

膜下滴灌调亏在提升河西绿洲洋葱产量及品质的应用

邓浩亮¹, 张恒嘉^{1,2}, 肖让¹, 张永玲¹, 李福强²,
俞海英¹, 吴克倩¹, 王玉才², 周宏³, 李煜²

(1.河西学院土木工程学院,河西走廊水资源保护利用研究所,甘肃 张掖 734000;

2.甘肃农业大学水利水电工程学院,兰州 730070;3.中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000)

摘要:为探究膜下滴灌调亏对河西绿洲洋葱品质和产量的影响,以“红宝 903”洋葱为试验材料,采用不同生育期和不同梯度调亏灌溉方式二因素随机区组试验设计,共 9 个处理。在每个生育期测定洋葱光合参数,收获后测定洋葱产量及品质。结果表明:(1)发叶和鳞茎膨大期水分亏缺显著降低了洋葱叶片净光合速率、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度,且降幅随水分亏缺程度加大而增大。(2)水分亏缺造成洋葱产量不同幅度降低,调亏处理中成熟期轻度水分亏缺产量最高($47\,940\text{ kg/hm}^2$),其次为苗期轻度水分亏缺($46\,521\text{ kg/hm}^2$),分别较充分灌溉降低 5.93% 和 8.71% ($P>0.05$)。 (3)苗期轻度水分亏缺灌溉水利用效率最高(58.84 kg/m^3),成熟期轻度水分亏缺次之(52.60 kg/m^3),分别较充分灌溉显著提高 36.14% 和 21.70% ($P<0.05$)。 (4)苗期轻度水分调亏处理的洋葱综合品质最佳,其紧实度、洋葱油、可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 和丙酮酸含量较生育期充分灌溉提高 3.06%, 2.50%, 10.40%, 17.57%, 4.35% 和 6.06%。因此,综合考虑产量、水分生产效率、产值及果实品质等指标,通过运用主成分分析法进行综合评价,表明洋葱最佳水分调控处理为苗期轻度水分胁迫,即在苗期保持土壤相对含水率 70%~75%、其余生育期土壤相对含水率为 80%~85%。该研究可为实现河西走廊绿洲灌区洋葱高效节水栽培和产业化发展提供理论与技术参考。

关键词:膜下滴灌调亏; 光合生理特性; 品质; 产量; 洋葱

中图分类号: S275.6; S633.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0201-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.030

Application of Mulched Drip Irrigation Under Water Deficit in Improving the Productivity and Quality of Onion in Hexi Corridor

DENG Haoliang¹, ZHANG Hengjia^{1,2}, XIAO Rang¹, ZHANG Yongling¹, LI Fuqiang²,
YU Haiying¹, WU Keqian¹, WANG Yucui², ZHOU Hong³, LI Xuan²

(1.College of Civil Engineering, Hexi University, Research Institute of Water Resources
Protection and Utilization in Hexi Corridor, Zhangye, Gansu 734000; 2.College of Water

Resources and Hydropower Engineering, Lanzhou 730070; 3.Northwest Institute of Eco-Environment
and Resources, Gansu Agricultural University, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: To uncover the effect of mulched drip irrigation under water deficit on the yield and quality of onion in Hexi corridor, a field experiment was conducted taking “Hongbao 903” as study object. The experimental employed a two-factor randomized blocks design of mulched drip irrigation with different water deficit gradients in growth periods, which included nine treatments totally. Onion photosynthetic parameters in every growth period were measured, and the onion productivity and quality were determined after harvest. Results showed that: (1) Water deficiency (WD) in the development and bulbification stages obviously decreased net photosynthetic rate, transpiration rate and intercellular CO_2 concentration, and the reduction increased with the raise of water deficiency. (2) WD decreased yield in different degree. Slight water deficit in ripening stage was the highest ($47\,940\text{ kg/hm}^2$), secondly in the establishment stage ($46\,521\text{ kg/hm}^2$), of which decreased by 5.93% and 8.71% ($P>0.05$) respectively compared with full irrigation. (3) Slight water deficit in the establishment period gave the highest irrigation efficiency (58.84 kg/m^3), secondly in ripening stage (52.60 kg/m^3), of which increased by 36.14% and 21.70% respectively compared with full irrigation.

收稿日期: 2019-12-18

资助项目:河西学院科研创新与应用校长基金一般项目(XZ2019012);河西学院横向科研项目(H2018005);国家自然科学基金项目(51669001);甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA073)

第一作者:邓浩亮(1988—),男,甘肃华亭人,博士,副教授,主要从事旱区作物高效节水研究。E-mail: denghaoliang521@163.com

通信作者:肖让(1979—),男,甘肃平凉人,硕士,副教授,主要从事旱区作物水肥一体化研究。E-mail: xiaorang999@163.com

(4) The onion quality was the best under the treatments of slight water deficit in the establishment stage, indicated by the increased compactness, onion oil, soluble sugar, soluble protein, vitamin C and pyruvic acid, by 3.06%, 2.50%, 10.40%, 17.57%, 4.35% and 6.06% respectively, compared with full irrigation. Taking the productivity, water product efficiency, output value and fruits quality, etc. altogether, the principal component analysis was used for comprehensive evaluation. The slight water deficit in the establishment stage was an ideal stage for soil moisture regulation. There lative soil water content should be kept around 70%~75% in the establishment stage, and 80%~85% in others. These results could provide the theoretical and technical references for the water saving planting of onion and its industrialization development.

