

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.028

覆膜滴灌条件下滴灌湿润比和施氮量对甘薯生长的影响

张友良¹ 汪兆辉¹ 冯绍元¹ 王凤新²

(1.扬州大学水利科学与工程学院,扬州 225009; 2.中国农业大学中国农业水问题研究中心,北京 100083)

摘要:为提高甘薯产量、品质以及水氮利用效率,设置3个灌水水平:不灌水(P1)、滴灌湿润比30%(P2)、滴灌湿润比60%(P3),3个施氮水平:90 kg/hm²(N1)、180 kg/hm²(N2)、270 kg/hm²(N3),共9个处理进行田间试验,探索不同水氮组合下甘薯生长指标、产量以及营养成分对水肥的响应。研究分析不同水肥处理下甘薯蔓长、茎粗、干物质积累量、块茎分级、产量、块茎可溶性糖含量、块茎淀粉含量、块茎总类胡萝卜素含量以及块茎粗蛋白含量等指标的变化。结果表明:在相同滴灌湿润比处理下,N3处理地上干物质量大于N2、N1处理(N1P2除外)。在定植后157 d,N1、N3施氮量处理下的P3处理地上干物质量最高,N2施氮量处理下则是P2处理地上干物质量最高。在生育期后期、不灌水(P1)条件下,N3处理地下干物质量最高;在P2、P3处理下,则N2处理最高。在相同滴灌湿润比处理下,随着施氮量的增加,甘薯产量、单株结薯数、大薯块个数(质量)以及可溶性糖含量均先增加、后减小,甘薯块茎粗蛋白含量先略有减小、而后增加,总类胡萝卜素含量减少。而在相同施氮量、不同滴灌湿润比处理间各指标均无显著性差异。N2P3(中氮高水)处理甘薯产量、可溶性糖含量表现最优,N3P2(高氮中水)处理甘薯块茎粗蛋白含量最高,N1P1(低氮不灌水)处理甘薯块茎总类胡萝卜素含量最高。综合考虑甘薯的产量、氮肥偏生产力与品质,经回归分析表明,在本试验条件下甘薯较为适宜的滴灌湿润比为60%,氮肥用量为180.25 kg/hm²。

关键词:甘薯;覆膜滴灌;水氮优化;产量;品质

中图分类号:S275.6;S365

文献标识码:A

文章编号:1000-1298(2021)07-0261-10

OSID:



Effects of Soil Wetted Percentages and Nitrogen Fertilizations on Sweet Potato Growth under Drip Irrigation with Film Mulching

ZHANG Youliang¹ WANG Zhaohui¹ FENG Shaoyuan¹ WANG Fengxin²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Optimizing the amount of water and nitrogen is the main way to increase crop yield and improve crop quality. Sweet potato, rich in anthocyanins, carotenoids and other health-care nutrients, has a good prospect for starch processing and is an important food and energy crop. Nitrogen is a necessary macronutrient element for sweet potato growth and development. Soil moisture is an important factor affecting soil nitrogen distribution in the field and sweet potato growth. Proper soil moisture can promote sweet potato vines growth and increase sweet potato yield. Meanwhile, soil moisture can help give full play to nitrogen fertilizer effect. Different soil wetted percentages and nitrogen fertilizations have different effects on sweet potato yield, water and fertilizer use efficiency, and sweet potato quality. The experiment was conducted in Rizhao City, Shandong Province from May to October 2020. The effects of different soil wetted percentages and nitrogen fertilizations on sweet potato vines growth, yield and quality under drip irrigation with black plastic film mulching were studied. The sweet potato vine stem diameter, vine length, and dry matter quality were measured throughout the whole growth season. The potato yield, tuber grade, starch, crude protein, soluble sugar and total carotenoid content were measured. The results showed that non-irrigation treatment could not fully exert the effect of nitrogen fertilizer, and caused

收稿日期:2021-02-02 修回日期:2021-04-09

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51809225)、中国博士后科学基金特别项目(2020T130559)和中国博士后科学基金面上项目(2019M651977)

作者简介:张友良(1987—),男,讲师,博士,主要从事农业水土环境与生态调控研究,E-mail: youliangzhang@yzu.edu.cn

通信作者:冯绍元(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与水资源及水环境研究,E-mail: syfeng@yzu.edu.cn

drought stress, which was not conducive to the growth of sweet potato vines and dry matter accumulation. High nitrogen fertilization (N3) treatment improved the above-ground growth and made the sink-source imbalance. Then it inhibited the underground dry matter accumulation. The P2 treatment provided appropriate water conditions for sweet potato growth and promoted nitrogen absorption of sweet potato, which was beneficial to underground dry matter accumulation. Under the same soil wetted percentage treatments, the number of sweet potato per plant and the quantity (mass) of large potato pieces would first increase and then decrease with nitrogen fertilization increase. Irrigation increase can increase sweet potato yield. Nitrogen fertilization significantly increased sweet potato yield and the quantity (mass) of large sweet potato pieces. However, excessive nitrogen fertilization reduced sweet potato yield and the quantity (mass) of large potato pieces. Excessive soil nitrogen content inhibited sweet potato soluble sugar accumulation, while higher soil water content alleviated the inhibitory effect of high nitrogen on tuber soluble sugar accumulation. Sweet potato tuber total carotenoid content was decreased with the increase of nitrogen fertilization, and the rate was slowed down with the increase of nitrogen fertilization. Higher nitrogen fertilization promoted sweet potato formation tuber crude protein. Considering the yield and quality and partial factor productivity (FPF) of sweet potato, the suitable soil wetted percentage for sweet potato in Shandong Province was 60%, and the nitrogen fertilizer amount was 180.25 kg/hm².

Key words: sweet potato; drip irrigation with film mulching; water and nitrogen optimization; yield; quality

0 引言

甘薯具有高产、耐旱、耐贫瘠的特点,对生长环境具有较好的适应性,是重要的粮食作物和能源作物^[1]。甘薯含有较为丰富的花青素、类胡萝卜素等保健营养成分,在生物能源以及保健品领域获得广泛关注^[2]。据FAO统计,2019年我国甘薯总产量占世界甘薯总产量的57%,我国是甘薯生产大国,但是与高产国家仍然有差距,澳大利亚甘薯产量是我国甘薯产量的1.66倍^[3]。山东省是我国甘薯主产省之一^[4]。山东省水资源紧缺,年内降水不均,且存在季节性缺水,农业用水日趋紧张^[5],在此形势下如何提高该地区甘薯产量是亟待解决的问题。

