

DOI: 10.11766/trxb201705090207

咸淡水间歇组合灌溉对盐碱耕地土壤水盐运移特性的影响*

刘小媛¹ 高佩玲^{1, 2†} 杨大明¹ 张晴雯³ 张宇航¹

(1 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255049)

(2 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东淄博 255049)

(3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100086)

摘要 为探明土壤水盐在咸淡水间歇组合灌溉条件下的运移情况, 采用室内一维垂直积水入渗试验, 以全淡水和微咸水直接灌溉作为对照, 设置了四种间歇时间, 分别为 0、30、60、120 min, 三种咸淡水组合比例, 分别为 2:1、1:1、1:2, 进行咸淡水间歇组合灌溉。结果表明: 在同一入渗时间, 间歇组合灌溉的累积入渗量大于淡水灌溉, 与微咸水直接灌溉差异较小; 累积入渗量 (I) 与湿润锋运移深度 (Z_f) 的决定系数 R^2 均大于 0.99, I 和 Z_f 呈良好的线性关系; 间歇组合灌溉的土壤含水率、灌水均匀度均远远大于淡水灌溉, 但间歇组合灌溉的灌水均匀度随着淡水所占灌水定额比例的增加而减小; 在 5~45 cm 作物根系密集区, 土壤整体脱盐, 但间歇组合灌溉土壤脱盐率显著高于微咸水直接灌溉, 与淡水灌溉差异较小; 不同间歇时间、组合比例对土壤脱盐率的影响均达到显著性水平。

关键词 间歇组合灌溉; 灌水均匀度; 一维垂直积水入渗试验; 脱盐率

中图分类号 S275.8 **文献标识码** A

黄河三角洲地区自然资源丰富, 开发前景广阔, 是我国重要的经济开发区^[1]。该地区土地资源优势明显, 其未开发利用土地资源达 54.07 万 hm^2 ^[2], 但土壤盐渍化程度较高, 盐渍化土地面积高达 44.29 万 hm^2 , 占全区耕地总面积的 52.5%。目前, 对于盐碱地改良已由早期的淡水漫灌洗盐的方式逐步发展为以节约淡水资源为主的微咸水灌溉方式^[3-6]。已有研究表明^[7], 利用微咸水进行灌溉能够促进土壤颗粒的絮凝作用和团聚性, 使土壤大孔隙增加, 入渗性能增强。但是, 微咸水中含有 Na^+ , 如果土壤中 Na^+ 含量过多, 会造成土壤颗粒松散, 破坏土壤结构, 使土壤积盐^[8-10]。因此, 合理开发利用微咸水资源, 使之成为能被农业生

产所利用的新水源, 不仅可以缓解该地区水资源供需矛盾, 还可改良盐碱耕地。可持续开发利用微咸水资源的关键是降低作物根系土层的盐分含量, 为作物提供良好的土壤水盐环境。间歇灌溉, 又称波涌灌溉, 是按照一定的时间间隔周期性供水的一种新的节水灌溉方式, 具有节水、保肥、提高灌水均匀性等优点^[11]。国内外学者对间歇灌溉的入渗机理进行了广泛的研究, 邵俊昌^[12]通过室内土柱实验, 分析了微咸水间歇灌溉对土壤水盐分布的影响, 结果表明, 在不同周期数、循环率的条件下, 土壤入渗特性有所差异。雪静等^[13]通过室内土柱实验, 发现微咸水间歇灌溉具有增加湿润深度的特点。汪志荣等^[14]分析了 Green-Ampt 模型在连续

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07203-007)、国家自然科学基金项目 (41402208) 和山东省自然科学基金项目 (ZR2016EEM34) 资助 Supported by the National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No.2015ZX07203-007), the National Natural Science Foundation of China (No.41402208) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2016EEM34)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaoplj@163.com

作者简介: 刘小媛 (1991—), 女, 山东青岛人, 硕士, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: 402983329@qq.com

收稿日期: 2017-05-09; 收到修改稿日期: 2017-07-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-08-18

和间歇入渗条件下的适用性，并建立了两者的联系，模型拟合精度较高。毕远杰等^[15]通过室内土柱实验，研究了淡水与微咸水连续与间歇入渗特性的差异，结果表明，淡水间歇入渗减渗，微咸水间歇入渗增渗。上述研究初步揭示了间歇灌溉的理论基础，对于间歇灌溉的实际应用具有重要意义。但前人的研究多集中在非盐碱土壤在淡水或者微咸水灌溉条件下的间歇入渗机理，而对于盐碱土壤在间歇组合灌溉条件下入渗机理研究较少。

本文以地处黄河三角洲地区的山东省滨州市滨城区的中度盐碱化土壤为研究对象，将间歇灌溉和先咸后淡组合灌溉相结合，在室内进行一维垂直积水入渗试验，分析对比不同间歇时间、咸淡水组合比例对中度盐碱土壤水盐再分布规律的影响，以期黄河三角洲地区盐碱耕地合理利用微咸水灌溉提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

试验用土取自山东省滨州市滨城区的小麦耕地，土壤类型为盐化潮土。取土深度为80 cm，每隔20 cm分层取扰动土和原状土，原状土取回后立即测定土壤容重和田间持水率，分别为 1.39 g cm^{-3} 和28.62%；扰动土经过风干、碾压、筛分（2 mm筛）、均匀混合后制备成室内试验土样。利用激光粒度仪（Mastersizer3000，英国）测定其土壤颗粒组成，并按照国际制土壤质地分类标准分类，砂粒、粉粒和黏粒体积分数分别为20.26%、76.78%

