

不同灌溉方式和灌水量对土壤水盐及 燕麦生长特征的影响

赵文举^{1,2}, 张雪儿^{1,2}, 李建承³, 俞海英^{1,2}

(1.兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2.农业农村部智慧农业节水灌溉装备重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3.兰州新区农业科技开发有限责任公司, 甘肃 兰州 730300)

摘要: [目的] 探究不同灌溉方式和灌水量对土壤水盐变化规律及燕麦生长特征的影响, 为提高盐碱地作物的生产效能和土壤水分管理提供科学参考。[方法] 采用盆栽试验, 设置3种灌溉方式: 常规灌溉、固定单侧灌溉(fixed unilateral root zone irrigation, FURI)、交替灌溉(alternative partial root zone irrigation, APRI), 3组灌水量: W_1 ($60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$, θ_f 为田间持水率), W_2 ($70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$) 和 W_3 ($80\% \theta_f \sim 90\% \theta_f$), 以常规灌溉作为对照, 共9组交互处理。[结果] ①不同灌溉方式下, 土壤各层含水率变化趋势基本一致, 随灌水量增加洗盐效果越显著, 常规灌溉的深层含水率总体高于其他两种灌溉方式。②燕麦株高、叶绿素相对含量(relative chlorophyll content of leaves, SPAD)、品质随灌水量的增加而上升, 与常规灌溉相比, W_2 灌溉水平下, 分根交替灌溉处理的粗脂肪, 粗蛋白, β -葡聚糖含量分别增加7.02%, 3.76%, 6.06%, 但降低了燕麦叶片的SPAD值, 影响其光合能力。③随着燕麦生育期的推进, 土壤盐分均呈现不同程度的累积, 分根交替灌溉的积盐率最低, 同时对燕麦根系生长、水分利用效率及产量影响显著, 其中根系总长、根系总表面积、根系总体积较相同灌水量(W_2)的常规灌溉分别增加6.75%, 6.92%, 12.5%, 水分利用效率提高17.32%。[结论] 采用分根交替灌溉方式下的中等灌水量(W_2)有利于提高燕麦的生产效能, 对盐分累积的控制效果较好。

关键词: 分根交替灌溉; 土壤水盐; 燕麦; 水分利用效率; 品质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0016-10

中图分类号: S275.3

文献参数: 赵文举, 张雪儿, 李建承, 等. 不同灌溉方式和灌水量对土壤水盐及燕麦生长特征的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 16-25. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.003; Zhao Wenju, Zhang Xueer, Li Jiancheng, et al. Effects of different irrigation methods and irrigation amounts on soil water and salt, and oat growth characteristics [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 16-25.

Effects of Different Irrigation Methods and Irrigation Amounts on Soil Water and Salt, and Oat Growth Characteristics

Zhao Wenju^{1,2}, Zhang Xueer^{1,2}, Li Jiancheng³, Yu Haiying^{1,2}

(1.College of Energy & Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2.Key Laboratory of Smart Agriculture Irrigation Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3.Lanzhou New Area Agricultural Science and Technology Development Co.Ltd, Lanzhou, Gansu 730300, China)

Abstract: [Objective] The effects of different irrigation methods and irrigation amounts on soil water, soil salt changes, and oat growth characteristics were explored to provide a scientific reference for improving crop production efficiency and soil water management in saline-alkali land. [Methods] Pot experiments were conducted with three irrigation treatments: conventional irrigation, fixed unilateral root-zone irrigation (FURI), and alternate partial root-zone irrigation (APRI). Three irrigation amounts were evaluated: W_1 ($60\% \theta_f \sim 70\% \theta_f$, θ_f is field water-holding capacity), W_2 ($70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$), and W_3 ($80\% \theta_f \sim 90\% \theta_f$). Conventional irrigation was used as the control. Therefore, there were a total of nine treatment combinations.

收稿日期: 2023-11-15

修回日期: 2024-01-04

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“河西绿洲灌区多源遥感的土壤水盐演变机理与反演模型研究”(52379042); 甘肃省东西协作专项(23CXNA0025); 甘肃省重点研发计划项目“兰白经济区暴雨山洪灾害风险识别与预警技术研发与示范”(23YFFA0019)

第一作者: 赵文举(1981—), 男(汉族), 甘肃省永昌县人, 博士, 教授, 主要从事寒旱区生态水利方面的研究。Email: wenjuzhao@126.com.

[Results] ① Under the different irrigation treatments, the change trend of water content in each soil layer was basically the same. As irrigation amount increased, the effect of salt leaching was more significant. The deep water content of conventional irrigation was generally higher than that of the other two irrigation treatments. ② Plant height, relative chlorophyll content of leaves, and oat quality increased with increasing irrigation amount. The contents of crude fat, crude protein, and β -glucan in oat were 7.02%, 3.76%, and 6.06%, respectively, greater under the W_2 irrigation level than under the conventional irrigation level, but the SPAD values of oat leaves were lower under W_2 , which affected the photosynthetic capacity of oat. ③ Soil salinity showed different degrees of accumulation as oat growth progressed, and the salt accumulation rate with alternate partial root-zone irrigation was the lowest. At the same time, soil salinity had a significant effect on oat root growth, water use efficiency, and yield. Total root length, total root surface area, and total root volume increased by 6.75%, 6.92%, and 12.5%, respectively. Water use efficiency increased by 17.32% compared with conventional irrigation with the same irrigation amount (W_2). [Conclusion] The medium irrigation amount (W_2) under alternate partial root-zone irrigation was beneficial for improving the production efficiency of oat and was better at controlling salt accumulation.

Keywords: alternate partial root-zone irrigation; soil water and salt; oat; water use efficiency; quality

水资源短缺和土壤盐碱化是制约中国粮食生产的重要因素^[1],水资源短缺和供需不平衡的问题日益突出,已经成为威胁中国粮食安全的关键因素之一^[2].土壤盐碱化问题在中国干旱半干旱地区尤为突出,如西北旱区盐碱化耕地面积约占耕地面积的15%,新疆的盐碱化耕地面积约 2.33×10^6 hm²,占耕地面积的37.7%^[3],严重威胁中国 1.20×10^8 hm²耕地红线。因此,研究高效节水灌溉技术,合理开发利用盐碱地是保障中国粮食安全、藏粮于地的重要途径之一。适宜的灌溉方式及灌水量使盐分被淋洗出湿润区,积累于远离活动根区的湿润峰处,能为作物生长创造良好的土壤环境^[4]。分根交替灌溉(alternative partial root zone irrigation, APRI)是康绍忠^[5]提出的一种可提高作物水分利用效率和改善果实品质的亏缺灌溉技术,通过改变和调节作物根系区域的湿润方式,使其产生水分胁迫信号传递至叶片气孔,减小蒸腾耗水;同时可以改善根系的吸收功能,达到不影响光合产物而明显提高水肥利用效率的目的^[6],已得到广泛应用。Aragües R.等^[7]研究发现,持续亏缺灌溉(SDI)和分根交替灌溉(APRI)均有利于保存果园高中等灌水量,而土壤盐分和碱度没有增加。Kaman H.等^[8]研究了不同亏缺灌溉条件下(FULL, APRI-50, APRI-75 分别为完全灌溉、50%亏缺灌溉、75%亏缺灌溉)黄瓜根区土壤水分状况、产量及盐分积累情况,结果表明:APRI处理的土壤含水量相对较低, FULL > APRI-75 > APRI-50;盐分积累在30 cm左右最高,且在APRI-50下的根区干燥侧具有较高的盐度,但是具有最低的根密度,黄瓜产量随灌水量的增加而降低。Zhou L.等^[9]在内蒙古河套灌区研究了亏缺灌溉对土壤水分分布及春小麦生长的

