

不同水盐处理对苜蓿耗水、品质及产量的影响

侯晨丽^{1,2}, 田德龙², 徐冰², 李仙岳¹, 任杰², 林雪松³

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;2.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020;3.辽宁禹盛生态环境工程技术有限公司,辽宁 朝阳 122000)

摘要:为探索河套灌区不同盐分土壤苜蓿生长的适宜水分展开盆栽试验,设置3个水分水平、3个盐分水平和1个对照处理CK,监测不同水盐处理苜蓿现蕾期至初花期土壤贮水变化量、品质及产量。结果表明:(1)相同盐分条件下,植株株高、地上生物量、地下生物量、耗水量及干草产量随灌水量的增加而增大,但苜蓿的增产效应明显降低;相同水分条件下,随盐分增加,苜蓿耗水量及地下生物量整体呈现先增大后减小的变化趋势。土壤含盐量超过3 g/kg,土壤中剩余水分显著增加,且随灌水量增加逐渐增加。(2)土壤含盐量1~3 g/kg,水分胁迫有利于提高苜蓿粗蛋白含量;其中低水处理粗蛋白含量均显著高于中水及高水处理($p<0.05$);含盐量3~4 g/kg,盐分改变水分胁迫阈值,中水处理粗蛋白含量显著高于低水与高水处理($p<0.05$)。盐分与水分胁迫下,植株体内氨基酸含量增加,其中F₃W₁处理氨基酸含量最大,为20.90%。对各游离氨基酸及粗蛋白含量进行相关性分析,其中甘氨酸、蛋氨酸与粗蛋白相关性不显著;其他氨基酸与粗蛋白均呈显著正相关($p<0.05$)。(3)土壤盐分1~2 g/kg,苜蓿的水分利用效率随灌水量增加而降低,土壤盐分超过2 g/kg,苜蓿水分利用效率随灌水量呈现先增大后减小趋势。土壤含盐量1~2 g/kg,水分70%~75% θ_f ,干草产量增加,水分利用效率提高;土壤含盐量2~3 g/kg,水分70%~85% θ_f ,水分利用效率提高干草产量减小,但差异不显著;土壤含盐量3~4 g/kg,水分85% θ_f 以上,苜蓿干草产量增加。该研究结果初步可为盐渍化农田苜蓿种植及合理灌溉提供理论依据。

关键词: 不同水盐;苜蓿;耗水;氨基酸;水分利用效率

中图分类号: S152.7; S551⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0293-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2019.06.041

Effects of Different Water and Salt Conditions on Water Consumption, Quality and Yield of Alfalfa

HOU Chenli^{1,2}, TIAN Delong², XU Bing², LI Xian Yue¹, REN Jie², LIN Xuesong³

(1.College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018; 2.Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020; 3.Liaoning Yusheng Ecological Environment Engineering Technology Service Co., Ltd., Chaoyang, Liaoning 122000)

Abstract: In order to explore the suitable water content of different salt soils of alfalfa in the Hetao Irrigation District, a pot experiment was carried out. Three water levels, three salt levels and one control (CK) are set up to monitor the changes of soil water storage, quality and yield of alfalfa from the bud stage to the initial flowering stage. The results showed that: (1) Plant height, aboveground biomass, underground biomass, water consumption and hay yield increased with the increase of water under the same salt conditions. But with the increase of irrigation amount, the increasing effect of irrigation on the yield of alfalfa was significantly reduced. Under the same water condition, the water consumption and the underground biomass increased with the increase of salt and then decreased. If the soil salinity was more than 3 g/kg, the water storage in the soil increased significantly, and gradually increased with the increasing irrigation amount. (2) When the soil salt content was 1~3 g/kg, water stress was beneficial to increase the content of crude protein. The content of crude protein in low water treatment was significantly higher than that in middle water and high water treatment ($p<0.05$). When the salt content was 3~4 g/kg, the soil salt

收稿日期:2019-03-10

资助项目:内蒙古科技重大专项;中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(MK2017J07);国家自然科学基金项目(51409174)

第一作者:侯晨丽(1992—),女,山西阳高人,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术应用研究。E-mail:ndhcl202060030@163.com

