

再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤水盐和碱性的影响

商放泽, 任树梅, 邹添, 杨培岭^{*}

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究再生水利用对土壤盐碱性影响的特殊性, 采用室内大型土槽试验, 对比研究了清水、再生水和钠吸附比 (sodium adsorption ratio, SAR) 分别为 3、10 和 20 (mmol_e/L)^{0.5} 的盐溶液入渗与蒸发 10 次 (模拟灌溉 2 a) 期间对土壤及土壤溶液盐分迁移累积和碱性的影响。结果表明: 与清水相比, 再生水和 SAR 值为 20 (mmol_e/L)^{0.5} 的盐溶液处理中 0~40 cm 深度壤土含水率较高, 80~120 cm 砂土含水率的增加产生滞后现象; 再生水和盐溶液入渗与蒸发后土壤中盐分产生累积, 累积量为 9.54%~51.83%, 而再生水处理中淋洗液带出的盐分最多, 是其他处理的 1.09~1.42 倍。清水、再生水和盐溶液处理土壤溶液钠吸附比(SAR)<3 (mmol_e/L)^{0.5}, 土壤 pH 值<8.5, 再生水和盐溶液入渗与蒸发引起土壤碱化的风险较低。再生水入渗与蒸发后土壤溶液中 K^+ 和 Ca^{2+} 在土体中的迁移分布与清水和盐溶液处理不同, 再生水对土壤中 Cl^- 有较强的淋洗作用, 长期再生水灌溉过程中土壤 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 的迁移和淋洗需要引起重视。试验结果对农业中长期安全合理利用再生水具有指导意义。

关键词: 土壤, 入渗, 蒸发, 再生水, 盐溶液, 盐分, 碱性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.016

中图分类号: S153

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0120-10

商放泽, 任树梅, 邹添, 等. 再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤水盐和碱性的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 120—129.

Shang Fangze, Ren Shumei, Zou Tian, et al. Effects of infiltration and evaporation with treated wastewater and salt solutions on soil moisture and salinize-alkalization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 120—129. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着经济和人口的增长, 中国工业用水、生活用水和生态用水比例将增大, 而农业用水占全部用水的比例将减小^[1]。再生水作为一种城市污水经过处理可再次利用的水, 为缓解农业用水压力提供了一条新途径, 农业灌溉也成为再生水的主要利用形式^[2]。国内外田间试验表明, 再生水灌溉后能提高或不影响作物产量^[3-5], 但与清水相比, 再生水中含较多的盐分离子, 短期或长期再生水灌溉农作物或绿地增加了表层 0~30 cm 土壤的盐分^[6-9], 同时再生水中较高的 Na^+ 浓度在一定程度上有引起土壤碱化的风险^[10-12], 但也有研究发现再生水灌溉对土壤盐分的影响不显著^[13-14]。 Na^+ 是再生水中浓度较高的盐分离子, 而钠吸附比 (sodium adsorption

ratio, SAR) 是指 Na^+ 浓度与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度之和平方根的比值, Na^+ 浓度过高会导致土壤黏粒的膨胀和分散^[15], 而且灌水引发的盐分累积与灌水水中的 SAR 值有直接关系^[16]。再生水水质、灌水方式、土壤质地和气候等因素的差异是影响再生水灌溉后土壤盐碱性差异的主要原因。同时, 再生水灌溉入渗补给地下水的过程中, 会引起地下水中盐分的增加^[17-19]。因此, 再生水中盐分离子的迁移累积成为再生水农业灌溉的主要问题之一。

北京郊区再生水灌溉面积已达 3.33 万 hm^2 ^[20], 特别是 2008 年开始实施东南郊水网工程后, 东南郊地区年引水能力超过 2 亿 m^3 , 再生水为农业灌溉提供了大量水源, 但长期再生水灌溉下土壤中盐分离子的迁移特性和土壤盐碱性的变化规律有待进一步研究。国内外对灌水中 SAR 值对土壤饱和和导水率影响的研究较多^[21-23], 对清水和再生水灌溉对土壤盐分影响的对比研究也较多^[24-27], 但是有关清水、再生水以及不同 SAR 值的盐溶液灌溉对土壤和土壤溶液盐碱性以及离子迁移的对比研究相对缺乏, 同时国内的再生水灌溉入渗与蒸发模拟试验大部分以小型土柱为基础, 模拟田间实际的效果不理想。针对以上特点, 本文以构建东南郊地区典型包气带结构的室内大型土槽为基

收稿日期: 2012-12-12 修订日期: 2013-05-21

基金项目: 水利部公益性行业科研专项 (201101051); 国家自然科学基金项目 (51279204); 北京市教委专业建设项目-精品教材建设

作者简介: 商放泽 (1988—), 男, 云南大理人, 博士生, 主要从事再生水利用、水土资源与环境研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: shangfangze@126.com

*通信作者: 杨培岭 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境、灌溉理论与技术等研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: yangpeiling@126.com

础,深入研究清水、再生水和不同 SAR 值溶液入渗与蒸发(模拟灌溉)条件下土壤和土壤溶液中盐分离子的运移特性和土壤盐碱性变化特征,旨在探讨再生水入渗与蒸发对土壤和土壤溶液盐碱性影响的特殊性,为再生水在农业中长期合理的利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为壤土和砂土,壤土取自通州区永乐店镇,砂土取自大兴区庞各庄镇,土样运回实验室后风干、筛分和均匀混合。土壤基本物理参数见表 1,土壤盐分离子初始值见表 2。

表 1 土壤基本物理参数

Table 1 Physical properties of experimental soils

取土样地点 Site	不同粒径颗粒所占百分比组成 Percentage of different size particles/%			土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	田间持水率 Field water-holding capacity/(g·g ⁻¹)	饱和含水率 Saturated moisture/(g·g ⁻¹)
	0.02~2 mm	≥0.002~ 0.02 mm	<0.002 mm				
通州区 Tongzhou district	54.042	37.852	9.106	壤土 Loam	1.4	0.228	0.325
大兴区 Daxing district	88.488	8.126	3.386	砂土 Sandy soil	1.4	0.188	0.287

表 2 土壤盐分初始值

Table 2 Background value of salt ions for experimental soils

取土样地点 Site	pH 值 pH value	EC _{1:5} (dS·m ⁻¹)	K ⁺ (mg·kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg·kg ⁻¹)	Na ⁺ (mg·kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg·kg ⁻¹)	Cl ⁻ (mg·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg·kg ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg·kg ⁻¹)
通州区 TongZhou district	8.3	0.269	8.6	89.1	48.2	32.6	14.6	98.3	249.0
大兴区 Daxing district	8.4	0.249	13.3	78.3	33.2	30.2	19.2	72.6	240.0

注: EC_{1:5} 表示干土和水质量比为 1:5 时用电导率仪测定的土壤溶液的电导率值。

Note: EC_{1:5} means the electrical conductivity of solution whose mass ratio of dry soil and water is 1:5.

