

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.03.10

华北地区咸水灌溉土壤水盐运移规律 及对小麦产量的影响研究

王哲¹, 王丽娟^{1*}, 李猛兴²

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061;

2. 山西省地质调查院有限公司, 太原 030006)

摘要: 为了探究华北地区地下咸水资源科学、合理的利用方式, 本文通过开展冬小麦咸水灌溉的田间试验, 采用地下咸水和淡水灌溉两种方式, 研究了咸水灌溉对土壤水盐运移及小麦产量的影响。结果表明, 同一灌溉量下, 淡水灌溉水分运移深度较咸水灌溉深, 且同一深度淡水灌溉土壤含水率明显高于咸水, 咸水灌溉在一度程度上会影响土壤入渗和持水能力; 咸水灌溉随着持续灌溉, 土壤表层(0~0.2 m)和深层(0.6~1.2 m)盐分开始积聚, 整个播种收获期, 土壤剖面含盐量产生不同程度累积, 埋深0.4 m盐分累积量达到峰值1.6 g/kg。淡水灌溉对土壤含盐量影响较小, 但会将表层土壤盐分淋洗至深层累积; 当灌溉水矿化度为8.69 g/L, 冬小麦产量减少达37.65%。因此, 在开展咸水灌溉时, 应合理控制灌溉水的矿化度, 实行咸淡混合灌溉, 在小麦不减产情况下最大限度利用咸水资源。

关键词: 小麦; 咸水灌溉; 水盐分布; 产量

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2023)03-0076-06

衡水市属于黑龙港流域, 是典型的农业区, 受气候因素影响, 本区粮食作物以小麦、玉米等高耗水性农作物为主, 而衡水地区水资源短缺, 浅层地下水以微咸水为主, 深层地下水超采严重, 合理开发利用利用微咸水资源, 探寻科学合理的微咸水灌溉方式, 对缓解全市淡水资源紧张、扩充农业灌溉水源、抗旱增产有着极其重要的作用^[1-3]。但微咸水灌溉为作物生长提供必需的水分的同时也将大量盐分带入土壤, 进而影响土壤质量和作物产量。如何科学合理的开发利用微咸水资源, 探讨微咸水灌溉对农田土壤水盐运移及作物产量的影响, 成为近些年研究的热点。国内外大量研究和实践证明, 灌溉土壤盐分的分布和积累情况受灌溉水量和灌溉水矿化度影响^[4-7]。研究发现利用矿化度低于3 g/L的微咸水进行灌溉, 土壤初始积盐并不明显, 不会对作物生长产生影响^[8,9], 但在多年持续灌溉或一次灌溉水量较少的情况下, 会造成农田土壤表层盐分积聚, 从而影响作物的生长^[10-13], 相关研究表明土壤盐分运移深度与单次灌溉

量呈正相关性, 即盐分运移深度随单次灌溉量增加而增大, 土壤盐分累积量随着灌溉时间增加而增大, 随着灌溉水矿化度的增大而增大^[14-17]。此外, 咸水灌溉对农作物产量是否存在影响, 也一直是众多学者关注焦点。郝远远等^[18]的研究表明, 在轻度盐渍化土壤中和非盐渍化土壤条件下, 微咸水灌溉条件下, 春玉米产量较渠灌(淡水)灌溉条件下分别降低28%和10.5%。李国安等^[19]研究表明当灌溉水矿化度为3.0 g/L时, 盐分胁迫小麦减产在10%以下; 灌水矿化度为5.0 g/L和7.0 g/L时, 春小麦减产严重, 最高可达28%。

不同地区咸水灌溉条件下水盐运移机理以及对作物产量的影响结果不同, 而针对地下咸水较为充裕的河北省衡水市微咸水灌溉对土壤含盐量的影响、土壤水分分布规律以及防治土壤次生盐碱化的研究相对较少。本文通过研究咸淡水在不同灌水量条件下土壤水盐运移规律及对冬小麦产量影响, 为河北衡水地区深入开展咸水灌溉研究提供基础数据

收稿日期: 2023-03-03

资助项目: 自然资源部项目“我国典型地区大气水-地表水-地下水资源综合评估与水平衡研究—以漳滏平原为例(B201905)”

作者简介: 王哲(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地下水资源与环境研究, E-mail: 972636980@qq.com;