Keywords: mulched drip irrigation under water deficit; photosynthetic physiological characteristics; quality; yield; onion

洋葱(*Allium cepa* L. var *agrogatum* Don.),又名圆葱、玉葱等,其丰富的营养成分和独特的辛香味成为大众蔬菜,同时具有抗癌、抗氧化、抗血栓、抗血小板凝集、抗糖尿病等药用和保健价值,有着“蔬菜皇后”的美誉^[1]。近年来,在河西绿洲作物种植中,洋葱以其适应性强、栽培简单、耐贮藏、耐运输、供应期长等特点得到大面积推广。但随着种植规模不断扩大、灌溉制度不合理等问题导致灌水需求持续递增。因此,制定合理的灌溉制度,提高洋葱灌溉水利用效率是水资源高效利用重要手段之一。调亏灌溉作为一种先进的灌溉技术,最初由澳大利亚持续灌溉农业研究所在 20 世纪 70 年代研究提高密植果园(桃树)生产率的过程中提出并得到实际验证^[2]。该技术能够根据作物生育耗水特征实施不同梯度的调亏灌溉制度,达到节水和高效用水的目的。目前已在干旱绿洲区广泛用于玉米^[3]、马铃薯^[4]、苕蓝^[5]、葡萄^[6]等作物栽培,并取得了良好的增产和节水效果。关于洋葱膜下滴灌调亏技术亦展开了相关的研究,如郑建华等^[7]建立了基于膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数与优化灌溉关系认为,洋葱水分敏感指数在鳞茎膨大期最大,发叶期次之,苗期和成熟期较小,因此在立苗期和成熟期调亏灌溉可提高产量,而发叶期和鳞茎膨大期调亏处理则分别减产 18.2%和 19.5%;刘静等^[8]对民勤沙漠绿洲洋葱膜下滴灌试验发现,适度增加灌水定额可提高洋葱产量和水分利用效率;同时,丁林等^[9]、李斌等^[10]亦开展了膜下滴灌洋葱耗水规律与节水高产灌溉制度等相关研究,拓展了干旱区洋葱膜下滴灌调亏栽培技术。

先前研究为干旱内陆绿洲洋葱膜下滴灌调亏栽培技术提供了可能选择,对发展洋葱产业、节约水资源具有重要的指导意义。然而当前研究主要集中于膜下滴灌调亏对洋葱产量、水分利用效率影响等方面,而对洋葱光合生理特性仍然关注较少,且对洋葱品质的影响研究更是鲜有报道。同时不同地域的土壤和气候条件都会影响灌溉栽培技术应用。因此,持续在干旱绿洲区开展和完善膜下滴灌调亏栽培体系的相

关研究是一项长期任务。本研究立足于河西绿洲轻壤土,开展膜下滴灌调亏对洋葱生长发育、光合生理特性、品质以及产量和水分利用效率影响的大田试验,旨在丰富该区域洋葱高产、稳产和节水高效栽培体系。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年 3—10 月在甘肃省民乐县洪水河管理处益民灌溉试验站(100°43'E, 38°39'N)进行。该地海拔约 1 970 m,属典型大陆性干旱气候,光热资源丰富,昼夜温差大,有利于农作物进行有效光合作用、养分积累和产量形成。年均气温 6.0℃,≥0℃积温 3 500℃,≥10℃有效积温 2 985℃,年均日照时间 3 000 h,平均无霜期 136 d。多年气象资料(2000—2018 年)显示,该地区年均降水量 328 mm,蒸发量 1 900 mm,昼夜温差大,干旱频繁。试验地为轻壤土,肥力中等,pH 为 7.22,耕作层土壤田间持水量 24.0%,土壤容重 1.40 g/cm³。0—20 cm 耕层土壤有机质含量 12.8 g/kg,速效磷含量 13.1 mg/kg,碱解氮含量 63.5 mg/kg,速效钾含量 192.7 mg/kg。地下水位埋深较深,盐碱化影响较小。

1.2 试验设计与方法

供试洋葱品种为美国引进的杂交一代“红宝 903”,4 月 17 日种植,10 月 9 日收获。行距和株距均为 10 cm,全膜覆盖,一膜 12 行,种植密度为 18.05 万株/hm²,灌溉方式采用膜下滴灌,滴灌管间距为 2 行,每小区面积 35 m²(10 m×3.5 m)。试验依不同水分调亏水平和调亏生育期设 8 个水分调控处理(WD1~WD8),1 个对照(CK),分别在洋葱立苗期、发叶期、鳞茎膨大期和成熟期 4 个生育阶段进行水分调控(表 1)。

1.3 水肥田间管理

为保证作物产量,首先在灌冬水后施入优质农家肥 7.5 万 kg/hm²,并耙耱保墒。播前 10 天对试验小区进行 30 cm 的翻耕处理,人工除去杂草,同时施入尿素(N 含量 46%)230 kg/hm²,磷酸二铵(P₂O₅ 含量 46%、N 含量 18%)300 kg/hm²,氯化钾(K₂O

含量 60%)150 kg/hm²,所有肥料都作为基肥在播种时一次性施入。5 月下旬结合灌水追施尿素 75 kg / hm²,7 月上旬结合灌水追施尿素 230 kg/hm²,8 月上旬结合灌水追施氮磷复合肥 300 kg /hm²。

表 1 不同试验处理的土壤含水量 单位: %

处理	立苗期	发叶期	鳞茎膨大期	成熟期	亏水处理
CK	80~85	80~85	80~85	80~85	各生育期充分供水
WD1	70~75	80~85	80~85	80~85	立苗期轻度亏水
WD2	80~85	70~75	80~85	80~85	发叶期轻度亏水
WD3	80~85	80~85	70~75	80~85	鳞茎膨大期轻度亏水
WD4	80~85	80~85	80~85	70~75	成熟期轻度亏水
WD5	60~65	80~85	80~85	80~85	立苗期中度亏水
WD6	80~85	60~65	80~85	80~85	发叶期中度亏水
WD7	80~85	80~85	60~65	80~85	鳞茎膨大期中度亏水
WD8	80~85	80~85	80~85	60~65	成熟期中度亏水

注:表中数据表示占田间持水量的百分数(%)。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生长指标 洋葱进入成熟期后,每个小区随机选取 20 株洋葱定苗,然后用精度 0.1 cm 直尺测定株高,精度 0.01 mm 游标卡尺测定假茎粗。

1.4.2 生理指标 每个生育期在水分调亏处理后第 5 天进行测定,选取第 3~4 片展开叶片中部作为测定部位,于上午 10:30 用 LI-6400 便携式光合仪在 1 000 μmol/(m² · s)的光子强度下测定叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)等生理指标日变化,各小区测定 10 株,每个叶片 3 个稳定读数,结果取各处理均值。