和2.96%，属于粉砂质壤土。土壤初始含水率为2.00%，土壤全盐量为 2.381 g kg^{-1} ，属于中度盐碱化土壤。

1.2 灌溉水质及水量

试验用水中淡水使用的是蒸馏水，矿化度为 0 g L^{-1} ； 3 g L^{-1} 的微咸水根据研究区潜层地下微咸水的盐分组成特点，在室内利用 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 、 MgCl_2 和 NaCl 室内配制而成，含量分别为783、602、377、644和 596 mg L^{-1} 。

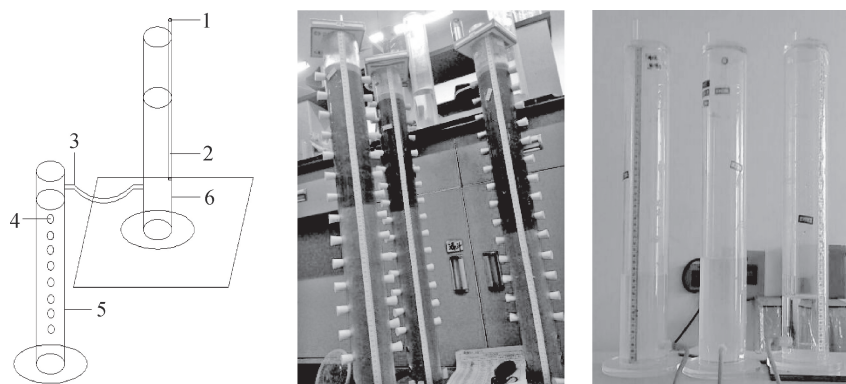
灌水定额 M 根据下式计算得：

$$M = \frac{H(\theta_{\max} - \theta_0)\gamma_{\pm}}{\gamma_{\text{水}}} \quad (1)$$

式中， H 为土壤计划湿润层深度，由于当地的地下水位较高，且为盐碱化较严重的地区，故计划湿润层深度不易超过60 cm^[16]，故 H 取60 cm； θ_{\max} 为土壤计划湿润层所允许的最大含水率（占干土重），一般为田间持水率，取28.62%； θ_0 为土壤计划湿润层初始含水率（占干土重），取2.00%； γ_{\pm} 、 $\gamma_{\text{水}}$ 分别为土壤干容重和水的密度，取 1.39 g cm^{-3} 和 1 g cm^{-3} 。由式（1）计算得到一次实验的灌水定额为22.2 cm。

1.3 试验装置

试验装置由试验土柱和马氏瓶两部分组成（图1）。试验土柱采用内径为8 cm，高为90 cm的有机玻璃制成，土柱两侧每隔5 cm开一直径为15 mm的对称圆形取样口（距土柱上沿10 cm以下）；利用马氏瓶供水，其截面积为 50.24 cm^2 ，高为50 cm，供水水头控制在1.5~2.0 cm。土柱与马氏瓶外壁标有刻度，用于观测马氏瓶水位和湿润锋运移深度。



1. 进气口；2. 进气管；3. 输水软管；4. 取土口；5. 试验土柱；6. 马氏瓶

1. Air inlet; 2. Air inlet vent; 3. Water hose; 4. Soil extraction port; 5. Soil column; 6. Markov bottle

图1 试验装置图

Fig. 1 Experiment device diagram

1.4 试验方案与测定内容

以全淡水和微咸水直接灌溉作为对照, 设置了四种间歇时间, 分别为0 min、30 min、60 min、120 min; 三种咸淡水组合比例, 分别为2:1、1:1、1:2, 进行间歇组合灌溉。在试验过程中,

将灌水定额分成两份, 第一份为微咸水, 第二份为淡水, 单轮入渗结束, 间歇一定的时间后, 进行下一轮入渗, 具体的微咸水与淡水灌溉水量如表1所示。为了保证试验数据的可靠性, 每个处理重复三次。

试验土样按土壤容重 1.39 g cm^{-3} 分层(5 cm)

表1 间歇组合灌溉下灌溉水量试验方案

Table 1 Experimental scheme of irrigation water amount under intermittent combined irrigation (ICI)

处理 Treatment	全淡水灌溉 Fresh water irrigation	微咸水直接灌溉 Brackish water irrigation	咸:淡=2:1 Brackish: Fresh=2:1	咸:淡=1:1 Brackish: Fresh=1:1	咸:淡=1:2 Brackish: Fresh=1:2
微咸水灌溉量 ^① (cm)	0	22.2	14.8	11.1	7.4
淡水灌溉量 ^② (cm)	22.2	0	7.4	11.1	14.8

①Amount of brackish water; ② Amount of fresh water

装, 共16层。填装完毕后, 在土表放置一张与土柱内截面积相同的带孔滤纸以防止灌水时对表土的冲刷。在试验过程中用秒表计时, 按照先密后疏的原则记录湿润锋运移深度和马氏瓶水位。当灌水定额入渗结束后, 立即从土表至湿润锋处每隔5 cm提取土样, 用烘干法测定土壤含水率, 利用电导率仪(DDS-11A, 上海)测定水土比为5:1的土壤溶液电导率, 并利用土壤含盐量与土壤浸提液电导率之间的关系, 将电导率转化为含盐量, 具体的转化公式为:

$$y=2.160EC_{5:1}+0.303 \quad (2)$$

式中, y 为土壤含盐量, g kg^{-1} ; $ED_{5:1}$ 为 25°C 下水土比为5:1的土壤浸提液电导率, mS cm^{-1} 。

1.5 数据分析

采用Microsoft Office Excel 2010进行数据整理, Origin9.0软件绘图, SPSS22.0进行数据分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异(LSD)法比较不同土层间和处理间土壤脱盐率的差异。