影响,试验结果表明:在常规灌溉条件下,0—100 cm土层土壤含水量和亏缺灌溉(80%APRI)条件下,作物实际需水量随土层深度的增加而增加;60%APRI亏缺灌溉条件下,土壤水分主要分布在20—40 cm的亚表层和40—60 cm的中层。60%APRI的亏缺灌溉对春小麦的生长发育和产量影响较大,比常规灌溉减产10%~37%,而80%APRI的亏缺灌溉对春小麦产量影响不大,仅比常规灌溉减产5%~13%,而可实现春小麦的节水灌溉。

土壤盐碱化的成因存在特殊的地域差异性,西北干旱区的盐碱土是由于气候干旱、生态环境脆弱,加上“有灌无排”的不合理灌溉方式,造成水体中的可溶盐随土壤毛管水上升,从而在土表聚集^[10],选择耐盐碱性植物是改良盐碱地的生物措施。与粮食作物相比,牧草(苜蓿、碱蓬、碱茅、毛苕子、黑麦草、怪柳、缘毛雀麦、高丹草等)对土壤条件和气候的协调性要求较低,通过种植抗盐碱牧草是目前利用盐碱化土壤的一种经济有效的途径。研究表明^[11]:苜蓿与新牧草混播有利于土壤速效钾积累,与缘毛雀麦混播有利于土壤有机质、氮素、速效磷积累,与长穗偃草混播有利于降低土壤pH值显著。燕麦(*Avena sativa*),禾本科燕麦属一年一熟抗盐碱优良牧草,是中国北方及农牧交错区重要的粮饲兼用性作物之一^[12],它主要是通过调节体内各个器官的无机渗透离子(K^+ , Na^+)及有机渗透物(有机酸、可溶性糖)等物质的含量维持植株体内的渗透平衡,以适应盐碱胁迫^[13]。卢培娜等^[14]研究表明,腐熟秸秆配施菌肥有助于增强盐碱地燕麦植株的渗透调节能力,提高其适应性,促进其生长,并显著提高其产量,适宜在盐碱地区进行推广应用。

分根交替灌溉具有节水稳产,可改变植株性状及生物量,提升作物品质,显著减少灌溉水量和提高水分利用效率等优势,已被广泛推广和应用于农业种植生态系统中。为进一步深化研究分根交替灌溉,本试验以抗盐碱先锋作物燕麦为研究对象,探究分根交替灌溉对土壤水盐及燕麦生长特征的影响,为提高盐碱地作物的生产效能和土壤水分管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于 2022 年 6—9 月在兰州理工大学试验基地(东经 103°46′北纬 36°3′)的室外防雨棚内进行,该地区属于典型的温带大陆性气候,年平均降水量 327 mm,年均蒸发量为 1 164.5 mm,蒸发强度大。供试燕麦品种为莫妮卡,种植于高 60 cm,外径 30 cm 的土柱内,管壁自底部每隔 10 cm 对孔穿,共 10 孔,孔径为 2.5 cm,便于不同土层水盐测量,管底铺有纱布并均匀打有若干小孔以提供良好的通气条件。固定单侧灌溉和交替灌溉处理的土柱中间用上端开有“V”形缺口的矩形防水亚克力板隔开,并在“V”形缺口处设置与其完全贴合的防水圆台,以定植燕麦和防止水分侧渗。供试土壤取自兰州新区盐碱地大田土壤,其基本理化性质为:pH 值为 8.5,电导率(EC)为 20.7 dS/m,全氮为 0.29 g/kg,全磷 0.77 g/kg,全钾 23.20 g/kg,田间持水率(θ_f)为 24.51%。该试验地土壤属于中度盐碱土壤。土壤进行风干、碾碎、磨细后过 2 mm 筛,按容重为 1.35 g/cm³ 分 5 层装土,土柱装填总高度为 50 cm。燕麦种植密度为每桶 10 株,株距为 2.3 cm,随即开始灌溉处理。

播种前将土柱内土壤灌水至土壤含水率为田间持水率($\theta_f = 24.51\%$),预先将燕麦在人工气候箱中催芽 2 d 后播种于室内穴盘中避光常规培养,并培育 7 d,然后将需要进行分根灌溉处理的燕麦须根穿过防水圆台的“根茎通过孔”,随后根系会生长于分隔板的两侧,确保试验进行分根处理。

1.2 试验设计

试验设置灌溉方式和灌水量 2 个因素。灌溉方式为 3 种方式:固定单侧灌溉(FURI,每次只对一侧进行灌水,另一侧保持干燥状态)、分根交替灌溉(APRI,对根系两侧进行控制性交替灌水)、常规灌溉(CTRI)。以田间持水量 θ_f 为基准,灌水量为 3 个水平,即:W₁ (60% $\theta_f \sim 70\% \theta_f$),W₂ (70% $\theta_f \sim 80\% \theta_f$),W₃ (80% $\theta_f \sim 90\% \theta_f$)。用 AZS-100 土壤水分速测仪监测,每日 1 次,当土壤含水率降至或接近该处理水分下限即进行灌水,灌水至水分控制上限。采

用交互试验进行,共 9 组处理,每个处理重复 3 次,试验方案见表 1。燕麦各生育期划分及灌水总量见表 2。不同处理的试验参见文献[15]。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处 理	灌水下限	灌水上限
CTRI-W ₁	60% θ_f	70% θ_f
CTRI-W ₂	70% θ_f	80% θ_f
CTRI-W ₃	80% θ_f	90% θ_f
APRI-W ₁	60% θ_f	70% θ_f
APRI-W ₂	70% θ_f	80% θ_f
APRI-W ₃	80% θ_f	90% θ_f
FURI-W ₁	60% θ_f	70% θ_f
FURI-W ₂	70% θ_f	80% θ_f
FURI-W ₃	80% θ_f	90% θ_f

注: θ_f 为田间持水量。下同。

表 2 燕麦各生育期划分及灌水总量

Table 2 Division of oat growth stage and total amount of irrigation

生育期	生育期日期划分	灌水时间	灌水总量/mm
苗 期	0612—0715	0624 0710	9 080
分蘖期	0715—0805	0716 0725	9 768
拔节期	0805—0817	0807 0815	10 516
抽穗期	0817—0906	0825 0902	10 177
灌浆期	0906—0920	0915	9 479
成熟期	0920—0929	0924	6 991