1.2 入渗与蒸发水质

用于入渗与蒸发(模拟灌溉)的水分为 3 类,清水、再生水和盐溶液。清水取自中国农业大学自来水, SAR=0.74 (mmol_c/L)^{0.5}; 再生水取自北京市清河污水处理厂二级沉淀出水, SAR=2.75 (mmol_c/L)^{0.5}; 盐溶液通过在去离子水中加入定量的 NaCl 和 CaCl₂ (试剂级) 后配置而成。

根据公式 (1) 和式 (2),

$$SAR = Na^+ / \sqrt{Ca^{2+} / 2} \quad (1)$$

$$Na^+ + Ca^{2+} = 10 \quad (2)$$

式中 Na⁺、Ca²⁺ 分别表示溶液中 Na⁺ 和 Ca²⁺ 的摩尔浓度, mmol_c/L。配置浓度为 10 mmol_c/L 而 SAR 值分别为 3、10 和 20 (mmol_c/L)^{0.5} 的盐溶液, SAR3 溶液、SAR10 溶液和 SAR20 溶液分别表示 SAR=3、10 和 20 (mmol_c/L)^{0.5} 的盐溶液。试验中用于入渗与蒸发的水质见表 3。

表 3 不同类型水水质指标

Table 3 Quality of different kinds of water

类型 Irrigation water types	pH value	EC (dS·m ⁻¹)	K ⁺ (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg·L ⁻¹)	TP (mg·L ⁻¹)	TSS (mg·L ⁻¹)	DOM (mg·L ⁻¹)
清水 Clear water	7.84	0.714	8.00	52.36	14.5	18.91	22.9	75	142	0.06	0.01	1.3	4.5
再生水 Treated wastewater	7.78	0.994	8.91	96.59	106.13	40.66	105	104	242	15.26	0.85	6.2	82.5
SAR3 溶液 Salt solution with SAR=3	8.20	0.965	0	286.93	282.55	0	355	0	0	0	0	0	0
SAR10 溶液 Salt solution with SAR=10	7.56	1.043	0	83.25	497.25	0	355	0	0	0	0	0	0
SAR20 溶液 Salt solution with SAR=20	7.02	1.245	0	25.27	558.35	0	355	0	0	0	0	0	0

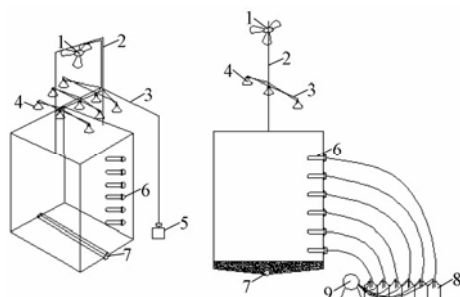
注: TP, total phosphorus (总磷); TSS, total suspended solids (总悬浮固体颗粒物); DOM, dissolved organic matter (溶解性有机质)。

1.3 试验装置及土槽填装

土槽的建设和填装: 土槽用黏土砌成, 并在其 4 个侧壁涂抹水泥, 共建设 5 个土槽, 每个土槽长 1.2 m、宽 1.2 m、高 1.5 m, 内壁和底部采用防水胶涂覆形成防水层。土槽底部具有 5°坡度, 底部从下到上依次设有反滤层和透布, 反滤层由石英砂制成, 目的是防止渗滤液携带土壤流出土槽。根据东南郊 80 cm 深度以上为壤土, 80~120 cm 为砂土的

典型包气带结构, 土槽下层填装 40 cm 厚的砂土, 然后再填装 80 cm 厚的壤土, 以田间实际土壤容重进行填装, 以 5 cm 为 1 层从下往上逐层填装, 下一层填装之前, 把前一层土壤表面划光。土壤填装完成后, 距每个土槽右边界 45 cm 处沿土壤顶端向下 15、25、45、65、85、105 和 125 cm 处设置直径为 25 mm 的取样口。土壤填装过程中, 当土壤填充高度超过预设取样口 1 cm 时, 埋设土壤溶液提取器。

模拟蒸发系统的安装：蒸发系统包括第一支架、风扇、配电箱、第二支架以及安装在第二支架上的 275 W 红外线灯。第一支架架设在土槽的上方，风扇吊挂在第一支架上，第二支架固定在第一支架上，位于风扇的下方，为了确保光线均匀照射到土壤表面，试验设置了 3 排第二支架，每排第二支架上设有 3 个红外线灯，风扇和红外线灯分别通过电线与配电箱连接。土槽入渗与蒸发模拟系统示意图如图 1 所示。



1. 风扇 2. 支架 3. 电源线 4. 红外线灯 5. 配电箱 6. 陶土头
7. 淋洗液出口 8. 取样瓶 9. 真空泵
1. Electric fan 2. Support 3. Electric wire 4. Infrared lamp 5. Distribution box 6. Clay head 7. Eluent outlet 8. Sample bottle 9. Vacuum pump

图 1 土槽入渗与蒸发模拟系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of infiltration and evaporation system of soil bin

1.4 入渗与蒸发量设计

参照北京市平原区平水年冬小麦灌溉定额 200 mm，灌水 4 次；夏玉米灌溉定额 30 mm，灌水 1 次。则 1.2 m×1.2 m 的试验土槽模拟年入渗量为 330 L，每年入渗 5 次，每次入渗量为 66 L，每隔 10 d 入渗 1 次。试验灌溉入渗方式为漫灌，模拟灌溉年份为 2 a。土槽填充结束后，向 5 个土槽中灌以相应的入渗水 66 L，每次入渗结束（上午 09:00）后开启风扇 8 h，入渗结束后的第 2、4、6 和 8 天每天上午 09:00 开启红外线灯 0.5 h，以提高土壤蒸发强度。开启红外线灯和风扇时实测水面蒸发强度平均值为 2.5 mm/d，只开风扇时水面蒸发强度平均值为 1.5 mm/d。

1.5 取样和测试方法

第 2 次入渗结束后 10 d 及每 2 次入渗前 1 d 利用真空泵提取土壤溶液，第 10 次入渗结束后 10 d 取土壤样品；在相同时间观测土壤 0~10、>10~30、>30~50、>50~70、>70~90、>90~110 cm 土层的含水率。土壤和土壤溶液测定指标有 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ，土壤还测定含水率和 pH 值，土壤溶液还测定电导率（electrical conductivity, EC）值和钠吸附比（SAR）值。测定土壤指标时直接测定土水比为 1:5 的浸提液中的相应指标，然后换算为土壤

