

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.029

咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究

杨培岭 王瑜 任树梅 魏琛琛 贺新 徐子昂

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:为探明不同矿化度微咸水和地下水在不同交替灌溉方式下对土壤水盐分布和玉米吸水规律的影响,采用3种矿化度(2.0、3.5、5.0 g/L)微咸水和地下水(1.1 g/L)在2种交替灌溉方式(“地下水-微咸水”、“地下水-微咸水-微咸水”)下进行了大田试验。结果表明,在同一土壤深度下,土壤含水率和电导率随着微咸水矿化度升高而升高,“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式下的含水率和电导率较高;在不同时期各处理的土壤纵向含水率均表现出先下降、后上升的规律,在拔节期和抽穗期各处理的土壤纵向电导率表现出先下降、后上升的规律,在灌浆期表现出上升、下降、再上升的规律。通过氢氧稳定同位素分析得出,不同矿化度微咸水和不同交替灌溉方式组合下,玉米在拔节期、抽穗期和灌浆期的主要吸水深度分别为:0~20 cm、20~40 cm和0~20 cm,不同时期主要吸水深度的平均贡献率随着微咸水矿化度的升高而减小,“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式的平均贡献率较低。矿化度2.0 g/L微咸水与地下水在“地下水-微咸水”的交替灌溉方式下得到的产量最高,达到1.54 kg/m²。

关键词:玉米;微咸水矿化度;交替灌溉;土壤含水率;土壤电导率;氢氧稳定同位素

中图分类号:S274;S513

文献标识码:A

文章编号:1000-1298(2020)06-0273-09

OSID:



Soil Moisture and Saline Distribution Characteristics and Maize Stem Water Uptake under Alternate Irrigation between Saline Water and Groundwater

YANG Peiling WANG Yu REN Shumei WEI Chenchen HE Xin XU Ziang

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The objective was to provide a scientific basis for using saline water for irrigation more effectively and reasonably. It was focused on the effects of two types of alternate irrigation regimes (alternating groundwater and saline water (GW-SW), and alternating groundwater, followed by two cycles of saline water (GW-SW-SW)) between three levels of irrigation water salinity (i. e. mineralization of 2.0 g/L, 3.5 g/L and 5.0 g/L) and groundwater (1.1 g/L) on soil moisture and saline distribution. The maize stem water uptake was investigated by detecting the stable hydrogen and oxygen isotopes of soil water and maize stem water, and the maize yield was calculated. The results showed that with the same depth of soil, soil moisture and EC were increased with the increase of irrigation water salinity, and were higher in the GW-SW-SW regime. The trend of soil moisture as depth increasing for all treatments at different periods were similar, but it was decreased at shallow depth and then increased at deep depth. The trend of soil EC as depth increasing for all treatments at the jointing and heading stage were similar to that of soil moisture; however, at the filling stage, the trend of soil EC as depth increasing for all treatments, it was increased at shallow depth, and then decreased as depth became deeper, and finally increased at deep depth. Based on the interception of curves for $\delta^{18}\text{O}$ in soil water and maize stem water as shown, the specific soil depth values of maize stem water sources for each treatment were from 20.1 cm to 26.1 cm at the jointing stage, from 24.1 cm to 63.0 cm at the heading stage and from 11.0 cm to 63.9 cm at the filling stage, respectively. Except for the jointing stage, there were more than one soil

收稿日期:2019-10-25 修回日期:2019-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51679239,51909265)、国家自然科学基金创新研究群体延续资助项目(51621061)和中国农业大学对口支援科研合作基金项目(2019TC157)

作者简介:杨培岭(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: yangpeiling@126.com

通信作者:任树梅(1956—),女,教授,主要从事农业灌溉与水资源利用研究,E-mail: renshumei@126.com

depths for maize stem water sources for most treatments at the heading and filling stages. Based on the multiple linear mixed model (IsoSource), the main water absorption depths for all treatments were 0 ~ 20 cm, 20 ~ 40 cm and 0 ~ 20 cm with the average contribution rate ranging from 33.9% to 51.0%, 27.4% to 83.0% and 32.0% to 80.6% at the jointing, heading and filling stages, respectively. The average contribution rate of the main water absorption depth in all periods was decreased with the increase of irrigation water salinity, and the average contribution rate of the GW-SW-SW regime was lower. The 2.0 g/L salinity under the GW-SW regime showed the highest yield of 1.54 kg/m², which was 26.23% higher than the lowest yield in the 5.0 g/L salinity under the GW-SW-SW regime.

Key words: maize; irrigation water salinity; alternate irrigation regime; soil moisture; soil EC; stable hydrogen and oxygen isotope

0 引言

在淡水资源短缺的现状下,利用非常规水资源(微咸水、再生水、海水等)进行农业生产已经在全球范围内展开了研究^[1-3]。当前微咸水灌溉的方式主要有3种:一直利用微咸水灌溉、微咸水与淡水混合灌溉和微咸水与淡水交替灌溉。相比于一直利用微咸水灌溉,混合灌溉和交替灌溉可以减缓土壤盐渍化^[4]。LI等^[5]研究发现,在减缓微咸水对土壤作物系统的不利影响方面,交替灌溉相比混合灌溉更为有效。朱成立等^[6]研究了不同矿化度微咸水在3种不同生育期(壮苗期、拔节期、灌浆期)咸淡交替灌溉方式(“咸淡淡”、“淡咸淡”和“淡淡咸”)下的土壤盐分分布和夏玉米生长情况;吴忠东等^[7]研究了不同组合灌溉下的土壤盐分分布和冬小麦产量;郭梦吉等^[8]研究了微咸淡水交替灌溉对加工番茄根系生长的影响。已有研究多是在不同生育期之间进行咸淡交替灌溉,缺乏每次灌溉之间进行不同咸淡交替灌溉方式的研究。