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率及含盐量 本试验土壤水盐的测得选择各生育期的灌水当天、灌水前 5 d,灌水后 5 d 各测 1 次。

土壤含水率测定:采用烘干法每次只对灌水处理的土壤含水率进行测定,每次钻取 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm 的各层土样,每层 3 次重复。

土壤含盐量测定:由于土水溶液当中的盐分含量与电导率成正比,故本实验采用所测得的电导率值(EC)来表示土壤含盐量。对所取得土样烘干、磨细后,采用土水质量比为 1:5 的比例进行浸提,采用 DDS-11A 数显电导率仪来测定。

1.3.2 生长指标 株高、茎粗测定:在燕麦各个生育期用卷尺及游标卡尺测定土柱内标记的 3 株代表性植株,每株每次量取相同位置,量取两次后取平均值。

根系测定:在燕麦各个生育期末进行根系采集,不同处理随机选取 4 株代表性植株,采用挖掘法将燕麦根系完整取出,用清水冲洗干净,利用 Can MF4350 型扫描仪对根系进行扫描。然后利用 Win

RHIZO Pro 根系分析软件对根系图像进行处理,获得根系总长、根表总面积、总根体积、根尖数等根系特征参数。每次称取燕麦生育期末根鲜重与地上部鲜重,计算前后二者比值得根冠比。

叶片叶绿素相对含量(SPAD)测定:在燕麦各个生育期使用 SPAD-502 型叶绿素仪于每日 8:00 测定,每个处理选取代表性旗叶 3 片,于每片旗叶中间部位测定 3 次取平均值,测定 3 片旗叶后计其平均值。

1.3.3 燕麦产量构成要素 于成熟期每个处理选取具有代表性的 4 株燕麦,放在通风处,风干后测定穗数、穗长、粒数、千粒重。

1.3.4 品质和水分利用效率 在燕麦成熟期时,刈割麦穗后将籽粒粉碎为粉末状,0.05 mm 过筛,密封保存于干燥处。每个处理选取 4 株成熟度一致的麦穗,取平均值作为品质测定的最终结果。燕麦品质粗蛋白,粗脂肪, β -葡聚糖依次采用凯氏定氮法、索氏抽

提法与酶试剂盒测定。

水分利用效率(water use efficiency, WUE)计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET_a}$$

式中:WUE 为水分利用(kg/m^3); Y 为单个盆栽燕麦产量(kg); ET_a 为盆栽燕麦全生育期总耗水量(m^3)。

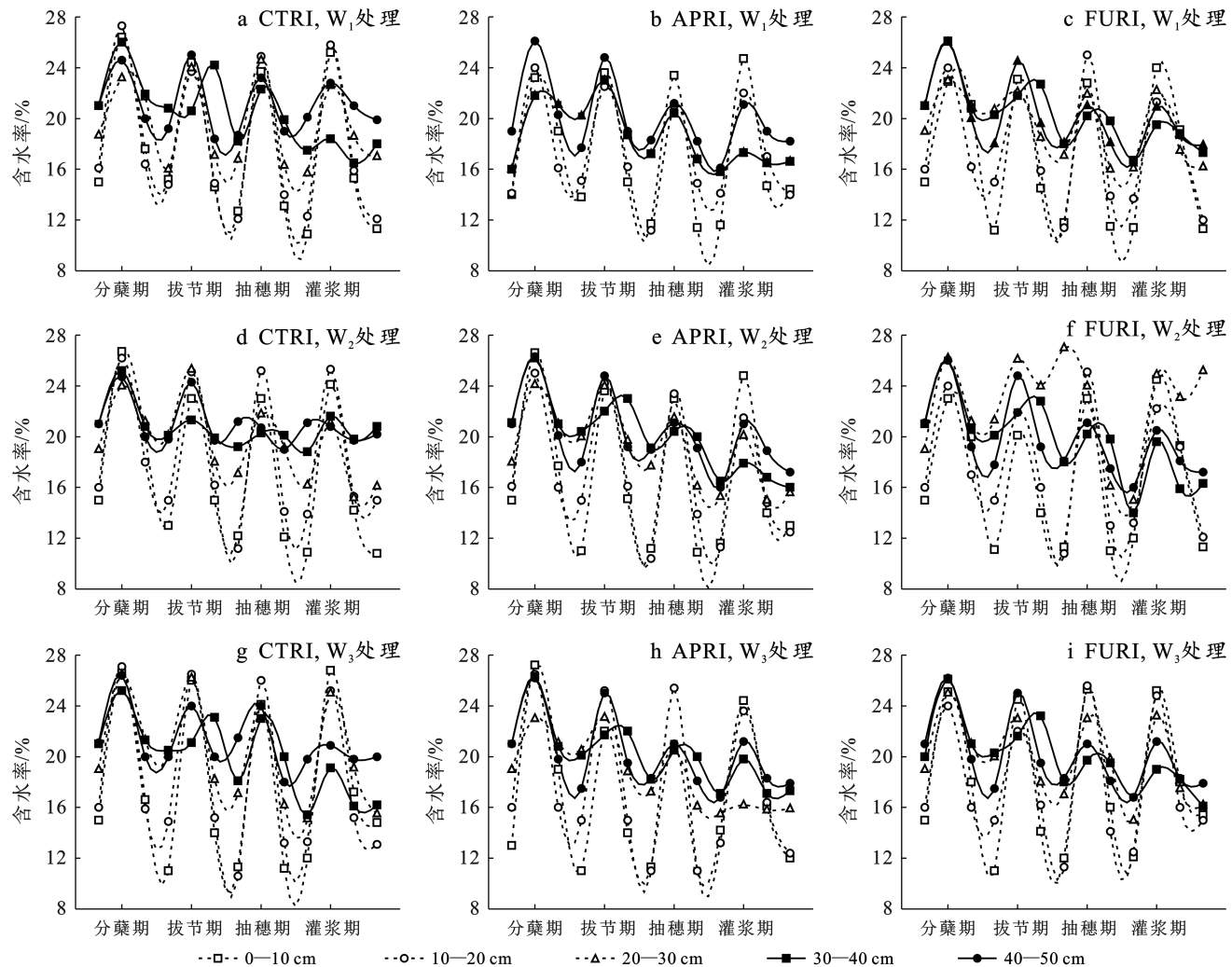
1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据计算,利用 SPSS 16.0 进行方差分析,用 Origin 2020 处理数据、绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤水盐的影响

2.1.1 各土层土壤含水率分布特征 不同处理各土层土壤含水率变化如图 1 所示。



注:①CTRI为常规灌溉; FURI为固定单侧灌溉; APRI为根根交替灌溉; ②灌水量为3个水平,即:W₁(60% $\theta_f \sim 70\% \theta_f$), W₂(70% $\theta_f \sim 80\% \theta_f$), W₃(80% $\theta_f \sim 90\% \theta_f$)。

