

DOI: 10.11766/trxb201906180279

李慧, 林青, 徐绍辉. 咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 656–666.

LI Hui, LIN Qing, XU Shaohui. Effect of Infiltration of Saline Water/Brackish Water on Soil Permeability and Transport of Salt Cations in the Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (3): 656–666.

咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响*

李 慧, 林 青, 徐绍辉[†]

(青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071)

摘 要: 在淡水资源短缺的干旱、半干旱及滨海地区, 地下微咸水/咸水资源较为丰富。为保障粮食安全和农业可持续发展, 需利用微咸水/咸水进行合理灌溉, 以缓解淡水资源短缺状况。与此同时, 微咸水/咸水灌溉入渗, 会引起土壤物理、化学及生物等性质的变化。通过室内土柱出流试验, 探讨了灌溉水盐分种类和浓度对土壤渗透性能及盐分阳离子运移的影响。选用灌溉水盐分种类为 NaCl、MgCl₂、CaCl₂, 浓度为 3 g·L⁻¹、5 g·L⁻¹ (代表微咸水)、10 g·L⁻¹ (代表咸水)。结果表明: 土壤对微咸水与咸水的响应机理基本一致, Na⁺在土壤中的迁移会导致土壤渗透性的降低; Ca²⁺、Mg²⁺在土壤中的迁移会提高土壤的渗透性; 且三种离子对表层土壤的影响均大于下层土壤。土壤相对渗透系数 K/K_0 (K 为各时刻计算所得的渗透系数, K_0 为初始渗透系数) 减小程度与 Na⁺浓度成正比; Ca²⁺、Mg²⁺对土壤渗透性能的影响相似, 土壤相对渗透系数增加的程度与 Ca²⁺、Mg²⁺浓度成反比, 其中 Ca²⁺对提升土壤渗透性的能力强于 Mg²⁺; 不同条件下土柱整体相对渗透系数与时间及离子浓度均成二次方相关关系; 在 NaCl 溶液入渗过程中, 土壤中被置换出来的 Ca²⁺、Mg²⁺含量随着 NaCl 溶液浓度的升高而增加, 而且随着入渗深度的增加而增大; 土壤含盐量取决于入渗水的种类和浓度, 在灌溉过程中容易发生土壤积盐的情况, 入渗溶液浓度越高, 积盐越严重。研究结果对合理开发利用咸水/微咸水灌溉具有一定指导意义。

关键词: 咸水灌溉; 盐分; 渗透系数; 迁移; 离子沉积

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Effect of Infiltration of Saline Water/Brackish Water on Soil Permeability and Transport of Salt Cations in the Soil

LI Hui, LIN Qing, XU Shaohui[†]

(College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: 【Objective】 In the arid, semi-arid and coastal regions where freshwater resources are scarce, while underground brackish water/saline water resources are abundant. In order to ensure food security and sustainable development of the agriculture development, it is necessary to use brackish water/saline water for reasonable irrigation to alleviate the pressure of shortage of freshwater resources. However, the use of brackish water/saline water for irrigation will certainly cause accumulation of salts in the soil, and trigger secondary salinization of the soil, thus affecting growth of the crops therein. Moreover, it will also

* 国家自然科学基金项目 (41571214, 41807010) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571214, 41807010)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shhxu@qdu.edu.cn

作者简介: 李 慧(1995—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事地下环境中水流和溶质运移及模拟研究。E-mail: lihuiqdu@163.com

收稿日期: 2019-06-18; 收到修改稿日期: 2019-09-11; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-10-29

alter chemical composition of the soil solution and stability of the soil structure, leading to degradation of soil physical properties and change in chemical reaction in the soil. 【Method】 In this paper, an indoor soil column percolation experiment was conducted to investigate effects of the salts in irrigation water, relative to kind and concentration, on permeability of and transport of salt cations in the soil. In the experiment, to prepare soil columns, plexiglass cylinders, 40 cm in height and 6 cm in diameter, were used, and for irrigation water containing NaCl, MgCl₂ and CaCl₂, separately, at 3, 5 g·L⁻¹ (as brackish water) and 10 g·L⁻¹ (saline water). A total of 9 treatments were designed, and each had two replicates. 【Result】 It was found that soil relative permeability coefficient K/K_0 (K stands for permeability coefficient calculated at each time, and K_0 for initial permeability coefficient) decreased with the increasing of Na⁺ concentration, and permeability declined faster in the topsoil than in the lower soil layers; and Ca²⁺ and Mg²⁺ behaved similarly during the process of infiltration, that is, both increasing soil permeability by a rate rising with the increase in Ca²⁺ and Mg²⁺ concentration and in soil depth. The effect of Ca²⁺ was more significant than that of Mg²⁺. Relative permeability coefficient of the whole soil column was in quadratic relationship with time and ion concentration. In terms of conductivity of soil effluent, the treatments followed an order NaCl > CaCl₂ > MgCl₂, while in terms of pH, an order of NaCl > MgCl₂ > CaCl₂. In the columns treated with NaCl solution, both Ca²⁺ and Mg²⁺ increased in the soil with rising NaCl concentration in the solution and soil depth. 【Conclusion】 Na⁺ migration in the soil will lead to decrease in soil permeability; while Ca²⁺ and Mg²⁺ migration in the soil does reversely; and the effects of the three ions are more significant in the surface soil layer than in the lower layers. Salt content in the soil depends on kind and concentration of the infiltration water. Irrigation with saline/brackish water tends to lead to accumulation of salts in the soil. The higher the salt concentration in the irrigation water, the higher the salt accumulation. When using saline/brackish water for irrigation, it is advisable to arrange irrigation reasonably in the light of water quality and properties of the soil to be irrigated, coupled timely with certain soil amelioration measures, when necessary, so as to avoid any adverse impacts of the irrigation on soil permeability and crop growth.

