

# 水质和体积质量对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响<sup>①</sup>

迟春明<sup>1,2</sup>, 王志春<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 以松嫩平原典型碱土为研究对象, 采用承压水、潜水及蒸馏水模拟的雨水 3 种水源, 分别在 6 种体积质量 (容重) 下测定了土壤饱和导水率和淋洗液的电导率及 pH, 分析了水质和体积质量对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响以及饱和导水率与淋洗液电导率和 pH 值间的关系。结果表明: 碱土饱和导水率随测定用水电导率的增加而升高; 采用承压水和潜水测定时, 碱土饱和导水率随土壤体积质量的增加而降低; 采用蒸馏水测定时, 饱和导水率在 1.08 ~ 1.33 g/cm<sup>3</sup> 体积质量范围内均为 0.11 mm/d, 而当体积质量 > 1.42 g/cm<sup>3</sup> 时, 饱和导水率均为 0 mm/d; 淋洗液的电导率和 pH 值随着测定用水电导率的逐渐增加而不断降低; 采用潜水和承压水测定时, 淋洗液的电导率和 pH 值随体积质量的增加而升高, 用蒸馏水测定时, 淋洗液的电导率和 pH 值不随体积质量的变化而改变; 淋洗液电导率和 pH 均随饱和导水率增加而降低, 且二者与饱和导水率均呈指数关系, 碱土饱和导水率越高其盐分淋洗效果越好。

**关键词:** 水质; 体积质量; 碱土; 饱和导水率; 电导率; pH

**中图分类号:** S156.4; S151.9

饱和导水率低是碱土标志性特征之一<sup>[1-3]</sup>。提高饱和导水率是有效淋洗碱土盐分的基本前提<sup>[4]</sup>。碱土饱和导水率受自身理化性质和灌溉水质等多种因素影响<sup>[5-10]</sup>。已有研究更多关注土壤自身理化性质包括体积质量 (容重)、孔隙度、结构、土壤有机质含量和盐分含量等因素<sup>[11-16]</sup>, 而对灌溉水质影响土壤饱和导水率报道较少。松嫩平原是我国五大盐碱土集中分布区域之一<sup>[17]</sup>, 土体富含 Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, 属典型碱土<sup>[18]</sup>。过量 Na<sup>+</sup> 使土壤黏粒遇水高度分散, 堵塞孔隙, 导致土壤导水率下降, 成为碱土淋洗改良的严重障碍<sup>[19-20]</sup>。鉴于灌溉水质和土壤体积质量是影响碱土饱和导水率的重要因素, 本文以松嫩平原典型碱土为对象, 采用当地主要农业水源, 地下承压水、潜水及蒸馏水模拟雨水, 分别在 6 种体积质量下测定了土壤饱和导水率和淋洗液的化学性质, 研究了水质和体积质量对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响, 旨在为松嫩平原碱土改良提供理论支持和借鉴。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试土样

供试土样采自中国科学院大安碱地生态试验站

(45°35'58" N ~ 45°36'28" N, 123°50'27" E ~ 123°51'31" E)。采样点为典型的碱斑地, 俗称光板地。取样深度为 20 cm。土样带回室内后自然风干, 过 2 mm 筛。采用吸管法对土壤颗粒进行分析, 根据国际土壤颗粒质地分类标准, 供试土样为黏土。土壤体积质量为 1.49 g/cm<sup>3</sup>, 碱化度为 51.88%; 饱和浸提液的电导率 (EC<sub>e</sub>) 为 27.54 dS/m, pH 值为 10.38。根据美国碱土实验室盐碱土分类标准, 供试土壤为盐化碱土<sup>[1]</sup>。

### 1.2 供试水样

供试水源 (模拟雨水) 为地下承压水、潜水、蒸馏水, 其化学性质见表 1。地下承压水和潜水取自大安碱地生态试验站, 其中, 承压水井深 80 m, 潜水井深 20 m。