图1 不同处理各土层含水率变化

Fig.1 Changes of water content in different soil layers under different irrigation treatments

由图 1 可知,燕麦从分蘖期到灌浆期这段时间,不同灌溉处理下各土层含水率变化趋势整体上一致。从不同灌溉方式分析,常规灌溉的深层含水率约为 26%,总体高于交替灌溉与固定单侧灌溉,且含水率的变化趋势较其他两种灌溉方式也较为明显,这可能是由于常规灌溉条件下未做分根处理,土壤水分侧向运移受阻,而垂直向下运移则优于其他两种灌溉方式;同一灌溉方式下,土壤含水率随灌水量的增大而提高,交替灌溉的土壤含水率在相同灌溉水平下低于其他两种灌溉方式,是由于在交替灌溉条件下的土壤

不断处于干湿循环状态,使得土壤水分蒸发较快。从不同土层深度分析,0—10,10—20,20—30 cm 土层含水率受灌水量影响较大,灌水当天土壤含水率会迅速上升,灌水结束后含水率又会降低,到 40 cm 土层的含水率变化趋势较小,深层土壤接近 50 cm 处土壤含水率基本维持稳定,受灌水量影响较小,究其原因,浅层含水率的变化趋势受种植地区高蒸发、高热量的气候条件,而深层土壤含水率受这一因素影响较小。

2.1.2 各土层土壤电导率分布特征 不同处理各土层电导率变化如图 2 所示。

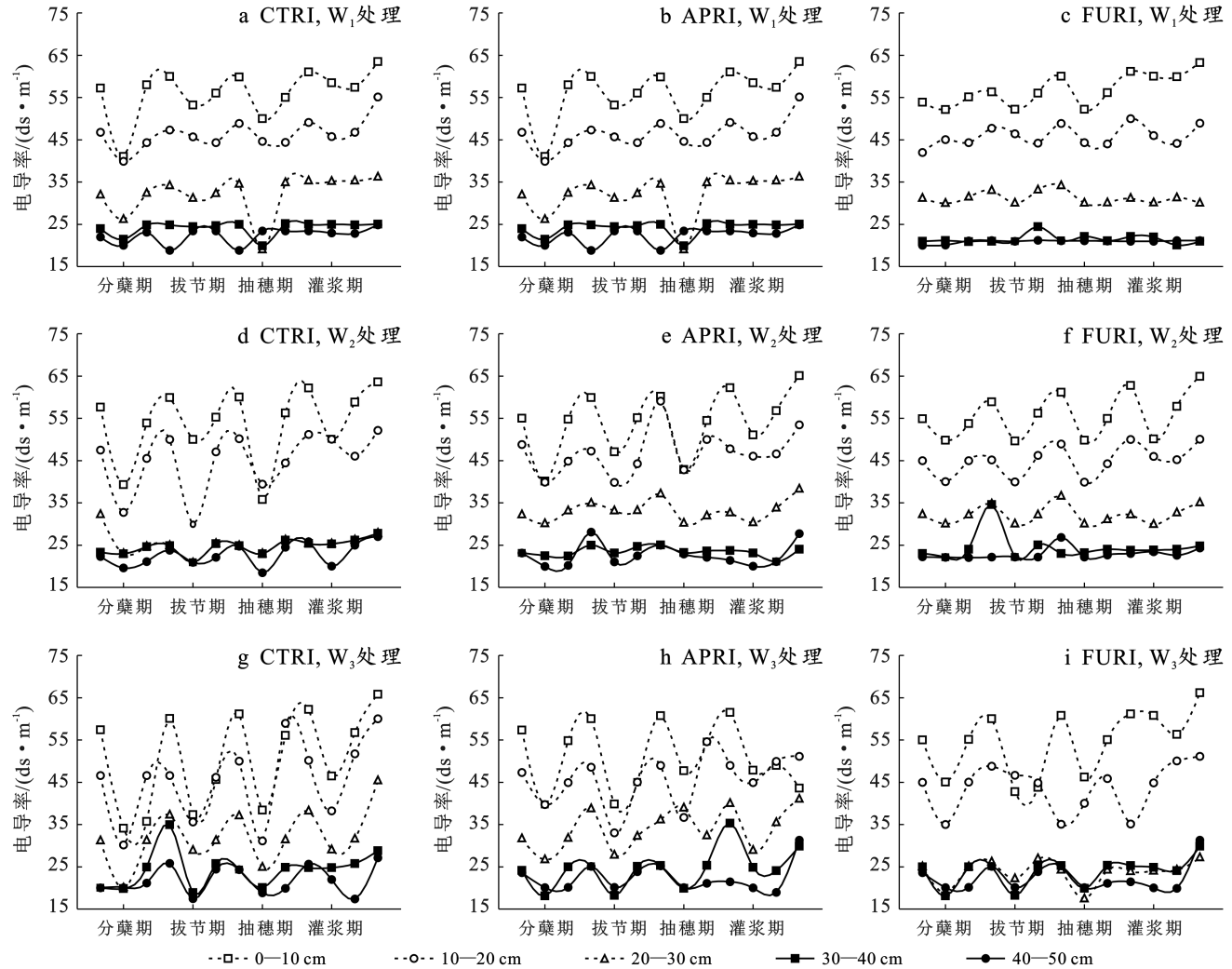


图 2 不同处理各土层电导率变化

Fig.2 Change of electrical conductivity in different soil layers under different irrigation treatments

由图 2 可知,土壤含盐量受灌溉方式及灌水量的影响较为显著,不同灌溉方式下,灌水量越大,土壤盐分降低的趋势越明显,对于 0—20 cm 土层,土壤盐分降低的趋势更加明显,土壤遵循“盐随水来,盐随水去”的水盐运移规律。随着燕麦生育期的推进,土壤含盐量总体呈现逐渐升高的变化趋势,盐分不断向表层土壤积聚,各层土壤均呈现不同程度盐分累积,灌

浆期末期浅层土壤 0—10 cm 处常规灌溉、交替灌溉、固定单侧灌溉的电导率分别约为 64,62,65 ds/m,较分蘖期的初始电导率依次增加 14.29%,9.73%,18.18%,交替灌溉的含盐量增加最小,表明交替灌溉控制盐分累积效果最好,常规灌溉次之,固定单侧灌溉控制盐分累积效果最差,这可能是由固定单侧灌溉只对一侧土壤进行灌溉,另一侧一直保持干燥状态,

使得土壤吸收水分的效率较低,盐分不能得到充分灌溉淋洗和运移,而交替灌溉条件下土壤水的活动性更强,从而将盐分带到浅层土壤的能力也更强。相同灌水量下,0—50 cm 土层交替灌溉处理下土壤电导率平均值比其他两种灌溉处理都低,且深层土壤的电导率普遍均低于浅层土壤电导率,这是由于深层土壤中的水分在灌溉入渗的作用下,使得深层土壤含水率逐渐累积增大,土壤盐分随土壤水分的运动表现为土壤盐分降低效果较好。