中的指标，土壤溶液直接测定相关指标，土壤和淋洗液中的盐分根据 EC 值换算。土壤含水率采用德国 IMKO 公司制造的土壤水分测定仪（TRIME）测定，并用烘干法对 TRIME 所测定的土壤含水率进行校正。土壤和土壤溶液中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 采用等离子质谱法测定， SO_4^{2-} 和 Cl^- 采用离子色谱法测定， HCO_3^- 采用容量法测定^[25]。土壤浸提液 pH 值和土壤溶液 EC 值用梅特勒便携式 pH/EC 多参数仪测定。数据用 SPSS 17.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 清水、再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤含水率和土壤盐分的影响

2.1.1 土壤含水率的变化

土壤水分是盐分运移的载体^[27]，水分的分布对盐分迁移有重要影响。本试验中入渗（模拟灌溉）水量只包括田间作物需要人工灌溉的水量，不包括自然降雨补充的水量，因此试验条件与田间实际有一定的差异。不同处理土壤含水率的变化如图 2 所示。前 5 次入渗与蒸发期间（模拟灌溉 1 a）不同土层含水率差异较小，第 6 次入渗与蒸发后，80 cm 以上壤土中含水率比 80 cm 以下砂土中小，这首先是土壤质地的差异引起的，其次由于入渗次数的增加，进入土壤中的水分增多，土壤含水率逐渐超过田间持水率，水分主要受重力作用而沿着土壤孔隙向下渗漏，使底层 80~120 cm 砂土逐渐达到饱和，最大值接近饱和含水率 28.7%（见表 1），土壤含水率达到饱和后，多余的水分受重力作用向下渗漏，经由土槽底部出流管流出土体，最终使底层 100~120 cm 土壤含水率低于饱和含水率，而在 80~100 cm 处出现峰值。

10 次入渗与蒸发（模拟灌溉 2 a）0~40 cm 土层中不同处理土壤含水率的平均值在 18.51%~20.21%，SAR20 溶液处理含水率最大，再生水次之，清水最小。因为各盐溶液处理中 SAR 值比清水大，其可溶性 Na^+ 浓度较高而使土壤黏粒分散和膨胀，这些微小颗粒堵塞了土壤孔隙，使土壤导水性能降低，水分不易迁移，含水率增大，与 Minhas 等^[28]关于灌溉水中 SAR 对土壤水分的影响结果相似；而再生水中溶解性有机质（dissolved organic matter, DOM）对土壤黏粒的弥散作用^[29]和悬浮固体颗粒物对土壤孔隙的堵塞也使再生水入渗后土壤导水率下降，水分迁移困难。另外，SAR20 溶液和再生水处理土壤 80~120 cm 含水率达到饱和所用的时间比其他处理多，产生滞后现象（图 2）。

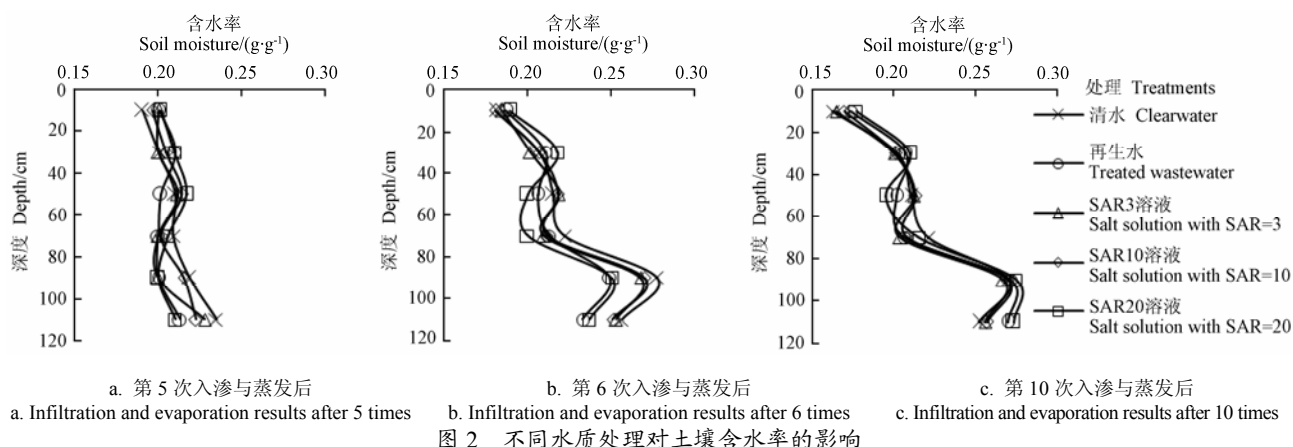


Fig.2 Effects of different water treatments on soil moisture after infiltration and evaporation

2.1.2 土壤溶液电导率 (EC) 值的变化

不同处理土壤溶液中 EC 值随入渗与蒸发次数的变化如图 3 所示。不同处理土壤溶液 EC 值随深度的增加而逐渐增大, 底层 90 和 110 cm 处提取的溶液 EC 值比 90 cm 以上溶液高, 差值在 1 dS/m 以上, 因为在水分的入渗淋洗作用下, 土壤中可溶性阳离子和阴离子被淋洗至底层, 底层土壤中淋洗液逐渐达到饱和, 溶液中盐分含量增加。入渗与蒸发 5 次 (模拟灌溉 1 a) 后, 开始有淋洗液淋出土槽, 并且

随入渗次数的增加, 淋出土槽的淋洗液体积逐渐增加, 由于“盐随水走”^[30], 淋洗液盐分浓度逐渐降低, 因此出现 90 和 110 cm 处提取的溶液 EC 值随灌水次数的增加而逐渐减小的现象。入渗与蒸发过程中, 壤土溶液中 EC 值较稳定, 而砂土溶液中盐分表现出了随水分向深层土壤迁移的特性。不同处理土壤溶液 EC 平均值大小为: SAR20 溶液>SAR10 溶液>SAR3 溶液>再生水>清水, 清水处理土壤溶液 EC 平均值与其他处理差异显著 ($\alpha<0.05$)。