作为定量化研究水分循环的方法,稳定同位素示踪技术被用于研究植物水分来源。由于植物茎秆中的水分同位素组成与利用水源的同位素组成相同,可以通过分析比较植物水分与各种水源的氢氧同位素组成,确定植物吸收利用的水分来源及对植物水分的相对贡献^[9]。现有利用氢氧稳定同位素对植物水分来源的研究主要集中在作物、地区、灌水量等方面。郭飞等^[10]研究了矮砧苹果树在不同时期的主要吸水深度;张景文等^[11]研究了山东省禹城市的夏玉米水分来源;CAO等^[12]探讨了不同灌水量、不同生育阶段樱桃根系吸水贡献率的变化;汤英等^[13]研究了不同水分条件下宁夏枸杞氢氧稳定同位素的变化特征。还有一些研究关注了盐分^[14-15]。目前尚无对大田作物采用微咸水灌溉下水分来源的研究。

河套灌区是中国设计灌溉面积最大的灌区,富含微咸水(矿化度为2.0~5.0 g/L),储量达88.6亿m³,具有很大的潜力^[16]。玉米是河套灌区的主要粮食

作物,种植面积达到河套灌区种植面积的30%^[17]。本研究以2018年河套灌区玉米为研究对象,研究不同矿化度微咸水和地下水在不同交替灌溉方式下土壤含水率、电导率(EC)的变化规律,利用氢氧稳定同位素技术,探索微咸水矿化度和交替灌溉制度耦合下的植物吸水规律,为制定适宜的灌溉模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018年4—9月在内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区曙光实验站(107°23'E, 40°72'N)开展。该地区位于河套灌区腹地,降雨量少,多年年均降水量为141.2 mm;早晚温差大,日均温为6.8℃;无霜期140 d左右;年日照时数为3 254 h。试验区地下1 m内的土质分为两种:0~60 cm的土壤为粉砂壤土,土壤密度为1.49 g/cm³,田间持水率为19.8%;60~100 cm的土壤为粉砂粘壤土,土壤密度为1.44 g/cm³,田间持水率为28.4%。2018年玉米生育期内总降雨量202 mm,降雨情况如图1所示。

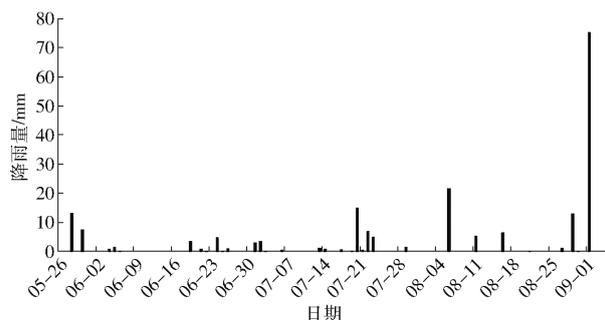


图1 玉米生育期的降雨量

Fig. 1 Rainfall during growth of maize in 2018

1.2 试验设计

试验采用3×2全因素设计,对应3种交替灌溉水盐度(矿化度为2.0、3.5、5.0 g/L,分别以S1、S2、S3表示)和2种类型的交替灌溉方式(“地下水-微咸水”和“地下水-微咸水-微咸水”,分别以L1和L2表示),对于L1地块,在第1、3、5次灌溉时采用

地下水灌溉,在第2、4、6次灌溉时采用微咸水灌溉;对于L2地块,在第1、4、7次灌溉时采用地下水灌溉,在第2、3、5、6次灌溉时采用微咸水灌溉。因此,总共有6个处理,每个处理重复3次,共计18个小区。所有小区随机分布,同时为了避免处理间的相互影响,在各小区间设置1m的隔离带。试验中使用的微咸水通过向当地地下水(矿化度为1.1g/L)中加入摩尔比为1:2的氯化钾(KCl)和氯化钠(NaCl)制备。试验期间,采用与当地农民种植制度一致的氮肥和田间管理方式。

选取当地常用玉米品种“西蒙3358”作为试验对象,9月20日收获。采用膜下滴灌种植方式,一膜一带,一膜两行。玉米大行行距70cm,小行行距40cm,株距30cm。小行玉米行间铺设壁厚4mm的滴灌带,灌水器工作流量均为2L/h,灌水器间距30cm。全生育期共计灌水16次,总灌水量300mm,试验区灌溉制度如表1所示。由于第1次灌水是在苗期(5月29日),为保证苗期玉米正常生长,所有处理采用地下水灌溉(22.5mm)。2018年4月28日施入磷酸二铵(375kg/hm²)和尿素(75kg/hm²)作为底肥。在6月21日、7月10日和8月9日以质量比为2:2:1追施尿素,追氮量共217.7kg/hm²。施肥采用比例泵,随灌水施肥。

表1 试验区灌溉制度

Tab.1 Irrigation schedule of test areas

日期	处理		灌水量/mm
	L1	L2	
5月29日	淡	淡	22.5
6月3日	咸	咸	15.0
6月9日	淡	咸	15.0
6月14日	咸	淡	15.0
6月21日	淡	咸	15.0
6月27日	咸	咸	22.5
7月3日	淡	淡	22.5
7月10日	咸	咸	22.5
7月16日	淡	咸	22.5
7月22日	咸	淡	22.5
7月28日	淡	咸	22.5
8月3日	咸	咸	22.5
8月9日	淡	淡	15.0
8月15日	咸	咸	15.0
8月21日	淡	咸	15.0
8月27日	咸	淡	15.0

1.3 样品采集

玉米拔节期、抽穗期和灌浆期各取样1次,每次取样玉米木质部茎和土壤,每个小区3个重复。玉米木质部茎每次取5cm左右栓质化的小茎3~4段。

土壤样品的采集分为4层(0~20cm、20~40cm、40~60cm和60~100cm),取样后分为3部分,分别用于测定土壤含水率、土壤电导率(EC)和氢氧稳定同位素丰度。测定氢氧稳定同位素丰度的玉米木质部茎和土壤取样后立刻放入100mL离心管,并用Parafilm膜密封,放入-20℃冰柜冷冻,防止同位素组分发生变化,直到开始抽提水分为止。每次采集样品尽量在09:00—11:00完成,目的是为了保证取样时的光照强度等外界环境不影响同位素组成的分析结果。

