

华北地区微咸水应用对土壤水力传导性能的影响

李法虎¹, 闫红¹, 庞昌乐², 夏强¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 由于淡水资源短缺, 中国华北地区微咸地下水灌溉面积逐年增多。该文通过室内土柱淋洗试验, 研究了灌溉水盐分浓度和钠吸附比(SAR)对华北地区非碱土(可交换钠百分比ESP≈0)和碱土(ESP≈30)饱和和水力传导性能的影响。灌溉水盐浓度分别为2.5、10和25 mmol/L, SAR分别为0、10和30 (mmol/L)^{0.5}。去离子(盐浓度≈0)作为对照处理。试验包括2个土壤碱度、9个灌溉水质组合和1个去离子水处理, 共20个试验处理。试验结果显示, 非碱土和碱土对微咸水应用的反应机理以及反应程度不同。当黏粒弥散程度较弱时, 上部土壤的饱和和水力传导度显著大于下层土壤; 反之, 则各层土壤的水力传导度均较小。在试验水质条件下, 非碱土的平均饱和和水力传导度的变化范围为0.75~13.25 cm/h, 而碱土的变化范围为0.06~6.50 cm/h。碱土的稳定饱和和水力传导度随着灌溉水盐浓度的增加或/和SAR的减小而增大, 但在非碱土中稳定饱和和水力传导度的变化规律与此基本相反。试验结果对合理应用微咸水灌溉非碱土和碱土具有指导意义。

关键词: 土壤, 盐分, 灌溉, 水质, 碱土, 钠吸附比, 水力传导度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.02.011

中图分类号: S153; S152.7+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-02-0073-08

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.

Li Fahu, Yan Hong, Pang Changle, et al. Soil hydraulic conductivity affected by slight saline water irrigation in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(2): 73-80. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤水力传导性能是土壤重要的物理参数之一, 它在一定程度上控制着农田水分循环过程以及水土环境质量状况^[1-2]。土壤水力传导能力大小主要由土壤质地控制, 但在一定条件下也会受到土壤结构和灌溉水水质及其pH值的明显影响^[2-5]。

由于淡水资源的严重短缺以及工业生产对水资源需求的竞争压力, 中国华北地区采用微咸水灌溉已成为解决该地区农业生产发展的重要手段之一^[6]。目前, 国内外对微咸水尚未有统一的定义指标。Beltrán认为微咸水是指电导率(EC)为0.7~2.0 dS/m或总可溶盐浓度为0.5~1.5 g/L的水质^[7], Fang和Chen认为矿化度达2~3 g/L的水质为微咸水^[8], 而中国节水灌溉工程技术规范(GB/T 50363-2006)将微咸水定义为矿化度为2~5 g/L的水质^[9]。微咸水灌溉不仅会引起盐分在土壤中的累积, 导致土壤的次生盐碱化, 影响作物生长, 而且

也会引起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, 从而影响作物根系的延伸、降雨或灌溉水在土壤中的运动、土壤盐分的淋洗效果、土壤透气性以及土壤中的化学反应等^[2,10]。

已有许多学者研究了微咸水灌溉对土壤次生盐碱化以及对作物生长和作物产量的影响^[11-16], 但微咸水灌溉对土壤水力传导性能影响的研究相对较少, 且已有的研究大多只关注灌溉水盐浓度对碱土水力传导性能的影响问题^[3,17]。当淋洗水中的盐分浓度低于土壤黏粒的临界凝絮浓度时, 淋洗(灌溉)水钠吸附比(SAR)对土壤理化性能的影响相当明显^[2-3]。土壤团聚体稳定性与土壤可交换钠百分比(ESP)以及土壤溶液浓度密切相关^[2]。因此, 当研究微咸水灌溉对土壤水力传导性能的影响时, 微咸水水质应包括盐浓度和Na⁺相对含量(SAR)2个方面的指标。McNeal和Coleman的研究结果显示, 土壤ESP水平越高或/和淋洗水盐浓度越低, 碱土的水力传导能力越小, 但淋洗水盐浓度对非碱土水力传导性能几乎没有影响^[17]。自然界中的微咸水中含有多重盐离子, 既包括二价阳离子如Ca²⁺和Mg²⁺也包括一价阳离子如Na⁺等。当非碱土采用微咸水灌溉时, Na⁺通过吸附或交换反应而在土壤中累积, 从而导致土壤次生碱化的发生。已有研究

收稿日期: 2012-07-25 修订日期: 2012-12-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077-03-04); 国家高技术研究发展计划(2006AA100205-2)。

作者简介: 李法虎(1963-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土工程与水土环境的研究。北京市海淀区清华东路17号中国农业大学295信箱, 100083。Email: lifahu@cau.edu.cn

结果显示, 当土壤 ESP (≤ 15) 较低时, 黏粒弥散是导致土壤水力性能退化的主要机理; 而当 ESP 较高时, 黏粒膨胀是其主要原因之一^[3,18]。因此, 当非碱土采用微咸水灌溉时不可避免会对其水力传导能力产生一定的影响, 且其影响规律应不同于碱土。

本文通过室内土柱淋洗试验, 模拟微咸水灌溉应用对非碱土和碱土的影响, 研究微咸水水质对非碱土和碱土水力传导性能的影响过程及其影响机理, 从而为微咸水灌溉地区如何最大程度维持土壤良好理化性能提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及土样制备

试验土壤取自北京市水利科学研究所通州灌溉试验站 (39°47'N, 116°47'E) 农田 0~30 cm 的表层土壤。该地区位于华北平原北部, 属于半湿润大陆性季风气候区, 年均降雨量 595 mm。土壤质地为粉质壤土, 其砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 36.1%、53.6%和 10.3%。试验土壤中的主要黏土矿物为伊利石和蒙脱石, 两者占黏粒数量的 80% (W1710 X-Diffractometer, Phillip, Holland)。土壤的阳离子代换量为 12 cmol_c/kg。当土水质量比为 1:2 (30 g 土:60 g 去离子水, 混合搅拌均匀后在室温下静置 16 h) 时, 其浸提液的 EC 值为 0.265 dS/m。

