

水肥供应对马铃薯根层养分及产量的影响

郭涛¹, 刘婉如¹, 方玉川², 李梅甜¹, 谢奎¹, 王飞³,
李霞³, 杜娟³, 姜文婷¹, 邢英英¹, 王秀康¹

(1.延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2.榆林市农业科学研究院, 陕西 榆林 719000;
3.延安市农业科学研究院, 陕西 延安 716000)

摘要:以陕北地区普遍种植的马铃薯品种荷兰15号为供试材料, 设置灌水水平和施肥量两因素, 研究水肥供应对马铃薯根层养分及产量的影响。以100% ET_0 (W1)和当地推荐施肥量(F1, N-P₂O₅-K₂O为240-120-300 kg·hm⁻²)为基础, 3个灌水量处理分别为W1, W2(80% ET_0)和W3(60% ET_0), 3个施肥水平分别为F1, F2(75%F1)和F3(50%F1), 以60% ET_0 灌水水平和不施肥处理为对照组(CK), 共10个处理。结果表明:不同水肥供应对马铃薯各生长阶段耗水量及水分利用效率有显著的影响, 随着灌水量增加, 土壤水分逐渐向下层迁移;在马铃薯整个生育期, W3F2处理水分利用效率最高, 为44.69 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 其次为W2F2(44.41 kg·hm⁻²·mm⁻¹), 比CK分别高39.64%和38.75%; W3F1处理在10~60 cm土层硝态氮含量平均值最高, 比CK高166.1%, W2F2在10~60 cm土层铵态氮含量平均值最高, 比CK高61%, W3F3在10~60 cm土层电导率平均值最高, 比CK增高48.44%。W2F2处理的土壤养分含量较高, 主要集中在10~30 cm土层; W2F2处理的产量最高, 为12 539.33 kg·hm⁻², 比CK处理的产量高55.65%, 且变异系数小。因此, 该地区推荐的灌水量为80% ET_0 , 施肥量N-P₂O₅-K₂O为180-90-225 kg·hm⁻²。

关键词:灌水量; 施肥量; 马铃薯; 硝态氮; 铵态氮; 碱解氮; 产量

中图分类号:S532 **文献标志码:**A

Effect of water and fertilizer supply on potato root layer soil nutrient and tuber yield

GUO Tao¹, LIU Wanru¹, FANG Yuchuan², LI Meitian¹, XIE Kui¹, WANG Fei³,
LI Xia³, DU Juan³, JIANG Wenting¹, XING Yingying¹, WANG Xiukang¹

(1. College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi, 716000, China;

2. Yulin Agricultural Science Research Institute, Yulin, Shaanxi 719000, China;

3. Yan'an Agricultural Science Research Institute, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: Holland No.15 which is widely planted in Northern Shaanxi Province as the test material, set the two factors of irrigation level and fertilizer rate, based on full irrigation (W1, 100% ET_0) and local recommended fertilizer rate (F1, N-P₂O₅-K₂O is 240-120-300 kg·hm⁻²), and the three irrigation amounts are respectively W1, W2 (80% ET_0) and W3 (60% ET_0), the three fertilization levels are F1, F2 (75%F1) and F3 (50%F1) respectively, with 60% ET_0 irrigation level and no fertilization treatment as control group (CK), a total of 10 treatments. The results showed different water and fertilizer supply had a significant effect on water consumption and water use efficiency at each growth stage of potato. With the increase of irrigation water, soil water gradually moved to the lower layer. In the whole growth period of potato, W3F2 treatment has the highest water use efficiency, 44.69 kg·hm⁻²·mm⁻¹, followed by W2F2 (44.41 kg·hm⁻²·mm⁻¹), which is 39.64% and 38.75% higher than CK, respectively; W3F1 treatment has the highest average nitrate nitrogen content in 10~60 cm soil layer, 166.1%

收稿日期:2020-04-28

修回日期:2020-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51809224, 51669034);延安大学研究生教育创新计划项目(YCX201929, YCX2020072)

作者简介:郭涛(1995-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为农业生态学研究。E-mail:312195220@qq.com

通信作者:王秀康(1983-),男,陕西安康人,教授,博士,主要从事农业生态学研究。E-mail:wangxiukang@126.com

higher than CK, W2F2 has the highest average ammonium nitrogen content in 10~60 cm soil layer, 61% higher than CK, W3F3 has the highest average conductivity in 10~60 cm soil layer, 48.44% higher than CK. The soil nutrient content of W2F2 treatment was higher, mainly concentrated in the 10~30 cm soil layer; the highest yield of W2F2 treatment was $12\,539.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which was 55.65% higher than that of CK treatment, and the coefficient of variation was small. Therefore, the recommended irrigation amount in this region is $W2(80\%ET_0)$, and the amount of fertilizer of $N-P_2O_5-K_2O$ is 180-90-225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: irrigation amount; fertilization amount; potato; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; alkaline nitrogen; yield

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)属于茄科茄属多年生草本块茎作物,是世界上继玉米、水稻、小麦之后的第四大粮食作物,栽培历史已超过 7 000 a^[1-3]。马铃薯有多种用途,深受人们喜爱。目前,我国马铃薯种植面积已达 508 万 hm^2 ,是世界第一大马铃薯生产国。陕西省常年种植面积为 26.7 万 hm^2 ,是我国马铃薯主要生产省份之一。马铃薯种植业是西北地区最具发展潜力产业之一,已成为陕西省第三大种植作物,仅次于小麦和玉米。随着我国马铃薯加工业的逐步兴起,马铃薯需求量迅猛增长,种植面积快速扩大。陕北地区具有土壤通气性良好,日照时间长,昼夜温差大等自然资源优势,适宜出产优质马铃薯,是全国五大马铃薯优势种植区之一。

滴灌膜下栽培技术是一项新型农业技术,其把地膜覆盖保墒技术与滴灌节水技术等结合,具有增温、保墒、节水、增产和优质等优点^[4]。研究报道,膜下滴灌技术在甜椒、棉花、玉米和苜蓿等^[5-8]作物上已有大量应用。合理的水肥供应对旱地作物生长具有显著的促进作用^[9],在西北旱区,水分始终是作物生产的主要限制因子。在延安地区,虽然氮肥投入量大,但氮肥利用率却很低,产量未同步增加,不仅增加了成本,还给土壤环境带来潜在的威胁。

Saravia 等^[10]研究表明,马铃薯在生长过程中受到干旱胁迫后,其光合速率会显著降低,营养代谢和能量代谢失调,最终导致马铃薯的产量显著降低。Wang 等^[11]研究得出,在相同灌水量下高频滴灌能使土壤水分保持在一个比较稳定的范围,有利于马铃薯的生长和产量的提高。康跃虎等^[12]研究得出滴灌灌溉频率和土壤水势对马铃薯生长有显著影响,过高的灌水频率会使土壤表面长期保持水分较高状态,加大土面蒸发,不利于马铃薯生长。张小静等^[13]研究了施肥比例对西北干旱区马铃薯生长和产量的影响,得出按照氮磷钾施肥比例为 12:10:8 进行配施,适度减少施肥量对马铃薯前期