2 结果

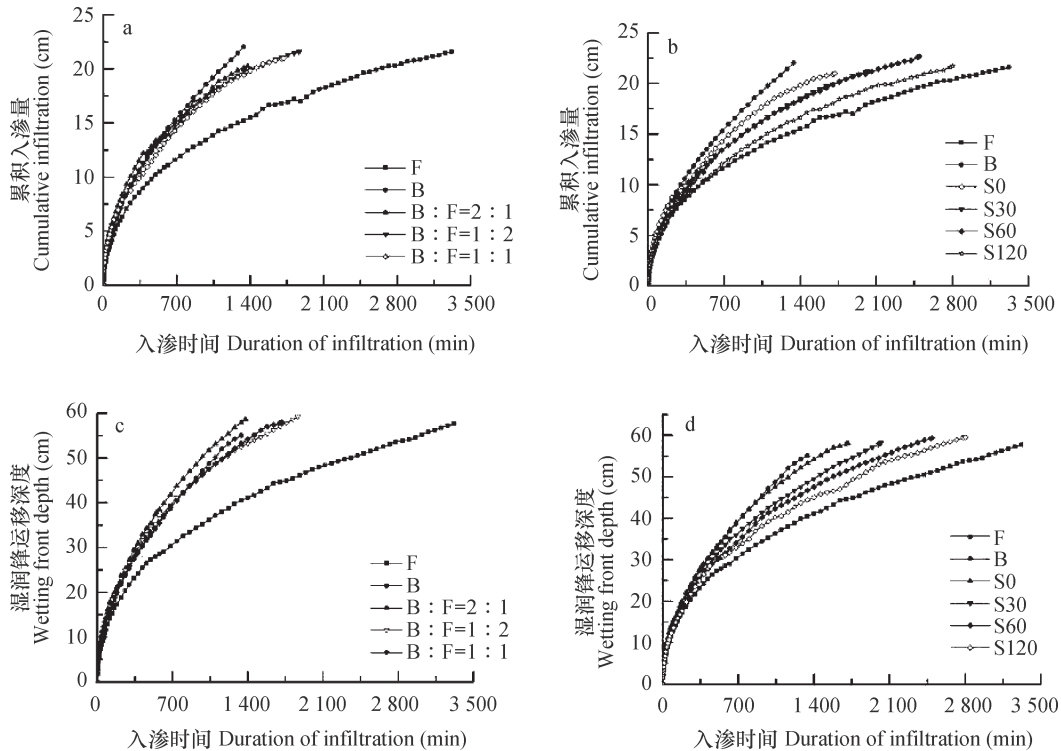
2.1 间歇组合灌溉对土壤入渗特征的影响

2.1.1 对累积入渗量的影响 为了对比分析间歇组合灌溉模式对土壤累积入渗量的影响, 点绘不同组合比例、间歇时间下土壤累积入渗量随入渗时

间的变化曲线, 见图2a、图2b。由图2a、图2b可知, 入渗初期, 所有处理的累积入渗量增长速度较快, 入渗中后期, 增幅变缓。在同一入渗历时, 间歇组合灌溉的累积入渗量大于淡水, 与微咸水直接灌溉差异较小。图2a表明, 在同一入渗时间下, 累积入渗量随微咸水灌水份额的增加而增加; 灌溉定额入渗结束的时间随淡水份额的增加而增加。图2b表明, 在相同入渗时间, 累积入渗量大小顺序依次为: 间歇组合灌溉0 min > 间歇组合灌溉30 min > 间歇组合灌溉60 min > 间歇组合灌溉120 min。这主要由于停水时间越长, 致密层形成的越充分, 越稳定, 土壤导水率减小, 累积入渗量减小。

2.1.2 对湿润锋运移深度的影响 在一维垂直积水入渗过程中, 水分在土体内运移, 土壤被湿润部分随着入渗时间的增加而增大。对于不同的咸淡水间歇组合灌溉模式, 湿润锋推进速度随入渗时间的变化不同。图2c、图2d表示不同组合比例、间歇时间湿润锋运移深度的变化规律, 由图2c、图2d可以看出, 入渗初期, 湿润锋运移速度较快, 各个处理间的曲线基本重合, 随着时间的延长, 湿润锋运移深度与入渗时间的变化曲线斜率发生不同程度的减小, 且各个处理间的差距越来越大。对比图2a、图2b可知, 其与累积入渗量随入渗时间的变化规律基本一致, 为了定量分析两者的关系, 利用线性方程进行拟合:

$$I=AZ_t \quad (3)$$



注：图a、c为组合比例对累积入渗量、湿润锋运移深度的影响，以间歇时间0 min为例进行说明；图b、d为间歇时间对累积入渗量、湿润锋运移深度的影响，以组合比例为1:1进行说明；F表示全淡水灌溉；B表示微咸水直接灌溉；B:F=2:1表示咸:淡=2:1；B:F=1:1表示咸:淡=1:1；B:F=1:2表示咸:淡=1:2；S0表示间歇组合灌溉0 min；S30表示间歇组合灌溉30 min；S60表示间歇组合灌溉60 min；S120表示间歇组合灌溉120 min，下同 Note: Fig. a and Fig. c Effects of combination ratio on cumulative infiltration or wetting front depth, illustrated with alternate irrigation 0-min in interval, Fig. b and Fig. d Effects of interval on cumulative infiltration or wetting front depth, illustrated with irrigation, B:F=1:1, F stands for irrigation with fresh water; B for irrigation with brackish water; B:F=2:1 for ratio of Brackish: Fresh=2:1; B:F=1:1 for ratio of Brackish: Fresh=1:1; B:F=1:2 for ratio of Brackish: Fresh=1:2; S0 for ICI 0 min in interval; S30 for ICI 30 min in interval, S60 for ICI 60 min in interval; S120 for ICI 120 min in interval. The same below