捡除所收集土壤中的作物根系残余。将土壤风干后分成 2 份, 分别放入 2 个小桶内。分别用 CaCl₂·2H₂O 和 NaCl (试剂级) 配制的 SAR 为 0 和 30 (mmol_c/L)^{0.5}、盐分浓度为 200 mmol_c/L 的水溶液从下而上慢速地饱和土壤。在土壤表面覆盖一粗滤纸, 以避免加水时扰动土壤。待土壤饱和后, 改变水流方向而从下至上慢速淋洗土壤。待土壤淋出液的化学成分趋于稳定后, 采用低一级浓度、但具有相同 SAR 值的水溶液继续淋洗。设计的淋洗水盐分浓度分别为 200、100 和 10 mmol_c/L。待所有设计浓度的淋洗水相继完成淋洗后, 土壤自由排水 1 d, 然后在 105℃烘箱中烘干 10 h 后待用。为便于叙述, 盐分浓度为 10 mmol_c/L、SAR 为 0 淋洗水淋洗平衡的土壤称之为非碱土 (ESP≈0), 而盐浓度为 10 mmol_c/L、SAR 为 30 (mmol_c/L)^{0.5} 淋洗水淋洗平衡的土壤称之为碱土 (ESP≈30)^[2-3,19]。

在本试验中, 试验用水的化学组成采用 Ca²⁺和 Na⁺ 2 种离子而非 Ca²⁺、Mg²⁺和 Na⁺ 3 种离子主要是考虑溶液配制的方便以及 SAR 概念本身的缺陷。美国盐土实验室在定义 SAR 时认为, Ca²⁺和 Mg²⁺ 均有利于土壤结构的稳定^[20]。但已有研究证实, Mg²⁺ 不利于土壤结构的稳定^[21], 其对黏粒弥散的促进效应大约是 Na⁺ 的 5%^[2,22]。

1.2 土柱装填

在直径 5 cm、高 51 cm 有机玻璃土柱的底部铺设 1.5~2 cm 厚的纯净石英砂。将准备好的土样过 4 mm 筛子, 然后以给定的土壤容重、分层均匀地装进有机玻璃柱内。装填完成后, 土样高 44 cm, 土样表面距土柱顶部 5 cm, 土壤容重为 1.35 g/cm³。在土柱侧面沿高度方向安装 4 个测压管, 各相邻测压管之间相距 10 cm。其中, 最上部测压管距土壤表面 6 cm。在土柱底部侧面安装一根出水管做排水用, 并在距土柱顶部 1 cm 处安装一排水管以控制土柱中的水位。在试验过程中, 土样表面的水头高度维持为 4 cm。

1.3 淋洗过程

土壤饱和和水力传导度采用定水头淋洗法测定, 试验采用马氏瓶法控制淋洗速率。设计的灌溉水盐浓度分别为 2.5、10 和 25 mmol_c/L (C2.5、C10 和 C25), SAR 值分别为 0、10 和 30 (mmol_c/L)^{0.5} (SAR0、SAR10 和 SAR30)。另外, 去离子水 (DW) 淋洗试验作为对照处理。试验共安排 10 个水质处理。在试验开始时, 在土样表面放置一粗滤纸, 然后按照设计的灌溉水质由下而上慢速饱和各个土柱。待土柱饱和后, 改变供水方向, 从上而下连续淋洗土柱, 直至土壤淋出液的化学元素组成基本趋于稳定后停止试验。在试验过程中, 定时记录各测压管中的水头高度, 并在土柱底部的排水口处连续收集淋出液, 分别测定各时段的淋出液体积以及淋出液 pH (Cyberscan 20 pH meter, 新加坡) 和 EC 值 (DDS-307, 上海)。

根据达西定理, 常水头条件下土壤饱和水力传导度 K (cm/h) 按下式计算

$$K = \frac{V \times \Delta L}{A \times \Delta t \times \Delta h} \times 60 \quad (1)$$

式中, V 为时段 Δt 内的淋出液体积, mL; ΔL 为测压管之间的距离, cm; A 为土柱的横断面面积, cm²; Δt 为试验时段长度, min; Δh 为水流流经土柱 ΔL 时的水头损失, cm。

试验共有 20 个处理, 即 2 个土壤处理 (非碱土和碱土)、9 个灌溉水质组合和 1 个去离子水处理。所有处理均采用 2 个重复。试验数据统计分析采用 SPSS 16.0 计算。

2 结果与讨论

2.1 淋出液 EC

土壤淋出液 EC 值在淋洗初期相对较大, 一般在 2 个孔隙体积 (2 PV, 1 PV=443 mL) 淋洗后逐渐趋于稳定 (图 1)。土壤淋出液稳定 EC 值的大小主要依赖于淋洗水的盐分浓度。尽管土壤与淋洗

水之间的离子交换影响淋出液的离子组成，但土壤碱度和淋洗水的 SAR 值对稳定 EC 值的影响较小^[23] (图 1a 和图 1b)。去离子水以及盐浓度为 2.5、10 和 25 mmol/L 的淋洗水，其土壤淋出液的平均稳定

EC 值分别为 0.28、0.36、1.36 和 2.67 dS/m。这些值与其相应淋洗水的 EC 值 0.12、0.25、1.29 和 2.67 dS/m 基本相似，这显示测试土壤中的可溶盐含量较低。

