排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2022 年 8 月 Aug. 2022 | 第 40 卷 第 8 期 Vol.40 No.8

灌溉水矿化度对土壤盐分及冬小麦产量的影响

苟淇书

苟淇书[1],党红凯[2],马俊永[2],张俊鹏[1],李全起[1*],王欣[1]
(1. 山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271000; 2. 河北省农林科学院旱作农业研究所河北省农作物抗旱研究重点实验室,河北 衡水 053000)

摘要: 为合理高效利用河北低平原区浅层地下咸水资源,采用田间试验的方法,系统研究了不同矿化度(1,2,4,6,8 g/L)灌溉水对土壤盐分分布与冬小麦产量的影响.结果表明,随灌溉水中矿化度的增加,0~20 cm 厚度的土层土壤容重增加,同时土壤孔隙率逐渐降低.与淡水处理(1 g/L)相比,矿化度为 2 g/L 的灌溉水浇灌的麦田 0~100 cm 土层土壤平均盐分含量未出现明显增加;冬小麦拔节期、孕穗期和抽穗期的叶面积指数、株高以及单位面积穗数、穗粒数、千粒质量和籽粒产量未呈现明显差异.然而,当灌溉水矿化度增加到 4 g/L 以上时,0~100 cm 土层土壤平均盐分含量大幅增加,植株生长受到明显抑制,籽粒产量出现显著下降,减产主要因素为咸水灌溉导致的冬小麦穗数减少.在该灌溉模式下,推荐冬小麦咸水灌溉的适宜矿化度低于 2 g/L.

关键词: 冬小麦;土壤盐分;咸水灌溉;土壤容重;产量
中图分类号: S27 **文献标志码**: A **文章编号**: 1674-8530(2022)08-0850-07
Doi:10.3969/j.issn.1674-8530.20.0273

苟淇书,党红凯,马俊永,等. 灌溉水矿化度对土壤盐分及冬小麦产量的影响[J].排灌机械工程学报,2022,40(8): 850-856.
GOU Qishu, DANG Hongkai, MA Junyong, et al. Effect of irrigation water salinity on soil salinity and winter wheat yield[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME),2022,40(8):850-856.(in Chinese)

Effect of irrigation water salinity on soil salinity and winter wheat yield

GOU Qishu[1], *DANG Hongkai*[2], *MA Junyong*[2], *ZHANG Junpeng*[1], *LI Quanqi*[1*], *WANG Xin*[1]
(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271000, China; 2. Key Laboratory of Crop Drought Resistance in Hebei Province, Dry-land Farming Institute of Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui, Hebei 053000, China)

Abstract: In order to make rational and efficient use of saline water resources, field experiments were conducted to study the effects of irrigation water salinity (1, 2, 4, 6, 8 g/L) on soil salinity distribution and winter wheat yield. The results show that, with the increase of irrigation water salinity, soil bulk density increases and soil porosity decreases in 0 -20 cm soil;compared with the fresh water treatment (1 g/L), the average salt content of 0 - 100 cm soil in the treatment of 2 g/L irrigation does not significantly increase, and there are no significant differences in leaf area index, plant height, spike number, grain number per spike, 1 000 grain weight and grain yield per unit area of winter wheat at jointing, booting and heading stages. When the salinity of irrigation water is more than or equal to 4 g/

收稿日期: 2020-09-28; 修回日期: 2021-01-26; 网络出版时间: 2022-07-12
网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220711.1745.020.html
基金项目: 河北省重点研发计划项目(21327003D);国家重点研发计划项目(2017YFD03009002);河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站开放基金资助项目(FIRI202004-0101)
第一作者简介: 苟淇书(1996—),男,山东青岛人,硕士研究生(2573771256@qq.com),主要从事农业水土工程研究.
通信作者简介: 李全起(1976—),男,山东昌乐人,教授,博士生导师(quanqili@sdau.edu.cn),主要从事农业水土工程研究.