表 1 供试水源化学性质

Table 1 Quality of tested water

水源	电导率 (dS/m)	钠吸附比 (mmol <sub>c</sub> /L) <sup>1/2</sup>	pH
潜水	3.79	9.64	8.60
承压水	0.92	3.15	7.20
蒸馏水	0.01	0.31	7.32

### 1.3 饱和导水率测定

①基金项目: 国家科技部“973”项目 (2007CB106800)、国家科技支撑计划项目 (2007BAD65B02-6)、中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-13)、中国科学院东北地理所领域前沿项目 (KZCX3-SWNA3-41) 和吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目 (2007SYHZ0035) 资助。

\* 通讯作者 (wangzhichun@neigae.ac.cn)

作者简介: 迟春明 (1978—), 男, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要从事土壤盐碱化研究。E-mail: chichunming@126.com

饱和导水率应用南京土壤仪器厂生产的TST-55A型渗透率仪(常水头法)测定。将土样按体积质量 1.08、1.17、1.25、1.33、1.42 和 1.50 g/cm<sup>3</sup>均匀装入渗透率仪内高 4 cm、横截面积 30 cm<sup>2</sup>的环刀中。渗透率仪可以保持土样体积恒定,因此保证实验中土壤体积质量不发生改变。每个处理 3 次重复。分别用上述 3 种供试水源测定饱和导水率。土样饱和后,用广口瓶收集出流液。对实验所用土壤而言,24 h后淋洗液流速可以达到完全稳定状态,此时换用小三角瓶收集出流液,每 30 min测量 1 次淋洗液体积,共测定 6 次。

饱和导水率采用达西定律计算:

$$K_s = \frac{Q \times L}{A \times t \times H} \quad (1)$$

式中,  $K_s$  为饱和导水率 (cm/s),  $Q$  为渗透量 (ml),  $A$  为渗透横截面积 (cm<sup>2</sup>),  $t$  为渗透时间 (s),  $L$  为土柱长度 (cm),  $H$  为水头 (cm)。为了消除温度的影响,将测定的饱和导水率换算成 10℃ 下的饱和导水率,公式如下:

$$K_{s10} = \frac{K_s}{0.7 + 0.03T} \quad (2)$$

式中,  $K_s$  为某水温下的土壤饱和导水率 (cm/s),  $K_{s10}$  为 10℃ 时的土壤饱和导水率 (cm/s),  $T$  为水的温度 (℃)。

#### 1.4 淋洗液化学性质测定

用于测定化学性质的淋洗液是指流速稳定后收集的出流液。实验开始 26 h 后,收集 120 min 内的淋洗液,用于测定化学性质。测定指标为电导率 (EC) 和 pH 值。EC 采用 DDS-307 型电导率仪 (上海精密仪器厂) 测定, pH 用 PHS-3B 型便携式 pH 计 (上海雷磁科学仪器厂) 测定。

#### 1.5 数据统计分析

实验所得数据采用 SPSS12.0 进行统计分析。显著性检验、方差分析采用 AVOVA 进行。回归分析采用 Regression 中的 Curve Estimation 子程序进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质和体积质量对碱土饱和导水率的影响

2.1.1 水质对碱土饱和导水率的影响 水质对碱土饱和导水率的影响如图 1 所示。结果表明,在体积质量相等的情况下,供试碱土在不同水质下测定的饱和导水率从高到低的顺序为潜水 > 承压水 > 蒸馏水。而 3 种水源的电导率 (EC<sub>w</sub>) 从高到低的顺序也是潜水 > 承压水 > 蒸馏水。这说明,在土壤性质相同的情况下,EC<sub>w</sub> 越高,碱土饱和导水率越高。这与国内外

的研究结果相一致<sup>[2, 9-10]</sup>。一般而言,过量 Na<sup>+</sup> 的存在引发黏粒高度分散<sup>[6,8,19]</sup>,从而堵塞土壤孔隙<sup>[6,14]</sup>,导致土壤导水性降低<sup>[9,20]</sup>。而黏粒的凝絮作用与土壤溶液或灌溉水的电导率有关<sup>[5, 21-22]</sup>。具有较高电导率的土壤溶液或灌溉水能促进黏粒的凝絮作用,增强土壤团聚体的稳定性,从而提高土壤导水性<sup>[7, 9, 20-23]</sup>。图 1 中,蒸馏水、承压水、潜水的电导率依次增加,因而其对应的饱和导水率也依次增加。