Key words: Salt water irrigation; Salt; Permeability coefficient; Migration; Ion deposition

随着社会经济的快速发展, 干旱半干旱地区面临着严峻的水资源短缺问题, 咸水、微咸水的开发利用为灌溉农业的可持续发展提供了潜在的水源^[1]。微咸水一般指矿化度为 2~5 g·L⁻¹ 的含盐水, 其下限值有时确定在 1 g·L⁻¹^[2], 上限值在实际应用中会有一定程度扩展至 6 g·L⁻¹^[3]。咸水多指 5~10 g·L⁻¹ 的含盐水, 10~50 g·L⁻¹ 多指为盐水^[4]。中国微咸水资源分布广泛, 尤其在易发生干旱的华北和西北以及沿海地带, 广泛分布着矿化度为 2~5 g·L⁻¹ 的微咸水资源^[5]。已有研究表明, 春旱时土壤溶液浓度一般达到 14 g·L⁻¹, 极端情况下甚至可以达到 30~80 g·L⁻¹, 用矿化度 3 g·L⁻¹ 的微咸水灌溉后, 土壤溶液浓度可下降至 6~10 g·L⁻¹^[6]。微咸水灌溉不仅会引起盐分在土壤中的累积, 产生土壤次生盐碱化, 影响作物生长; 而且也会造成土壤溶液化学成分和土壤结构稳定性的变化, 导致土壤物理性能退化, 影响作物根系的延伸、降雨或灌溉水在土壤中的运动、盐分的淋洗效果、透气性以及土壤中的化学反应等。已有诸多学者探讨了微咸水灌溉对作物的生长、产量及对土壤次生盐碱化等的影响^[7-16]。然而

咸水/微咸水灌溉入渗对土壤渗透性能影响的研究相对较少, 且已有的研究大多关注较低浓度盐分入渗对土壤渗透性能的作用机理, 如李法虎等^[17]通过低浓度盐分入渗试验认为非碱土中稳定饱和水力传导度随着灌溉水盐浓度的增加而减小, 在碱土中与之相反。Bhardwaj 等^[18]研究发现用处理过的含少量盐的废水灌溉后, 土壤水力传导性及团聚体稳定性高于含盐河水及中度含盐水的处理, 且三者均低于未处理的样品。Shang 等^[19]模拟灌溉处理后废水和盐碱溶液的试验, 结果显示灌溉水类型和溶液中钠离子浓度决定了土壤饱和导水率 (K_0), 但灌溉频率不影响土壤 K_0 , 模拟灌溉土壤 2 年 K_0 减少幅度小于 1 年。唐胜强和余冬立^[20]采用 1 g·L⁻¹ 的微咸水进行一维降水头积水入渗试验, 发现微咸水可增加粉砂土与壤土的饱和导水率。盛丰等^[21]研究发现适宜的盐分浓度有利于提高土壤团聚体的稳定性、抑制土壤板结、改善土壤入渗性能。

当用高浓度盐分(微咸水/咸水)灌溉时, 它们会对土壤渗透性能产生怎样的影响, 值得进行深入分析。在此基础上, 土壤渗透性能的变化又会如何

控制盐分阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的运移过程, 更是一个亟待解决的科学问题, 类似研究尚未见文献报道。为了揭示较高浓度盐分入渗时常见阳离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 对土壤渗透性和运移特征的作用机理, 本文开展不同浓度、不同盐分溶液入渗的室内土柱实验, 以期为咸水/微咸水灌溉地区土壤物理化学性能维护和作物健康生长提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

土样取自青岛市即墨区农田 0~30 cm 表层土壤, 其理化性质如表 1 所示, 按照土水比 1:5 获得的土壤浸提液电导率为 $0.16 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。本研究中使用的主要实验仪器有: 电子天平 (FR224CN 型, 奥豪斯仪器有限公司)、pH 计 (HS-3C 型, 上海精科仪器有限公司)、ORP 电极 (连接到 pH 计上使用)、电导率仪 (雷磁 DDB-303A, 上海精科仪器有限公司)、

电感耦合等离子发射光谱仪 (ICP, Optima 8000 型, PerkinElmer 公司) 以及有机玻璃土柱 (高 40 cm, 内径 6 cm)。

1.2 土柱填装及试验方法

在直径 6 cm、高 40 cm 的有机玻璃土柱底部铺设 2 cm 厚的纯净石英砂, 将风干、研磨后的土样过 2 mm 的筛子, 然后以给定土壤容重 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 分层均匀地装进有机玻璃柱内, 为防止土壤颗粒堵塞出水口, 在土柱的出水口处添加一层定性滤纸, 使液体均匀地流出土柱, 装填完成后的土样高 30 cm, 试验使用两套实验装置, 进行两组重复试验。土柱侧面布设 5 个测压管, 用硅胶管与测压板相连, 各相邻测压管间距 6 cm, 土柱另一侧高度方向设置 4 个取样孔, 分别在沿土柱高度方向的 8 cm、16 cm、22 cm、28 cm 处 (由上往下)。有机玻璃柱的上端控制水头装置由溢流口充当, 下端也有一水头控制装置, 固定在实验支架上; 在土柱底部安装一出水管连接下端控水头装置, 用作排水, 试验过程中土柱上下端始终保持 10 cm 的水头差。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土壤质地 Soil texture	粒径分布 Particle size distribution / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			pH	有机质 Organic matter / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	阳离子交换量 CEC / ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Eh /mV
	<2 μm	2~50 μm	50~200 μm				
砂质壤土 ^①	7.52	36.80	55.69	6.51	8.52	10.23	444
土壤盐分离子含量 Content of salt ions in soil / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)							
EC / ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-
0.16	0.06	0.02	0.06	0.19	0.48	0.06	0.05

注: EC, 土壤浸提液电导率。Note: EC, Electrical conductivity of soil extract. ① Sandy loam.

试验开始阶段, 先从底部由下而上, 用去离子水饱和土柱 24 h, 然后转换方向由上而下继续饱和土柱, 以更好地排除土柱中的气泡, 饱和土壤, 待测压管中的读数稳定后, 分别输入 3、5、10 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 、 MgCl_2 、 CaCl_2 盐溶液, 共 9 种处理, 直至出流液的阳离子浓度不再发生变化后停止试验。试验过程中每隔 3 小时记录各测压管中的水头高度 h 和出流量 Q , 同时收集侧边及底部出流液水样, 测定出流液中的盐分阳离子浓度及 pH 和电导率 (EC) 值。实验装置如图 1 所示。

土壤的渗透系数 K 根据达西定律, 按下式计算:

$$K = \frac{4Q \times \Delta x}{\pi d^2 \times \Delta h} \quad (1)$$

式中, Q 为出水口流量, $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$; x 为任意两测压管之间的距离, cm; d 为土柱的直径, cm; h 为两测压管之间的水头差, cm。

本文采用相对渗透系数来描述渗透性的变化, 相对渗透系数为实测渗透系数 K 与初始渗透系数 K_0 之比, K/K_0 越小, 说明渗透性能降低程度较大。将土柱从上到下分为 A (4~10 cm)、B (10~16 cm)、C (16~22 cm)、D (22~28 cm) 四段。