L, the average salt content in 0-100 cm soil is significantly increased, the growth of winter wheat is significantly inhibited, and the grain yield is significantly decreased. The decrease of spike number is the main factor leading to the decrease of winter wheat yield under saline water irrigation. In this irrigation mode, the suitable salinity for saline water irrigation of winter wheat is less than or equal to 2 g/L.
Key words: winter wheat; soil salinity; saline water irrigation; soil bulk density; yield

河北低平原是中国重要的冬小麦生产基地,灌溉用水需求量较大[1].该区域淡水资源紧缺,深层地下淡水超量开采,而浅层地下咸水(微咸水)资源分布广泛却未得到利用.大量试验表明咸水可以用来灌溉[2-3],利用咸水进行农业灌溉能在一定程度上缓解冬小麦的水分亏缺问题,但同时也使盐分进入了土壤[4].如果能够因地制宜,科学合理地进行灌溉,适宜矿化度的咸水对土壤及冬小麦生长的影响不大;然而采用不合理的咸水灌溉方法,咸水浓度不适宜,则会造成土壤持续积盐,使土壤理化性质恶化,导致冬小麦产量降低[5].国内外许多科研工作者开展了针对咸水灌溉、土壤盐分与作物生长关系的相关研究.合理开采浅层地下咸水,用以进行农业灌溉,既可以缓解淡水缺乏,又能够满足冬小麦生长对水分的基本需求,使冬小麦产量保持在较高水平.

前人对咸水灌溉的开发和利用进行了较多研究. CHEDLIA 等[6]研究发现,咸水灌溉会导致土壤含盐量增加,但影响土壤盐分的因素有多种,尤其是土壤质地、气候条件(降雨模式、平均温度等)以及水源的距离等.PHOGAT 等[7]认为,土壤中盐分沉积量与灌溉水电导率呈正相关关系.JIANG 等[8]认为,灌溉水电导率为 3.2 dS/m 对小麦产量和水分生产力没有显著影响.灌溉量和水矿化度对产量、农田实际蒸散量和水分利用效率的交互作用在试验中不显著.ZHANG 等[9]研究发现,灌溉水的矿化度达到5 g/L时,土壤盐分显著积累,并诱发次生盐渍化.李佳等[10]发现,使用矿化度为 2.47 g/L 的咸水进行 9 a连续灌溉,0~20 cm 土层土壤未达到盐渍化水平,而 1 m 土体出现轻度盐渍化,但未对冬小麦产量造成明显影响,因此,用矿化度为 2.47 g/L 的咸水进行长期灌溉,不会导致严重的土壤盐渍化.焦艳平等[11]提出,利用咸淡混合的方法,获得的矿化度为 2 g/L 的混合水对小麦和玉米的产量影响较小,对土壤盐分动态进行长期监测、定期淡水淋盐有助于微咸水的长期安全利用.李国安等[12]发现,当咸水的矿化度为 3.0 g/L 时,盐分胁迫造成的春小麦减产量低于 10%;但当矿化度达到 5.0 和 7.0 g/L 时,春小麦严重减产,产量最高下降达 28%.有关咸水灌溉对于土壤以及冬小麦产量的影响,前人已经在土壤盐分累积风险、冬小麦-盐分响应关系等方面进行了具体的研究,但不同气候条件、土壤质地、灌溉制度及灌溉年限下的灌溉水矿化度阈值存在较大差异.研究团队自 2006 年 10 月起进行长期咸水定位灌溉试验,文中在连续咸水灌溉第 13—14 年(2018—2019 年),获得咸水对土壤盐分变化以及冬小麦生长响应特征的规律,为河北低平原区浅层微咸水高效利用和咸水灌溉提供理论支撑.

1　试验方法与材料

1.1　试验区域概况

本研究于 2018 年 10 月至 2019 年 6 月在河北农林科学院衡水旱作农业节水试验站(115°47′E, 37°44′N)进行.试验地点位于河北低平原区,海拔高度 21 m,地下水埋深约 7 m.该站年日照时数为 2 509.4 h,多年平均气温为 12.8 ℃,无霜期天数 188 d,多年平均降水量 512.5 mm,夏季 6—8 月降水量占全年 70%左右,年蒸发量 1 785.4 mm,土壤特质为黏质壤性脱盐土.