图2 间歇组合灌溉对土壤入渗特性的影响

Fig. 2 Effects of ICI on characteristics of soil infiltration

式中， I 为累积入渗量，cm； Z_f 为湿润锋运移深度，cm； A 为拟合系数。

由表2可知，累积入渗量与湿润锋运移深度的决定系数 R^2 均大于0.99， I 和 Z_f 的线性关系成立。在同一间歇时间下，拟合系数 A 的变化规律表现为咸:淡=2:1 > 咸:淡=1:1 > 咸:淡=1:2。对于咸:淡=2:1，随着间歇时间的增加，拟合系数 A 增加，而对于咸:淡=1:1，咸:淡=1:2，拟合系数 A 随着间歇时间的增加呈现先增大后减小的趋势。

2.2 间歇组合灌溉对土壤水分垂直分布特征的影响

土壤水分入渗是指水分通过地表或入渗界面进入土壤的过程^[17]。入渗结束后，农田土壤水分分布情况决定了作物对其吸收利用的程度和土壤水

分的有效性^[18]。不同组合比例、间歇时间土壤含水率随土层的变化情况见图3。由图3可以看出，在土壤上层（5~10 cm），淡水灌溉的土壤含水率最大；在土壤中下层（10~50 cm），间歇组合灌溉的土壤含水率远远大于淡水灌溉，与微咸水直接灌溉差异较小，说明间歇组合灌溉有利于提高中下层土壤的持水能力。由图3a可知，在同一土层深度，土壤含水率变化规律为：咸:淡=2:1 > 咸:淡=1:1 > 咸:淡=1:2，即土壤含水率与咸水所占灌溉定额比例大小呈正比。由图3b可知，在土壤的表层和下层，土壤含水率表现为：间歇组合灌溉0 min > 间歇组合灌溉30 min > 间歇组合灌溉60 min > 间歇组合灌溉120 min；而对于中层土壤，间歇组合灌溉0 min土壤含水率最低，但仍远

表2 间歇组合灌溉模式下累积入渗量与湿润锋运移深度的拟合系数

Table 2 Fitted parameters of cumulative infiltration and downward depth of wetting front relative to ICI mode

处理 Treatment	间歇组合灌溉0 min			间歇组合灌溉30 min			间歇组合灌溉60 min			间歇组合灌溉120 min		
	ICI S0			ICI S30			ICI S60			ICI S120		
	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2
拟合系数 ^①	0.358 9	0.356 1	0.354 2	0.373 3	0.370 6	0.360 5	0.386 4	0.382 9	0.378 3	0.391 1	0.367 3	0.347 5
R ²	0.993 6	0.998 8	0.998 6	0.998 4	0.999 4	0.999 5	0.998 3	0.998 2	0.999 3	0.99 8	0.999 1	0.998 6

①Fitting coefficient (A)

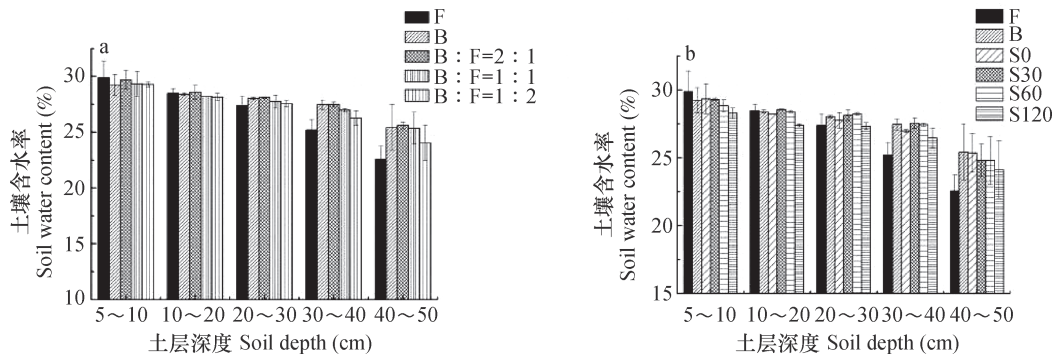


图3 间歇组合灌溉土壤含水率随土层深度的变化规律

Fig. 3 Variation of soil water content with soil depth under ICI

高于淡水灌溉。故在实际灌溉中，苗期使用间歇组合灌溉0 min、生育旺期使用间歇组合灌溉30 min进行灌溉，更有益于提高农田水资源利用效率，使大部分水分贮存在土壤有效深度内，有利于作物的吸收利用。