通信作者:田德龙(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士,高级工程师,主要从事节水灌溉原理及应用研究。E-mail:mkstdl@126.com

changed the water stress threshold. The crude protein content of the treated water was significantly higher than that of the low water and high water treatment ($p<0.05$). Under the salt and water stress, the amino acid content of the plant increased, and the F_3W_1 treated amino acid content was the largest, which was 20.90%. Under the same salt condition, the amino acid content decreased stepwise with the increase of water content. Correlation analysis of each free amino acid and crude protein content showed that the correlation between glycine and methionine was not significant, but the correlation between other amino acids and crude protein was positively correlated ($p<0.05$). (3) When the soil salinity was in the range of 1~2 g/kg, and the water use efficiency of the water was decreasing. But when the soil salinity exceeded 2 g/kg, and the water use efficiency increased first and then decreased with the increasing irrigation amount. When the soil salinity was 1~2 g/kg, and the water content was $70\%\theta_f\sim75\%\theta_f$, both the yield of hay and water use efficiency were increased. When the soil salinity was 2~3 g/kg, the water content was $70\%\theta_f\sim85\%\theta_f$, the water use efficiency was improved, the hay yield was decreased, but it is not significant. When the soil salt content was 3~4 g/kg, and the water content was above $85\%\theta_f$, alfalfa production was increased. The results of this study could provide a theoretical basis for the cultivation and rational irrigation of salinized farmland.

Keywords: different water and salt conditions; alfalfa; water consumption; amino acid; water use efficiency

内蒙古河套灌区降雨少、蒸发强度大,农田土壤出现不同程度盐渍化,目前河套灌区盐渍化耕地面积 32.27 万 hm^2 , 占总耕地面积的 45.5%, 土壤盐分严重影响作物生长。苜蓿可以提高土壤生产力^[1], 增加地下水利用量, 提高灌溉水利用效率, 盐渍化农田种植苜蓿对当地粮经饲协调发展及提高耕地质量具有重要意义。水分是干旱区最为关键与敏感的生态因子之一, 也是影响植物生产力的重要因素, 水分不仅是构成植物自身有机体的主要成分, 同时参与植物体内生理、生化、代谢和光合作用^[2]。紫花苜蓿作为优良豆科牧草, 营养价值高, 具有一定耐旱及耐盐性, 土壤含盐量达到 4.28 g/kg, 对苜蓿生长造成危害, 主要表现为植物吸水困难、单盐毒害、生理紊乱、氮素代谢异常, 产生氨毒害^[3-4], 甚至苜蓿种子停止萌发。灌水充足可抑制表层土壤盐分累积, 达到盐分淋洗效果, 提高作物产量, 但灌溉水利用效率偏低。因此探索不同盐分苜蓿农田适宜水分对苜蓿种植发展起着重要作用。

目前, 多数研究^[2-7]主要集中于苜蓿品种育选、抗旱及耐盐性生理研究、苜蓿生产性能等方面。赵霞等^[5]研究发现, 不同梯度盐碱胁迫抑制紫花苜蓿生长, 其粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量降低, 光合色素的含量明显减少, 光合气体交换参数和叶绿素荧光参数降低; 万里强等^[2]研究发现, 受旱植株株高、干草产量和蒸腾耗水量显著降低, 但根冠比要高于正常供水的植株, 苜蓿水分利用效率显著提高。受水分胁迫, 植物体为了减缓由水分亏缺造成的生理代谢不平衡, 造成细胞内脯氨酸、甜菜碱、可溶性糖、游离氨基酸和多元醇等积累^[6]。以上这些研究主要集中在水分及盐分单因素胁迫上, 水盐联合胁迫对苜蓿耗水、品质及

产量影响鲜有报道。曹何莉等^[8]研究不同水盐对番茄生长及产量影响得出充分灌水番茄耗水、产量均提高, 无盐处理组合干旱复水可提高坐果率产量增加, 但试验盐分处理相对单一。盐渍化土壤中除含有氯化钠(NaCl), 同时存在碱性的可溶性盐分^[4]。Peng 等^[9]发现, 高浓度的混合盐碱的胁迫损伤强于单盐胁迫或碱胁迫。本试验盐分处理为了与农田盐渍化土壤真实状况更为接近进行混合的盐碱胁迫, 开展盆栽试验, 模拟该条件下不同灌水水平对苜蓿耗水、产量及品质影响, 为盐渍化土壤苜蓿种植及合理灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤基本性质

试验在内蒙古磴口县坝楞村圣牧高科经济园区, 盆栽试验于 2018 年 4 月开始。供试土壤容重为 1.48 g/cm^3 , 田间持水率为 24.5%。土壤质地为粉砂壤土, 其中砂粒含量占 36.10%, 粉粒含量占 57.78%, 黏粒含量占 6.12%, 初始土壤(0—20 cm)含盐量为 0.88 g/kg, 有机质质量比为 25.71 g/kg, 全氮质量比为 1.01 g/kg, 全磷质量比为 0.90 g/kg。

