

河西绿洲膜下滴灌调亏对制种玉米 籽粒发育及幼苗生长的影响

梁超¹,张恒嘉¹,肖让²,邓浩亮²,王泽义¹,李珍³,陈涛¹,周三利¹

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃兰州 730070;2.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;3.兰州新区农业科技开发有限责任公司,甘肃兰州 730314)

摘要:为探究河西绿洲灌区膜下滴灌调亏对制种玉米籽粒发育及幼苗生长的影响,以充分灌溉(CK)为对照,设置不同生育时期与调亏梯度双因素随机组合的8种水分调亏处理,共计9个处理,测算了各处理产量、水分利用效率及其籽粒萌发生长、生理活性和营养物质。结果表明:与CK相比,除T1与T3外,不同生育期调亏灌溉均降低了制种玉米籽粒产量,降幅3.07%~26.84%;调亏处理中,T1处理水分利用效率最高(1.61 kg·m⁻³),T3次之(1.59 kg·m⁻³),分别较CK提高6.62%和1.32%;T8处理籽粒的发芽指数和活力指数较CK分别降低30.39%、30.07%,其余中度亏水玉米籽粒的活力指数均较CK无显著差异;丙二醛含量除T1和CK处于较低水平且无显著性差异外,其余处理均提高了MDA含量,较CK增幅13.04%~134.78%;T3(40.64 mg·g⁻¹)和T5(40.35 mg·g⁻¹)处理可溶性蛋白含量较CK无显著差异,其余亏水处理均显著下降,降幅6.90%~16.60%;T1处理的抗氧化酶活性和营养物质含量相对最高,SOD、CAT、可溶性糖、维生素C、根系活力较CK分别提高3.77%、0.10%和19.67%、3.89%、8.56%。运用主成分分析及隶属函数进行灌溉制度评价,结果表明制种玉米最佳水分调亏处理为苗期轻度水分调亏,即苗期相对土壤含水率保持在70%~75%、其余生育期保持在85%~90%可作为河西绿洲灌区制种玉米最佳灌溉模式。

关键词:水分调亏;制种玉米;籽粒发育;产量;幼苗生长;水分利用效率;抗氧化酶活性

中图分类号:S275.6;S513 **文献标志码:**A

Effects of drip irrigation under mulch on seed development and seedling growth of maize in Hexi oasis

LIANG Chao¹, ZHANG Hengjia¹, XIAO Rang², DENG Haoliang²,
WANG Zeyi¹, LI Zhen³, CHEN Tao¹, ZHOU Sanli¹

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. School of Civil Engineering, Hexi University/Hexi Corridor Water Resources Protection and
Utilization Research Institute, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;
3. Lanzhou New District Agricultural Technology Development Co., Ltd. Lanzhou, Gansu 730314, China)

Abstract: To explore the effect of drip irrigation under mulch on the growth of seedling maize grains and seedling growth in Hexi Oasis Irrigation District, we set up 9 treatments including 8 water regulated deficit irrigation treatments based on two-factor random combination of different growth periods and water regulated deficit gradients and a full irrigation treatment (CK) as a control. The yield, water use efficiency, seed germination, physiological activity and nutrients of each treatment were measured. The results showed that: compared with CK, except for T1 and T3, the regulated deficit irrigation at different growth periods reduced the yield of seed-producing maize by 3.07%~26.84%. Among the regulated deficit treatments, T1 treatment had the highest water use efficiency (1.61 kg·m⁻³), followed by T3 (1.59 kg·m⁻³), which were increased respectively by 6.62% and 1.32% compared with CK. The germination index and vigor index of grains of T8 treatment were decreased by 30.39%, 30.07% com-

pared with CK, and the vigor index of the other moderately water-deficient maize grains was not significantly different from that of CK. The content of malondialdehyde was not significantly different except T1 and CK, which were at a lower level. For other treatments, the content of MDA all increased, which was 13.04%~134.78% higher than that of CK. The soluble protein content of T3 ($40.64 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) and T5 ($40.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) treatments was not significantly different than that of CK, and the remaining water deficit treatments were significantly reduced, with a decrease of 6.90%~16.60%. The antioxidant enzyme activity and nutrient content of T1 treatment were relatively optimal, and SOD, CAT, soluble sugar, vitamin C, and root vitality increased individually by 3.77%, 0.10% and 19.67%, 3.89%, 8.56% compared with CK. The results of irrigation system evaluation using principal component analysis and membership function demonstrated that the optimal water deficit adjustment treatment for seed production was mild. Keeping the relative soil moisture content at 70%~75% in the seedling stage and 85%~90% in the rest of the growth period is recommended as the best irrigation mode for seed production in the Hexi Oasis Irrigation District.

Keywords: water deficit regulation; seeds-production maize; seed development; production; seedling growth; water use efficiency; antioxidant enzyme activity

玉米是我国主要的粮食作物之一,2020 年全国玉米播种面积约 3 846.67 万 hm^2 , 商品种子价格达到 36.75 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$ [1]。河西走廊得天独厚的气候资源和优越的灌溉条件,使其成为我国最主要的制种玉米生产基地 [2]。随着现代农业技术与农业机械化的发展,玉米种子单粒精播成为必然的发展趋势,同时对种子质量提出了更高的要求。王密侠等 [3] 研究发现适宜的水分调亏可增加玉米抵御干旱的能力,提高水分利用效率,改善作物品质。陆文娟等 [4] 灌溉试验中发现拔节前期至中期中度亏水降低了玉米叶绿素含量和总干物质量,提高了可溶性糖和脯氨酸含量。农梦玲等 [5] 在对玉米灌溉方式和肥料运筹中发现相同施肥方式时,与常规灌溉相比,隔沟灌溉提高籽粒中可溶性糖和淀粉量。研究发现,科学的亏水灌溉制度对洋葱、板蓝根、向日葵、冬小麦等作物具有较好的增产调质效应 [6-9]。1976 年,国际种子检验协会提出种子活力是种子或者种子批在发芽和出苗期间的活性强度及特性的综合表现,它在种子发育中形成 [10]。种子活力是决定种子质量的关键因素之一 [10],是衡量种子在广泛条件下迅速、整齐发芽的潜力和影响作物高产稳产的因素 [11-12]。制种玉米品质的好坏最主要体现于籽粒活性方面,高活力种子在生产和加工过程中能够抵抗各种环境条件的不利影响,发芽快,成苗率高,幼苗生长整齐,抗逆性强,有利于提高粮食产量和农民的经济效益 [13]。目前关于调亏灌溉对制种玉米的研究多集中于提高水分利用率与增产方面,而对于制种玉米籽粒品质及幼苗抗氧化酶活性鲜有报道。因此,本试验以充分灌溉为对照 (CK),设置 8 种不同生育期及亏水条件的水分调亏处理,通

