

咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响

朱瑾瑾¹, 孙军娜¹, 张振华¹, 杨润亚², 潘英华¹, 杨 懋¹

(1.鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2.鲁东大学 生命科学学院, 山东 烟台 264025)

摘 要:滨海盐碱土透水透气性差,盐分含量高,严重制约了农业生产。为寻找较优的灌溉模式,拟开展室内土柱试验,主要分析了3种矿化度水平(3 g/L, 6 g/L, 9 g/L)和两种交替次序(咸淡交替灌溉、淡咸交替灌溉)条件下,黄河三角洲地区滨海盐碱土水分入渗特征及盐分分布的变化规律。结果表明:咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的入渗历时均随咸水矿化度的增加而增大,且淡咸交替灌溉的水分入渗历时大于咸淡交替灌溉。咸淡交替灌溉(32.15%~33.29%)的平均土壤含水率和淡咸交替灌溉(32.95%~33.58%)差别并不显著。但咸淡交替灌溉(3.915~4.773 g/kg)的平均土壤含盐量小于淡咸交替灌溉(4.255~5.313 g/kg),且3 g/L的平均土壤含盐量远低于其他处理。总体来说,咸水,矿化度较小(例如,3 g/L)的咸淡交替灌溉有利于降低土壤盐分。

关键词:交替灌溉; 入渗历时; 土壤含盐量; Na^+ 含量; Cl^- 含量

中图分类号: S274.1; S273.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)05-0113-05

Effects of Alternate Irrigation with Brackish and Fresh Water on Water and Salt Movement in Coastal Saline Soil

ZHU Jinjin¹, SUN Junna¹, ZHANG Zhenhua¹, YANG Runya², PAN Yinghua¹, YANG Mao¹

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shangdong 264025, China; 2.School of Life Science, Ludong University, Yantai, Shangdong 264025, China)

Abstract: Saline soil is characterized by poor permeability and high salt content, which seriously restricts agricultural production. In this study, we investigated the effects of alternate irrigation with brackish and fresh water on water and salt movement in a coastal saline soil of the Yellow River Delta region. We conducted laboratory simulation soil column experiments and monitored changes in water infiltration and salt distribution in the soil under six irrigation treatments, including three kinds of salinity (3 g/L, 6 g/L, and 9 g/L) and two sequences (brackish-fresh water and fresh-brackish water). The results showed that the duration of water infiltration into the soil increased with the rise of salinity under brackish-fresh water and fresh-brackish water, with the higher value recorded at fresh-brackish water. There was no significant difference in the mean soil water content under the brackish-fresh water (32.15%~33.29%) and fresh-brackish water (32.95%~33.58%) irrigation treatments. However, the mean soil salt content under treatment of brackish-fresh water (3.915~4.773 g/kg) was lower than that under the treatment of fresh-brackish water (4.255~5.313 g/kg), and much lower soil salt content was observed at 3 g/L of salinity compared with other levels of salinity. From the perspective of reducing soil salt content, saline water with lower salinity (3 g/L) is the optimal strategy for alternate irrigation with brackish and fresh water in the study region.

Keywords: alternate irrigation; duration of infiltration; soil salt content; Na^+ content; Cl^- content

中国盐渍土面积约有3 600万 hm^2 ,占全国可利用土地面积的4.88%,是重要的土地资源,但开发利用较困难^[1]。特别是位于黄河三角洲地区地势低平、地下水位高、引黄灌溉、排水不畅、易受海水侵袭,造

成该地土壤盐碱化程度高,严重制约该地的经济发展^[2-3]。目前,淡水洗盐是一种较为常用的水利工程措施,但对淡水资源相对的紧缺的黄河三角洲来说,该措施会造成水资源的极大浪费^[4]。然而,黄河三角

收稿日期:2018-10-25

修回日期:2018-11-25

资助项目:国家重点研发计划子课题(2016YFC0400202-5);国家自然科学基金(41771256;41501309)

第一作者:朱瑾瑾(1994—),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事区域水土资源利用与调控研究。E-mail:jinjin2417@vip.163.com