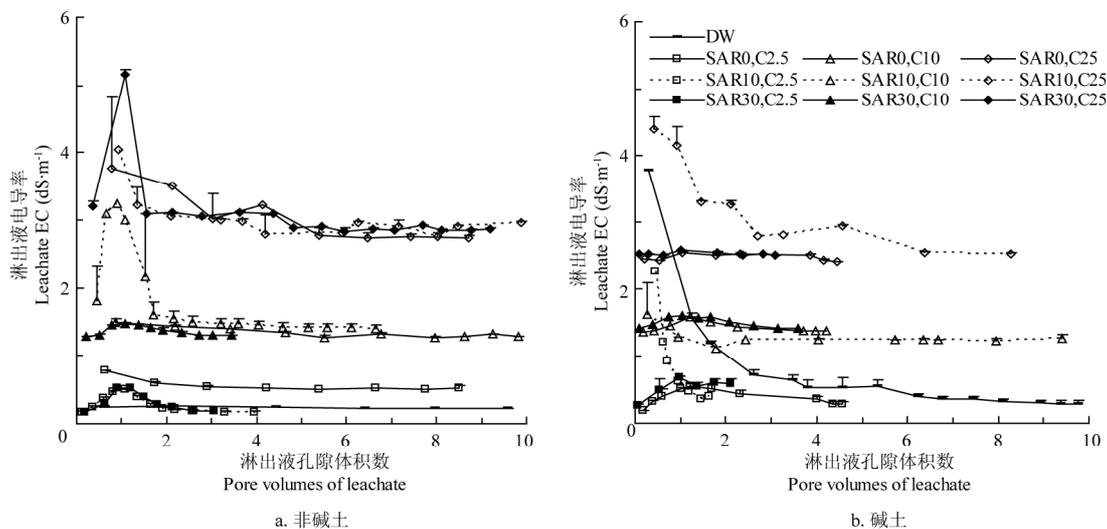


图 1 不同淋洗水质 (SAR、盐浓度 C 以及去离子水 DW) 条件下非碱土 (a) 和碱土 (b) 淋出液 EC 随淋出液体积的变化
Fig.1 Variation of leachate EC with leachate volume for nonsodic (a) and sodic (b) soils under water qualities of various SARs, salt concentrations (C) and distilled water (DW)

2.2 淋出液 pH 值

在测试水质条件下，非碱土淋出液的 pH 值基本在 7~8 之间 (图 2a)。去离子水和 SAR 为 0 淋洗水的淋出液 pH 值为 7.2~7.4，且在整个淋洗过程中

基本维持不变 (图 2a)。而 SAR 为 10 和 30 (mmol/L)^{0.5} 的淋洗水，其淋出液 pH 值在淋洗初期随着淋出液体积的增加而稍微增大，在 2 PV 淋洗后逐渐趋于稳定，其稳定值在 7.5~7.8 之间 (图 2a)。

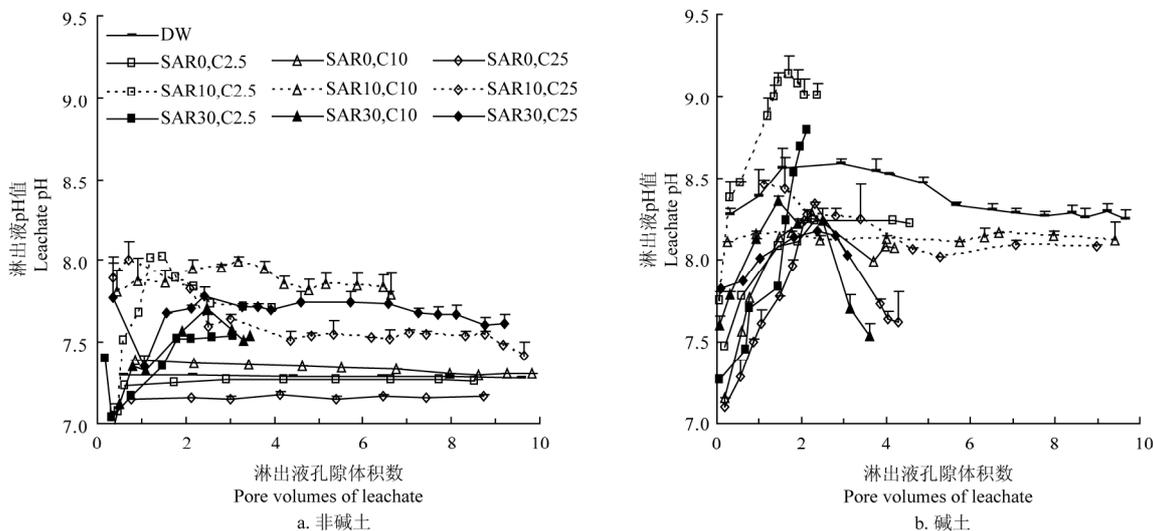


图 2 不同淋洗水质 (SAR、盐浓度 C 以及去离子水 DW) 条件下非碱土 (a) 和碱土 (b) 淋出液 pH 随淋出液体积的变化
Fig.2 Variation of leachate pH with leachate volume for nonsodic (a) and sodic (b) soils under water qualities of various SARs, salt concentrations (C) and distilled water (DW)

碱土淋出液的 pH 值基本上随着淋出液体积的增加而增大，在约 2 PV 处达其最大值，然后逐渐减小或趋于其稳定值 (图 2b)。去离子水淋出液的 pH 值在整个淋洗过程中维持一个相对的较高值，

一般在 8.3~8.6 之间。所有测试水质在碱土中的淋出液，其 pH 值在 7.1~9.2 之间 (图 2b)，明显高于非碱土淋出液的 pH 值 (图 2a)。

在淋洗过程中，碱土中的 Na⁺黏粒水解是导致

碱土淋出液 pH 值较高的主要原因^[24-25]。当淋洗水的盐浓度小于土壤溶液浓度时，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 值的升高。随着淋洗过程的继续，其他阳离子会逐渐从吸附相进入土壤溶液而稍微降低淋出液的 pH 值^[24]。

2.3 土壤饱和水力传导度

2.3.1 各土层水力传导度

图 3 给出了 2 种微咸水淋洗条件下不同土壤深度 (3、11、21 和 31 cm, 即 SD2、SD11、SD21 和 SD31) 处的非碱土饱和水力传导度随淋出液体积的变化情况，其他水质条件下非碱土饱和水力传导度随淋出液体积的变化规律与此相似。当采用微咸水淋洗非碱土时，表层土壤的饱和水力传导度显著大于下部土壤，