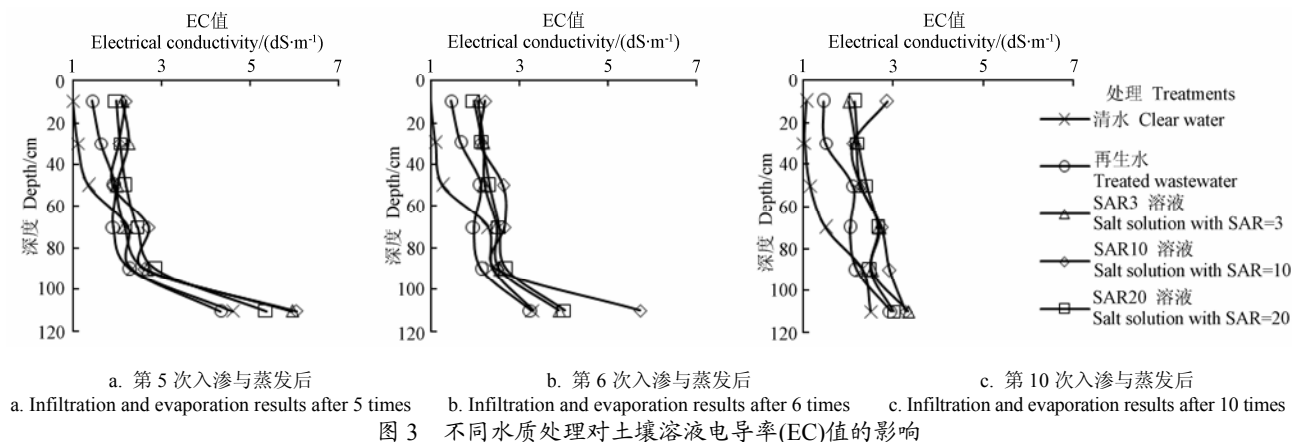


Fig.3 Effects of different water treatments on electrical conductivity of soil solution after infiltration and evaporation

2.1.3 土壤盐分的平衡分析

土壤盐分的盈亏变化可用式 (3) 表示,

$$\Delta S = (S_e + S_0) - (S_b + S_i) \quad (3)$$

式中, ΔS 为土体中储盐量的变化, g; S_e 为入渗与蒸发终期土壤含盐量, g; S_0 为流出液中的含盐量, g; S_b 为初始土壤含盐量, g; S_i 为入渗带入的盐量, g。

不同处理土槽中盐分的平衡状况见表 4, 试验结束后盐分相对误差小于 10%, 表明试验结果可靠。入渗与蒸发 10 次 (模拟灌溉 2 a) 后, 清水处理土壤含盐量几乎不变。再生水处理土壤中盐分有

累积, 含盐量增加了 9.54%, 可能是再生水中的盐离子部分被土壤胶体吸附, 部分发生迁移淋洗。而 SAR3、10 和 20 (mmol/L)^{0.5} 的盐溶液处理土壤含盐量分别增加了 30.27%、39.16% 和 51.83%, 因为盐溶液中 Na^+ 浓度是再生水的 2~5 倍, 高浓度的 Na^+ 使土壤结构破坏, 土壤盐分随水分迁移淋洗的途径被削弱, 土壤盐分发生累积, 统计分析表明不同处理土壤中盐分累积量差异显著 ($\alpha<0.05$)。再生水处理淋洗液中的含盐量最多, 是其他处理的 1.09~1.42 倍, 其中再生水与 SAR3 溶液 EC 值接近, 但再生水入渗与蒸发后盐分随土壤溶液迁移淋洗的量是 SAR3 溶液处理的 1.42 倍, 而在土壤中累

积的量只有 SAR3 溶液处理的 84.08%。

对不同处理土壤溶液和土壤中盐分变化的分析表明，与清水相比，再生水和盐溶液入渗与蒸发

使盐分在土壤中累积。与盐溶液相比，再生水处理盐分随水分迁移出土体的量较多而累积在土壤中的量较少。

表 4 试验土体盐分平衡分析表
Table 4 Soil salt balance after 10 times of infiltration and evaporation

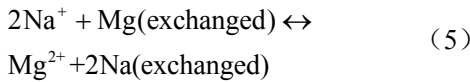
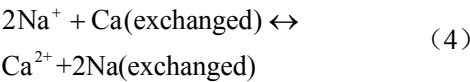
灌溉水质 Quality of irrigation water	初始含盐量 Soil salt quantity before experiment/g	入渗水含盐量 Salt quantity in irrigation water/g	最终含盐量 Soil salt quantity after experiment/g	流出水含盐量 Salt quantity in leachate/g	相对误差值 Relative error/%	盐分累积 Percentage of salt accumulation quantity/%
清水 Clear water	589.82	301.38	585.81	372.50	7.53	-0.68
再生水 Treated wastewater	589.82	419.87	646.06	405.47	4.14	9.54
SAR3 溶液 Salt solution with SAR=3	589.82	407.62	768.37	285.23	5.63	30.27
SAR10 溶液 Salt solution with SAR=10	589.82	440.56	820.79	310.05	9.75	39.16
SAR20 溶液 Salt solution with SAR=20	589.82	525.89	895.54	320.14	8.96	51.83

2.2 清水、再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤溶液和土壤碱性的影响

2.2.1 土壤溶液钠吸附比（SAR）的变化

不同处理土壤溶液中 SAR 值随入渗与蒸发次数的变化如图 4 所示。不同处理土壤溶液中 SAR 值始终低于 3 (mmol/L)^{0.5}，碱性危害程度处于轻微或无危害水平。不同处理土壤溶液中 SAR 值呈“K”型分布，这是因为表层土壤受到红外线灯照射以及风扇产生的风力使土壤水分蒸发强烈，盐分离子随水分向上迁移，Na⁺代换 Mg²⁺和 Ca²⁺，使土壤溶液 SAR 值增大，而土壤淋洗液在底层聚积，导致盐分

离子也累积并发生离子代换反应^[20]，离子代换方程式如下^[31]。



不同处理土壤溶液中 SAR 平均值无显著差异。相关性分析表明 0~120 cm 土层土壤溶液 EC 平均值与 SAR 平均值有一定相关性，但土壤溶液 SAR 值并不随 EC 值的增大而增加，表明盐分的增大不一定引起土壤的碱化。

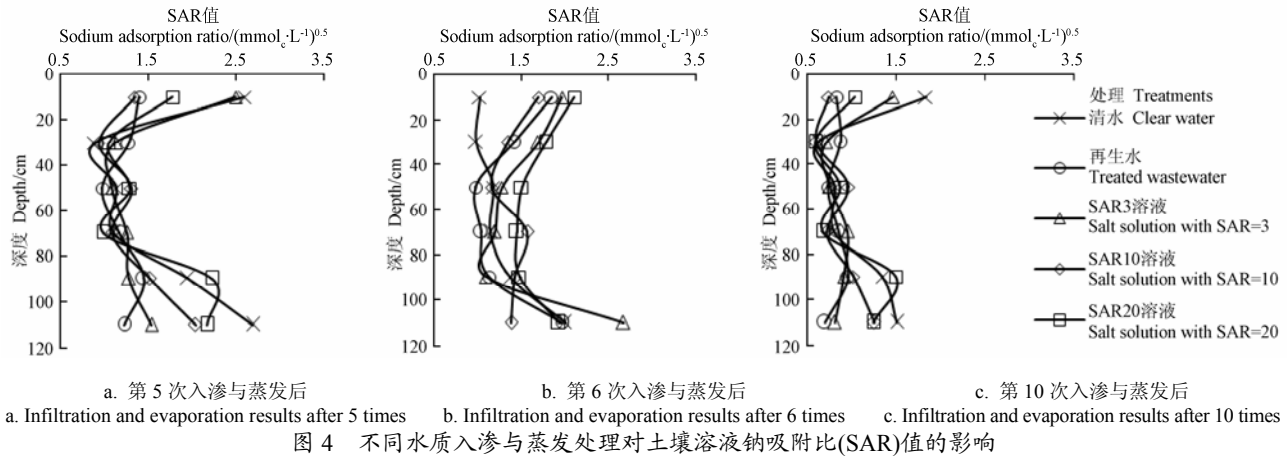


图 4 不同水质入渗与蒸发处理对土壤溶液钠吸附比(SAR)值的影响
Fig 4 Effects of different water treatments on sodium adsorption ratio value of soil solution after infiltration and evaporation