*通讯作者: 王丽娟(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地下水资源与环境研究, E-mail: 32737195@qq.com。

<http://hbdz.org.cn>

和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2018年10月—2019年6月在国土资源部地下水科学与工程大型试验基地(简称“衡水试验场”)开展。试验场位于衡水北部,深县南,中心点坐标为N37°54'23.0",E115°40'44.3",属于温带大陆性、半湿润半干旱季风气候区,气温年较差、日差都较大。多年平均降水量480 mm(1949—1984年),多年平均蒸发量约1 665 mm。试验场所在区第I含水组矿化度约8.9 g/L左右,第II含水组矿化度约0.71 g/L左右,第III含水组矿化度约0.80 g/L左右,第IV含水组矿化度约0.64 g/L左右。所用灌溉井水(第I含水组)的矿化度为8.69 g/L。试验场0~120 cm各层土壤基本性质和初始含盐量如表1和表2所示,地下水主要离子组成见表3。

1.2 试验设计

试验田采用咸水灌溉单元和淡水灌溉单元分区设计,每块灌溉单元的面积为(5×5) m²,纵向深度为1.8 m,中间以混凝土结构进行隔断处理,水平方向为封闭环境,垂直方向为开放环境(图1)。灌水方式为

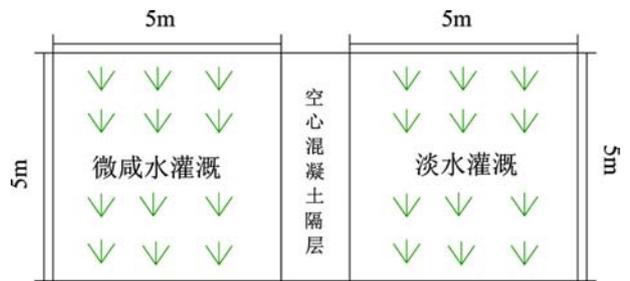


图1 田间试验现场图

Fig.1 The scene of field trial

漫灌,咸水灌溉单元利用地下水(矿化度8.69 g/L)进行日常灌溉,淡水灌溉单元利用自来水(矿化度为1.05 g/L)进行日常灌溉。一季种植期内于2018年10月25日、12月5日、2019年3月21日和4月24日灌溉4次,灌溉水量分别为1.58 m³、2 m³、3 m³和3 m³。结合当地灌溉资料,本实验针对试验单元设计的1.58 m³、2 m³和3 m³三种灌溉水量,分别代表重度、轻度缺水的非充分灌溉和充分灌溉。同时,考虑施肥不利于单纯分析咸水灌溉对小麦产量影响效果,种植期间未施任何肥料。

2 观测项目及测试方法

2.1 土壤含水率、温度及基质势

土壤含水率和温度,均是利用埋在土壤不同深度下的ECH₂O 5TE/5TM(含水率及温度)进行监测。微咸水灌溉一侧含水率、温度传感器埋藏深度分别为0.05 m、0.25 m、0.45 m、0.90 m、1.30 m,共五层;淡水灌溉一侧含水率、温度传感器埋深分别为0.05 m、0.25 m、0.45 m、0.90 m、1.25 m,共五层(图2)。设置每15 min传回一组数据,以保证准确获取土壤各层水的变化情况。

2.2 土壤盐分

土壤盐分由甘肃地质工程实验室进行易溶盐检测。取样时间为2018年10月25日、12月5日和2019年3月21日、4月24日灌溉前后,即每次灌溉前后在

表1 土壤各层颗粒组成

Table 1 Particle composition of each layer of soil

土壤层次/m	土壤颗粒/%					土壤类型
	< 4 μm	4 ~ 63 μm	63 ~ 250 μm	250 ~ 500 μm	> 500 μm	
0 ~ 0.2	4.290	59.451	29.333	6.165	0.761	粉细砂
0.2 ~ 0.4	3.098	77.414	18.670	0.818	0	粉细砂
0.4 ~ 0.8	8.461	80.342	10.507	0.690	0	粉砂
0.8 ~ 1.2	6.916	76.032	14.671	2.327	0.053	粉砂