1.4.3 产量和鳞茎形态特性 待洋葱成熟后,每个小区单独收获测产计算,3 个重复的平均值为各处理的实际产量。用精度为 0.01 g 的电子秤进行称量,并换算为标准产量 kg/hm²。同时各小区将定苗的 20 株洋葱单独收获,带回室内冲洗,将鳞茎从植株上剪下,采用精度为 0.01 mm 游标卡尺测定鳞茎横径和纵径,结果取各处理均值。

1.4.4 水分利用效率

$$R_{WUE}=Y/E_{Ta}$$

$$I_{WUE}=Y/I$$

式中: R_{WUE} 为全生育期水分利用效率(kg/m³); I_{WUE} 为全生育期灌溉水利用效率(kg/m³); Y 为单位面积产量(kg/hm²); E_{Ta} 为全生育期实际单位面积耗水量(m³/hm²); I 为全生育期单位面积灌水量(m³/hm²)。

1.4.5 品质 鳞茎紧实度采用称重排水法(容量法)测定;洋葱油采用蒸馏萃取法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;维生素 C 采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定;丙酮酸采用气相色谱法进行测定^[11]。

1.5 数据统计与分析

利用 Excel 2013 对所测数据进行计算,采用 SPASS 19.0 软件中 Duncan 多重比较法比较各处理

相关数据差异的显著性,Origin 8.0 软件绘图,表中数据均为平均值。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌调亏对洋葱生物学特性的影响

从表 2 可以看出,不同生育阶段调亏梯度对洋葱的生物学特性影响显著。与 CK 相比,各处理株高均呈降低趋势,但轻度亏水 WD1、WD2、WD3 和 WD4 对株高影响不显著,而中度亏水 WD5、WD6、WD7、WD8 不利于株高生长,降幅显著。各处理洋葱鳞茎横径、纵径均不同程度降低,其中处理 WD1 影响最小,分别降低 1.82%和 1.88%,而 WD7 影响最显著,分别降低 39%和 34.03%,表明鳞茎膨大期中度亏水不利于洋葱的鳞茎生长繁殖。各处理均造成鳞茎鲜重不同程度降低,降幅为 5.86%~43.38%,其中 WD6 和 WD7 最显著,分别为 35.91%和 43.38%,而 WD4 的影响最小,仅为 5.86%,表明发叶期和鳞茎膨大期中度亏水不利于鳞茎鲜重积累。地上鲜重亦产生不同程度的减产,其中 WD5 和 WD8 最显著,降幅达 27.40%和 34.25%,而 WD1 和 WD2 无显著差异。

2.2 膜下滴灌调亏对洋葱叶片光合气体交换参数的影响

2.2.1 净光合速率 不同梯度调亏处理下洋葱叶净光合速率(P_n)从立苗到成熟期表现为先上升再下降的单峰型变化趋势(图 1)。轻度亏水处理在立苗期无显著差异,但中度亏水 WD5 较 CK 显著降低 10.46%;发叶期,轻度亏水 WD2 和 中度亏水 WD6 仅为 10.31,9.89 μmol/(m² · s),较 CK 分别显著降低 14.35%和 17.82%,其他处理与 CK 间无显著差异;鳞茎膨大期,轻度亏水 WD3 和 中度亏水 WD7 较 CK 分别显著降低 14.42%和 20.87%,而 WD2 复水后补偿效应大于 WD6,且与 CK 间无显著差异。同时发现,鳞茎膨大期 P_n 较发叶期无显著减低趋势,均值均维持在 9.17~12.18 μmol/(m² · s);至成熟期, P_n 绝对值显著低于发叶和鳞茎膨大期,均值

仅为 8.04 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,略高于苗期,轻度亏水 WD4 较 CK 降低 7.73%,且与 CK 间无显著差异,而中度亏水 WD8 较 CK 显著降低 9.54%,说明中度亏水不利于洋葱成熟期净光合速率提升。

表 2 调亏灌溉对洋葱生物学特性影响

处理	株高/cm	假茎粗/mm	鳞茎横径/cm	鳞茎纵径/cm	鳞茎鲜重/g	地上鲜重/g
CK	83.63±3.58a	16.25±0.56a	9.36±0.35a	9.55±0.68a	334.01±13.68a	42.37±1.87a
WD1	81.21±4.13ab	15.61±0.49ab	9.19±0.41a	9.37±0.72a	305.29±14.72b	40.91±2.23ab
WD2	79.86±3.07ab	15.34±0.37bc	8.94±0.38ab	9.06±0.59ab	268.56±16.51c	39.58±2.19ab
WD3	80.54±3.91ab	15.77±0.35ab	8.05±0.29b	8.41±0.43b	251.73±10.37c	39.14±1.17b
WD4	82.60±2.75a	16.06±0.66ab	9.13±0.52a	9.26±0.84a	314.43±13.59ab	36.42±2.06c
WD5	73.15±5.60cd	14.85±0.59c	7.64±0.19bc	7.34±0.49c	233.91±10.27d	30.76±1.45e
WD6	69.38±4.72d	13.51±0.71d	6.89±0.54d	7.07±0.35c	214.06±9.60e	33.50±2.62d
WD7	70.82±3.33cd	13.20±0.50d	5.71±0.27e	6.30±0.44d	189.12±7.74f	31.22±2.40de
WD8	75.22±4.28bc	14.64±0.84c	7.30±0.20cd	7.11±0.27c	228.50±10.80de	27.86±0.98f