2.2.2 入渗与蒸发 10 次后土壤 pH 值的变化

入渗与蒸发 10 次（模拟灌溉 2 a）后不同处理土壤 pH 值在不同土层的分布如图 5 所示。不同处理在 0~80 cm 土层中 pH 值均小于初始值，而在 80 cm 深度以下土壤中 pH 值大部分大于初始值，但土壤 pH 值在同一土层变化幅度小于 2.6%，原因一是下层土壤基本达到饱和，入渗溶液与土壤接触更充分，对土壤 pH

值的影响更显著；二是虽然土壤具有较强的缓冲能力^[11]，但砂土中有机质和黏粒含量少，对酸碱的缓冲能力比壤土弱。与 SAR3 溶液相比，再生水处理土壤 pH 值较低，可能是再生水中含有的 N、P 等养分作用的结果（表 3），不同处理之间无显著差异。入渗与蒸发试验结束后，土壤 pH 值范围为 8.11~8.49，处于适宜耕作范围内（7.7~8.5）。

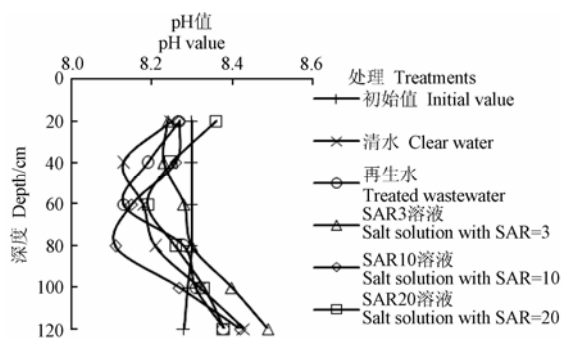


图 5 不同水质处理入渗与蒸发 10 次后土壤 pH 值
Fig.5 Soil pH value of different water treatments after 10 times of infiltration and evaporation

对不同处理土壤溶液和土壤碱性的分析表明, 所有处理土壤溶液 SAR 值小于 3 (mmol/L)^{0.5}, pH 值小于 9, 没有达到碱土的标准, 再生水和盐溶液入渗与蒸发引起土壤碱化的风险较低。清水、再生水和盐溶液对土壤溶液和土壤碱性的影响无显著差异。

2.3 清水、再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤溶液和土壤中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的影响

2.3.1 入渗与蒸发 10 次后土壤溶液 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的质量浓度

入渗与蒸发 10 次后, 不同处理土壤溶液中阳离子质量浓度如图 6 所示。土壤溶液 K^+ 质量浓度在 0~32 mg/L , 再生水处理土壤溶液不同深度 K^+ 的分布与其他处理不同, 表现为 K^+ 质量浓度分别在 30 和 110 cm 处出现峰值, 而清水和盐溶液处理不同深度 K^+ 质量浓度分布相似, 表现为在 0~90 cm 土层主要随深度增加而逐渐减小。清水中 K^+ 质量浓度

与再生水接近 (见表 3), 但在剖面中分布却不同, 可能是再生水中悬浮固体颗粒物和胶体等影响土壤胶体对 K^+ 的吸附。

Ca^{2+} 质量浓度在 60~300 mg/L , 再生水处理 Ca^{2+} 分布与其他处理不同, 表现为 Ca^{2+} 质量浓度在 0~50 cm 土壤中随深度增加而增大, 在 50 cm 深度以下变化较小。而清水和盐溶液处理不同深度 Ca^{2+} 质量浓度的分布类似, 表现为在 0~50 cm 土壤中随深度增加而减小, 在 50~110 cm 土壤中随深度增加而增大。再生水入渗与蒸发过程中对土壤溶液中 K^+ 和 Ca^{2+} 的影响值得注意。不同处理对土壤溶液 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量浓度清水与其他处理差异显著 ($\alpha < 0.05$), 说明再生水和盐溶液入渗与蒸发对土壤溶液 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量浓度的影响与清水不同。

2.3.2 入渗与蒸发 10 次后土壤 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的质量比

入渗与蒸发 10 次后, 不同处理土壤中阳离子质量比如图 7 所示。土壤 K^+ 质量比在 0~15 mg/kg , 入渗水分的淋洗作用使土壤中 K^+ 向下层土壤迁移, 砂土由于淋洗液汇集而逐渐饱和, K^+ 富集在 80~120 cm 砂土中, 统计分析表明只有清水与其他处理之间 K^+ 质量比差异显著 ($\alpha < 0.05$)。土壤 Ca^{2+} 质量比在 50~110 mg/kg , 不同处理土壤 Ca^{2+} 质量比在不同深度处大部分都小于初始值, 减小幅度最大的为 39%, 原因是灌水中的 Na^+ 浓度较高, 发生离子代换反应而置换出土壤中的 Ca^{2+} , 导致土壤中的 Ca^{2+} 质量比减小, 这与土壤溶液中 Ca^{2+} 质量浓度增加的现象相呼应。统计分析表明只有清水与其他处理之间 Ca^{2+} 质量比差异显著 ($\alpha < 0.05$)。

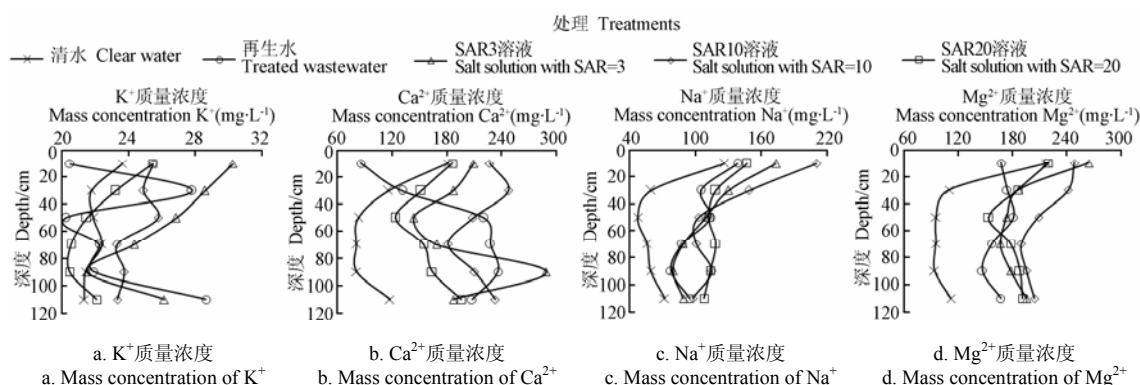


图 6 入渗与蒸发 10 次后不同处理土壤溶液中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量浓度
Fig.6 Mass concentrations of K^+ , Ca^{2+} , Na^+ and Mg^{2+} in soil solution after 10 times of infiltration and evaporation with different water treatments