通信作者:张振华(1971—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要研究方向:区域水土资源利用与调控研究。E-mail:zhangzh71@163.com

洲地下微咸水资源储量丰富,开发潜力较大^[5]。但微咸水中含有的 Na^+ 会改变土壤的理化性质,降低渗透性,导致土壤节皮,造成潜在盐碱化危险^[6-8]。如何科学合理的利用微咸水是黄河三角洲地区使用微咸水进行农田灌溉的关键。

微咸水灌溉主要有微咸水直接灌溉、咸淡水混合灌溉、咸淡水交替灌溉 3 种模式^[9]。Minhas 等^[10-12]通过大量的试验证明,在同样盐分的水平下,咸淡水交替灌溉的作物产量高于咸淡水混灌的产量,是一种较为适宜的灌溉方式。为寻求合理的矿化度进行咸淡水交替灌溉,避免造成土壤盐渍化危险,考虑采用不同矿化度水平(3 g/L,6 g/L,9 g/L)的咸水。吕焯等^[13]利用矿化度为 2 g/L,4 g/L 的咸水分别与淡水交替淋溶室内土柱,结果发现,咸淡水交替淋溶下土壤(粉质壤土)表层盐分逐渐下移,两种矿化度处理的土柱均出现积盐现象,且 2 g/L 的积盐量小于 4 g/L 的积盐量,土壤溶液中 Na^+ 含量, Ca^{2+} 含量的变化规律与 EC 值基本一致。但交替次序不完整,缺乏与淡咸交替淋溶的对比。

研究发现,交替次序不同,土壤盐分分布不

同^[14-15]。刘静妍等^[16]通过室内土柱试验,分析了咸(5 g/L),(1.7 g/L)水交替灌溉对土壤(黏壤土)水盐分布的影响,结果表明,咸淡交替灌溉有利于降低土壤表层的含盐量,淡咸交替灌溉有利于降低土壤中层含盐量。但其并未结合不同矿化度咸水进行灌溉。因此,现有研究欠缺矿化度和交替次序相结合的研究。

基于此,本文将采用一份咸水一份淡水进行灌溉试验,研究不同矿化度(3 g/L,6 g/L,9 g/L)和交替次序(咸淡交替灌溉、淡咸交替灌溉)下水盐再分布的变化规律,旨在为微咸水的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土样取自中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45′50″N,118°59′24″E)。采样地内植物呈斑块状分布,植物群落组成简单,以耐盐植物为主,优势种主要为盐地碱蓬、芦苇、怪柳和白茅等。2017 年 6 月,采集 0—60 cm 的土壤,去除杂质后,自然风干,碾压过 2 mm 筛备用。本研究的土样为盐碱土,基本理化性质见表 1。

表 1 供试土样的基本理化性质

土壤 质地	颗粒组成/%			田间 持水量/%	初始 含水率/%	pH	电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	总盐/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	主要离子/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			
	砂砾	粉粒	黏粒						Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
粉壤土	11.6	48.7	39.7	28.04	1.04	7.4	1.88	4.50	0.27	0.57	0.30	2.90

灌溉水质为淡水和咸水,淡水为蒸馏水,咸水由 NaCl 和蒸馏水配置而成,矿化度分别为 3 g/L,6 g/L,9 g/L。灌溉水量为 453.23 ml。根据以下公式^[17]计算得到:

$$M=HA(\theta_{\max}-\theta_0)\gamma_{\pm}/\gamma_{\text{水}} \tag{1}$$

式中: H 为土壤计划湿润层深度,取 44 cm; A 为土壤灌溉面积,取 28.26 cm^2 ; θ_{\max} 为土壤计划湿润层所允许的最大含水率(占干土重),通常为田间持水率,取 28.04%; θ_0 为土壤计划湿润层初始含水率(占干土重),取 1.04%; γ_{\pm} 为土壤容重,取 1.35 g/cm^3 ; $\gamma_{\text{水}}$ 为水的容重,取 1.00 g/cm^3 。