表2 土壤各层初始含盐量

Table 2 Background salinity of each soil layers

埋深/m	咸水灌溉侧 含盐量/(mg/kg)	淡水灌溉侧 含盐量/(mg/kg)
0 ~ 0.2	706	943
0.2 ~ 0.4	1 004	1 316
0.4 ~ 0.6	1 095	1 506
0.6 ~ 0.8	1 822	2 116
0.8 ~ 1.2	1 864	2 669

表3 地下水主要离子组成表

Table 3 Table of main ions composition of groundwater

离子浓度 (mg/L)	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
	1 789.00	636.00	324.80	6.10	3 591.00	2 130.00	427.10	2.72

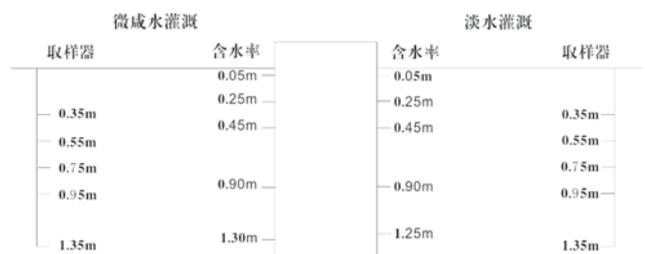


图2 试验场装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of testing apparatus

每个区域内分别取一次土样,取土前期分6层,后期分10层,深度1.2 m(前期取样分层[0-0.2],[0.2-0.4],[0.4-0.6],[0.6-0.8],[0.8-1],[1-1.2] m;后期取样分层[0-0.1],[0.1-0.2],[0.2-0.3],[0.3-0.4],[0.4-0.5],[0.5-0.6],[0.6-0.7],[0.7-0.8],[0.8-1],[1-1.2] m)。

2.3 冬小麦产量

冬小麦成熟后,对每个试验小区进行收割,脱粒,自然条件下风干、称重、计算每公顷小麦产量。

3 结果与分析

3.1 土壤水分动态

图3和图4为剖面0.05 m、0.25 m、0.45 m和0.9 m处土壤平均含水率的变化情况,红线标注为农作物生长阶段的4次灌溉时间及水量(淡水侧因表层传感器损坏,故土壤含水率从0.25 m开始监测)。

咸水侧:表层土壤水分含量变化最为剧烈,降雨、灌溉和蒸发是引起表层土壤含水率波动的重要因素。随埋深逐渐增加,土壤含水率随时间变化曲

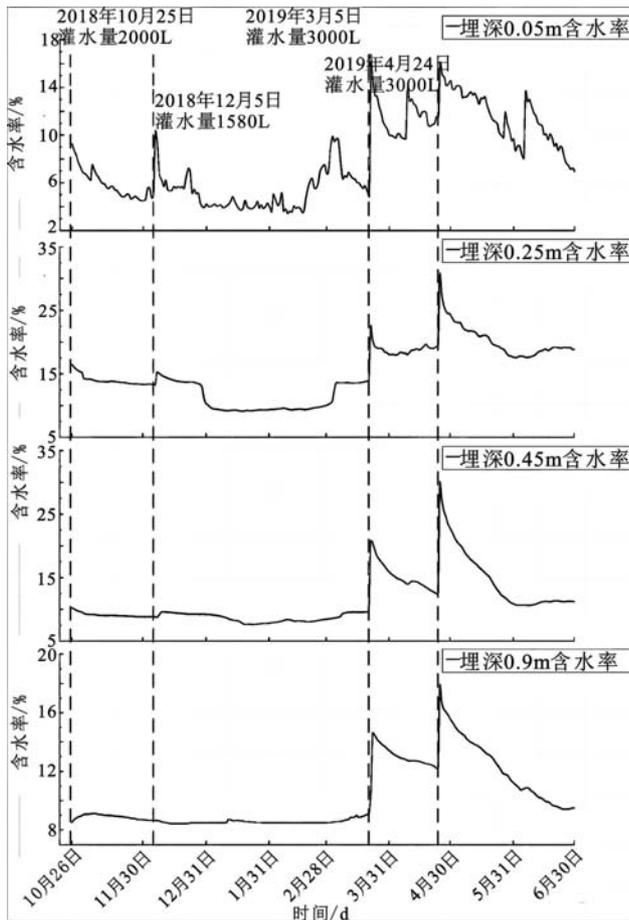


图3 咸水灌溉条件下土壤含水率随时间变化图
Fig.3 The graph of soil moisture content over time under saline irrigation conditions