图 1 实验装置图

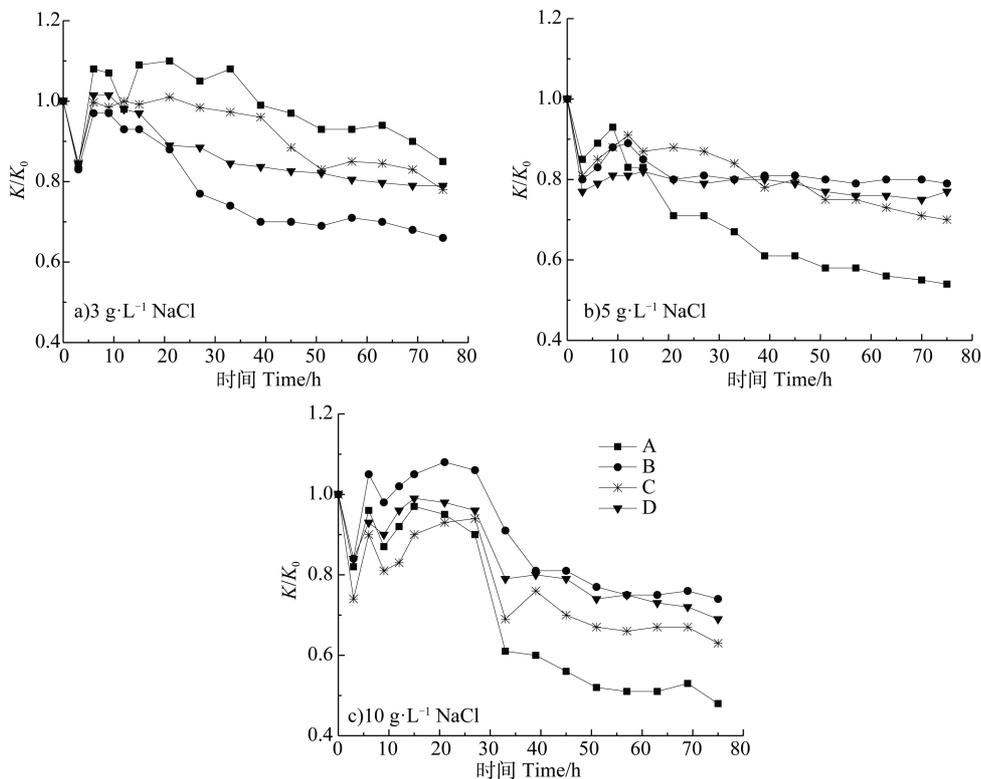
Fig. 1 Scheme of the experimental device

2 结果与讨论

2.1 不同入渗处理土柱各层段渗透性能变化

2.1.1 不同浓度 Na⁺溶液对土壤渗透性能影响

3、5 和 10 g·L⁻¹ NaCl 溶液入渗时土壤各层(4~10 cm、10~16 cm、16~22 cm、22~28 cm 即 A、B、C、D 四段)渗透性能随时间变化过程如图 2 所示。在入渗的初始阶段,输入 3、5 和 10 g·L⁻¹ NaCl 溶液土壤相对渗透系数分别降为初始值的 0.83%~0.85%、0.77%~0.85%和 0.74%~0.84%,这说明在入渗初始阶段 Na⁺浓度越高,对土壤渗透性降低影响越大。持续输入溶液 3 h 后,三种不同浓度 NaCl 溶液情况下土柱各段的渗透性能均开始回升,这主要是土壤中交换性 Na⁺置换出土壤中的 Ca²⁺、Mg²⁺使得土壤孔隙增加。随着入渗试验持续进行,土柱各层段的渗透系数开始缓慢下降,且逐渐趋于稳定。至试验结束时,输入 3、5、10 g·L⁻¹ NaCl 溶液土柱 A 段的渗透系数分别降为初始值的 90%、55%、50%; B 段的渗透系数分别降为初始值的 70%、80%、75%; C 段的渗透系数分别降为初始值的 83%、73%、67%; D 段的渗透系数分别降为初始值的 80%、76%、72%。由此可以看出,输入不同浓度 NaCl 溶液,



注: K/K_0 表示相对渗透系数; A、B、C、D 分别表示土柱 4~10 cm、10~16 cm、16~22 cm、22~28 cm。下同。Note: K/K_0 represents relative permeability coefficient; A, B, C and D stands for soil section of 4~10 cm, 10~16 cm, 16~22 cm and 22~28 cm, respectively. The same below.

图 2 不同浓度 NaCl 溶液入渗时土柱各段渗透性变化

Fig. 2 Variation of permeability of NaCl solution with section of the soil column relative to concentrations of the solution

土柱各段渗透系数整体上呈下降趋势; NaCl 溶液浓度越高, 入渗结束时土柱各段相对渗透系数减小得越多。这说明 Na^+ 浓度越高, 土壤渗透性降低就越大, 且随着 Na^+ 浓度增大, 其对表层土壤渗透性的影响程度大于下层。

一般认为土壤渗透性能的大小与土壤中 Na^+ 数量、黏粒的迁移沉积密切相关。 Na^+ 数量越多, 使土壤中部分交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 被交换性 Na^+ 取代, 交换性 Na^+ 增多容易引起土壤分散、膨胀, 破坏土壤团聚体的稳定性^[21], 使土壤孔隙减小, 出现土壤板结与渗透性差的现象, 因此, 随着 NaCl 溶液入渗的进程, 土壤的渗透性能降低。图 2 中 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液入渗过程中, 土柱 A 段的渗透系数在 6~30 h 出现了渗透性能大于初始值的现象, 这主要是适宜浓度的 NaCl ($3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 利于抑制土壤黏粒的分散, 促进土壤颗粒絮凝, 使渗透性能增大^[22]; 由于持续地输入 Na^+ , 30 h 之后土壤的渗透性能主要受 Na^+ 的影响, 渗透性能逐步减小。而 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液入渗时, B 段渗透性能大于初始值, 这可能是由于土壤中交换出大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 使得孔隙暂时性的增加, 今后会继续进行试验, 探讨 B 段渗透性增加的原因。有研究指出土壤中黏粒随水流一起迁移运动时, 使渗透性有可能增大 (黏粒的迁移使土壤孔隙增大), 也有可能降低 (黏粒堵塞孔喉)^[23], 对于土柱中不同层段的渗透性降低程度的不同, 可以用黏粒的运动来解释, 黏粒除了受范德华力之外, 还受自身重力的影响向下运动, 高浓度 (5 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 NaCl 溶液下 A 段因强烈的吸附作用使 Na^+ 数量增加, 黏粒也因为较大的范德华力相互之间发生碰撞、挤压形成较大体积的胶团, 难以向下运动, 而其余三段, 土壤中的黏粒在受自身重力向下运动时, 在整体渗透性能降低的前提下, B 段渗透性能降低的程度最小, C 段的渗透性能降低最大。而在较低浓度 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液入渗时, 因 Na^+ 浓度较低, 表层土壤中黏粒因自身重力向下迁移较多, 使 B 段的渗透性能降低较为严重。