2.2 不同处理对燕麦生长的影响

2.2.1 不同处理对燕麦株高茎粗的影响

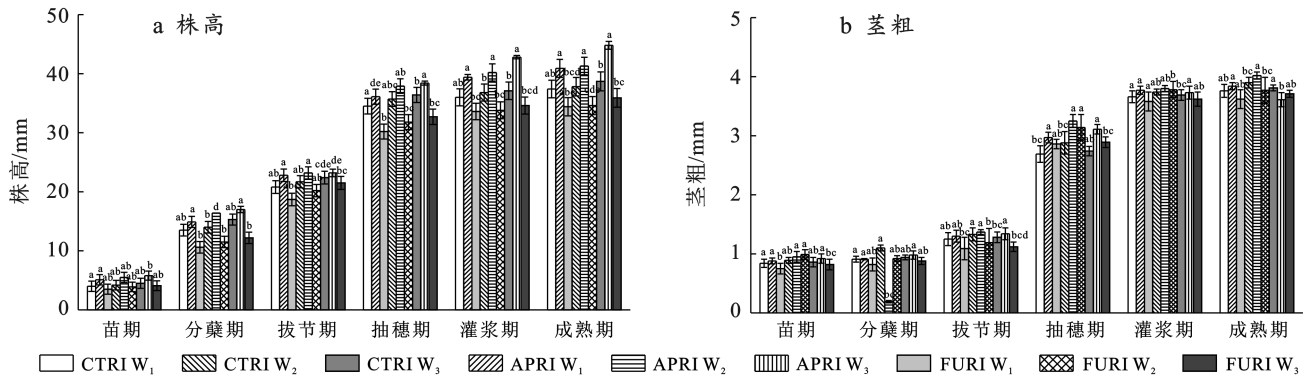
在燕麦各生育期内,燕麦株高及茎粗受不同灌溉方式和灌水量的影响显著($p < 0.05$)。如图 3 所示,随着不同生育期的改变各处理燕麦株高、茎粗呈现不同幅度的增长。灌水量相同时,灌溉方式对燕麦苗期的株高几乎没有影响,而从分蘖期到成熟期,交替灌溉处理的株高显著高于常规灌溉和固定单侧灌溉,灌浆期内差异最显著,表明灌溉方式对燕麦株高的影响主要在分蘖期以后,且同一灌溉方式下,燕麦株高随灌水量的增加呈增长趋势,燕麦茎粗随灌水量的增大而先增大后减小,即灌水量达到一定程度后,可促进作物株高茎

粗生长。方差分析结果表明,灌溉方式和灌水量对燕麦株高、茎粗均有显著影响($p < 0.05$),且交互作用下对株高影响更为显著,而对茎粗影响不显著。相同灌水量,常规灌溉和固定单侧灌溉处理的燕麦茎粗相近,但均低于交替灌溉,说明交替灌溉有利于促进燕麦茎粗生长发育。

2.2.2 不同处理对燕麦叶绿素含量(SPAD)值的影响

植物叶片的叶绿素含量是表明作物光合能力的主要指标。燕麦整个生育期内,不同处理下燕麦 SPAD 值的变化如图 4 所示。

随着燕麦生育期的推进,在 W_1 和 W_2 灌溉水平下,燕麦 SPAD 值整体呈现先上升后下降的变化趋势,其中常规灌溉和分根交替灌溉处理的 SPAD 峰值均出现在灌浆期,而固定单侧灌溉处理的 SPAD 峰值出现在抽穗期;在 W_3 灌溉水平下,分根交替灌溉和固定单侧灌溉处理的燕麦 SPAD 均在灌浆期以后表现为快速降低,而常规灌溉在燕麦抽穗期以后,SPAD 值几乎相近。交替灌溉和固定单侧灌溉处理的燕麦 SPAD 值均低于常规灌溉,这可能是由于进行分根处理的燕麦根系受到干旱胁迫的作用,使得其光合作用受阻。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平下各个处理间存在显著性差异。

图 3 不同处理燕麦株高及茎粗变化

Fig.3 Plant height and stem diameter of oat under different irrigation treatments

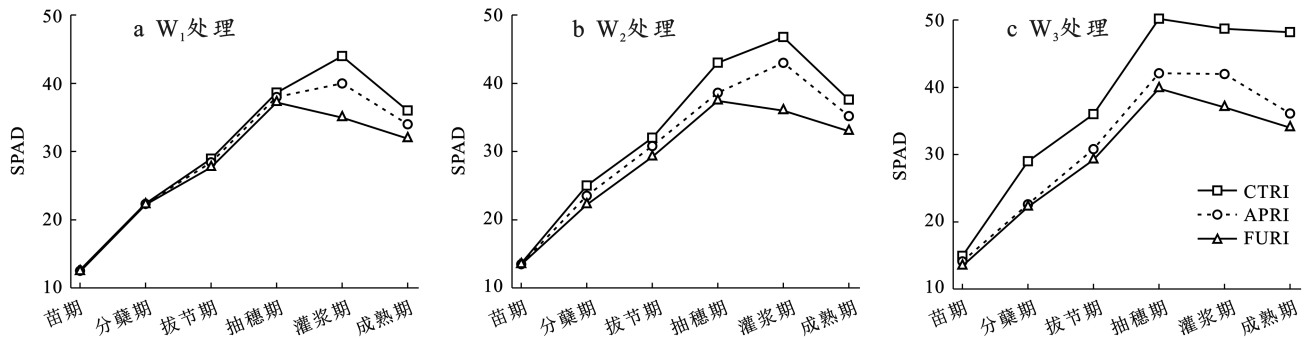


图 4 不同处理燕麦各生育期叶绿素含量(SPAD)变化

Fig.4 Changes in relative chlorophyll content of leaves (SPAD) at each fertility stage of oats in different treatments

2.2.3 不同处理对燕麦根系特征参数的影响 双因素方差分析结果表明:燕麦的根系特征参数受不同灌溉方式和灌水量及二者交互作用显著影响($p < 0.05$) (表 3)。灌溉方式和灌水量对燕麦分支数和根冠比影响较显著,且交互作用下对分支数影响更为显著,而对根冠比无显著性影响,同时燕麦分支数随灌水量的增大而减少。不同灌溉方式和灌水量显著影响燕麦的根系总长、根系总表面积、根系总体积、根尖数、根系平均直径,但二者交互作用对根系总体积影响不显著($p > 0.05$)。相同灌水量下,交替灌溉的根冠比最大,固定单侧灌溉的最小,是由于固定单侧灌溉处理下作物根区一侧的土壤过度干旱,对根系造成了伤害,由此抑制了作物冠层生长。在交替灌溉方式下,APRI-W₂处理组的燕麦根系总长、根系总表面积、根系总体积较 APRI-W₁ 分别提高 2.42%, 1.89%, 1.25%, 较 APRI-W₃ 分别提高 6.28%, 2.32%, 1.70%。在 W₂ 灌溉水平下,与常规灌溉相比,交替灌溉处理