1.2 试验设置

盆栽试验以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为研究对象, 品种为“阿尔冈金”, 试验共设 10 个处理, 包括: 3 个水分水平, 即 W_1 (60%~75% θ_f)、 W_2 (70%~85% θ_f)、 W_3 (85%~100% θ_f), 3 个盐分水平, 即为 F_1 、 F_2 、 F_3 , 土壤含盐量分别为 1~2, 2~3, 3~4 g/kg, 1 个对照处理, 即 CK, 土壤含盐量<1 g/kg, 水分 θ_f 85%~100%; 每个处理 4 次重复, 共 40 盆。每盆定苗 10 株, 取农田 0—20 cm 土壤, 将土中的杂草及石块筛除装入试验容器中。试验所用容器为塑料容

器(外口直径 30 cm,高 20 cm),容器外部包 1 层隔温膜,防止容器外部受太阳辐射,加快水分散失;每盆装土样 8 kg。苜蓿于 2018 年 5 月初播种,出苗后进行灌水,每盆灌水量相同,为 275 mL,共灌水 10 次。2018 年 6 月 20 日苜蓿进入现蕾期,其苜蓿耗水强度高,气孔开闭最明显,因此该时期盆栽进行不同水盐处理,灌水量分别为 175,275,375 mL,共灌水 9 次;盐分处理分别在盆栽中添加质量浓度为 0.5‰,1.0‰,1.5‰ 的 NaCl、NaHCO₃混合试剂,添加时均匀混合,达到试验盐分处理要求。2018 年 7 月 10 日(初花期)苜蓿刈割,测其产量。

1.3 观测内容与方法

苜蓿日耗水变化量:从 2018 年 6 月 22 日开始,每天早上 8:00 称重苜蓿,灌水前后加测,收获后结束。记录每天灌水量及天气情况。

株高:收获时选取 3 株长势均匀的植株,用直尺从苜蓿底部开始测量,取其平均值。

植株生物量:苜蓿收获后,将地上部分及根部分开,根部用清水清洗干净,均称其鲜重后,放入烘箱 105 ℃杀青 30 min 后,80 ℃烘干 48 h 后称其干重。

产量及品质:苜蓿初花期进行刈割,每个处理留茬 5 cm,测鲜重。鲜草在 105 ℃杀青 30 min 后,80 ℃烘干 48 h 后称其干草重量,取平均值。称重后待测样用破碎机磨粉,10 月 31 日将样品送于内蒙古农牧渔业生物试验研究中心进行粗蛋白与氨基酸含量检测,凯氏定氮仪分析粗蛋白含量,氨基酸分析仪(日立 L-8900)分析氨基酸含量,最低检测灵敏度 3 pmol。

1.4 数据分析

采用水量平衡法计算盆栽苜蓿现蕾期至收获期耗水量,计算公式为:

$$ET=\Delta W+P+I$$
 (1)

式中:ET 为耗水量(mm);ΔW 为土壤贮水变化量(mm);P 为有效降雨量(mm);I 为灌溉量(mm)。

试验期间,如果出现降雨,所有盆栽转移到遮雨棚,因此降雨量为 0 mm。

苜蓿水分利用效率计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$
 (2)

式中:WUE 为水分利用效率(kg/(hm²·mm));Y 为苜蓿干草产量(kg/hm²);根据每盆苜蓿干草产量,折合计算出公顷产量。

采用 Excel 2007 软件对试验数据进行处理及绘图,利用 SPSS 17.0 软件进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水盐处理对苜蓿耗水的影响