为了更加全面地分析间歇组合灌溉对土壤含水率的影响，引入衡量灌水质量的重要指标灌水均匀度 E_d [19-21]，计算公式如下：

$$E_d = 1 - \frac{\sum_{i=0}^N |Z_i - \bar{Z}|}{N\bar{Z}} \quad (4)$$

式中， Z_i 为各层的土壤含水率，%； \bar{Z} 为土壤含水率的平均值，%； N 为取样层数。

由表3可知，间歇组合灌溉的灌水均匀度均高于全淡水灌溉。在间歇组合灌溉模式下，灌水均匀

度与间歇时间的关系不明显，如在组合比例为1:1条件下，间歇时间由0 min提高至30 min、60 min、120 min时，均匀度基本稳定在0.96左右。灌水均匀度随着淡水所占灌水定额比例的增加而减小，造成这种现象的原因可能是，利用微咸水进行灌溉能改善土壤结构，增强土壤持水能力，但当微咸水入渗量减小时，土壤结构形成不充分，故对土壤含水率的分布情况影响不明显。

2.3 间歇组合灌溉对土壤脱盐率的影响

为了进一步研究间歇组合灌溉对土壤盐分的淋洗效果，引入土壤脱盐率来进行说明。土壤脱盐率的计算方法如下：

$$\text{脱盐率}(\%) = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100 \quad (5)$$

表3 间歇组合灌溉土壤灌水均匀度

Table 3 Irrigation uniformity under ICI

全淡水 Fresh water	间歇组合灌溉0 min			间歇组合灌溉30 min			间歇组合灌溉60 min			间歇组合灌溉120 min		
	ICI S0			ICI S30			ICI S60			ICI S120		
	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2
0.91	0.96	0.96	0.94	0.95	0.96	0.94	0.96	0.96	0.94	0.95	0.96	0.94

式中, S_1 为土壤初始含盐量, g kg^{-1} ; S_2 为灌后土壤含盐量, g kg^{-1} 。不同间歇组合灌溉模式土壤各层次的脱盐率如表4所示。

由表4可知, 对于所有处理, 在5~45 cm作物根系密集区, 土壤整体脱盐, 但间歇组合灌溉土壤脱盐率显著高于微咸水直接灌溉, 与淡水灌溉差异较小。咸淡水组合比例对土壤脱盐率的影响差异较显著, 淡水所占灌水定额比例越高, 脱盐效果越好, 越有利于为作物提供良好的土壤水盐环境。间

歇组合灌溉对各土层土壤脱盐率的显著性分析结果表明, 不同间歇时间、组合比例对土壤脱盐率的影响均达到显著水平, 说明间歇组合灌溉参数对土壤盐分的运移具有重要影响。由土壤脱盐率平均值显著性分析结果可知, 在间歇时间为0 min、120 min时, 组合比例1:1与1:2之间的差异不显著, 1:2与2:1间差异较显著; 在间歇时间为30 min、60 min时, 所有处理之间的差异均不显著; 微咸水直接灌溉条件下土壤脱盐率平均值显著低于其他处理。

表4 间歇组合灌溉模式下的土壤各层次脱盐率

Table 4 Soil desalinization rate of different depth relative to ICI mode (%)

间歇时间 ^①	组合比例 ^②	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm	40 cm	45 cm	50 cm	55 cm	脱盐率平均值 ^③
0	全淡水 ^④	72.03a	72.44a	75.47b	74.44a	76.4a	74.44b	75.39a	75.06a	66.47a	57.26a	-46.04b	73.57a
0	微咸水 ^⑤	45.79h	46.73j	45.69n	44.73l	43.74k	43.93k	41.62m	39.67l	36.09g	24.20d	-15.42a	43.11g
0	2:1	68.03d	67.08d	66.73d	65.75d	66.73c	65.69c	64.77c	48.11g	44.24d	13.88f	-131.5h	61.9cd
	1:1	68.69c	68.03c	67.72c	72.55b	62.83d	62.95d	63.24d	68.73b	39.44f	20.77e	-150.5j	63.9bc
	1:2	69.64b	70.34b	77.53a	70.71c	73.66b	74.63a	74.63b	66.11c	64.13b	37.73c	-143.2i	71.26ab
30	2:1	61.10f	59.01i	57.91k	57.86j	56.16g	54.71h	52.63gh	52.67d	34.75i	2.18h	-53.49c	54.09def
	1:1	59.99g	59.96h	58.96i	58.91h	54.76h	52.67i	54.76f	51.56e	32.74k	-4.12k	-57.62d	53.81def
	1:2	61.16f	61.06f	61.10f	58.96g	60.04e	59.01f	52.73g	44.38i	35.02hi	6.52g	-57.45d	54.82def
60	2:1	60.81f	60.74fg	58.71j	46.09k	44.31j	43.91l	43.91k	43.93i	33.48j	-4.12k	-98.78f	48.43f
	1:1	59.90g	60.88f	57.69l	58.76i	51.37i	42.92n	41.95l	41.91jk	35.41h	-24.04l	-127.0g	50.09ef
	1:2	61.89e	61.93e	61.93e	60.88e	59.87e	58.81g	52.39h	42.09j	35.44h	0.54j	-90.43e	55.03def
120	2:1	62.27e	60.6gh	54.93m	44.58m	44.6j	43.46m	44.43j	41.37k	30.94l	-55.60m	-158.7k	47.42f
	1:1	62.19e	62.02e	61.01h	59.96f	54.71h	49.46j	46.30i	45.28h	42.18e	1.58i	-141.3i	53.68def
	1:2	61.99e	61.06f	61.07g	58.98g	58.99f	61.19e	58.16e	50.89f	47.98l	38.20b	-195.7l	57.71cde

