降水量分别为 382.2 mm 和 316.0 mm,其中 60% ~ 70% 的降雨量集中在 7—8 月(图 1)。两年的累积降雨量均明显高于当地 5—9 月多年平均降雨量 265 mm,为丰水年;2012 年生育期内共降雨 45 次,其中 23 次降水量低于 5.0 mm,5 ~ 10 mm、10.1 ~ 25 mm 和 25.1 ~ 50 mm 的降水各 13 次、3 次和 5 次,1 次大的降水为 55.0 mm,发生在 7 月 30 日。2013 年生育期内共降雨 38 次,其中低于 5.0 mm、5 ~ 10 mm、10.1 ~ 25 mm 和 25.1 ~ 50 mm 的降水各 21 次、7 次、7 次和 2 次,1 次大的降水为 54.9 mm,发生在 7 月 14 日。2012 年和 2013 年 10 mm 以上的降雨总量分别为 246.1 mm 和 246.0 mm,在沙地上极易引起养分的淋失^[25]。

2012 年 10%、30%、50%、70% NPK 和 90% NPK 的累计灌水量分别为 95.1、111.2、189.0、118.3 mm 和 171.5 mm,出苗后分别灌水 7、9、21、10 和 19 次(图 1)。2013 年 10%、35%、60%、85% NPK 和 110% NPK 的累计灌水量分别为 194.2、105.9、122.1、155.1 mm 和 130.4 mm,出苗后分别灌水 20、11、16、14 和 12 次。2013 年马铃薯出苗期间遭遇大风天气,沙地表层土壤常被吹走,致使马铃薯种薯外露,为保证出苗,重新培土后统一灌水 3 次,每次灌水约 8 mm。2012 年 50% NPK 和 90% NPK 处理、2013 年 10% NPK 处理的灌水量较多,灌溉频率较高,这可能与埋设负压计点的土壤空间变异或者植株生长旺盛等有关。

2.2 土壤水分状况

不同滴灌施肥处理马铃薯土壤水基质势变化情况(8:00)如图 2 所示。马铃薯整个生育期内,除了在生长旺盛阶段,因马铃薯耗水量大、灌溉不及时,导致个别处理在个别时间土壤水基质势低于灌溉阈值外,总体上所有处理在两年内马铃薯施肥灌溉阶段的大部分时间内都维持在 - 25 kPa 以上,土壤水分状况良好。由于负压计读数采用人工定时观测,出现土壤水基质势低于 - 25 kPa 的原因可能为前日 15 时的土壤水基质势未达到设定阈值而未进行灌溉,经过一下午和一晚上的水分消耗,致使根区的土

壤水基质势在当日 8:00 观测时出现低于阈值的情况(15 时数据未给出)。

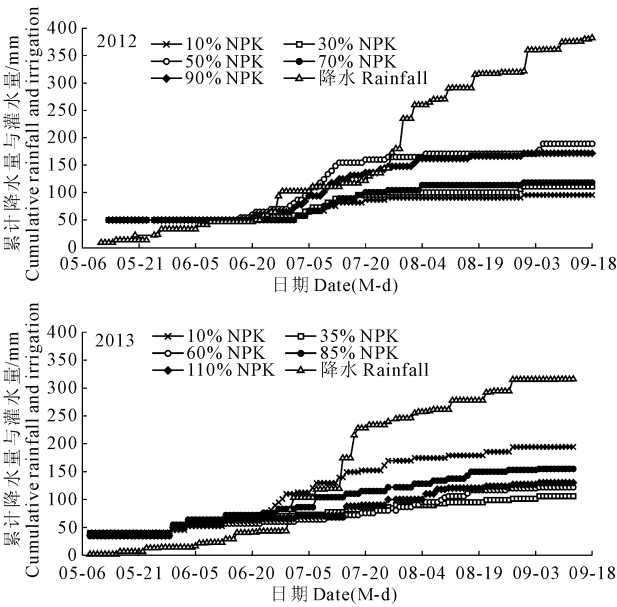


图 1 马铃薯生育期内的降水量和不同处理的累积灌水量
Fig.1 Rainfall and irrigation amount for different treatments during potato growing period