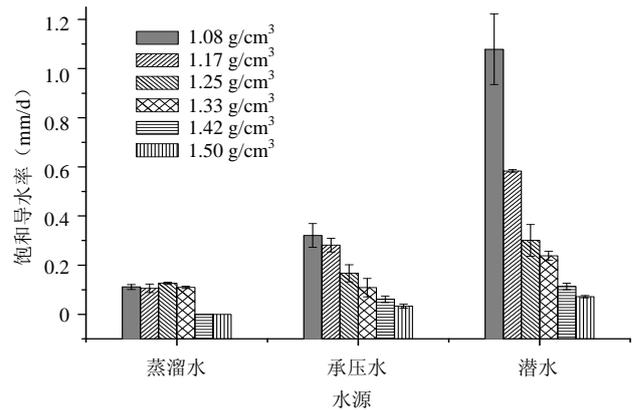


图 1 水质对不同体积质量碱土饱和导水率的影响

Fig. 1 Effect of water quality on hydraulic conductivity of sodic soils in different bulk density

尽管供试碱土饱和导水率随 EC<sub>w</sub> 的增加升高,但统计分析表明,当土壤体积质量达到 1.25 g/cm<sup>3</sup> 以上时,蒸馏水和承压水所对应的饱和导水率差异不显著 (p > 0.05); 而当土壤体积质量达到 1.50 g/cm<sup>3</sup> 时,潜水和承压水所对应的饱和导水率差异不显著 (p > 0.05)。这表明碱土饱和导水率不仅与水质有关,还受土壤体积质量的影响。

2.1.2 体积质量对碱土饱和导水率的影响 体积质量对碱土饱和导水率影响的统计分析结果见表 2。采用潜水和承压水测定时,  $K_{s10}$  随体积质量的逐渐增加而逐渐升高。值得注意的是,用潜水测定时,体积质量达到 1.25 g/cm<sup>3</sup> 后,  $K_{s10}$  差异不显著; 承压水测定时,体积质量 1.08 ~ 1.25 g/cm<sup>3</sup> 范围内  $K_{s10}$  差异不显著, 1.33 ~ 1.50 g/cm<sup>3</sup> 范围内,  $K_{s10}$  差异也不显著。而用蒸馏水测定的饱和导水率变化规律与潜水和承压水测定略有不同:  $K_{s10}$  在体积质量 1.08、1.17、1.25 和 1.33 g/cm<sup>3</sup> 情况下都为 0.11 mm/d; 在体积质量 1.42 g/cm<sup>3</sup> 和 1.50 g/cm<sup>3</sup> 情况下,实验没有收集到淋洗液,因此,  $K_{s10}$  均为 0 mm/d。尽管实验测得的  $K_{s10}$  为 0 mm/d,但是实验只进行了 28 h,如果延长实验时间可能会收集到淋洗液。因此,当蒸馏水入渗时,体积质量大情况下,短

时入渗不能获得碱土饱和和导水率的数值, 长时入渗

表 2 体积质量对碱土饱和和导水率的影响

Table 2 Effect of bulk density on saturated hydraulic conductivity of sodic soil

体积质量 (g/cm <sup>3</sup> )	饱和导水率 (mm/d)		
	潜水	承压水	蒸馏水
1.08	1.08 ± 0.1437 a	0.32 ± 0.0482 a	0.11 ± 0.0096 a
1.17	0.58 ± 0.0048 b	0.28 ± 0.0277 a	0.11 ± 0.0173 a
1.25	0.30 ± 0.0645 c	0.17 ± 0.0346 b	0.11 ± 0.0046 a
1.33	0.24 ± 0.0187 c	0.11 ± 0.0375 bc	0.11 ± 0.0046 a
1.42	0.11 ± 0.0126 d	0.06 ± 0.0127 c	0.00 ± 0.0000 b
1.50	0.07 ± 0.0047 d	0.03 ± 0.0083 c	0.00 ± 0.0000 b