注: 同一列中不同字母表示差异显著性 ($p < 0.05$), 正值表示脱盐, 负值表示积盐 Note: Different letters in the same column mean significant difference ($p < 0.05$), and positive/negative values means desalinization/ salinization. ① Interval (min); ②Combination ratio; ③ Mean soil desalinization rate; ④ Fresh water irrigation; ⑤ Brackish water irrigation

3 讨论

利用微咸水灌溉不仅可以使作物增产, 而且可改良盐碱土壤^[22-24]。基于此, 有学者提出了集咸淡水组合灌溉模式、间歇灌溉方式、作物轮作等一体化的微咸水灌溉调控技术。咸淡水组合灌溉应用于轻度盐碱化土壤能够有效提高土壤脱盐效果, 但淡咸组合灌溉模式是最合理的入渗模式^[25]。在非盐碱化土壤, 淡淡咸组合灌溉模式有利于土壤脱盐, 而咸淡淡能够有效淋洗小麦主根区的土壤盐

分^[26]。在滨海盐土区, 由于土壤含盐量较高、有机质和速效养分含量较低, 先用咸水灌溉达到稳定状态, 再采用淡水灌溉方式淋洗, 效果最好, 其脱盐速度最快, 脱盐率最高^[27], 与本试验结果基本一致。但本试验结果与吴忠东等^[25]、米迎宾等^[26]研究结果区别较大, 产生这种差异的原因可能主要是: 与非盐碱化土壤相比, 盐碱化土壤中离子含量丰富, 与微咸水中的离子发生交换吸附作用, 使土壤结构发生改变, 改善了土壤的入渗性能。

间歇灌溉是一项新型的田间节水灌溉技术,

主要包括周期数、间歇时间等技术参数。毕远杰等^[15]探究了微咸水与淡水间歇入渗特性的差异,结果表明,随着间歇时间的增加,微咸水间歇灌溉的增渗效果变强。刘静妍等^[28]研究表明,与连续灌溉相比,间歇灌溉土壤水分分布更均匀,且间歇灌溉未从本质上改变湿润锋运移深度与累积入渗量的线性函数关系,与本试验结果基本一致。产生这种现象的主要原因可能是:①在间歇灌溉中,灌水是间断式的,土壤经受灌水湿润与停水落干的交替过程,土壤颗粒重分布,土壤表层的物理结构、性状发生改变,使土壤糙率减小,创造了新的水流界面,提高了灌水均匀性;②表层土壤容重增加,使地表形成致密层,土壤孔隙减少,导水率减小,入渗速率降低,这为节水、提高灌水效率和改善灌水质量起到了重要作用。

土壤盐分的分布易受土壤含水率、土壤结构、灌溉水质等多种因素的影响,咸淡水间歇灌溉可以改善土壤水盐环境,对作物的生长产生影响。严亚龙等^[29]研究发现,周期数对土壤盐分含量分布有一定影响,间歇时间对土壤盐分含量无显著影响,而本研究发现,在间歇组合灌溉条件下,间歇时间对土壤脱盐率的影响均达到显著水平。吴忠东和王全九^[30]研究表明,与连续灌溉相比,间歇灌溉有效降低了土壤盐分局部累积的发生,保证了土壤的可持续利用,与本研究结果基本一致。本研究还发现,间歇组合灌溉对作物根系密集区(0~45 cm)的盐分具有淋洗作用,形成低盐区,不会对作物产生盐害。同时,咸淡水组合比例对土壤脱盐率具有重要影响,淡水所占灌水定额比例越高,脱盐效果越好,越有利于为作物提供良好的土壤水盐环境。故在实际灌溉中,应根据作物的耐盐度和作物根系活动层选择合适的间歇组合灌溉参数,将土壤盐分对作物的胁迫损害降至最低。

综上所述,利用咸淡水间歇组合灌溉模式,更有利于为作物提供良好的土壤水盐环境。由于时间与条件所限,本试验仅在室内条件下进行,所得结论有一定的局限性,需要大田试验验证。为了获得盐碱地作物高产优质效果,今后应综合考虑土壤盐分、pH及土壤盐分离子等重要参考指标,全面系统地研究它们对作物产量和品质的影响。

4 结 论

室内土柱试验下,在同一入渗历时,间歇组合灌溉累积入渗量、湿润锋运移深度均大于淡水灌溉,与微咸水灌溉差异较小,且在间歇组合灌溉条件下,累积入渗量、湿润锋运移深度均随淡水份额的增加、间歇时间的减小而增大。在整个入渗过程中,湿润锋运移深度与累积入渗量呈线性关系。间歇组合灌溉能够显著提高每层土壤的含水率,且土壤含水率分布更均匀。在5~45 cm作物根系密集区,间歇组合灌溉脱盐效果更好,更能为作物提供良好的生长环境。

参 考 文 献

- [1] 刘国平. 黄河三角洲滨海盐渍土改良措施. 山东农业大学学报(社会科学版), 2009, 11(3): 68—69
Liu G P. Improvement measures of coastal saline soil in the Yellow River Delta (In Chinese). Journal of Shandong Agricultural University (Social Science Edition), 2009, 11(3): 68—69
- [2] 王洪彬. 沧州地区利用地下微咸水灌溉分析. 水科学与工程, 1998(4): 4—5
Wang H B. Analysis of underground brackish water irrigation in Cangzhou region (In Chinese). Water Sciences and Engineering Technology, 1998(4): 4—5
- [3] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用. 灌溉排水学报, 2002, 21(4): 73—77
Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 73—77
- [4] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117—126
Wang Q J, Shan Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117—126
- [5] Al-Ghamdi A A. Recycling of reverse osmosis reject streams in brackish water desalination plants using fixed bed column softener. Energy Procedia, 2017, 107: 205—211