生长无显著影响,在施肥总量确定下,该施肥比例马铃薯商品薯和产量最高。李燕山等^[14]研究表明,马铃薯生育期在氮肥用量增加的条件下逐渐延长,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,施氮量为 $345\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时最高。Milroy 等^[15]研究得出在充足的灌水条件下,马铃薯的产量随着施氮量的增加而增加,但在水分亏缺的条件下,施氮量的增加则对产量产生负影响。综上表明,土壤水分是马铃薯产量的重要影响因子,施肥是保持土壤肥力和增加马铃薯产量的重要环节,有效管理灌水和施肥是马铃薯增产和提高马铃薯经济效益的重要手段。国内外研究重点已从灌溉施肥技术参数对作物生长和产量的影响,逐步向灌溉施肥制度的建立,以及对作物增产和品质的扩展研究,随着人们生活水平的提高,将会更加注重马铃薯品质的研究。因此,在干旱半干旱地区,在合理的水肥结合下达到最佳的交互耦合作用,是马铃薯提高品质、增产的重要途径,还可实现水肥资源的高效利用。

本研究以陕北延安地区日光温室马铃薯为研究对象,采用起垄覆普通塑料地膜与膜下滴灌,将灌水量和施肥量二因素组合,探求其对陕北地区马铃薯地上部分生长、产量以及品质的影响规律。旨在提出陕北地区马铃薯提质增效的施肥量与灌水量组合,为该地区优质高效种植模式提供技术指导和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年在陕西省延安市延安大学生命科学学院试验基地进行,试验站($36^{\circ}38'E$, $109^{\circ}26'N$)海拔为 953 m,试验地所在区域属典型的大陆性干旱季风气候,夏秋多雨,冬季严寒干燥,年均气温 $9.1^{\circ}C$,多年平均降雨量 473 mm,降雨集中在 6—9 月,年均蒸发量为 1 400~1 800 mm。供试土壤为粉质壤土,pH 值为 8.33,萎蔫含水率为 8.5%,耕作层

土壤平均容重 $1.26\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。试验区 0~60 cm 土层土壤含水量为 11.5%,硝态氮含量为 $12.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\pm 1.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $38.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\pm 5.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮含量为 $6.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\pm 0.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值为 8.3。

1.2 试验设计及方法

供试马铃薯为陕北地区大面积种植的荷兰 15 号,试验所用肥料氮肥为尿素(N 量 $\geq 46\%$),磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 量 $\geq 12\%$),钾肥为硫酸钾(K_2O 量 $\geq 52\%$)。试验以 100% ET_0 (W1)和当地推荐施肥量(F1,N- P_2O_5 - K_2O 为 240-120-300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)为依据,设置灌水量及施肥量 2 因素 3 水平试验,灌水量处理分别为 W1,W2(80% ET_0)和 W3(60% ET_0),施肥量分别为 F1,F2(75%F1)和 F3(50%F1),以 60% ET_0 灌水水平和不施肥处理为对照组(CK),共 10 个处理,分别为:W3F1、W2F3、W1F2、W3F3、W2F2、W1F1、W3F2、W2F1、W1F3 和 CK。试验田的长度和宽度分别为 20 m 和 8 m。试验处理采用随机区组排列,小区长 3.5 m、宽 3.3 m、面积 11.55 m^2 ,小区间采用 60 cm 隔水板做防渗隔离。试验开展前,对整个试验田进行 40 cm 翻耕(两次),平整后起高 35 cm、宽 70 cm 垄,垄间距 30 cm。试验小区采用起垄覆膜种植模式。各小区定植 30 株,株距 30 cm,滴灌管沿垄中线置于膜下,滴头间距 30 cm,地膜厚度为 0.006 mm,宽度为 100 cm。试验于 2019 年 3 月 25 日播种,7 月 15 日收获。

播种前灌水 40 mm,处理开始后平均每 7 d 灌 1 次水。参考作物需水量的确定采用孙景生等^[16]适用于风沙区参考作物需水量(ET_0)的 Penman-Monteith 公式。

其中, Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率($\text{kPa}\cdot\text{℃}^{-1}$), R_n 是地表净辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), G 是土壤热通量($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), γ 是温度计常数($\text{kPa}\cdot\text{℃}^{-1}$), e_s 是空气饱和水汽压(kPa), e_a 是空气实际水汽压(kPa), T 为空气平均温度(℃), u_2 为地面以上 2 m 高处的风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

肥料分 6 次施入,幼苗期 1 次、块茎形成期 2 次、块茎增长期 2 次和淀粉积累期 1 次,施肥比例为 1:1:2:2:2:2;每个灌水处理小区都单独安装水表,通过水表和加压泵精确控制灌水量和施肥量。仅灌水不施肥时,用水表精确控制每个灌水处理的水量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集 植物样品采集:植株样品采集分 4 个时期进行,分别为苗期(4 月 22 日)、块茎形成期(5 月 12 日)、块茎增长期(5 月 27 日)和淀粉积累期(6 月 12 日)。每个处理随机选取 3 株,取样后立即带回实验室,将根、茎、叶、块茎分开(苗期无块茎)。

土壤样品采集:为研究滴灌施肥供水供肥方式下土壤中水分养分的空间分布情况,分 6 次取土,分别于种植时、第 2 次、第 3 次、第 4 次、第 5 次滴灌施肥前和马铃薯收获后进行,每个处理的取样从滴头正下方为 0 点,沿水平方向分 0、15、30 cm 取 3 个测点,沿垂直滴灌带方向分 10、20、30、40、50、60 cm 取 6 个土层深度,共 18 个测点。

马铃薯样品采集:马铃薯收获后,每个处理随机选取 3 株块茎,用直径为 6 mm 的打孔器取马铃薯块茎芽眼周围部位的组织并称鲜重,然后装入塑封袋中,用液氮速冻 1 min 后置于-70℃冰箱中低温保存。

1.3.2 测定指标与测定方法

土壤水分:土壤含水量测定深度为 0~60 cm,10 cm 为 1 层;每个处理随机选取 3 个测点,共计 18 个测点,用土钻取土,105℃烘干至恒重后称重。

阶段耗水量(ET_i)计算公式^[17]:

$$ET_i = SWS_i - SWS_{i+1} + P$$
式中, SWS_i 为某个生育时期初始时的土壤贮水量(mm); SWS_{i+1} 为该生育时期结束时的土壤贮水量(mm); P 为生育期降雨量(mm)。