1.2 试验方法

试验装置由土柱和供水设备组成。土柱是由内径为 6 cm,高 2 cm 的有机玻璃圆环组装而成,共 25 个;用 4 根固定螺杆固定,底板上均匀分布 2 mm 的小孔,用以排气,管壁连接处均均匀涂抹凡士林,以避免因管壁存在孔隙对入渗产生影响。供水设备是内径为 5.4 cm,高为 60 cm 的马氏瓶。

试验土样按土壤容重为 1.35 g/cm^3 分层(2 cm)装土,共 44 cm,底部两层装填石英砂用以通气,装填完毕后,在表层放一张滤纸以避免灌水时对表土产生

冲刷,放置 12 h 后开始试验。水头控制在 1~2 cm,用秒表计时。

试验采用咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉两种方式,咸水矿化度分别为 3 g/L,6 g/L,9 g/L,共 6 个处理,每个处理设置 3 个重复试验。试验过程中,将灌水定额分两份,每份灌水量为 226.62 ml,单轮入渗结束后,立即进行下一轮灌溉。灌水结束后,放置 24 h,旨在对咸淡水交替灌溉后土壤水盐再分布的规律进行分析。每隔 4 cm 测定含盐量等指标,利用烘干法测定土壤含水率,利用电导率仪(DDS11A,上海)测定土壤浸提液电导率,利用火焰光度计测定 Na^+ ,利用硝酸银滴定法测定土壤中 Cl^- 。

1.3 数据处理

0—40 cm 土层是黄河三角洲地区植物根系生物量分布较多的区域^[18-19],因此应重点分析该范围土层的水盐变化。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:

$$y=1.857\text{EC}_{5:1}+1.011 \tag{2}$$

式中: y 为土壤含盐量(g/kg); $\text{EC}_{5:1}$ 为 24.5℃ 下水土比 5:1 的土壤浸提液电导率(mS/cm)。

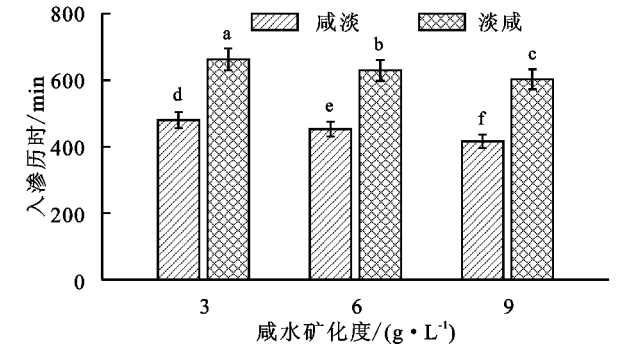
本研究采用 Microsoft Office Excel 2016 进行数

据整理,Origin 2017 进行绘图,SPSS 19.0 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)法比较不同处理间入渗历时、土壤含水率、土壤含盐量、 Na^+ 和 Cl^- 含量的差异。

2 结果与分析

2.1 咸淡水交替灌溉对盐碱土入渗历时的影响

不同矿化度和交替次序下入渗历时的变化规律如图 1 所示。咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的入渗历时均随矿化度的增大而显著减小($p<0.05$)。以咸淡交替灌溉 9 g/L 为例,咸淡交替灌溉 3 g/L 的入渗历时为 480 min,咸淡交替灌溉 9 g/L 的入渗历时减少了 15.38%($p<0.05$)。咸淡交替灌溉的入渗历时显著小于淡咸交替灌溉($p<0.05$)。尤其在矿化度 9 g/L 下,咸淡交替灌溉的入渗历时为 416 min,淡咸交替灌溉的入渗历时增加了 44.95%($p<0.05$)。



注:不同字母表示差异显著性($p<0.05$)

图 1 不同矿化度和交替次序下入渗历时的变化规律

2.2 咸淡水交替灌溉对盐碱土水分分布的影响

由表 2 可知,咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的平均土壤含水率均随矿化度的增大而减小,但差异不显著($p>0.05$)。咸淡交替灌溉的平均土壤含水率小于淡咸交替灌溉,差异不显著($p>0.05$)。