对不同处理土壤溶液和土壤中阳离子含量分布的分析表明, 再生水和盐溶液入渗与蒸发后土壤溶液中阳离子质量浓度大部分比清水处理大。由于阳离子之间发生离子代换作用, 以及再生水作为多物质共存体系 (盐分、养分、悬浮固体颗粒物、胶

体和溶解性有机质等) 影响土壤对离子的吸附, 再生水处理土壤溶液中 K^+ 和 Ca^{2+} 在不同深度土壤中的分布与清水和盐溶液处理不同, 而清水处理与其他处理之间 K^+ 和 Ca^{2+} 质量比差异显著 ($\alpha < 0.05$)。不同处理土壤 Na^+ 和 Mg^{2+} 质量比无显著差异。

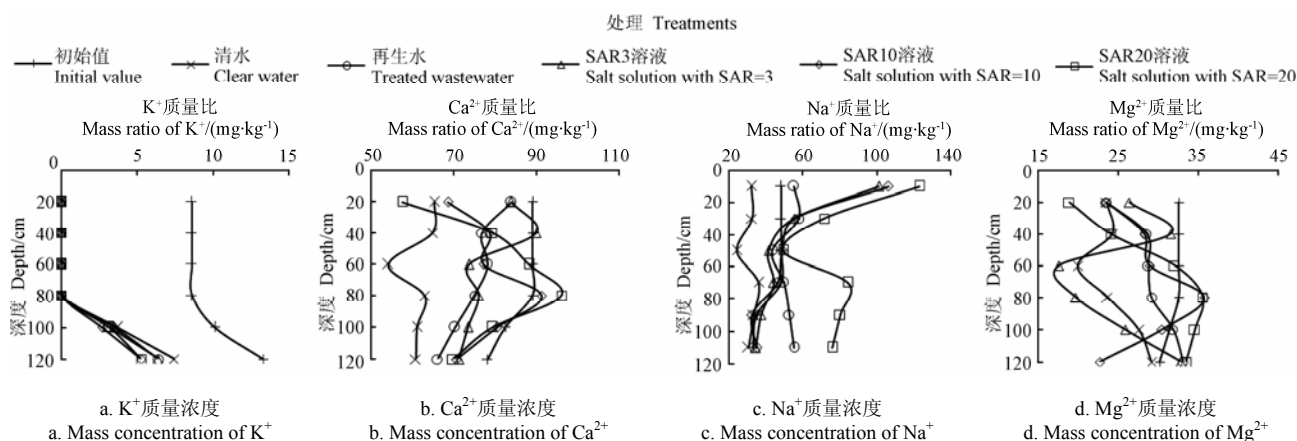


图 7 入参与蒸发 10 次后不同处理土壤中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的质量比

Fig.7 Mass ratio of K^+ , Ca^{2+} , Na^+ and Mg^{2+} in soil profile for different water treatments after 10 times of infiltration and evaporation

2.4 清水、再生水及盐溶液入参与蒸发对土壤溶液和土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的影响

2.4.1 入参与蒸发 10 次后土壤溶液 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的质量浓度

入参与蒸发 10 次后, 不同处理土壤溶液中阴离子的质量浓度如图 8 所示。 Cl^- 质量浓度在 0~600 mg/L, 与清水相比, 再生水和盐溶液处理土壤溶液中 Cl^- 质量浓度明显较大, 不同处理 Cl^- 平均质量浓度大小为: SAR3 溶液 > 再生水 > SAR10 溶液 > SAR20 溶液 > 清水, 清水处理与其他处理之间差异显著 ($\alpha < 0.05$)。再生水中 Cl^- 质量浓度只有盐溶液的 0.3 倍, 但再生水处理土壤溶液中 Cl^- 质量浓度分别是

SAR3 溶液、SAR10 溶液和 SAR20 溶液的 0.95、1.14 和 1.29 倍, 与清水和盐溶液相比, 再生水处理更易使 Cl^- 发生淋洗, 可能是再生水中存在的养分和溶解性有机质 (DOM) 等物质增强了再生水对土壤中 Cl^- 的溶解能力, 也可能是再生水对土壤的溶解引起土壤胶体电荷的失衡, 土壤胶体要维持电中性, 释放 Cl^- 的量增大。 SO_4^{2-} 质量浓度在 0~600 mg/L, 不同处理之间无显著差异。 HCO_3^- 质量浓度在 0~750 mg/L, 再生水和盐溶液处理土壤溶液 HCO_3^- 质量浓度分布类似, 与清水处理差异显著 ($\alpha < 0.05$), 可能是清水中含有阳离子少, 与土壤发生反应时不需要溶解释放 HCO_3^- 来达到土壤电荷的平衡。

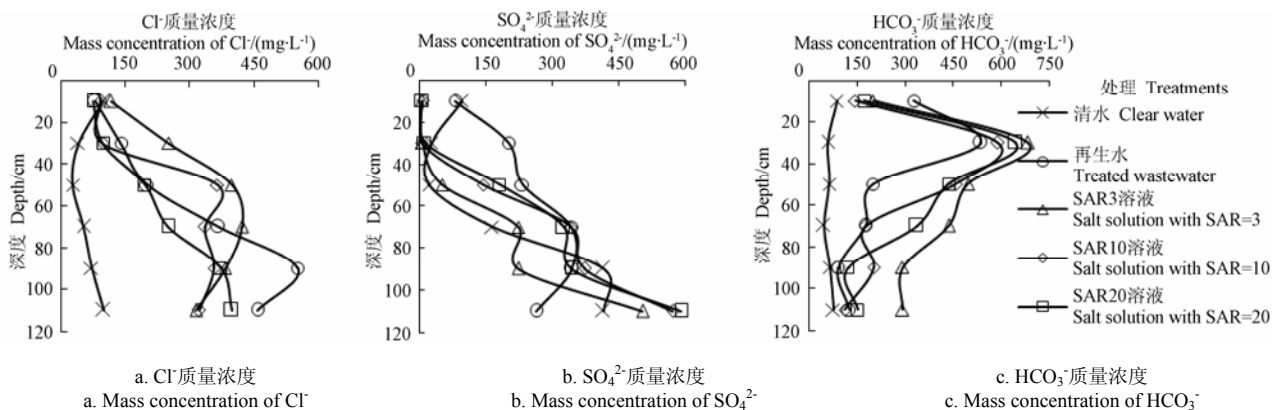


图 8 入参与蒸发 10 次后不同处理土壤溶液中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 质量浓度