且下部各层土壤的水力传导度大小基本相似 (图 3)。

土壤与淋洗水平衡时的黏土颗粒弥散程度决定了各层土壤饱和水力传导度的大小及其在淋洗过程中的变化情况^[26]。当淋洗水盐浓度较高或/和 SAR 较低时，表层土壤的饱和水力传导度随着淋洗过程呈逐渐增大之趋势 (图 3a)。这可能意味着此时表层土壤中的弥散黏粒较少，它们可以随淋洗水流一起逐渐向下层移动，从而增大了表层土壤的水力传导能力。而当淋洗水盐浓度较低或/和 SAR 较高时，由于弥散颗粒较多，此时各层水力传导度明显小于 SAR 较低时的值 (图 3a 和图 3b)；且由于它们不能连续不断地随淋洗水流一起下移或只能部分发生位移，表层土壤的饱和水力传导度在整个淋洗过程中基本维持不变 (图 3b)。

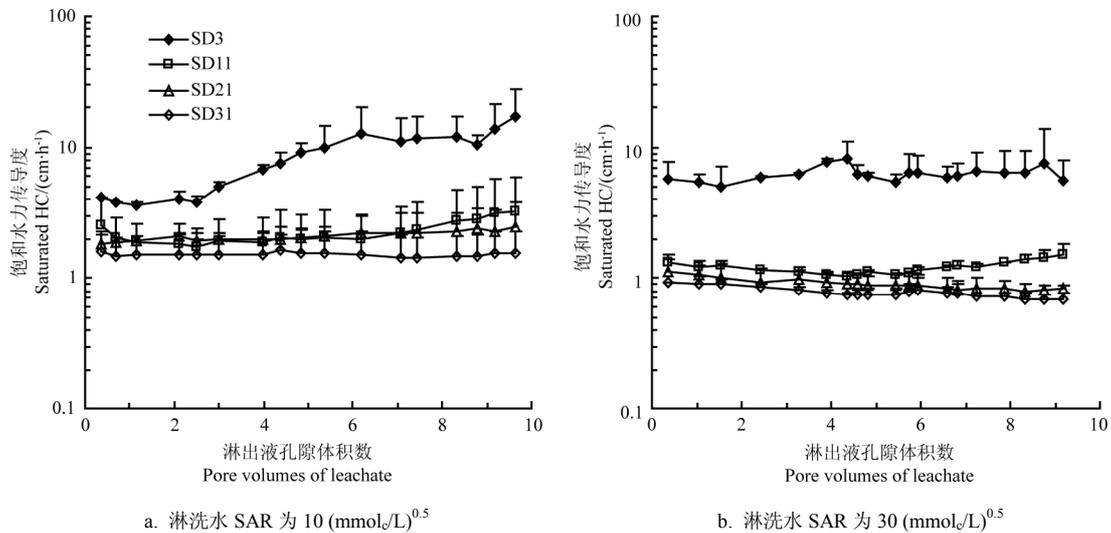


图 3 2 种淋洗水质 (SAR 分别为 10 (a) 和 30 (mmol/L)^{0.5} (b)、盐浓度为 25 mmol/L) 条件下不同土壤深度 (SD, cm) 非碱土饱和水力传导度随淋出液体积的变化

Fig.3 Variation of saturated hydraulic conductivity (HC) of nonsodic soil at various soil depths (SD, cm) with leachate volume under water qualities with SARs of 10 (a) and 30 (mmol/L)^{0.5} (b) and salt concentration of 25 mmol/L

当采用微咸水淋洗碱土时，各层土壤饱和水力传导度的大小与淋洗水盐浓度及其 SAR 值密切相关 (图 4)。当淋洗水 SAR 为 30 (mmol/L)^{0.5}、盐浓度为 2.5 mmol/L 时，各层土壤的水力传导度较小 (图 4a)，只有 0.04~0.1 cm/h；而当其盐浓度增大到 25 mmol/L 时，各层土壤的水力传导度显著增大，可达 0.8~2.5 cm/h，且上部土层的饱和水力传导度明显大于下层土壤 (图 4b)。

碱土的饱和水力传导度随土壤深度的变化规律也与黏粒的弥散程度以及弥散颗粒能否连续下移有关。当采用 SAR 为 30 (mmol/L)^{0.5}、盐浓度为 2.5 mmol/L 的水淋洗碱土 (土壤 ESP≈30) 时，此时的淋洗水盐浓度小于土壤的临界凝絮浓度 (>7~18 mmol/L)^[2]，因此会产生严重的黏粒弥散，从而堵塞传导孔隙通道，导致各层土壤较低的水力传导能

力 (图 4a)。但当淋洗水盐浓度增大到 25 mmol/L 时，土壤的弥散程度极大减弱，各层土壤的水力传导能力显著增大 (图 4b)。此时，上部土层中的部分弥散颗粒随淋洗水一起下移，从而导致上部土层的饱和水力传导度大于下层土壤 (图 4b)。

2.3.2 土柱平均水力传导度

在各种淋洗水质条件下整个土柱的平均饱和水力传导度随淋出液体积的变化见图 5。淋洗水质对碱土和非碱土平均饱和水力传导度的影响程度显著不同 (图 5)。在非碱土中，土壤平均饱和水力传导度在整个淋洗过程中基本维持不变或随淋洗体积的增加而稍微减小 (图 5a)。当淋洗水盐浓度为 25 mmol/L 时，非碱土的平均饱和水力传导度随淋洗水 SAR 的增大而显著减小，但这一规律在淋洗水盐浓度为 2.5 和 10 mmol/L 时则不存在。在