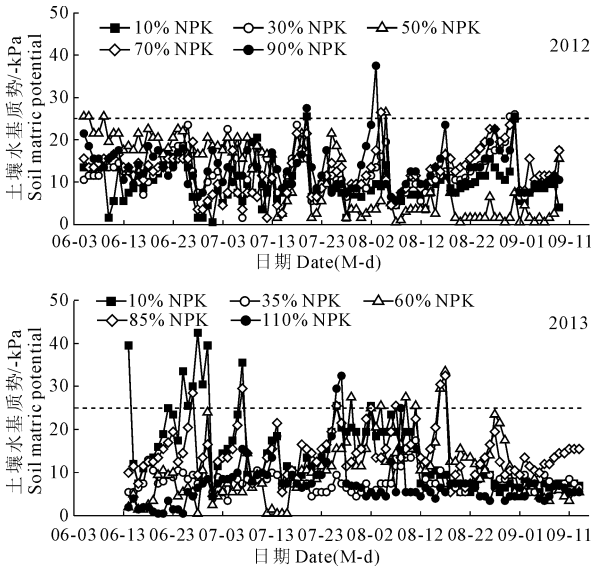


图 2 马铃薯生育期内不同滴灌施肥处理的土壤水基质势变化
Fig.2 Changes of soil matrix potential of different treatments

2.3 施肥量

由图 3 可知,2012 年,10% ~ 90% NPK 的施肥灌溉次数分别为 7、9、21、10 和 19 次,平均每 14、10、4、8 d 和 5 d 追施 1 次。马铃薯生育中后期降雨频繁,从 7 月中旬至 8 月底 47 d 内共降雨 19 次,其中 5 ~ 10 mm 和 10 mm 以上的降雨各 5 次(图 1)。马铃薯生育中后期是块茎膨大的关键时期,且该时期内负

压计监测的土壤根区墒情良好,使得灌溉施肥次数明显减少,10%~90% NPK 的施肥灌溉次数仅为 2、3、2、5 和 6 次,有的处理(如 30% NPK)甚至最长 43 d 才灌溉施肥 1 次,这极易导致土壤根区养分缺乏(图 2、图 3)。50% NPK 和 90% NPK 处理施肥灌溉频率高,次数多的原因可能为马铃薯块茎形成期植株生长旺盛致使马铃薯生育前期施肥灌溉频率较高。2013 年,考虑到降雨后养分淋失及关键生育期马铃薯需肥的问题,在 24 h 内降雨超过 10 mm 或者连续 10 d 未进行灌溉时,仍进行灌溉施肥。2013 年 10%~110% NPK 分别施肥灌溉 20、11、16、14 和 12 次,平均施肥灌溉 15 次,约每 6 d 追肥 1 次。

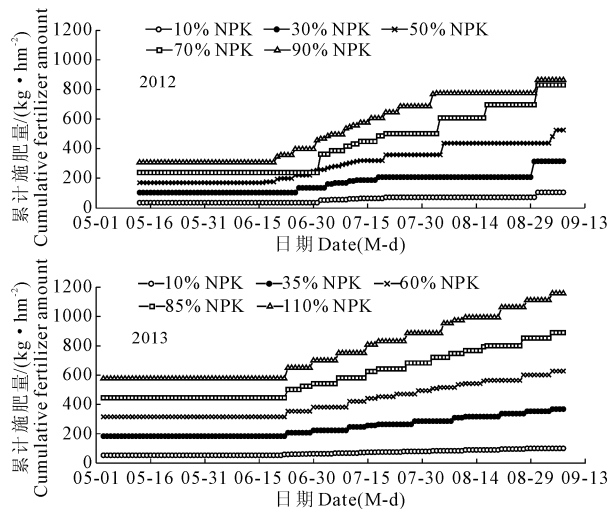


图 3 马铃薯生育期内不同滴灌施肥处理的累计施肥量
Fig.3 Fertilization amount for different treatments during potato growing period