1.4 样品测定

采用干燥法测定土壤含水率。采用梅特勒-托利多参数测试仪测定土壤电导率。采用植物水分真空抽提装置抽取植物土壤水分,收集到的水样用Picarro L2120-i型水同位素分析仪测定。

1.5 数据分析

数据处理和表格制作在Microsoft Excel中进行,同位素来源比例分析由IsoSource软件进行,统计分析和差异显著性检验在SPSS 21.0统计分析软件中进行。

2 结果与分析

2.1 土壤质量含水率

不同生育期不同土壤深度的土壤质量含水率如表2所示。不同时期各处理的土壤质量含水率在0~100cm深度呈现先下降后上升的规律,最低值大多出现在40~60cm。不同深度土壤3个时期平均质量含水率最高值大多出现在S3L2处理,分别为14.49%(0~20cm)、13.10%(20~40cm)、14.99%(40~60cm),其中60~100cm的最高值出现在S2L1处理(26.70%);最低值出现在S1L1处理,分别为10.33%(0~20cm)、9.35%(20~40cm)、4.68%(40~60cm)和15.59%(60~100cm)。对土壤在不同深度的平均质量含水率进行方差分析及Duncan多重比较($P < 0.05$)分析可知:微咸水矿化度对不同土壤深度的平均质量含水率均有显著影响,平均质量含水率随着微咸水矿化度的升高显著增加;交替灌溉方式对0~20cm和40~60cm土壤深度的平均质量含水率有显著影响,L1交替方式下的平均质量含水率显著低于L2交替方式;微咸水矿化度和交替灌溉方式的耦合对60~100cm土壤深度的平均质量含水率有显著影响。

2.2 土壤电导率

表3为各处理在不同生育期不同土壤深度的土壤电导率(EC)。可以看出,拔节期和抽穗期各处理的土壤EC最高值大多出现在0~20cm土层,灌浆

表2 各处理不同土壤深度的土壤质量含水率

Tab. 2 Mass soil moisture at different depths with different treatments

%

取样时期	土壤深度/ cm	处理					
		S1L1	S2L1	S3L1	S1L2	S2L2	S3L2
拔节期	0~20	(8.99 ± 0.48) ^c	(11.67 ± 0.53) ^b	(14.20 ± 0.45) ^a	(13.23 ± 1.29) ^{ab}	(12.88 ± 0.87) ^{ab}	(13.36 ± 0.71) ^{ab}
	20~40	(8.54 ± 0.12) ^b	(10.94 ± 1.15) ^a	(10.31 ± 0.51) ^{ab}	(12.09 ± 0.55) ^a	(12.39 ± 1.60) ^a	(11.64 ± 1.30) ^a
	40~60	(4.81 ± 0.33) ^d	(9.21 ± 0.98) ^{bc}	(13.22 ± 3.81) ^b	(9.07 ± 1.34) ^c	(10.15 ± 1.01) ^{bc}	(17.71 ± 0.67) ^a
	60~100	(15.04 ± 3.78) ^c	(27.00 ± 0.85) ^a	(26.16 ± 2.79) ^a	(18.74 ± 4.51) ^{bc}	(25.24 ± 1.15) ^a	(21.32 ± 0.81) ^{ab}
抽穗期	0~20	(10.37 ± 0.63) ^b	(9.67 ± 0.51) ^b	(13.94 ± 0.77) ^a	(11.20 ± 1.17) ^b	(10.98 ± 0.68) ^b	(13.80 ± 0.68) ^a
	20~40	(6.67 ± 1.22) ^b	(10.49 ± 0.75) ^a	(12.09 ± 1.83) ^a	(9.93 ± 0.58) ^a	(10.60 ± 1.31) ^a	(11.03 ± 0.37) ^a
	40~60	(5.00 ± 0.94) ^d	(7.38 ± 0.78) ^{cd}	(11.92 ± 1.52) ^b	(9.72 ± 1.87) ^{bc}	(8.59 ± 1.23) ^c	(15.46 ± 0.98) ^a
	60~100	(20.16 ± 2.39) ^{ab}	(27.52 ± 1.03) ^a	(23.87 ± 0.97) ^{ab}	(18.84 ± 7.51) ^b	(22.70 ± 2.91) ^{ab}	(26.57 ± 2.14) ^{ab}
灌浆期	0~20	(11.63 ± 0.57) ^c	(12.19 ± 0.45) ^{bc}	(13.50 ± 0.56) ^b	(10.78 ± 1.28) ^c	(13.64 ± 0.97) ^b	(16.30 ± 0.72) ^a
	20~40	(12.83 ± 1.18) ^{bc}	(15.09 ± 1.31) ^{ab}	(14.13 ± 1.02) ^{abc}	(8.88 ± 0.55) ^d	(12.27 ± 1.42) ^c	(16.62 ± 1.18) ^a
	40~60	(4.22 ± 1.10) ^b	(7.68 ± 1.83) ^b	(12.94 ± 1.85) ^a	(5.61 ± 1.54) ^b	(5.42 ± 0.57) ^b	(11.78 ± 1.72) ^a
	60~100	(11.57 ± 5.28) ^b	(25.59 ± 0.89) ^a	(19.99 ± 4.05) ^{ab}	(19.51 ± 6.74) ^{ab}	(17.74 ± 0.85) ^{ab}	(23.65 ± 0.68) ^a

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

期则出现在20~40 cm土层,不同时期各处理的土壤EC最低值大部分出现在40~60 cm。相比拔节期,抽穗期0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层的EC分别增大了19.44%~37.44%、16.22%~43.29%、7.02%~34.50%,除了S1L1处理60~100 cm土层的EC下降了2.06%,其余处理60~100 cm土层的EC增大了2.33%~48.98%;灌浆期20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm土层的EC增大了67.37%~141.46%、7.54%~60.09%和8.26%~48.14%,除了S1L2处理0~20 cm土层的EC下降了1.83%,其余处理0~20 cm土层的EC增大了4.26%~37.51%。可以看出,随着微咸水和地下水交替灌溉的进行,0~20 cm土层的土壤EC增长率降低,20~100 cm土层的则逐渐提高。3个时期在不同深度的平均土壤EC最高值都出现在S3L2处