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

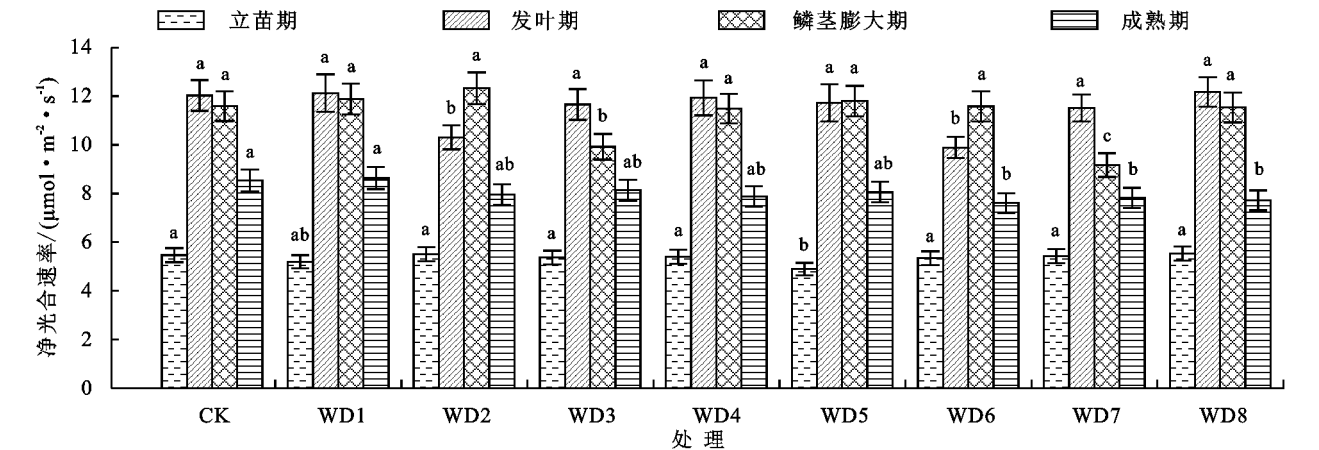


图 1 膜下滴灌调亏对洋葱净光合速率的影响

2.2.2 气孔导度 随着生育期推进,各处理之间洋葱的气孔导度(G_s)逐渐增大,至成熟期后略有降低,且各处理间差异不同(图 2)。立苗期 G_s 最小,仅为 69.02~77.77 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,轻度亏水 WD1 较 CK 降低 5.01%,与 CK 间无显著差异,而中度亏水 WD5 较 CK 显著降低 10.16%,而其他处理与 CK 间无显著差异。随生育期推进,发叶期各处理 G_s 逐渐增加,为 93.16~115.93 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但 WD2 和 WD6 较 CK 显著降低 15.11%和 18.32%,而鳞茎膨大期, G_s 持续递增至全生育最大值,达 115.19~153.52 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但各亏水处理 G_s 均不同程度降低,其中当季亏水 WD3 和 WD7 降幅最显著,分别降低 13.75%和 19.57%,可以看出,发叶和鳞茎膨大期亏水不利于气孔张开。成熟期 G_s 较鳞茎膨大期呈显著降低趋势,但各处理与 CK 间均无显著差异,轻度亏水 WD4 和 中度亏水 WD8 较 CK 仅分别降低 6.84%和 3.80%,说明亏水对成熟期气孔导度无显著影响。

2.2.3 胞间二氧化碳浓度 洋葱各生育期胞间 CO_2 浓度(C_i)从立苗到成熟期表现为先上升后下降变化趋势,且在发叶期达到最大值,而 WD2 和 WD6 由于调亏处理, C_i 最大值延后至鳞茎膨大期(图 3)。立苗期,中度亏水 WD5 较 CK 显著降低 10.16%,而

轻度亏水 WD1 仅降低 5.01%,与 CK 无显著性差异;发叶期,轻度和中度调亏处理 WD2 和 WD6 分别为 96.83,93.16 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,较 CK 分别显著降低 15.11%和 18.32%,而 WD5 复水后 C_i 与 CK 无显著差异,仅较 CK 降低 2.37%;鳞茎膨大期,WD1、WD2、WD5 和 WD6 在复水后 C_i 与 CK 无显著差异,表现出较好的补偿效应,且较发叶期 C_i 略有增加,而该时期轻度和中度调亏处理 WD3 和 WD7 分别较 CK 显著降低 13.75%和 19.57%;至成熟期,各处理 C_i 仅略高于苗期,且轻度和中度调亏处理 WD4 和 WD8 分别为 77.53, 80.06 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,较 CK 仅分别降低 6.84%和 3.80%,与 CK 无显著差异,尽管 WD6 复水后鳞茎膨大期 C_i 与 CK 无显著差异,但成熟期 C_i 较 CK 显著降低 10.19%。

2.3 膜下滴灌调亏对洋葱品质的影响

调亏处理对洋葱品质构成要素影响不同(表 3)。轻度调亏较 CK 对紧实度无显著影响,而中度亏水均降低了紧实度,降幅为 5.10%~10.20%,其中鳞茎膨大期亏水处理 WD7 最显著。苗期和成熟期轻度调亏处理 WD1 和 WD4 洋葱油含量均为 0.41%,较 CK 提高 2.50%,其他处理较 CK 均不同程度的降低,降幅为 2.50%~20.00%,其中 WD7 影响最显著,较 CK 降低 20.00%;而轻度和中度水分调亏均能提高

洋葱中可溶性糖和可溶性蛋白含量,且随着水分调亏幅度增大,可溶性糖和可溶性蛋白含量越高,增幅分别为 10.40%~51.98%和 17.57%~43.24%,其中 WD7 增幅最大,较 CK 分别提高 51.98%和 43.24%,而 WD1 增幅最小,仅为 10.40%和 17.57%;立苗和成熟期轻度调亏处理 WD1 和 WD4 可提高维生素 C 含量,增幅分别为

4.35%和 0.88%,而其他处理不利于维生素 C 含量积累,降幅为 2.98%~16.60%;WD1 可提高洋葱丙酮酸含量,增幅为 6.06%,其他处理较 CK 均导致丙酮酸含量不同程度降低,降幅为 4.43%~36.52%,其中 WD6 和 WD7 降幅显著,丙酮酸含量仅为 9.59,8.17 $\mu\text{mol}/\text{mL}$,较 CK 分别降低 25.49%和 36.52%。