2.1.2 不同浓度 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 溶液对土壤渗透性能影响 3 、 5 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 、 MgCl_2 溶液入渗时土柱各段的相对渗透系数随入渗时间的变化见图 3。由图中可以看出, 土柱各段相对渗透系数随着 CaCl_2 、 MgCl_2 溶液的不断注入整体上呈上升趋势,

且随着 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度增加, 上升趋势减缓。这主要是土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度的增加, 使扩散双电子层向黏粒表面压缩, 土壤颗粒之间的排斥力降低, 土壤中颗粒较小的粒子粘结到一起形成较大的土壤团聚体, 利于土壤中颗粒的凝聚, 使土壤中孔隙增加, 渗透性增强, 在某种程度上有利于土壤的透水和透气能力^[24-25]。

3 、 5 和 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液入渗至试验结束时, 土柱各层相对渗透系数由上到下 (四层段) 分别增大至初始值的 1.61 倍、1.58 倍、1.55 倍和 1.48 倍 ($3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 1.51 倍、1.38 倍、1.31 倍和 1.27 倍 ($5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 1.32 倍、1.31 倍、1.30 倍和 1.27 倍 ($10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)。由此可见, 随着 CaCl_2 溶液的不断注入, 表层土壤的渗透性能的增加大于底层土壤, 且随着 Ca^{2+} 浓度的增加, 土柱各段的渗透性能增加的趋势减小。这是由于 Ca^{2+} 入渗过程中, 表层土壤置换出来的 Na^+ 随入渗溶液向下迁移, 使表层土壤渗透性能大于下部土壤, Ca^{2+} 浓度越大, 置换出来的 Na^+ 越多, 向下迁移的 Na^+ 越多, 故入渗溶液中 Ca^{2+} 浓度越大, 提升渗透性的能力越差。 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 溶液入渗至结束时, 土柱各层相对渗透系数由上到下分别增加为初始值的 1.48 倍、1.38 倍、1.42 倍、1.34 倍, 相对渗透系数由上往下依次减小, 且由图 3 可以看出, B、C 段在整个过程中增加的趋势几乎相似, 差距较小; 5 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 溶液入渗至结束时, 土柱各层相对渗透系数由上到下分别增加为初始值的 1.45 倍、1.49 倍、1.40 倍、1.47 倍 ($5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 1.23 倍、1.28 倍、1.12 倍、1.22 倍 ($10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 相对渗透系数由大到小依次为 B、D、A、C 段。有研究^[26]指出, 较大的 Mg^{2+} 水合数会导致黏土夹层和双电子层的膨胀, 这将不可避免地增加黏土的膨胀和分散, 而 Ca^{2+} 由于较小的水合数较 Mg^{2+} 更易于絮凝。另有研究^[27]证明 Mg^{2+} 对土壤黏粒弥散的促进效应大约是 Na^+ 的 5%, 这可能是导致图中 5 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 高浓度 Mg 溶液入渗过程中 A 段渗透性能增加程度较小的原因。部分弥散的黏土颗粒随灌溉水的剪切力和自身重力的作用向下运动, 在 C 段积聚, 从而导致 C 段的渗透性能升高的最小。而由于土壤黏粒对 Ca^{2+} 的吸附选择性大于 Mg^{2+} , 因此, 相同条件下 Mg^{2+} 系统中将有更多的可交换 Na^+ 存在于黏粒表面, 使得整体上 Mg^{2+} 入渗对土壤渗透性能的提升作用小于 Ca^{2+} 。