以 2013 年 85% NPK 为例,将一周作为一个周期,分析采用负压计指导马铃薯滴灌施肥灌溉下单株马铃薯施用氮和钾的情况,结果如图 4 所示。

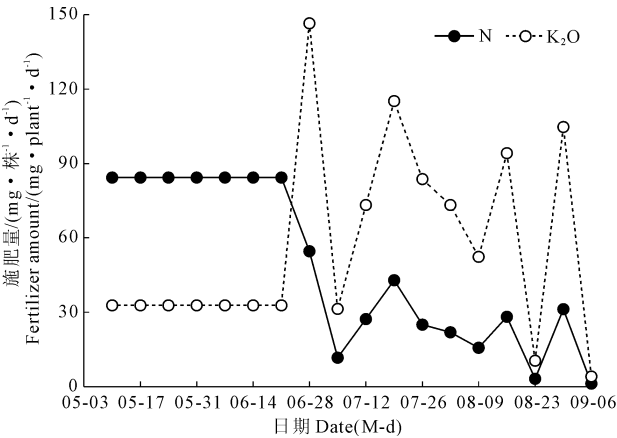


图 4 马铃薯 2013 年整个生育期内 85% NPK 的单株日施肥量
Fig.4 Fertilization amounts per plant every day for 85% NPK treatment during potato growing period in 2013

在芽条生长期和幼苗期(前 7 周),氮肥和钾肥主要以底肥供应,平均日施肥量分别为 84.3 mg·株⁻¹和 32.8 mg·株⁻¹。进入块茎形成期后,开始进行施肥灌溉。随着生育期的进行,日施氮量总体上逐渐下降,在块茎形成后期施氮量相对较少,为 11.7 mg·株⁻¹,日施钾量在施肥灌溉后明显升高,之后在块茎形成期、块茎膨大期和成熟期各有一个高峰,分别达到 146.5、115.1 mg·株⁻¹和 104.7 mg·株⁻¹,总体上呈逐渐下降的趋势。

2.4 不同滴灌施肥处理对马铃薯块茎膨大期植株生长性状的影响

块茎膨大期是马铃薯产量形成的关键时期,地上部长势会影响地下块茎的生长。由表 2 可知,不同滴灌施肥处理对马铃薯的株高、茎粗、叶面积指数和鲜生物量有明显的影响。两年马铃薯的株高、茎粗、叶面积指数和鲜生物量表现出相似的规律,均随着施肥量比例的增加,基本呈现先逐渐增加后略有下降的趋势。2012 年,70% NPK 的叶面积指数和鲜生物量最高,分别达 4.6 t·hm⁻²和 48.3 t·hm⁻²,10% NPK 的马铃薯生长明显受到影响。2013 年以 85% NPK 的株高、茎粗、叶面积指数和鲜生物量最高,达 86.2 cm、1.596 cm、3.4 和 62.6 t·hm⁻²,10% NPK 施肥处理明显影响到了马铃薯的生长。

参考 Janat^[13]的研究,将块茎膨大期块茎鲜生物量占地上部(茎叶)和块茎总鲜生物量的比值定义为收获指数,结合块茎膨大期的总鲜生物量,在一定程度上可以评价马铃薯群体光合同化物转化为块茎产量的能力。2012 年 7 月 28 日取样时,马铃薯处于块茎膨大初期,收获指数均低于 0.5,以茎叶生长为主,70% NPK 的鲜生物量和叶面积指数最高,收获指数最低,地上部生长旺盛,能够为块茎的膨大提供更多的干物质,并获得了最高的产量(表 2、表 3)。与 70% NPK 相比,90% NPK 的鲜生物量、叶面积指数、株高和收获指数与其差异不显著,而产量却降低了 4.0%,这可能是因为较高的施肥量比例和块茎形成期较高的施肥灌溉频率使得马铃薯植株营养生长过旺,加之生育后期降雨较多,影响了干物质在块茎中的积累,最终导致产量下降^[26-27]。2013 年 8 月 10 日取样时,马铃薯处于块茎膨大后期,收获指数均高于 0.5,较 2012 年提高了近 1 倍,营养分配中心已经由茎叶向块茎转移,此时 85% NPK 的鲜生物量、叶面积指数和株高均最高,收获指数相对较低,生长发育比例比较协调,有利于块茎膨大,最终产量最高(表 2、表 3)。与 85% NPK 相比,110% NPK 的鲜生物量、叶面积指数、株高和收获指数与其差异不显著,而产量降低了 14.8%,这可能是因为较高的施肥量