水分利用效率(WUE)计算公式^[17]:

$$WUE = Y_d / ET$$
$$ET = SWS_{BF} - SWS_{HA} + P$$
式中, Y_d 为马铃薯单位面积产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); SWS_{BF} 为播种前土壤贮水量(mm); SWS_{HA} 为收获后土壤贮水量(mm); P 为马铃薯全生育期降雨量(mm)。

土壤理化性质:土样经实验室内风干磨细后,过 20 目筛。土壤硝态氮采用水土比 2 mol $\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 浸提后用紫外分光光度计法测定^[18];土壤 pH 值用雷磁 pHB-4 便携式 pH 计测量,土水比为 1:2.5;电导率用雷磁便携式电导率仪测定;碱解氮用碱解扩散法测定。

产量测定:在马铃薯成熟期,各小区随机选择 10 株,测定各小区马铃薯块茎产量,大薯、中薯、小薯个数及质量,单株结薯数,单株结薯重。

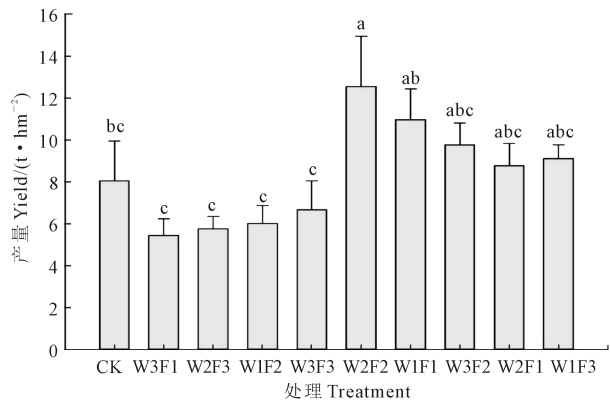
1.4 数据处理与分析

用 SPSS 20.0 统计软件进行单因素方差分析,如果差异显著($p<0.05$),则采用 Duncan's 法进行比较,用 Sigmaplot.14 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 不同水肥供应对马铃薯产量的影响

不同水肥供应对马铃薯产量的影响如图 1 所示。W2F2 产量最高,比 CK 高 55.7%,W1F1 比 CK 高 36.2%。W3F1、W2F3、W1F2、W3F3 比 CK 的产量低 32.4%、28.5%、25.3%和 17.4%。W2F2 与 CK、W3F1、W2F3、W1F2、W3F3 间存在显著差异,与其余处理差异不显著。在 F1 处理下,产量随灌水量增大而增加;在 F2 下,产量随灌水量增大呈先增加后降低;在 F3 下,产量随灌水量增大呈先降低后增加。在 W3 和 W2 下,产量随着施肥量的增加呈先增后降,在 W1 下,产量随施肥量增加呈先降低后增加。



注 Note: W3F1-60%ET₀, N-P₂O₅-K₂O:240-120-300 kg·hm⁻²; W2F3-80%ET₀, 50% F1; W1F2-100%ET₀, 75% F1; W3F3-60%ET₀, 50% F1; W2F2-80%ET₀, 75% F1; W1F1-100%ET₀, N-P₂O₅-K₂O:240-120-300 kg·hm⁻²; W3F2-60%ET₀, 75% F1; W2F1-80%ET₀, N-P₂O₅-K₂O:240-120-300 kg·hm⁻²; W1F3-100%ET₀, 50% F1; CK-60%ET₀.柱形图上不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05), 下同。Different lowercase letters on the column chart showed significant differences among treatments, the same below.

图 1 不同水肥供应下马铃薯块茎产量
Fig.1 Potato tuber yield under different water and fertilizer supply

2.2 不同水肥供应对马铃薯根层土壤含水量的影响

不同水肥供应对马铃薯根层土壤水分含量及分布影响如图 2 所示。灌水量增大,水分积累层就会向下迁移;当灌水量恰好等于马铃薯所需水分时,土壤水分积累层则位于土壤上层(10~30 cm)。在种植前(图 2a),W2F2 在 60 cm 土层土壤含水量最高,为 20.37%;在萌芽期(图 2b),W2F3 在 10 cm 土层土壤含水量最大,为 24.68%;在幼苗期(图 2c),不同处理之间含水量分布较为一致,10~50 cm 土层的含水量主要在 8%~15%。在块茎形成期(图

2d),W2F2 在 60 cm 土层含水量最大,为 20.44%;在 10~30 cm 土层,CK 处理土壤含水量最高。在块茎增长期(图 2e),W1F2 在 20 cm 土层含水量最大,为 16.84%;W1F2 的平均含水量比 CK 高 38.2%;在淀粉积累期(图 2f),所有处理在上层(10~30 cm)土壤含水量均低于 CK,W2F2 在 60 cm 土层含水量最大,为 20.39%。

2.3 不同水肥供应对马铃薯耗水量和水分利用效率的影响

不同水肥供应处理马铃薯各生长阶段耗水量如图 3(a)所示。在整个生育期,W1F2 处理耗水量最高,为 366.33 mm,比 CK 高 45.54%;W1F1 处理次之,为 358.90 mm,比 CK 高 42.58%。耗水量最高的时期为幼苗期,其次是淀粉积累期。幼苗期 W1F3 耗水量最高,比 CK 高 69.9%;块茎形成期 W2F3 耗水量最高,比 CK 高 155.4%;块茎增长期 W1F3 耗水量最高,比 CK 高 100.4%;淀粉积累期 W1F2 耗水量最高,比 CK 高 29.8%。在整个生育期,马铃薯耗水量随灌水量的增加而增加。在相同施肥量的条件下,马铃薯耗水量随灌水量的增加而增加;在 W3 下,耗水量随施肥量增大而增加;在 W2 水平下,耗水量随施肥量增加先降低后增大;在 W1 水平下,耗水量随施肥量增加先增大后降低。

不同水肥供应对马铃薯水分利用效率的影响如图 3(b)所示。W3F2 的水分利用效率最高,比 CK 高 39.6%;其次是 W2F2,比 CK 高 38.7%。W1F2 的水分利用效率最低。在 F1 水平下,水分利用效率随灌水量增加而增大;在 F2 水平下,水分利用率随灌水量增大而降低;在 F3 水平下,水分利用率随灌水量增大先降低后增大。在 W3、W2 和 W1 水平下,水分利用效率比 CK 分别高 2.1%和降低 2.8%、23.9%。在 F3、F1 和 F2 水平下,水分利用效率比 CK 分别降低 20%、14.4%和提高 9.9%。