苜蓿耗水强度随刈割茬数逐渐递减,第 1 茬耗水

最多,其中现蕾期达到最大^[10],对苜蓿现蕾期至初花期土壤贮水变化量进行分析。由图 1 可知,随时间变化,土壤贮水变化量呈上下波动变化,土壤贮水变化量峰值次数与灌水次数基本一致。6 月 26 日前后由于外界相对湿度增大,土壤蒸发减小,苜蓿土壤贮水变化量上下波动幅度减小,其中土壤含盐量在 3~4 g/kg,不同处理整体呈平缓变化趋势。不同水盐处理苜蓿耗水量结果见表 1,土壤含盐量 1~2 g/kg,随灌水量增加苜蓿耗水量增加;耗水量大小为高水处理显著高于中水、低水处理($p<0.05$)。土壤含盐量在 2~4 g/kg,随灌水量增加土壤总贮水变化量及耗水量均增加;且差异性显著($p<0.05$),说明低浓度盐分胁迫下,土壤贮水变化量受水分影响显著。低水、中水处理耗水量随盐分增加呈先增大后减小变化趋势;土壤含盐量增加至 2~3 g/kg,土壤总贮水变化量平均减少 76.24%,增加至 3~4 g/kg,土壤总贮水变化量平均增加 67.23%。高水处理随盐分增加土壤中剩余水分增加,F₃W₃处理土壤剩余水分最大,较对照处理 CK 增加 93.96%,可以看出高浓度盐分胁迫对苜蓿土壤水分消耗影响显著。

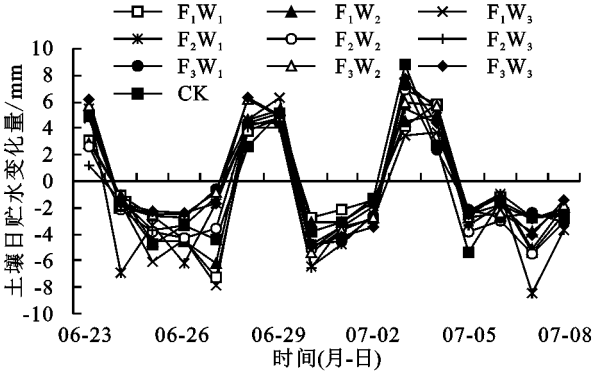


图 1 不同水盐处理苜蓿现蕾期—初花期土壤贮水变化量

表 1 不同水盐处理苜蓿现蕾期—初花期耗水量

单位:mm

处理	最大土壤贮水 变化量	最小土壤贮水 变化量	总土壤贮水 变化量	耗水量
F ₁ W ₁	5.87 ^{de}	-7.25 ^e	-11.24 ^{cd}	33.54 ^{ef}
F ₁ W ₂	6.02 ^{de}	-6.13 ^c	-12.09 ^d	45.12 ^{cd}
F ₁ W ₃	6.28 ^d	-7.82 ^f	-16.87 ^e	64.64 ^a
F ₂ W ₁	7.47 ^{bc}	-8.49 ^g	-19.82 ^f	42.11 ^d
F ₂ W ₂	6.90 ^c	-5.45 ^b	-15.62 ^c	50.71 ^c
F ₂ W ₃	5.45 ^c	-6.51 ^c	-12.40 ^d	60.17 ^{ab}
F ₃ W ₁	7.29 ^{bc}	-4.74 ^a	-6.49 ^b	28.79 ^f
F ₃ W ₂	6.23 ^d	-5.38 ^b	-1.29 ^a	36.32 ^c
F ₃ W ₃	7.71 ^b	-4.88 ^{ab}	-0.62 ^a	48.39 ^c
CK	8.78 ^a	-5.31 ^b	-10.25 ^c	58.02 ^b

注:同列不同小写字母表示各处理间差异性显著($p<0.05$)。

2.2 不同水盐处理对苜蓿生长的影响

不同水盐处理苜蓿株高、地上及地下生物量变化

见图 2。不同水盐处理苜蓿株高、地上及地下生物量变化规律不一致。相同盐分水平条件下,株高与灌水量呈正相关,土壤含盐量超过 3 g/kg,株高增长率变缓,为 0.09。土壤盐分诱导苜蓿侧根增加,同时水分促进根系生长,不同水盐处理苜蓿地下生物量变化幅度较大,土壤含盐量在 1~3 g/kg,地下生物量增加;但土壤盐分过高时,对作物产生毒害作用,苜蓿根系死亡,土壤含盐量在 3~4 g/kg,地下生物量减小。土壤含盐量 1~2 g/kg,地下生物量增长率最大,与 F₁W₁比较,F₁W₃提高 132.18%;土壤含盐量在 2~4 g/kg,地下生物量增长率变缓,与 F₂W₁、F₃W₁比较,F₂W₃、F₃W₃分别提高 14.41%、12.05%。可以看出,低浓度土壤盐分、水分增加促进苜蓿地下生物量增加;盐分浓度增大,水分增加对地下生物量影响不显著。相同水分条件下,含盐量增加至 2~3 g/kg 时,地下生物量平均提高 73.10%,较对照处理 CK,该盐分水平地下生物量平均增加 10.70%;含盐量增加至 3~4 g/kg 时,地下生物量平均降低 9.84%,表明土壤盐分低于 3 g/kg 有利于诱导根系生长。不同水盐处理苜蓿地上生物量变化幅度平缓;相同土壤盐分水平,高水处理较低水处理地上生物量分别增加 2.22%、6.12%、20.33%;相同水分条件下,最小地上生物量为 1.22 g,随盐分水平递增,地上生物量相对降低 8.00%、9.97%;与对照处理 CK 相比,F₁W₃、F₂W₃地上生物量分别提高 6.96%、0.39%,F₃W₃地上生物量降低 5.53%,表明低浓度土壤盐分可以促进植株生长。