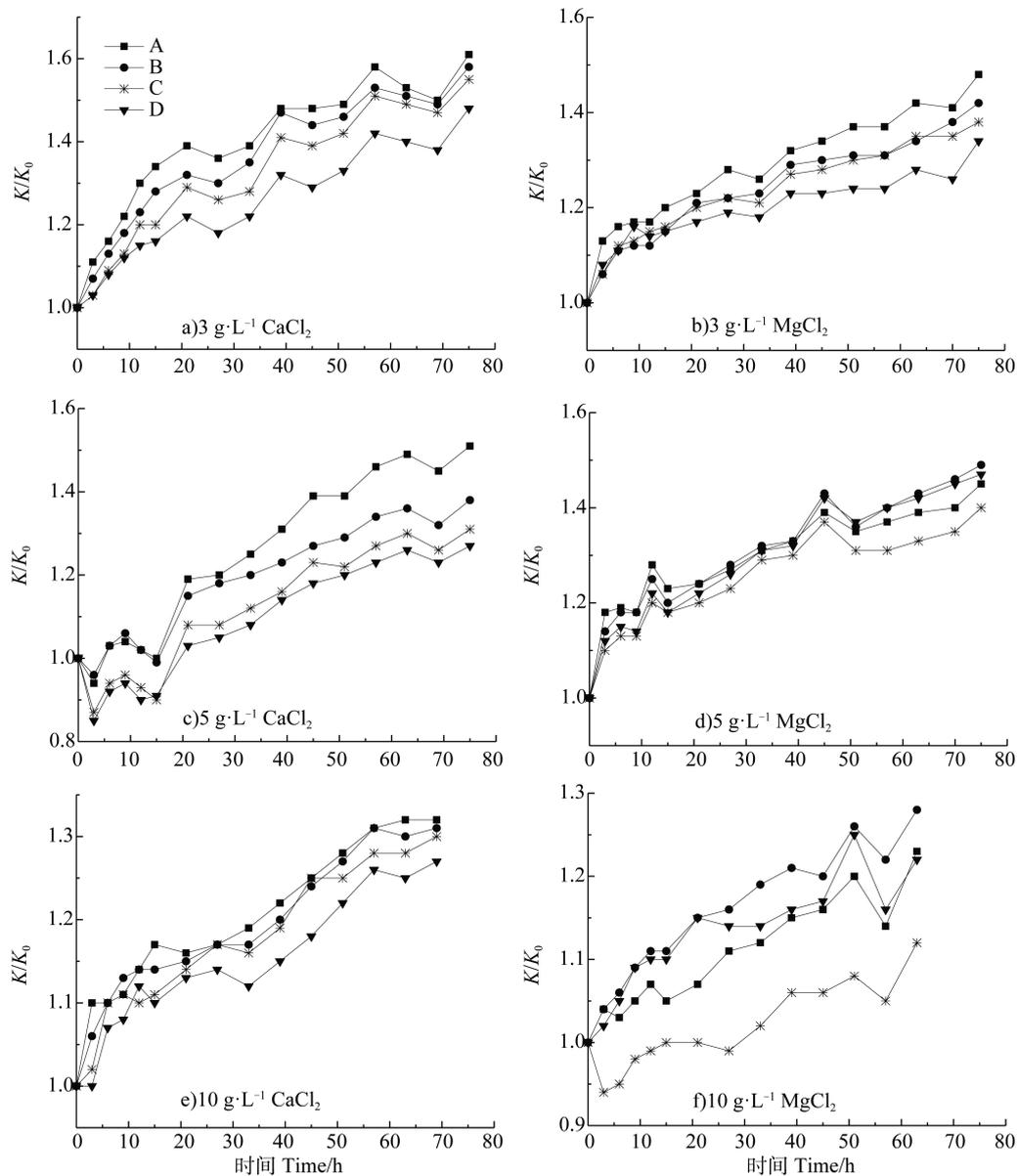


图 3 不同浓度 CaCl_2 、 MgCl_2 溶液入渗时土柱各段渗透性变化

Fig. 3 Variation of permeability of CaCl_2 or MgCl_2 solution through various sections of the soil column relative to concentration of the solution

2.2 不同入渗处理土柱整体渗透性变化

九种入渗水质整体土柱的平均渗透系数随入渗时间变化如图 4 所示,土柱整体渗透系数按公式(1)计算。由图 4 可知,入渗水质对土柱整体渗透系数的影响程度显著不同,在相同的入渗时间内,入渗结束时,通入 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 、 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 的土柱相对渗透系数分别降为初始值的 0.74%、0.61%、0.58%。这说明 Na^+ 对土柱整体的渗透性能起到了严重的阻碍作用, Na^+ 浓度越大,土柱整体的相对渗透系数越小;主要是土壤溶液中 Na^+

含量的增加,使土壤团聚结构分散,土壤孔隙减小,降低了土壤的导水性能^[21]。图 4 中,随着 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度的增加,土柱整体的相对渗透系数增加,由图 4 可得到其提高土壤渗透性由大到小的顺序分别为 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 、 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$, 试验结束时,渗透系数分别增大为初始值的 1.58 倍、1.46 倍、1.40 倍、1.40 倍、1.31 倍、1.22 倍。已有的研究^[28-29]表明,土壤中钙镁离子含量的增加,有利于增强土壤的絮凝作用,增加土壤的有效孔隙,

能够加速排盐效应,使土壤中 Na^+ 大量排出,从而改善土壤的导水性能。结合图 2、图 3 可以看出,整个土柱的平均渗透系数与土柱各层中最小的渗透系数基本保持一致,这表明土壤整体的渗透性能由最小的渗透性能所在层决定。

2.3 相对渗透系数与时间的相关关系

为定量分析整个土柱的渗透性能随时间的变化特征,将上述试验的土柱整体相对渗透系数(用 y 表示)与时间(用 x 表示)进行回归分析,结果见表 2。由表中的回归方程与 R^2 可知土柱整体渗透系数 y 与时间 x 之间成二次方关系, CaCl_2 、 MgCl_2 处

理后的 R^2 值在 0.92~0.97 之间, NaCl 处理后的 R^2 值在 0.74~0.82 之间,可见 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 处理下的土柱整体相对渗透系数与时间的相关性较 Na^+ 好。三种浓度 NaCl 处理下 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 的 R^2 值最大,这说明 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 土柱整体相对渗透系数与时间的相关性较好。 MgCl_2 处理下的试验中 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2 的 R^2 最大,因此,浓度较小的 MgCl_2 处理下的土柱整体渗透系数与时间相关性较好。 CaCl_2 处理下的试验中 3 、 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 R^2 均为 0.97,说明其低浓度或高浓度处理下土柱整体渗透系数与时间的相关关系均较好。

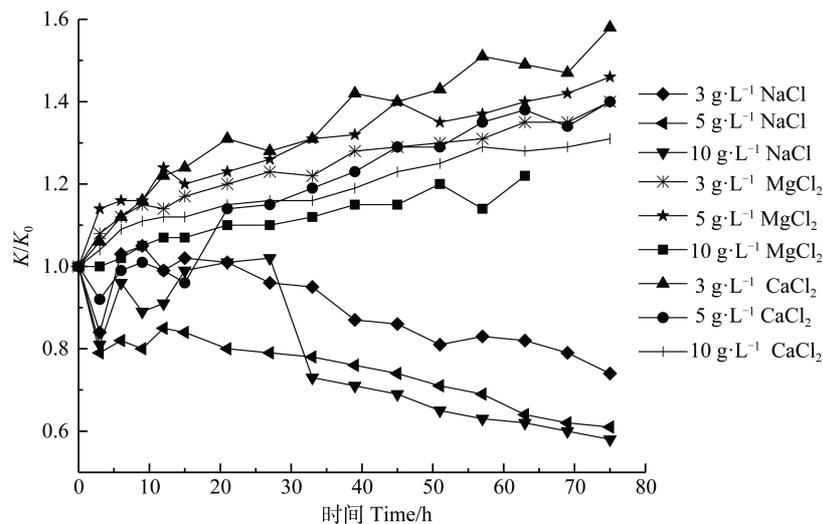


图 4 不同浓度溶液入渗时整个土柱渗透性随时间变化

Fig. 4 Temporal variation of permeability of the solution through the entire soil column relative to concentration of the solution

表 2 土柱整体相对渗透系数与时间的回归方程

Table 2 Regression equation of overall relative permeability coefficient with duration of the test of the soil column

试验方案 Test plan	回归方程 Regression equation	R^2
$3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl	$y = -0.001 8x^2 + 0.014 1x + 0.960$	0.75
$5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl	$y = -0.000 5x^2 - 0.010 4x + 0.899$	0.82
$10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl	$y = -0.001 9x^2 + 0.004 1x + 0.947$	0.74
$3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2	$y = -0.000 5x^2 + 0.030 5x + 1.008$	0.97
$5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2	$y = -0.000 8x^2 + 0.038 2x + 1.023$	0.94
$10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ MgCl_2	$y = -0.000 1x^2 + 0.017 5x + 0.975$	0.94
$3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2	$y = -0.001x^2 + 0.051 4x + 0.965$	0.97
$5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2	$y = 0.000 3x^2 + 0.027 7x + 0.896$	0.92
$10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2	$y = -0.000 2x^2 + 0.022 5x + 1.000$	0.97

注: y 表示土柱整体相对渗透系数, x 表示溶液入渗时间。Note: y stands for overall relative permeability coefficient of the soil column, and x for duration of solution infiltration.