优化水氮用量是提高作物产量、改善作物品质的主要途径^[6-8]。研究表明,水分胁迫会抑制甘薯各器官的生长^[9],适当增加土壤水分可以促进甘薯藤蔓生长、提高甘薯产量^[10],但土壤水分过高会导致地上部分徒长、鲜薯产量降低^[11]。氮是甘薯生长发育所必需的营养元素,对甘薯茎蔓生长和地下干物质积累影响显著^[12-13],在一定的施氮量范围内,甘薯产量与氮肥投入量呈正相关关系^[10,12],但过量施氮会使地上部分旺长,从而降低单薯质量和甘薯块茎产量^[13-15]。宁运旺等^[13]研究发现,氮缺乏显著降低甘薯主蔓长、单株叶面积、单株分枝数以及茎叶根生物量。陈晓光等^[16]研究发现,施氮(N 60 kg/hm²)可以增加甘薯各个生育期叶面积,显著提高块茎产量,但过量施氮(N 240 kg/hm²)使块茎产量降低。水氮对薯类块茎的品质也有重要的影响。苏亚拉其其格等^[17]研究发现,随着水分胁迫程

度的加剧,马铃薯块茎中淀粉和可溶性总糖含量增加,而蔗糖含量减少。朱绿丹等^[18]研究发现,提高土壤含水率会降低块茎维生素C含量、提高可溶性糖含量。林彩玲^[19]研究发现,甘薯块茎可溶性糖、粗蛋白、氨基酸总含量均随施氮量的增加而呈先增大、后减小的趋势。LAURIE等^[20]研究发现,增加灌水量与施肥量(N、P、K)可以减少黄肉甘薯块茎β-胡萝卜素含量,但差异不显著。EL-BAKY等^[21]研究发现,增加钾肥与锌肥施用量可以提高甘薯类胡萝卜素含量。SMOLEN'等^[22]研究发现,单独施用氮肥对作物胡萝卜素含量无显著影响。

目前,我国农业生产存在过量灌水和施氮的问题,导致水肥利用率较低^[23-24]。覆膜滴灌可以显著提高水分利用效率、降低土壤氮素损失^[25],而覆膜滴灌条件下滴灌湿润比和施氮量对甘薯生长、产量及其品质的影响却鲜有报道。本研究探讨覆膜滴灌条件下不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯的生长、产量及其品质的影响,以为覆膜滴灌甘薯种植提供理论依据和技术参考。

1 材料与与方法

1.1 试验区概况

试验于2020年5—10月,在山东省日照市岚山区中国农业大学特色马铃薯优质高产试验示范基地(北纬35°25',东经118°59',海拔131 m)进行,该地属暖温带湿润季风气候,多年平均气温为13.2℃,相对湿度为72%,日照时数为2 533 h,降水量897 mm,无霜期为213 d,2020年5—10月试验区总降雨量为1 245 mm,降雨量分布如图1所示。土壤质地

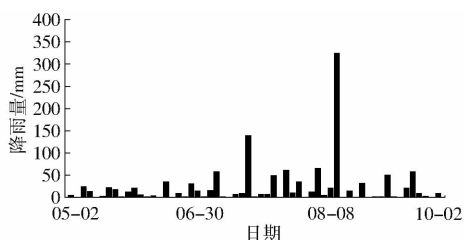


图1 2020年5—10月试验区降雨量

Fig. 1 Rainfall in experimental area from May to October 2020

表1 试验区土壤基础肥力

Tab. 1 Basic soil fertility in experimental area

土层深度/cm	pH 值	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	全磷质量比/ (g·kg ⁻¹)	全钾质量比/ (g·kg ⁻¹)
0~10	4.8	7.8	50.34	69.65	0.4654	0.7477	3.18
10~20	4.9	7.7	37.14	69.38	0.3523	0.6574	3.19
20~30	4.8	8.5	31.36	59.54	0.4623	0.6843	3.47
30~50	5.3	7.5	30.53	47.42	0.1595	0.6018	3.33
50~70	6.2	3.3	11.55	50.12	0.0676	0.4760	3.22

30%)、P3(滴灌湿润比为60%)。氮肥施用量3个水平:N1(90 kg/hm²)、N2(180 kg/hm²)、N3(270 kg/hm²)。试验共9个处理,3次重复,一共27个小区。试验小区布置采用完全随机布置。

灌溉时间依据负压计监测的土壤基质势确定,每个处理安装2个负压计,取负压计平均值,当平均值达到土壤基质势下限(-25 kPa)时灌水。灌水方式为地表滴灌,并覆膜(黑色地膜)。滴灌系统采用支管+辅管布置,每个小区都有闸阀、压力表和水表,用来控制和调节小区灌溉。采用的滴灌带直径为16 mm,滴头流量2.0 L/h,滴头间距0.3 m。灌水定额计算式为

$$m = h(\theta_a - \theta_b)P/\eta \quad (1)$$

式中 m ——灌水定额,m

h ——土壤计划湿润层深度,取0.4 m

θ_a ——灌水后土壤平均含水率,即田间持水率,cm³/cm³

θ_b ——灌水前土壤平均含水率,即-25 kPa时土壤含水率(田间持水率的70%),cm³/cm³

P ——滴灌湿润比,%

η ——灌溉水利用系数,取0.97

根据式(1)计算得到不同滴灌湿润比的灌水定额分别为:16.8 mm(滴灌湿润比60%)、8.4 mm(滴灌湿润比30%)、0 mm(滴灌湿润比0%)。

试验甘薯供试品种为普薯32号,2020年5月1日定植,10月4日收获。采用起垄种植,一垄单行,每个小区7垄,株距0.25 m,垄宽0.85 m,垄高0.2 m,

主要为砂壤土,0~90 cm深度土壤平均干容重为1.46 g/cm³,田间持水率为22.6%(体积含水率)。试验区随机选取10个点测定土壤基础肥力,取土深度为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm、50~70 cm,土壤基础肥力见表1。

1.2 试验设计

试验考虑灌水量和施氮量2个试验因素。设置3个灌水量水平:P1(不灌水)、P2(滴灌湿润比为

小区长6 m,小区面积35.7 m²(6 m×5.95 m)。播种前每个小区施入相同量的底肥,施入375 kg/hm²复合肥(N 17%、P₂O₅ 17%、K₂O 17%),600 kg/hm²钙硫磷肥料(P₂O₅ 12%、Ca 12%、S 8%)。尿素(N 46%)为供试氮肥肥料,硫酸钾肥料(K₂O 52%)为供试钾肥肥料。8月2日所有处理追施223.6 kg/hm²硫酸钾,8月2日、9月5日对N1、N2、N3处理分别追施28.53、126.36、224.18 kg/hm²尿素,其中不灌水(P1)处理的氮肥和钾肥以喷雾的形式施入甘薯根部,P2、P3处理肥料通过滴灌系统施入。各处理的施肥和病虫害防治等其他农艺措施相同。

1.3 试验观测内容与方法

气象数据:利用标准气象站(HOBO U30 Station型,Onset,美国)监测压强、风速、大气温度、降雨量等,气象站安装高度为距离地面2 m。

蔓长和茎粗:每个小区选取固定10株甘薯,各个生育期分别用卷尺和游标卡尺测量蔓长和茎粗。

干物质积累量:分别于甘薯定植后的97、117、157 d取样。每一个处理小区随机取得连续10株,挖出块茎,将植株分为地上、地下两部分,利用干燥箱在105℃杀青30 min,再在80℃干燥至质量恒定,测定干物质量。