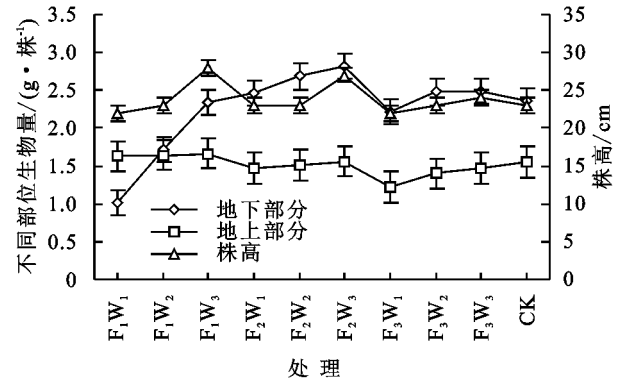
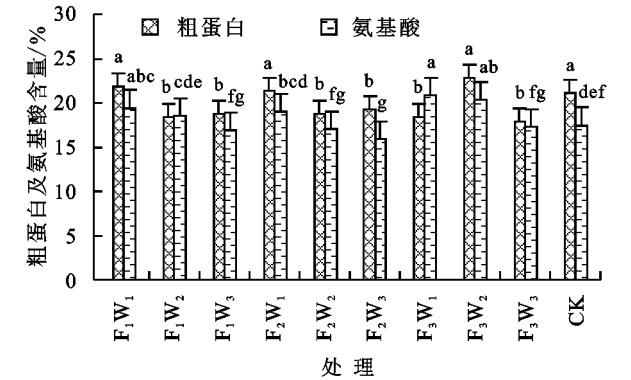


图 2 不同水盐处理苜蓿株高、地上及地下生物量

2.3 不同水盐处理对苜蓿品质的影响

图 3 为不同水盐处理苜蓿粗蛋白及氨基酸含量变化,不同水盐处理蛋白质含量整体高于氨基酸含量。土壤含盐量在 1~3 g/kg,低水处理粗蛋白含量均显著高于中水及高处理($p<0.05$),平均提高 17.45%,但中水与高水处理粗蛋白含量无显著差异,说明一定的水分亏缺有利于提高苜蓿粗蛋白含量。土壤含盐量在 3~4 g/kg,F₃W₂苜蓿粗蛋白含量显著高于其他处理($p<0.05$)。与对照处理 CK 相比较,相同水分条件下,粗蛋白含量大小为 CK>F₂W₃>

F₁W₃>F₃W₃处理,说明盐胁迫抑制苜蓿粗蛋白的积累,充足水分条件下,中浓度盐分处理苜蓿粗蛋白含量增加,盐分超过 3 g/kg 时,粗蛋白含量明显降低。不同水盐处理苜蓿氨基酸含量呈增加趋势,且差异性显著($p<0.05$),其中 F₃W₁氨基酸含量最大,为 20.90%。相同盐分水平下,随灌水量增加氨基酸含量减小,平均分别减小 7.39%、9.46%、10.43%。与对照处理 CK 相比,F₁W₁处理氨基酸含量显著高于 CK 处理($p<0.05$),增高 11.30%;F₂W₃处理氨基酸含量显著低于 CK 处理($p<0.05$),降低 8.86%;F₃W₁、F₃W₂处理氨基酸含量均显著高于 CK 处理($p<0.05$),平均提高 18.23%。说明植株为了缓解盐分与水分胁迫造成的生理代谢不平衡,促使植株体内氨基酸含量增加。