2.4 不同水肥供应对马铃薯根层土壤 pH 值和电导率的影响

不同处理下各土层 pH 值如表 1 所示。土壤 pH 值随土层深度的增加而增大,各处理平均 pH 值都低于 CK。土壤上层(10~30 cm)pH 值均小于土壤下层(30~60 cm)。在相同施肥量条件下,土壤 pH 值随灌水量增大而降低。F3、F2 和 F1 水平下 10~60 cm 土层 pH 值比 CK 分别降低 6.1%和 4.5%和 5.5%;W3、W2 和 W1 水平下 10~60 cm 土层 pH 值比 CK 分别降低 4.03%、5.15%和 6.86%。

不同水肥供应对土壤电导率的影响如表 2 所示。所有处理土壤上层(0~30 cm)电导率值大于下

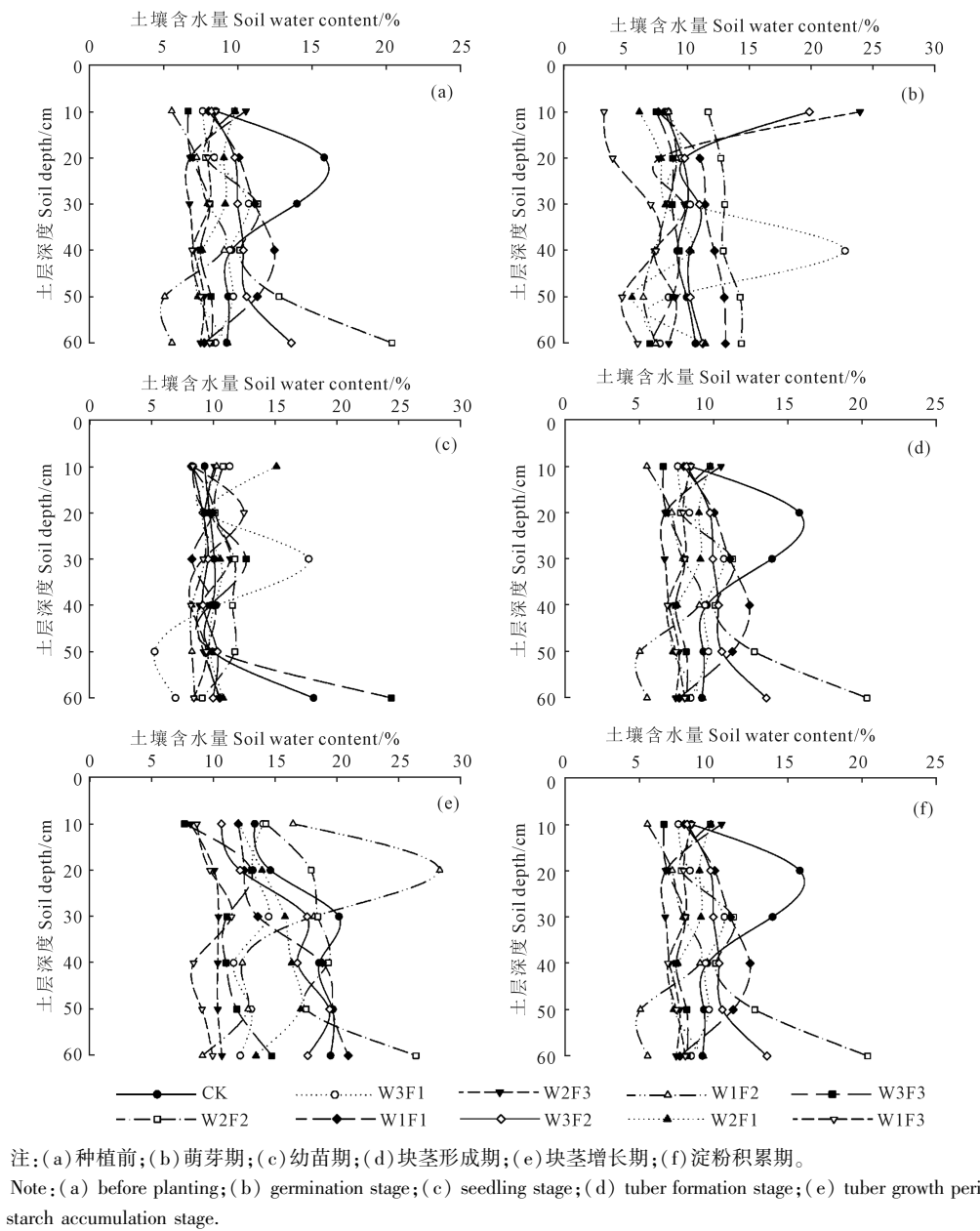


图 2 不同水肥供应对马铃薯根层土壤含水量的影响

Fig.2 Effect of different water and fertilizer supply on soil moisture content of potato root layer

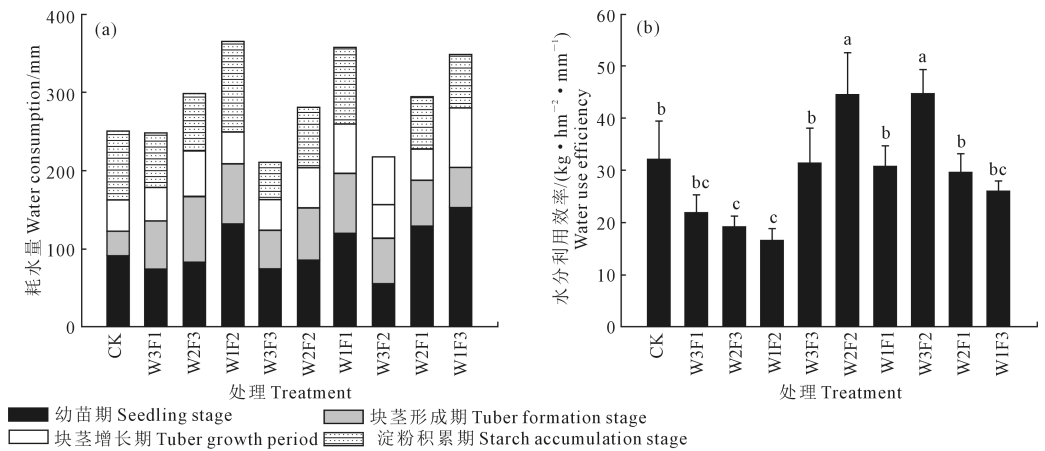


图 3 不同水肥供应对马铃薯耗水量和水分利用效率的影响

Fig.3 Effect of different water and fertilizer supply on water consumption and water use efficiency of potato

表 1 不同水肥供应对马铃薯根层土壤 pH 值的影响

Table 1 Effects of different water and fertilizer supply on soil pH value of potato root layer