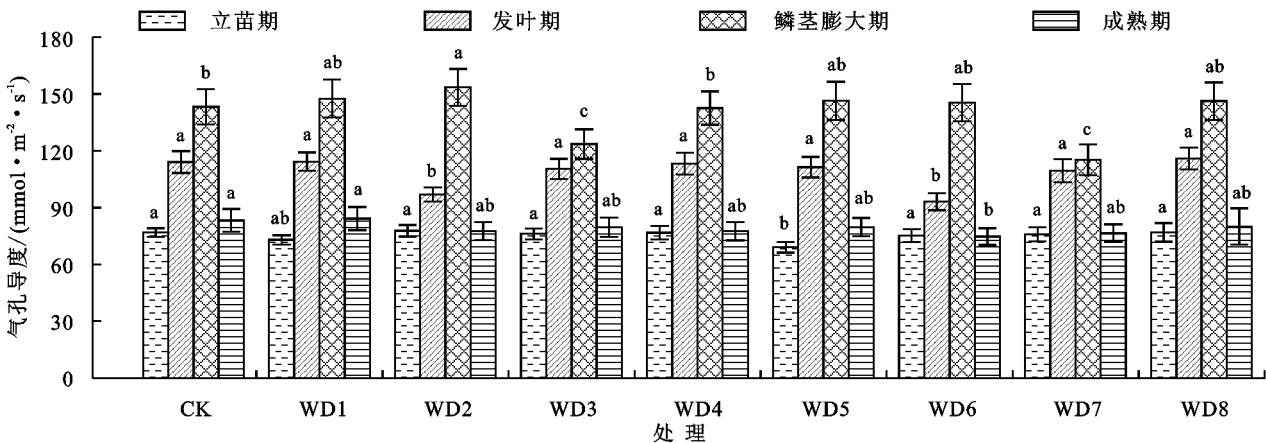


图 2 膜下滴灌调亏对洋葱气孔导度的影响

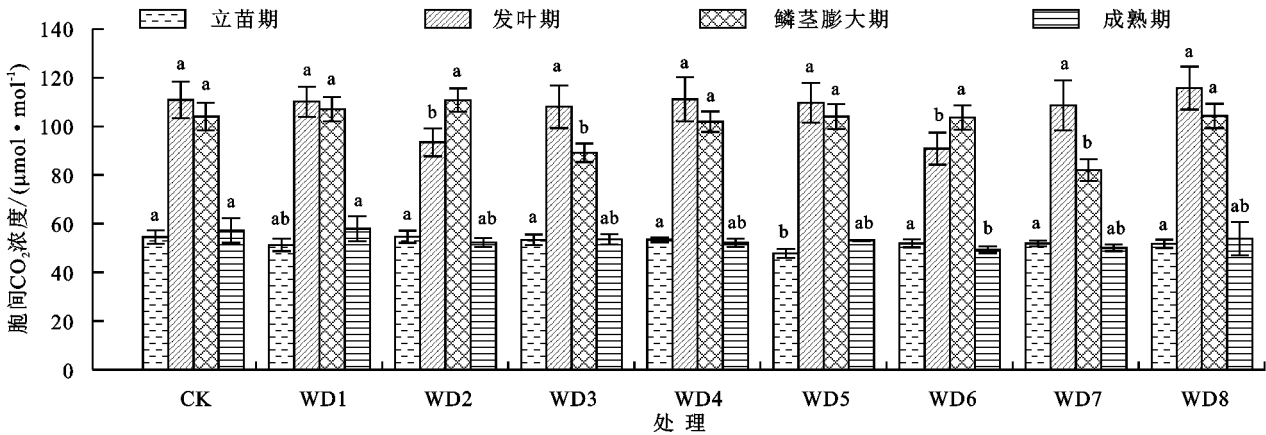


图 3 膜下滴灌调亏对洋葱胞间 CO₂ 浓度的影响

表 3 膜下滴灌调亏对洋葱品质影响

处理	紧实度/ (g·cm ⁻³)	洋葱油/ %	可溶性糖/ %	可溶性 蛋白/%	维生素 C/ (mg·kg ⁻¹)	丙酮酸/ (μmol·mL ⁻¹)
CK	0.98±0.022ab	0.40±0.021a	4.04±0.19e	1.48±0.01d	92.40±4.25abc	12.87±0.42ab
WD1	1.01±0.012a	0.41±0.012a	4.46±0.08d	1.74±0.04c	96.42±2.33a	13.65±0.36a
WD2	0.98±0.019ab	0.39±0.016a	5.13±0.15cd	1.87±0.03bc	89.65±1.64abc	12.30±0.55b
WD3	0.95±0.013ab	0.35±0.013bc	5.29±0.20bcd	1.89±0.04bc	83.59±3.58cd	11.24±0.27c
WD4	0.99±0.010ab	0.41±0.010a	4.89±0.07d	1.82±0.07c	93.21±2.48ab	12.50±0.48ab
WD5	0.93±0.014ab	0.38±0.014ab	5.72±0.11ab	1.93±0.02bc	83.40±2.07cd	10.53±0.22cd
WD6	0.91±0.017b	0.36±0.017b	6.01±0.24a	2.06±0.06ab	79.42±2.28d	9.59±0.19d
WD7	0.88±0.016b	0.32±0.016c	6.14±0.18a	2.12±0.06a	77.06±1.13d	8.17±0.30e
WD8	0.93±0.020ab	0.39±0.019a	5.59±0.08bc	2.01±0.04ab	86.29±4.01bcd	10.91±0.28c

2.4 膜下滴灌调亏对洋葱产量和水分利用效率的影响

不同梯度水分调亏对洋葱全生育期耗水量、产量、灌溉水利用效率和水分利用效率等指标影响差异显著(表 4)。调亏灌溉显著降低了洋葱全生育期耗水量,其中中度调亏处理 WD6、WD7 和 WD8 全生育期耗水量降幅较大,分别为 3 547.7,3 509.6,3 629.0 m^3/hm^2 ,较 CK 分别显著降低 12.89%,13.82%和

10.89%,而轻度调亏处理 WD2、WD3 和 WD4 与 CK 无显著差异;水分调亏均造成洋葱产量不同程度降低,其中成熟期轻度调亏处理 WD4 影响幅度最小,产量可达 47 940 kg/hm^2 ,较 CK 仅降低 5.93%,而鳞茎膨大期中度调亏处理 WD7 降幅最大,仅为 28 857 kg/hm^2 ,较 CK 显著降低 43.37%,中度调亏处理不利于洋葱产量的积累,降幅显著大于轻度调亏处理,