产量:收获时在测产小区内随机连续选取30株甘薯,以小区为单位称量得到块茎鲜质量。

氮肥偏生产力:为甘薯收获期块根鲜质量与氮肥投入量比值。

块茎分级:每个小区随机选取10株,用精度1%天平称量,分别记录各小区的块茎个数与质量。

营养成分:可溶性糖含量采用蒽酮-硫酸分光光度法;淀粉率采用薯块烘干率 a 换算,即淀粉率为 $0.86945a - 6.34587^{[26]}$;粗蛋白含量采用凯氏半微量定氮法;总类胡萝卜素含量采用国标法。

1.4 数据分析

试验数据使用 Microsoft Excel 2013 软件进行录入和计算,用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行统计分析,处理间平均数显著性检验采用新复极差法,用 Origin 2018 软件对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯蔓长、茎粗的影响

不同滴灌施肥处理甘薯全生育期蔓长变化如图 2 所示。在定植后 50~70 d 的生育期前期,甘薯

蔓长增长速率最快,随着生育期后移,甘薯蔓长增长速度放缓。由图可以看出,在相同滴灌湿润比处理,定植 70 d 以后,仅 P2 滴灌湿润比处理下,不同施氮处理间表现出微小差异,其中, N2 处理蔓长较 N1、N3 处理分别提高了 4.4%、5.9%,但未达到显著性水平。在相同施氮处理下,定植后的 146 d, N1、N2 处理的 P2 处理获得最大的蔓长; N3 处理下, P3 处理蔓长最大。

不同滴灌施肥处理甘薯全生育期茎粗变化如图 3 所示。总体上,在滴灌施肥条件下,随着生育期后移,甘薯茎粗在不断增加,增长速率在放缓,茎粗在不同水肥处理间无显著性差异。在定植后的 60~70 d 内,甘薯的茎粗快速增长,是全生育期内茎粗增长速率最大的时期,此后茎粗增加缓慢,定植后 100 d,茎粗已经接近最大值。

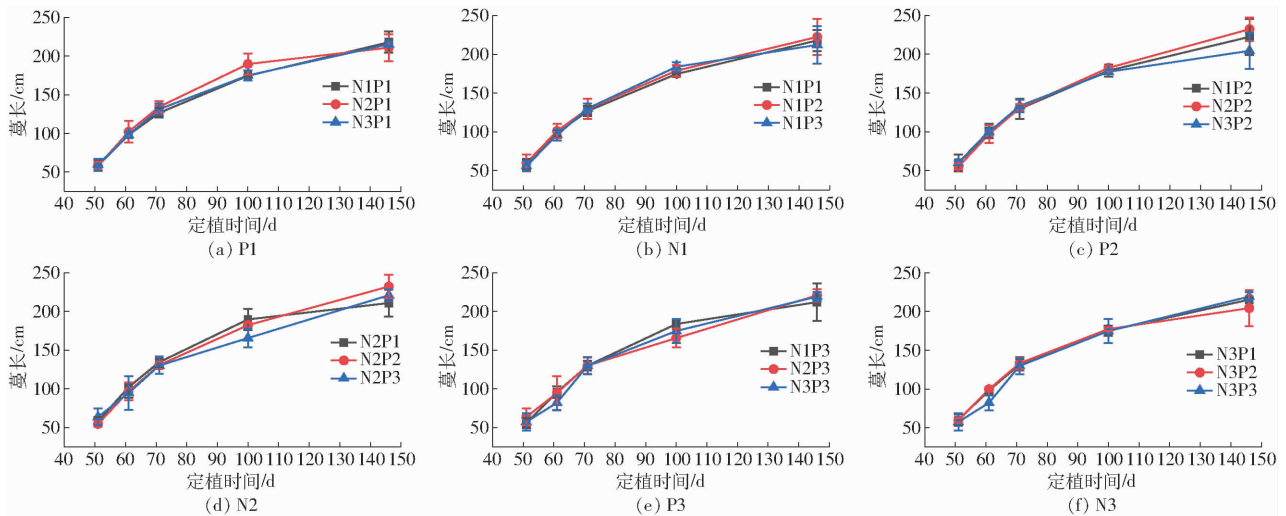


图 2 不同滴灌湿润比和施氮量处理下全生育期甘薯蔓长动态变化曲线

Fig. 2 Dynamic change curves of sweet potato vine length during whole growth period under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

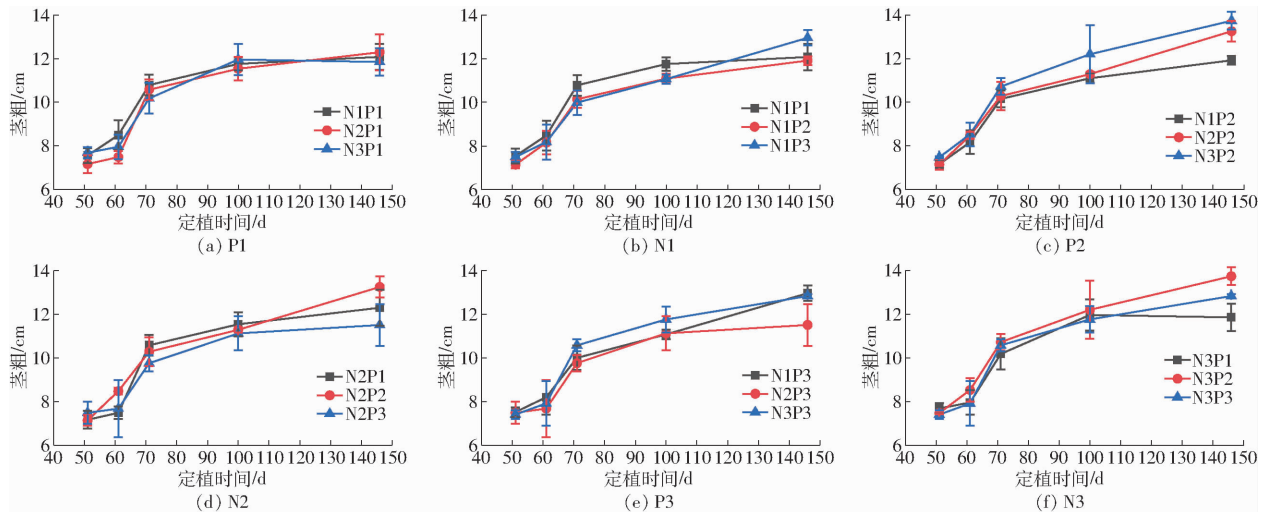


图 3 不同滴灌湿润比和施氮量处理下全生育期甘薯茎粗动态变化曲线

Fig. 3 Dynamic change curves of sweet potato stem diameter during whole growth period under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