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

碱土饱和和导水率的数值可能是很小, 几乎接近 0 mm/d。

一般而言, 土壤体积质量越大, 孔隙度越小, 饱和和导水率越小。但是, 使用蒸馏水测定的饱和和导水率表明: 土壤体积质量不相等, 饱和和导水率却相同(表 2)。这说明饱和和导水率除受土壤孔隙度影响外, 还与土壤孔隙分布特征密切相关<sup>[5]</sup>。在土壤体积质量差异很大, 即土壤孔隙度相差很大时, 如果土壤孔隙都以小孔隙存在(如孔隙直径  $< 2 \mu\text{m}$ ) 致使土壤水分处于束缚水状态, 那么土壤水分的流动性极低甚至不流动。因此, 体积质量相差很大的土壤其饱和和导水率可能相同。本实验结果很好地说明了这一点。

值得注意的是, 潜水测定条件下, 当土壤体积质量从 1.50 g/cm<sup>3</sup>降低到 1.25 g/cm<sup>3</sup>和 1.08 g/cm<sup>3</sup>时, 碱土饱和和导水率分别提高了 3.0 倍和 14.4 倍。在使用潜水和承压水测定时, 尽管不同体积质量情况下碱土饱和和导水率在统计学意义上具有显著差异, 但是其绝对数值仍然极低, 说明影响供试碱土饱和和导水率的主要因素是土壤黏粒分散度、团聚度和孔隙分布特征等。

## 2.2 水质和体积质量对碱土盐分淋洗的影响

2.2.1 水质对碱土盐分淋洗的影响 水质对碱土淋洗液电导率和 pH 的影响如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可见, 随着测定用水电导率增加(表 1), 淋洗液电导率和 pH 值不断降低。由于实验测定的是流速稳定后出流液的电导率和 pH 值, 因此该电导率和 pH 值可以在一定程度上反映碱土淋洗后的化学性质。也就是说, 流速稳定后淋洗液的电导率和 pH 值越低, 先前被淋洗的盐分就越多, 即盐分淋洗的效果越好。因此, 测定用水的电导率越高, 碱土中的盐分越容易被淋洗, 其机理可以解释为电解质效应和离子代换效应<sup>[24]</sup>。

2.2.2 体积质量对碱土盐分淋洗的影响 体积质

量对碱土淋洗液电导率和 pH 的影响如图 4 和图 5 所

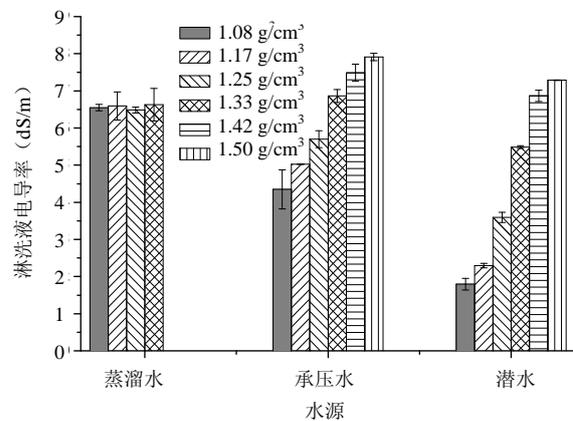


图 2 水质对不同体积质量碱土淋洗液电导率的影响

Fig. 2 Effect of water quality on leachate EC of sodic soils in different bulk density