同时受产量影响,各处理产值与产量变化一致;WD3 单方水产值减小,较 CK 显著降低 18.54%,而其他处理均提高了单方水产值,增幅为 1.49%~36.12%,其中立苗期轻度调亏处理 WD1 最显著,增幅 23.42 元/m³,较 CK 显著提高 36.12%;WD1 水分利用效率最高,达 12.56 kg/m³,其次为 WD4,较 CK 仅分别提高 0.32%和 0.08%,而其他处理水分利用效率均不同程

度降低,降幅为 14.06%~34.30%,其中 WD7 水分利用效率最低,仅为 8.22 kg/m³,较 CK 显著降低 34.35%;WD3 灌溉水利用效率最低,仅为 46.44 kg/m³,较 CK 显著降低 18.54%,而其他处理灌溉水利用效率均不同程度提高,增幅为 1.49%~36.14%,其中 WD1 灌溉水利用效率最高,其次为 WD4,分别为 58.84,52.60 kg/m³,较 CK 分别显著提高 36.14%和 21.70%。

表 4 不同调亏灌溉处理下洋葱产量和全生育期水分利用状况

处理	生育期降雨量/ (m ³ ·hm ⁻²)	全生育期灌水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	全生育期耗水量/ (m ³ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	产值/ (元·hm ⁻²)	单方水产值/ (元·m ⁻³)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	灌溉水利用效率/ (kg·m ⁻³)
CK	2928	1179a	4072.5a	50962a	76442a	64.84d	12.52a	43.22d
WD1	2928	791cd	3704.6bc	46521a	69781a	88.26a	12.56a	58.84a
WD2	2928	879b	3795.1ab	40819b	61228b	69.66cd	10.76b	46.44cd
WD3	2928	1088a	3988.8ab	38322bc	57483bc	52.82e	9.61c	35.21e
WD4	2928	911b	3826.4ab	47940a	71910a	78.91b	12.53a	52.60b
WD5	2928	810c	3730.7bc	35548cd	53321cd	65.80d	9.53c	43.87d
WD6	2928	632e	3547.7c	32629de	48943de	77.44b	9.20cd	51.63b
WD7	2928	586e	3509.6c	28857e	43286e	73.82bc	8.22d	49.22bc
WD8	2928	714d	3629.0c	34790d	52185d	73.09bc	9.59c	48.73bc

2.5 不同调亏灌溉方式综合评价

经计算河西绿洲不同生育期和不同梯度调亏灌溉方式 11 个效益评价指标的相关矩阵,并对其进行特征分析(表 5,表 6)后表明,前 4 个主成分(综合指标)的累积贡献率已达 99.07%,故只选产量、水分利用效率、灌溉水利用效率和产值前 4 个指标建立综合方程:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0.3388X_1' + 0.3425X_2' + 0.0865X_3' + 0.3388X_4' + \\ &\quad 0.0867X_5' + 0.3332X_6' + 0.3081X_7' - 0.3312X_8' - \\ &\quad 0.3070X_9' + 0.3393X_{10}' + 0.3363X_{11}' \\ &= 0.00005X_1 + 0.20671X_2 + 0.01291X_3 + 0.00003X_4 + \\ &\quad 0.00863X_5 + 7.88406X_6 + 10.20719X_7 - 0.47194X_8 - \\ &\quad 1.60471X_9 + 0.05168X_{10} + 0.19458X_{11} \\ Y_2 &= -0.0956X_1' + 0.0510X_2' + 0.6631X_3' - 0.0956X_4' + \\ &\quad 0.6630X_5' - 0.0057X_6' + 0.1307X_7' + 0.1363X_8' + \\ &\quad 0.2382X_9' + 0.0760X_{10}' - 0.0400X_{11}' \\ &= -0.00001X_1 + 0.03078X_2 + 0.09895X_3 - \\ &\quad 0.000008X_4 + 0.06597X_5 - 0.13487X_6 + 4.33002X_7 + \\ &\quad 0.19422X_8 + 1.24509X_9 + 0.01158X_{10} - 0.02314X_{11} \\ Y_3 &= -0.1951X_1' - 0.1509X_2' - 0.1869X_3' - 0.1952X_4' - \\ &\quad 0.1870X_5' + 0.3185X_6' + 0.5333X_7' + 0.3037X_8' + \\ &\quad 0.4456X_9' + 0.2118X_{10}' + 0.3311X_{11}' \\ &= -0.00003X_1 - 0.09107X_2 - 0.02789X_3 - 0.00002X_4 - \\ &\quad 0.01861X_5 + 7.53625X_6 + 17.66794X_7 + 0.43276X_8 + \\ &\quad 2.32919X_9 + 0.03226X_{10} + 0.19157X_{11} \\ Y_4 &= -0.0434X_1' - 0.0218X_2' + 0.0278X_3' - 0.0433X_4' + \\ &\quad 0.0278X_5' + 0.5130X_6' - 0.7339X_7' - 0.1086X_8' + \\ &\quad 0.2918X_9' + 0.1442X_{10}' + 0.2734X_{11}' \\ &= -0.000006X_1 - 0.01316X_2 + 0.00415X_3 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &0.000004X_4 + 0.00277X_5 + 12.13845X_6 - \\ &24.31371X_7 - 0.15475X_8 + 1.52526X_9 + \\ &0.02196X_{10} + 0.15819X_{11} \end{aligned}$$

通过利用主成分分析,不同生育期和不同梯度调亏灌溉方式的综合主成分分值依次为 WD1>CK>WD4>WD2>WD8>WD5>WD3>WD6>WD7,即 WD1 评价最优。

3 讨论

调亏灌溉依据作物各生育期需水规律,实施不同程度的水分胁迫,导致作物生长状况随之变化,进而达到稳产、节水、调质的目的^[12]。高佳等^[13]、王玉才^[14]研究证实,膜下滴灌调亏技术改变了农田土壤水热环境,进而对作物生长产生影响,但影响幅度与作物种类、调亏幅度、调亏时期和试验区环境等相关。膜下滴灌调亏技术对洋葱生长发育影响显著^[15-18]。本研究发现,膜下滴灌洋葱株高、假茎粗、鳞茎横径、鳞茎纵径、鳞茎鲜重、地上鲜重等指标受灌水量影响,均表现为降低趋势,且生育后期调亏影响显著大于生育前期。这是由于苗期根系较弱,需水量较低,轻度调亏对洋葱生长影响较小,而生育期后期洋葱处于营养繁殖关键期,需水量大,水分胁迫抑制其正常生长发育,不利于鳞茎形成。