的根系总长、根系总表面积、根系总体积分别增加 6.75%, 6.92%, 12.5%。说明在交替灌溉条件下,合理范围的灌水量可以促进燕麦根系发育,使其更发达。

2.3 不同处理对燕麦产量构成要素、水分利用效率的影响

不同处理对燕麦产量构成要素及水分利用效率的影响较显著。如表 4 所示,在相同灌溉方式下, W₁ 和 W₃ 之间的燕麦穗数差异显著($p < 0.05$),灌溉水平对燕麦粒数和 WUE 则无显著性影响,且燕麦产量构成要素均随灌水量的增加表现出先增大后减小的趋势: W₂ > W₃ > W₁, W₂ 显著高于 W₁ 和 W₃。灌溉水平为中等水平(W₂)时,常规灌溉处理下燕麦穗数和粒数均高于其他灌溉方式,穗数是 11.3 穗/株,粒数 15.7 粒/穗,交替灌溉和固定单侧灌溉处理的燕麦穗数和粒数均较少。双因素方差分析结果表明,不同灌溉方式和灌水量对燕麦产量构成因素影响显著($p < 0.05$),而交互作用下仅对穗数有显著性影响。

表 3 不同处理燕麦根系生长特征变化

Table 3 Change of root growth characteristics of oat under different irrigation treatments

灌溉处理	根系总长	根系总表面积/cm ²	根系总体积/cm ³	根尖数	根系平均直径	分支数	根冠比	
CTRI-W ₁	148.7 ^e	47.9 ^e	0.4 ^{ef}	112.7 ^g	0.9 ^c	21.0 ^{ab}	1.7 ^d	
CTRI-W ₂	163.0 ^b	62.1 ^b	0.8 ^b	149.6 ^b	1.8 ^a	17.0 ^c	2.1 ^{abc}	
CTRI-W ₃	159.7 ^c	56.8 ^d	0.6 ^{cd}	121.3 ^e	1.5 ^b	19.7 ^b	1.8 ^{cd}	
APRI-W ₁	148.7 ^e	47.9 ^e	0.4 ^{ef}	112.7 ^{fg}	0.9 ^c	17.0 ^c	1.7 ^d	
APRI-W ₂	174.0 ^a	66.4 ^a	0.9 ^a	155.7 ^a	1.8 ^a	22.3 ^a	2.3 ^a	
APRI-W ₃	163.7 ^b	57.1 ^d	0.6 ^{cd}	124.7 ^d	1.5 ^b	20.0 ^b	1.9 ^{bcd}	
FURI-W ₁	143.3 ^f	47.7 ^e	0.3 ^f	111.7 ^g	0.7 ^d	22.7 ^a	1.7 ^d	
FURI-W ₂	159.0 ^c	60.3 ^c	0.7 ^{bc}	146.3 ^c	1.4 ^b	17.3 ^c	2.0 ^{ab}	
FURI-W ₃	154.7 ^d	56.2 ^d	0.5 ^{de}	118.0 ^f	0.8 ^{cd}	20.1 ^{8b}	1.8 ^{cd}	
显著性 检验 <i>p</i> 值	灌溉方式(M)	0.000***	0.000***	0.001**	0.000***	0.000***	0.143	0.199
	灌溉水平(L)	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.017*	0.000***
	M × L	0.000***	0.000***	0.267	0.000***	0.000***	0.000***	0.761

注:数据为 3 次重复的平均值,同列不同小写字母表示处理之间差异性显著($p < 0.05$),下同。

利用双因素方差分析结果表明,不同灌溉方式和灌水量及交互作用对水分利用效率的影响不显著($p > 0.05$)。总体来看,交替灌溉的水分利用效率最高,常规灌溉次之,固定单侧灌溉最小。在中等灌溉水平下(W₂),交替灌溉处理的水分利用效率为 6.30 kg/m³,较常规灌溉提高 17.32%。在低等灌水量(W₁),常规灌溉和固定单侧灌溉的水分利用效率均较低,说明固定单侧灌溉虽减少了灌溉水量,但没有显著提高燕麦的水分利用效率,未达到节水灌溉的目的。

2.4 不同处理对燕麦品质的影响

不同处理对燕麦品质的影响见表 5。由表 5 可知,不同灌溉方式和灌水量对燕麦品质的影响不显

著。各个处理组间粗脂肪和 β-葡聚糖差异性不显著,但常规灌溉和交替灌溉条件下粗蛋白的含量均高于固定单侧灌溉。在 W₃ 灌溉水平下,交替灌溉处理的燕麦粗脂肪和粗蛋白含量分别为 12.5, 88.5 g/kg, 高于其他两种灌溉方式。各处理在低中等灌溉水平下(W₂ 和 W₃),常规灌溉和固定单侧灌溉处理的 β-葡聚糖含量相近,含量约为 3.3 nmol/g,而交替灌溉的 β-葡聚糖含量为 3.5 nmol/g,高于常规灌溉和固定单侧灌溉。与常规灌溉相比, W₂ 灌溉水平下,交替灌溉处理的粗蛋白,粗脂肪, β-葡聚糖含量分别增加 7.02%, 3.76%, 6.06%, 相同灌溉方式下,燕麦品质随灌水量的增加而增大,总体而言, APRI-W₃ 处理下燕麦品质最优。

表 4 不同处理燕麦产量构成因素及水分利用效率变化

Table 4 Changes of yield components and water use efficiency of oats under different treatments

灌溉处理	穗数 (穗/株)	粒数 (粒/穗)	穗长/cm	千粒重/g	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	
CTRI-W ₁	8.7 ^{cd}	13.7 ^{abc}	10.3 ^{abc}	28.3 ^a	4.86 ^{ab}	
CTRI-W ₂	11.3 ^a	15.7 ^a	12.3 ^a	30.3 ^a	5.37 ^a	
CTRI-W ₃	10.3 ^{abc}	14.6 ^{ab}	11.3 ^{ab}	29.0 ^a	5.20 ^a	
APRI-W ₁	7.3 ^{ef}	11.7 ^{bcde}	8.3 ^{bc}	23.3 ^{bc}	5.57 ^a	
APRI-W ₂	10.7 ^{ab}	14.3 ^{abc}	10.0 ^{abc}	28.0 ^a	6.30 ^a	
APRI-W ₃	9.0 ^{bcd}	12.7 ^{abcd}	9.3 ^{abc}	25.0 ^b	5.87 ^a	
FURI-W ₁	6.3 ^f	8.3 ^e	7.3 ^c	20.1 ^d	4.82 ^{ab}	
FURI-W ₂	7.7 ^{de}	9.3 ^{de}	8.0 ^{bc}	23.7 ^{bc}	5.26 ^a	
FURI-W ₃	9.7 ^{bc}	10.3 ^{cde}	9.0 ^{abc}	21.5 ^{cd}	5.11 ^{ab}	
显著性 检验 <i>p</i> 值	灌溉方式(M)	0.000 ^{***}	0.000 ^{***}	0.003 ^{**}	0.000 ^{***}	0.792
	灌溉水平(L)	0.000 ^{***}	0.127	0.000 ^{***}	0.000 ^{***}	0.544
	M×L	0.003 ^{**}	0.712	0.267	0.520	0.996