1.2　试验设计

本研究的供试作物为冬小麦,分别以矿化度为 1,2,4,6,8 g/L 的灌溉水进行灌溉试验.其中,矿化度为 1 g/L 的淡水取自当地深层地下水,作为对照处理.试验区浅层地下咸水的成因是大陆盐化及海水入侵共同作用,咸水中 Na^+ 和 Cl^- 含量最高.因此,本试验中矿化度为 2,4,6,8 g/L 的咸水通过在深层地下水中加入海盐配制而成,不同矿化度 *IS* 灌溉水离子浓度 *IC* 见表 1.种植冬小麦与夏玉米,一年两熟.每个灌溉处理进行 3 次重复,随机排列.选用当地主栽品种衡 4399 作为试验用冬小麦,栽种区面积 57 m^2(9.5 m×6.0 m).生育期浇水 2 次(拔节水和扬花水灌溉量各 60 mm,水表计量).播前旋耕 2 次,深度 12~15 cm.播种前底施 525 kg/hm^2 磷酸二铵(P_2O_5含量 46%,N 含量 18%),春季结合第 1 次灌水追施 300 kg/hm^2 尿素(N 含量 46%).2018 年 10

月12日播种,冬小麦播种量为195~225 kg/hm^2,2019年6月10日收获,采用15 cm等行距的播种方式.冬小麦生育期内的降水总量为133.7 mm,属平水年份.各月份降水P_0分布如表2所示.试验在长期(自2006年10月)咸水定位灌溉基础上,重点考察了连续咸水灌溉的第13—14年冬小麦的生长和产量情况.初始0~100 cm土层土壤盐度($EC_{1:5}$,土水质量比1∶5浸提液电导率)为0.25 dS/m.

表1 试验用灌溉水的离子组成

Tab.1 Ion compositions of irrigation water with different salinity used in experiment

IS/(g·L^{-1})	IC/(mmol·L^{-1})						
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-
1	0.72	0.81	0.15	10.73	2.94	1.04	7.63
2	0.86	1.60	0.18	25.62	5.16	1.11	21.45
4	1.00	2.30	0.20	56.44	8.46	1.21	47.27
6	1.17	2.89	0.23	87.84	11.67	1.31	73.58
8	1.40	3.13	0.26	119.97	15.07	1.44	100.04

表2 冬小麦生育期各月降水量

Tab.2 Rainfall during winter wheat growth period

参数	月份(2018—2019)							
	10	11	12	1	2	3	4	5
P_0/mm	3.5	4.2	3.0	0.0	2.4	1.6	67.4	51.6

1.3 测试项目及方法

土壤盐分测定:利用电导率法检测土壤盐分.分别于播种前(2018年9月30日)、拔节水前(2019年3月15日)、拔节水后(2019年3月30日)、扬花水前(2019年4月30日)、扬花水后(2019年5月15日)及小麦收获期(2019年6月13日)用土钻采集土壤样品.取土深度100 cm,0~60 cm土层每10 cm为1层,60~100 cm每20 cm为1层,共分为8层.土样风干、碾磨、过筛后,以土水质量比1∶5,配制土壤浸提液,然后测定土壤电导率($EC_{1:5}$),电导率仪为上海雷磁DDS-307A型.

土壤容重:环刀体积为100 cm^3,每10 cm取1个土样,置于烘箱中在105 ℃下烘干12 h,称重,求得土壤容重γ.

土壤孔隙度:利用土壤容重γ,依据式(1)计算土壤孔隙度P为

$$P=(1-\gamma/d)\times 100\%, \tag{1}$$

式中:d为土壤比重,数值为2.65 g/cm^3.

冬小麦株高和叶面积指数:每试验区取20株代表性植株,在冬小麦的拔节期和孕穗期测量最上部展开叶的叶尖到地面的距离,在抽穗期测量穗顶的到地面的距离,并计算平均值作为株高.利用LI-3000型叶面积仪测量植株所有有效叶片的总面积计作叶面积,通过式(2)计算叶面积指数LAI为

$$LAI=D\times A, \tag{2}$$

式中:D为群体密度,株/m^2;A为单株叶面积,m^2/株.

产量及产量构成因素:在收获前,每试验区选取2个采样点,采用1 m双行的方法计算穗数;各试验区取外形均匀一致的30~40株单穗,考种测量穗粒数;各区选取3 m^{2}进行实割测定产量,折算为单位面积产量,并测量千粒质量.