光合作用是对水分胁迫最敏感的生理过程之一,水分亏缺可能会阻碍 CO₂ 进入叶片,或者影响叶肉细胞对 CO₂ 的羧化能力,从而抑制植物的光合作用。Reddy 等^[19]研究指出,水分亏缺会导致作物叶片气孔关闭,G_s 下降,最终引起 P_n 下降。本研究发现,洋葱发叶期水分亏缺 WD2 和 WD6 处理 P_n 显著降低,且降幅随调亏幅度的增大而增加。郭仁松等^[20]在海岛棉花调亏灌溉研

究中发现,当调亏程度逐渐增大时, G_s 显著下降,从而引起 P_n 降低,这与本研究结论一致,类似结论在邓浩亮等^[21]关于绿洲崧蓝对膜下滴灌调亏研究中亦得到证实。这是由于水分亏缺抑制了洋葱地上部分的生长,引起叶面积指数减小,蒸腾速率降低,同时土壤缺水

时,气孔通过部分或全部关闭使蒸腾速率降低,从而导致作物整体光合速率下降^[22]。同时,本研究发现,中度水分亏缺导致 C_i 下降幅度更显著,这是由于水分胁迫导致气孔关闭,导致 CO_2 进入叶片内数量减小,这与张建忠等^[23]研究结果相一致。

表 5 综合效益评价指标

处理	产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	水分利用效率/ ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)	灌溉水利用效率/ ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)	产值/ (元 $\cdot hm^{-2}$)	单方水产值/ (元 $\cdot m^{-3}$)	紧实度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	洋葱油/ %	可溶性糖/ %	可溶性 蛋白/%	维生素 C/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	丙酮酸/ ($\mu mol \cdot mL^{-1}$)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
CK	50962	12.52	43.22	76442	64.84	0.98	0.40	4.04	1.48	92.40	12.87
WD1	46521	12.56	58.84	69781	88.26	1.01	0.41	4.46	1.74	96.42	13.65
WD2	40819	10.76	46.44	61228	69.66	0.98	0.39	5.13	1.87	89.65	12.30
WD3	38322	9.61	35.21	57483	52.82	0.95	0.35	5.290	1.89	83.59	11.24
WD4	47940	12.53	52.60	71910	78.91	0.99	0.41	4.89	1.82	93.21	12.50
WD5	35548	9.53	43.87	53321	65.80	0.93	0.38	5.72	1.93	83.40	10.53
WD6	32629	9.20	51.63	48943	77.44	0.91	0.36	6.01	2.06	79.40	9.59
WD7	28857	8.22	49.22	43286	73.82	0.88	0.32	6.14	2.12	77.06	8.17
WD8	34790	9.59	48.73	52185	73.09	0.93	0.39	5.59	2.01	86.29	10.91

表 6 综合指标值和综合评价系数

处理	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	综合评分
CK	3.57261	-1.74013	-0.90659	-0.41054	2.33266
WD1	3.66739	1.93775	-0.08205	0.43414	3.14430
WD2	0.88347	-0.26476	0.60572	0.27503	0.63891
WD3	-1.14112	-2.61786	0.25089	0.53900	-1.34795
WD4	2.74917	0.84163	0.09289	-0.07330	2.23959
WD5	-1.45019	-0.55644	0.43540	-0.45022	-1.19459
WD6	-2.67753	1.15304	-0.20109	-0.18743	-1.81068
WD7	-4.48174	0.67790	-0.86602	0.25264	-3.27896
WD8	-1.12205	0.56886	0.67084	-0.37931	-0.72329

注:表中数值的正负仅表示其与平均水平的位置(原始数据标准化,平均数为 0)。

本研究发现,调亏处理均导致洋葱产量和产值不同程度降低,降幅可达 8.71%~43.37%,进而引起生产效益同步降低,而 Juan 等^[24]、郑建华等^[7]研究结论表明,立苗和成熟期适度调亏可提高洋葱产量和经济效益,这与本试验结论有所差异,这可能与调亏幅度、试验条件和洋葱品种等有关。本试验发现,鳞茎膨大期轻度和中度调亏处理 WD3 和 WD7 较 CK 产量显著降低 24.80%和 43.37%,Pelter 等^[25]研究亦发现,洋葱鳞茎膨大期亏水较充分供水可减产 20%左右,这与本研究结论一致。因为鳞茎膨大期洋葱鳞茎开始细胞分裂并膨大,洋葱由营养生长旺盛期进入生殖生长期,水分亏缺减弱了洋葱蒸腾和光合作用,复水后难以补偿恢复,从而显著影响产量形成,经济效益减少。立苗期轻度调亏 WD1 较 CK 产量仅降低 8.71%,这是由于立苗期根系活性弱,尚处在吸收功能的缓慢生长时期,该生育期亏水有利于根系深扎,复水后洋葱恢复生长时间较长,因此对产量形成和经济效益波动影响较小;同时本研究发现,WD1 水分利用效率和灌溉水利用效率最高,分别较

CK 提高 0.32%和 36.14%,WD4 较 CK 仅分别提高 0.08%和 21.70%,而其他处理水分利用效率较 CK 降低 14.06%~34.35%。可见,苗期和成熟期适度亏缺有利于提高灌溉水利用效率,这与 Bekele 等^[26]研究结论相一致,然而不合理亏水则会导致减产显著,最终表现为低产值、低效益。

已有研究^[27]表明,适时适度的水分亏缺在稳产的前提下,不仅能提高水分利用效率,而且还能改善果实品质。本研究发现,适度的水分调亏能够在稳产的同时提高洋葱品质,其中 WD1 和 WD5 紧实度、可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 含量分别较 CK 提高 2.50%~17.57%和 1.02%~22.97%。尽管中度调亏处理可显著提高可溶性糖和可溶性蛋白含量,但是显著降低了紧实度、洋葱油、维生素 C 和丙酮酸含量,不利于洋葱综合品质的提高。Zayton^[28]研究发现,洋葱成熟期水分亏缺可提高品质,这与本结论相一致。然而,Juan 等^[24]认为,洋葱生育期内水分调亏对丙酮酸含量无显著影响。但本试验发现,调亏处理可显著降低洋葱丙酮酸含量,没有很好地支持前者结论,这可能与试验地土壤类型、洋葱品种等因素有关。由于水分调亏水平和调亏阶段对洋葱产量和品质综合影响的研究鲜有报道,因此仍需要大量试验去证实和探索调亏灌溉对不同区域和品种间品质差异。