表 5 不同处理对燕麦品质的影响

Table 5 Effects of different treatments on quality of Oats

灌溉处理	粗脂肪/ (g·kg ⁻¹)	粗蛋白/ (g·kg ⁻¹)	β-葡聚糖/ (nmol·g ⁻¹)
CTRI-W ₁	11.2 ^a	85.0 ^{bc}	3.3 ^a
CTRI-W ₂	11.4 ^a	85.2 ^{abc}	3.3 ^a
CTRI-W ₃	11.6 ^a	85.3 ^{abc}	3.4 ^a
APRI-W ₁	12.1 ^a	88.4 ^{ab}	3.5 ^a
APRI-W ₂	12.2 ^a	88.4 ^{ab}	3.5 ^a
APRI-W ₃	12.5 ^a	88.5 ^a	3.6 ^a
FURI-W ₁	11.0 ^a	83.0 ^c	3.2 ^a
FURI-W ₂	11.1 ^a	83.3 ^c	3.2 ^a
FURI-W ₃	11.5 ^a	83.4 ^c	3.3 ^a

3 讨论

分根交替灌溉作为局部供水技术,与其他节水灌溉技术相比会显著影响作物生长,从而影响作物产量^[16-17]。株高、茎粗和根系是反映作物长势的重要指标,合理范围的灌水量会影响作物生长。不同灌溉水平对分根交替灌溉玉米的影响显著,结果表明,适宜的灌水量显著提高了玉米株高、茎粗和籽粒产量,过多的灌水量则不利于作物生长发育^[18],本研究也得到相似的结论。研究发现根区部分干燥灌溉条件下作物根系一直处于干湿交替循环状态时,可以有效促进根系的补偿性和向水性生长,使根系更发达,进而影响作物产量^[19]。Qi Dongliang 等^[20]研究发现在相同氮素水平和灌水量条件下,交替隔沟灌溉能显著提高玉米的根长密度;本研究结果表明,与常规灌溉相比,中等灌溉水平(W₂),分根交替灌溉可以有效促进燕麦根系的生长,这与刘琳絮等^[21]研究发现中等灌溉水平下,分根交替灌溉可促进根系发育,保持作物产量的研究结果相同。分根交替灌溉技术应用于作物生产时,不仅需要关注产量的稳定性,还需重视节水效益,节水效益的评估通常采用水分利用效率和水

分生产力^[22]。大量研究表明分根交替灌溉可以达到节水稳产,提高水分利用效率和改善作物品质的优势^[23-24],本研究结果表明,与常规灌溉相比,相同灌溉水平,交替处理下燕麦的水分利用效率和品质均提高。

杨培岭等^[25]研究表明,作物在生长过程中不仅要制定适宜的灌水制度,同时提供良好的地下水盐环境对于作物根系的发育也尤为重要。本研究结果表明,在燕麦整个生育期内,不同处理土壤各土层含水率变化趋势基本一致。对于不同土壤不同深度,表层土壤含水率受灌水量影响较大,常规灌溉的深层土壤含水率总体高于其他两种灌溉且变化趋势也较为明显,是因为常规灌溉使得水分垂直向下运动强于其他灌溉方式。不同处理 0—40 cm 土层的土壤盐分降低的趋势更加明显,这与 Slamini M. 等^[26]研究发现部分根区干燥灌溉可以降低植物较深层根区盐浓度的结果相似。另外,灌溉方式和灌溉水平对土壤含盐量的影响显著,随着灌水量的增大土壤盐分降低的趋势越明显。本结果表明,灌水量相同时,三种灌溉方式盐分累积程度依次是:分根交替灌溉<常规灌溉<固定单侧灌溉,则分根交替灌溉控制盐分累积效果最好,这与余根坚等^[27]得到不同沟灌方式下,交替沟灌的脱盐率大于传统畦灌的研究结果相似。

4 结论

(1) 不同处理下,燕麦在分蘖期到灌浆期这段时期内,土壤各土层含水率变化趋势基本一致,0—30 cm 土层含水率受灌水影响较大,灌水当天土壤含水率迅速上升,灌水结束后含水率又会迅速降低,40 cm 处土层的含水率又基本维持稳定,深层土壤接近 50 cm 处其含水率受灌溉影响较小。在相同灌溉方式下,盐分降低的趋势随灌水量的增加表现得越明

显,盐分不断向表层土壤积聚。灌浆期末期不同灌溉方式下,浅层土壤 0—10 cm 处常规灌溉、交替灌溉、固定单侧灌溉的电导率较分蘖期的初始电导率依次增加 14.29%,9.73%,18.18%,则交替灌溉较其他两种灌溉方式对盐分累积的控制效果最佳。

(2) 各生育期内,燕麦生长受灌溉方式和灌水量影响显著,增加灌水量,有利于燕麦株高生长,但不利于茎粗和根系生长。中等灌溉水平(W_2),与常规灌溉相比,交替灌溉可提高燕麦水分利用效率、根系生长及品质,其中 WUE 提高 17.32%,效果最为显著;根系总长、根系总表面积、根系总体积分别提高 6.75%,6.92%,12.5%;粗蛋白,粗脂肪, β -葡聚糖含量分别增加 7.02%,3.76%,6.06%;燕麦各生育期的 SPAD 值在不同处理下整体表现为先上升后下降,交替灌溉和固定单侧灌溉条件下的燕麦 SPAD 值均低于常规灌溉。总体而言,APRI- W_2 处理组的灌溉效果最好。可为抗盐碱燕麦的灌溉管理提供科学参考。

参考文献 (References)