施氮会促进甘薯茎粗增加,但在不同的滴灌湿润比条件下,甘薯茎粗对施氮的响应不同,灌水处理茎粗对于施氮的响应大于不灌水处理。在灌水条件下,N3处理在定植后71、100、146 d的茎粗高于N1和N2处理。例如,P2处理定植后146 d,N3处理较N1、N2处理茎粗分别提高了15.21%、3.63%,P3滴灌湿润比也有类似规律。P1处理下,不同施氮处理间茎粗的最大差异为0.45 cm,而P2处理下最大差异为1.81 cm。

在相同施氮处理下,提高滴灌湿润比有助于茎粗的增加,但过高滴灌湿润比将抑制茎粗增加。例如,在N2处理下,定植后146 d,P2处理茎粗最大,相较于P1、P3处理分别提高了7.76%、15.19%,其中N2P2与N2P3差异达到显著性水平($P < 0.05$)。

2.2 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯干物质积累的影响

不同滴灌施氮处理甘薯植株地上干物质质量变化如图4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。总体上,随着生育期后移,各处理甘薯地上干物质质量趋于稳定,部分处理(N1P2、N2P3)地上干物质质量减少;P1处理下,定植97 d后地上干物质质量增长缓慢,并且各施氮处理间差异很小。在各个生育期,在相同滴灌湿润比处理下(除N1P2外),N3处理地上干物质质量均大于N2、N1处理。在相同施氮处理下,定植后97 d,P2处理地上干物质质量高于P1处理,但继续增加灌水量,N1、N2处理地上干物质质量减小,N3处理则继续增加;在定植后157 d,N1、N3处理地上干物质质量随灌水量增大而增大,N2处理则先增大后减小。在N3处理下,各时期均为P3处理地上干物质质量最高,P1处理最小。例如,定植后97 d,N3P3较N3P1、N3P2分别提高了12.9%、11.4%;定植后117 d,分别提高28.5%、22.1%;定植后157 d,分别提高36.4%、9.7%。

不同滴灌施氮处理甘薯植株地下干物质质量变化如图5所示。总体上,滴灌湿润比对甘薯地下干物质质量无显著性影响,施氮在定植后157 d对地下干物质积累有显著性影响,不灌水处理地下干物质对于施氮的响应小于灌水处理。定植后157 d,P1处理下,N1处理地下干物质质量高于N2、N3处理,无显著性差异;P2处理下,N2处理获得最高的地下干物质积累量,N2处理相较于N1、N3处理分别提高了50.5%、23.1%,达到显著性水平,P3处理也有类似的规律。在相同施氮量条件下,在N1处理下,P1处理地下干物质质量最高,增加灌水量会不同程度地减少地下干物质质量;在N2、N3施氮处理下,P2处理地下

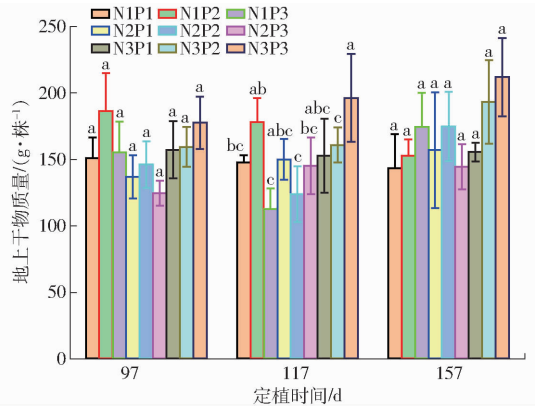


图4 不同滴灌湿润比和施氮量处理下全生育期地上干物质质量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of above-ground dry matter quality during whole growth period under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

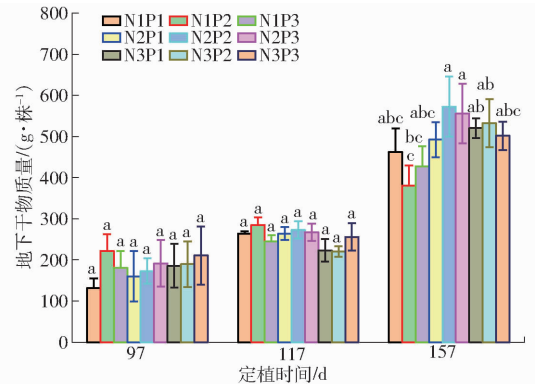


图5 不同滴灌湿润比和施氮量处理下全生育期地下干物质质量动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of underground dry matter quality during whole growth period under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

干物质质量高于P1和P3处理。例如,在N2施氮处理下,P2处理相较于P1、P3处理分别提高了16.36%、3.02%;在N3施氮处理下,P2处理相较于P1、P3处理分别提高了2.31%、6.06%。

2.3 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯产量、氮肥偏生产力的影响

总体上,在滴灌施氮条件下,施氮量对甘薯产量的影响极显著($P < 0.01$),滴灌湿润比对甘薯产量无显著性影响(表2)。灌溉、施氮及水氮交互效应对甘薯单株结薯数、单薯质量均无显著性影响。

在相同滴灌湿润比条件下,N2处理的单株结薯数最大,达到7.27~7.83个/株,比N1处理平均多0.83~1.00个/株,比N3处理平均多0.13~1.17个/株。N1、N2施氮处理下,不同滴灌湿润比处理间单株结薯数相差较小,各滴灌湿润比处理间单株结薯数最大差异为0.43、0.4个/株,而不同施氮量处理间最大差异为1.0、1.17个/株,滴灌湿润

表2 不同滴灌湿润比和施氮量处理下甘薯产量及其构成因子

Tab.2 Sweet potato yield and constituent factors under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

施氮水平	灌溉水平	单株结薯数/ (个·株 ⁻¹)	单薯质量/ g	产量/ (t·hm ⁻²)	增产幅度/%	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
N1	P1	6.83 ^a	241.29 ^a	67.29 ^{abcd}	10.82	747.67 ^a
	P2	6.40 ^a	196.13 ^a	58.01 ^d	28.58	644.56 ^b
	P3	6.60 ^a	239.27 ^a	62.17 ^{bcd}	19.98	690.78 ^{ab}
N2	P1	7.83 ^a	208.30 ^a	69.96 ^{ab}	6.62	388.67 ^c
	P2	7.27 ^a	262.15 ^a	72.77 ^a	2.50	404.28 ^c
	P3	7.43 ^a	252.72 ^a	74.59 ^a	0.00	414.39 ^c
N3	P1	7.70 ^a	230.88 ^a	59.24 ^{cd}	25.91	219.41 ^d
	P2	6.10 ^a	305.84 ^a	68.05 ^{abc}	9.61	252.04 ^d
	P3	6.97 ^a	252.33 ^a	72.46 ^{abc}	2.94	268.37 ^d
P	施氮	0.195	0.181	0.006 ^{**}		0.001 ^{**}
	灌溉	0.226	0.346	0.271		0.344
	施肥×灌溉	0.874	0.128	0.069		0.027 [*]

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), * 表示差异达显著水平($P < 0.05$), ** 表示差异达极显著水平($P < 0.01$),下同。