比例使得马铃薯吸收的养分浓度较高,一定程度上抑制了植株的生长,致使总生物量较少的缘故^[28]。

表 2 不同滴灌施肥处理对马铃薯块茎膨大期植株生长状况的影响

Table 2 The influence on the growth characteristics of different treatments in the tuber bulking stage

年份 Year	施肥水平 Fertigation level	株高 Height /cm	茎粗 Stem diameter /cm	叶面积指数 LAI	鲜生物量 Fresh biomass /(t·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index
2012	10% NPK	69.2b	1.415a	2.6c	30.1c	0.41a
	30% NPK	71.9ab	1.594a	3.8ab	41.7ab	0.35a
	50% NPK	69.3b	1.427a	3.11bc	34.6bc	0.38a
	70% NPK	74.5ab	1.503a	4.6a	48.3a	0.24b
	90% NPK	77.1a	1.579a	4.5a	47.6a	0.32ab
2013	10% NPK	55.0b	1.052c	0.5b	21.7c	0.81a
	35% NPK	66.1ab	1.315b	1.1b	31.0c	0.73b
	60% NPK	80.4a	1.349ab	2.8a	45.8b	0.55d
	85% NPK	86.2a	1.596a	3.4a	62.6a	0.61cd
	110% NPK	77.2a	1.456ab	2.6a	59.4a	0.68bc

注:同一年同列不同小写字母表示各处理差异显著($P < 0.05$),下同。
Note; Different small letters in the same column represented significant difference among treatments at 0.05 level in same year, the same as below.

2.5 不同滴灌施肥处理对马铃薯产量和水肥利用效率的影响

2012 年和 2013 年马铃薯的产量随着施肥量的增加呈现逐渐增加后略有下降的趋势。2012 年,马铃薯的产量以 70% NPK 最高,为 32.2 t·hm⁻²,除明显比 10% NPK 高出 32.0% 外,与其它处理间的差异均不显著(表 3)。2013 年在 85% NPK 时产量最高(32.4 t·hm⁻²),明显比 10% NPK 高出 68.8%,但与其它处理间的差异不显著。2012 年和 2013 年的最高产量与当地马铃薯生产企业的产量(各年份分别为 31.5 t·hm⁻²和 33.0 t·hm⁻²)持平甚至更高,但节约肥料 30% ~ 40%,平均节肥 157 kg·hm⁻² N、52 kg·hm⁻² P₂O₅ 和 187 kg·hm⁻² K₂O。分析两年产量相对较低的原因可能为:(1) 砂土保水保肥性差,特别是 2012 年马铃薯生育中、后期降水频繁,根区土壤养分容易淋失,致使马铃薯块茎膨大期养分缺乏,虽然后期进行补肥,但植株已开始衰老,吸收养分能力差,致使产量下降(图 3)。(2) 2013 年,马铃薯生育后期遭遇高温天气,从 8 月 8 日至 8 月 15 日,30℃ 以上的高温每天持续 6 h 以上,不利于马铃薯植株的生长,引起早衰,干物质虽较早地向块茎转移但转移不完全(表 2),从而造成产量下降。

2012 年的灌溉水利用效率(IWUE)以 70% NPK 最高,为 271.8 kg·hm⁻²·mm⁻¹,分别比其它处理高 6.1%、5.6%、69.0% 和 50.9%。2013 年的 IWUE 以 60% NPK 最高,为 248.7 kg·hm⁻²·mm⁻¹,高于其它处理 5.0% ~ 151.7%(表 3)。

表 3 不同滴灌施肥处理对马铃薯产量、水分和肥料利用效率的影响

Table 3 The influence on potato yield, IWUE and PFP of different treatments

年份 Year	施肥水平 Fertigation level	产量 Yield /(t·hm ⁻²)	IWUE /(kg·hm ⁻² · mm ⁻¹)	PFP /(kg·kg ⁻¹)
2012	10% NPK	24.4b	256.2a	234.7a
	30% NPK	28.6ab	257.4a	90.9b
	50% NPK	30.4a	160.8b	57.9c
	70% NPK	32.2a	271.8a	38.7c
	90% NPK	30.9a	180.1b	35.8c
2013	10% NPK	19.2b	98.8b	191.8a
	35% NPK	25.1ab	236.9a	68.1b
	60% NPK	30.4a	248.7a	48.3b
	85% NPK	32.4a	209.2a	36.4b
	110% NPK	27.6ab	211.2a	23.8b