Fig.8 Mass content of Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- in soil solution for different water treatments after 10 times of infiltration and evaporation

2.4.2 入参与蒸发 10 次后土壤 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的质量比

入参与蒸发 10 次后, 土壤中阴离子质量比如图 9 所示。 Cl^- 质量比在 0~300 mg/kg, 不同处理土壤中 Cl^- 质量比都大于初始值。 Cl^- 平均质量比大小为: SAR20 溶液 > SAR10 溶液 > SAR3 溶液 > 再生水 > 清水, 统计分析表明清水和再生水处理与其他

处理差异显著 ($\alpha < 0.05$), 说明与盐溶液相比, 再生水处理土壤中 Cl^- 累积量较少, 这与再生水处理土壤溶液中 Cl^- 质量浓度较大的现象相呼应。 SO_4^{2-} 质量比在 0~150 mg/kg, 不同处理之间无显著差异。 HCO_3^- 质量比在 150~350 mg/kg, 不同处理之间无显著差异, 再生水和盐溶液入参与蒸发引起土壤中 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 累积的风险较低。

对不同处理土壤溶液和土壤中阴离子含量分布的分析表明,再生水处理土壤溶液中 Cl^- 质量浓度较大, 土壤中 Cl^- 质量比分布与盐溶液处理有差异,

再生水入渗与蒸发对土壤 Cl^- 有较强的淋洗作用, 可能是再生水中的养分、溶解性有机质 (DOM) 和土壤维持电荷平衡的结果。

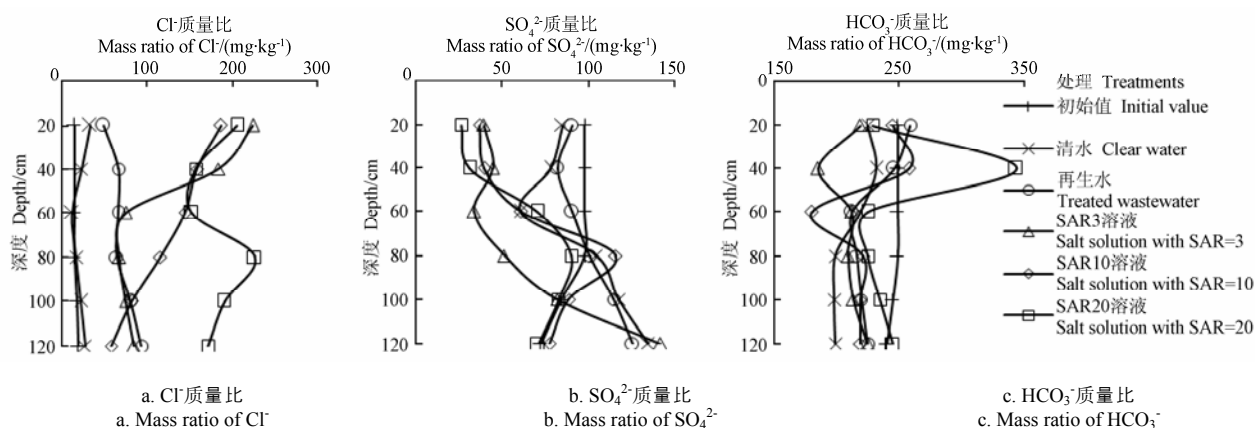


图 9 入渗与蒸发 10 次后不同处理土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 质量比

Fig.9 Mass ratio of Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- in soil for different water treatments after 10 times of infiltration and evaporation

3 结 论

1) 与清水相比, 再生水和 SAR20 盐溶液处理中 0~40 cm 深度壤土含水率较高, 80~120 cm 砂土含水率的增加产生滞后现象。

2) 与清水相比, 再生水和盐溶液入渗与蒸发使土壤中盐分累积, 累积量为 9.54%~51.83%; 与清水和盐溶液相比, 再生水处理中淋洗液带出的盐分最多, 是其他处理的 1.09~1.42 倍。

3) 清水、再生水和盐溶液处理土壤溶液钠吸附比 (SAR) 值 < 3 (mmol/L)^{0.5}, 土壤 pH 值 < 8.5 , 再生水和盐溶液入渗与蒸发引起土壤碱化的风险较低。

4) 再生水入渗与蒸发引起土壤溶液中 K^+ 和 Ca^{2+} 在土体中的迁移分布与清水和盐溶液处理不同; 再生水处理对土壤 Cl^- 有较强的淋洗作用。再生水长期灌溉过程中土壤 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 的迁移和淋洗需要引起重视。

[参 考 文 献]

- [1] 王会肖, 蔡燕, 王海龙, 等. 再生水农业利用现状及研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(4): 98—100.
Wang Huixiao, Cai Yan, Wang Hailong, et al. Advances in study on reclaimed wastewater utilization in agriculture[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2009, 7(4): 98—100. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吴文勇, 刘洪禄, 郝仲勇, 等. 再生水灌溉技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 302—306.
Wu Wenyong, Liu Honglu, Hao Zhongyong, et al. Review and perspectives of research status on reclaimed

wastewater irrigation technologies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 302—306. (in Chinese with English abstract)

- [3] Singh P K, Deshbhratar P B, Ramteke D S. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 100—104.
- [4] Zavadil J. The effect of municipal wastewater irrigation on the yield and quality of vegetables and crops[J]. Soil and Water Res, 2009, 4(3): 91—103.
- [5] Qadir M, Wichelns D, Raschid-Sally L, et al. The challenges of wastewater irrigation in developing countries[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(4): 561—568.
- [6] Mohammad Rusan M J, Hinnawi S, Rousan L. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters[J]. Desalination, 2007, 215(1/2/3): 143—152.
- [7] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6): 716—724.
- [8] Muyen Z, Moore G A, Wrigley R J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 33—41.
- [9] Morugan-Coronado A, Garcia-Orenes F, Mataix-Solera J, et al. Short-term effects of treated wastewater irrigation on Mediterranean calcareous soil[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(1): 18—26.
- [10] 薛彦东, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤主要盐分离子的分布特征及盐碱化的影响[J]. 水土保持