过测定调亏灌溉后制种玉米籽粒萌发生长和生理指标,以及运用数学评价模型的理论知识,综合种子活力生理、生化 [14] 等方面对调亏灌溉制种玉米籽粒进行综合评价,构建较为合理的评价体系,筛选最优制种玉米亏水处理,以期为河西灌区制种玉米节水灌溉增产增质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 4—9 月在甘肃省张掖市党寨镇制种玉米试验基地 ($100^{\circ}27'E$, $38^{\circ}51'N$) 进行,该地区属于温带大陆性干旱气候,平均海拔 1 474 m 左右,多年平均气温 7.25°C ,极端最高气温和最低气温分别为 36.6°C 和 -10.1°C ,年均日照时数 3 000~3 600 h,平均无霜期 128 d,耕层土壤最大田间持水量为 26.8%,作物萎蔫系数为 7.3%。据近 20 年气象数据资料显示,该试验区年平均降水 128.7 mm 左右,蒸发量 1 639~2 341 mm,昼夜温差大,光能资源充沛,夏季短而炎热,冬季长而严寒,干燥少雨。试验地为沙壤土,地势平坦、土壤肥力中等。

1.2 试验设计

制种玉米品种为新大弓农化有限公司提供品种 NC242,采用覆膜种植方式,于 2020 年 4 月 20 日播种,9 月 11 日收获。小区面积 35 m^2 (长 7.0 m×宽 5.0 m),采用底宽 25 cm,高 20 cm 的地埂分隔,小区周围设保护区,宽度 1 m。2020 年 4 月 8 日播种母本,4 月 15 日和 4 月 22 日分别第一期和第二期播种父本,9 月 10 日收获。父母本种植行比为 1:4,即 1 行父本,4 行母本,东西行向种植,母本宽窄行种植,行距 0.45 m,株距 0.2 m,父本在 2 行母本中间

播种,行距 1.35 m,株距 0.2 m,每小区铺设 5 行膜,每膜种植 2 行。基施化肥 N 105 kg · hm⁻²、P₂O₅ 138 kg · hm⁻²和 K₂O 75 kg · hm⁻²。氮肥追施用量 345 kg · hm⁻²,水肥耦合滴灌施入,追肥施用时间分别为拔节期、吐丝期、灌浆期,追施比例分别为 3 : 4 : 3。试验依据《灌溉试验规范》^[15]并结合当地制种玉米的实际生长进程,将其整个生育期划分为 5 个阶段:苗期、拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期。土壤水分设置 3 个梯度分别为:充分灌水处理(土壤含水量

为田间持水量的 85% ~ 90%)、轻度水分调亏处理(土壤含水量为田间持水量的 70% ~ 75%)、中度水分调亏处理(土壤含水量为田间持水量的 60% ~ 65%);4 个控水时期为:苗期、拔节期、吐丝期、灌浆期。本试验采用随机区组设计,设 8 个水分调亏处理和 1 个对照,每个处理 3 次重复,共 27 个小区,灌水方式为膜下滴灌,用水表控制水量。土壤水分控制到设计范围内,当计划湿润层的土壤水分降低到设计下限时,灌水到土壤水分上限。具体试验设计见表 1。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	田间持水量 Field capacity/%				水分处理 Irrigation pattern
	苗期 Seedling	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	灌浆期 Pustulation period	
T1	70~75	85~90	85~90	85~90	苗期轻度亏水 Mild water deficit in seedling stage
T2	60~65	85~90	85~90	85~90	苗期中度亏水 Moderate water deficit in seedling stage
T3	85~90	70~75	85~90	85~90	拔节期轻度亏水 Mild water deficit in jointing stage
T4	85~90	60~65	85~90	85~90	拔节期中度亏水 Moderate water deficit in jointing stage
T5	85~90	85~90	70~75	85~90	吐丝期轻度亏水 Mild water deficit in silking stage
T6	85~90	85~90	60~65	85~90	吐丝期中度亏水 Moderate water deficit in silking stage
T7	85~90	85~90	85~90	70~75	灌浆期轻度亏水 Mild water deficit in grouting period
T8	85~90	85~90	85~90	60~65	灌浆期中度亏水 Moderate water deficit in filling stage
CK	85~90	85~90	85~90	85~90	充分灌溉 Fully irrigated

1.3 测定内容与方法

1.3.1 土壤含水量 生育期内,每隔 15 d 在长势一致的两株玉米中间位置取土,测深 100 cm,20 cm 为一土层深度,利用烘干法测定土壤含水量。

土壤贮水量计算:

$$SWS(mm) = h \times \rho \times \omega \times 10$$

式中, h 为土层深度(cm), ρ 为土壤容重(g · cm⁻³), ω 为土壤含水量(%)。

1.3.2 产量及农艺性状 玉米成熟后按小区单独收获,自然风干后脱粒并计产。收获前 3~5 d,各小区选取长势均匀的玉米 20 株,测定果穗直径、果穗长度、穗粒数、单株穗粒重、百粒重等指标。产值 = 产量×种子价格,种子价格选取当地当年收购价格(3.77 元 · kg⁻¹)。

1.3.3 籽粒水分利用效率 采用土壤水分平衡方程计算制种玉米耗水量。

耗水量 $ET(mm)$ = 播前 100 cm 土层土壤贮水量-收获时 100 cm 土层土壤贮水量+生育期降水量

+生育期灌水量

水分利用效率 $WUE(kg \cdot m^{-3})$ = 籽粒产量/生育期耗水量

1.3.4 种子萌发测定指标 将收获后的制种玉米自然风干后,收集籽粒自然老化 2 个月。对参试种子进行预处理(冷浸胁迫 4℃,1 d),发芽方法参考杜清福等^[16]的标准发芽试验方法。将处理后的玉米籽粒放入发芽盒中,每盒 20 粒种子,3 次重复,在 25℃ 条件下进行发芽试验。每天定时补充水分并记录发芽种子数,第 4 天统计种子的发芽势(GE),第 7 天结束时统计发芽率(GP)并计算发芽指数(GI)、活力指数(VI)、根系活力等指标。

$$GE = (G_t/T) \times 100\%$$

$$GP = (G_t/T) \times 100\%$$

$$GI = \sum \frac{G_t}{D_t}$$

$$VI = GI \times S$$

式中, G_t 为发芽开始后第 t 天的累计发芽数, D_t 为相

应的发芽天数(d), S 为幼苗鲜重(g), T 为每个发芽盒内的供试种子数。

1.3.5 生长指标测定 从种子萌发试验中各处理发芽盒内随机抽取 6 株生长 7 d 的玉米幼苗,用蒸馏水冲洗干净后,分别测定并统计不同处理下各重复的芽长和根长。用吸水纸吸干表面水分,分别称量并统计不同处理下各重复的鲜重。再将称量过的玉米幼苗置于 105℃烘箱中杀青 30 min 后置 70℃烘箱烘干至恒重,称量并统计玉米芽长、根长干重。