两年马铃薯的肥料偏生产力(PFP)均以 10% NPK 最高,并随着施肥量的增加逐渐降低,2012 年和 2013 年分别为 234.7 kg·kg⁻¹和 191.8 kg·kg⁻¹,明显高于其它处理 158.3% ~ 707.2%(表 3)。

将 2 年滴灌施肥处理的产量除以 10% NPK 处理的产量折算成相对产量,滴灌施肥处理的相对产量与施肥量的关系见图 5。马铃薯的相对产量随着施肥量的增加呈现出先增加后下降的趋势。回归分析发现马铃薯的产量(y)与施肥量(x)的关系为二次曲线关系,表达式为 $y = 0.865 + 1.394x - 0.810x^2$ ($R^2 = 0.5668$)。当施肥量为推荐施肥量的 86% (86% NPK)时,马铃薯的产量最高,比推荐施肥量时增产 1.2%,同时节肥 14%,两年平均节约 N 57 kg·

hm^{-2} 、 P_2O_5 $18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

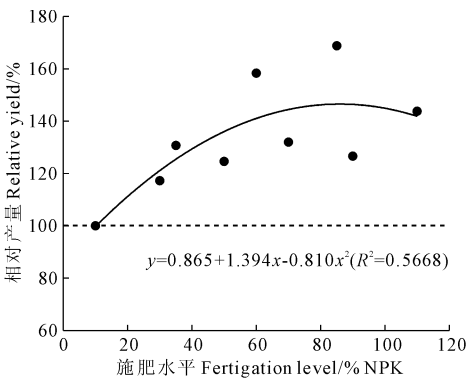


图 5 滴灌施肥水平与马铃薯相对产量的关系

Fig.5 Relationships between relative tuber yield with drip fertilization levels

3 结论与讨论

马铃薯在芽条生长期和幼苗期(前 7 周),氮肥和钾肥主要以底肥供应。进入块茎形成期后,采用负压计指导施肥灌溉,当滴头正下方 20 cm 深度处的土壤水基质势低于 -25 kPa 时进行施肥灌溉,随着生育期的进行,日施氮量总体上呈逐渐下降的趋势,日施钾量在施肥灌溉后明显升高,之后总体上呈逐渐下降的趋势。Carpenter^[29], Zebarth 等^[3]等的研究发现,马铃薯整个植株对氮素和钾素的吸收均从薯块萌芽后就开始,萌芽后的 30 ~ 45 d 达到峰值,日吸收速率分别约为 $100 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $168 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,此时期主要保证茎叶的生长,萌芽后 60 d,马铃薯主要将氮和钾从地上部运输到块茎,此时期块茎对其吸收量远超过整个植株的吸收量。因此,从整个生育期来看,总体上采用负压计指导施肥灌溉时,氮和钾的日施肥量趋势和马铃薯对其日吸收情况基本吻合,生育前期主要以地上部生长为主,施用氮肥有利于促进植株生长,生育后期主要用于块茎的膨大,减少氮肥的施用,多施用钾肥有利于促进地上部养分向块茎的转化,进而促进产量的形成。

马铃薯产量的近 60% 是在块茎膨大期形成的^[31],产量的形成在一定程度上取决于生物量和收获指数^[32]。只有合理的水肥管理措施,在满足前期茎叶生长的基础上,协调干物质在块茎及地上部营养器官的合理分配,才有利于块茎更快、更多地积累干物质,获得高产^[33]。当块茎膨大中、后期收获指数为 0.5 左右时,地上部分与地下部分的生长发育比例协调,有利于块茎膨大,积累更多的干物质,获得较高的产量^[34]。本研究发现,随着施肥量比例的增加,马铃薯的株高、茎粗、叶面积指数、鲜生物量均先增加再降低,当施肥量比例为 70% ~ 85% 时达到

最大值,并且收获指数相对较低,这是因为适宜施肥量(60% ~ 85% NPK)使得块茎膨大中后期地上部与地下部生长发育比例比较协调,延长了地上部养分向块茎转移的时间,促进更多养分向块茎积累,提高产量,而施肥量过量会引起马铃薯贪青晚熟,植株不能正常成熟,营养物质不能及时转移到块茎中导致减产^[13,26-27],甚至可能因施肥量过高导致马铃薯吸收的养分浓度较高,一定程度上抑制了植株的生长,进而影响产量^[28]。