2.4 不同入渗处理出流液电导率及 pH

图 5 给出了不同条件下土壤出流液电导率与 pH 随时间的变化。电导率在入渗初期增速较快,第 15 小时左右逐渐趋于稳定。浓度相同的 NaCl、CaCl₂ 出流液稳定,电导率差别不大,其两者与 MgCl₂ 有较大差别。10 g·L⁻¹ NaCl、CaCl₂ 和 MgCl₂ 出流液电导率稳定在 16.5、15.0、9.3 dS·m⁻¹; 5 g·L⁻¹

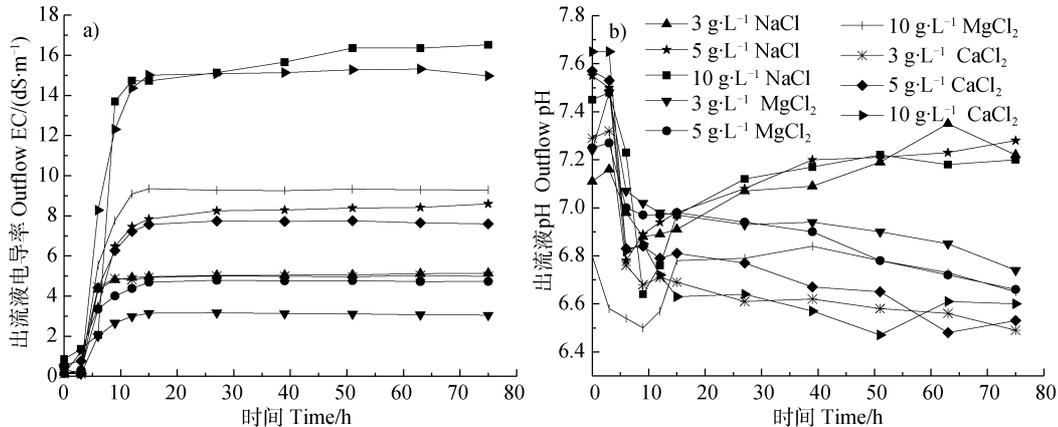


图 5 不同浓度条件下出流液电导率和 pH 的变化

Fig. 5 Variation of conductivity and pH of the outflow under different concentration of the solution

保持入渗溶液的 pH 为 6, 输入 3、5、10 g·L⁻¹ CaCl₂、MgCl₂ 的出流液 pH 在入渗结束时稳定在 6.50~6.60、6.65~6.75 之间; 输入 NaCl 溶液的土壤出流液 pH 随着出流液体积的增加而增大, 在入渗结束时三种浓度的 pH 稳定在 7.2~7.3 之间, 造成土壤轻微碱化, 这表明盐分离子的种类对土壤 pH 的影响大于盐分离子的浓度, 且影响土壤 pH 的主要离子为 Na⁺。一般认为 Na⁺的水解是导致出流液 pH 较高的主要原因, 土壤黏粒吸附的 Na⁺进入土壤溶液, 而溶液中的 H⁺进入交换相, 从而导致土壤溶液 pH 的升高, 而钙镁离子入渗过程中, 土壤 pH 受控于土壤胶体上的交换性 Na⁺和水溶性的 HCO₃⁻+CO₃²⁻, 添加 Ca²⁺、Mg²⁺后, 土壤中的 HCO₃⁻+CO₃²⁻ 含量减少, Ca²⁺、Mg²⁺与土壤中 Na⁺发生离子交换反应, 交换出来的钠离子向下迁移运动, 水溶性钠离子消失后, 钙镁离子继续与土壤胶体上的交换性钠离子反应, 使得土壤中钠离子含量降低, 从而降低土壤 pH^[30]。

2.5 不同入渗处理土壤盐分阳离子的运移过程

咸水/微咸水入渗改变了土壤渗透性, 与此同时, 渗透性又如何影响盐分阳离子的运移过程, 也是一个值得探讨的科学问题。图 6 中显示了 3、5、

NaCl、CaCl₂ 和 MgCl₂ 出流液电导率稳定在 8.4、7.6、4.7 dS·m⁻¹; 3 g·L⁻¹ NaCl、CaCl₂ 和 MgCl₂ 出流液电导率稳定在 5.1、5.0、3.1 dS·m⁻¹。由此可以看出, 稳定出流液电导率、土壤积盐程度的大小依赖于入渗溶液的种类和浓度; 土壤积盐程度由大到小依次为: Na>Ca>Mg, 且浓度越大土壤积盐越严重。

10 g·L⁻¹ NaCl 入渗时土柱 8、16、22、28 cm 位置处 Ca²⁺+Mg²⁺、Na⁺随时间的变化特征。由图 6 可知, Ca²⁺+Mg²⁺在土柱 8、16、22、28 cm 出流最大峰值分别为 0.076、0.190、0.332、0.368 g·L⁻¹ (3 g·L⁻¹ NaCl), 0.511、0.700、0.733、0.835 g·L⁻¹ (5 g·L⁻¹ NaCl) 和 1.667、1.787、1.698、2.831 g·L⁻¹ (10 g·L⁻¹ NaCl)。由此可以看出, Ca²⁺+Mg²⁺浓度随着入渗深度和 Na⁺浓度的增加而增加, 输入 10 g·L⁻¹ NaCl 溶液的土壤中置换出来的 Ca²⁺+Mg²⁺远高于其他两个浓度; 这是由于土壤溶液中 Na⁺浓度越高, 被置换出来的 Ca²⁺、Mg²⁺越多, 表层土壤中被置换出来的 Ca²⁺、Mg²⁺随入渗溶液向下迁移, 使土壤底部 Ca²⁺、Mg²⁺含量较高。不同浓度 Na⁺的迁移规律相似, 随着持续输入 NaCl 溶液, 土柱各层 Na⁺浓度不断增大, 经过约 40 h 后基本达到一个定值, 此时土壤中 Na⁺的吸附反应也基本达到了稳定状态。入渗结束时, 出流液中 Na⁺浓度基本维持在 1 g·L⁻¹ (3 g·L⁻¹ NaCl)、2.2 g·L⁻¹ (5 g·L⁻¹ NaCl)、4.6 g·L⁻¹ (10 g·L⁻¹ NaCl)。由图 6 可以看出, 3、5、10 g·L⁻¹ NaCl 溶液入渗, 土柱各段 Na⁺含量最多的分别是 B 段 (3 g·L⁻¹ NaCl)、A 段 (5 g·L⁻¹ NaCl)、A 段 (10 g·L⁻¹ NaCl),