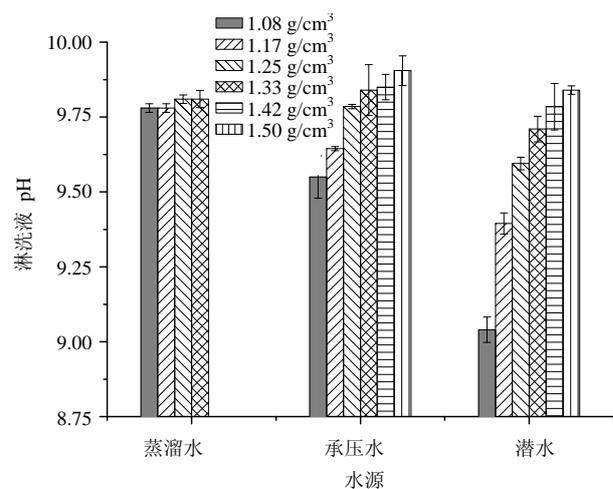


图 3 水质对不同体积质量碱土淋洗液 pH 值的影响

Fig. 3 Effect of water quality on leachate pH of sodic soils in different bulk density

示。由图 4 和图 5 可见，在潜水和承压水情况下，随着土壤体积质量的逐渐增加，淋洗液电导率和 pH 不断升高。因此，土壤体积质量越大，盐分淋洗效果越差。在蒸馏水情况下，随着土壤体积质量的升高，淋洗液电导率和 pH 基本不变。

### 2.3 碱土饱和导水率与盐分淋洗的关系

碱土饱和导水率与淋洗液电导率和 pH 值的关系如图 6 和图 7 所示。总体趋势为，随着碱土饱和导水率的增加，淋洗液电导率和 pH 值降低。根据曲线形状，可以进行指数方程拟合。电导率与饱和导水率的关系

曲线方程为：

$$EC = 1.31 + 7.38e^{-2.93K_{s10}} \quad (n = 16, R^2 = 0.9662) \quad (3)$$

pH 值与饱和导水率的关系方程为：

$$pH = 8.16 + 1.77e^{-0.65K_{s10}} \quad (n = 16, R^2 = 0.9867) \quad (4)$$

上述两方程经检验均具有极显著统计学意义 ( $p < 0.0001$ )，表明碱土盐分淋洗效果与饱和导水率密切相关。饱和导水率越高，碱土盐分淋洗的效果越好。因此，在碱土改良过程中，提高土壤通透性是必要条件之一。