所有测试的水质处理中，去离子水淋洗条件下的非碱土平均饱和水力传导度基本上是最大的。非碱土

平均饱和水力传导度在所有测试水质处理条件下的变化范围为 0.75~13.25 cm/h。

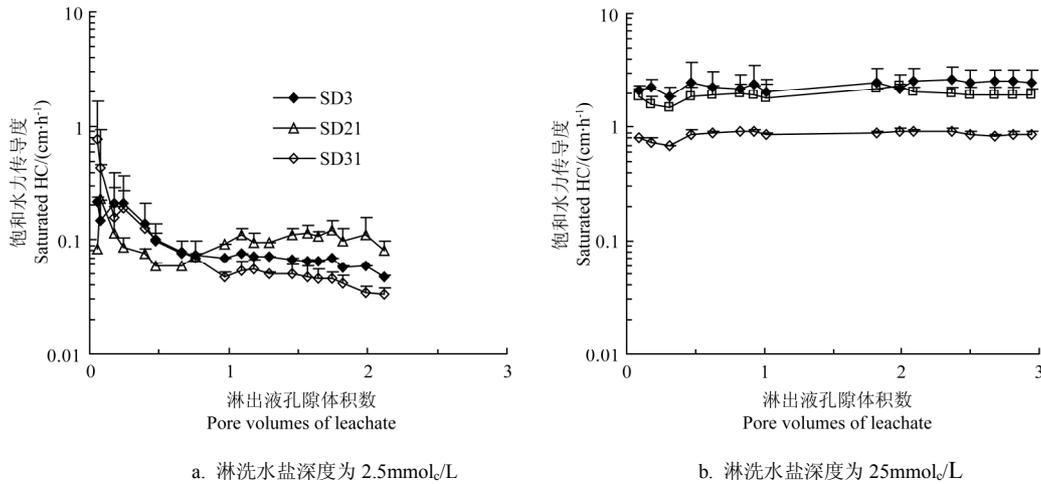


图 4 2 种淋洗水质（盐浓度分别为 2.5 (a) 和 25 mmol/L (b)、SAR 为 30 (mmol/L)^{0.5}）条件下不同土壤深度 (SD, cm) 碱土饱和和水力传导度随淋出液体积的变化

Fig.4 Variation of saturated hydraulic conductivity (HC) of sodic soil at various soil depths (SD, cm) with leachate volume under water qualities with salt concentrations of 2.5 (a) and 25 mmol/L (b) and SAR of 30 (mmol/L)^{0.5}

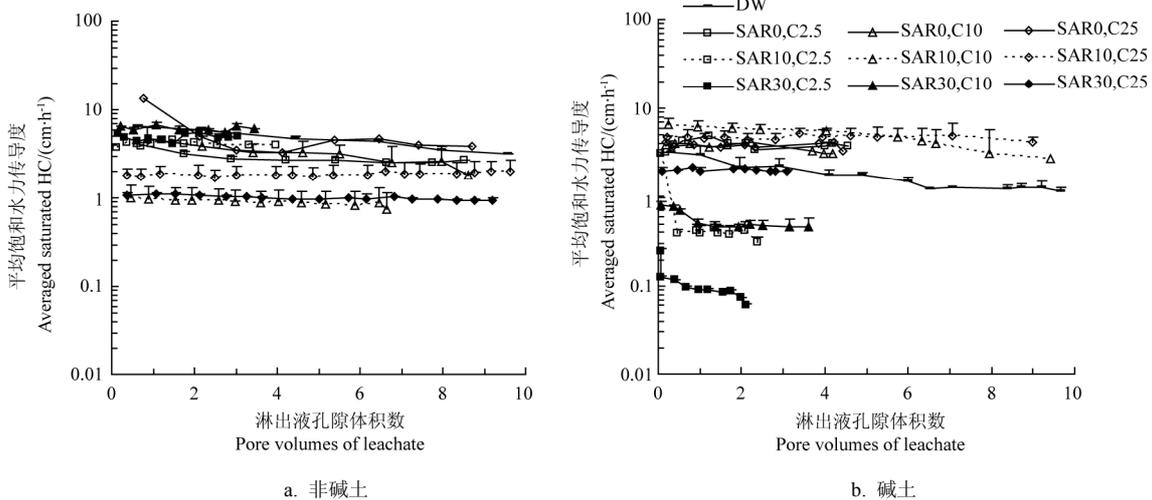


图 5 不同淋洗水质 (SAR、盐浓度 C 以及去离子水 DW) 条件下非碱土 (a) 和碱土 (b) 平均饱和水力传导度随淋出液体积的变化

Fig.5 Variation of averaged saturated hydraulic conductivity (HC) in nonsodic (a) and sodic (b) soils with leachate volume under water qualities of various SARs, salt concentrations (C) and distilled water (DW)

在碱土中，土壤平均饱和水力传导度随淋出液体积的增加基本维持不变或逐渐减小（图 5b）。除 SAR 为 0 的淋洗水外，碱土平均饱和水力传导度随着淋洗水 SAR 值的增大或其盐浓度的降低而减小，这与已有的试验结论一致^[2,4,27]。在 SAR 为 0 的淋洗水淋洗时，淋洗水盐浓度对碱土水力传导度无明显影响(图 5b)。除了淋洗水 SAR 为 30 (mmol/L)^{0.5}、盐浓度为 2.5 和 10 mmol/L 以及 SAR 为 10 (mmol/L)^{0.5}、盐浓度为 2.5 mmol/L 3 个处理外，其他淋洗水质处理条件下的碱土平均饱和水力传导度均不小于去离子水条件下的平均饱和水力传导度。在测试的所有水质处理条件下，碱土平均饱

和水力传导度的变化程度大于 2 个数量级，其范围为 0.06~6.50 cm/h。这一变化程度远大于非碱土平均饱和水力传导度的变化程度，因此灌溉水质对碱土水力传导性能的影响程度比非碱土的影响更为严重。整个土柱的平均饱和水力传导度与各土层中的最小水力传导度大小基本一致（图 3~图 5），这表明土壤平均饱和水力传导度的大小由最小水力传导度所在层土壤的水力传导性能所控制。