当施肥比例为 60% ~ 70% 时,灌溉水利用效率最高。这可能是整个生育期施肥灌溉较频繁,施肥促进了作物根系的发育,提高了根系对水分及养分的吸收利用,使得水肥高效利用的缘故^[35](图 1)。Ierna 等^[36]认为,滴灌施肥下无论是高灌水量还是低灌水量,均以中等施肥量的灌溉水分利用效率较高,与本研究结果一致。肥料偏生产力均以 10% NPK 最高,并随着施肥量的增加逐渐降低,这与井涛等^[19]在马铃薯高垄覆膜滴灌施氮条件下的研究结果一致。

植物对养分的吸收、运输和利用都依赖于土壤水分,土壤的水分状况在很大程度上决定着肥料的合理用量^[37]。本研究采用负压计指导施肥灌溉,土壤大部分时间内都维持在 -25 kPa 以上,水分状况良好。同时,滴灌施肥灌溉能够直接把水分和养分输送到马铃薯根部,使植株能在短时间内高效利用水分和养分,施肥量与传统施肥量相比明显减少。石玫莉等^[38]认为马铃薯滴灌施肥灌溉时,施肥量应比常规施肥水平减少 40% ~ 60% 为宜。Ierna 等^[36]指出滴灌施肥灌溉时,中等施肥量($100:50:150 \text{ N:P:K kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)既可保证马铃薯的产量,又有利于水肥资源的高效利用。在埃及干旱区和山东青岛地区进行的马铃薯滴灌施肥灌溉研究,也得到了类似的结果^[39-40]。由于不同马铃薯品种的需肥特性不同、不同地区的土壤基础条件和气候条件存在差异,使得滴灌施肥灌溉条件下马铃薯的总施肥量仍存在较大差异。本研究基于养分平衡法得到推荐施肥量,设计了 5 个滴灌施肥量比例,并利用肥料效应函数法得到施肥量为推荐施肥量的 86% (86% NPK) 时,马铃薯的产量最高,比推荐施肥量时增产 1.2%,同时节肥 14%,两年平均节约 $57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ N}$ 、 $18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ K}_2\text{O}$,保证了较高的水肥利用效率。由于 N、P、K 等元素随水迁移流失的过程主要是水循环带动的物理过程,即溶质运移过程,主要与土壤质地和含水量以及降水过程等因素密切相关,故该比例关系可用于指导在沙地马铃薯的滴灌施肥。综合分析马铃薯生长、产量、灌溉水利用效率

和肥料利用效率,认为内蒙古沙地栽培马铃薯时,采用滴灌施肥灌溉系统,当滴头正下方 20 cm 处的土壤水基质势下限在 -25 kPa 时进行施肥灌溉,且施肥量为推荐施肥量的 85% 左右时,既能获得马铃薯高产,又可保证较高的水肥利用效率。

参考文献:

- [1] Fabeiro C, Martin de Santa Olalla F, de Juan JA. Yield and size of deficit irrigated potatoes[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 48(3):255-266.
- [2] Darwish T, Atallah T, Hajhasan S, et al. Nitrogen and water use efficiency of fertigated processing potato[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1):95-104.
- [3] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2014.
- [4] 程满金, 郭富强, 高文慧, 等. 内蒙古自治区农牧业高效节水灌溉工程技术研究[J]. *黑龙江水利*, 2015, 1(3):6-10.
- [5] 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.
- [6] 林阿典, 黄玉芬, 黄沛深, 等. 广东冬种马铃薯水肥一体化技术研究[J]. *广东农业科学*, 2012, (7):46-47.
- [7] Kang Y, Wang F X, Liu H J, et al. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes[J]. *Irrigation Science*, 2004, 23(3):133-143.
- [8] Wang F X, Kang Y, Liu S P, et al. Effects of soil matric potential on potato growth under drip irrigation in the north china plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1):34-42.
- [9] 康跃虎, 王凤新, 刘士平, 等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2):66-72.
- [10] 王凤新, 康跃虎. 用负压计拟定滴灌马铃薯灌溉计划的方法研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3):58-64.
- [11] Chawla J, Narda N. Economy in water and fertilizer use in trickle fertigated potato[J]. *Irrigation and Drainage*, 2001, 50(2):129-137.
- [12] Darwish T, Atallah T, Hajhasan S, et al. Management of nitrogen by fertigation of potato in lebanon[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 67(1):1-11.
- [13] Janat M. Efficiency of nitrogen fertilizer for potato under fertigation utilizing a nitrogen tracer technique[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(17-18):2401-2422.
- [14] Mohammad M, Zuraiqi S, Quasmeh W, et al. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54(3):243-249.
- [15] Papadopoulos I. Nitrogen fertigation of trickle-irrigated potato[J]. *Fertilizer Research*, 1988, 16(2):157-167.
- [16] Papadopoulos I. Phosphorus fertigation of trickle-irrigated potato[J]. *Fertilizer Research*, 1992, 31(1):9-13.
- [17] 邓兰生, 林翠兰, 龚林, 等. 滴施不同钾肥对马铃薯生长及产量的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(2):12-14.
- [18] 邓兰生, 林翠兰, 龚林, 等. 滴灌施用不同氮肥对马铃薯生长的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1):141-144.
- [19] 井涛, 樊明寿, 周登博, 等. 滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):654-661.
- [20] 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.
- [21] 邢海峰, 石晓华, 杨海鹰, 等. 磷肥分次滴灌施用提高马铃薯群体磷素吸收及磷利用率的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4):987-992.
- [22] Liu R, Kang Y, Zhang C, et al. Chemical fertilizer pollution control using drip fertigation for conservation of water quality in danjiangkou reservoir[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 98(3):295-307.
- [23] Bhat R, Sujatha S, Balasimha D. Impact of drip fertigation on productivity of arecanut (*Areca catechu* L.) [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1):101-111.
- [24] 赵冰. 山药、马铃薯栽培技术问答[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2007:239.
- [25] Gascho G, Hook J. Development of a fertigation program for sprinkler-irrigated corn[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1991, 4(3):306-312.
- [26] 孙继英, 王山, 肖本彦, 等. 不同施肥量马铃薯主要农艺性状的变化及与产量性状相关性的研究[J]. *安徽农学通报*, 2009, 15(11):100-101, 64.
- [27] 王国兴, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(3):106-111.
- [28] 张东昱, 成军花, 夏叶, 等. 河西走廊加工型马铃薯水肥耦合效应量化管理指标研究[J]. *土壤*, 2012, 44(6):987-990.
- [29] Carpenter P N. Mineral Accumulation in Potato Plants[M]. Orono: Maine Agricultural Experiment Station Bulletin 562, 1957:1-23.
- [30] Zebarth B J, Rosen C J. Research perspective on nitrogen BMP development for potato [J]. *American Journal of Potato Research*, 2007, 84(1):3-18.
- [31] 郑顺林, 王西瑶, 马均, 等. 营养水平对马铃薯块茎发育中激素、产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3):515-519.
- [32] 张树兰, 刘俊梅, 黎青慧, 等. 秸秆覆盖下旱地小麦收获指数降低的原因解析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1):47-51.
- [33] 夏锦慧. 马铃薯干物质积累及氮、磷、钾营养特征研究[J]. *长江蔬菜*, 2008, (12b):34-37.
- [34] 邓万香. 高寒地区地膜马铃薯不同生育时期施用钾肥的效果试验[J]. *长江蔬菜*, 2008, (12):39-40.
- [35] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. *干旱地区农业研究*, 1994, 12(1):38-46.
- [36] Ierna A, Pandino G, Lombardo S, et al. Tuber yield, water and fertilizer productivity in early potato as affected by a combination of irrigation and fertilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 101(1):35-41.
- [37] 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.
- [38] 石玫莉, 陆兴伦, 宾士友, 等. 马铃薯水肥一体化技术应用试验研究[J]. *广西农学报*, 2012, 27(2):11-14.
- [39] Badr M A, El-Tohamy W A, Zaghloul 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.
- [40] 张志伟, 梁斌, 李俊良, 等. 不同灌溉施肥方式对马铃薯产量和养分吸收的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(36):268-272.