2 结果分析

2.1 土壤含盐量变化

图1为冬小麦不同生长期不同土层深度(0~100 cm)土壤含盐量$EC_{1:5}$随着土壤深度H的变化过程.表3为灌溉水矿化度对冬小麦不同生育期各土层土壤平均含盐量的影响.从图1和表3看出,在冬小麦不同生育期0~100 cm土层土壤的平均含盐量随灌溉水矿化度的升高而增加.与1 g/L的淡水灌溉相比,2 g/L的咸水灌溉时,在冬小麦各生育期0~100 cm土层土壤的平均含盐量增加不明显.而当矿化度增加到4 g/L以上时,土壤含盐量显著升高.与淡水(1 g/L)灌溉情况相比,矿化为2,4,6,8 g/L时,拔节水灌溉后平均土壤盐含量分别升高了14.3%,77.1%,131.4%和242.9%;扬花水灌溉后平均土壤盐含量增加了20.0%,85.0%,160.0%和235.0%.其原因是灌溉所用咸水的矿化度越高,随咸水进入土壤的各种盐分的量越多,盐分累积越严重.

在播种冬小麦前,雨季降雨对土壤有淋洗作用,0~20 cm土层土壤的盐浓度低于深层土壤,土壤中盐浓度的峰值土层为60~80 cm;其他时期,表层土壤盐分含量相对较高.进行拔节水灌溉后,不同矿化度咸水灌溉的0~100 cm土层土壤平均盐含量相较于拔节水灌溉前均有升高,增幅分别为4.7%,9.8%,34.3%和27.5%,说明高矿化度的灌溉水会导致土壤盐分显著增加.值得注意的是,灌溉扬花水后,不同矿化度灌溉对土壤盐含量的影响较小,这与扬花期降雨的淋洗作用以及土壤中盐分的空间变异性有关.相比于2006年土壤的初始含盐量,2019年小麦收获期不同矿化度4,6,8 g/L咸水灌溉的0~100 cm土层土壤的平均含盐量分别升高了127.4%,213.4%和345.4%,这说明长期采用不低于4 g/L咸水灌溉具有积盐的风险.

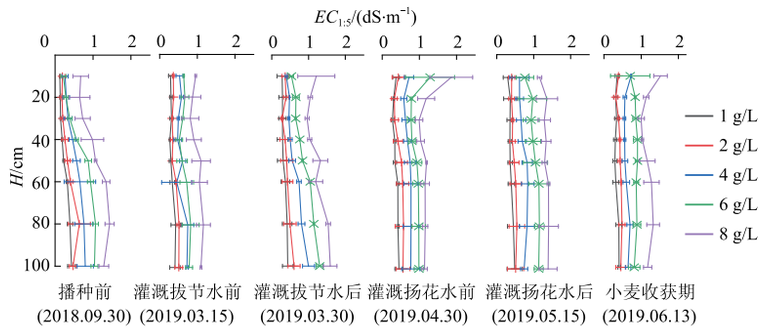

图 1　不同灌水处理冬小麦土壤盐分分布特征

Fig.1　Soil salinity distribution characteristics of winter wheat under different irrigation treatments

表 3　不同灌水处理 0~100 cm 土层平均土壤盐分

Tab.3　Average soil salinity in 0−100 cm soil layers under different irrigation treatments　　dS/m

IS/(g·L^{-1})	$EC_{1:5}$					
	播种前 (2018.10.02)	灌溉拔节水前 (2019.03.15)	灌溉拔节水后 (2019.03.30)	灌溉扬花水前 (2019.04.30)	灌溉扬花水后 (2019.05.15)	小麦收获时 (2019.06.13)
1	0.28d	0.35c	0.35d	0.38d	0.40d	0.35d
2	0.38cd	0.42c	0.44cd	0.49d	0.48d	0.43d
4	0.57bc	0.61b	0.67c	0.72c	0.74c	0.63c
6	0.75b	0.70b	0.94b	0.95b	1.04b	0.85b
8	1.09a	1.02a	1.30a	1.20a	1.34a	1.21a

注:表中小写字母表示试验处理之间的差异在 $P<0.05$ 水平下具有统计学意义.下同

2.2　土壤容重和孔隙度变化

表 4 列出了冬小麦播种前,灌溉水矿化度对耕作层 0~20 cm 处土壤容重 γ 和孔隙度 P 的影响.

表 4　不同灌水处理 0~20 cm 土壤容重和孔隙度

Tab.4　Soil bulk density and porosity of 0−20 cm layer under different irrigation treatments

IS/(g·L^{-1})	γ/(g·cm^{-3})	*P*/%
1	1.51b	42.93a
2	1.57ab	40.59ab
4	1.59ab	39.98ab
6	1.62a	38.95b
8	1.64a	38.78b

由表 4 可知,灌溉水矿化度越高,土壤容重越大.与 1 g/L 的淡水灌溉相比,矿化度为 2,4,6,8 g/L 的咸水灌溉下 0~20 cm 的土壤容重分别升高了 4.1%,4.2%,7.0%和 7.3%.尤其是 6 g/L 和 8 g/L 灌溉水与 1 g/L 淡水灌溉之间的差异在 0.05 水平下具有统计学意义.土壤孔隙率在不同矿化度水的灌溉下,呈现出与容重相反的趋势.