土层深度/cm Soil depth	CK	W3F1	W2F3	W1F2	W3F3	W2F2	W1F1	W3F2	W2F1	W1F3
10	9.15	8.78	8.66	8.52	8.78	8.72	8.57	8.79	8.50	8.38
20	8.72	8.65	8.62	8.55	8.42	8.49	8.51	8.65	8.47	8.12
30	9.05	8.57	8.89	8.65	8.75	8.95	8.87	9.18	8.79	8.37
40	9.37	9.11	9.06	8.70	8.95	8.98	8.86	9.21	8.89	8.67
50	9.60	9.07	9.01	9.08	9.43	9.31	8.89	9.22	9.02	8.85
60	9.42	9.23	8.84	9.10	9.17	9.16	9.04	9.23	8.97	8.74

表 2 不同水肥供应对马铃薯根层土壤电导率的影响/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)

Table 2 Effects of different water and fertilizer supply on soil conductivity of potato root layer

处理 Treatment	水平距离/cm Horizontal distance	土层深度 Soil depth/cm						平均 Mean
		10	20	30	40	50	60	
CK	0	322	487	386	228	183	150	292.7
	15	893	773	389	161	183	130	421.5
	30	375	478	286	244	179	240	300.3
	平均 Mean	530	579	354	211	182	173	338.2
W3F1	0	506	630	551	258	213	226	397.3
	15	604	512	433	259	213	307	388.0
	30	738	689	541	259	232	171	438.3
	平均 Mean	616	610	508	259	219	235	407.9
W2F3	0	409	422	437	218	289	279	342.3
	15	541	456	339	250	208	348	357.0
	30	497	475	286	247	199	523	371.2
	平均 Mean	482	451	354	238	232	383	356.8
W1F2	0	358	360	409	378	284	233	337.0
	15	500	506	428	420	236	214	384.0
	30	524	451	552	346	272	383	421.3
	平均 Mean	461	439	463	381	264	277	380.8
W3F3	0	840	996	999	344	223	232	605.7
	15	709	766	448	206	199	181	418.2
	30	1110	763	437	207	183	192	482.0
	平均 Mean	886	842	628	252	202	202	501.9
W2F2	0	409	356	207	144	137	103	226.0
	15	375	320	179	200	104	103	213.5
	30	390	344	217	305	107	106	244.8
	平均 Mean	391	340	201	216	116	104	228.1
W1F1	0	369	454	231	179	180	123	256.0
	15	550	554	351	198	216	118	331.2
	30	287	365	235	237	223	174	253.5
	平均 Mean	402	458	272	205	206	138	280.2
W3F2	0	178	272	187	131	117	101	164.3
	15	486	363	222	125	110	141	241.2
	30	634	682	166	110	141	100	305.5
	平均 Mean	433	439	192	122	123	114	237.0
W2F1	0	671	539	380	127	95	97	318.2
	15	757	411	229	111	194	113	302.5
	30	569	404	363	134	108	92	278.3
	平均 Mean	666	451	324	124	132	101	299.7
W1F3	0	414	472	397	235	244	232	332.3
	15	417	639	402	304	223	201	364.3
	30	425	607	375	278	255	222	360.3
	平均 Mean	419	573	391	272	241	218	352.3

层(30~60 cm)。其中 W3F3 的电导率最高,为 $501.9 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,比 CK 高 48.4%,W3F1 的电导率($407.9 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)比 CK 提高 20.6%。在 F1 和 F3 水平下,电导率随灌水量增大而降低,在 F2 下,电导率随灌水量增加而增大。F3、F2 和 F1 处理平均土壤电导率比 CK 分别高 19.4%,低 16.6%、2.6%。在 W3 和 W2 下,电导率随施肥量增加而降低,在 W1 下,电导率随施肥量增加先增大后降低。CK 在水平方向距根部 15 cm、纵深 10 cm 处出现最高值,为 $893 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,整个剖面电导率值变化范围为 $129.6 \sim 893 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。W3F3 在水平方向距根部 10 cm、纵深 30 cm 处出现最高值,比 CK 增高 48.44%。W2F1 在水平方向距根部 30 cm、纵深 60 cm 处出现最低值,为 $92 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

2.5 不同水肥供应对马铃薯根层土壤硝态氮、铵态氮和碱解氮的影响

不同水肥供应对马铃薯根层硝态氮含量的影响如表 3 所示。上层(10~30 cm)土壤硝态氮含量高于下层(30~60 cm)。W3F1 在 10~60 cm 土层硝态氮含量平均值最高,比 CK 高 166.1%。在 F3 和 F1 水平下,硝态氮含量随灌水量增加先降低后增大,在 F3、F2 和 F1 下硝态氮含量均值比 CK 分别高 144%、92%和 106.1%。在 W2 和 W1 水平下,硝态氮含量随着施肥量增加而降低。在 W3、W2 和 W1 下硝态氮含量均值比 CK 分别高 112%、104.9%和 125.1%。W2F2 处理在水平距根部 0 cm、深 10 cm 处出现最高值,为 $85.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其 10~60 cm 土层的硝态氮含量平均值比 CK 高 107.02%;CK 处理在根部正中纵深 60 cm 处出现最低值,为 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

不同水肥供应对马铃薯根层铵态氮含量的影响如表 4 所示。铵态氮含量分布总体随土层深度增加呈先增后降趋势。W2F2 在 10~60 cm 土层的铵态氮含量均值最高,比 CK 高 61%。在 F3 处理下,铵态氮含量随灌水量的增加呈现先降后增趋势;在 F2 下,铵态氮含量随灌水量增加呈先增后降趋势;在

