

典型荒漠植物梭梭在咸水滴灌条件下土壤水盐运移特性

刘赛华¹, 杨广^{1*}, 张秋英², 何新林¹, 薛联青³, 王泽林¹, 李发东^{4,5}, 任富天¹

(1.石河子大学 水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000;

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3.河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;

4.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】探讨不同矿化度咸水滴灌荒漠植物梭梭对土壤水盐运移特性的影响。【方法】采用测坑进行咸水滴灌梭梭试验, 运用舒卡列夫和Piper三线图等方法, 分析不同矿化度对梭梭土壤水分、盐分、土壤离子量和水化学特征变化。【结果】①不同矿化度咸水滴灌后, 不同深度土壤盐分累积量不同, 结果发现在60~80 cm深度处积盐, 最高积盐量可达6.2 g/kg; 且咸水滴灌梭梭土壤含盐量与灌水矿化度呈正相关关系; ②咸水滴灌梭梭后, 土壤中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 和 Na^+ 离子量的变化随矿化度显著增加, 土壤水溶液阳离子由 Ca^{2+} 逐渐向 Na^+ 变化, 阴离子由 SO_4^{2-} 逐渐向 Cl^- 变化, 水化学类型由 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ 型逐渐向 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ 型演化。【结论】不同矿化度滴灌梭梭条件下, 分析土壤含水率、含盐量的分布特征, 明确了不同咸水滴灌对土壤离子变化及水化学演变特性, 为当地咸水资源的高效利用及生态建设具有指导意义。

关键词: 咸水; 梭梭; 水盐运移; 水化学特性

中图分类号: S153.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019186

刘赛华, 杨广, 张秋英, 等. 典型荒漠植物梭梭在咸水滴灌条件下土壤水盐运移特性[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 52-60.

LIU Saihua, YANG Guang, ZHANG Qiuying, et al. Experimental study on water and solute movement in soil grown with desert plant haloxylon ammodendron under drip irrigation using saline water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 52-60.

0 引言

我国西北干旱区水资源紧缺, 生态环境脆弱, 农业用水比重高达90%以上。近年来, 随着社会的发展及农业规模的进一步扩大, 水资源供需矛盾进一步加剧, 生态环境局部退化。我国咸水资源储量丰富, 主要分布在东南沿海及西北干旱区, 可开发的潜力巨大^[1-2]。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)作为我国西北干旱区广泛分布的优生荒漠植物, 也是生态植物对维持生态平衡有着重要的作用^[3-4], 同时具有良好的耐盐特性, 因此开展咸水滴灌荒漠植物梭梭对于水资源的可持续利用及生态建设具有重要意义^[5]。

咸水灌溉对土壤水盐分布及作物生长有着重要的影响, 盐分带入土壤, 会造成土壤盐渍化。国内很多学者对微咸水灌溉条件下玉米、小麦、番茄等主要

农作物进行了研究^[6-8], 其中, 张余良等^[9]对长期微咸水灌溉条件下耕地土壤理化性质的研究, 表明长期灌溉微咸水导致土壤表层盐分积累, 土壤理化性质趋于恶化, 土壤入渗速度降低。土壤含盐量过高, 会导致土壤潜在盐碱化。将咸水用于灌溉生态植物梭梭, 能有效利用水资源, 在一定矿化度下研究土壤水盐分布特征, 发现土壤积盐不会影响梭梭的生长。周智彬等^[10]对塔克拉玛干沙漠腹地长期用4 g/L的咸水灌溉梭梭研究发现, 虽然土壤积盐, 但不影响梭梭的正常生长, 说明咸水对绿洲荒漠造林是可行的。刘江涛等^[11]利用Piper三线图和主要离子比值关系分析地下水化学组成的时空分布特征及区域水化学类型及其形成的主要控制因素, 有助于了解区域地下水循环过程。长期灌溉咸水会降低土壤含水率的入渗, 灌溉水浓度达到某一临界值时, 盐分在一定深度的土层内显著聚集, 影响植物生长^[12-15]。分析咸水滴灌下对土壤水分和盐分运移的特性, 指定咸水灌溉水盐调控灌溉制度, 对于缓解干旱区水资源紧缺具有重要意义^[16]。在已有的研究成果, 对微咸水灌溉分析土壤水盐运移影响, 所研究的盐分梯度少, 对于复合盐分组成的不同矿化度咸水灌溉生态植物的土壤水盐运移方面的研究较

收稿日期: 2019-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601579, U1803244); 国家重点研发计划专项(2017YFC0404303); 兵团中青年科技创新领军人才项目(2018CB023); 兵团优秀青年教师项目(CZ027204); 石河子大学青年创新人才项目(CXRC201801)

作者简介: 刘赛华(1995-), 女。硕士研究生, 主要从事干旱区生态水文方向的研究。E-mail: 1321751104@qq.com

通信作者: 杨广(1983-), 男, 河北新乐人。副教授, 主要从事干旱区生态水文方向的研究。E-mail: mikeyork@163.com

少。本文选择西北干旱区典型荒漠植物梭梭,通过测坑试验,分析咸水滴灌梭梭对土壤含水率、含盐量、土壤离子量及水化学类型的影响,为区域浅层地下微咸水资源开发利用和生态建设提供科学技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于天山北麓准噶尔盆地南缘,新疆石河子市西郊石河子大学农试场二连现代节水灌溉兵团重点试验室(东经 85°59′,北纬 44°19′),平均海拔高度约 400 m。试验于 2018 年 5—9 月在石河子大学现代节水灌溉兵团重点试验室(E85°59′, N44°19′)进行,平均海拔高度约 400 m,属于典型的干旱少雨温带大陆性气候,年降水量 125.0~207.7 mm,年平均蒸发量 1 000~1 500 mm,平均气温 25.1~26.1 °C,全年日照时间 2 797.5 h,蒸发量 1 500 mm 左右^[17]。