不同处理	矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	3	6	9
咸淡交替灌溉	33.29a	32.61a	32.15a
淡咸交替灌溉	33.58a	33.15a	32.95a

注:不同字母表示差异显著性($p<0.05$)。

2.3 咸淡水交替灌溉对盐碱土盐分分布的影响

2.3.1 对土壤含盐量的影响 土壤含盐量随水分入渗而向深层土壤迁移,并在土层底部聚集(图 2)。咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的平均土壤含盐量随矿化度的增加而显著增大($p<0.05$)。尤其是淡咸交替灌溉 9 g/L,淡咸交替灌溉 3 g/L 的平均土壤含盐量为 4.255 g/kg,淡咸交替灌溉 9 g/L 的平均土壤含盐量增加了 24.86%($p<0.05$,表 3)。

在 0—12 cm 土层和 36—40 cm 土层,咸淡交替灌溉的土壤含盐量小于淡咸交替灌溉。在 12—36 cm 土层,咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的土壤含盐量差异不明显(图 2)。以 0—40 cm 平均土壤含盐量为例,咸淡交替灌溉的平均土壤含盐量显著小于淡咸交替灌溉($p<0.05$)。当矿化度为 9 g/L 时,咸淡交替灌溉的平均土壤含盐量为 4.773 g/kg,淡咸交替灌溉的平均土壤含盐量增加了 11.31%($p<0.05$,表 3)。

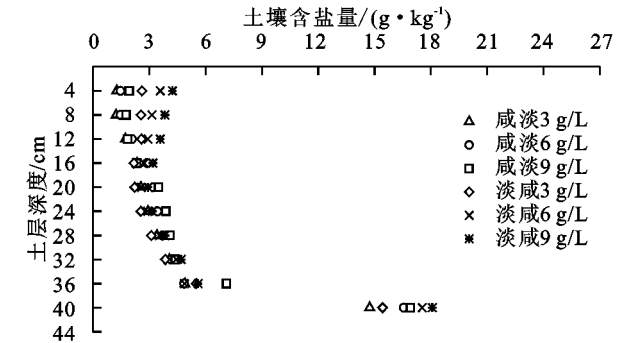


图 2 不同剖面各处理土壤含盐量分布

不同处理	矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	3	6	9
咸淡交替灌溉	3.915d	4.381c	4.773b
淡咸交替灌溉	4.255c	4.822b	5.313a

注:不同字母表示差异显著性($p<0.05$)。

2.3.2 对土壤水溶性盐的影响

(1) Na^+ 含量的变化特征。 Na^+ 含量随水分入渗而向深层土壤迁移,并在土层底部聚集(图 3)。咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的平均 Na^+ 含量均随矿化度的增加而显著增大($p<0.05$)。以咸淡交替灌溉 9 g/L 为例,咸淡交替灌溉 3 g/L 的平均 Na^+ 含量为 1.703 g/kg,咸淡交替灌溉 9 g/L 的平均 Na^+ 含量增加了 67.18%($p<0.05$,表 4)。

在 0—12 cm 土层和 36—40 cm 土层,咸淡交替灌溉的 Na^+ 含量小于淡咸交替灌溉。在 12—36 cm 土层,咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的 Na^+ 含量差异不明显(图 3)。以 0—40 cm 平均 Na^+ 含量为例,咸淡交替灌溉的平均 Na^+ 含量显著小于淡咸交替灌溉($p<0.05$)。当矿化度为 6 g/L 时,咸淡交替灌溉的 Na^+ 含量为 2.228 g/kg,淡咸交替灌溉的 Na^+ 含量增加了 22.98%($p<0.05$,表 4)。