2.3　冬小麦叶面积指数与株高变化

图 2 为灌溉水的矿化度对拔节期、孕穗期和抽穗期冬小麦叶面积指数 *LAI* 和株高 *pH* 的影响.与矿化度为 1 g/L 的淡水灌溉相比,灌溉水矿化度大于 4 g/L时叶面积指数均显著降低.4,6,8 g/L 的咸水灌溉使叶面积指数在拔节期分别下降 34.0%,66.8%和 75.2%;孕穗期下降 38.9%,68.2%和 78.9%;抽穗期下降 34.2%,71.1%和 77.9%.

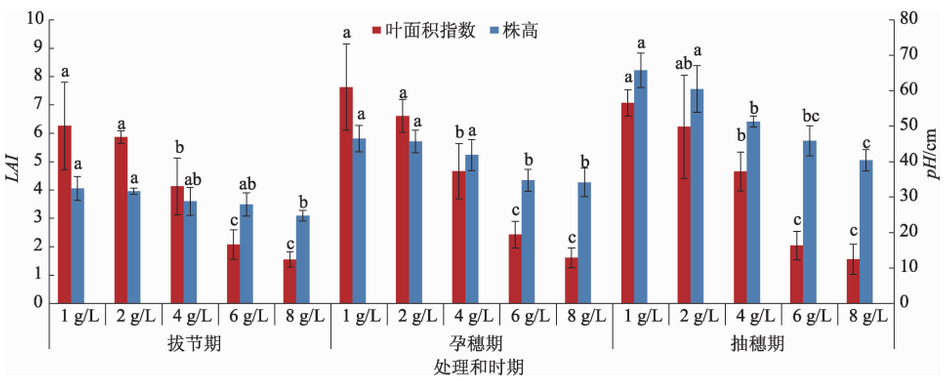

图 2　不同处理冬小麦关键生长期的叶面积指数和株高

Fig.2　Effect of irrigation water salinity on leaf area index and plant height of winter wheat at different key growth stages

2.4 冬小麦产量与产量构成因素变化

冬小麦籽粒产量由穗数、穗粒数和千粒质量共同决定[13].表5为2019年各处理冬小麦籽粒产量及产量构成因素,其中 NS,NG,TW,GY 分别表示单位面积穗数、穗粒数、千粒质量和籽粒产量.由表可知,与1 g/L淡水灌溉相比,灌溉水矿化度大于4 g/L时冬小麦的籽粒产量和穗数显著降低,4,6,8 g/L的咸水灌溉使籽粒产量分别下降了35.6%,44.9%和64.7%,穗数分别下降44.0%,48.9%和60.7%.然而,矿化度2 g/L的咸水对籽粒产量和穗数均未产生明显的影响.此外,穗粒数随矿化度的上升先增后减.相比于淡水灌溉,矿化度4 g/L的咸水灌溉使穗粒数增加了23.5%,差异性在0.05水平下具有统计学意义;矿化度增加到8 g/L,穗粒数比4 g/L时降低了26.3%.冬小麦的千粒质量对灌溉水矿化度不敏感,不同矿化度咸水灌溉与淡水灌溉间的千粒质量差异不具有统计学意义.

表5 不同灌水处理冬小麦产量构成因素及产量

Tab.5 Yield components and yield of winter wheat under different irrigation treatments

IS/(g·L^{-1})	NS/(穗·m^{-2})	NG/(粒·穗$^{-1}$)	TW/g	GY/(g·m^{-2})
1	769.8a	24.92cd	35.64a	627.15a
2	742.9a	26.80bc	35.26a	584.59a
4	431.1b	30.77a	36.79a	404.10b
6	393.3bc	28.63ab	35.63a	345.30bc
8	302.7c	22.67d	36.69a	221.48c