表 1 2018 年气象状况

Table 1 Meteorological conditions in 2018

月份 Month	5	6	7	8	9	10
最高气温/°C	28.2	31.2	34.1	30.3	25.9	14.3
Maximum temperature/°C						
最低气温/°C	13.1	18.1	19	15.8	9.7	1.1
Minimum temperature/°C						
平均气温/°C	20.4	24.6	26.5	22.6	17.2	6.9
Average temperature/°C						
降雨量/mm	44.9	38.5	7.3	19.2	1.8	16.9
Rainfall/mm						

表 2 测坑土壤体积质量与田间持水率

Table 2 Measuring pit soil bulk density and field water holding capacity

土层深度/cm	体积质量/(g·cm ⁻³)	田间持水率/%
Depth of soil	Bulk density and volume	Field water holding
layer/cm	mass/(g·cm ⁻³)	capacity/%
0~20	1.489 7	19.73
20~40	1.465 5	19.06
40~60	1.459 3	20.08
60~80	1.442 2	19.55
80~100	1.463 0	17.20
平均	1.461 5	19.13

1.2 试验设计

试验以梭梭为供试植物,供试土壤为沙土。选择人工移栽 2 a 生的荒漠植物梭梭,在测坑内种植梭梭。测坑规格为 3 m×2 m×2 m,四周侧壁进行防渗处理,底部设 30 cm 反滤层,每个测坑种植植株 4 棵。土壤平均体积质量为 1.46 g/cm³,田间持水率为 19.13%(质量含水率),滴灌矿化度设 5 个处理,分别为 1、3、

6、9、12 g/L,每个矿化度处理设 3 次重复。测坑土壤初始含盐量为 0.35%。灌水方式为滴灌,滴头流量为 7.9~10.5 L/h。滴头布置于距植物基径约 5 cm。根据准噶尔南缘莫索湾灌区地下水的主要组成成分,灌溉水溶液为人工配置而成,所配化学药品 NaHCO₃、Na₂SO₄、NaCl、CaCl₂、MgCl₂ 的质量比例为 1:7:8:1:1。梭梭的灌水下限为相对田间持水率的 30%~40%,灌水上限为相对田间持水率 80%,灌水周期为 15 d/次,灌水定额为 30 L/株。

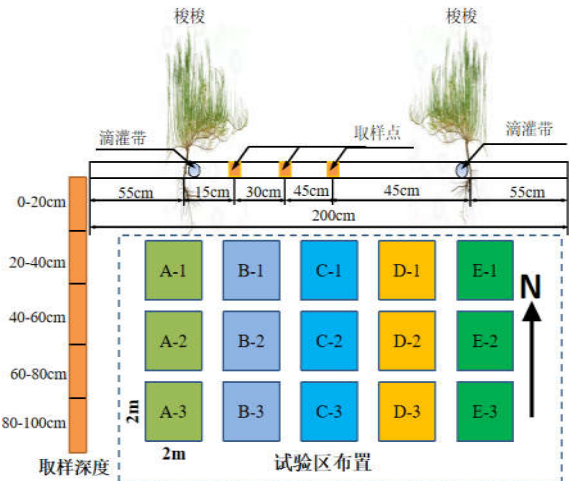


图 1 滴灌布置方案图

Fig.1 Drip Irrigation Arrangement Schemes

1.3 数据处理

1.3.1 土壤水分和盐分

土壤含水率在室内采用烘干法测定。将土壤剖面分为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 这 5 个采样区间进行土壤含水率的测定,A 到 E 表示 5 种不同矿化度的咸水。每个处理设 3 个重复,例如 A-1、A-2 和 A-3 (图 1)。在灌水前收集所有深度区间的土样,用土钻取土样。测量土壤的盐分,将烘干的土壤杨平磨碎后,用 5 mm 的筛子筛土,土样风干后,采用 1:5 的土水比来浸提土样,然后采用上海雷磁 DDS-11A 电导仪测定土壤电导率 (EC)。

1.3.2 土壤离子

Ca²⁺和 Mg²⁺采用 EDTA 滴定法测定,Na⁺和 K⁺采用火焰光度法测定;CO₃²⁻和 HCO₃⁻采用双指示剂中和滴定法测定;Cl⁻采用硝酸银滴定法测定;SO₄²⁻采用 EDTA 间接络合滴定法测定;采用电位法利用酸度计、玻璃电极和 pH 值复合电极测定土壤 pH 值;以上测定均重复 3 次,取平均值。

1.4 数据分析

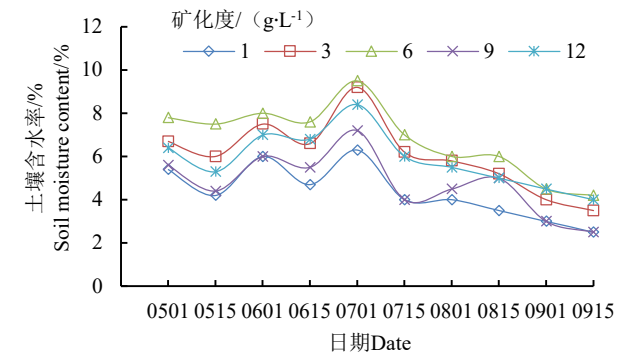
使用 Origin (Edwards 2002) 进行方差分析 (ANOVA)。采用 Tukey's HSD 检验进行多重比较,检验不同方法之间的显著性差异,当 $p \leq 0.05$ 时,差异性被认为具有统计学意义。舒卡列夫法进行水化