比对单株结薯数的影响小于施肥。

滴灌湿润比和施氮量对单薯质量均无显著性影响,但 N2、N3 施氮处理下,P2 处理均获得最高单薯质量。例如,在 N2 处理下,P2 处理的单薯质量比 P1、P3 提高了 25.9%、3.7%;N3 处理下,P2 处理的单薯质量比 P1、P3 处理提高了 32.5%、21.2%。而 N1 处理下,P2 处理的单薯质量比 P1、P3 处理分别减少了 23.0%、22.0%。

滴灌施氮条件下,施氮量对甘薯产量有极显著影响($P < 0.01$)。总体上,相同滴灌湿润比条件下,N2 处理产量相较于 N1、N3 处理都有所提高,且与 N1 处理的差异达到显著性水平。在 P1 处理下,N2 处理较 N1、N3 处理分别提高了 4%、18.1%,但未达到显著性水平;在 P2 处理下,N2 处理较 N1、N3 处理分别提高了 25.4%、6.9%,其中 N1 处理与 N2 处理达到显著性水平($P < 0.05$);在 P3 处理下,N2 处理比 N1 处理显著提高 20.0%,比 N3 处理提高 9.65%。相同施氮量条件下,低施氮量(N1)下灌水会导致不同程度减产,而中高施氮量(N2、N3)下提高滴灌湿润比可以提高产量。例如,在 N1 处理下,P1 处理产量最高,P1 处理较 P2、P3 处理分别高了 16.0%、8.3%;N2 处理下,P3 处理较 P1、P2 处理分别提高了 6.61%、2.49%。其中,N2P3 处理产量最高,为 74.59 t/hm²,相比 N1P2 增产最多达到 28.56%,相比 N3P1 增产 25.9%。

滴灌施氮条件下,施氮量对甘薯氮肥偏生产力的影响极显著($P < 0.01$),灌溉对氮肥偏生产力无显著影响,水氮交互效应对氮肥偏生产力影响显著($P < 0.05$)。相同滴灌湿润比条件下,N1 处理的氮肥偏生产力最高,显著高于 N2、N3 处理,且 N2 处理

显著高于 N3 处理。相同施氮量条件下,低施氮量下不灌水处理(P1)氮肥偏生产力最高,中高施氮量下提高滴灌湿润比会提高氮肥偏生产力。例如,N2 处理下,P3 处理比 P1、P2 处理分别提高 6.2%、2.4%。

为实现甘薯高产和氮肥高效利用,分别建立膜下滴灌条件下甘薯产量和甘薯氮肥偏生产力的回归方程。设定滴灌湿润比的上、下限为 P3、P1 处理滴灌湿润比,施氮量上、下限为 N3、N1 处理施氮量,用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据处理,对模型进行寻优后获得最优水氮组合。滴灌施肥条件下甘薯产量(Y)和氮肥偏生产力(PFP)的回归方程分别为

$$Y = 44.229 + 0.323N - 0.324b + 0.0017bN - 0.0010N^2 + 0.0015b^2 \quad (R^2 = 0.898) \quad (2)$$

$$PFP = 892.56 - 2.49N + 0.10b \quad (R^2 = 0.949) \quad (3)$$

式中 N——施氮量,kg/hm²

b——滴灌湿润比,%

设置寻优目标为产量和氮肥偏生产力最大,计算中产量函数权重调整为最大,对模型进行寻优发现,滴灌湿润比为 60%、施氮量为 180.25 kg/hm²时,获得最大目标产量 75.03 t/hm²和氮肥偏生产力 450.15 kg/kg。即施氮量为中氮,灌水为高滴灌湿润比,滴灌施肥处理甘薯产量达到高产目标,同时获得较高的氮肥偏生产力。

2.4 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯块茎分级的影响

不同滴灌湿润比与施氮量处理甘薯块茎分级如图 6 所示。总体上,适当地增加施氮量可以增加大块茎(200 g ≤ M < 500 g, M 为块茎质量)、中等茎块

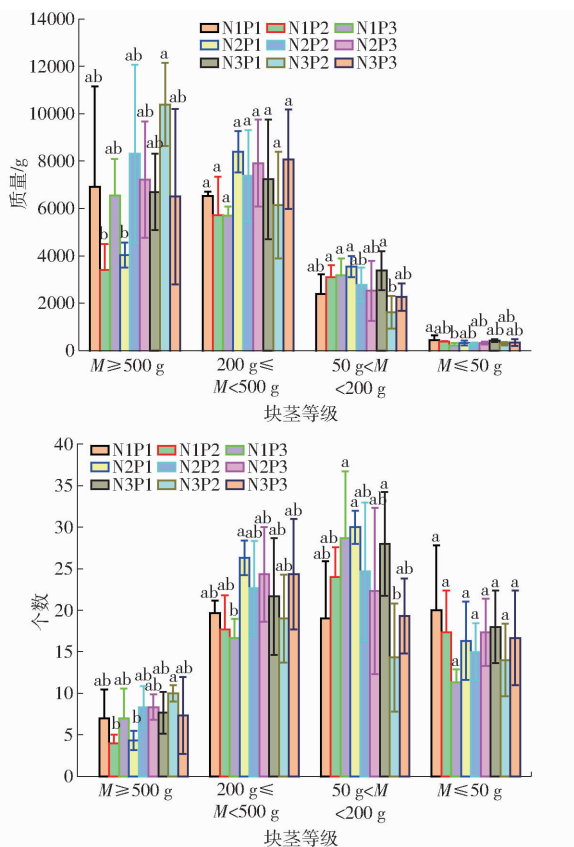


图 6 不同滴灌湿润比和施氮量处理下的甘薯块茎分级

Fig. 6 Classification of sweet potato tubers (mass and quantity) under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

($50\text{ g} < M < 200\text{ g}$) 的个数与大块茎质量,但过量施氮则会减小。在 P1、P2 滴灌湿润比条件下,N2 处理可以提高大、中块茎的个数与质量,但是小块茎个数减小。例如,P1 处理下,N2 处理大块茎个数较 N1、N3 处理分别提高 33.90%、21.54%,质量分别提高 28.76%、16.08%;P2 处理下,N2 处理大块茎个数较 N1、N3 处理分别提高 49.06%、19.30%,质量分别提高 29.17%、20.19%。P3 处理下,N1 处理中等块茎的个数与质量最高,而 N3 处理最低。例如,P3 处理下,相较于 N1 处理,N2、N3 处理个数分别减少 28.36%、48.28%,质量分别减少 25.90%、40.75%。

在 N1 施氮处理下,提高滴灌湿润比可以提高甘薯中等茎块的个数与质量;随着施氮量增加,提高滴灌湿润比会减少中等茎块的个数与质量,使特大块茎($M \geq 500\text{ g}$)的个数与质量随滴灌湿润比的增加而先增大后减小。例如,在 N1 处理下,P3 处理较 P1、P2 处理的中等茎块个数分别增加 50.88%、19.44%,质量分别增加 33.08%、2.39%;在 N3 处理下,P1 处理中等茎块个数较 P2、P3 处理分别增加 95.35%、44.83%,中等茎块质量分别增加 108.36%、49.77%;在 N3 处理下,P2 处理特大块茎