理,分别是542.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0~20 cm)、534.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20~40 cm)、299.89 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (40~60 cm)和413.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (60~100 cm);最低值出现在S1L1处理,分别是317.45 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0~20 cm)、379.45 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20~40 cm)、197.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (40~60 cm),其中60~100 cm的最低值出现在S2L2(341.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。对土壤在不同深度的平均EC进行方差分析及Duncan多重比较($P < 0.05$)分析可知:微咸水矿化度对0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土壤深度的平均EC均有显著影响,土壤平均EC随着微咸水矿化度升高显著升高;交替灌溉方式对0~20 cm和20~40 cm土壤深度的平均EC有显著影响,L1交替方式的平均EC显著低于L2交替方式;微咸水矿化度和交替灌溉方式的耦合对60~100 cm土壤深度的平均EC有显著影响,S3L2处理最高。

表3 各处理不同土壤深度的土壤电导率

Tab. 3 Soil EC at different depths with different treatments

 $\mu\text{S}/\text{cm}$

取样时期	土壤深度/ cm	处理					
		S1L1	S2L1	S3L1	S1L2	S2L2	S3L2
拔节期	0~20	(270.67 ± 11.15) ^c	(367.67 ± 17.82) ^{ab}	(427.00 ± 34.67) ^{ab}	(346.67 ± 43.25) ^{bc}	(391.00 ± 54.49) ^{ab}	(444.33 ± 44.58) ^a
	20~40	(265.00 ± 28.88) ^a	(320.67 ± 17.97) ^a	(317.33 ± 26.39) ^a	(316.67 ± 35.94) ^a	(320.00 ± 32.14) ^a	(332.67 ± 46.55) ^a
	40~60	(183.53 ± 16.61) ^a	(206.70 ± 29.50) ^a	(237.03 ± 32.34) ^a	(185.43 ± 13.04) ^a	(214.43 ± 32.76) ^a	(228.00 ± 16.99) ^a
	60~100	(339.33 ± 49.70) ^{ab}	(294.67 ± 30.30) ^{bc}	(260.33 ± 25.77) ^c	(375.33 ± 8.65) ^a	(305.00 ± 18.38) ^{abc}	(372.00 ± 34.24) ^a
抽穗期	0~20	(372.00 ± 40.01) ^d	(465.33 ± 27.74) ^{bc}	(510.00 ± 55.18) ^{ab}	(418.00 ± 25.47) ^{cd}	(516.00 ± 37.97) ^{ab}	(573.00 ± 26.17) ^a
	20~40	(363.67 ± 37.57) ^b	(372.67 ± 28.80) ^b	(410.33 ± 61.59) ^{ab}	(378.00 ± 37.21) ^b	(413.67 ± 41.80) ^{ab}	(476.67 ± 17.59) ^a
	40~60	(211.30 ± 26.24) ^b	(230.00 ± 8.16) ^b	(253.67 ± 30.62) ^{ab}	(221.33 ± 33.51) ^b	(253.33 ± 42.15) ^{ab}	(306.67 ± 20.76) ^a
	60~100	(332.33 ± 42.68) ^b	(439.00 ± 51.11) ^a	(381.00 ± 49.48) ^{ab}	(429.33 ± 19.14) ^a	(330.00 ± 22.55) ^b	(380.67 ± 43.91) ^{ab}
灌浆期	0~20	(309.67 ± 22.22) ^d	(383.33 ± 43.71) ^{cd}	(467.67 ± 21.64) ^{bc}	(340.33 ± 50.53) ^d	(522.67 ± 28.86) ^a	(611.00 ± 56.78) ^a
	20~40	(509.67 ± 26.39) ^c	(596.00 ± 36.25) ^{bc}	(694.33 ± 60.96) ^{ab}	(530.00 ± 41.58) ^c	(772.67 ± 18.52) ^a	(792.67 ± 69.30) ^a
	40~60	(197.37 ± 21.44) ^d	(269.33 ± 39.47) ^{bc}	(349.33 ± 43.40) ^a	(204.83 ± 23.86) ^{cd}	(279.67 ± 22.94) ^b	(365.00 ± 18.46) ^a
	60~100	(375.67 ± 62.89) ^a	(402.33 ± 46.34) ^a	(385.67 ± 19.60) ^a	(406.33 ± 32.25) ^a	(390.33 ± 28.24) ^a	(486.33 ± 53.42) ^a

2.3 玉米根系主要吸水深度的变化

图2为玉米在各生长期茎秆水与土壤水的 $\delta^{18}O$ 关系。通过直接对比法,可以初步得出玉米在不同生长期的主要吸水深度^[18]。由直接对比法可知,拔节期L1小区S1、S2、S3处理的玉米主要吸收23.8、23.6、26.1 cm处的土壤水,L2小区S1、S2、S3处理的玉米主要吸收22.2、20.6、20.1 cm处的土壤水。抽穗期L1小区中S1处理主要吸收29.9、31.0 cm处的土壤水,S2处理主要吸收27.4、38.1 cm处的土壤水,S3处理主要吸收24.7、39.6 cm处的土壤水;

L2小区中S1处理主要吸收28.4、35.9 cm处的土壤水,S2处理主要吸收24.1、37.8 cm处的土壤水,S3处理主要吸收63.0 cm处的土壤水。灌浆期L1小区中S1处理主要吸收12.8 cm处的土壤水,S2处理主要吸收37.3、69.2 cm处的土壤水,S3处理主要吸收40.2 cm处的土壤水;L2小区中S1处理主要吸收16.9、36.0、63.9 cm处的土壤水,S2处理主要吸收11.0、38.7 cm处的土壤水,S3处理主要吸收11.2、39.4 cm处的土壤水。