学分类和 Piper 三线图处理数据。

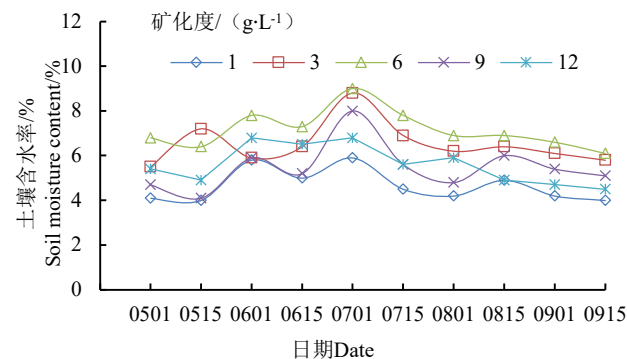
2 结果与分析

2.1 土壤水分运移分析

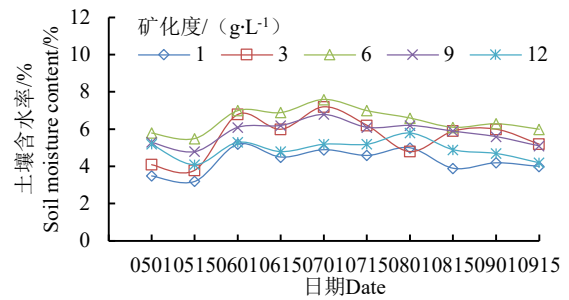
土壤的水分运移是水分在土壤中循环的重要过程,影响着荒漠植被的生长,降雨、太阳辐射和灌溉等都会对土壤的水分产生影响^[18-19]。由图 2 可见,咸水灌溉梭梭土壤水分分布具有明显的分层现象。在表层(0~20 cm)土壤中,土壤含水率有明显波动,主要是由于表层土壤接近地表,受灌溉,蒸发,降水等因素影响,含水率变化剧烈^[20];深层(80~100 cm)土中,由于积盐量较大,盐分胁迫影响植物根系吸水,土壤含水率缓慢降低,但波动性不大,深层土壤很难受外界因素影响,含水率相对稳定。5 月份灌水后,在不同矿化度处理下土壤含水率没有明显的波动,主要由于气温较低,蒸发较弱 7 月中旬土壤含水率呈现最高值,主要由于在气温强烈的蒸发作用下,植被需水急剧上升,土壤含水率总消耗量在增加。由图 2 可以看出,随矿化度的增大,同一深度下矿化度为 6 g/L 的土壤含水率最大,矿化度增大到 9 g/L 和 12 g/L 时土壤含水率不再增加,反而降低,这是由于土壤盐分胁迫使得土壤结构受到一定程度的破坏,从而影响梭梭对土壤水分的吸收能力。



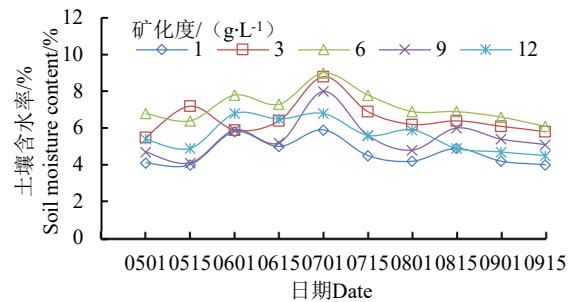
(a) 0~20 cm



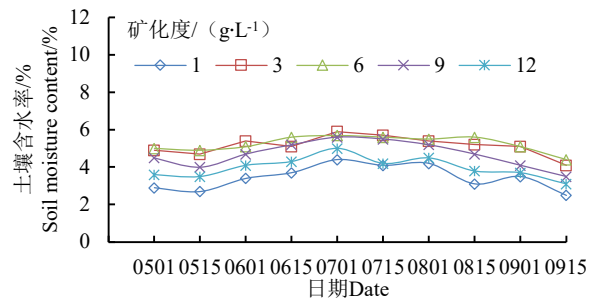
(b) 20~40 cm



(c) 40~60 cm



(d) 60~80 cm



(e) 80~100 cm

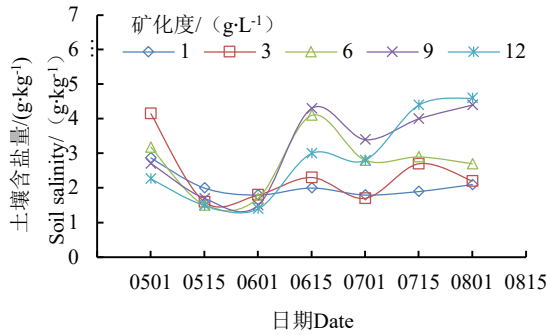
图 2 不同矿化度咸水处理下土壤含水率分布

Fig.2 Distribution of soil water content in saline water treatment with different salinity