1.3.6 生理指标测定 取第 7 天结束各处理组幼苗相同部位叶片进行下列生理指标的测定:超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原抑制法测定^[17],过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外吸收法^[17],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定^[16],可溶性糖含量采用蒽酮-硫酸法测定^[16],可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定^[17],根系活力采用 TTC 法测定^[17]。

1.3.7 不同生育期水分调亏综合指标隶属函数值 当籽粒品质与所测指标正相关时,其综合隶属函数计算公式为:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$
$$j = 1, 2, 3, \cdots, n$$

当籽粒品质与所测指标负相关时,其综合隶属函数计算公式为:

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$
$$j = 1, 2, 3, \cdots, n$$

式中, X_j 表示第 j 个综合指标, $X_{\min}$ 表示第 j 个综合指标最小值, $X_{\max}$ 表示第 j 个综合指标最大值。

1.3.8 不同生育期水分调亏综合指标权重

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j$$
$$j = 1, 2, 3, \cdots, n$$

式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中重要程度即权重, P_j 为各处理的第 j 个综合指标贡献率。

1.3.9 不同生育期水分调亏综合评价

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad j = 1, 2, 3, \cdots, n$$

式中, D 值为各处理的水分调亏综合评价值。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据进行计算处理,SPSS 26.0 软件对试验数据进行差异显著性分析、相关性分析以及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同调亏灌溉下制种玉米产量和水分利用效率

调亏灌溉显著降低了制种玉米全生育期耗水量(表 2),其中 T4、T6 和 T8 全生育期耗水量降幅较大,较 CK 降低 14.23%、15.88% 和 21.03% ($P < 0.05$),苗期轻度调亏处理 T1 降幅最小,为 9.07%。不同亏水处理均会使制种玉米减产,其中 T1 与 T3 较 CK 减产 3.07% 和 7.17%,T8 处理降幅最大,较 CK 减产 26.84% ($P < 0.05$)。各处理产值变化与产量一致,轻度亏水处理 T1、T3 单方水产值较 CK 显著增加,增幅 6.24% ~ 7.05%,而中度亏水处理 T6、T8 显著降低,降幅为 6.35%、6.47%。T1 处理的水分利用效率最高,达 1.61 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,较 CK 显著增加 6.62%,T3、T5 处理次之,较 CK 分别增加 5.30%、0.66%,而 T4、T6、T8 处理水分利用效率均较 CK 显著降低,降幅 5.30% ~ 7.28%。T8 处理灌溉水利用效率最低,较 CK 降低 5.64% ($P < 0.05$),其次为 T4、T6,较 CK 降低 3.59%、4.62%,T1、T3 处理分别较 CK 提高灌溉水利用效率 9.74%、6.67% ($P < 0.05$)。

表 2 不同调亏灌溉下制种玉米产量和全生育期水分利用状况

Table 2 Yield and water use in whole growth period of seed maize under different regulated deficit irrigation

处理 Treatment	降雨量 Rainfall /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌水量 Irrigation /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	耗水量 Water consumption /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量 Grain yield /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	产值 /(元· hm^{-2}) Output value /(Yuan· hm^{-2})	单方水产值 /(元· m^{-3}) Output value of one cubic meter of water /(Yuan· m^{-3})	水分 利用效率 Water use efficiency /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	灌溉水 利用效率 Irrigation water use efficiency /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
T1	910a	3500	4410b	7095ab	26773ab	9.10a	1.61a	2.14a
T2	910a	3430	4340bc	6630c	25027cd	8.78ab	1.53bc	2.01b
T3	910a	3360	4270bc	6795ab	25713bc	9.03a	1.59ab	2.08a
T4	910a	3250	4160bc	5963de	22480e	8.1cd	1.43cd	1.88de
T5	910a	3410	4320bc	6570c	24743cd	8.59b	1.52bc	1.95bc
T6	910a	3170	4080bc	5745e	21668ef	7.96d	1.41d	1.86de
T7	910a	3240	4150cd	6189d	23335de	8.39bc	1.49bcd	1.92cd
T8	910a	2920	3830d	5355f	20212e	7.95d	1.40d	1.84e
CK	910a	3940	4850a	7320a	27612ab	8.50bc	1.51bc	1.95bc

注:同列不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著,下同。
Note: Different letters in the same column represent significant difference at $P < 0.05$, the same below.

2.2 不同调亏灌溉下制种玉米籽粒萌发状况

由表 3 可知,不同生育期膜下滴灌亏水灌溉对籽粒萌发状况影响不同。处理间,除 T1 外,其他处理的发芽势均低于 CK。与 CK 相比,T1 处理发芽势提高 6.00%。各亏水处理对籽粒发芽率与发芽指数的影响一致, T1 处理发芽率、发芽指数均为最高,分别较 CK 增长 5.56%、2.03%,其余各处理发芽率与发芽指数均低于 CK,降幅 2.22%~30.39%。此外,不同生育期调亏灌溉对制种玉米籽粒活力指数影响不同,其中 T1 处理影响最显著,其次为 T3 和 T5,较 CK 分别增长 41.99%、6.57%和 3.04%,其他处理较 CK 均有不同程度降低,降幅 6.41%~30.07%,其中 T8 降幅最显著,为 30.07%。表明苗期、拔节期和吐丝期轻度水分调亏有利于玉米籽粒活力指数的增长。