4 结论

(1)不同生育期水分调亏抑制洋葱生长发育,株高、假茎粗、鳞茎纵横径等生物学指标不同程度降低,但生育前期轻度调亏影响不显著。

(2)不同生育期水分调亏均可引起洋葱叶片净光合速率、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度降低,且降低程度与水分亏缺程度和生育阶段有关。其中,发叶期和鳞茎膨大期水分亏缺对洋葱叶片净光合速率、蒸腾速率

和胞间 CO_2 浓度降低程度最为显著,且水分亏缺程度越高,降幅越大。

(3)苗期和成熟期轻度水分调亏稳产的同时可显著提高洋葱水分利用效率和灌溉水利用效率,而发叶和鳞茎膨大期轻度和中度水分调亏均显著降低洋葱产量和水分利用效率。

(4)水分调亏能够显著提高洋葱品质,且亏缺程度越高,可溶性糖和可溶性蛋白含量越高,但紧实度、洋葱油、维生素 C 和丙酮酸含量越低。其中,苗期轻度水分调亏综合品质最佳。

综合考虑产量、水分生产效率、产值及果实品质等指标,通过运用主成分分析法进行综合评价,表明洋葱最佳水分调控处理为苗期轻度水分胁迫,即在苗期保持土壤相对含水率 70%~75%、其余生育期土壤相对含水率为 80%~85%,既能平衡洋葱的营养生长与生殖生长,又能提高灌溉水利用效率和水分利用效率,在稳产的同时,还能获得较好的品质,对河西走廊绿洲灌区洋葱高产、节水调质和产业化发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 赵靖,宋述尧,韩玉珠,等.分蘖洋葱和普通洋葱营养品质的比较[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):106-110.
- [2] 唐利华.调亏灌溉下滴灌甜菜耗水特征及水分生产函数研究[D].新疆:石河子大学,2019.
- [3] 姜良超,仝川,胡敏杰,等.河套灌区玉米光合特征及产量对全膜覆盖下不同滴灌量的响应[J].水土保持学报,2017,31(4):289-297.
- [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] 王玉才,张恒嘉,邓浩亮,等.调亏灌溉对蒜蓝水分利用及产量的影响[J].植物学报,2018,53(3):322-333.
- [6] 李昭楠,李唯,姜有虎,等.西北干旱区戈壁葡萄膜下滴灌需水量和灌溉制度[J].水土保持学报,2011,25(5):249-253.
- [7] 郑建华,黄冠华,黄权中,等.干旱区膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数与优化灌溉制度[J].农业工程学报,2011,27(8):25-30.
- [8] 刘静,成自勇,安飞虎.民勤沙漠绿洲膜下滴灌洋葱灌溉试验研究初探[J].干旱地区农业研究,2012,30(6):55-59.
- [9] 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.
- [10] 李斌.疏勒河流域洋葱膜下滴灌耗水规律及灌溉过程控制研究[J].中国农村水利水电,2017(12):7-12.
- [11] 赵锴,李瑾,徐宁,等.氮磷钾配施对洋葱产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(3):558-563.
- [12] 刘小飞,费良军,段爱旺,等.调亏灌溉对冬小麦产量和品质及其关系的调控效应[J].水土保持学报,2019,33(3):276-282.
- [13] 高佳,张恒嘉,巴玉春,等.调亏灌溉对绿洲灌区膜下滴灌辣椒生长发育和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):25-31.
- [14] 王玉才.河西绿洲蒜蓝水分高效利用及调亏灌溉模式优化研究[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [15] 符崇梅,魏野畴,李娟,等.不同灌溉量、滴灌频率及水肥耦合对洋葱产量和水分利用率的影响[J].节水灌溉,2011(8):36-39.
- [16] Ennahli S, Earl H J E. Physiological limitations to photosynthetic carbon assimilation in cotton under water stress[J].Crop Science,2005,45(6):2374-2382.
- [17] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants[J].Plant Cell and Environment,2002,25(2):275-294.
- [18] Yin C Y, Berninger F, Li C Y. Photosynthetic responses of *Populus przewalski* subjected to drought stress[J].Photosynthetica,2006,44(1):62-68.
- [19] Reddy A R, Chaitanya K V, Vivekanandan M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J].Journal of Plant Physiology,2004,161(11):1189-1202.
- [20] 郭仁松,林涛,田立文,等.调亏灌溉对海岛棉花铃期光合及叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):130-134.
- [21] 邓浩亮,张恒嘉,李福强,等.河西绿洲蒜蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应[J].水土保持学报,2018,32(3):321-327.
- [22] 安玉艳,梁宗锁.植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J].应用生态学报,2012,23(10):2907-2915.
- [23] 张建忠,朱强根.水分胁迫对夏玉米胞间 CO_2 浓度、维管束鞘细胞 CO_2 泄漏和叶片碳稳定同位素的影响[J].土壤学报,2009,46(6):1040-1049.
- [24] Juan E, Bob W, John J, et al. Onion yield and quality response to two irrigation scheduling strategies[J].Scientia Horticulturae,2009,120(3):301-305.
- [25] Pelter G Q, Mittelstadt R, Leib B G, et al. Effects of water stress at specific growth stages on onion bulb yield and quality[J].Agricultural Water Management,2004,68(2):107-115.
- [26] Bekele S, Tilahun K. Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia[J].Agricultural Water Management,2007,89(1):148-152.
- [27] Du T S, Kang S Z, Zhang J H, et al. Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation[J].Agricultural Water Management,2008,95(6):659-668.
- [28] Zayton A M. Effect of soil-water stress on onion yield and quality in sandy soil[J].Misr Journal of Agricultural Engineering,2007,24(1):141-160.