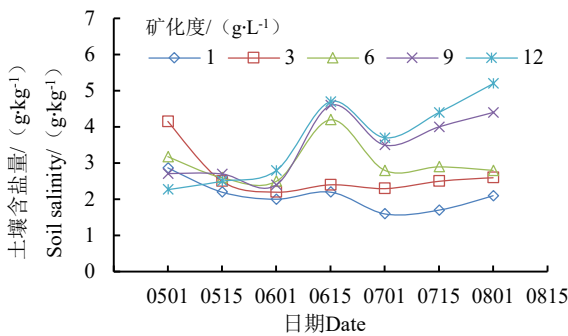
2.2 土壤盐分运移分析

土壤含盐量直接影响梭梭成活及生理生长。在试验条件下,灌溉水的矿化度会影响梭梭主根区的含盐量,含盐量过高会引起根系盐胁迫,影响梭梭对水分的有效利用。图 3 显示了不同矿化度处理对土壤含盐量分。在梭梭生长阶段,1、3、6、9、12 g/L 矿化度咸水灌溉后不同深度土壤含盐量的变化趋势相似。5、6 月时,由于初期灌水量少,带入土壤中的盐分较少,而且降雨对土壤盐分的淋洗,土壤中含盐量下降;进入 7 月,正是干旱地区最热的季节,干旱少雨,大量咸水灌溉,土壤盐分缺乏淡水淋洗,土壤盐分逐渐累积。在 20~60 cm 土层中,矿化度为 3、6 g/L 咸水进行滴灌时,含盐量逐渐下降,说明在梭梭生长期未出现盐分积累,甚至还有脱盐现象。不断的累积灌溉,积盐现象逐步显现出来,在 60~80 cm 土层处,整个生育期内 9、12 g/L 咸水灌溉后土壤内均积盐,最高积盐量分别比 6 g/L 咸水灌溉高 1.4、2.1 g/kg。可以

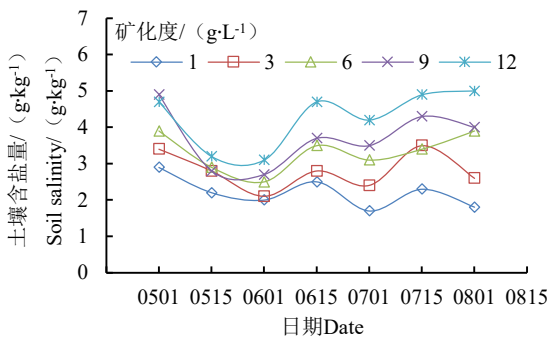
看出,在 60~80 cm 深度处积盐量最高,“盐随水动”上层土壤盐分随着灌溉水向下迁移,滴灌过程中将盐分带入湿润区最边缘土层聚集,在土壤湿润锋处的含盐量最大^[21]。



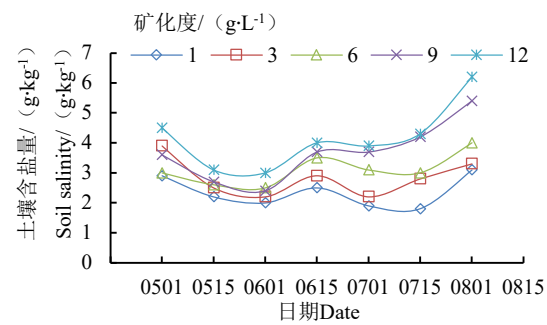
(a) 0~20 cm



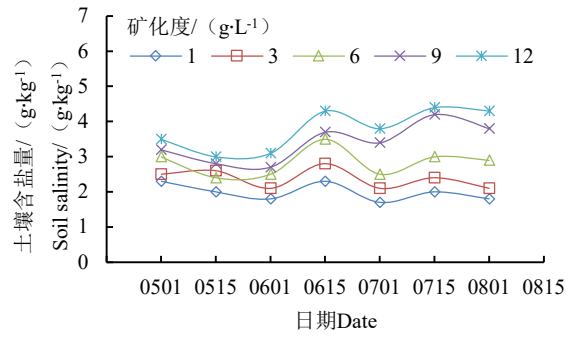
(b) 20~40 cm



(c) 40~60 cm



(d) 60~80 cm



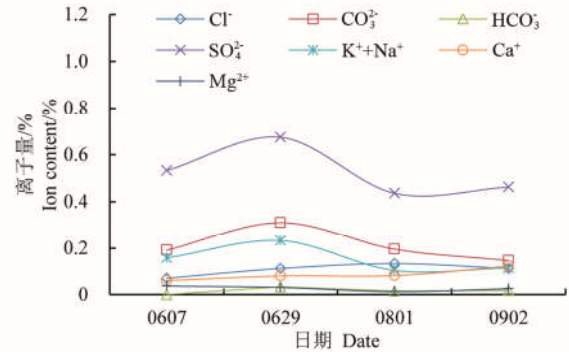
(e) 80~100 cm

图 3 不同矿化度咸水处理下土壤含盐量的变化

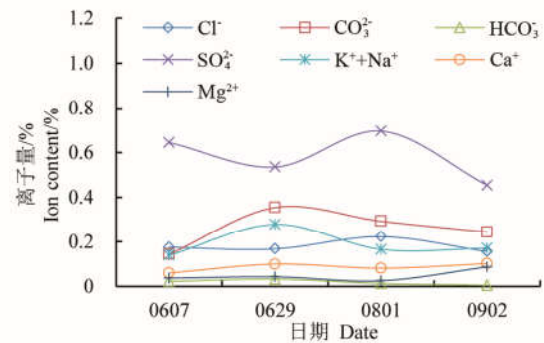
Fig.3 Changes of soil salinity under saline water treatment with different salinity

2.3 土壤离子变化

咸水滴灌入渗带入一定量盐分离子与土壤胶体颗粒间发生着物理化学变化,影响土壤结构,导致土壤盐渍化。离子毒害主要是由于植物摄取了过量的 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 等离子,土壤中的钠离子量是反映土壤盐分的重要指标^[22-23]。不同矿化度处理梭梭土壤 8 大离子如图 4 所示。在土壤表层 0~20 cm,不同矿化度处理下,土壤中阳离子中 K^+ 、 Na^+ 量最高,阴离子中 SO_4^{2-} 量最高, HCO_3^- 量最低,表 3 为不同矿化度处理下土壤离子量。