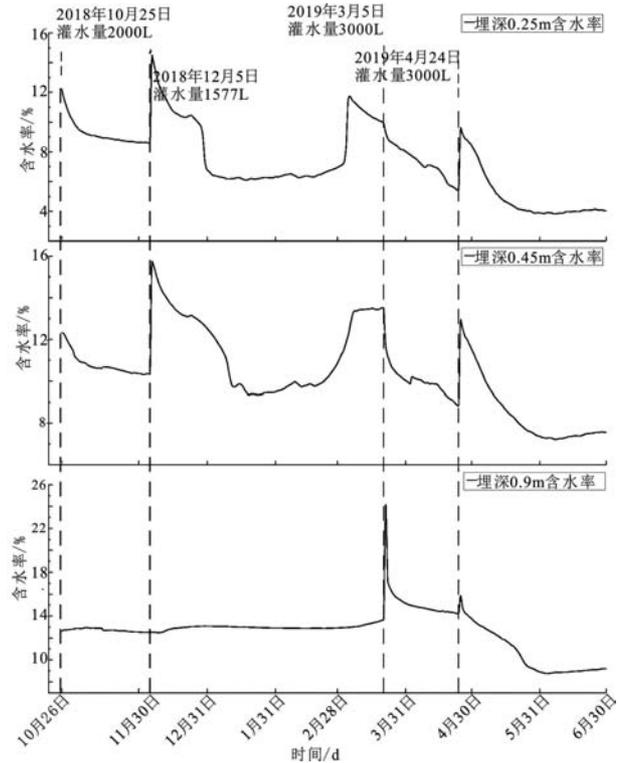


图4 淡水灌溉条件下土壤含水率随时间变化图
Fig.4 The graph of soil moisture content over time under fresh water irrigation conditions

线逐渐平缓,埋深0.25 m处土壤含水率重度缺水非充分灌溉几乎无反应,轻度缺水的非充分灌溉时出现小幅上升,两次充分灌溉时含水率上升明显,其余时段几乎不受小幅度降雨的影响,说明随埋藏深度增加,土壤受外界影响逐渐减小,土壤水与大气水交换频率降低;当埋深达到0.45 m时,两次非充分灌溉已经对该层土壤含水率影响较小,含水率稍有上升,两次充分灌溉时含水率曲线上上升明显;当埋深达到0.9 m时,仅两次充分灌溉可以看出明显波动外,其余时间段内,土壤含水率变化几乎可以忽略。据此推测,水分运移深度与单次灌溉量呈正相关性,即水分运移深度随单次灌溉量增加而增大。

淡水侧:相比咸水侧同一深度同一时段淡水侧土壤含水率均明显偏高。0.25 m处土壤含水率几乎不受小幅降雨影响,但对四次灌溉均响应明显,在第二次灌溉时含水率达到峰值。0.45 m处,含水率曲线变化趋势及峰值与0.25 m处近乎相同。埋深0.9 m处,含水率曲线对两次非充分灌溉未表现出任何响应,仅在两次充分灌溉时,呈现明显上升趋势。总体来看,大气降水仅对0.25 m以浅土壤含水率有影响,非充分灌溉仅对0.45 m以浅土壤含水率有影响,充

分灌溉对0.9 m以浅土壤含水率均有不同程度影响,且影响程度随深度增加逐渐减小。

对比发现,淡水侧同一深度同一时段土壤含水率均明显高于咸水侧,0.25~0.45 m段对两次非充分灌溉均表现出明显的响应,咸水侧则响应不够明显,表明咸水侧土壤的持水能力、导水能力均弱于淡水侧,推测咸水灌溉影响了土壤的持水和入渗能力。

3.2 土壤盐分动态变化

3.2.1 土壤盐分背景值

咸水侧:灌溉前(图5(a),2018年10月25日曲线),剖面上土壤盐分含量随埋藏深度增加呈逐渐增大的趋势,含量在0.7~1.9 g/kg范围波动,可见该区域土壤盐分含量背景值较小。