2.3.3 稳定水力传导度

淋洗水质对土壤稳定饱和水力传导度的影响见图 6。对于非碱土，其稳定饱和水力传导度基本上随着淋洗水中盐分浓度的增加而趋于减小

(图 6a)，但随淋洗水 SAR 值的增大而趋于增大(图 6b)。

对于碱土，其稳定水力传导度随淋洗水盐分浓度的增加而增大(图 6c)；但在淋洗水盐分浓度大于凝絮浓度后，其值随淋洗水盐浓度的进一步增加基本维持不变(图 6c)。从图 6c 可以看出，当淋洗水的 SAR 值为 0、10 和 30 (mmol_e/L)^{0.5} 时，测试

土壤的相应临界凝絮浓度大致为 2.5、10 和大于 25 mmol_e/L ，这与已有的试验结果基本一致^[2-3,28]。总的来讲，碱土的稳定水力传导度随淋洗水 SAR 值的增加而减小(图 6d)；且淋洗水盐浓度越小，碱土稳定水力传导度的下降程度越大(图 6d)。低盐浓度、高 SAR 淋洗水对碱土水力传导能力产生了更大的不利影响(图 6c 和图 6d)。

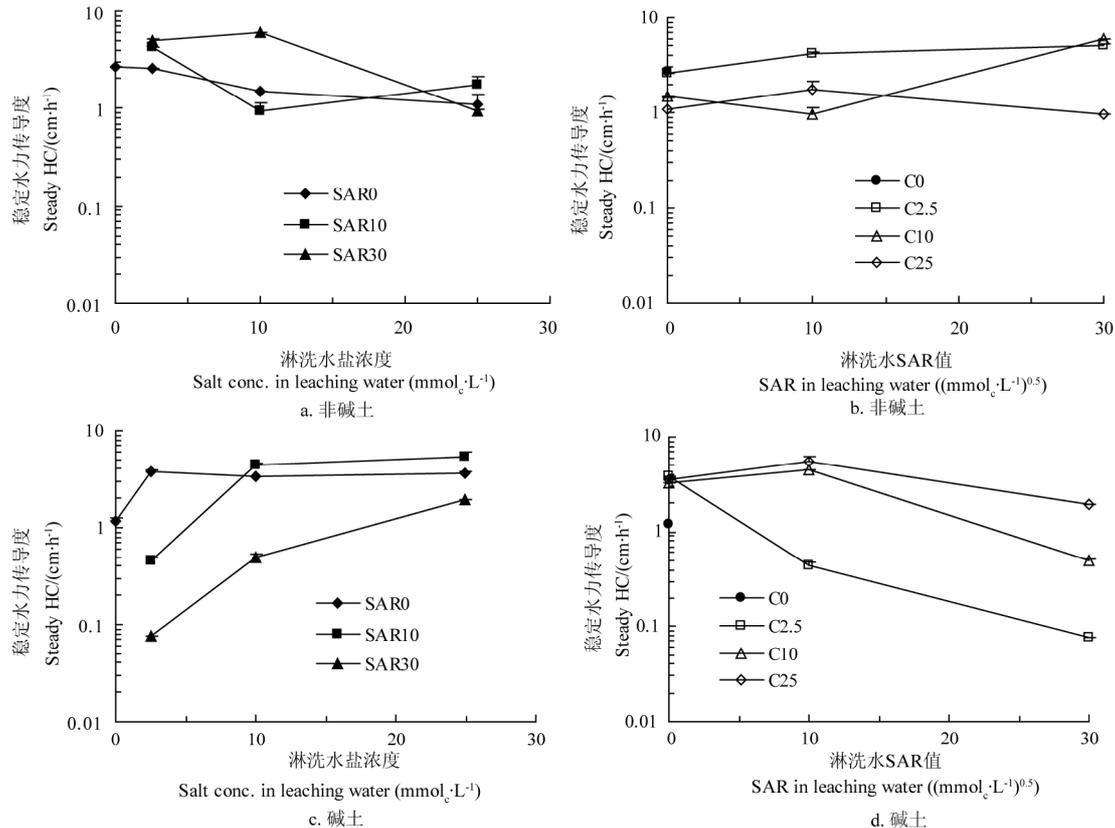


图 6 非碱土 (a 和 b) 和碱土 (c 和 d) 稳定水力传导度随淋洗水盐分浓度 C (a 和 c) 或淋洗水 SAR 值 (b 和 d) 的变化
Fig.6 Variation of steady saturated hydraulic conductivity (HC) with salt concentration C (a and c) or SAR (b and d) in leaching water for nonsodic (a and b) and sodic (c and d) soils

这些试验结果表明，非碱土和碱土对灌溉水质的反应机理明显不同。当非碱土采用微咸水灌溉时，首先发生的是灌溉水中 Na^+ 在土壤交换相的吸附反应。灌溉水中的 Na^+ 被土壤黏粒吸附或与土壤吸附相的二价阳离子发生交换反应而滞留于土壤中，土壤交换相的 Na^+ 含量随着淋洗过程逐渐增大直至与土壤溶液（淋洗水）中的 Na^+ 平衡。在灌溉水 SAR 值相同的条件下，灌溉水的盐分浓度越大，土壤对 Na^+ 的亲合力越大^[2,29-30]，因此与其平衡的土壤黏粒中的 Na^+ 含量越大，土壤 ESP 水平越高，黏粒弥散的可能性越大，从而导致非碱土稳定饱和水力传导度随灌溉水盐浓度的增大而减小(图 6a)。当灌溉水中的盐浓度较低时，土壤的 ESP 水平较低，此时的弥散黏粒较少，它们易随水流一起下移或部分排出土柱。这可能是本试验中淋洗水盐浓度小于 10 mmol_e/L 时非碱土稳定饱和水力传导度随