(a) 1 g/L



(b) 3 g/L

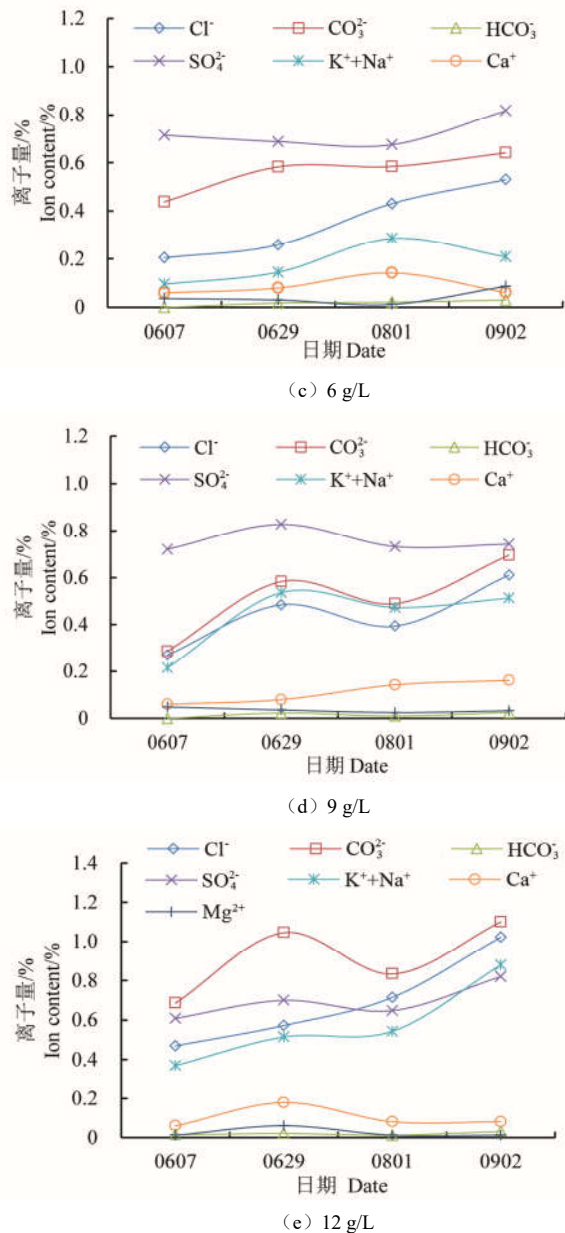


图4 梭梭不同矿化度处理下0~20 cm 土壤离子变化

Fig.4 Changes of soil ions in 0~20 cm under different salinity treatments of *Haloxylon ammodendron*

表3 不同矿化度处理下土壤离子量

Table 3 Soil ion content under different salinity treatments

矿化度/ (g·L ⁻¹) Salinity/ (g·L ⁻¹)	盐分离子量/(mmol·L ⁻¹) Salt segregator content/(mmol·L ⁻¹)						
	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃	Cl ⁻	Ca ⁺	K ⁺ +Na ⁺	CO ₃ ²⁻
1	0.024±0.002a	0.537±0.021a	0.023±0.003a	0.137±0.025a	0.093±0.003a	0.153±0.025a	0.243±0.035a
3	0.046±0.002d	0.557±0.025a	0.025±0.005a	0.153±0.025a	0.127±0.025a	0.160±0.030a	0.247±0.015a
6	0.041±0.002c	0.743±0.032b	0.025±0.003a	0.360±0.020b	0.130±0.030a	0.247±0.031b	0.560±0.030b
9	0.026±0.002a	0.753±0.032b	0.020±0.003a	0.453±0.032c	0.137±0.025a	0.453±0.032c	0.547±0.031b
12	0.036±0.003b	0.956±0.021b	0.022±0.002a	0.730±0.03d	0.137±0.021a	0.550±0.026d	0.812±0.026c

注 小写字母代表在0.05水平差异显著。

Note Lowercase letters represent the significance difference at 0.05.

由图4可知,土壤表层0~20 cm,随着矿化度不断增加,各离子量不同程度增加。咸水中的分布及离子量变化关系分析,SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺+Na⁺是咸水化学组成中占主导作用,离子的量是随矿化度增加显著增加,其他离子量变化不明显;由于灌溉水矿化度越大,带入土壤盐分量越多,SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺+Na⁺离子浓度就越大,影响植物生长。

2.4 土壤 pH 值

土壤盐分增加可能导致土壤盐渍化。随灌水矿化度的升高,土壤盐分离子量的相对比例发生变化,因而会影响其pH值^[24]。不同矿化度对土壤pH值变化如图5所示,随着矿化度升高,土壤pH值增加,矿化度超过6 g/L时,土壤pH值升高至8.5左右。深度在0~40 cm,60~80 cm土壤pH值变化明显,其矿化度为1、3、6 g/L, pH值变化范围在0.25左右,矿化度为9、12 g/L时, pH值变化范围在0.58。