(2) Cl^- 含量的变化特征。 Cl^- 含量随水分入渗而向深层土壤迁移,并在土层底部聚集(图 4)。咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的平均 Cl^- 含量均随矿化度的增加而显著增大($p<0.05$)。以淡咸交替灌溉 9 g/L 为例,淡咸交替灌溉 3 g/L 的平均 Cl^- 含量为 0.231 g/kg,淡咸交替灌溉 9 g/L 的平均 Cl^- 含量增加了 45.89%($p<0.05$,表 5)。

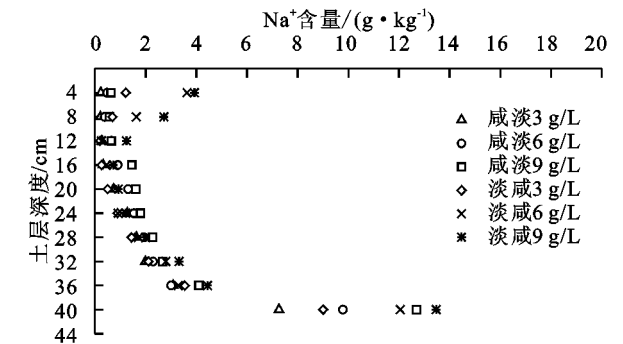


图 3 不同剖面各处理 Na⁺ 含量分布

不同处理	矿化度/(g·L ⁻¹)		
	3	6	9
咸淡交替灌溉	1.703e	2.228c	2.847b
淡咸交替灌溉	1.985d	2.740b	3.397a

注:不同字母表示差异显著性($p<0.05$)

在 0—12 cm 土层和 36—40 cm 土层,咸淡交替灌溉的 Cl⁻ 含量小于淡咸交替灌溉。在 12—36 cm 土层,咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的 Cl⁻ 含量差异不明显(图 4)。以 0—40 cm 平均 Cl⁻ 含量为例,咸淡交替灌溉的平均 Cl⁻ 含量显著小于淡咸交替灌溉($p<0.05$)。当矿化度为 9 g/L 时,咸淡交替灌溉的 Cl⁻ 含量为 0.279 g/kg,淡咸交替灌溉的 Cl⁻ 含量增加了 20.79%($p<0.05$,表 5)。

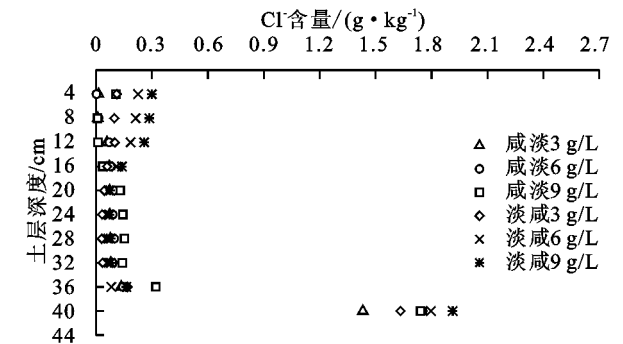


图 4 不同剖面各处理 Cl⁻ 含量分布

不同处理	矿化度/(g·L ⁻¹)		
	3	6	9
咸淡交替灌溉	0.202d	0.244c	0.279b
淡咸交替灌溉	0.231c	0.288b	0.337a

注:不同字母表示差异显著性($p<0.05$)。

3 讨论

本文针对黄河三角洲土壤盐碱化程度高展开,通过分析咸淡水交替灌溉过程中的水盐运移过程,结果发现,咸淡交替灌溉的入渗历时显著小于淡咸交替灌溉。咸淡交替灌溉与淡咸交替灌溉的平均土壤含水率差别并不显著。土壤平均土壤含盐量随矿化度的