这与图2中3、5、10 g·L⁻¹ NaCl溶液入渗，土壤相对渗透系数最小段相一致。从图6中可以发现，上层土壤的Na⁺含量大于下层土壤，且土壤各层钠离子含量相互之间差距不大，随着入渗溶液浓度的升

高，入渗过程中进入土壤中的Na⁺数量随之增加，使得Na⁺置换出的Ca²⁺、Mg²⁺数量越多，而Ca²⁺+Mg²⁺浓度随着入渗深度和浓度的增加而增加，土壤积盐情况越严重。

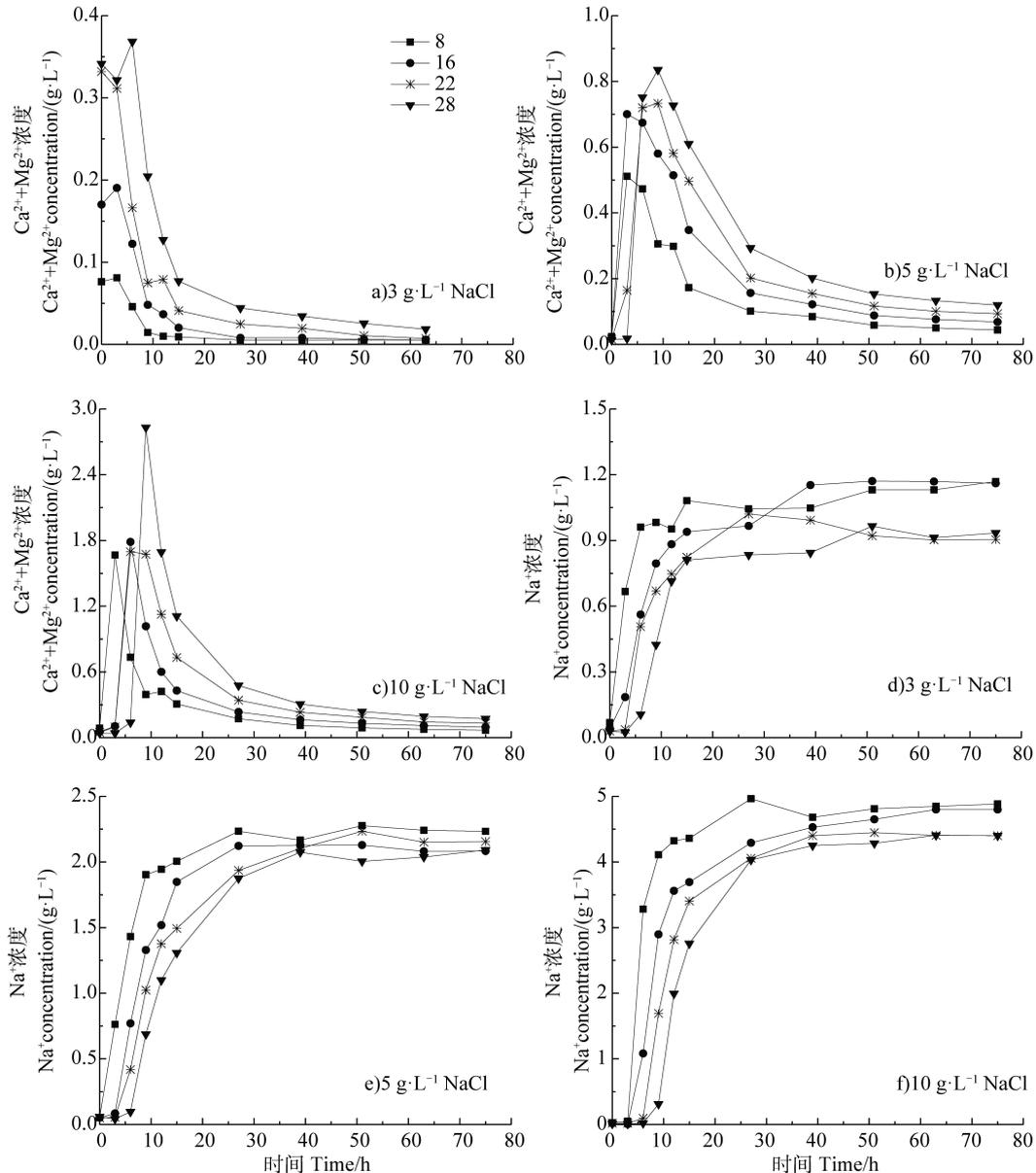


图6 不同浓度NaCl溶液入渗下土壤中Ca²⁺+Mg²⁺、Na⁺浓度随时间变化

Fig. 6 Temporal variation of concentration of Ca²⁺+Mg²⁺ and Na⁺ in the soil relative to concentration of the NaCl solution tested

3 结论

通过室内土柱试验，设置了3种盐分(NaCl、MgCl₂、CaCl₂)3个浓度梯度(3、5、10 g·L⁻¹)，研究不同浓度的咸水/微咸水对土壤渗透性能及溶质运移的影响，得出如下结论：(1)对土柱整体的渗

透性而言，NaCl溶液浓度越高土壤渗透性能降低程度越大；CaCl₂、MgCl₂溶液均能提升土柱的渗透性能，但提升程度会随着溶液浓度的升高而逐渐放缓。其中3 g·L⁻¹ CaCl₂对于提升土壤的渗透性能最为显著。这说明在利用微咸水/咸水灌溉或者碱土盐渍土改良的过程中可以适当加入钙制剂，利于洗盐，从

而缓解土壤盐渍化。(2) 对于土柱各层的渗透性, NaCl 溶液浓度越高, 表层土壤的渗透性降低得越大; CaCl_2 、 MgCl_2 溶液浓度越小, 表层土壤的渗透性能增加得越大; 溶液对表层土壤渗透性能的影响大于下层。(3) 土壤含盐量主要取决于入渗水的种类及浓度; 在 NaCl 溶液长期灌溉过程中, 对土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 影响程度较大, 且在灌溉过程中容易发生土壤积盐的情况, 入渗溶液浓度越高, 积盐越严重。因此, 在利用咸水/微咸水灌溉时, 要根据土壤的具体情况, 合理配置灌溉水质, 必要时结合改良措施, 以避免对土壤渗透性能及作物生长的影响。

参考文献 (References)