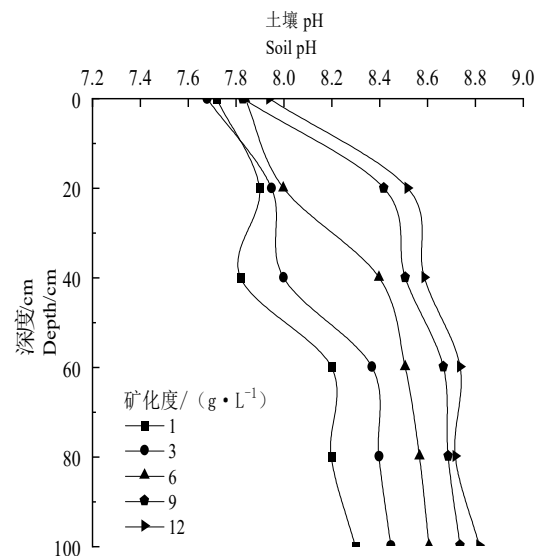


图5 不同矿化度咸水灌溉土壤 pH 值

Fig.5 Soil pH of saline water irrigation with different salinity

2.5 土壤水化学特征

由图6可知,不同矿化度处理土壤溶液均以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 量较高,主要阴离子浓度关系均为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$,阳离子质量浓度关系均为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$;1 g/L处理下土壤溶液水化学类型以 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 型为主,3 g/L处理下土壤溶液水化学类型以 SO_4^{2-} - Ca^{2+} · Mg^{2+} 型为主,6 g/L处理下土壤溶液水化学类型以 SO_4^{2-} - Ca^{2+} · Na^+ 型为主,9 g/L处理下土壤溶液水化学类型以 SO_4^{2-} · Cl^- - Ca^{2+} · Na^+ 型为主,12 g/L处理下土壤溶液水化学类型以 SO_4^{2-} · Cl^- - Na^+ 型为主;不同矿化度咸水灌溉下土壤溶液水化学类型分布较集中,阳离子类型以 Ca^{2+} 和 Na^+ + K^+ 为主(毫克当量百分比为60%~100%),阴离子类型以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主(毫克当量百分比为80%~100%)^[25];随着灌溉水矿化度的增大,阳离子由 Ca^{2+} 逐渐向 Na^+ 变化,阴离子由 SO_4^{2-} 逐渐向 Cl^- 变化,水化学类型由 SO_4^{2-} - Ca^{2+} · Mg^{2+} 型逐渐向 SO_4^{2-} · Cl^- - Na^+ 型演化。

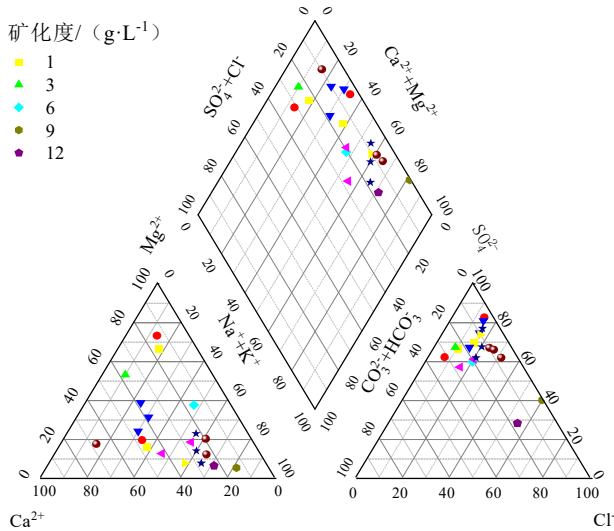


图6 不同矿化度处理土壤水化学 piper 三线图

Fig.6 Piper three-line map of soil hydrochemistry with different salinity treatments

3 讨论

3.1 咸水灌溉对土壤水分的影响

含水率是土壤重要物理性状之一,是作物良好生长发育的基础,是评价土壤渗透性能和影响作物生长状况的重要指标^[26-29]。不同矿化度(1、3、6、9、12 g/L)处理下的土壤含水率如图3所示。随着灌溉水矿化度的增大,土壤含水率不断增加,当矿化度大于6 g/L时,含水率随着矿化度的升高而减小。主要是随着矿化度增大,滴灌过程中土壤中的 Na^+ 数量会增多, Na^+ 的存在会引起土壤颗粒的膨胀和分散,在干湿交替作用下改变土壤物理特性^[30],使土壤的透水性和透气性变差。吴忠东等^[22]研究表明,同一土层中矿

化度为3 g/L的入渗土壤含水率最大,矿化度进一步增大到3.5 g/L和4.3 g/L时土壤含水率并未有增大现象,反而略有减小即相同湿润锋深度,土壤含水率反而与入渗水矿化度负相关。

3.2 咸水灌溉对土壤盐分的影响

高矿化度咸水长期灌溉导致深度0~100 cm土壤有明显积盐,盐分呈底聚型分布,咸水灌溉带入的盐分与土壤本身化学元素及土壤颗粒发生相互作用,改变土壤理化性质,导致土壤水分和盐分运移规律的变化,影响土壤水分和盐分分布。随着矿化度的升高,土壤中 Na^+ 数量也随之增加, Na^+ 是引起土壤退化的主要盐分,是影响土壤盐化和碱化的主要离子。土壤碱度变化也与灌溉水矿化度有关,长期高矿化度咸水灌溉会导致土壤碱化。许多研究发现^[31-34],滴灌土壤湿润区将盐分推移到湿润锋附近,使其含盐量增加;长期滴灌条件下,土壤湿润锋处的盐分积累是造成土壤次生盐碱化的原因之一。Ben等^[35]研究发现咸水灌溉导致土壤盐分显著增加。这与本研究的结果一致。

4 结论

1) 在垂直条件咸水滴灌下,同一深度处,矿化度以6 g/L为界,土壤含水率呈现先随矿化度增加而增加,而后随矿化度的升高而减小的规律,高矿化度带入的盐分及离子数量影响土壤的持水与导水能力。

2) 咸水滴灌梭梭土壤含盐量与灌水矿化度呈正相关,灌溉不同咸水会引起土壤含盐量的不同,其影响的大小排列顺序为:12 g/L>9 g/L>6 g/L>3 g/L>1 g/L,在垂直方向60~80 cm深度处积盐量最高,可达6.2 g/kg,体现灌溉矿化度越高,土壤含盐量也越高的特性。