- [6] Gebreyohannes T, Smedt F D, Walraevens K, et al. Application of a spatially distributed water balance model for assessing surface water and groundwater resources in the Geba basin, Tigray, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2013, 499: 110—123
- [7] 王全九, 毕远杰, 吴忠东. 微咸水灌溉技术与土壤水盐调控方法. *武汉大学学报(工学版)*, 2009, 42(5): 559—564
Wang Q J, Bi Y J, Wu Z D. Irrigation technique of saline water and regulation and control method of soil water and salt (In Chinese). *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(5): 559—564
- [8] 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. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 64—69, 75
Wu Z D, Wang Q J. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 64—69, 75
- [9] 苏莹, 王全九, 叶海燕, 等. 咸淡轮灌土壤水盐运移特征研究. *灌溉排水学报*, 2005, 24(1): 50—53
Su Y, Wang Q J, Ye H Y, et al. Research of soil water and salt transport feature for alternative irrigation of fresh and saline water (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(1): 50—53
- [10] 王雪, 樊贵盛. Na^+ 含量对土壤入渗能力影响的试验研究. *太原理工大学学报*, 2009, 40(4): 391—394
Wang X, Fan G S. Experimental study on the influence of sodium ion content on infiltration capability of soils (In Chinese). *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2009, 40(4): 391—394
- [11] 王文焰. 波涌灌溉试验研究与应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1994
Wang W Y. Research and application of surge irrigation experiment (In Chinese). Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1994
- [12] 邵俊昌. 间歇供水对微咸水土壤入渗与水盐分布特性的影响研究. *吉林水利*, 2015(8): 11—15
Shao J C. Study on the influence of intermittent irrigation on the characteristics of water-salt distribution (In Chinese). *Jilin Water Resources*, 2015(8): 11—15
- [13] 雪静, 王全九, 毕远杰. 微咸水间歇供水土壤入渗特征. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 14—19
Xue J, Wang Q J, Bi Y J. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 14—19
- [14] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 浑水波涌灌溉入渗机制及其Green-Ampt模型. *水利学报*, 1998(10): 45—49
Wang Z R, Wang W Y, Wang Q J, et al. The Green-Ampt model and infiltration characteristics of surge flow irrigation for muddy water (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998(10): 45—49
- [15] 毕远杰, 王全九, 雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 70—75
Bi Y J, Wang Q J, Xue J. Infiltration characteristic contrast analysis of fresh water and saline water (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 70—75
- [16] 郭元裕. 农田水利学. 第3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997
Guo Y Y. Irrigation and drainage engineering (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1997
- [17] 樊贵盛. 非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2012
Fan G S. Experimental study on water infiltration of unsaturated soil (In Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2012
- [18] 王乃江, 高佩玲, 赵连东, 等. 咸淡水分配比例对盐碱土壤水分入渗特征与脱盐效果的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 100—105
Wang N J, Gao P L, Zhao L D, et al. Influence of distribution properties between brackish and fresh water on water infiltration characteristics and desalting effect in Saline-Alkali soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 100—105
- [19] 罗春艳, 牛文全. 滴头堵塞率及堵塞位置对灌水均匀度的影响. *干旱地区农业研究*, 2014(2): 196—200
Luo C Y, Niu W Q. Influence of emitter clogged ratio and clogged location to the irrigation uniformity (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014(2): 196—200
- [20] 赵东彬, 仵峰, 宰松梅, 等. 不同灌水方式下灌水均匀度评价. *人民黄河*, 2011(3): 76—78
Zhao D B, Wu F, Zai S M, et al. Evaluation of irrigation uniformity under different irrigation patterns (In Chinese). *Yellow River*, 2011(3): 76—78
- [21] 张林, 吴普特, 范兴科, 等. 低压滴灌灌水均匀度试验研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(12): 207—212
Zhang L, Wu P T, Fan X K, et al. Experimental research on drip irrigation uniformity at low-pressure (In Chinese). *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(12): 207—212