- 学报, 2012, 26(2): 234—240.
- Xue Yandong, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Effects of treated wastewater irrigation strategies on the distribution of salt contents in soils cultivated with tomato and cucumber[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 234—240. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郑伟, 李晓娜, 杨志新, 等. 再生水灌溉对不同类型草坪土壤盐碱化的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 101—104.
- Zheng Wei, Li Xiaona, Yang Zhixin, et al. Effects of turf-grass irrigation with reclaimed water on soil salinization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 101—104. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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)
- [13] Stevens D P, McLaughlin M J, Smart M K. Effect of long-term with reclaimed water on soils of the Northern Adelaide Plains, South Australia[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(5): 933—948.
- [14] Reyes S I E, Garcia C N E, Servin R D E. Wastewater-irrigation effect in physical and chemical soil properties of Mezquital Valley, Hidalgo state, Mexico[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18): 396—402.
- [15] Halliwell D J, Barlow K M, Nash D M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(6): 1259—1267.
- [16] Singh R B, Minhas P S, Chauhan C P S, et al. Effect of high salinity and SAR waters on salinization, sodication and yields of pearl-millet and wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 1992, 21(1/2): 93—105.
- [17] Wang R S, Kang Y H, Wan S Q, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 109—117.
- [18] Katz B G, Griffin D W, Davis J H. Groundwater quality impacts from the land application of treated municipal wastewater in a large karstic spring basin: Chemical and microbiological indicators[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(8): 2872—2886.
- [19] Candela L, Fabregat S, Josa A, et al. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 374(1): 26—35.
- [20] 吴文勇, 刘洪禄, 陈鸿汉, 等. 再生水灌区调蓄工程对地下水盐分的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 22—25.
- Wu Wenyong, Liu Honglu, Chen Honghan, et al. Effect of regulation and storage engineering on groundwater salinity in reclaimed water irrigation district[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(12): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [21] Arienzo M, Christen E W, Jayawardane N S, et al. The relative effects of sodium and potassium on soil hydraulic conductivity and implications for winery wastewater management[J]. *Geoderma*, 2012, 173/174(3): 303—310.
- [22] Bhardwaj A K, Goldstein D, Azenkot A, et al. Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil[J]. *Geoderma*, 2007, 140(1/2): 199—206.
- [23] Suarez D L, Wood J D, Lesch S M. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1/2): 150—164.
- [24] Xu J, Wu L S, Chang A C, et al. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183(1/2/3): 780—786.
- [25] 徐小元, 孙维红, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对典型土壤盐分和离子浓度的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 34—39.
- Xu Xiaoyuan, Sun Weihong, Wu Wenyong, et al. Effect of irrigation with reclaimed water on soil salt and ion content in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(5): 34—39. (in Chinese with English abstract)
- [26] Pereira B F F, He Z L, Silva M S, et al. Reclaimed wastewater: Impact on soil-plant system under tropical conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(1): 54—61.
- [27] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 59—63.
- Tan Junli, Kang Yuehu, Jiao Yanping, et al. Characteristics of soil salinity and salt ions distribution in salt-affected field under mulch-drip irrigation in different planting years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(6): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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.
- [29] Lado M, Ben-Hur M. Effects of irrigation with different effluents on saturated hydraulic conductivity of arid and

- semiarid soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 23–32.
- [30] 肖振华, Prendergast B, Noble C L. 灌溉水质对土壤水盐动态的影响[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 8–17.
Xiao Zhenhua, Prendergast B, Noble C L. Effect of irrigation water quality on salt-water dynamics of soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 8–17. (in Chinese with English abstract)
- [31] 宝哲, 杨培岭, 任树梅, 等. 模拟再生水灌溉下污灌土壤中盐分离子交换运移的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 101–106.
Bao Zhe, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Experimental research on soil salinity and ion exchange and transport in sewage irrigated soil under simulated recycled water irrigation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 101–106. (in Chinese with English abstract)

Effects of infiltration and evaporation with treated wastewater and salt solutions on soil moisture and salinize-alkalization

Shang Fangze, Ren Shumei, Zou Tian, Yang Peiling^{*}

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the special effects of treated wastewater irrigation on soil salinize-alkalization, we built 5 large soil bins with length of 1.2 m, width of 1.2 m and height of 1.5 m, and filled with loam and sandy soil in 0~80 and 80-120 cm, respectively. Three infrared lamps and one electric fan were placed above the soil bin. After that, indoor large soil bins infiltration and evaporation experiments were conducted to research the effects of infiltration and evaporation with clear water, treated wastewater and salt solutions with SAR=3, 10 and 20 (mmol/L)^{0.5} on soil, and soil solution salt and ions migration and accumulation, and soil alkalization. During the 10 times of infiltration and evaporation experiments (simulation field irrigation for 2 years), the electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), pH, K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, and HCO₃⁻ in soil and soil solution were measured. The results showed that compared with the clear water irrigation, soil moisture in 0~40 cm loam were larger and the increasing of sandy soil moisture in 80-120 cm led to lagged effect. The reason was that the dissolved organic matter (DOM) and suspended solids in treated wastewater caused clay dispersion and blocked the soil pores, respectively, and Na⁺ in treated wastewater and salt solutions with SAR=20 (mmol/L)^{0.5} caused clay swelling and dispersion, during the infiltration and evaporation with treated wastewater and salt solution with SAR=20 (mmol/L)^{0.5}. The soil salt accumulated in treated wastewater and salt solutions treatments after 10 times of infiltration and evaporation, and the cumulant was between 9.54% and 51.83%, and the salt in leachate was most in treated wastewater treatment, which was 1.09-1.42 times of other treatments. All treatments had similar effects on soil solution SAR value and soil pH, which were less than 3 (mmol/L)^{0.5} and 8.5, respectively. The results showed a low possibility of soil alkalization during infiltration and evaporation with treated wastewater and salt solutions. As a coexistence system with variety of materials like salinity, nutrients, suspended solids and DOM, the mass concentrations of K⁺ and Ca²⁺ in soil solution showed a different distribution in various depths during infiltration and evaporation with treated wastewater. The mass concentration of Cl⁻ in treated wastewater was about 0.3 times of salt solutions, but the mass concentration of Cl⁻ in soil solution in treated wastewater treatment was 0.95-1.29 times of salt solutions treatments. The mass ratio of Cl⁻ in soil also varied in different soil depths. The treated wastewater treatment had a stronger leaching ability on soil Cl⁻, and it may attribute to the particularity of treated wastewater and the results of soil maintain charge balance. According to the results, it was concluded that compared with clear water and salt solutions, soil salinity and some salt ions indicated a different migration and distribution in the soil profile after infiltration and evaporation with treated wastewater, and more attention should be paid to the migration and leaching of K⁺, Ca²⁺ and Cl⁻. The results of this research provide references for the long-term secure and rational irrigation with treated wastewater in agriculture.

Key words: soils, infiltration, evaporation, treated wastewater, salt solutions, salinity, alkalization

(责任编辑: 刘丽英)