3) 矿化度越大,离子质量浓度越大, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ + Na^+ 量变化随矿化度增加显著。不同矿化度处理下土壤溶液中均以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 量较高,主要阴离子质量浓度关系均为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$,阳离子质量浓度关系均为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。随着灌水矿化度的增大,阳离子由 Ca^{2+} 逐渐向 Na^+ 变化,阴离子由 SO_4^{2-} 逐渐向 Cl^- 变化,水化学类型由 SO_4^{2-} - Ca^{2+} · Mg^{2+} 型逐渐向 SO_4^{2-} · Cl^- - Na^+ 型演化。

参考文献:

- [1] HE Jianhua, MA Jinzhu, ZHANG Peng, et al. Groundwater recharge environments and hydrogeochemical evolution in the jiuquan basin, northwest china[J]. Applied Geochemistry, 2012, 27(4): 866-878.
- [2] YANG Guang, HE Xinlin, LI Xiaolong, et al. Transformation of surface water and groundwater and water balance in the agricultural irrigation area of the Manas River Basin, China. Int J Agric & Biol Eng, 2017, 10(4): 107-118.

- [3] 刘海东, 刘娇, 赵英, 等. 梭梭和沙拐枣对风沙土壤水热盐动态的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 169-175.
- LIU Haidong, LIU jiao, ZHAO Ying, et al. Effects of Haloxylon ammodendron and Calligonum mongolicum on Water-heat-salt Dynamics in Sandy Soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 169-175.
- [4] 朱海, 胡顺军, 刘翔, 等. 不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 860-867.
- ZHU Hai, HU Shunjun, LIU Xiang, et al. Spatio-temporal variations of soil moisture in the root zone of Haloxylon ammodendron at different life stages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): 860-867.
- [5] YANG Guang, HE Xinlin, ZHAO Chun, et al. A saline water irrigation experimental investigation into salt-tolerant and suitable salt concentration of Haloxylon ammodendron from the Gurbantünggüt Desert, Northwestern China[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2016, 25(9): 3 408-3 416.
- [6] 曹荷莉, 丁日升, 薛富岚. 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.
- CAO Heli, DING Risheng, XUE Fulan. Growth and Yield of Tomato as Impacted by Salinity Stress[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 29-35.
- [7] 闵勇, 朱成立, 舒慕晨, 等. 微咸水-淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 9-17.
- MIN Yong, ZHU Chengli, SHU Muchen, et al. Effects of Alternate Fresh and Brackish Water Irrigation on the Diurnal Variation of Photosynthesis of Summer Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 9-17.
- [8] 庞桂斌, 徐征和, 王海霞, 等. 微咸水灌溉对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 35-41.
- PANG Guibin, XU Zhenghe, WANG Haixia, et al. Effect of Irrigation with Slight Saline Water on Photosynthesis Characteristics and Yield of Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1): 35-41.
- [9] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969-973.
- ZHANG Yuliang, LU Wenlong, ZHANG Wei, et al. Effects of Long Term Brackish Water Irrigation on Characteristics of Agrarian Soil[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2006, 25(4): 969-973.
- [10] 周智彬, 徐新文. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地三种灌木的离子吸收特性[J]. 干旱区研究, 2002, 19(1): 49-52.
- ZHOU Zhibing, XU Xinwen. Absorption Characteristics of Ions in Three Species of Shrubs of the Artificially-planted Greenbelts in the Hinterland of Taklamakan Desert[J]. Study on Arid Areas, 2002, 19(1): 49-52.
- [11] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5 428-5 439.
- LIU Jiangtao, CAI Wutian, CAO Yueting, et al. Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvialproluvial Fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5 428-5 439.
- [12] 张伟, 吕新, 李鲁华, 等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2008(8): 15-19.
- ZHANG Wei, LV Xin, LI Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(8): 15-19.
- [13] OZSEF Zsembeli, LUCIA Sinka, ARZU Riveragarcía, et al. Effect of Soil Conditioning on the Moisture Content and the Salt Profile of the Soil Under Irrigation with Saline Water[J]. Agriculture (Pol'nohospodárstvo), 2019, 65(2): 77-87.
- [14] 王艳, 吴勇, 廉晓娟, 等. 不同矿化度水淋洗重度盐碱土的水盐运移特征[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 39-43.
- WANG Yan, WU Yong, LIAN Xiaojuan, et al. Water and Salt Transporting Feature of Soil with Different Degree Mineralization of Water Leaching Severe Saline-alkali Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(4): 39-43.
- [15] 李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1 180-1 187.
- LI Congjuan, TANG Junyan, GAO Pei, et al. Effect of Irrigation With Saline Water on Plant Root Distribution and Evolution of Aeolian Sandy Soil in Shelterbelts Along the Taklimakan Desert Highway[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(5): 1 180-1 187.
- [16] 吴忠东, 王全九. 微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 36-43.
- WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect of Saline Water Continuous Irrigation on Winter Wheat Yield and Soil Physicochemical Property[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 36-43.
- [17] YANG G, XUE L Q, HE X L, et al. Change in land use and evapotranspiration in the manas river basin, china with long-term water-saving measures[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 1 7874.
- [18] WANG Q j, WANG W Y, LU D Q, et al. Water and salt transport features for salt-effected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 54-57.
- [19] 王春霞, 王全九, 刘建军, 等. 微咸水滴灌条件下土壤水盐分布特征试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 30-35, 57.
- WANG Chunxia, WANG Quanjiu, LIU Jianjun, et al. Trial studies on characteristics of soil water and salt distribution in brackish water drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(6): 30-35, 57.
- [20] RAHMAN Muhammadmuhtur, HAGARE Dharma, MAHESHWARI Basant, et al. Impacts of Prolonged Drought on Salt Accumulation in the Root Zone Due to Recycled Water Irrigation[J]. Water Air & Soil Pollution, 2015, 226(4): 90-107.
- [21] 陈素英, 邵立威, 孙宏勇, 等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物