注:图中不同小写字母表示各处理间差异性显著($p<0.05$)。
图 3 不同水盐处理苜蓿粗蛋白与氨基酸含量分布

氨基酸是植物蛋白质组成成分,以游离状态广泛存在于植物体内,在植物生命活动中担负着各种生理作用^[6]。由表 2 可知,甘氨酸、蛋氨酸与粗蛋白相关性为负相关,且相关性不显著, p 值分别为 0.98、0.95;其他氨基酸与粗蛋白相关性均为正相关,且相关性显著($p<0.05$)。其中天门冬氨酸、谷氨酸、氨、组氨酸精氨酸与粗蛋白相关性极显著($p<0.01$),最大相关系数为 0.77,脯氨酸、苯丙氨酸含量与粗蛋白相关性显著($p<0.05$),相关系数均为 0.44,表明苜蓿粗蛋白含量主要受天门冬氨酸、谷氨酸、氨、组氨酸及精氨酸含量影响,其次为脯氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸等游离氨基酸。

2.4 不同水盐处理对苜蓿产量及水分利用效率的影响

表 3 为不同水盐处理苜蓿干草产量及水分利用效率结果,由方差分析结果可知,灌水水分、盐分水平对苜蓿干草产量、根生物量、生物量及耗水量影响显著($p<0.05$),对水分利用效率无显著影响,水盐相互作用对苜蓿产量及水分利用效率都有极显著影响($p<0.01$),灌水量及盐分是影响苜蓿获得高产的主要因素,对于河套灌区水盐相互作用对苜蓿产量及水分利用效率的影响普遍存在。

表 2 不同氨基酸与粗蛋白相关性分析

氨基酸种类	相关系数	显著性(双侧)	协方差	氨基酸种类	相关系数	显著性(双侧)	协方差
天门冬氨酸	0.65**	0.00	0.60	异亮氨酸	0.37*	0.04	0.07
苏氨酸	0.45*	0.01	0.08	亮氨酸	0.38*	0.04	0.12
丝氨酸	0.37*	0.04	0.06	酪氨酸	0.37*	0.04	0.04
谷氨酸	0.47**	0.01	0.16	苯丙氨酸	0.44*	0.02	0.08
甘氨酸	−0.00	0.98	−0.00	赖氨酸	0.46*	0.01	0.11
丙氨酸	0.45*	0.01	0.09	氨	0.77**	0.00	0.09
胱氨酸	0.41*	0.03	0.01	组氨酸	0.72**	0.00	0.07
缬氨酸	0.44*	0.02	0.09	精氨酸	0.54**	0.00	0.09
蛋氨酸	−0.01	0.95	0.00	脯氨酸	0.44*	0.01	0.18

注：* 表示差异性显著($p<0.05$)；** 表示差异性极显著($p<0.01$)。

相同土壤盐分处理下,随灌水量增加苜蓿干草产量呈增加趋势,土壤盐分在 1~2 g/kg,干草产量大小为高水处理显著高于低水处理($p<0.05$)。土壤盐分在 2~4 g/kg,中水处理干草产量显著高于低水处理($p<0.05$),而中水与高水处理无显著差异。水分由低水增加到中水,不同盐分干草产量分别提高 8.26%,18.90%,15.08%,增加至高水,不同盐分干草产量分别提高 5.29%,3.18%,4.56%。可见,灌水量高的苜蓿干草产量也较高,但随灌水量增加,灌水量对苜蓿的增产效应明显降低。土壤盐分对苜蓿产量影响也十分显著。相同水分条件下,干草产量大小均为低盐分处理显著高于高盐分处理($p<0.05$),土壤盐分由 F₁ 增加到 F₂,干草产量平均降低 10.53%;土壤盐分增至 F₃,不同水分处理干草产量平均降低 5.58%,可见土壤盐分超过 3 g/kg,相对低盐处理干草产量减小不明显。土壤盐分在 1~2 g/kg,不同处理苜蓿干草产量均偏高,F₁W₃ 产量最大,为 1 211.61 kg/hm²。不同水盐处理,干草产量 F₁W₃>F₁W₂>

F₂W₃>CK,较对照处理 CK,干草产量分别提高 4.63%,10.17%,0.26%,说明土壤盐分小于 3 g/kg,适宜水分可提高苜蓿产量。相同盐分水平下,低水处理较高水处理水分利用效率均偏大。土壤含盐量在 2~4 g/kg,中水处理水分利用效率达到最大值,水分由中水增加到高水,水分利用效率平均降低 10.38%。相同水分条件下,随土壤盐分增加水分利用效率先减小后增大,土壤盐分增加至 F₂,水分利用效率平均降低 14.07%;土壤盐分增加至 F₃,水分利用效率平均提高 10.89%。较对照处理 CK,土壤含盐量在 1~2, 3~4 g/kg,不同处理水分利用效率均大于 CK 处理,平均提高 10.77%;土壤盐分在 2~3 g/kg,F₂W₂ 处理水分利用效率较对照 CK 提高 5.09%。综上表明土壤含盐量在 1~2 g/kg,水分在 70%~75% θ_f ,增加干草产量,提高水分利用效率;土壤含盐量在 2~3 g/kg,水分在 70%~85% θ_f ,水分利用效率提高干草产量减小,但不显著;土壤含盐量在 3~4 g/kg,水分在 85% θ_f 以上,苜蓿干草产量增加。