淋洗水 SAR 增大而增大的原因(图 6b)。反之，当淋洗水盐浓度为 25 mmol_e/L 时，土壤 ESP 较高，黏粒弥散程度较为严重，土壤传导孔隙被堵塞，从而导致非碱土稳定饱和水力传导度随淋洗水 SAR 的增大先增大而后稍微降低(图 6b)。因此，非碱土对微咸水灌溉的反应程度与土壤中可交换 Na^+ 的累积以及黏粒弥散程度有关。灌溉水的 SAR 值及其盐浓度决定了土壤中的 Na^+ 含量即土壤的 ESP 水平，从而影响了土壤的稳定水力传导能力。

对于碱土，当土壤溶液浓度小于土壤 ESP 相对应的临界凝絮浓度时，灌溉水盐浓度越大，土壤溶液浓度越大(图 1b)，土壤溶液 pH 值越低(图 2b)，因此土壤颗粒的弥散程度越轻，土壤稳定水力传导能力越大^[2,28](图 6c)。去离子水淋洗时较低的碱土稳定饱和水力传导度是由于其非常低的盐浓度和较高的土壤溶液 pH 值所致^[2,28]。当碱土的 ESP

水平大于与其平衡的土壤溶液 SAR 值时, 由于阳离子交换, 土壤黏粒中的部分 Na^+ 被交换出来而随淋出液一起被排出土壤, 从而降低了土壤的 ESP 水平^[24], 有助于土壤团聚体的稳定和土壤水力传导度的改善; 反之, 如果碱土的 ESP 值小于与其平衡土壤溶液的 SAR 值, 那么土壤交换相的 Na^+ 将随着淋洗过程而增多, 土壤 ESP 值增大, 从而导致土壤水力传导性能的恶化。但随着淋洗时间的延长, ESP 相对较低的土壤甚至非碱土中的 Na^+ 含量最终将与淋洗水中的 Na^+ 浓度达到动态平衡, 从而导致碱土稳定饱和和水力传导度随着淋洗水 SAR 的增大而减小(图 6d)。因此, 对于给定的土壤, 不论碱土还是非碱土, 灌溉水的 SAR 水平及其盐浓度最终决定了长期微咸水灌溉条件下的土壤水力传导能力。

3 结 论

非碱土和碱土对微咸水应用的反应机理以及反应程度不同。当黏粒弥散程度较弱时, 上部土壤的饱和水力传导度显著大于下部土壤; 反之, 如果弥散程度较严重, 则各层土壤的水力传导度均较小。当非碱土采用微咸水灌溉时, 灌溉水中的 Na^+ 在土壤中的吸附是其主要反应。灌溉水的 SAR 水平越高、盐浓度越大, 则被吸附在土壤交换相的 Na^+ 越多, 土壤 ESP 越高, 土壤的水力传导能力越低。而在碱土中, 当采用微咸水灌溉时, 水土之间主要发生阳离子交换反应。灌溉水盐浓度以及 SAR 值的大小决定了与之平衡的土壤临界凝聚浓度以及水力传导能力的大小。在试验水质条件下, 非碱土平均饱和水力传导度的变化范围为 0.75~13.25 cm/h, 而碱土的变化范围为 0.06~6.50 cm/h。碱土水力传导度随灌溉水盐浓度的增加或和 SAR 的减小而增大, 而在非碱土中水力传导度的变化规律基本与此相反。非碱土在微咸水灌溉条件下的碱化过程是导致这一现象的主要原因。对于拟采用微咸水灌溉的地区, 应根据灌溉土壤的碱度条件, 合理安排灌溉水质, 以避免对土壤水力传导性能产生过大的不利影响。

[参 考 文 献]

[1] 樊贵盛, 李尧, 苏冬阳, 等. 大田原生盐碱荒地入渗特性的试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 63-70. Fan Guisheng, Li Yao, Su Dongyang, et al. Study on infiltration characteristics of original saline-alkali wasteland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 63-70. (in Chinese with English abstract)

[2] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[3] Shainberg I, Letey J. Response of soils to sodic and saline conditions[J]. Hilgardia, 1984, 52(2): 1-57.

[4] 李法虎, 郭锦蓉. 土壤水蚀中关于化学因素的研究现状和展望[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 32-37.

Li Fahu, Guo Jinrong. Research status and future development of effects of chemical factors on soil water erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 32-37. (In Chinese with English abstract)

[5] Churchman G J, Skjemstad J O, Oades J M. Influence of clay minerals and organic matter on effects of sodicity on soils[J]. Aust J Soil Res, 1993, 31(6): 779-800.

[6] Fang S, Chen X L. Developing drainage as the basis of comprehensive control of drought, waterlogging, salinity and saline groundwater[J]. Irrig Drain, 2007, 56(S1): 227-244.

[7] Beltrán J M. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact[J]. Agri Water Manage, 1999, 40(2/3): 183-194.

[8] Fang S, Chen X L. Using shallow saline groundwater for irrigation and regulating for soil salt-water regime[J]. Irrig Drain Syst, 1997, 11(1): 1-14.

[9] 中华人民共和国水利部. 节水灌溉工程技术规范(GB/T 50363-2006) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical specification for water-saving irrigation engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.

[10] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 30-35. Wan Shuqin, Kang Yuehu, Wang Dan, et al. Effect of saline water on tomato growth and yield by drip irrigation in semi-humid regions of north China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(8): 30-35. (In Chinese with English abstract)

[11] Schleiff U. Analysis of water supply of plants under saline soil conditions and conclusions for research on crop salt tolerance[J]. J Agron Crop Sci, 2008, 194(1): 1-8.

[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]. Agri Water Manage, 2006, 83(1/2): 30-36.

[13] 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]. Agri Water Manage, 2007, 90(1/2): 63-74.

[14] Tedeschi A, Dell'Aquila R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. Agri Water Manage, 2005, 77(1/3): 308-322.

[15] 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]. Irrig Drain Syst, 2008, 22(1): 3-18.