2.3 不同调亏灌溉下制种玉米幼苗生长与根系活力

不同生育期水分调亏对制种玉米幼苗生长的影响不同(表 4)。综合 2020 年平均数据分析发现,与 CK 相比,T1 处理的玉米幼苗根长最长,较 CK 提高 8.30%,而其他处理均低于 CK,降幅 1.16%~25.72%,其中 T8 的根长最短,较 CK 降低25.72% ($P<0.05$)。T1 芽长最长,达 18.06 mm,高于 CK($P>0.05$),其余处理的芽长值均低于 CK,其中 T6、T8 分别降低 32.18%、37.63% ($P<0.05$)。不同生育期调亏灌溉对幼苗的干、鲜重影响存在差异,其中 T1 处理的幼苗干、鲜重较 CK 分别提高 7.69%、2.00% ($P>0.05$),而 T8 处理分别较 CK 降低 30.76%、26.00% ($P<0.05$)。其余处理干重、鲜重均较 CK 降低,降幅7.69%~23.07%、8.00%~22.00%。制种玉米生育前期轻度亏水对根系活力影响不显著,而生育中后期中度亏水降低了幼苗根系活力,T1、T2、T3 和 T5 处理较 CK 根系活力无显著性差异,其中 T1 最高,为 $552.65\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,较 CK 增长 8.56%。

表 4 不同调亏灌溉对制种玉米籽粒幼苗生长的影响

Table 4 Effects of different regulated deficit irrigation on seedling growth of seed production maize					
处理 Treatment	根长/mm Length of roots	芽长/mm Length of shoots	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight	根系活力/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) Root activity
T1	50.60a±1.82	18.06a±0.18	0.51a±0.01	0.14a±0.01	552.65a±25.56
T2	45.58ab±1.87	15.42b±0.29	0.44bc±0.01	0.12bc±0.01	468.54bc±27.27
T3	46.18a±2.32	16.00b±0.34	0.46b±0.02	0.12b±0.01	471.67bc±20.63
T4	40.49bc±1.82	14.18c±0.3	0.40de±0.01	0.11cd±0.01	417.44cd±18.46
T5	39.13cd±0.99	13.46c±0.4	0.41cd±0.01	0.11cd±0.01	456.7bc±10.57
T6	37.19cd±0.52	11.95de±0.52	0.39de±0.01	0.10de±0.01	357.79de±7.08
T7	38.47cd±0.98	12.32d±0.35	0.40de±0.01	0.10de±0.01	366.35e±23.84
T8	34.70d±1.67	10.99e±0.41	0.37e±0.01	0.09e±0.01	329.32e±15.05
CK	46.72a±2.59	17.62a±0.39	0.50a±0.01	0.13a±0.01	509.07ab±9.04

T4、T6、T7 和 T8 处理较 CK 根系活力显著下降,其中 T8 处理最低,较 CK 降低 35.31% ($P<0.05$)。

2.4 不同调亏灌溉下制种玉米幼苗生理活性

由图 1 可见,不同生育期的膜下滴灌亏水对玉米幼苗生理活性存在显著影响。各调亏处理均导致玉米幼苗 MDA 含量增加,其中 CK 含量最低 ($0.023\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$),其次为 T1、T3,达 0.025 、 $0.026\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,与 CK 分别提高 8.7%、13.04%,T8 处理玉米幼苗 MDA 含量最高,达 $0.054\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,与 CK 差异性显著。不同生育期调亏灌溉对 CAT、SOD 含量存在影响,在 T1 处理下,CAT、SOD 含量最高,与 CK 相比,分别提高 0.10%、3.77%,无显著差异,T6 与 T8 极不利于幼苗 CAT、SOD 含量的积累,其中 T8 最显著,其次为 T6 处理,分别较 CK 降低 21.44%、15.82%和 17.19%、9.51%。

2.5 不同调亏灌溉下制种玉米幼苗营养物质含量

不同生育期水分调亏对制种玉米幼苗营养物质的影响不同(表 5),其中 T1 处理的可溶性糖含量最高,达 2.19%,较 CK 提高 19.67% ($P<0.05$),T2、T3

表 3 不同调亏灌溉对制种玉米籽粒萌发的影响

Table 3 Effects of different regulated deficit irrigation on seed germination of maize				
处理 Treatment	发芽势/% Germination energy	发芽率/% Germination	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
T1	88a±3	95a±3	25.11a±0.58	17.28a±0.19
T2	75c±5	88abc±3	22.05b±0.50	10.94c±0.53
T3	78bc±3	88abc±8	22.41b±0.22	12.97b±0.80
T4	73c±7	83bcd±3	21.08bc±0.63	11.10c±0.06
T5	65d±5	85bc±5	19.78cd±0.91	12.54bc±0.10
T6	63d±3	80cd±3	18.54de±0.46	11.39bc±0.39
T7	63d±5	83bcd±3	18.63de±0.55	10.89c±0.56
T8	58d±3	75d±5	17.13e±0.65	8.51d±0.54
CK	83ab±3	90ab±3	24.61a±0.39	12.17bc±0.62

处理较 CK 分别下降 7.65%、0.55% ($P>0.05$),其余处理较 CK 均显著下降,降幅 19.67%~40.44%。中度亏水处理严重影响玉米幼苗可溶性蛋白与 Vc 含量,其中 T8 处理最低,分别为 34.71、5.42 mg · kg⁻¹,较 CK 下降 16.6%、18.98% ($P<0.05$)。中度处理 T2、T4 和 T6 较 CK 分别下降 9.63%~7.32%、7.86%

~11.66%、12.97%~14.35%,而轻度亏水处理 T3、T5 对玉米幼苗可溶性蛋白影响不显著,同时 T1、T3 对 Vc 含量影响也不显著,其中 T3、T5 可溶性蛋白较 CK 分别下降 2.35%、3.05%,T1、T3 Vc 含量较 CK 提高 3.89% 和 -1.35%,其余处理较 CK 均显著下降。