淡水侧:相比于咸水灌溉侧(图5(b),2018年10月25日曲线),剖面土壤初始含盐量相对大一些,大致在0.94~2.67 g/kg范围内波动。

3.2.2 不同时期土壤盐分分布

(1)咸水侧:咸水灌溉后,剖面上曲线呈现4种分布规律。

表层未出现积盐现象:第二次灌溉前(12月5日),经过一次重度缺水的非充分咸水灌溉后,剖面上土壤盐分出现波动,但表层并未出现积盐现象,埋深0.4 m以下呈增大趋势,在埋深0.6~0.8 m处积聚,达到最大值3.0 g/kg,继而又开始下降,剖面上土壤含盐量在0.8~3.0 g/kg范围内波动。

表层出现积盐,深层未出现积盐现象:第二次灌

溉后至第三次灌溉前(12月14日),两次非充分灌溉条件下,土壤盐分在表层0~0.2 m积聚,0.2 m以下略有下降后回升,至0.4 m再次达到峰值,0.4~0.6 m开始下降,0.6 m处达到最小值1.77 g/kg,继而开始回升,0.8 m处达到最大值3.8 g/kg,继而下降,说明非充分灌溉对深层土壤含盐量几乎不产生影响。

表层和深层均出现积盐现象:第三次灌溉后至第四次灌溉前(4月24日),两次非充分灌溉一次充分灌溉,且受蒸发作用影响条件下,土壤盐分在表层0~0.2 m开始累积,0.2 m处达最大值7.35 g/kg左右。0.2~0.6 m段含盐量开始下降,0.6 m以下又开始升高,峰值出现在1.2 m处,深部出现积盐现象。可见土壤剖面盐分的累积深度与灌水量有关,土壤盐分的累积深度随着灌水量的增加而增加。

表层及深层积盐现象略呈降低:第四次灌溉后至最后一次取样(6月24日),四次灌溉,进入雨季条件下,土壤表层积盐较之前(4月24日)有所降低,深层(1.2 m)积盐也呈现较之前有所降低现象,推测应该是雨季到来,对表层土壤积盐及深层起到一定的洗盐作用。

(2)淡水侧:淡水灌溉条件下,在整个小麦生长阶段,土壤剖面含盐量在0.8~3.7 g/kg范围波动,土壤含盐量变化不大,总体走势相似,随埋藏深度的增加土壤含盐量逐渐增大,在1.2 m处达到最大值。