增加而增大,3 g/L 的平均土壤含盐量最低。咸淡交替灌溉的平均土壤含盐量显著小于淡咸交替灌溉。

3.1 咸淡水交替灌溉对土壤水分的影响

研究结果显示,咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的入渗历时均随矿化度的增加而显著减小。王艳等^[20]在天津滨海新区大苏庄研究了不同矿化度水(0.56 g/L,3.78 g/L,6.14 g/L)淋洗对盐碱土(0—40 cm 为重壤土,40—60 cm 为轻黏土,60—100 cm 为中黏土)水盐分布的影响,结果也显示,入渗水的矿化度越高,入渗速率越大。但赵丽丽等^[21]在烟台农业科学研究院苹果园研究了入渗水矿化度(3 g/L,6 g/L,12 g/L,24 g/L)对土壤(粉砂黏壤土)水盐分布的影响发现,入渗速率随矿化度的增加而显著减小。与本试验结果区别较大,其原因可能与土壤类型相关。首先,与非盐碱土相比,盐碱土中含有丰富的离子,其与微咸水中的盐分离子产生交换作用,使土壤胶体吸附的钠离子被钙镁离子置换,改善了土壤团聚性并导致土壤中的大孔隙增加,进而增强土壤的入渗能力^[22]。其次,在微咸水灌溉过程中,随着矿化度增加,带入土壤中的钠离子含量进一步增加,由于电荷少,半径大,水化能相对较小,钠离子增加导致土壤颗粒的膨胀分散,使土壤的透水透气性变差^[23]。

咸淡交替灌溉的入渗历时显著小于淡咸交替灌溉。咸淡交替灌溉导致土壤中大孔隙的增多,使土壤通透性增强,水分入渗较快^[24]。而淡咸交替灌溉有利于土壤有效孔隙的形成,使水分保持在土壤孔隙中,无法继续使入渗水保持快速的流动^[25],故咸淡交替灌溉的入渗历时比淡咸交替灌溉短。

咸淡交替灌溉与淡咸交替灌溉的平均土壤含水率差别不显著。其原因可能是咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的灌溉水量、灌溉水质、土壤初始含水率、土壤类型都相同,水分入渗结束后,土壤含水率差别不大。此外,短时间(24 h)内蒸发作用对水分再分布的影响较小,不足以改变土壤含水率的大小。

3.2 咸淡水交替灌溉对土壤盐分的影响

咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉的平均土壤含盐量、平均 Na⁺ 含量和平均 Cl⁻ 含量均随矿化度的增加而显著增大。杨艳和王全九^[26]也表明土壤(砂质黏壤土)的剖面含盐量随着矿化度的增加而增加。其原因,一方面是由于微咸水本身含有一定盐分,入渗后,必然会给土壤带来额外的盐分累积,因此随着矿化度增加,土壤整体的含盐量也随之升高^[27]。另一方面,与低矿化度水相比,高矿化度水对土壤盐分的淋洗作用相对较小,脱盐率较低,土壤含盐量高^[28]。土壤含盐量随入渗水的显著变化表明,控制好灌溉水的矿化度对于作物正常生长至关重要。

咸淡交替灌溉的平均土壤含盐量显著小于淡咸

交替灌溉,平均 Na^+ 含量和平均 Cl^- 含量显著小于淡咸交替灌溉,其原因可能是首轮微咸水灌溉下,扩散双电子层向黏粒表面压缩,使土壤颗粒排除力降低,增强土壤胶体的絮凝作用,从而形成团粒结构,增加土壤导水能力,有利于后一次淡水灌溉对土壤盐分的淋洗^[29]。交替次序对土壤平均含盐量的影响较大。例如刘静妍等^[16]在山西省水利科学研究院节水高效示范基地对比了咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉(咸水矿化度为 5.02 g/L,淡水矿化度为 1.75 g/L)对土壤(黏壤土)含盐量的影响,结果表明,咸淡交替灌溉显著降低了表层土壤的含盐量,淡咸交替灌溉降低了土壤中层含盐量。苏莹等^[24]在河北省南皮县通过对比咸淡交替灌溉和淡咸交替灌溉(咸水矿化度为 3 g/L,淡水矿化度为 0.5 g/L)对土壤(次生碱化土)脱盐率的影响发现,在灌水量和灌溉水质相同的情况下,淡咸交替灌溉变为咸淡交替灌溉可以提高土壤脱盐率。