个数较 P1、P3 处理分别增加 30.43%、36.36%,质量分别增加 55.31%、59.86%。

2.5 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯品质的影响

在滴灌施氮条件下,总体上,施氮对甘薯块茎粗蛋白含量影响极显著($P < 0.01$),总类胡萝卜素含量影响显著($P < 0.05$),对淀粉、可溶性糖含量均无显著影响,灌溉以及水肥交互效应对甘薯块茎粗蛋白、总类胡萝卜素、淀粉、可溶性糖含量都无显著影响(表 3)。

表 3 不同滴灌湿润比和施氮量处理对甘薯品质的影响

Tab. 3 Sweet potato quality under different soil wetted percentage and nitrogen fertilization treatments

施氮水平	灌溉水平	粗蛋白含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	淀粉含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总类胡萝卜素含量/ ($\text{mg} \cdot (100\text{ g})^{-1}$)	可溶性糖含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
N1	P1	73.18 ^{abc}	18.54 ^{ab}	18.17 ^a	40.36 ^a
	P2	68.51 ^{bc}	20.03 ^{ab}	16.99 ^{ab}	42.49 ^a
	P3	78.20 ^{abc}	17.33 ^{ab}	18.16 ^a	49.10 ^a
N2	P1	71.14 ^{abc}	19.92 ^{ab}	16.40 ^{ab}	46.55 ^a
	P2	60.50 ^{bc}	20.19 ^a	15.26 ^{ab}	49.41 ^a
	P3	76.31 ^{abc}	19.84 ^{ab}	15.30 ^{ab}	51.22 ^a
N3	P1	85.21 ^{ab}	19.22 ^b	14.51 ^{ab}	44.10 ^a
	P2	88.18 ^a	18.98 ^{ab}	13.70 ^b	47.48 ^a
	P3	80.57 ^{ab}	19.03 ^{ab}	15.14 ^{ab}	47.67 ^a
P	施氮	0.009 ^{**}	0.212	0.019 [*]	0.212
	灌溉	0.401	0.333	0.533	0.157
施肥 × 灌溉		0.277	0.492	0.938	0.901

在相同滴灌湿润比条件下,N2 处理粗蛋白含量略小于 N1 处理,N3 处理粗蛋白含量最高。P2 处理下各施氮处理间粗蛋白含量变化最明显,例如,N2 处理较 N1 处理减小 11.69%,较 N3 处理减小 45.75%,达到显著性水平。在 N1、N2 处理下,P3 处理粗蛋白含量最高,P2 处理最低,粗蛋白含量随滴灌湿润比增加先降低后增加;在 N3 处理下,粗蛋白含量随滴灌湿润比的变化规律与 N1、N2 处理相反,P3 处理最高,P2 处理最低,随滴灌湿润比增加先增大后减小。

在相同滴灌湿润比条件下,淀粉含量随着施氮量增加而先增加后减小,N2 处理获得最高的淀粉含量。例如,在 P1 处理下,N2 处理较 N1、N3 处理分别提高 7.44%、3.64%;在 P3 处理下,N2 处理较 N1、N3 处理分别提高 14.48%、4.26%,没有达到显著性水平。在 N1、N2 处理下,P2 处理淀粉含量最高,P3 处理最低;N3 处理下,各处理块茎淀粉含量相近。

施氮对甘薯块茎总类胡萝卜素含量影响显著,

在相同滴灌湿润比条件下,N1处理总类胡萝卜素含量最高,N3处理最低,例如,在P1处理下,N1施氮处理总类胡萝卜素含量比N2、N3施氮处理分别高10.75%、25.23%;在P2、P3滴灌湿润比处理下也有类似规律。在相同施氮处理下,P2处理总类胡萝卜素含量最低,P1、P3处理都可能最高,并且差距很小。例如,N3处理下,P2处理比P1、P3处理分别减少5.58%、9.51%。

在相同滴灌湿润比条件下,N2处理可溶性糖含量最高。在P1处理下,N2处理相较于N1、N3处理分别增加15.34%、5.56%;在P2处理下,N2处理相较于N1、N3处理分别增加16.29%、4.06%;在P3处理下,N2处理相较于N1、N3处理分别增加4.32%、7.45%,没有达到显著性水平。在同一施氮条件下,P3处理可溶性糖含量最高,而P1处理最低,并且N1处理下,提高滴灌湿润比使得可溶性糖含量的增加效果优于N2、N3处理。例如,N1处理下,P3处理较P2处理提高15.56%;N2、N3施氮量条件下,P3处理较P2处理分别只提高3.66%、0.40%。

3 讨论

3.1 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯蔓长、茎粗以及干物质积累的影响

干旱会导致植物水分胁迫,从而对植物的生长、光合作用、呼吸作用等产生不良影响,影响作物的生长,影响水分和同化物质的输入,从而影响着作物的产量^[27-28]。氮素作为影响甘薯生长的基础元素,茎蔓和薯块的协调生长是甘薯取得高产的保障,而氮肥对茎蔓的生长、块茎的膨大以及二者协调生长有重要作用^[14]。若土壤供氮不足会严重影响作物的茎叶生长,影响光合作用;过量施氮会使甘薯地上部分生长过旺,使得库源失衡,影响产量^[29]。本研究发现,在甘薯定植后的前70 d,甘薯蔓长、茎粗生长速率最大,随着生育期的后移逐渐放缓;增加施氮和提高土壤含水率都不同程度地促进地上部分生长,这与李长志^[10]、吴春红等^[14]研究结果一致。N3处理的甘薯茎粗、地上干物质量高于N1、N2处理,在生育前期差异很小,生育中期后差异逐渐增大。其原因是前期各处理土壤供氮充足,作物需氮量较小,地上部分生长不受氮素的约束;在生育中后期,作物需氮量加大,高氮处理土壤供氮充足,地上部分增长大于其他处理。不同的滴灌湿润比处理下,灌水处理甘薯藤蔓生长对于施氮的响应大于不灌水处理,N1、N2处理下,P2滴灌湿润比处理对藤蔓生长促进效果优于P3处理,N3处理下,则P3处理高于P2处

理,这可能是由于土壤干旱会影响氮肥肥效,P2滴灌湿润比可以充分发挥氮肥促进作物生长的能力,但过高的滴灌湿润比会造成氮肥运移到根区以外,影响了藤蔓生长,这与郑志松等^[30]的小麦试验结论类似。在生育后期,相较于其他灌水处理,P2处理茎粗增长速率没有减缓,地上干物质量大体上呈现继续增长的趋势,而P1处理的地上干物质量定植后97 d就不再增加,干物质量增加曲线趋向水平,各施氮处理间差异很小。其原因是在土壤缺水的情况下,适量补水有利于缓解干旱胁迫,同时促进甘薯对氮的吸收,使得地上部分有继续增长的趋势,这与张海燕等^[9]的结论相似。P1处理下,N1处理地下干物质量最高;P2、P3处理下,N2处理地下干物质量最高,N1处理最低,并且P2处理地下干物质量大于P3处理。这可能是不灌水处理不能充分发挥氮肥肥效,并导致干旱胁迫;高氮处理导致地上部分徒长,使得库源失衡,这都抑制了地下干物质的积累。P2滴灌湿润比为甘薯提供良好的水分条件的同时,促进了甘薯对氮的吸收,有利于地下干物质的积累。