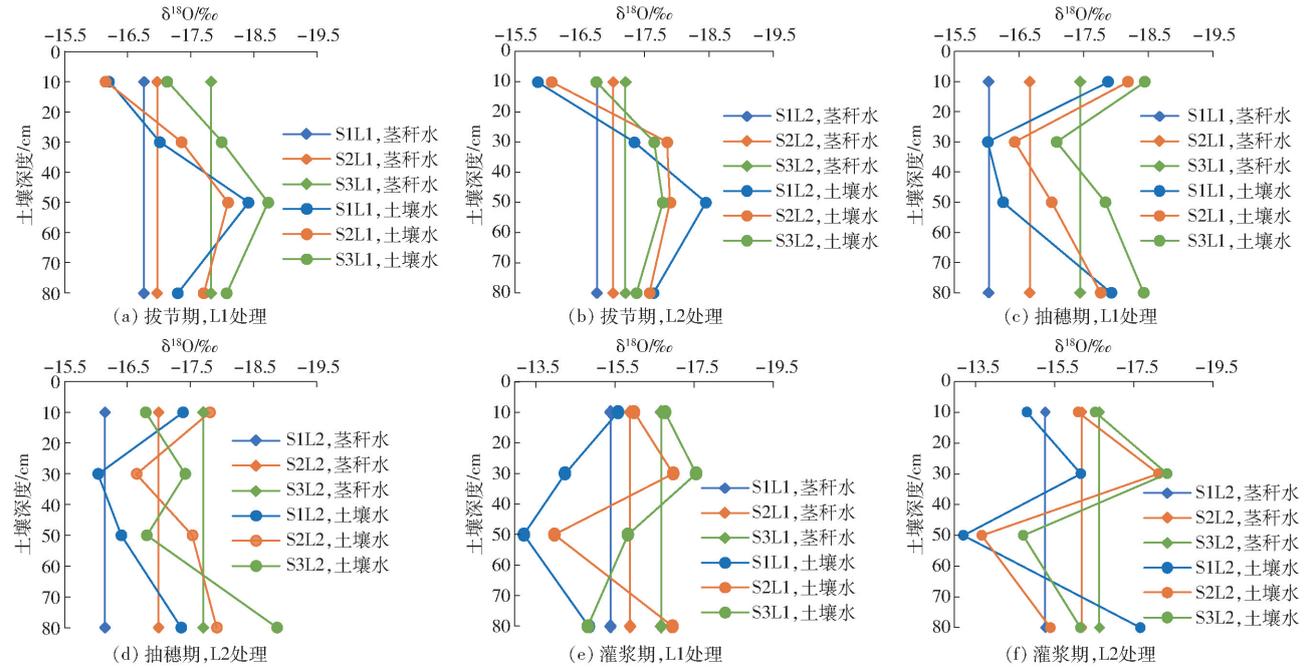


图2 玉米在各生长期茎秆水与土壤水的 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 2 Relationship between $\delta^{18}O$ characteristics of maize stem water and soil water in different growth periods

2.4 不同土壤深度土壤水对玉米根系吸水的平均贡献率

图3为通过多元线性混合模型(IsoSource)计算得出的玉米在不同生长期各土壤深度的土壤水对植物吸水的平均贡献率。拔节期植物主要利用0~20 cm的土壤水,对L1小区S1、S2、S3处理的平均贡献率分别是51.0%、45.7%和33.9%,对L2小区S1、S2、S3处理的平均贡献率分别是50.8%、44.0%

和44.4%。抽穗期植物主要利用20~40 cm的土壤水,对L1小区S1、S2、S3处理的平均贡献率分别是83.0%、72.6%和64.4%,对L2小区S1、S2、S3处理的平均贡献率分别是77.1%、66.3%和27.4%。灌浆期植物主要利用0~20 cm的土壤水,对L1小区S1、S2、S3处理的平均贡献率分别是80.6%、33.3%和36.2%,对L2小区S1、S2、S3处理的平均贡献率分别是33.1%、32.8%和32.0%。由图3可

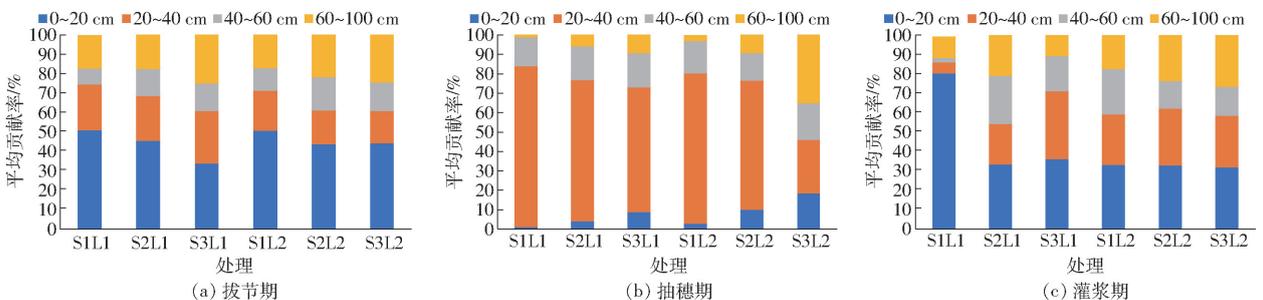


图3 不同生长期各土壤深度的土壤水对玉米吸水的平均贡献率

Fig. 3 Average contribution rate of soil water from different soil depths to maize water absorption in different growth stages

以看出,各处理的植物在不同时期主要水分来源的深度保持一致,平均贡献率在相同交替灌溉方式下由大到小依次为 S1、S2、S3,在相同微咸水矿化度下表现为 L1 大于 L2。

2.5 产量

表4为各处理的玉米产量。由表4可知,产量及其各项性状的最高值均出现在 S1L1 处理,分别比出现在 S3L2 处理的最低值高 12.62% (穗长)、6.07% (穗粗)、4.13% (行数)、14.11% (列数)、

69.89% (秃尖长)、25.56% (穗质量) 和 26.23% (产量)。对玉米产量及其各项性状进行方差分析及 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$) 分析可知:微咸水矿化度对穗粗和产量有显著影响,均随着微咸水矿化度升高显著减少;交替灌溉方式对穗粗、秃尖长和产量有显著影响,L1 交替灌溉方式下的穗粗、秃尖长和产量显著高于 L2 交替灌溉方式;微咸水矿化度和交替灌溉方式的耦合对产量及其性状均无显著影响。