4 结论

咸淡水交替灌溉的入渗历时随矿化度的增加而减小;不同交替次序下土壤入渗历时表现为咸淡交替灌溉小于淡咸交替灌溉,咸淡交替灌溉与淡咸交替灌溉的平均土壤含水率差别不显著。咸淡水交替灌溉的平均土壤含盐量随咸水矿化度的增加而增大,咸淡交替灌溉的平均土壤含盐量小于淡咸交替灌溉。因此,从降低土壤盐分方面考虑,矿化度较小(例如 3 g/L),咸淡交替灌溉的方式最优。由于时间和条件有限,试验仅在室内进行,所得结论具有一定局限性,还需进一步在大田验证,以及综合考虑对作物的影响。在具体利用微咸水进行农田灌溉时,应考虑微咸水矿化度、交替次序、间歇时间、灌溉频次以及作物不同生育阶段抗盐胁迫能力等。

参考文献:

- [1] 李建国,濮励杰,朱明,等.土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J].地理学报,2012,67(9):1233-1245.
- [2] Guan B, Yu J, Hou A, et al. The ecological adaptability of *Phragmites australis* to interactive effects of water level and salt stress in the Yellow River Delta [J]. *Aquatic Ecology*, 2016,51(1):107-116.
- [3] Luo X, Liu G, Xia Y, et al. Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016,17(3):780-789.
- [4] 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[J].土壤学报,2016,53(2):388-400.
- [5] Xie T, Liu X, Sun T. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China[J]. *Eco-*

logical Modelling, 2011,222(2):241-252.

- [6] Kunhikrishnan A, Bolan N S, Karin Müller, et al. The influence of wastewater irrigation on the transformation and bioavailability of heavy metals (loid) in soil [J]. *Advances in Agronomy*, 2012,115(21):215-297.
- [7] Tavakkoli E, Fatehi F, Coventry S, et al. Additive effects of Na^+ and Cl^- ions on barley growth under salinity stress [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62 (6): 2189-2203.
- [8] 胡节,吴新亮,蔡崇法.快速湿润过程中钾和钙离子浓度对土壤团聚体稳定性的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):175-182.
- [9] Malash N, Flowers T J, Ragab R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production[J]. *Agricultural Water Management*, 2005,78(1/2):25-38.
- [10] Minhas P S. Saline water management for irrigation in India[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 30 (1):10-24.
- [11] Minhas P S, Singh Y P, Chhabba D S, et al. Changes in hydraulic conductivity of soils varying in calcite content under cycles of irrigation with saline-sodic and simulated rain water[J]. *Irrigation Science*, 1999, 18 (4):199-203.
- [12] Minhas P S, Bajwa M S. Use and management of poor quality waters for the rice-wheat based production system [J]. *Journal of Crop Production*, 2001,4(1):273-306.
- [13] 吕烨,杨培岭,管孝艳,等.咸淡水交替淋溶下土壤盐分运移试验[J].水利水电科技进展,2007,27(6):90-93.
- [14] 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].农业机械学报,2017,48(10):220-228,201.
- [15] 管孝艳,杨培岭,吕烨.咸淡水交替灌溉下土壤盐分再分布规律的室内试验研究[J].农业工程学报,2007,23(5):88-91.
- [16] 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[J].灌溉排水学报,2015,34(4):55-60.
- [17] 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[J].水土保持学报,2016,30(6):100-105.
- [18] 宋香静,李胜男,韦玮,等.黄河三角洲怪柳根系分布特征及其影响因素[J].湿地科学,2017,15(5):716-723.
- [19] 白世红,丁新景,马风云,等.黄河三角洲盐碱地人工刺槐混交林细根分布研究[J].中国生态农业学报,2018,26(1):116-124.
- [20] 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.
- [21] 赵丽丽,张振华,李陆生.滨海盐渍土和棕壤咸水入渗特征分析[J].水土保持通报,2013,33(3):44-48,117.