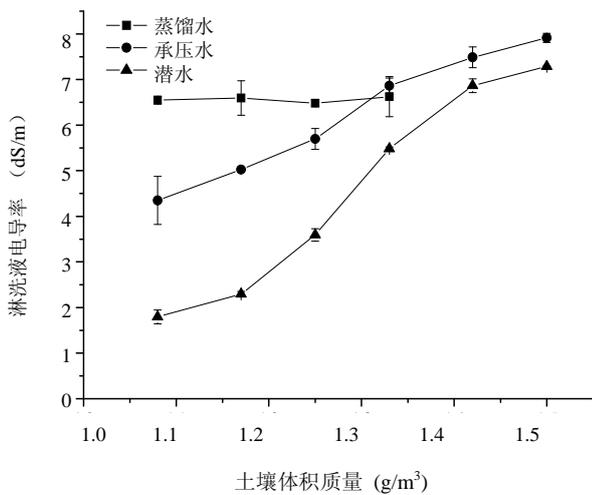


图 4 土壤体积质量对碱土淋洗液电导率的影响

Fig. 4 Effect of bulk density on leachate EC of sodic soil

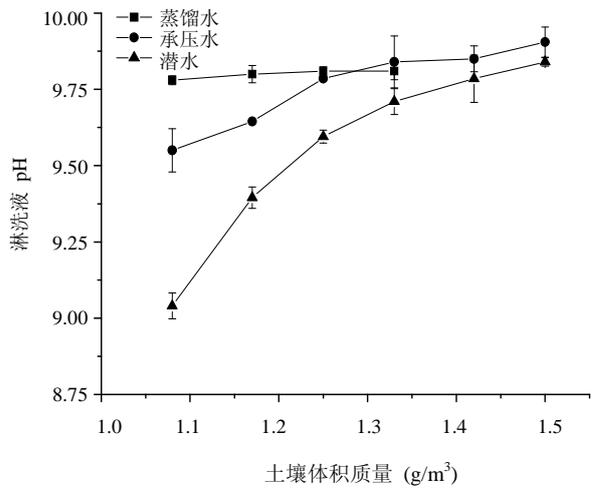


图 5 土壤体积质量对碱土淋洗液 pH 的影响

Fig. 5 Effect of bulk density on leachate pH of sodic soil

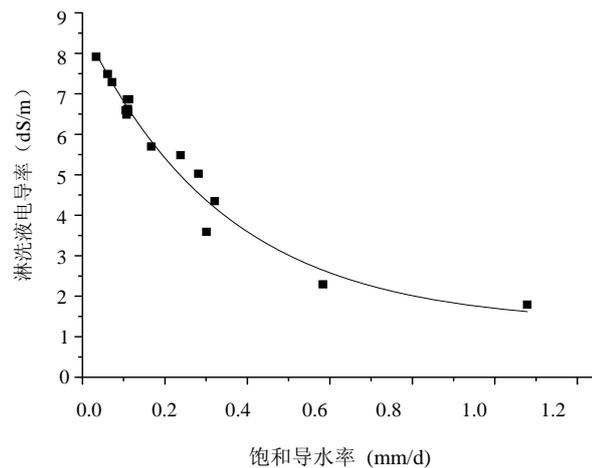


图 6 饱和导水率与淋洗液电导率的关系

Fig. 6 Relationship between hydraulic conductivity and leachate EC

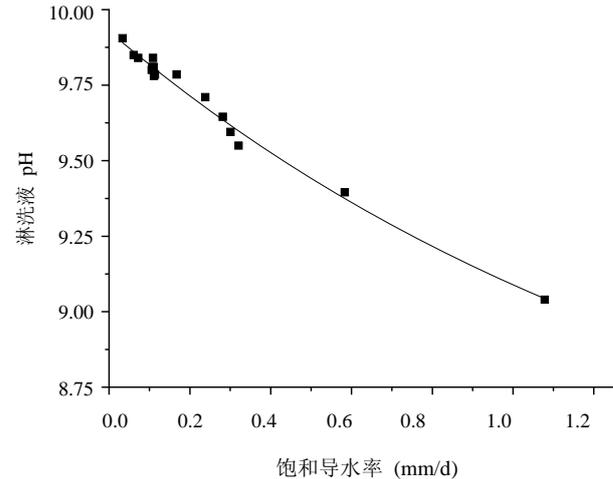


图 7 饱和导水率与淋洗液 pH 的关系

Fig. 7 Relationship between hydraulic conductivity and leachate pH

## 3 结论与讨论

在本实验条件下，碱土饱和导水率随灌溉用水电

导率增加和土壤体积质量降低而增加，盐分淋洗效果随饱和导水率提高而增强。这对松嫩平原盐碱土改良具有重要意义。根据该区盐碱土实际情况，种植耐盐

碱作物, 通过栽培与耕作措施降低土壤体积质量, 配合潜水灌溉, 可以促进土壤盐分淋洗, 实现盐碱土改良目标。

本实验结论是由室内土柱实验得出的。在田间实际条件下潜水灌溉和土壤体积质量对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响需要长期观测与研究。本区潜水属微咸水(矿化度在1~2 mg/L)虽然可以提高土壤饱和导水率和盐分淋洗效果, 但田间灌溉均在干旱季节进行, 潜水自身携带的盐分可能对耕层土壤构成次生盐渍化危险, 必需确定适当的淋洗定额。同时, 田间灌溉之后通常为雨季, 碱土实际导水率和盐分淋洗受到灌溉水和雨水交替作用的影响, 需要在以后工作中进行深入研究。