表 3 不同水肥供应对马铃薯根层土壤 硝态氮含量的影响/(mg·kg ⁻¹)								
Table 3 Effects of different water and fertilizer supply on the NO ₃ ⁻ -N content in potato root layer								
处理 Treatment	水平距离/cm Horizontal distance	土层深度 Soil depth/cm						平均 Mean
		10	20	30	40	50	60	
CK	0	18.0	26.9	19.8	7.0	2.9	1.7	12.7
	15	30.4	27.9	26.0	8.4	7.7	3.5	17.3
	30	33.8	43.2	23.6	14.4	8.3	12.6	22.7
	平均 Mean	27.4	32.7	23.1	9.9	6.3	5.9	17.6
W3F1	0	64.5	73.3	54.4	30.4	21.0	28.1	45.3
	15	79.6	73.7	50.1	28.7	22.0	35.5	48.3
	30	83.3	81.8	52.6	25.9	20.5	15.5	46.6
	平均 Mean	75.8	76.3	52.4	28.3	21.2	26.4	46.7
W2F3	0	60.8	54.8	47.8	22.2	31.9	40.5	43.0
	15	58.2	48.2	31.8	25.1	31.7	77.3	45.4
	30	3.7	21.9	31.4	34.7	59.1	82.1	38.8
	平均 Mean	40.9	41.6	37.0	27.3	40.9	66.6	42.4
W1F2	0	6.4	15.3	19.4	23.1	79.0	83.4	37.8
	15	6.0	21.7	29.6	51.9	85.0	84.5	46.5
	30	14.8	36.4	34.6	42.2	47.6	37.1	35.5
	平均 Mean	9.1	24.5	27.9	39.1	70.5	68.3	39.9
W3F3	0	55.6	26.9	36.5	58.1	43.5	36.3	42.8
	15	54.5	29.6	42.2	43.7	27.1	25.5	37.1
	30	13.9	78.1	25.7	27.6	29.6	66.9	40.3
	平均 Mean	41.3	44.9	34.8	43.1	33.4	42.9	40.1
W2F2	0	85.3	83.8	82.4	61.6	53.6	38.3	67.5
	15	45.3	22.6	15.5	29.5	3.5	4.6	20.2
	30	56.6	32.6	9.1	18.4	6.8	4.9	21.4
	平均 Mean	62.4	46.3	35.7	36.5	21.3	15.9	36.4
W1F1	0	47.6	45.5	23.6	14.3	12.9	4.8	24.8
	15	79.9	71.3	49.0	20.6	28.3	7.6	42.8
	30	45.2	46.6	27.7	23.3	23.4	16.0	30.4
	平均 Mean	57.6	54.5	33.4	19.4	21.5	9.5	32.6
W3F2	0	5.7	15.1	22.8	24.7	31.3	49.0	24.8
	15	4.6	27.1	20.9	52.7	44.7	69.1	36.5
	30	5.4	12.3	13.7	3.9	22.5	22.0	13.3
	平均 Mean	5.2	18.2	19.1	27.1	32.8	46.7	24.9
W2F1	0	69.1	5.1	29.2	15.7	32.4	43.2	32.5
	15	81.2	32.9	13.8	3.8	17.6	6.2	25.9
	30	66.6	41.1	52.0	8.9	3.8	2.5	29.2
	平均 Mean	72.3	26.4	31.7	9.5	17.9	17.3	29.2
W1F3	0	60.2	64.8	67.8	31.0	27.1	23.9	45.8
	15	62.5	59.1	66.7	35.2	26.4	16.0	44.3
	30	64.2	77.1	55.8	35.0	29.6	26.2	48.0
	平均 Mean	62.3	67.0	63.4	33.7	27.7	22.0	46.0

F1 下,铵态氮含量随灌水量增加而增大。在 F3、F2 和 F1 下铵态氮含量均值比 CK 分别高 30%、29.4% 和 30.1%。在 W3 和 W1 下,铵态氮含量随施肥量的增加呈现先减后增趋势,在 W2 下,铵态氮含量随施肥量的增加呈现先增后降趋势。在 W3、W2 和 W1 下的铵态氮含量均值比 CK 分别高 19.7%、36.8%和 33%。W1F3 处理在水平距根部 0 cm、纵深 20 cm 处出现最高值,为 13.50 mg·kg⁻¹;平均铵态氮含量比 CK 高42.7%;W2F3 处理在水平距根部 10 cm、纵深 40 cm 处出现最低值,为 3.91 mg·kg⁻¹。

表 4 不同水肥供应对马铃薯根层土壤 铵态氮的影响/(mg·kg ⁻¹)								
Table 4 Effects of different water and fertilizer supply on soil ammonium nitrogen in potato root layer								
处理 Treatment	水平距离/cm Horizontal distance	土层深度 Soil depth/cm						平均 Mean
		10	20	30	40	50	60	
CK	0	4.45	4.13	5.57	8.03	4.00	3.95	5.02
	15	4.61	4.08	8.57	4.73	5.10	4.69	5.30
	30	5.65	6.41	4.53	6.28	6.25	5.24	5.73
	平均 Mean	4.90	4.87	6.22	6.35	5.12	4.63	5.35
W3F1	0	5.24	5.21	6.76	9.19	5.21	6.57	6.36
	15	5.26	4.29	5.87	5.45	5.45	9.28	5.93
	30	6.32	7.52	6.81	4.88	6.00	6.86	6.40
	平均 Mean	5.61	5.67	6.48	6.51	5.55	7.57	6.23
W2F3	0	10.8	6.34	6.23	6.21	7.31	8.17	7.51
	15	5.47	6.92	7.25	3.91	7.08	8.45	6.51
	30	5.18	6.75	5.70	4.82	5.54	5.07	5.51
	平均 Mean	7.15	6.67	6.39	4.98	6.64	7.23	6.51
W1F2	0	6.39	6.05	5.31	5.48	5.30	5.71	5.71
	15	6.50	5.75	7.41	6.34	6.62	6.15	6.46
	30	6.19	6.57	5.74	6.35	7.81	7.81	6.75
	平均 Mean	6.36	6.12	6.15	6.06	6.58	6.56	6.30
W3F3	0	7.56	6.26	7.03	7.2	8.44	8.05	7.42
	15	7.45	7.61	6.46	7.77	8.18	7.53	7.50
	30	9.70	6.55	5.11	6.74	6.71	7.49	7.05
	平均 Mean	8.24	6.81	6.20	7.24	7.78	7.69	7.32
W2F2	0	8.16	8.46	8.70	8.20	7.99	7.55	8.18
	15	8.83	7.96	11.10	9.52	9.15	9.37	9.32
	30	8.20	9.00	9.22	8.81	7.92	11.40	9.09
	平均 Mean	8.40	8.47	9.67	8.84	8.35	9.44	8.86
W1F1	0	7.07	8.73	7.90	11.10	8.51	7.67	8.50
	15	7.24	7.77	6.07	6.27	5.83	6.33	6.59
	30	11.30	6.10	12.20	6.61	11.50	6.15	8.98
	平均 Mean	8.54	7.53	8.72	7.99	8.61	6.72	8.02
W3F2	0	6.09	5.87	5.45	6.17	6.68	6.64	6.15
	15	6.18	6.16	7.16	6.29	6.63	6.80	6.54
	30	5.16	4.24	5.41	7.09	6.49	7.06	5.91
	平均 Mean	5.81	5.42	6.01	6.52	6.60	6.83	6.20
W2F1	0	6.02	9.55	6.00	10.6	8.02	6.86	7.84
	15	6.83	4.41	7.83	6.12	6.58	6.20	6.33
	30	5.03	5.75	9.03	9.65	8.95	6.41	7.47
	平均 Mean	5.96	6.57	7.62	8.79	7.85	6.49	7.21
W1F3	0	8.17	13.50	7.08	6.43	6.48	5.71	7.90
	15	7.46	7.50	7.45	7.32	7.42	5.74	7.15
	30	7.84	9.24	6.84	6.10	7.68	9.42	7.85
	平均 Mean	7.82	10.08	7.12	6.62	7.19	6.96	7.63