[16] 李法虎, Benhur M, Keren R. 劣质水灌溉对土壤盐碱化及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 63-66. Li Fahu, Benhur M, Keren R. Effect of marginal water irrigation on soil salinity, sodicity and crop yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 63-66. (In Chinese with English abstract)

[17] McNeal B L, Coleman N T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1966, 30(3): 308-312.

[18] Levy G J. Sodicty[C]// Sumner M E. Handbook of Soil Science. Boca Raton, USA: CRC Press. 2000: G27-G63.

[19] Li F H, Yang S M, Peng C. Effects of domestic sewage water and ameliorant effectiveness on soil hydraulic conductivity[J]. Soil Sci Soc Am J, 2010, 74(2): 461-468.

- [20] US Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[M]. USDA Agricultural Handbook No. 60. Washington, DC: U S Government Printing Office, 1954.
- [21] Zhang X C, Norton L D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils[J]. *J Hydrology*, 2002, 260: 194–205.
- [22] Curtin M, Steppuhn H, Selles F. Effects of magnesium on cation selectivity and saturated stability of sodic soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58(3): 730–737.
- [23] Keren R. Salinity[C]// Sumner M E. Handbook of Soil Science. Boca Raton, USA: CRC Press. 2000: G3-G25.
- [24] Marwan M, Rowell D L. Cation exchange, hydrolysis and clay movement during the displacement of saline solutions from soils by water[J]. *Irrig Sci*, 1995, 16(2): 81–87.
- [25] Li F H, Keren R. Native CaCO_3 mineral dissolution and its contribution to sodic calcareous soil reclamation under laboratory conditions[J]. *Arid Land Res Manag*, 2008, 22(1): 1–15.
- [26] 李海明, 佟琪, 翟菁, 等. 不同钠吸附比含水介质渗透性损失的胶体效应[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 90–94.
- Li Haiming, Tong Qi, Zhai Jing, et al. Colloid effect on permeability losses of water-bearing media under different sodium adsorption ratio[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(8): 90–94. (in Chinese with English abstract)
- [27] 彭冲, 李法虎, 潘兴瑶. 聚丙烯酰胺施用对碱土和非碱土水力传导度的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 835–842.
- Peng Chong, Li Fahu, Pan Xingyao. Effects of polyacrylamide application on hydraulic conductivity of sodic and nonsodic soils[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 835–842. (In Chinese with English abstract)
- [28] Suarez D L, Rhoades J D, Lavado R, et al. Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48(1): 50–55.
- [29] Kopittke P M, So H B, Menzies N W. Effect of ionic strength and clay mineralogy on Na-Ca exchange and the SAR-ESP relationship[J]. *Eur J Soil Sci*, 2006, 57(5): 626–633.
- [30] Evangelou V P, Marsi M. Influence of ionic strength on sodium-calcium exchange of two temperate climate soils[J]. *Plant Soil*, 2003, 250(2): 307–313.

Soil hydraulic conductivity affected by slight saline water irrigation in North China

Li Fahu¹, Yan Hong¹, Pang Changle², Xia Qiang¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The area irrigated with slight saline groundwater increases in North China because of fresh water shortage. The effects of salt concentration and sodium adsorption ratio (SAR) in irrigation water on saturated hydraulic conductivity of nonsodic (exchangeable sodium percentage $\text{ESP} \approx 0$) and sodic ($\text{ESP} \approx 30$) soils in North China were studied by soil column experiments in laboratory. The designed salt concentrations in irrigation water were 2.5, 10, and 25 mmol_e/L , and its SARs were 0, 10, and 30 (mmol_e/L)^{0.5}, respectively. Irrigation with distilled water (salt concentration ≈ 0) also was conducted as a control treatment. The experiments included 2 soil sodicity levels, 9 irrigation water qualities, and one distilled water treatment, and total experimental treatments were 20. Experimental results demonstrated that saturated hydraulic conductivities of nonsodic soil on surface layers were significantly bigger than those on lower soil layers, in which they were similar to each other, under slight saline water leaching. Saturated hydraulic conductivities of sodic soil at various depths were closely related to salt concentration and SAR level in leaching water. The saturated hydraulic conductivities at various soil depths were small (0.04–0.10 cm/h) when sodic soil was leached with SAR of 30 (mmol_e/L)^{0.5} and salt concentration of 2.5 mmol_e/L , however they were significantly increased (0.8–2.5 cm/h) when salt concentration in leaching water increased to 25 mmol_e/L at the same SAR level. Meanwhile, the saturated hydraulic conductivities on upper soil layers were significantly bigger than those on lower layers. The results indicated that the response mechanism and degree of nonsodic soil to slight saline water irrigation were different, and the dispersion degree of nonsodic soil was bigger than that of sodic soil under same irrigation water quality. When the degree of clay dispersion was weak, saturated hydraulic conductivities on upper soil layers were significantly greater than those on lower layers. When salt concentration in leaching water was 25 mmol_e/L , averaged saturated hydraulic conductivity of nonsodic soil significantly decreased with the increase of SAR level in leaching water, but the variation tendency did not exist when salt concentrations were 2.5 and 10 mmol_e/L . Average saturated hydraulic conductivity of sodic soil decreased with the increased SAR level or decreased salt concentration in leaching water, but it was not obviously affected by salt concentration when SAR level in leaching water was 0. Generally, the variation extent of averaged saturated hydraulic conductivity of nonsodic soil over the whole soil columns was 0.75–13.25 cm/h, and that of sodic soil was 0.06–6.50 cm/h under all tested water qualities. Steady saturated hydraulic conductivity of sodic soil increased with the increased salt concentration or/and decreased SAR in leaching water, but that of nonsodic soil basically decreased with the increased salt concentration or/and decreased SAR in leaching water. This research result can provide references for arranging a reasonable irrigation scheme about slight saline groundwater on nonsodic and sodic soils.

Key words: soils, salts, irrigation, water quality, sodic soil, sodium adsorption ratio, hydraulic conductivity