- [1] Wang H. Advances in study of brackish water irrigation in China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016 (6): 59—63, 64. [王辉. 我国微咸水灌溉研究进展[J]. *节水灌溉*, 2016 (6): 59—63, 64.]
- [2] Wang Y P, Zhou J L, Guo X J. Experimental research on the effect of saline water irrigation in China on crop growth and yield[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009 (9): 4—7. [王毅萍, 周金龙, 郭晓静. 我国咸水灌溉对作物生长及产量影响研究进展与展望[J]. *中国农村水利水电*, 2009 (9): 4—7.]
- [3] Jiang A X, Li D G. Chemical characteristics of shallow groundwater in salt water intrusion area on the southern plain of Laizhou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19 (4): 142—147. [姜爱霞, 李道高. 莱州湾南岸滨海平原咸水入侵区浅层地下水水化学特征[J]. *海洋学报*, 1997, 19 (4): 142—147.]
- [4] Lin H, Zhang Y F, Zou Y F. Comprehensive utilization of underground salt water [J]. *Energy and Environment*, 2006 (6): 70—71, 75. [林晖, 张玉峰, 邹叶锋. 地下咸水的综合利用[J]. *能源与环境*, 2006 (6): 70—71, 75.]
- [5] Ma Z S, Tan J L, Wei T. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (3): 70—75. [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 (3): 70—75.]
- [6] Fang S, Chen X L. Study on utilization and renovation of shallow underground salt water [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 1999 (2): 6—11. [方生, 陈秀玲. 浅层地下咸水利用与改造的研究[J]. *南水北调与水利科技*, 1999 (2): 6—11.]
- [7] Li C J, Tang J Y, Gao P, et al. Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along the Taklimakan desert highway[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1180—1187. [李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (5): 1180—1187.]
- [8] Li J G, Qu Z Y, Sun G F, et al. Effect of saline water mulched drip irrigation on soil salt ions distribution and yield of tomato[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017 (3): 31—35, 39. [李金刚, 屈忠义, 孙贵芳, 等. 微咸水膜下滴灌对土壤盐分离子分布和番茄产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2017 (3): 31—35, 39.]
- [9] Wan S Q, Kang Y H, Wang D, et al. Effect of drip irrigation with saline water on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) yield and water use in semi-humid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1/2): 63—74.
- [10] Tedeschi A, Dell'Aquila R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 77 (1/2/3): 308—322.
- [11] Ma W J, Mao Z Q, Yu Z R, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of winter wheat-maize in North China Plain[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2008, 22 (1): 3—18.
- [12] Rajak D, Manjunatha M V, Rajkumar G R, et al. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1/2): 30—36.
- [13] Abegunrin T P, Awe G O, Idowu D O, et al. Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria[J]. *Catena*, 2016, 139: 167—178.
- [14] Sou/Dakouré M Y, Mermoud A, Yacouba H, et al. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties[J]. *Geoderma*, 2013, 200/201: 31—39.
- [15] Chen S Y, Shao L W, Sun H Y, et al. Effect of brackish water irrigation on soil salt balance and yield of both winter wheat and summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24 (8): 1049—1058. [陈素英, 邵立威, 孙宏勇, 等. 微咸水灌溉对土壤盐分平衡与作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24 (8): 1049—1058.]
- [16] Zhang W, Zhou G W, Min W, et al. Effects of drip irrigation with saline water on cotton yield, soil physical and chemical properties, and soil N_2O emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33 (8): 1583—1590. [张文, 周广威, 闵伟, 等. 长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (8): 1583—1590.]
- [17] Li F H, Yan H, Pang C L, et al. Soil hydraulic conductivity affected by slight saline water irrigation in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering, 2013, 29 (2): 73—80. [李法虎, 闫红, 庞昌乐, 等. 华北地区微咸水应用对土壤水力传导性能的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 73—80.]
- [18] Bhardwaj A K, Mandal U K, Bar-Tal A, et al. Replacing saline-sodic irrigation water with treated wastewater: Effects on saturated hydraulic conductivity, slaking, and swelling[J]. Irrigation Science, 2008, 26(2): 139—146.
- [19] Shang F Z, Ren S M, Zou T, et al. Impact of simulated irrigation with treated wastewater and saline-sodic solutions on soil hydraulic conductivity, pores distribution and fractal dimension[M]//Computer and Computing Technologies in Agriculture VII. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 502—516.
- [20] Tang S Q, She D L. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (10): 108—114. [唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和和导水率和入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47 (10): 108—114.]
- [21] Sheng F, Zhang M, Xue R X, et al. Effects of salt in irrigation water on soil structural properties and water flow characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (3): 346—355. [盛丰, 张敏, 薛如霞, 等. 灌溉水中盐分对土壤结构性质及水流运动特征的影响[J]. 水利学报, 2019, 50 (3): 346—355.]
- [22] Li B H, Cao Y T, Guan X Y, et al. Microbial assessments of soil with a 40-year history of reclaimed wastewater irrigation[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 696—705.
- [23] Blume T, Weisbrod N, Selker J S. Permeability changes in layered sediments: Impact of particle release[J]. Ground Water, 2002, 40 (5): 466—474.
- [24] Xiao Z H, Wan H F, Zheng L F. Effect of irrigation water quality on soil chemical characteristics and crop growth[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34 (3): 272—285. [肖振华, 万洪富, 郑莲芬. 灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34 (3): 272—285.]
- [25] Liu X Z, Kang S Z. Contrast experimental research on continuous and intermittent infiltration under ponded conditions[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(1): 53—58. [刘贤赵, 康绍忠. 连续与间歇积水入渗对比试验研究[J]. 水科学进展, 1999, 10 (1): 53—58.]
- [26] Zhang X, Norton L. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils[J]. Journal of Hydrology, 2002, 260 (1/2/3/4): 194—205.
- [27] Curtin D, Steppuhn H, Selles F. Effects of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 (3): 730—737.
- [28] Zhang H, Chen X H, Fu R B, et al. Effect to FGD (flue gas desulfurization) -gypsum as an improvement to different coastal saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (7): 4397—4403. [张辉, 陈小华, 付融冰, 等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11 (7): 4397—4403.]
- [29] Cheng J R, Chen X H, Liu Z H, et al. The experimental study on the process and effect to the FGD-gypsum as an improvement in coastal saline-alkali soil[J]. China Environmental Science, 2014, 34 (6): 1505—1513. [程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34 (6): 1505—1513.]
- [30] He K, Li X P, Xu C, et al. Remediation efficiency of flue gas desulfurization gypsum on coastal saline alkali soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31 (3): 547—554. [贺坤, 李小平, 徐晨, 等. 烟气脱硫石膏对滨海盐渍土的改良效果[J]. 环境科学研究, 2018, 31 (3): 547—554.]

(责任编辑: 陈荣府)