3 讨 论

采用咸水进行灌溉能为冬小麦根区的土壤提供盐分,并调节盐分分布.咸水灌溉后,由于蒸发作用使得土层深度为0~10 cm表层土壤中的盐分随水向上迁移,水分蒸发导致盐分在土壤表层积累[14],表层土壤含盐量升高.这与文献[14]报道的表层土壤盐分聚积现象一致.在冬小麦的不同生长期,相比于淡水灌溉,矿化度大于4 g/L的咸水灌溉导致了0~100 cm土壤的平均含盐量显著增加.该结论与郑春莲等[15]的研究结果一致,说明盐含量在4 g/L以上的咸水导致大量盐分进入土壤,并在0~100 cm土壤中造成明显的盐分积累,从而使得土壤平均含盐量增高.因此,除1 g/L淡水灌溉外,拔节灌溉后咸水灌溉的土壤含盐量与拔节水灌溉前均有明显增加.降雨对土壤中的盐分具有淋洗作用,因此以咸水进行扬花水灌溉前后的土壤含盐量变化不明显.与2006年时土壤的初始含盐量相比,2019年冬小麦收获时矿化度大于4 g/L的咸水灌溉均使0~100 cm土层的土壤平均含盐量显著上升,且土壤盐分增加的幅度随咸水矿化度的上升而增大.然而,ZHANG等[16]的研究发现,同一区域咸水灌溉后,土壤含盐量并不随灌溉年限的增加而逐年累积.其原因为降雨导致的土壤盐分淋溶.灌溉水量和降雨量的比值 I/P 与土壤含盐量的年度变化密切相关.当 I/P 值较小时,土壤含盐量呈现淋洗效果;反之,I/P 值较大时土壤呈现盐分累积.0~100 cm土层的土壤中盐分变化还与水文年型以及降雨量的年内分配密切相关,甚至部分年份会出现脱盐.但从多年累计数据分析,某一矿化度咸水灌溉可实现作物根区盐分补排平衡.郑春莲等[17]的研究也得出了与之相似的结论.

孔隙度和容重是土壤非常重要的理化性质,综合反映了土壤的颗粒构成、化学性质及团聚体特性.咸水中的盐分会与土壤发生复杂的反应,引起土壤的理化性质发生变化,从而改变了土壤质量及其可持续利用性.随着土壤含盐量增加,0~20 cm的表层土壤表现出容重增加、孔隙率降低的趋势,原因是长期咸水灌溉引入的盐分导致了土壤黏粒膨胀,从而改变了土壤结构.

文中系统研究了不同矿化度灌溉水对冬小麦在不同生长时期的株高和叶面积指数的影响.结果表明,与1 g/L淡水灌溉相比,矿化度不低于4 g/L时冬小麦拔节期、孕穗期及抽穗期的叶面积指数大幅下降,这是由于盐的渗透效应与离子毒害效应,高矿化度的咸水灌溉致使叶片中 Na^+ 含量上升,而高浓度的 Na^+ 离子抑制了冬小麦叶片的生长[18].此外,拔节期8 g/L的咸水灌溉的冬小麦株高明显降低,孕穗期不低于6 g/L的咸水灌溉、抽穗期不低于4 g/L的咸水灌溉均导致株高显著下降.这说明冬小麦的株高随生长进程的推进,对灌溉水矿化度的敏感度逐渐升高,其原因是土壤中盐分降低了土壤水分的有效性,当盐含量超过一定程度后将产生渗透胁迫,进而影响根系吸水[17].综合考虑矿化度对冬小麦叶面积指数和株高的影响,采用不低于4 g/L的咸水灌溉会明显影响冬小麦拔节期、孕穗期和抽穗期的生长.

基于收获期的冬小麦产量三要素与灌溉水的矿化度关系分析,冬小麦穗数对矿化度最敏感,相较于淡水灌溉,矿化度在4 g/L以上的咸水灌溉使穗数显著减少,该变化趋势与冬小麦籽粒产量一致.

小麦穗粒数随矿化度的增加呈现先增加后减少的趋势,但这一趋势并不明显,只有矿化度 4 g/L 时比 1 g/L 以及 8 g/L 比 4 g/L 灌溉得到的穗粒数之间的差异在 0.05 水平下具有统计学意义.千粒质量受咸水灌溉的影响不大,咸水灌溉的千粒质量与淡水灌溉差异不具有统计学意义.这说明,影响冬小麦籽粒产量的主要因素是咸水灌溉导致的穗数减少,这一结论与焦艳平等[11]的一致.而各产量要素受到咸水灌溉的影响差异,是因为植株各生长部位对盐分胁迫的敏感度不尽相同.因此,针对河北低平原地区的冬小麦耐盐品种选育,应更加重视穗数指标,优选成穗率高的冬小麦品种.在栽培措施上,应适当提高冬小麦播种量,从而提升咸水灌溉情况下冬小麦的籽粒产量.