#### 参考文献:

- [1] United States Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S. Dep. Agric. Handb. No. 60. United States Salinity Laboratory, River-side, CA., 1954
- [2] Qiurk JP, Schofield PK. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *Journal of Soil Science*, 1955, 6(2): 163-178
- [3] McIntyre DS. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1979, 17: 115-120
- [4] Ilyas M, Qureshi RH, Qadir MA. Chemical changes in a saline-sodic soil after gypsum application and cropping. *Soil Technology*, 1997, 10: 247-260
- [5] Oades JM. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 1984, 76: 319-337
- [6] Frenkel H, Goertzen JO, Rhoades JD. Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42: 32-39
- [7] Oster JD, Schroer W. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43: 444-447
- [8] Hardy N, Shainberg I, Gal M, Keren R. The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation. *Journal of Soil Science*, 1983, 34: 665-676
- [9] Levy GJ, Rosenthal A, Torchitzky J, Shinberg I, Chen Y. Soil hydraulic conductivity changes caused by irrigation with reclaimed waste waters. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28:1658-1664
- [10] 王全九, 叶海燕, 史晓南, 苏莹. 土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 51-53
- [11] 陈效民, 茆泽圣, 刘兆普, 徐中祥. 大丰王港试验站滨海盐渍土饱和导水率的初步研究. *南京农业大学学报*, 1994, 17(4): 134-137
- [12] 秦耀东, 胡克林. 大孔隙对农田耕作层饱和导水率的影响. *水科学进展*, 1998, 9(2): 107-111
- [13] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 李宝山. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究. *水土保持通报*, 2000, 20(5): 11-13
- [14] 李保国, 胡克林, 陈德李, White RE. 农田土壤表层饱和导水率的条件模拟. *水利学报*, 1999 (2): 36-45
- [15] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 154-157
- [16] 胡伟, 邵明安, 王全九, 李毅. 取样尺度对土壤饱和导水率测定结果的影响. *土壤学报*, 2005, 42(6): 1041-1044
- [17] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用. *土壤通报*, 1999, 30(4): 158-159, 177
- [18] 李彬, 王志春, 梁正伟, 迟春明. 吉林省大安市苏打碱土碱化参数之间的关系. *土壤通报*, 2007, 38(3): 443-446
- [19] Bauder JW, Brock TA. Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching. *Arid Land Research and Management*, 2001, 15: 101-113
- [20] Shainberg I, Letey J. Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 1984, 61: 21-57
- [21] Rengasamy P, Greene RSB, Ford GW, Mehanni AH. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. *Australian Journal of Soil Research*, 1984, 22: 413-431
- [22] Quirk JP. The significance of the threshold and turbidity concentrations in relation to sodicity and microstructure. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39, 1185-1217
- [23] Shainberg I, Rhoades JD, Prather RJ. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 273-277
- [24] 李取生, 王志春, 李秀军. 苏打盐渍土壤微咸水淋洗改良技术研究. *地理科学*, 2002, 22(3): 342-348

## Effects of Water Quality and Bulk Density on Saturated Hydraulic Conductivity and Salt Leaching of Sodic Soil

CHI Chun-ming<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-chun<sup>1</sup>

(1 *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China;*

*2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** This paper was to study the effect of water quality and bulk density on saturated hydraulic conductivity ( $K_{s10}$ ) and on salt leaching, and study the relationship between  $K_{s10}$  and leachate EC,  $K_{s10}$  and leachate pH. Results showed:  $K_{s10}$  increased with the increment of irrigation water quality;  $K_{s10}$  decreased with the increase of bulk density of sodic soil when shallow and deep ground water were used; while when distilled water was used,  $K_{s10}$  value was 0.11 mm/d and 0 mm/d with bulk density of sodic soil ranging from 1.08 g/cm<sup>3</sup> to 1.33 g/cm<sup>3</sup> and from 1.42 g/cm<sup>3</sup> to 1.50 g/cm<sup>3</sup>, respectively; the values of EC and pH of leachate decreased with the increase of irrigation water quality; when shallow and deep ground water were used, the values of EC and pH of leachate increased with the increment of bulk density of sodic soil; while the values of EC and pH of leachate didn't vary with the increment of bulk density of sodic soil; the values of EC and pH decreased with the increase of  $K_{s10}$ , the relationships between EC and  $K_{s10}$ , pH and  $K_{s10}$  follow the exponential function.

**Key words:** Water quality, Bulk density, Sodic soil, Saturated hydraulic conductivity, EC, pH