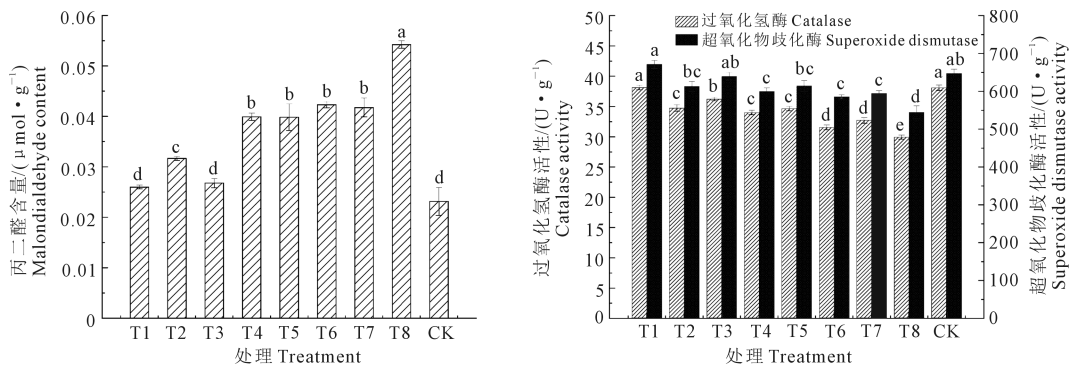


图 1 不同调亏灌溉对制种玉米幼苗 MDA 含量及抗氧化酶活性的影响

Fig.1 Effects of different regulated deficit irrigation on MDA content and antioxidant enzyme activities of seed production maize seedlings

2.6 不同调亏措施下制种玉米籽粒综合评价

2.6.1 各指标间的相关性分析 对制种玉米的 9 个单项指标进行相关性分析(表 6),发现 VI 与 SOD、RA 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.885 和 0.818($P<0.01$)。MDA 与 CAT、MDA 和 GI 极显著负相关,相关系数分别为-0.958、-0.945。Y 与 VI 显著正相关,GI 与 SP 也呈显著正相关关系。因此,仅采用单一或个别几个指标来评价制种玉米籽粒活力不准确,应对其进行综合分析。

2.6.2 不同调亏处理的综合评价 相关性分析表明,各指标间存在一定的信息重叠,因此分别对 9 个不同处理的 9 个指标进行主成分分析(表 7),前 3 个综合指标贡献率分别为87.89%、6.432%、3.456%,

表 5 不同调亏灌溉对制种玉米幼苗营养物质的影响

Table 5 Effects of different regulated deficit irrigation on seed production maize seedling nutrients

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar /(mg · g ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg · g ⁻¹)	Vc /(mg · kg ⁻¹)
T1	21.9a±0.02	38.75bc±0.63	6.95a±0.11
T2	16.9bc±0.08	37.61c±0.95	6.20bc±0.14
T3	18.2b±0.11	40.64a±0.47	6.60ab±0.18
T4	14.7c±0.04	38.35bc±0.88	5.91cd±0.11
T5	12.3d±0.04	40.35ab±0.58	6.24bc±0.15
T6	11.3d±0.05	36.22cd±0.60	5.73de±0.13
T7	12.0d±0.11	37.17c±0.77	6.10cd±0.10
T8	10.9d±0.13	34.71d±0.30	5.42e±0.19
CK	18.3b±0.08	41.62a±0.79	6.69a±0.07

表 6 各指标间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis among various indicators

指标 Index	Y	GI	VI	SOD	CAT	MDA	SS	SP	RA
Y	1.000								
GI	0.904**	1.000							
VI	0.715*	0.754*	1.000						
SOD	0.942**	0.936**	0.885**	1.000					
CAT	0.967**	0.967**	0.785*	0.974**	1.000				
MDA	-0.944**	-0.945**	-0.710*	-0.945**	-0.952**	1.000			
SS	0.831**	0.962**	0.778*	0.901**	0.904**	-0.894**	1.000		
SP	0.852**	0.721*	0.522	0.789*	0.849**	-0.797*	0.587	1.000	
RA	0.934**	0.954**	0.818**	0.954**	0.970**	-0.904**	0.917**	0.768*	1.000

注: **、* 分别表示差异显著($P<0.01$ 、 $P<0.05$)。Y-产量,GI-发芽指数,VI-活力指数,SOD-超氧化物歧化酶,CAT-过氧化氢酶,MDA-丙二醛,SP-可溶性蛋白含量,SS-可溶性糖含量,RA-活力指数。

Note: **, * indicate significant differences ($P<0.01$, $P<0.05$), respectively. Y-yield, GI-germination index, VI-vitality index, SOD-superoxide dismutase, CAT-catalase, MDA-malondialdehyde, SP-soluble protein content, SS-soluble sugar content, RA-activity index.

累计贡献率达 97.778%, 计算不同调亏处理下 3 个主成分的隶属函数值, 结合 3 个主成分的贡献率, 得 3 个主成分权重, 分别为 0.899、0.066、0.035。计算出不同调亏处理综合评价值 (D), 根据综合评价 (D) 值进行综合排序见表 8, 其中 T1 苗期轻度调亏处理 D 值最高, 表明其经调亏灌溉处理后所得种子活力最强。

3 讨 论

对制种玉米不同生育期进行调亏灌溉可有效利用作物补偿或超补偿作用调节作物生长形态, 营养物质积累速率与分配, 最终影响作物的经济产量与品质。范志超等^[18]研究发现调亏灌溉可以改变土层水分垂直分布特征, 轻度水分亏缺较 CK 可提高产量 5%。袁淑芬等^[19]研究发现适当减小灌水量可以有效增加地上部生物量积累量, 提高水分利用效率。这与本试验结论有所差异, 这可能与亏水梯度、试验环境和制种玉米品种等有关。本研究发现, 不同生育期水分调亏均会导致制种玉米产量下降,

表 7 制种玉米各综合指标系数与贡献率			
Table 7 Comprehensive index coefficient and contribution rate for maize seed production			
变量 Variable	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
Y	0.122	-0.306	0.002
GI	0.123	0.122	-0.651
VI	0.104	0.725	1.209
SOD	0.125	0.109	0.358
CAT	0.126	-0.126	-0.031
MDA	-0.122	0.154	0.445
SS	0.117	0.439	-0.797
SP	0.103	-0.917	0.607
RA	0.123	0.087	-0.021
特征值 Eigenvalues	7.91	0.579	0.311
贡献率 Contribution rate/%	87.89	6.432	3.456
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	87.89	94.322	97.778

表 8 不同调亏灌溉制种玉米籽粒隶属函数综合评价
Table 8 Comprehensive evaluation of the membership functions of maize grains in seed production with different regulated deficit irrigation