不同水肥供应对马铃薯根层碱解氮含量影响如表 5 所示,土壤碱解氮主要积累于土壤表层(10~30 cm)。W3F3 处理在 10~60 cm 土层土壤碱解氮含量最高,平均值比 CK 高 11.3%。在 F3 和 F1 下,碱解氮含量随灌水量增加呈先降后增趋势;在 F2 下,碱解氮含量随灌水量的增加而增加。在 F3、F2 和 F1 下碱解氮含量均值比 CK 分别高 3.3%和降低 21%和 26.7%。在 W2 和 W1 下,碱解氮含量随施肥量的增加呈降低趋势。在 W3、W2 和 W1 下碱解氮含量均值比 CK 分别低 6.4%、21.8%和 16.2%。W1F3 处

表 5 不同水肥供应对马铃薯根层土壤碱解氮的影响/(mg·kg⁻¹)

Table 5 Effects of different water and fertilizer supply on soil alkali-hydrolyzed nitrogen in potato root layer								
处理 Treatment	水平距离/cm Horizontal distance	土层深度 Soil depth/cm						平均 Mean
		10	20	30	40	50	60	
CK	0	31.9	48.0	56.4	21.4	21.4	3.9	30.5
	15	36.8	49.4	36.8	7.4	10.2	3.9	24.1
	30	35.4	56.4	37.5	15.8	14.4	14.4	29.0
	平均 Mean	34.7	51.3	43.6	14.9	15.3	7.4	27.9
W3F1	0	36.1	38.2	37.5	19.3	13.0	10.2	25.7
	15	41.7	38.9	38.9	17.2	17.9	23.5	29.7
	30	44.5	49.4	54.3	17.2	12.3	14.4	32.0
	平均 Mean	40.8	42.2	43.6	17.9	14.4	16.0	29.1
W2F3	0	38.2	41.0	57.8	10.9	15.8	18.6	30.4
	15	42.4	41.0	21.4	14.4	14.4	20.0	25.6
	30	37.5	26.3	29.8	16.5	15.8	24.2	25.0
	平均 Mean	39.4	36.1	36.3	13.9	15.3	20.9	27.0
W1F2	0	28.4	19.3	28.4	31.2	7.4	9.5	20.7
	15	28.4	28.4	30.5	28.4	23.5	15.8	25.8
	30	38.9	30.5	29.8	24.2	17.9	17.9	26.5
	平均 Mean	31.9	26.1	29.6	27.9	16.3	14.4	24.4
W3F3	0	52.2	44.5	35.4	17.9	14.4	21.4	31.0
	15	52.2	51.5	36.8	15.8	17.2	14.4	31.3
	30	51.5	42.4	34.0	18.6	21.4	16.5	30.7
	平均 Mean	52.0	46.1	35.4	17.4	17.7	17.4	31.0
W2F2	0	38.9	52.9	19.3	8.05	15.1	8.8	23.9
	15	49.4	38.2	31.2	20.0	7.4	7.4	25.6
	30	42.4	35.4	25.6	19.3	3.9	2.5	21.5
	平均 Mean	43.6	42.2	25.4	15.8	8.8	6.2	23.7
W1F1	0	22.1	35.4	24.9	10.2	8.8	4.6	17.7
	15	30.5	28.4	18.6	7.35	15.8	2.5	17.2
	30	28.4	24.2	24.2	14.4	5.3	7.4	17.3
	平均 Mean	27.0	29.3	22.6	10.7	10.0	4.8	17.4
W3F2	0	27.0	29.8	10.2	1.8	1.8	7.4	13.0
	15	25.6	21.4	14.4	12.3	9.5	3.9	14.5
	30	43.1	57.8	8.1	7.4	42.4	1.8	26.8
	平均 Mean	31.9	36.3	10.9	7.2	17.9	4.4	18.1
W2F1	0	36.8	24.9	21.4	1.1	5.3	0.4	15.0
	15	26.3	29.8	15.8	0.4	7.4	3.9	13.9
	30	22.8	28.4	28.4	11.6	0.4	0.4	15.3
	平均 Mean	28.6	27.7	21.9	4.4	4.4	1.6	14.8
W1F3	0	35.4	42.4	59.9	14.4	16.5	19.3	31.3
	15	50.8	36.8	58.5	24.9	11.6	7.4	31.7
	30	30.5	44.5	29.1	10.9	10.2	6.0	21.9
	平均 Mean	38.9	41.2	49.2	16.7	12.8	10.9	28.3

理在水平距根部 0 cm、纵深 30 cm 处值最高(59.9 mg·kg⁻¹),其 10~60 cm 土层碱解氮含量平均值比 CK 增高 1.54%;W2F1 在水平、纵深距根部距离 15、40 cm,30、50 cm,30、60 cm,0、60 cm 4 个点出现最低值,为 0.4 mg·kg⁻¹,其 10~60 cm 土层碱解氮含量平均值较 CK 降低 47.05%。

3 讨 论

3.1 不同水肥供应对马铃薯根层土壤含水率分布、耗水量和水分利用效率的影响

灌水量、施肥量以及灌水方式是影响水分养分

利用效率主要因素,滴灌施肥方式可以根据土壤状况及作物不同生长阶段特性,有效地控制水分、养分供给的比例,既能保证作物对水分需求,又可以减少肥料淋失,充分发挥水肥耦合效应,提高水肥利用率。关于滴灌施肥对马铃薯耗水特征的影响,国内外学者进行了相关研究。本试验在膜下滴灌条件下,研究了不同灌溉施肥对马铃薯根层土壤水分含量和分布及水分效率的影响。结果表明,提高土壤湿润比或增加施肥量都可以增加马铃薯的单株块茎质量,从而增加马铃薯产量,这与前人的研究结果相似^[20-22]。但在相同灌水条件下,随着施肥量增大,产量和水分利用效率由增高变为降低。何华等^[23]研究表明,水肥配合下的水分利用效率,中水中肥与低水低肥有较好的效应值,高水低肥或高肥低水配合会大幅度降低 WUE。本试验中 W2F2 处理水分利用效率位于第二,但产量为最高。在同一灌水水平下,水分利用效率随施肥量增大呈抛物线变化,水分利用效率 F2>F1>F3;在同一施肥水平下,水分利用效率 W3>W2>W1,因此马铃薯在 W3 和 F2 下,有较好的水分利用效率,与前人研究结果一致^[24]。

地表经覆膜后,有效减少了土壤水分的无效蒸发,储蓄了土壤水分,从而提高了土壤含水率。滴灌水分主要在土壤表层运动,大部分被马铃薯吸收,用于地上和地下部分生长,一部分迁移到土壤下层。本试验结果表明,土壤含水率最大值多数出现于土壤上层(10~30 cm),马铃薯根部主要位于 0~40 cm 土层,适宜的土壤水分环境不仅利于根系生长,而且能抑制马铃薯旺盛的营养生长,水分过多或不足,都会对马铃薯的生长有不利的影响。