- [1] Hu Yanzhe, Ding Risheng, Kang Shaozhong, et al. The trade-offs between resistance and resilience of forage stay robust with varied growth potentials under different soil water and salt stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,846:157421.
- [2] 王玉宝,吴楠,张富尧,等.基于三维水足迹模型的农业用水可持续性评估[J]. *农业机械学报*,2023,54(1):287-295. Wang Yubao, Wu Nan, Zhang Fuyao, et al. Assessment of agricultural water sustainability based on 3D water footprint model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023,54(1):287-295.
- [3] 王全九,邓铭江,宁松瑞,等.农田水盐调控现实与面临问题[J]. *水科学进展*,2021,32(1):139-147. Wang Quanjiu, Deng Mingjiang, Ning Songrui, et al. Reality and problems of controlling soil water and salt in farmland [J]. *Advances in Water Science*, 2021,32(1):139-147.
- [4] Stavi I, Thevs N, Priori S. Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021,9:712831.
- [5] 康绍忠,张建华,梁宗锁,等.控制性交替灌溉一种新的农田节水调控思路[J]. *干旱地区农业研究*,1997(1):4-9. Kang Shaozhong, Zhang Jianhua, Liang Zongsuo, et al. The controlled alternative irrigation: A new approach for water saving regulation in farmland [J]. *Agricultural research in the Arid Areas*,1997,(1):4-9.
- [6] Zhang Y, Li X, Simunek J, et al. Optimizing drip irrigation with alternate use of fresh and brackish waters by analyzing salt stress: The experimental and simulation approaches [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022,219:105355.
- [7] Aragués R, Medina E T, Martínez-Cob A, et al. Effects of deficit irrigation strategies on soil salinization and sodification in a semiarid drip-irrigated peach orchard [J]. *Agricultural Water Management*, 2014,142:1-9.
- [8] Kaman H, Özbek Ö. Salt and water distributions in the plant root zone under deficit irrigation [J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2012,10(3):496-500.
- [9] Zhou L. Influences of deficit irrigation on soil water content distribution and spring wheat growth in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia of China [J]. *Water Supply*, 2020, 20(8): 3722-3729.
- [10] Zhang Q, Chen W, Wu G, et al. Effect of PVA-treated soil on water-salt capillary rise in loess soil: Soil column experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610:127806.
- [11] 陈逸凡,云岚,艾芊,等.苜蓿与禾草混播对海流图盐碱地土壤改良效果研究[J]. *草地学报*,2023,31(10):3203-3211. Chen Yifan, Yun Lan, Ai Qian, et al. Effect of alfalfa-grass mixed pasture on the remediation soil in saline area of Hailutu [J]. *Grassland Journal*, 2023,31(10):3203-3211.
- [12] Köse Ö D E, Mut Z, Akay H. Assessment of grain yield and quality traits of diverse oat (*Avena sativa* L.) genotypes [J]. *Annali di Botanica*, 2021:55-66.
- [13] 海霞,刘景辉,杨彦明,等.盐胁迫对燕麦幼苗 Na^+ 、 K^+ 吸收和离子积累的影响[J]. *麦类作物学报*,2019,39(5):613-620. Hai Xia, Liu Jinghui, Yang Yanming, et al. Na^+ and K^+ uptake and ion accumulation in oat seedlings under salt stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(5):613-620.
- [14] 卢培娜,白健慧,米俊珍,等.菌肥与腐熟秸秆对盐碱地燕麦渗透生理特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*,2023,43(6):753-765. Lu Peina, Bai Jianhui, Mi Junzhen, et al. Effects of bio-fertilizer and rott straw on osmotic physiological characteristics and yield of oats in saline-alkali soil environment [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023,43(6):753-765.
- [15] 刘小刚,张富仓,杨启良,等.控制性分根区灌溉对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. *农业工程学报*,2009,25(11):62-67. Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Yang Qiliang, et al. Effects of controlled root-divided irrigation on transport and utilization of water and nitrogen in maize rootzone soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 62-67.
- [16] Cheng Minghui, Wang Haidong, Fan Junliang, et al. A global meta-analysis of yield and water use efficiency of crops, vegetables and fruits under full, deficit and alternate partial root-zone irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2021, 248(12): 106771.
- [17] Sonawane A V, Shrivastava P K. Partial root zone drying method of irrigation: A review [J]. Irrigation and Drainage, 2022, 71(3): 574-588.
- [18] Qi Dongliang, Hu Tiantian, Song Xue. Effects of nitrogen application rates and irrigation regimes on grain yield and water use efficiency of maize under alternate partial root-zone irrigation [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2792-2806.
- [19] Khaleghi M, Hassanpour F, Karandish F, et al. Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions [J]. Agricultural water management, 2020, 234: 106094.
- [20] Qi Dongliang, Hu Tiantian, Liu Tingting. Biomass accumulation and distribution, yield formation and water use efficiency responses of maize (*Zea mays* L.) to nitrogen supply methods under partial root-zone irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2020, 230: 105981.
- [21] 刘琳絮, 王铁梅, 张霁, 等. 紫花苜蓿根系主要功能性状对分根区交替灌溉的响应[J]. 草地学报, 2023, 31(3): 852-859.
- Liu Linxiu, Wang Tiemei, Zhang Ji, et al. Response of main functional traits of alfalfa partial root-zone irrigation [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(3): 852-859.
- [22] Fernández J E, Alcon F, Diaz-Espejo A, et al. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard [J]. Agricultural Water Management, 2020, 237: 106074.
- [23] Wang Xingchen, Liu Rui, Luo Jia'nan, et al. Effects of water and NPK fertigation on watermelon yield, quality, irrigation-water, and nutrient use efficiency under alternate partial root-zone drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107785.
- [24] Sarker K K, Hossain A, Timsina J, et al. Alternate furrow irrigation can maintain grain yield and nutrient content, and increase crop water productivity in dry season maize in sub-tropical climate of South Asia [J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: 106229.
- [25] 杨培岭, 王瑜, 任树梅, 等. 咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 273-281.
- Yang Peiling, Wang Yu, Ren Shumei, et al. Soil Moisture and saline distribution characteristics and maize stem water uptake under alternate irrigation between saline water and groundwater [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 273-281.
- [26] Slamini M, Sbaa M, Arabi M, et al. Review on partial root-zone drying irrigation: Impact on crop yield, soil and water pollution [J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107807.
- [27] 余根坚, 黄介生, 高占义, 等. 基于 HYDRUS 模型不同灌水模式下土壤水盐运移模拟[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 826-834.
- Yu genjian, Huang Jiesheng, Gao Zhanyi, et al. Study on water and salt transportation of different irrigation modes by the simulation of HYDRUS model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 826-834.

(上接第 8 页)

- [24] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4): 1213-1222.
- [25] Lou Yibao, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Vegetation affects gully headcut erosion processes by regulating runoff hydrodynamics in the loess tableland region [J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128769.
- [26] Vanmaercke M, Poesen J, van Mele B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth Science Reviews, 2016, 154: 336-355.
- [27] Chen Zhuoxin, Guo Mingming, Wang Wenlong, et al. Response of soil erodibility of permanent gully heads to revegetation along a vegetation zone gradient in the loess-table and Gully Region of the Chinese Loess Plateau [J]. The Science of the Total Environment, 2023, 892: 164833.
- [28] 郭明明, 黄土高原沟壑区退耕草地沟头溯源侵蚀及形态演化特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Guo Mingming. Gully headward erosion and its morphology evolution characteristics of rehabilitated grassland in the gully region of the loess [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry Technology University, 2016.
- [29] Mukai S. Gully erosion rates and analysis of determining factors: A case study from the semi-arid main Ethiopian rift valley [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(2): 602-615.