3.2.3 播种前至收获后剖面盐分含量变化量

播种前至收获后土壤剖面盐分变化情况见图6,

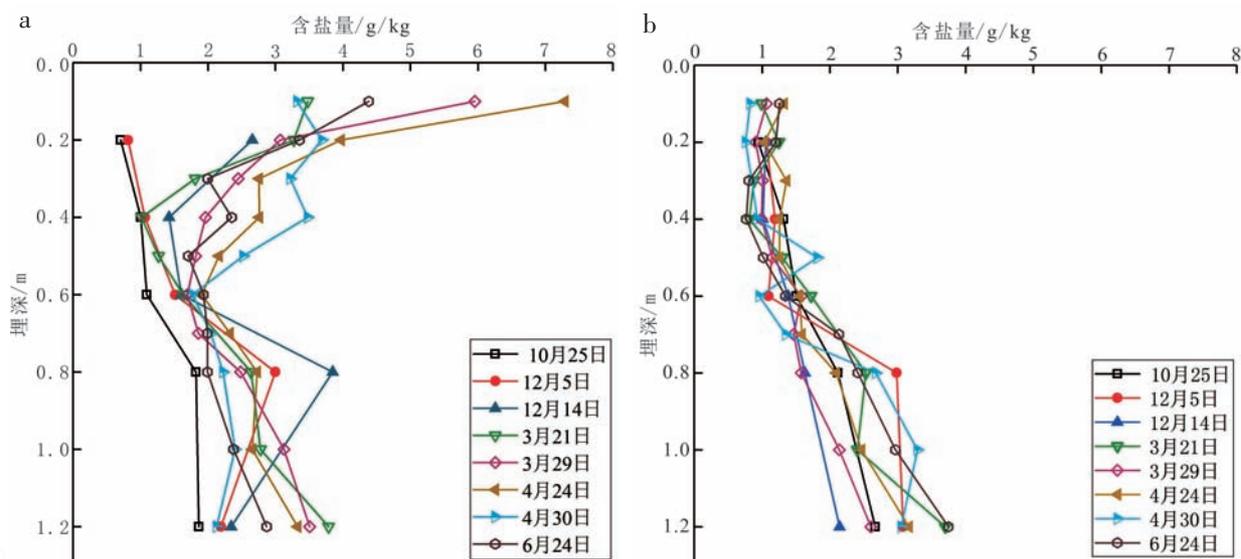


图5 不同灌溉条件下土壤剖面含盐量变化

Fig.5 The soil profile salt content change under different irrigation conditions

a. 咸水灌溉; b. 淡水灌溉

<http://hbdz.org.cn>

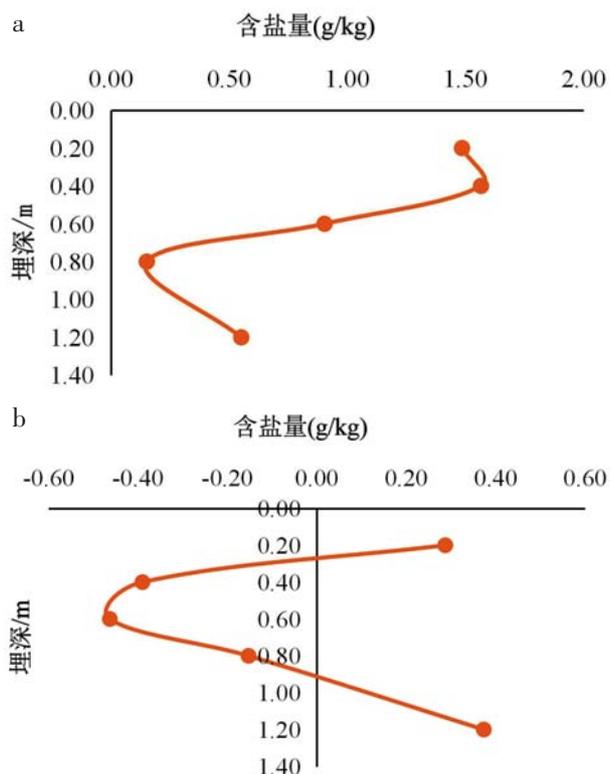


图6 播种前至收获后土壤剖面含盐量变化

Fig.6 The soil profile salinity change before sowing and after harvesting

a. 咸水灌溉; b. 淡水灌溉

正值表示土壤盐分积累,负值表示盐分被淋洗。咸水灌溉条件下,土壤剖面含盐量变幅在0.6~1.6 g/kg间波动,表层0.2~0.4 m盐分积累明显,0.4 m处盐分累积量达到峰值1.6 g/kg,0.4~0.8 m盐分累积量随深度增加而降低,0.8~1.2 m盐分累积量随深度增大而增加,1.2 m盐分累积量达0.6 g/kg,说明咸水灌溉时,土壤剖面含盐量产生不同程度累积,且表层土壤(0.2~0.4 m)积盐现象明显,深层(1.2 m)盐分也呈累积状态。淡水灌溉条件下,土壤剖面盐分在表层0.3~0.4 m产生轻微累积,0.3~0.9 m盐分被淋洗,0.9~1.2 m又产生轻微累积现象,整个剖面盐分累积量峰值不超过0.4 g/kg,说明淡水灌溉对土壤含盐量影响较小,但会将表层土壤盐分淋洗至深层累积。

3.3 小麦产量变化

表4为冬小麦产量变化,咸水灌溉较淡水灌溉产

表4 冬小麦产量
Table 4 Yield of winter wheat

处理	淡水灌溉	咸水灌溉	减产率
穗数/(万/hm ²)	528.4	362.5	31.40%
产量/(kg/hm ²)	6 640.3	4 140.5	37.65%

量减少了37.65%,穗数减少31.40%,说明灌溉水矿化度为8.69 g/L时,冬小麦对盐分的胁迫比较敏感,造成减产比较严重。

4 结论

本文通过一季冬小麦咸淡水对比灌溉试验,分析土壤水盐动态变化和对产量的影响,主要得到以下结论:

(1)研究区内0.45 m以浅的土壤接受大气降水的补给,0.45 m以深的土壤几乎不与大气水交换。

(2)同一灌溉量下,淡水灌溉条件水分运移深度较咸水灌溉条件下深,且同一深度淡水灌溉侧土壤含水率明显高于咸水侧,即咸水灌溉在一度程度上会影响土壤入渗能力和持水能力。