滴灌施肥对不同生长阶段马铃薯的耗水量有显著影响($p<0.05$)。本试验表明,马铃薯幼苗期耗水量约占全生育期耗水量的 30%左右,块茎形成期耗水量约占全生育期耗水量的 22%左右,块茎增长期耗水量约占全生育期耗水量的 17%左右,淀粉积累期耗水量约占全生育期耗水量的 27%左右。这与刘战东等^[25]的研究结果,马铃薯的耗水规律总体上是前期耗水强度小,中期逐渐变大,后期又减少的趋势有差异。

马铃薯在幼苗期和淀粉积累期耗水量较大。产量随耗水量增大先增加后降低,水分不足会影响马铃薯的产量,过度灌水会让马铃薯植株产生“徒长”现象。在马铃薯各生育期适量增加灌水,有利于产量增加。W2F2 处理下增产率最高,说明 W2F2 水肥配比合理,马铃薯生长效果最佳。

3.2 不同水肥供应对马铃薯根层土壤养分的影响

土壤中碱解氮含量可以很好地反映作物吸收氮状况^[26]。孔令郁等^[27]研究表明,马铃薯肥料充足,氮、磷、钾养分配比合理时,植株达到最大生物产量的同时块茎产量也相应达到最高,过量施肥不仅造成植株对养分的奢侈吸收,降低生产效益,还会造成环境污染。因此,合理使用肥料,不仅能实现高效、高产,也能对环境起到一定的保护。

本研究表明,水肥互作显著影响马铃薯根层碱解氮含量与分布,土壤碱解氮主要积累于表层(10~30 cm),大部分处理 10~60 cm 土层的碱解氮含量低于 CK。在同一施肥水平下,随灌水量的增大碱解氮平均含量呈现先降后增,在同一灌水水平下,随施肥量的增加而增加。

4 结 论

1)不同水肥供应对马铃薯根层养分及产量有显著影响,W3F1 处理在 10~60 cm 土层的硝态氮含量平均值最高,为 $46.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 CK 增高 166.1%;W2F2 处理在 10~60 cm 土层的铵态氮含量平均值最高,为 $8.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 CK 增高 61%;W3F3 处理的碱解氮含量平均值最高,为 $31.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 CK 增高 11.3%。W3F3 处理在 10~60 cm 土层的电导率平均值最高,为 $501.9\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,比 CK 增高 48.44%。W2F2 处理的土壤养分含量较高,主要集中在 10~30 cm 土层,有利于马铃薯地下部分的吸收。

2)在整个马铃薯生育期内,耗水量由大到小依次为:幼苗期>块茎增长期>块茎形成期>淀粉积累期。W3F2 处理的水分利用效率最高,为 $44.69\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,比 CK 增高 39.64%,W2F2 处理位于第二,为 $44.41\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,比 CK 增高 38.75%。W2F2 处理产量最高,为 $12\,539.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比 CK 增高 55.65%。

3)综合考虑水肥交互作用对马铃薯的土壤理化性质、水分分布和产量的影响,W2F2 处理为该地区适宜的灌水量和施肥量。

参 考 文 献:

[1] 王秀康,邢英英,李占斌.覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20):3944-3957.

[2] Jackson S D. Multiple Signaling Pathways control tuber induction in Potato[J]. Plant Physiology, 1999, 119(1):1-8.

[3] 林叶春,胡跃高,曾昭海.不同节水措施对马铃薯生长及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1):54-60.

[4] 张恒嘉,李晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利

用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10):143-151.

[5] 丁林,金彦兆,王文娟,等.民勤绿洲膜下滴灌洋葱节水高产灌溉制度[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):46-54.

[6] 杨会颖,刘海军,李艳,等.膜下滴灌条件下土壤基质势对辣椒产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1):54-60.

[7] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等.膜下滴灌棉花产量和品质与作物缺水指标的关系研究[J]. 农业工程学报, 2005,21(6):26-29.

[8] 刘战东,肖俊夫,刘祖贵,等.膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3):60-64.

[9] 谢森传,惠士博.高产高效冬小麦节水喷灌模式研究[J]. 灌溉排水, 1997, 16(1):14-18.

[10] Saravia D, Farfán-Vignolo E R, Gutiérrez R, et al. Yield and physiological response of potatoes indicate different strategies to cope with drought stress and nitrogen fertilization [J]. American Journal of Potato Research, 2016, 93(3):288-295.

[11] Wang F X, Kang Y H, Liu S P. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain[J]. Agricultural Water Management,2005,79(3):248-264.

[12] 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.

[13] 张小静,陈富,袁安明,等.氮磷钾施肥水平对西北干旱区马铃薯生长及产量的影响[J].中国马铃薯, 2013, 27(4):222-225.

[14] 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[J]. 土壤, 2020, 52(1):25-32.

[15] Milroy S P, Wang P, Sadras V O. Defining upper limits of nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of potato in response to crop N supply [J]. Field Crops Research, 2019, 239:38-46.

[16] 孙景生,刘祖贵,张奇阳,等.风沙区参考作物需水量的计算[J]. 灌溉排水,2002,21(2):17-20.

[17] 张绪成,马一凡,于显枫,等.西北半干旱区深旋松耕作对马铃薯水分利用和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(10):3293-3301.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2010.

[19] 张永成,田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.

[20] 陈瑞英,蒙美莲,梁海强,等.不同水氮条件下马铃薯产量和氮肥利用特性的研究[J].中国农学通报,2012,28(3):196-201.

[21] Belanger G, Walsh J R, Richards J E, et al. Nitrogen fertilization and irrigation affects tuber characteristics of two potato cultivars[J]. American Journal of Potato Research, 2002, 79(4):269-279.

[22] Walwonh J L, Carling D E. Tuber initiation and development in irrigated and non-irrigated potatoes[J]. American Journal of Potato Research, 2002, 79(6):387-395.

[23] 何华,陈国良,赵世伟.水肥配合对马铃薯水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1999,17(2):62-69.

[24] 王立为,潘志华,高西宁,等.不同施肥水平对旱地马铃薯水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2):54-58.

[25] 刘战东,肖俊夫,于秀琴.不同土壤水分处理对马铃薯形态指标、耗水量及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010,(8):1-3,7.

[26] 刘学军,巨晓棠,张福锁.基施尿素对土壤剖面中无机氮动态的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001,6(5):63-68.

[27] 孔令郁,彭启双,熊艳,等.平衡施肥对马铃薯产量及品质的影响[J]. 土壤肥料, 2004,(3):17-19.