处理 Treatment	F1	F2	F3	U(X1)	U(X2)	U(X3)	D 值 D value	排序 Sort
T1	1.44631	2.07424	0.49591	1	1	0.590750413	0.98553492	1
T2	0.18072	0.09698	-1.52295	0.590901891	0.42691106	0	0.559228652	4
T3	0.71486	-0.50569	-0.00901	0.763561018	0.252233217	0.443002824	0.718594772	3
T4	-0.27518	-0.07547	-0.30862	0.443533606	0.37692816	0.355332192	0.436034677	6
T5	0.00701	-1.01714	1.8945	0.534750663	0.103994574	1	0.522859221	5
T6	-0.89954	0.52267	0.55416	0.24171114	0.550293028	0.607795286	0.274949553	8
T7	-0.67285	-0.16514	0.46201	0.314987991	0.350938212	0.580830736	0.326749168	7
T8	-1.6473	0.44549	-0.74112	0	0.527923181	0.228775842	0.042813836	9
CK	1.14596	-1.37594	-0.82488	0.902912778	0	0.204266339	0.818823749	2
权重 Weights				0.899	0.066	0.035		

注: F1、F2、F3 分别表示主成分 1、2、3 的综合指标值, U(X1)、U(X2)、U(X3) 分别表示主成分 1、2、3 的隶属函数值。
Note: F1, F2, and F3 represent the comprehensive index values of principal components 1, 2, and 3, respectively. U(X1), U(X2), and U(X3) represent the membership function values of principal components 1, 2, and 3, respectively.

降幅 3.07% ~ 26.84%, 其中, T1 与 T3 较 CK 降低 3.07% 和 7.17%, 而水分利用效率与灌溉水利用效率分别提高 6.62%、5.3% 与 9.74%、6.67% ($P < 0.05$)。这可能是由于在苗期与拔节期, 茎叶增长迅速, 玉米主要进行营养生长, 而到吐丝期与灌浆期, 玉米从营养生长进入到生殖生长阶段, 水分亏缺导致玉米光合活动与营养积累等速率降低, 复水后难以补偿, 最终影响产量与水分利用状况, 这与薛冯定等^[20]研究结果一致。

作物长时间在逆境生长会造成严重的损害, 而适当的逆境刺激(抗性锻炼)有利于作物激发形态与生理上的正效益变化。连彩云等^[21]对制种玉米进行不同灌溉定额研究发现, 玉米种子同一施肥情况下发芽率、发芽指数、活力指数随灌水量变化呈现先增加后减少的趋势, 适当的灌水量可以有效增加种子活力。陈蕾太等^[22]研究得出不同逆境条件下小麦种子活力与种子萌发相关酶活性存在不同差异。本研究发现, T1 处理发芽势、发芽率和发芽

指数分别较 CK 增长 6.02%、5.55% 和 2.03% ($P>0.05$), 而活力指数较 CK 增长 41.99% ($P<0.05$)。植物种子萌发初期的根长是评价种子品级的综合指标之一, 通常认为它们与种子品级呈正相关^[23]。本研究发现, 不同调亏处理对籽粒萌发生长影响各异, 其中 T1 较 CK 根长提高 8.30%, T2、T3 处理与 CK 无明显差异, 其余处理均有所下降, 降幅 13.33%~25.73%, 同时 T1 处理的芽长与干物质量均达到最高, 较 CK 提高 4.4% 和 7.69%, 原因可能为生育前期进行水分亏缺, 作物生物量分配优先倾斜于根部生长, 提高根系吸水能力, 缓解干旱胁迫^[24]。即导致其籽粒生长进化过程中可能同样优先加速根部生长, 增强营养物质吸收能力。

作物处于逆境胁迫时, 细胞内自由基代谢平衡被破坏, 致使作物中丙二醛含量提高^[25], 其含量及质膜透性都是膜脂过氧化作用强弱和质膜受破坏程度的评价指标^[26]。植物受逆境伤害的程度可用 MDA 含量来表示^[25]。本试验结果表明, 不同生育期水分亏缺效果在各处理玉米籽粒幼苗中有明显的差异, 随着生育期的推进以及水分亏缺的增加, 玉米幼苗中 MDA 含量均呈显著上升的趋势, 而生育前期轻度水分亏缺 T1、T3 处理 MDA 含量较 CK 仅增长 8.70%、13.04%。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)不仅是植物体内酶促系统^[27]的主要成分, 还是活性氧清除系统^[28]的主要依托, 可以有效降低自由基水平, 保护膜结构, 是植物减轻逆境胁迫危害的机理之一。本试验发现, 制种玉米苗期轻度亏水 T1 可以始终保持较高的 SOD 与 CAT 含量, 较 CK 分别提高 0.10% 和 3.77%, 其次为拔节期轻度亏水(T3), 较 CK 仅降低 4.96% 和 1.18%, 均无显著性差异。而制种玉米生育后期轻中度亏缺与生育前期中度亏缺均使幼苗 SOD 与 CAT 含量下降, 下降幅度 9.08%~21.44% 和 5.03%~15.82%, 其中 T8 处理 SOD 与 CAT 含量均达到最低, 降幅分别为 21.44% 和 15.82%。可能原因为作物生育后期受到的逆境胁迫伤害远大于生育前期, 过度的水分亏缺致使作物体内活性氧增多, 造成膜质过氧化, 破坏了细胞膜系统从而使抗氧化酶活性降低。

可溶性糖既是渗透调节剂, 也是合成其他有机溶质的碳架和能量的来源, 还可在细胞内无机离子浓度高时起保护酶类的作用^[29], 植物体内可溶性蛋白持水强度大, 可以延缓种子老化, 为植物抵抗逆境提供主要的物质和能量, 从而增强植物的抗逆性^[28]。有研究表明逆境胁迫可以诱导小白菜^[29]、玉米^[30]体内可溶性糖与可溶性蛋白含量的增加。

本试验发现, 处理 T1 可溶性糖含量与维生素 C 含量均达到最大, 较 CK 提高 19.67%、3.89%。而处理 T3 与 CK 无显著差异, 其余调亏处理均导致可溶性糖与维生素 C 含量下降, 降幅 7.65%~40.44%、7.32%~18.98%。处理 CK 可溶性蛋白含量最高, 达 $41.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 中度调亏处理幼苗内可溶性蛋白含量显著下降, 降幅 7.88%~16.60%, 其中 T8 处理降幅最大, 达 16.60%, T3、T5 处理较 CK 分别下降 2.35%、3.05% ($P>0.05$), 而 T1 处理较 CK 显著下降 6.90% ($P<0.05$), 原因可能为, T1 根系活力最高, 较高的根系活力可以在促进幼苗生长的同时, 使较多的种子蛋白质水解产物转化为幼苗生长所需的其他能源物质, 进而导致可溶性蛋白含量降低^[30]。而其余调亏处理均导致幼苗根系活力低于 CK, 降幅 7.96%~35.31%, 其中 T6、T8 处理降幅最大, 分别为 29.72%、35.31%。