表4 各处理的玉米产量

Tab.4 Yield of maize under different irrigation treatments

处理	穗长/cm	穗粗/cm	行数	列数	秃尖长/cm	穗质量/g	产量/(kg·m ⁻²)
S1L1	(20.79 ± 0.57) ^a	(52.24 ± 0.67) ^a	(16.89 ± 0.57) ^a	(41.80 ± 1.37) ^a	(1.58 ± 0.14) ^a	(305.72 ± 6.40) ^a	(1.54 ± 0.03) ^a
S2L1	(20.46 ± 1.86) ^a	(51.52 ± 1.11) ^{ab}	(16.67 ± 0.72) ^a	(40.89 ± 3.73) ^{ab}	(1.57 ± 0.14) ^a	(284.12 ± 30.74) ^{ab}	(1.44 ± 0.09) ^{ab}
S3L1	(19.99 ± 1.20) ^a	(50.71 ± 1.14) ^{abc}	(16.33 ± 0.27) ^a	(39.50 ± 1.95) ^{ab}	(1.57 ± 0.14) ^a	(279.51 ± 44.19) ^{ab}	(1.41 ± 0.06) ^b
S1L2	(20.29 ± 0.32) ^a	(51.39 ± 0.51) ^{ab}	(16.56 ± 0.42) ^a	(40.44 ± 1.12) ^{ab}	(1.48 ± 0.28) ^a	(288.77 ± 6.62) ^{ab}	(1.45 ± 0.04) ^{ab}
S2L2	(19.59 ± 0.70) ^a	(49.83 ± 0.36) ^{bc}	(16.33 ± 0.27) ^a	(39.43 ± 1.19) ^{ab}	(1.17 ± 0.17) ^{ab}	(255.68 ± 11.18) ^{ab}	(1.29 ± 0.05) ^c
S3L2	(18.46 ± 0.54) ^a	(49.25 ± 0.77) ^c	(16.22 ± 0.31) ^a	(36.63 ± 1.86) ^b	(0.93 ± 0.23) ^b	(243.49 ± 1.76) ^b	(1.22 ± 0.02) ^c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

微咸水中含有的盐分通过灌溉进入土壤,形成盐分胁迫,阻碍作物根系吸收,提高土壤含水率^[19]。本研究发现,相同交替灌溉方式下,同一深度土层的土壤含水率随着微咸水矿化度升高而增加,微咸水矿化度越高,携带的盐分越多,盐分胁迫越严重,作物难以吸收水分,土壤含水率增高。在相同矿化度微咸水灌溉中,同一深度土层的土壤电导率在“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式下较高,这与含水率与盐分积累成正比的规律一致。各处理的土壤纵向含水率在不同时期均呈现先下降后上升的现象,这可能是由于本试验区的 60 cm 处是粉砂壤土和粉砂粘壤土的交界处,土质变化会造成水盐渗透力变差^[20],导致 60 ~ 100 cm 土层水分积累,较难下渗。

长期的微咸水灌溉和灌溉水矿化度的升高都会导致盐分的表聚^[21],盐分则可能会随着灌溉水或降水向下移动到作物根区,从而抑制作物对水分和养分的吸收^[22]。本研究结果显示,相同交替灌溉方式下,同一深度土层的土壤电导率随着微咸水矿化度升高而增加,与之前的研究结果一致^[19,23],这是由于随着微咸水矿化度的增高,入渗能力增强,土壤盐分积累增多^[6]。在相同矿化度微咸水灌溉中,同一深度土层的土壤电导率在“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式下较高,积盐现象较为严重,这与吴忠东等^[7]的研究结果一致。“地下水-微咸水”的交替灌溉模式可以在每次微咸水灌溉后进行一次淡

水灌溉,通过淋洗作用,可以降低土壤累积含盐量。随着作物生育期的推进,灌溉次数增多,土壤电导率增大,各处理在不同时期的土壤纵向电导率分布规律一致,但各土层的增长率不同,最终土壤纵向电导率在拔节期和抽穗期呈现先下降后上升的现象,灌浆期则是先上升后下降再上升,灌浆期土壤电导率最高值出现在 20 ~ 40 cm 土层,这可能是淋洗作用下盐分向土壤深层运移的结果,60 ~ 100 cm 土层的含盐量在 3 个时期较高,可能也是由于 60 cm 以下是粉砂粘壤土,盐分运移受阻。

直接对比法可以得出玉米水分来源的具体深度,各处理在各个时期的具体吸水深度范围分别是 20.1 ~ 26.1 cm (拔节期)、24.1 ~ 63.0 cm (抽穗期) 和 11.0 ~ 63.9 cm (灌浆期)。除了拔节期,抽穗期和灌浆期大部分处理的水分来源出现了多个吸收深度。WANG 等^[24]认为,植物生长期根内根系吸收的水分可能不是来自于单独的某一层土壤水,也有可能是几种同位素组成不同的水源按照一定比例形成的混合物。多元线性混合模型 (IsoSource) 是基于同位素质量守恒原理的多元分析方法,可以计算不同土壤深度水源的贡献率,更为准确地判断玉米的主要水分来源和吸水深度。研究结果显示,玉米在拔节期的主要吸水深度是 0 ~ 20 cm,各处理的平均贡献率为 33.9% ~ 51.0%;抽穗期的主要吸水深度是 20 ~ 40 cm,平均贡献率为 27.4% ~ 83.0%;灌浆期的主要吸水深度是 0 ~ 20 cm,各处理的平均贡献率为 32.0% ~ 80.6%,呈现出“浅-深-浅”的规律,这