- 产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1 049-1 058.
- CHEN Suying, SHAO Liwei, SUN Hongyong, et al. Effect of brackish water irrigation on soil salt balance and yield of both winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1 049-1 058.
- [22] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64-69, 75.
- WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on Both Soil Infiltration Characteristics and Ion Mobility Features by Mineralization Degree of Infiltration Water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64-69, 75.
- [23] 王丹, 康跃虎, 万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 83-87.
- WANG Dan, KANG Yuehu, WAN Shuqin. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 83-87.
- [24] 郭全恩, 南丽丽, 李保国, 等. 灌溉水盐分组成对土壤水盐迁移参数的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 123-128.
- GUO Quanen, NAN Lili, LI Baoguo, et al. Effect of salt ion composition of irrigation water on parameters of soil water and salt movement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 123-128.
- [25] 李海学, 程旭学, 李林阳, 等. 宁夏海原盆地地下水淡水: 微咸水分布规律[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 182-188.
- LI Haixue, CHENG Xuxue, LI Linyang, et al. Distribution law of ground freshwater-brackishwater in the Haiyuan basin, Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 182-188.
- [26] 季泉毅, 冯绍元, 霍再林, 等. 咸水灌溉对土壤盐分分布和物理性质及制种玉米生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 20-25.
- JI Quanyi, FENG Shaoyuan, HUO Zailin, et al. Effects of Saline Water Irrigation on Salinity Distribution, Soil Physical Properties and the Growth of Seed Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 20-25.
- [27] 刘宗潇, 朱成立, 翟亚明, 等. 微咸水灌溉对土壤 EC 值及冬小麦产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 59-64.
- LIU Zongxiao, ZHU Chengli, ZHAI Yaming, et al. Influence of Brackish Water Irrigation on Soil EC and Yield of Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(3): 59-64.
- [28] 张安琪, 郑春莲, 李宗毅, 等. 棉花成苗和幼苗生长对咸水滴灌的响应特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 18-24.
- ZHANG Anqi, ZHENG Chunlian, LI Zongyi, et al. Responsive Growth of Seedling and Matured Cotton to Drip Irrigation with Saline Water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 18-24.
- [29] 马婷婷, 薛娴, 黄翠华, 等. 咸水膜下滴灌频率对土壤表层水盐环境的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(8): 32-38.
- MA Tingting, XUE Xian, HUANG Cuihua, et al. The Impact of Frequency of Surface Drip Irrigation with Saline Water on Salt Accumulation on Mulched Soil Surface[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(8): 32-38.
- [30] 吴忠东, 王全九. 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 53-58.
- WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect of saline water surge flow border irrigation on soil water-salt distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 53-58.
- [31] 王海江, 崔静, 王开勇, 等. 绿洲滴灌棉田土壤水盐动态变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 136-138.
- WANG Haijiang, CUI Jing, WANG Kaiyong, et al. Soil water-salt dynamic change for cotton field under mulched drip irrigation on Oasis in Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 136-138.
- [32] 杨鹏年, 董新光, 刘磊, 等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 90-95.
- YANG Pengnian, DONG Xinguang, LIU Lei, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 90-95.
- [33] ROBERTS T L, WHITE S A, WARRICK A W, et al. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6): 669-677.
- [34] ROSS P J. Modeling Soil Water and Solute Transport--Fast, Simplified Numerical Solutions [J]. 2003, 95(6): 1 352-1 361.
- [35] BEN AHMED C, MAGDICH S, BEN ROUINA B, et al. Saline water irrigation effects on soil salinity distribution and some physiological responses of field grown Chemlali olive [J]. 2012, 113(1): 538-544.

Experimental Study on Water and Solute Movement in Soil Grown with Desert Plant *Haloxylon Ammodendron* under Drip Irrigation Using Saline Water

LIU Saihua¹, YANG Guang^{1*}, ZHANG Qiuying², HE Xinlin¹,

XUE Lianqing³, WANG Zelin¹, LI Fadong^{4,5}, REN Futian¹

(1. School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University/Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation Corps, Shihezi 832000, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Institute of Geography and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 Saline groundwater in arid and semi-arid regions could be used as an alternative water source to irrigate crops, and understanding its impact on water and solute dynamics in soil is essential to safeguard its use. In this work we present the results of an experimental study on water and solute movement in soil grown with desert plant *Haloxylon ammodendron* under drip irrigation using saline water. 【Method】 The experiment was conducted in lysimeters and during the experiment, we measured soil moisture, soil salinity, contents of different ions, and other hydro-chemical properties of the *Haloxylon ammodendron*. The data were analyzed using Shukalev method and the piper trigram. 【Result】 ① Soil salt content was positively correlated to the salinity of the irrigating water and accumulated in depth of 60~80 cm with a maxima of 6.1 g/kg. ② The content of SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ and Na^+ in soil varied significantly as the salinity of the irrigating water increased. After irrigation, the cations in soil changed gradually from Ca^{2+} dominant to Na^+ dominant, anions from SO_4^{2-} dominant to Cl^- dominant, and soil water from SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Mg^{2+} type to SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ type. 【Conclusion】 The movement and distribution of water and solute in soil under drip irrigation using saline water was experimentally studied in lysimeters and the results provide guidance to saline water irrigation management in arid and semi-arid regions.

Key words: saline water; *haloxylon ammodendron*; water and salt migration; hydro-chemical property

责任编辑: 赵宇龙