(3)咸水灌溉条件下,随着持续灌溉,土壤表层(0~0.2 m)和深层(0.6~1.2 m)盐分出现积聚;雨季,会对表层及深层土壤起到一定洗盐作用,致使土壤含盐量略呈降低;淡水灌溉条件下,土壤含盐量变化不大,但总体走势相似。

(4)整个播种收获期,咸水灌溉条件下,土壤剖面含盐量产生不同程度累积,且表层土壤(0.2~0.4 m)积盐现象明显,深层(1.2 m)盐分也呈累积状态;淡水灌溉条件下,对土壤含盐量影响较小,但随着持续灌溉,会将表层土壤盐分淋洗至深层累积。

(5)当灌溉水矿化度为8.69 g/L时,冬小麦产量减少达37.65%,减产严重。因此,建议在华北平原开展咸水灌溉时,应合理控制灌溉水的矿化度,对于灌溉水的适宜矿化度还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 焦文煊. 衡水地区长期咸水灌溉下土壤水盐运移与作物生长的模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.
- [2] 邵洪强, 费宇红, 雒国忠, 等. 河北平原地下咸水资源利用的效应分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(02):53-56.
- [3] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(03):70-75.
- [4] 付腾飞, 于洪军, 徐兴永, 等. 微咸水灌溉对莱州湾南岸土壤水盐运移的影响研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6):1358-1363.
- [5] 杨树青, 杨金忠, 史海滨. 微咸水灌溉对作物生长及土壤盐分影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(7):32-35, 42.
- [6] 冯绍元, 蒋静, 霍再林, 等. 基于SWAP模型的春小麦咸水非充分灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9):66-75.

- [7] 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 (137): 78-88.
- [8] 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.
- [9] WANG ZAIMIN, JIN MENGGUI, SIMUNEK J, et al. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China [J]. *Irrigation Science*, 2014, 32 (1): 15-27.
- [10] 王军涛, 姜丙洲, 程献国. 西北内陆地区微咸水交替灌溉试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(6): 125-126.
- [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.
- [12] 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 73-80.
- [13] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 599-603.
- [14] 张俊鹏, 冯棣, 曹彩云, 等. 咸水灌溉对覆膜棉花生长与水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(5): 448-455.
- [15] 蒋静, 冯绍元, 孙振华, 等. 咸水非充分灌溉对土壤水盐分布及玉米产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2637-2642.
- [16] 蒋静, 冯绍元, 王永胜, 等. 灌溉水量和水质对土壤水盐分布及春玉米耗水的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2270-2279.
- [17] 王相平, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. *农业工程学*, 2014, 30(7): 54-63.
- [18] 郝远远, 郑建华, 黄权中. 微咸水灌溉对土壤水盐及春玉米产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(10): 36-41.
- [19] 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.

Study on soil water and salt movement and its effect on wheat production under saline water irrigation in North China Plain

WANG Zhe¹, WANG Lijuan¹, LI Mengxing²

(1. *The Institute of Hydrogeology and Environment Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061 China;*

2. Shanxi Institute of Geological Survey Co., Ltd, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to explore a scientific and rational utilization way of the saline groundwater resources in North China, the effects of saline groundwater irrigation on soil water-salt movement and wheat production was studied by the field experiments of saline water irrigation for winter wheat, with both saline water and fresh water irrigation. The results showed that the water movement depth of fresh water irrigation side was deeper than that of salt water irrigation side, and the soil water content of fresh water irrigation side was higher than that of salt water irrigation side at the same depth. It can be inferred that salt water irrigation affects soil infiltration and soil water holding capacity to a certain extent. With the continuous irrigation, salt accumulated in the surface layer (0~0.2 m) and the deep layer (0.6 m~1.2 m) of the saline water irrigation side. The salt content accumulated differently at different depth of the soil profile in the whole growth period, and it reached a peak value of 1.6 g/kg at the depth 0.4 m. The effect of fresh water irrigation on salt accumulation was relatively weak, but it would leach salt from surface to deep layer. When the salinity of irrigation water reached 8.69 g/l, the yield of winter wheat reduced by 37.65%. Therefore, when saline water irrigation is carried out, the mineralization degree of irrigation water should be reasonably controlled.

Key words: wheat; saline water irrigation; water-salt distribution; yield