4 结 论

1) 苗期与拔节期轻度水分调亏稳产的同时可显著提高制种玉米水分利用效率与灌溉水利用效率, 而吐丝期与灌浆期中度调亏均显著降低制种玉米产量与水分利用效率。

2) 不同生育期水分调亏可引起制种玉米籽粒发芽指数与活力指数降低, 而苗期轻度水分亏缺籽粒发芽指数与活力指数与 CK 无显著差异。

3) 水分亏缺可显著提高玉米幼苗丙二醛含量, 且亏缺程度越高, 丙二醛含量就越高, 但过氧化氢酶与超氧化物歧化酶含量越低, 其中苗期轻度调亏抗氧化酶活性含量最高。

4) 不同生育期水分调亏均可降低玉米幼苗可溶性蛋白含量, 其中灌浆期中度调亏最低, 达 $34.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 而拔节期与吐丝期轻度水分调亏无显著影响。苗期与拔节期轻度水分调亏对幼苗可溶性糖、维生素 C 与根系活力较 CK 影响不显著, 而其余处理均有降低, 降幅为 7.65%~40.44%、7.32%~18.98%、7.77%~35.31%。

综合考虑产量、水分利用状况、籽粒萌发生长、生理活性与营养物质等指标, 运用主成分分析法及隶属函数法进行综合值的计算, 并进行综合排序, 表明制种玉米最佳水分调亏处理为苗期轻度水分调亏, 即在苗期土壤含水率保持在 70%~75%, 其余生育期相对土壤含水率为 85%~90%, 可在稳产的同时提高水分利用效率, 获得较好的籽粒活性, 对河西走廊地区制种玉米高产、节水增质和籽粒活性的提升具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘春青,景琦.我国玉米种业市场规模变化趋势分析[J].中国种业, 2020, (12): 4-7.
- LIU C Q, JING Q. Analysis of market scale trend of maize seed industry in our country[J]. China Seed Industry, 2020, (12): 4-7.
- [2] 张亚宁,张明军,王圣杰,等.气候变化对河西走廊主要农作物的影响[J].生态环境学报, 2017, 26(8): 1325-1335.
- ZHANG Y N, ZHANG M J, WANG S J, et al. Impacts of climate change on main crops in the Hexi Corridor[J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26(8): 1325-1335.
- [3] 王密侠,康绍忠,蔡焕杰,等.玉米调亏灌溉节水调控机理研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 87-90.
- WANG M X, KANG S Z, CAI H J, et al. Study on the mechanism of saving water of regulated deficit irrigation in maize[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2004, 32(12): 87-90.
- [4] 陆文娟,李伏生,农梦玲.不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响[J].生态学报, 2014, 34(18): 5257-5265.
- LU W J, LI F S, NONG M L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on physiological characteristics and water use of maize under different water and fertilizer conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5257-5265.
- [5] 农梦玲,张潇潇,李伏生.沟灌方式和肥料运筹对甜糯玉米产量、品质和土壤酶活性的影响[J].灌溉排水学报, 2016, 35(10): 52-57.
- NONG M L, ZHANG X X, LI F S. Effects of furrow method and fertilizer management on yield and quality of sweet-waxy maize and soil enzyme activity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 52-57.
- [6] 邓浩亮,张恒嘉,肖让,等.膜下滴灌调亏在提升河西绿洲洋葱产量及品质的应用[J].水土保持学报, 2020, 34(4): 201-208.
- DENG H L, ZHANG H J, XIAO R, et al. Application of mulched drip irrigation under water deficit in improving the productivity and quality of onion in Hexi Corridor[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 201-208.
- [7] 王泽义,张恒嘉,王玉才,等.板蓝根耗水特性和其产量及品质对膜下滴灌调亏的响应[J].水土保持学报, 2020, 34(3): 318-325.
- WANG Z Y, ZHANG H J, WANG Y C, et al. Responses of water consumption characteristics, yield, and quality of *Isatis tinctoria* to mulched drip irrigation under water deficit[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 318-325.
- [8] 王璐,张恒嘉,巴玉春,等.河西绿洲膜下滴灌调亏对食用向日葵耗水特征、光合特性及品质的影响[J].水土保持学报, 2020, 34(4): 209-216.
- WANG L, ZHANG H J, BA Y C, et al. Effects of drip irrigation deficit adjustment under mulch on water consumption, photosynthetic characteristics, and quality of edible sunflower in Hexi Oasis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 209-216.
- [9] 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, 291.
- LIU X F, FEI L J, DUAN A W, et al. Effect of regulated deficit irrigation (RDI) on grain yield and quality traits of winter wheat and their relationship[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 276-282, 291.
- [10] 毕辛华,戴心维.种子学[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- BI X H, DAI X W. Seed science[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [11] HENNING F A, MERTZ L M, ABRAHÃO E, et al. Chemical composition and reserve mobilization in soybean seeds with high and low vigor[J]. Bragantia, 2010, 69(3): 727-734.
- [12] ZHANG H, WANG W Q, LIU S J, et al. Proteome analysis of poplar seed vigor[J]. Plos One, 2015, 10(7): e0132509.
- [13] MAHENDER A, ANANDAN A, PRADHAN S K. Early seedling vigour, an imperative trait for direct-seeded rice; an overview on physiological parameters and molecular markers[J]. Planta, 2015, 241(5): 1027-1050.
- [14] WOODSTOCK L W, TAO K L J. Prevention of imbibitional injury in low vigor soybean embryonic axes by osmotic control of water uptake[J]. Physiologia Plantarum, 1981, 51(1): 133-139.
- [15] 中国灌溉排水发展中心. SL13-2015. 中华人民共和国灌溉实验规范[S].北京:中国水利水电出版社, 2015.
- China Irrigation and Drainage Development Center. SL13-2015. Specifications for irrigation experiment of the People's Republic of China[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [16] 杜清福,贾希海,律保春,等.不同类型玉米种子活力检测适宜方法的研究[J].玉米科学, 2007, 15(6): 122-126.
- DU Q F, JIA X H, LV B C, et al. Study on the fitting vigor testing methods of different types maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(6): 122-126.
- [17] 蔡庆生.植物生理学实验[M].北京:中国农业大学出版社, 2013.
- CAI Q S. Plant physiology experiment[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.
- [18] 范志超,张巨松,石俊毅,等.调亏灌溉对滴灌棉花光合生产的调节补偿效应[J].西北农业学报, 2017, 26(10): 1461-1469.
- FAN Z C, ZHANG J S, SHI J Y, et al. Effect of soil water content on photosynthetic and yield of drip irrigation in cotton under regulated deficit irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2017, 26(10): 1461-1469.
- [19] 袁淑芬,陈源泉,闫鹏,等.水分胁迫对华北春玉米生育进程及物质生产力的影响[J].中国农业大学学报, 2014, 19(5): 22-28.
- YUAN S F, CHEN Y Q, YAN P, et al. Effects of water stress on growth of spring maize and the morphological and physiological reaction during different growth stages in North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 22-28.
- [20] 薛冯定,张富仓,索岩松,等.不同生育时期亏水对河西地区春玉米生长、产量和水分利用的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 59-65.
- XUE F D, ZHANG F C, SUO Y S, et al. Effect of water deficit at different growth stages on growth, yield and water use of spring maize in Hexi area[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 59-65.
- [21] 连彩云,马忠明.水肥用量对制种玉米水肥利用及种子活力的影响[J].干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 128-135.
- LIAN C Y, MA Z M. Rates of water and fertilizer on their use efficiency and seed vigor of seed maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 128-135.
- [22] 陈蕾太,孙爱清,杨敏,等.逆境条件下小麦种子活力与种子萌发相