与之前的研究结果保持一致^[25],说明灌溉水的矿化度和灌溉方式对不同时期玉米的主要吸水深度没有影响。微咸水灌溉对作物危害最直接的部位是根系^[26],根系是作物吸收水分和养分最活跃的器官^[27]。本研究发现,土壤含水率随着微咸水矿化度的升高而升高,且“地下水-微咸水-微咸水”灌溉方式下的土壤含水率更高。当土壤层持有更多水分时,能够增加根系水分吸收率和吸水量^[28-29],因此在不同时期的主要吸水深度,灌溉水矿化度和土壤水分平均贡献率呈正比,“地下水-微咸水-微咸水”灌溉方式下的平均贡献率偏大,但这与本研究通过 IsoSource 计算得出的结果相反。可能是由于在盐分非均匀分布的情况下,高盐度区根系对水分和养分吸收会减少,而低盐度区根系的吸收明显增加^[30]。

作物产量是实际生产活动中的主要考虑因素。本研究结果显示,在相同交替灌溉方式下,随着微咸水矿化度的升高,作物产量减少,这与已有的研究保持一致^[6,19,22];在相同微咸水矿化度下,“地下水-微咸水”交替灌溉方式下的玉米产量大于“地下水-微咸水-微咸水”。WEI 等^[31]于 2017—2018 年研究了与本试验相同试验条件下的地下水(矿化度为 1.1 g/L)和不同矿化度(2.0、3.5、5.0 g/L)微咸水对土壤特性、N₂O 排放量和玉米产量的影响,王帅杰等^[32]在 2017 年研究了与本试验相同试验条件下的温室气体排放量和玉米产量(图 4)。相比 WEI 等^[31]在 2018 年采取地下水进行灌溉得到的产量,本研究各处理减产 12.27%~30.49%,减产最少的处理是 2.0 g/L 微咸水结合“地下水-微咸水”交替方式;相同微咸水矿化度下,本研究在“地下水-微咸水”交替方式下的产量比 WEI 等^[31]的研究结果高 1.84%~16.79%，“地下水-微咸水-微咸水”交替方式下采用 2.0 g/L 微咸水灌溉的产量减少了 4.34%，采用 3.5 g/L 和 5 g/L 微咸水灌溉的产量分别增加了 5.12% 和 1.42%；说明交替灌溉相比于一直采用微咸水进行灌溉对产量的影响较小，其中“地下水-微咸水”交替方式下减产更小。本研究发现微咸水矿化度和交替灌溉方式对玉米产量的影响和王帅杰等^[32]的发现一致。相比 2017 年王帅杰等^[32]的研究结果,本研究采取“地下水-微咸水”交替方式处理的玉米增产 1.67%~5.28%；采取“地下水-微咸水-微咸水”交替方式处理的玉米产量中,只有矿化度 2.0 g/L 微咸水的处理增产 0.73%，其余均减产。可能是由于相同矿化度下,长期“地

下水-微咸水-微咸水”交替方式处理的盐分胁迫较为严重,抑制作物的生长。因此,“地下水-微咸水”交替方式的农业可持续性更高。

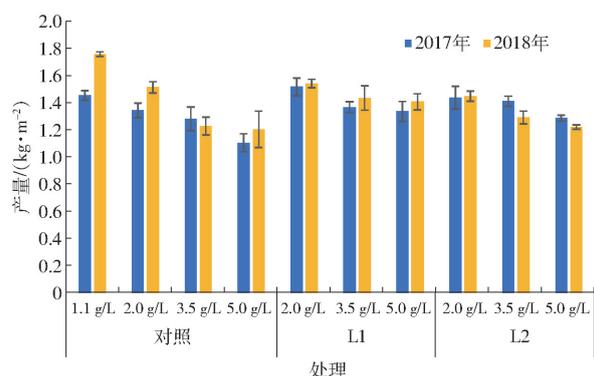


图 4 2017—2018 年微咸水与地下水交替灌溉下的产量
Fig. 4 Yield under alternate irrigation between saline water and groundwater in 2017 and 2018

4 结论

(1) 土壤含水率在不同时期和不同处理间表现出相似的规律:同一土壤深度,微咸水矿化度和土壤含水率成正比,“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式下的土壤含水率较高;土壤纵向含水率均呈现先下降、后上升的趋势。

(2) 土壤电导率在不同处理间表现出相似的规律:同一土壤深度的土壤电导率随着微咸水矿化度的升高而升高,“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式下的土壤电导率较高;土壤纵向电导率在拔节期和抽穗期表现出先下降、后上升的规律,在灌浆期则表现出上升、下降、再上升的规律,这是在淋洗作用下盐分向土壤深层运移的结果。

(3) 玉米在不同时期的水分利用情况不同,但是各处理间的规律一致,拔节期的主要吸水深度是 0~20 cm(平均贡献率为 33.9%~51.0%),抽穗期的主要吸水深度是 20~40 cm(平均贡献率为 27.4%~83.0%),灌浆期的主要吸水深度是 0~20 cm(平均贡献率为 32.0%~80.6%),表现出“浅-深-浅”的规律。随着微咸水矿化度的升高,主要吸水深度的平均贡献率减小,“地下水-微咸水-微咸水”交替灌溉方式下的平均贡献率较小。

(4) 本试验条件下,矿化度 2.0 g/L 微咸水与地下水在“地下水-微咸水”交替灌溉方式下可以得到最高产量(1.54 kg/m²),相比于最低产量高 26.23%,此时穗长、穗粗、行数、列数、秃尖长和穗质量均达到最大值。

参 考 文 献

[1] MORALES-GARCIA D, STEWART K, SEGUIN P, et al. Supplemental saline drip irrigation applied at different growth stages of two