表 3 不同水盐处理产量及水分利用效率

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	单株根 生物量/g	单株 生物量/g	耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
F ₁ W ₁	1062.99 ^{bcd}	1.01 ^e	2.84 ^d	72.46 ^{fg}	14.67 ^a
F ₁ W ₂	1150.74 ^{ab}	1.72 ^d	2.00 ^f	84.04 ^{de}	13.69 ^{ab}
F ₁ W ₃	1211.61 ^a	2.35 ^{bc}	2.39 ^e	103.47 ^a	11.70 ^{cd}
F ₂ W ₁	898.80 ^e	2.46 ^b	2.86 ^d	81.03 ^{def}	11.09 ^d
F ₂ W ₂	1068.65 ^{bcd}	2.68 ^a	3.40 ^b	89.63 ^{bcd}	11.92 ^{cd}
F ₂ W ₃	1102.62 ^{bc}	2.81 ^a	3.45 ^b	99.10 ^{ab}	11.13 ^d
F ₃ W ₁	863.41 ^e	2.21 ^c	4.02 ^a	67.71 ^g	12.75 ^{bcd}
F ₃ W ₂	993.63 ^d	2.48 ^b	2.96 ^d	75.25 ^{efg}	13.20 ^{abc}
F ₃ W ₃	1038.92 ^{cd}	2.48 ^b	3.28 ^{bc}	87.31 ^{cd}	11.90 ^{cd}
CK	1099.79 ^{bc}	2.36 ^{bc}	3.09 ^{cd}	96.94 ^{abc}	11.34 ^d
水分水平	9.77*	59.94*	26.03**	23.45**	6.88
显著性分析 盐分水平	5.58*	9.02**	27.43**	9.41*	10.16
灌水×盐分	12.36**	66.23**	40.92**	22.76**	11.27**

注：同列数据后不同小写字母表示各处理差异性显著($p<0.05$)；* 表示差异性显著($p<0.05$)；** 表示差异性极显著($p<0.01$)。

3 讨论

水分及盐分是影响农业生产的主要限制因子,具

体表现为植物生产性能及生理等方面^[2-4]。随灌溉量的增多,紫花苜蓿干草产量逐渐增加,而苜蓿的水分

利用效率随灌溉量呈降低趋势^[10]；同时，NaCl 浓度的增加和胁迫时间的延长均使苜蓿的生长速率和水分利用效率下降^[12]，但适宜灌溉量能明显改善苜蓿的生产性能，并提高其水分利用效率^[11]。本研究表明，相同盐分水平下，随灌水量的增加，苜蓿干草产量增加，土壤含盐量 1~2 g/kg，随灌水量增加，苜蓿水分利用效率下降；土壤盐分超过 2 g/kg，随灌水量增加呈先增大后减小变化趋势，可能原因水分抑制土壤盐分向表层累积，苜蓿植株体内水势降低，气孔导度及蒸腾速率增大^[5]，水分利用效率增大；但充足的水分供给使得根区土壤达到饱和状态导致涝渍现象，造成气孔关闭^[12]，导致水分利用效率降低。李品芳等^[13]研究发现，NaCl 胁迫浓度的增加和胁迫时间的延长均使苜蓿土体中的剩余水量呈上升趋势，本研究表明，土壤含盐量超过 3 g/kg，土壤溶液渗透势降低，苜蓿吸水困难^[4]，导致土壤中剩余水分显著增加，随灌水量逐渐增加。

李冬冬等^[14]研究发现，适宜的盐分含量在棉花生殖生长期具有促进作用。因此一定盐分范围内，对作物生长不一定产生抑制作用，低浓度的 NaCl 对紫花苜蓿种子的发芽和幼苗生长没有抑制作用或者具有促进作用^[15]，同时灌水充足苜蓿的株高、生长速度增大。本研究表明，相同盐分株高与灌水量呈正相关，与对照组 CK 比较，株高平均提高 3.87%。土壤含盐量在 2~3 g/kg，随灌水量增加地下生物量增加，与对照处理 CK 相比，地下生物量均增大，平均增大 10.70%；可能原因是当盐分浓度达到一定程度时诱导侧根系统发育，侧根的数量明显增加，在土壤高水分作用下，根系直径增粗，苜蓿根系生物量增加^[16]。以上研究结果仅为盆栽模拟试验，后期将会在大田中监测多年生苜蓿进行验证。