3.2 不同滴灌湿润比和施氮量对甘薯产量、氮肥偏生产力、块茎分级以及品质的影响

前人研究认为,干旱胁迫会导致甘薯产量减少^[31],提高土壤含水率可以明显促进地下块茎的生长。在土壤氮素含量较高的情况下,高土壤含水率可以稀释土壤中的氮浓度,降低甘薯块茎中氮素,促进甘薯块茎干物质的积累^[10]。本试验结果发现,在相同水分条件下,甘薯产量、单株结薯数和大薯块个数(质量)会随着施氮量增加先增大后减小,这说明适宜的施氮量可以增加单株结薯数和产量,施氮量不足或者施氮过量都会带来不同程度的减产,并且缺氮对产量的负面影响大于多施氮,这与陈晓光等^[32]、高璐阳等^[33]结论类似。在N1处理下,灌水会导致产量减少,而在N2、N3处理下,提高滴灌湿润比可以提高甘薯产量,这可能是低施氮量条件下,土壤中氮素较少,增加灌水量会使氮素运移到根区以外,加剧氮素亏缺,进而影响产量。施氮可以显著提高甘薯产量以及大薯块个数(质量),但过量施氮会使产量以及大薯块个数(质量)降低,可能是土壤氮素过多导致地上茎叶部分旺长,使得库源失衡,都抑制了甘薯地下块茎的膨胀以及干物质的积累,不利于产量的形成。甘薯氮肥偏生产力会随着施氮量的增加而减小,在中高施氮量下提高滴灌湿润比使甘薯增产,从而提高氮肥偏生产力。甘薯块茎可溶性糖含量随着施氮量的增加而减少,提高灌水量可以提高可溶性糖含量,原因是过高的土壤氮含量会抑制甘薯可溶性糖积

累,但较高土壤含水率可以缓解高氮对块茎可溶性糖积累的抑制作用,邢英英等^[34]的番茄试验、高娜等^[35]的油菜试验均得到类似的结论。甘薯块茎总类胡萝卜素含量随着施氮量的增加而减少,并且在随着施氮量降低速率减缓。块茎粗蛋白含量在施氮量为 90 ~ 180 kg/hm² 时,随着施氮量的增加略有减小,当施氮量超过 180 kg/hm² 时随施氮量增加粗蛋白含量增加,表明当施氮量超过 180 kg/hm² 时,施氮可以促进甘薯块茎粗蛋白的形成;30% 滴灌湿润比会抑制甘薯粗蛋白积累,但继续提高滴灌湿润比到 60% 对甘薯粗蛋白的积累有促进作用。其中 N2P3 处理甘薯产量、可溶性糖含量表现最优,N3P2 处理甘薯块茎粗蛋白含量最高,N1P1 处理甘薯块茎总类胡萝卜素含量最高。

4 结论

(1)在土壤缺水的情况下,适量补水有利于缓解干旱胁迫,同时提高氮肥对甘薯生长的促进效果,

使甘薯地上部分增长。增加施氮量可以促进甘薯茎粗增加和地上干物质积累,在生育前期差异很小,在生育中期后差异逐渐增大。过高的施氮量会使地上部分旺长,进而影响产量。

(2)在相同水分条件下,随着施氮量的增加,甘薯产量、单株结薯数和大薯块个数(质量)先增大、后减小,并且缺氮对其负面影响大于多施氮。氮肥偏生产力随施氮量的增加而减小。在氮素不受约束的情况下,提高滴灌湿润比可以提高甘薯产量和氮肥偏生产力,施氮可以显著提高甘薯产量以及大薯块个数(质量),但过量施氮会降低产量和大薯块个数(质量)。在本试验条件下甘薯较为适宜的滴灌湿润比为 60%,氮肥用量为 180.25 kg/hm²。

(3)过高的土壤氮含量会抑制甘薯可溶性糖积累,而较高的土壤含水率可以缓解高氮对块茎可溶性糖积累的抑制作用;甘薯块茎总类胡萝卜素含量随施氮量的增加而减少;较高的施氮量可以促进甘薯块茎粗蛋白的形成。

参 考 文 献

- [1] 盛家廉,袁宝忠. 甘薯栽培技术[M]. 北京:中国农业出版社, 1980.
- [2] 戴起伟,钮福祥,孙健,等. 我国甘薯生产与消费结构的变化分析[J]. 中国农业科技导报, 2016,18(3):201-209. DAI Qiwei, NIU Fuxiang, SUN Jian, et al. Changes analysis of sweet potato production and consumption structure in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016,18(3):201-209. (in Chinese)
- [3] FAO. FAOSTAT[EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- [4] 陆建珍,汪翔,秦建军,等. 我国甘薯种植业发展状况调查报告(2017年)——基于国家甘薯产业技术体系产业经济固定观察点数据的分析[J]. 江苏农业科学, 2018,46(23):393-398.
- [5] 山东省水利厅. 2019年山东省水资源公报[EB/OL]. http://wr.shandong.gov.cn/zwgk_319/szygb/.
- [6] 张丽霞,杨永辉,尹钧,等. 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累转运及产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(2):275-282. ZHANG Lixia, YANG Yonghui, YIN Jun, et al. Effects of drip fertigation on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen with yield in wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):275-282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210226&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.026. (in Chinese)
- [7] 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 Na, WANG Fengxin, YANG Chenfei, 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 CSAE, 2013, 29(13):98-105. (in Chinese)
- [8] STEFANELLI D, GOODWIN I, JONES R. Minimal nitrogen and water use in horticulture: effects on quality and content of selected nutrients[J]. Food Research International, 2010,43(7):1833-1843.
- [9] 张海燕,解备涛,汪宝卿,等. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和抗氧化能力的影响[J]. 中国农业科学, 2020,53(6):1126-1139. ZHANG Haiyan, XIE Beitao, WANG Baoqing, et al. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of antioxidant enzymes in sweet potato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020,53(6):1126-1139. (in Chinese)
- [10] 李长志. 水分与氮素对甘薯生理特性及产量的影响[D]. 青岛:青岛农业大学, 2016. LI Changzhi. Effect of water and nitrogen on physiological characteristics and yield of sweet potato[D]. Qingdao:Qingdao Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [11] 张辉,朱绿丹,安霞,等. 水分和钾肥耦合对甘薯光合特性和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2016,32(6):1294-1301. ZHANG Hui, ZHU Lüdan, AN Xia, et al. Effects of water coupled with K on the photosynthetic characteristics of sweet potato and its water use efficiency[J]. Jiangsu Journal of Agriculture Sciences, 2016,32(6):1294-1301. (in Chinese)
- [12] 宁运旺,曹炳刚,马洪波,等. 氮肥用量对滨海滩涂区甘薯干物质积累、氮素效率和钾钠吸收的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012,20(8):982-987. NING Yunwang, CAO Bingge, MA Hongbo, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation, nitrogen efficiency, and potassium and sodium uptake of sweet potato (*Ipomoea batatas*) in coastal North Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012,20(8):982-987. (in Chinese)
- [13] 宁运旺,马洪波,许仙菊,等. 氮磷钾缺乏对甘薯前期生长和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013,46(3):52-61. NING Yunwang, MA Hongbo, XU Xianju, et al. Effects of deficiency of N, P, or K on growth traits and nutrient uptakes of sweet potato at early growing stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(3):52-61. (in Chinese)