文中基于长期定位咸水灌溉试验,重点考察了连续咸水灌溉第 13—14 年时,矿化度对土壤含盐量及冬小麦生长的影响.前人已对本工作前期的部分数据进行了一些报道.郑春莲等[15]基于 2007—2008 年度灌溉水矿化度与土壤盐积累及作物产量之间的关系,发现在黑龙港耕作区采用微咸水灌溉方式时,咸水灌溉的矿化度不宜高于 4 g/L.李佳等[10]分析了 2007—2015 年各年度的冬小麦咸水灌溉的矿化度阈值,发现阈值具有明显的年际波动特征,且年际之间的波动较大.本研究的相关结果也存在一定程度的矿化度阈值年际波动.究其原因是影响作物生长和产量的土壤盐分迁移过程非常复杂,不同年份作物根区土壤盐分含量和变化规律差异很大[17].

本试验中的咸水为定时定量灌溉,灌溉方式单一,咸水内离子成分固定,且试验周期仅为 1 个小麦生育期,长期的咸水灌溉,不同灌溉方式、灌溉水量以及不同组分咸水灌溉时,土壤盐分和冬小麦生长发育遵循何种规律,仍需进一步的研究.此外,该研究由于受到试验条件、仪器设备等限制,因此在研究期间仅测定了降水量,并未测定农田总蒸发量,在未来的研究中也会补充农田总蒸发量测定试验,并进行进一步的研究与分析.

4　结　论

1) 与矿化度 1 g/L 淡水灌溉相比,2 g/L 的咸水灌溉对试验耕作区 0~100 cm 土层土壤的平均含盐量影响较小,不低于 4 g/L 的咸水灌溉会导致土壤含盐量显著增加.

2) 随着灌溉水矿化度增加,试验耕作区 0~20 cm表层土壤的容重数值增大,孔隙率减小,其中,矿化度为 6 g/L 和 8 g/L 的咸水灌溉与淡水灌溉之间的差异在 0.05 水平下具有统计学意义.

3) 咸水灌溉有抑制冬小麦株高和叶面积指数的趋势,冬小麦不同生育时期,2 g/L 灌水处理小麦叶面积指数和株高较淡水(1 g/L)灌溉处理间差异不具有统计学意义.

4) 当使用矿化度为 2 g/L 微咸水灌溉时,冬小麦穗数与籽粒产量下降不明显,矿化度达到 4 g/L 及以上时,冬小麦的穗数与籽粒产量都有明显减少,且穗数的减少是咸水灌溉影响冬小麦籽粒产量的主要原因.

5) 综合考虑灌溉水矿化度对土壤的理化性质、冬小麦的生长发育以及籽粒产量的影响,建议试验区冬小麦咸水灌溉的矿化度阈值控制在 2 g/L 以下.

参考文献(References)

[1] SOOTHAR Rajesh Kumar, ZHANG Wenying, ZHANG Yanqing, et al. Evaluating the performance of saltmed model under alternate irrigation using saline and fresh water strategies to winter wheat in the North China Plain [J]. Environmental science and pollution research, 2019,26(33):34499-34509.

[2] HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, SHENG Zhuping, et al. Soil salinity and maize growth under cycle irrigation in coastal soils[J]. Agronomy journal, 2019, 111(5): 2276-2286.

[3] SOOTHAR Rajesh Kumar, ZHANG Wenying, LIU Binhui, et al. Sustaining yield of winter wheat under alternate irrigation using saline water at different growth stages:a case study in the North China Plain[J]. Sustainability, 2019,11(17):1-16.

[4] SUN Youping, CHEN Jijhong, XING Haifeng, et al. Growth, visual quality, and morphological responses of 12 viburnum taxa to saline water irrigation[J]. Hortscience,2020,55(8):1233-1241.