4 结论

(1) 相同盐分条件下，植株株高、地上生物量、地下生物量、耗水量及干草产量随灌水量的增加而增大，但灌水量增加，苜蓿的增产效应明显降低。相同水分条件下，随盐分增加，苜蓿耗水量及地下生物量整体呈先增大后减小的变化趋势。土壤含盐量超过 3 g/kg，土壤中剩余水分显著增加，随灌水量逐渐增加。土壤盐分在 1~2 g/kg，灌水量增多，苜蓿的水分利用效率呈下降趋势，土壤盐分超过 2 g/kg，苜蓿水分利用效率随灌水量呈先增大后减小趋势。

(2) 土壤含盐量在 1~3 g/kg，水分胁迫有利于提高苜蓿粗蛋白含量；其中低水处理粗蛋白含量均显著高于中水及高水处理($p < 0.05$)；土壤含盐量 3~4 g/kg，盐分改变水分胁迫阈值，中水处理粗蛋白含量显著高于低水与高水处理($p < 0.05$)。盐分与水分胁迫

迫下，植株体内氨基酸含量增加，其中 F₃W₁ 氨基酸含量最大，为 20.90%；对各游离氨基酸及粗蛋白含量进行相关性分析，其中甘氨酸、蛋氨酸与粗蛋白相关性不显著；其他氨基酸与粗蛋白相关性均呈显著正相关($p < 0.05$)，其中天门冬氨酸、谷氨酸、氨、组氨酸精氨酸与粗蛋白相关性极显著($p < 0.01$)。

(3) 土壤含盐量在 1~2 g/kg、水分在 70%~75% θ_f ，干草产量增加，水分利用效率提高；土壤含盐量在 2~3 g/kg、水分在 70%~85% θ_f ，水分利用效率提高干草产量减小，但不显著；土壤含盐量在 3~4 g/kg、水分在 85% θ_f 以上，苜蓿干草产量增加。

参考文献：

- [1] 魏晓斌, 王志锋, 于洪柱, 等. 不同生长年限苜蓿对盐碱地土壤肥力的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(10): 1502-1507.
- [2] 万里强, 李向林. 苜蓿水分生理与耐旱研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
- [3] 成自勇. 甘肃秦王川灌区苜蓿草地土壤水盐动态及其生态灌溉调控模式研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [4] 贾利霞. 盐胁迫对草原 3 号杂花苜蓿的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [5] 赵霞, 叶林. 盐碱胁迫对紫花苜蓿生长、品质及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 176-180.
- [6] 刘建兵, 喻方圆, 胡晓健. 水分胁迫下植物体内小分子有机化合物积累研究综述[J]. 湖南林业科技, 2012, 39(1): 80-84.
- [7] 张立全, 张凤英, 哈斯阿古拉. 紫花苜蓿耐盐性研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(6): 296-305.
- [8] 曹荷莉, 丁日升, 薛富岚, 等. 不同水盐胁迫对番茄生长发育和产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 29-35.
- [9] Peng Y L, Gao Z W, Gao Y, et al. Eco-physiological characteristics of alfalfa seedlings in response to various mixed salt-alkaline stresses[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(1): 29-39.
- [10] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123.
- [11] 张前兵, 于磊, 鲁为华, 等. 优化灌溉制度提高苜蓿种植当年产量及品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 116-122.
- [12] 许迪, 李益农, 龚时宏, 等. 面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(1): 63-72.
- [13] 李品芳, 侯振安. 蒸发脱湿过程中盐胁迫对苜蓿生长及矿质元素吸收运输的影响[J]. 土壤通报, 2001(增刊 1): 76-80.
- [14] 李冬冬, 王海红, 吕新, 等. 滴灌棉田不同盐分土壤水分变化规律及其利用效率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 90-94.
- [15] 景艳霞, 袁庆华. NaCl 胁迫对苜蓿幼苗生长及不同器官中盐离子分布的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 134-139.
- [16] 张建波, 白史旦, 张新全, 等. 紫花苜蓿根系与土壤物理性质的关系[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(14): 3424-3425.