- bell pepper cultivars grown with or without mulch in non-saline soil [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 893–898.
- [2] SHARMA B, MINHAS P. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78: 136–151.
- [3] RAMESHWARAN P, TEPE A, YAZAR A, et al. Effects of drip-irrigation regimes with saline water on pepper productivity and soil salinity under greenhouse conditions [J]. *Science Horticulturae*, 2016, 199: 114–123.
- [4] WANG Y, YANG P, REN S, et al. CO₂ and N₂O emissions from spring maize soil under alternate irrigation between saline water and groundwater in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(15):2669.
- [5] LI J, GAO Y, ZHANG X, et al. Comprehensive comparison of different saline water irrigation strategies for tomato production: soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 521–533.
- [6] 朱成立, 舒慕晨, 张展羽, 等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 220–228.
ZHU Chengli, SHU Muchen, ZHANG Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 220–228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171027&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.027. (in Chinese)
- [7] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 71–76.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Field study on impacts of soil water–salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese)
- [8] 郭梦吉, 刘宇, 任树梅, 等. 河套灌区微咸淡水交替灌溉对加工番茄根系生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(2): 65–72.
GUO Mengji, LIU Yu, REN Shumei, et al. Effect of alternative irrigation between brackish water and fresh water on root growth of processing tomato in Hetao [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(2): 65–72. (in Chinese)
- [9] WILLIAMS D, EHLERINGER J. Intra- and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands [J]. *Ecological Monographs*, 2000, 70(4): 517–537.
- [10] 郭飞, 高磊, 马娟娟. 基于氢氧稳定同位素的矮砧苹果树根系吸水深度研究[J]. *节水灌溉*, 2019(6): 10–13.
GUO Fei, GAO Lei, MA Juanjuan. Water absorption of roots of dwarf anvil apple trees based on stable isotopes of hydrogen and oxygen [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(6): 10–13. (in Chinese)
- [11] 张景文, 陈报章. 基于同位素分析研究山东禹城夏玉米水分来源[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 99–104.
ZHANG Jingwen, CHEN Baozhang. Isotope analysis of water sources of summer corn in Yucheng of Shandong [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 99–104. (in Chinese)
- [12] CAO X, YANG P, ENGEL B, et al. The effects of rainfall and irrigation on cherry root water uptake under drip irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 9–18.
- [13] 汤英, 徐利岗, 王怀博, 等. 不同水分条件下宁夏枸杞氢氧稳定同位素变化特征试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(3): 304–309.
TANG Ying, XU Ligang, WANG Huaibo, et al. Research on variation characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes of *Lycium barbarum* in Ningxia under different moisture conditions [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(3): 304–309. (in Chinese)
- [14] SWART P, STERNBERG L, STEINEN R, et al. Controls on the oxygen and hydrogen isotopic composition of the waters of Florida Bay, USA [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1989, 79(2): 113–123.
- [15] STERNBERG L, SWART P. Utilization of freshwater and ocean water by coastal plants of Southern Florida [J]. *Ecology*, 1987, 68(6): 1898–1905.
- [16] HE X, YANG P, REN S, et al. Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation [J]. *International Journal of Agriculture and Biology Engineering*, 2016, 9(2): 63–73.
- [17] 童文杰, 陈中督, 陈阜, 等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜区划分[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 131–137.
TONG Wenjie, CHEN Zhongdu, CHEN Fu, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(10): 131–137. (in Chinese)
- [18] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(3): 412–422.
DENG Wenping, YU Xinxiao, JIA Guodong, et al. Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of quercus variabilis in dry season [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(3): 412–422. (in Chinese)
- [19] 潘延鑫, 袁成福. 不同灌溉水矿化度对土壤水盐动态及春玉米产量影响研究[J]. *南昌工程学院学报*, 2017, 36(1): 37–41.
PAN Yanxin, YUAN Chengfu. Effect of irrigation water salinity on soil water salt dynamic and spring maize yield [J]. *Journal*

- of Nanchang Institute of Technology, 2017, 36(1): 37–41. (in Chinese)
- [20] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44–51. CHEN Lijuan, FENG Qi, WANG Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 44–51. (in Chinese)
- [21] 侯振安, 王艳娜, 龚江, 等. 干旱区咸水滴灌土壤盐分的分布与积累特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 16–24. HOU Zhen'an, WANG Yanna, GONG Jiang, et al. Salt distribution and accumulation as affected by under-film drip irrigation with saline water in an arid region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(1): 16–24. (in Chinese)
- [22] 王艳娜, 侯振安, 龚江, 等. 咸水滴灌对土壤盐分分布、棉花生长和产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2007, 25(2): 158–162. WANG Yanna, HOU Zhen'an, GONG Jiang, et al. The effect of drip irrigation with saline water to the distribution of salt and development and yield of cotton [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2007, 25(2): 158–162. (in Chinese)
- [23] 郭安安, 王梦琴, 王为木, 等. 微咸水滴灌对土壤水盐运移影响的研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(12): 118–121. GUO An'an, WANG Mengqin, WANG Weimu, et al. Study on the effects of brackish water drip irrigation on soil water and salt movement [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(12): 118–121. (in Chinese)
- [24] WANG P, SONG X, HAN D, et al. A study of root water uptake of crops indicated by hydrogen and oxygen stable isotopes: a case in Shanxi Province, China [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 475–482.
- [25] 朱元浩, 杨培岭, 杜鑫, 等. 利用氢氧稳定同位素探究保水剂对玉米根系作用机理[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 42–46. ZHU Yuanhao, YANG Peiling, DU Xin, et al. Exploration on the mechanism of super absorbent polymer effect on maize roots using stable deuterium and oxygen isotopes [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 42–46. (in Chinese)
- [26] BATES T, LYNCH J. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability [J]. Plant, Cell and Environment, 1996, 19: 529–538.
- [27] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26–32. LIANG Zongsuo, KANG Shaozhong, SHI Peize, et al. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(6): 26–32. (in Chinese)
- [28] FEDDES R, HOFF H, BRUEN M, et al. Modeling root water uptake in hydrological and climate models [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(12): 2797–2809.
- [29] FEDDES R, KOWALIK P, KOLINSKA-MALINKA K, et al. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function [J]. Journal of Hydrology, 1976, 31(1–2): 13–26.
- [30] FLORES P, CARVAJAL M, CERDÁ A, et al. Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites [J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24(10): 1561–1573.
- [31] WEI C, LI F, YANG P, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N₂O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation [J]. Water, 2019, 11:1548.
- [32] 王帅杰, 杨培岭, 苏艳平, 等. 微咸水与淡水轮灌对春玉米土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 41–48. WANG Shuaijie, YANG Peiling, SU Yanping, et al. Effects of alternative irrigation between brackish water and fresh water on CO₂ and N₂O emission from spring maize soil [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 41–48. (in Chinese)