(下转第 122 页)

上迁移,使上层土壤全磷含量显著高于下层土壤中的含量。在林地土壤中,处于腐解过程中的凋落林冠叶片和表层土壤中的可溶性磷,水分入渗的作用下,向亚表层土壤中迁移,使亚表层土壤全磷含量提高。

参考文献:

- [1] Weihrauch C, Opp C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far[J]. *Geoderma*, 2018,325:183-194.
- [2] Zhou Q, Daryanto S, Xin Z, et al. Soil phosphorus budget in global grasslands and implications for management[J]. *Journal of Arid Environments*, 2017,144:224-235.
- [3] Dodd R J, Sharpley A N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015,105:282-293.
- [4] Childers D L, Doren R F, Jones R, et al. Decadal Change in Vegetation and Soil Phosphorus Pattern across the Everglades Landscape[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003,32(1):344-362.
- [5] 杨文治,余存祖.黄土高原区域治理与评价[M].北京:科学出版社,1992.
- [6] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.土壤肥实质的研究.Ⅰ黑土[J]. *土壤学报*,1984,21(3):229-237.
- [7] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.土壤肥实质的研究.Ⅱ棕壤[J]. *土壤学报*,1985,22(2):113-119.
- [8] 周礼恺,严昶升,武冠云.土壤肥实质的研究.Ⅲ红壤[J]. *土壤学报*,1986,23(3):193-203.
- [9] 邱凤琼,严昶升,陈恩凤.土壤肥实质的研究.Ⅳ水稻土[J]. *土壤学报*,1986,23(3):193-203.
- [10] Milic, S, Ninkov J, Zeremski, T, et al. Soil fertility and phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a long-term field experiment[J]. *Geoderma*, 2019,339:9-19.
- [11] Garland G, Bünemann E. K, Oberson A, et al. Phosphorus cycling within soil aggregate fractions of a highly weathered tropical soil: A conceptual model[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,116:91-98.
- [12] Turron M B, Teresa B, Francisco L, et al. Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:374-382.
- [13] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥性能及其组成比例在平均土壤肥力中的作用[J]. *土壤学报*,1994,31(1):18-28.
- [14] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.土壤的自动调节性能与抗逆性能[J]. *土壤学报*,1991,28(2):168-176.
- [15] 陈恩凤.土壤肥力物质基础及其调控[M].北京:科学出版社,1990.
- [16] 汪景宽,张继宏,张旭东,等.不同肥力棕壤各粒级团聚体中氮素状况的研究[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1999.
- [17] 汪景宽,张继宏,王雷,等.棕壤不同粒级微团聚体中磷素的保持与供应[J]. *土壤通报*,2001,32(3):113-115.
- [18] 王佑民,刘秉正著.黄土高原防护林生态特征[M].北京:中国林业出版社,1994.
- [19] 裴海昆,朱志红,乔有明.不同草甸植被类型下土壤腐殖质及有机磷类型探讨[J]. *草业学报*,2001,10(4):18-23.
- [20] 王百群,吴金水,赵世伟.子午岭林区植被类型对土壤氮素的效应[J]. *水土保持通报*,2002,22(6):23-25.
- [21] 严昶升.土壤肥力研究法[M].北京:中国农业出版社,1988.
- [22] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [22] Li Z, Liu X, Zhang X, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content[J]. *Agricultural Water Management*, 2008,95(4):498-502.
- [23] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. *农业机械学报*,2015,46(12):117-126.
- [24] 苏莹,王全九,叶海燕,等.咸淡轮灌土壤水盐运移特征研究[J]. *灌溉排水学报*,2005,24(1):50-53.
- [25] Beesley L, Eduardo Moreno-Jiménez, Clemente R, et al. Mobility of arsenic, cadmium and zinc in a multi-element contaminated soil profile assessed by in-situ soil pore water sampling, column leaching and sequential extraction[J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(1):155-160.
- [26] 杨艳,王全九.微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J]. *水土保持学报*,2008,22(1):13-19.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Gawad G A, Arslan A, Gaihbe A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999—2002) [J]. *Agricultural Water Management*, 2005,78(1/2):39-53.

(上接第 117 页)