关酶活性及其基因表达的关系[J].应用生态学报,2017,28(2): 609-619.

CHEN L T, SUN A Q, YANG M, et al. Relationships of wheat seed vigor with enzyme activities and gene expression related to seed germination under stress conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 609-619.

[23] 蔡卓山.水分胁迫下外源 NO 对苜蓿种子萌发和幼苗抗旱生理的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2013.

CAI Z S. Effects of exogenous nitric oxide on seed sprouting and seedling physiological characteristics of alfalfa under water stress[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.

[24] 李文尧,张岁岐,丁圣彦,等.干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J].生态学报,2010,30(19):5140-5150.

LI W R, ZHANG S Q, DING S Y, et al. Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5140-5150.

[25] 张晓艳,杨忠仁,郝丽珍,等.温度及盐胁迫对地梢瓜种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J].西北植物学报,2017,37(6):1166-1174.

ZHANG X Y, YANG Z R, HAO L Z, et al. Effect of temperature and salt stress on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Cynanchum thesioides* (freyn). K. schum [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(6): 1166-1174.

[26] 吕婷婷,肖云华,吴群,等.外源 5-氨基乙酰丙酸对盐胁迫下菘蓝种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J].西北植物学报,2013,33(10):2037-2042.

LV T T, XIAO Y H, WU Q, et al. Effect of exogenous 5-aminolevulinic acid on seed germination and antioxidase activities of *Isatis indigotica* seedlings under salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-

Occidentalia Sinica, 2013, 33(10): 2037-2042.

[27] 王穗子,金则新,李月灵,等.铜胁迫条件下 AMF 对海州香薷光合色素含量、抗氧化能力和膜脂过氧化的影响[J].生态学报,2015,35(23):7699-7708.

WANG S Z, JIN Z X, LI Y L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the photosynthetic pigment contents, anti-oxidation capacity and membrane lipid peroxidation of *Elsholtzia splendens* leaves under copper stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7699-7708.

[28] 孟红梅,张芬琴,韩多红,等.Ca²⁺对 Cd²⁺胁迫下板蓝根种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(1): 161-165.

MENG H M, ZHANG F Q, HAN D H, et al. The effect of Ca²⁺ on radix isatidis seed germination and seedling physiological characteristics under Cd²⁺ stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 161-165.

[29] 任艳芳,何俊瑜,杨军,等.外源 H₂O₂对盐胁迫下小白菜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].生态学报,2019,39(20):7745-7756.

REN Y F, HE J Y, YANG J, et al. Effects of exogenous hydrogen peroxide on seed germination and physiological characteristics of pak-choi seedlings (*Brassica chinensis* L.) under salt stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7745-7756.

[30] 刘娜,白万明,苏玲玲,等.油橄榄加工废液对小麦和玉米种子萌发及相关酶活性的影响[J].西北植物学报,2016,36(3):565-572.

LIU N, BAI W M, SU L L, et al. Effect of olive mill waste water on the germinability and related enzyme activities of wheat and maize seeds[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(3): 565-572.



(上接第 150 页)

[32] 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.

LI J M, PAN T H, WANG L H, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 82-90.

[33] SHEN Y F, LI S Q, SHAO MA. Effects of spatial coupling of water and fertilizer applications on root growth characteristics and water use of winter wheat [J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(4): 515-528.

[34] 马戌,王进鑫,张玉玉,等.水肥条件对煤矸石土壤上两种牧草光合及生物量的影响[J].水土保持研究,2021,28(1):179-187.

MA Q, WANG J X, ZHANG Y Y, et al. Effects of water and fertilizer conditions on photosynthesis and biomass of two forage grasses in coal gangue soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 179-187.

[35] WANG Y, FU D L, PAN L L, et al. The coupling effect of water and fertilizer on the growth of tea plants [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz][J]. Journal of Plant Nutrition, 2016, 39(5): 620-627.

[36] 张经廷,吕丽华,张丽华,等.作物水肥耦合类型量化方法在华北冬

小麦水氮配置中的应用[J].中国农业科学,2019,52(17): 2997-3007.

ZHANG J T, LV L H, ZHANG L H, et al. A novel method for quantitating water and fertilizer coupling types and its application in optimizing water and nitrogen combination in winter wheat in the North China plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(17): 2997-3007.

[37] 孙善文,章永江,曹坤芳.热带季雨林不同小生境大戟科植物幼树的叶片结构、耐旱性和光合能力之间的相关性[J].植物生态学报,2014,38(4):311-324.

SUN S W, ZHANG Y J, CAO K F. Correlations among leaf structure, drought tolerance and photosynthetic capacity in saplings of *Euphorbiaceae* from different micro-habitats in a seasonal tropical rainforest [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(4): 311-324.

[38] 吴骏恩,刘文杰,朱春景.稳定同位素在植物水分来源及利用效率研究中的应用[J].西南林业大学学报,2014,34(5):103-110.

WU J E, LIU W J, ZHU C J. Application of stable isotope techniques in the study of plant water sources and use efficiency[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2014, 34(5): 103-110.