- [22] 张越, 杨劲松, 姚荣江. 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响. 土壤学报, 2016, 53 (2): 388—400
Zhang Y, Yang J S, Yao R J. Effects of saline ice water irrigation on distribution of moisture and salt content in coastal saline soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 388—400
- [23] 韩建均, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂区水盐调控措施对土壤盐渍化的影响研究. 土壤, 2012, 44 (4): 658—664
Han J J, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of adjustment measure of water-salinity on soil salinization in the coastal area of North Jiangsu Province (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (4): 658—664
- [24] 王全九, 张继红, 谭帅. 微咸水入渗下施加PAM土壤水盐运移特性研究. 土壤学报, 2016, 53 (4): 1056—1064
Wang Q J, Zhang J H, Tan S. Effects of PAM on characteristics of water and salt movement in soil under brackish water infiltration (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (4): 1056—1064
- [25] 吴忠东, 王卫华, 张照录, 等. 咸淡组合淋洗对土壤水盐分布特征的影响. 排灌机械工程学报, 2014, 32 (12): 1085—1090
Wu Z D, Wang W H, Zhang Z L, et al. Effect of infiltrated by fresh and saline water alternately on water-salt distribution properties (In Chinese). *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32 (12): 1085—1090
- [26] 米迎宾, 屈明, 杨劲松, 等. 咸淡水轮灌对土壤盐分 and 作物产量的影响研究. 灌溉排水学报, 2010, 29 (6): 83—86
Mi Y B, Qu M, Yang J S, et al. Effects of rotational irrigation with saline water on soil salinity and crop yield (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29 (6): 83—86
- [27] 王艳, 吴勇, 廉晓娟, 等. 不同灌水方式淋洗下滨海盐土的水盐运移特征. 中国农学通报, 2012, 28 (32): 258—263
Wang Y, Wu Y, Lian X J, et al. Water and salt transporting features of coastal saline soil with leaching by different irrigation methods (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (32): 258—263
- [28] 刘静妍, 毕远杰, 孙西欢, 等. 交替供水条件下土壤入渗特性与水盐分布特征研究. 灌溉排水学报, 2015, 34 (4): 55—60
Liu J Y, Bi Y J, Sun X H, et al. Characteristics of soil infiltration and water-salt distribution under alternate irrigation (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34 (4): 55—60
- [29] 严亚龙, 毕远杰, 郭向红, 等. 微咸水间歇供水方式土壤水盐分布分析. 节水灌溉, 2015 (6): 39—42, 46
Yan Y L, Bi Y J, Guo X H, et al. Analysis on soil water and salt distribution of saline water intermittent water supply mode (In Chinese). *Water Saving Irrigation*, 2015 (6): 39—42, 46
- [30] 吴忠东, 王全九. 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响. 农业机械学报, 2010, 41 (1): 53—58
Wu Z D, Wang Q J. Effect of saline water surge flow border irrigation on soil water-salt distribution (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2010, 41 (1): 53—58

Effects of Intermittent Combined Irrigation on the Characteristics of Soil Water and Salt Movement in Farm Land of Salt-affected Soil

LIU Xiaoyuan¹ GAO Peiling^{1, 2†} YANG Daming¹ ZHANG Qingwen³ ZHANG Yuhang¹

(1 Institute of Agriculture Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

(2 Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

(3 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract 【Objective】 Researchers in the Salt Soil Laboratory of the USA (United States Department of Agriculture, 1954) and ASCE (American Society of Civil Engineers, 1990) have brought forth a series of advice aiming at ameliorating salt-affected soils. Amelioration of salt-affected soils requires for the first priority removal of excessive soluble salt. However, in actual productive application, the only method available for reducing soluble salt content in the root zone of the crop is to wash the salt off the soil with fresh

water. Owing to shortage of fresh water resources, the use of brackish water as replacement has aroused extensive attention. Reasonable exploitation of brackish water can not only improve crop production, but also ameliorate salt-affected soils. To explore characteristics of soil and water movement in the fields under intermittent combined irrigation (ICI), a lab experiment was conducted in an attempt to provide certain theoretical basis and technical support for reasonable use of brackish water in moderately salt-affected soil. **【Method】** The experimental system consisted of soil columns and Mariotte bottles. The latter was used to supply water with a constant water head of 1.5 ~ 2 cm. The one-dimension vertical water infiltration experiment was designed to have four treatments in terms of interval in intermittent irrigation, i.e. 0 min, 30 min, 60 min and 120 min and five treatments in terms of combination of the irrigation water, i.e. simple fresh water (F), simple brackish water (B), 2 : 1 (brackish and fresh water), 1 : 1 (brackish and fresh water) and 1 : 2 (brackish and fresh water). During the experiment, wetting front movement and cumulative infiltration was monitored. At the end of the experiment, soil samples were extracted at the soil extraction port as quickly as possible to avoid the effect of water redistribution inside the cylinder, and soil water content was measured with the oven-drying method and electrical conductivity of the soil solution with a conductivity meter. **【Result】** Cumulative infiltration was relatively high during the initial stage of infiltration, and dropped drastically with the experiment going on. Measurements done at the same time show that the treatments of ICI were all higher than Treatments F, but differed slightly from Treatment B in cumulative infiltration, and among the treatments of ICI, the same in quantity of water supply, cumulative infiltration increased with the ratio of brackish water. And the infiltration lasted longer when the ratio of fresh water was higher. Cumulative infiltration was in good linear relationship with wetting front movement ($R^2 > 0.99$). Determination of soil water content at the same soil depth shows that the treatments of ICI exhibited an order of ICI 2 : 1 (Brackish water : Fresh water) > ICI 1 : 1 > ICI 1 : 2, indicating that soil water content was positively related proportional to ratio of brackish water. Treatments ICI were all higher than Treatment F in irrigation uniformity, which was negatively related to ratio of fresh water. In the 5 ~ 45 cm crop root zone, soil desalinization rate was significantly higher in Treatments ICI than in Treatment B, and varied sharply between the treatments. The higher the proportion of fresh water, the higher the soil desalinization rate, the more favorable the salt-water environment for the crop to grow in. Significance tests of the effects of Treatments ICI on soil desalinization rate show that all the treatments reached significant levels, regardless of combination ratio and length of interval, indicating that the parameters of ICI have important on soil salt movement. **【Conclusion】** Intermittent combined irrigation is more conducive than other irrigation modes to the formation of a good soil water-salt environment for crops to grow. In actual productive application, a proper combination (fresh water and brackish water ratio and interval) should be designed and used in the light of crop salt tolerance and depth of the main root system active zone, so as to minimize damage of salt stress to crops.

Key words Intermittent combined irrigation; Irrigation uniformity; One-dimension vertical water infiltration experiments; Soil desalinization rate

(责任编辑: 陈荣府)