[5] 龚雨田,孙书洪,闫宏伟.微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J].节水灌溉,2017(9):33-37,42.
GONG Yutian, SUN Shuhong, YAN Hongwei. Effect of brackish water irrigation on yield and agronomic traits of winter wheat[J]. Water saving irrigation,2017 (9):33-37,42.(in Chinese)

[6] CHEDLIA B A, SALWA M, BECHIR B R, et al. Saline water irrigation effects on soil salinity distribution

and some physiological responses of field grown Chemlali olive [J]. Journal of environmental management, 2012, 113(3): 538-544.

[7] PHOGAT Vinod, JAMES WILLIAM Cox, JIRKA Simunek, et al. Modeling water and salinity risks to viticulture under prolonged sustained deficit and saline water irrigation[J]. Water and climate change, 2020, 11 (3): 901-915.

[8] JIANG Jing, HUO Zailin, FENG Shaoyuan, et al. Effect of irrigation amount and water salinity on water consumption and water productivity of spring wheat in Northwest China[J]. Field crops research, 2012, 137: 78-88.

[9] ZHANG Zemin, ZHANG Zanyu, LU Peirong, et al. Soil water-salt dynamics and maize growth as affected by cutting length of topsoil incorporation straw under brackish water irrigation[J]. Agronomy - basel, 2020, 10(2): 1-17.

[10] 李佳,曹彩云,郑春莲,等.河北低平原冬小麦长期咸水灌溉矿化度阈值研究[J].中国生态农业学报,2016,24(5):643-651.
LI Jia, CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, et al. Study on mineralization threshold of Winter Wheat under long-term saline water irrigation[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2016, 24 (5): 643 - 651. (in Chinese)

[11] 焦艳平,高巍,潘增辉,等.微咸水灌溉对河北低平原土壤盐分动态和小麦、玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):134-140.
JIAO Yanping, GAO Wei, PAN Zenghui, et al. Effects of brackish water irrigation on soil salt dynamics and wheat and maize yields in Hebei low plain[J]. Agricultural research in the arid areas, 2013, 31(2): 134-140. (in Chinese)

[12] 李国安,蒋静,马娟娟,等.咸水灌溉对土壤水盐分布和小麦产量的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(6):544-552.
LI Guoan, JIANG Jing, MA Juanjuan, et al. Effect of saline water irrigation on water-salt distribution and yield of wheat[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018, 36(6): 544-552. (in Chinese)

[13] 李太魁,寇长林,郭战玲,等.有机氮替代部分无机氮对砂姜黑土冬小麦产量及氮肥利用率的影响[J].江苏农业科学,2021,49(5):97-101.
LI Taikui, KOU Changlin, GUO Zhanling, et al. Influences of partial substitution of chemical nitrogen with manure on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in lime concretion black soil[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2021, 49(5): 97-101. (in Chinese)

[14] 马雅静,王哲,李志萍,等.微咸水灌溉对土壤水盐分布的影响[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(4):65-69.
MA Yajing, WANG Zhe, LI Zhiping, et al. Effects of brackish water irrigation on soil water and salt distribution[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (natural science edition), 2019, 40 (4): 65-69. (in Chinese)

[15] 郑春莲,曹彩云,李伟,等.不同矿化度咸水灌溉对小麦和玉米产量及土壤盐分运移的影响[J].河北农业科学,2010,14(9):49-51,55.
ZHENG Chunlian, CAO Caiyun, LI Wei, et al. Effects of saline water irrigation with different salinity on wheat and maize yield and soil salt transport[J]. Journal of Hebei agricultural sciences, 2010, 14 (9): 49-51, 55. (in Chinese)

[16] ZHANG Anqi, LI Kejiang, SUN Jingsheng, et al. Effects of a ten-year irrigation with saline water on soil physico-chemical properties and cotton production [J]. Journal of soil and water conservation, 2020, 75(5): 629-639.

[17] 郑春莲,冯棣,李科江,等.咸水沟灌对土壤水盐变化与棉花生长及产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(13):92-101.
ZHENG Chunlian, FENG Di, LI Kejiang, et al. Effects of saline water furrow irrigation on soil water and salt changes and cotton growth and yield[J]. Transcations of the CSAE, 2020, 36(13): 92 - 101. (in Chinese)

[18] 徐猛,马巧荣,张继涛,等.盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应[J].生态学报,2011,31(3):784-792.
XU Meng, MA Qiaorong, ZHANG Jitao, et al. The osmotic and ionic toxic effects of different genotypes of winter wheat under salt stress[J]. Acta ecology, 2011, 31(3): 784-792. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)