- [14] 吴春红,刘庆,孔凡美,等. 氮肥施用量对不同紫甘薯品种产量和氮素效率的影响[J]. 作物学报, 2016,42(1):113-122.
WU Chunhong, LIU Qing, KONG Fanmei, et al. Effects of nitrogen application rates on root yield and nitrogen utilization in different purple sweet potato varieties[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016,42(1):113-122. (in Chinese)
- [15] 刘明,李洪民,张爱君,等. 不同氮肥与密度水平对鲜食甘薯产量和品质的影响[J]. 华北农学报, 2020,35(1):122-130.
LIU Ming, LI Hongmin, ZHANG Aijun, et al. Effects of nitrogen fertilizer and density on yield and quality of fresh edible type sweet potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020,35(1):122-130. (in Chinese)
- [16] 陈晓光,丁艳锋,唐忠厚,等. 氮肥施用量对甘薯产量和品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015,21(4):979-986.
CHEN Xiaoguang, DING Yanfeng, TANG Zhonghou, et al. Suitable nitrogen rate for storage root yield and quality of sweet potato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015,21(4):979-986. (in Chinese)
- [17] 苏亚拉其其格,樊明寿,陈玉珍,等. 马铃薯非结构性碳水化合物含量对水分胁迫的响应[J]. 植物生理学报, 2019, 55(12):1839-1850.
SU Yalagiqige, FAN Mingshou, CHEN Yuzhen, et al. Response of non-structural carbohydrate contents of potato to water stress[J]. Plant Physiology Journal, 2019,55(12):1839-1850. (in Chinese)
- [18] 朱绿丹,张珮琪,陈杰,等. 不同土壤水分条件下施氮对甘薯干物质积累及块根品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(3):533-539.
ZHU Ludan, ZHANG Peiqi, CHEN Jie, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulations and qualities of sweet potato under different soil moistures conditions[J]. Jiangsu Journal of Agriculture Sciences, 2013,29(3):533-539. (in Chinese)
- [19] 林彩玲. 不同N肥水平对甘薯营养与食味品质的影响[D]. 福州:福建农林大学, 2019.
LIN Cailing. The effects of different nitrogen levels on the nutritional and tasting quality traits of sweet potato[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [20] LAURIE S M, FABER M, VAN JAARVELD P J, et al. β -carotene yield and productivity of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam.) as influenced by irrigation and fertilizer application treatments[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142:180-184.
- [21] EL-BAKY A, AHMED A, EL-NEMR M, et al. Effect of potassium fertilizer and foliar zinc application on yield and quality of sweet potato[J]. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 2010,6(4):386-394.
- [22] SMOLEŇ S, SADY W O. The effect of various nitrogen fertilization and foliar nutrition regimes on the concentrations of sugars, carotenoids and phenolic compounds in carrot (*Daucus carota* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2009,120(3):315-324.
- [23] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014,20(4):783-795.
JU Xiaotang, GU Baojing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014,20(4):783-795. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [25] 江燕,史春余,王振振,等. 地膜覆盖对耕层土壤温度水分和甘薯产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014,22(6): 627-634.
JIANG Yan, SHI Chunyu, WANG Zhenzhen, et al. Effects of plastic mulching on arable layer soil temperature, moisture and yield of sweet potato[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014,22(6):627-634. (in Chinese)
- [26] 王文质,以凡,杜述荣,等. 甘薯淀粉含量换算公式及换算表[J]. 作物学报, 1989,15(1):94-96.
WANG Wenzhi, YI Fan, DU Shurong, et al. Conversion table of the starch content in sweet potato[J]. Acta Agronomica Sinica, 1989,15(1):94-96. (in Chinese)
- [27] 邢英英. 温室番茄滴灌施肥水肥耦合效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
XING Yingying. Study on the coupling effect of water and fertilizer coupling on greenhouse tomato under fertilization[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [28] WANG Z X, CHEN L, AI J, et al. Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in amur grape (*Vitis amurensis* Rupr.) [J]. Photosynthetica, 2012,50(2):189-196.
- [29] 宁运旺,马洪波,张辉,等. 甘薯源库关系建立、发展和平衡对氮肥用量的响应[J]. 作物学报, 2015,41(3):432-439.
NING Yunwang, MA Hongbo, ZHANG Hui, et al. Response of sweet potato in source-sink relationship establishment, expanding, and balance to nitrogen application rates[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015,41(3):432-439. (in Chinese)
- [30] 郑志松,王晨阳,牛俊义,等. 水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4):788-793.
ZHENG Zhisong, WANG Chenyang, NIU Junyi, et al. Effects of irrigation and fertilization coupling on protein and amino acids contents in grains of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011,19(4):788-793. (in Chinese)
- [31] 张海燕,段文学,解备涛,等. 不同时期干旱胁迫对甘薯内源激素的影响及其与块根产量的关系[J]. 作物学报, 2018, 44(1):126-136.
ZHANG Haiyan, DUAN Wenxue, XIE Beitao, et al. Effects of drought stress at different growth stages on endogenous hormones and its relationship with storage root yield in sweet potato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018,44(1):126-136. (in Chinese)
- [32] 陈晓光,丁艳锋,李洪民,等. 施氮量对甘薯块根产量和氮素利用的影响[J]. 西南农业学报, 2015,28(5):2158-2161.
CHEN Xiaoguang, DING Yanfeng, LI Hongmin, et al. Effects of nitrogen rates on yield and nitrogen utilization of sweet potato [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015,28(5):2158-2161. (in Chinese)
- [33] 高璐阳,房增国,史衍玺. 施氮量对鲜食型甘薯产量、品质及氮素利用的影响[J]. 华北农学报, 2014,29(6):189-194.
GAO Luyang, FANG Zengguo, SHI Yanxi. Effects of nitrogen application on yield, quality and nitrogen utilization of fresh-eating sweet potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014,29(6):189-194. (in Chinese)
- [34] 邢英英,张富仓,张燕,等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4):713-726.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(4):713-726. (in Chinese)
- [35] 高娜,张玉龙,曲晶,等. 水氮联合调控对小油菜生长、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4):84-89.
GAO Na, ZHANG Yulong, QU Jing, et al. Regulation effects of different irrigation and nitrogen fertilization on growth, yield and quality of rape[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2016(4):84-89. (in Chinese)