

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

宝哲^{1,2}, 杨培岭¹, 任树梅¹, 许廷武³

(1.中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2.北京市水利科学研究所, 北京 100048; 3.中国农业大学国际学院, 北京 100083)

摘要:为研究再生水灌溉下原污灌区土壤中主要盐分离子交换运移规律,采用有污水灌溉背景的两种植地土壤,根据再生水的基本性质及其盐分离子组分,配制4种浓度水平的入渗液,进行土柱模拟试验。结果表明,不同质地土壤在低Na⁺配制液淋洗下的穿透曲线都出现下凹现象,但Na⁺在壤土中富集的表现并不显著,而在粉质砂壤土中部分Na⁺吸附累积时间较长;模拟再生水入渗溶液中不同组分的盐分离子在不同程度上影响污灌土壤中发生的离子化学反应的进行,导致各处理下Na⁺穿透时间发生显著差异;长期再生水灌溉会对HCO₃⁻含量较高且粉粒比重大的土壤的入渗等性能产生更为不利的影响。

关键词:再生水;污灌土壤;盐分;离子交换;Na

中图分类号:S153.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0101-06

Experimental Research on Soil Salinity and Ion Exchange and Transport in Sewage Irrigated Soil Under Simulated Recycled Water Irrigation

BAO Zhe^{1,2}, YANG Pei-ling¹, REN Shu-mei¹, XU Ting-wu³

(1.College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2.Beijing Hydranlic Research Institute, Beijing 100048, China; 3.International College China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To assess the effects of irrigation with recycled water in sewage irrigated soils, soil column studies were carried out using two different texture soils from the sewage irrigated districts. Based on the ionic forms of salinity and the concentration in the recycled water, four levels of solutions were adopted in this experiment. Each sewage irrigated soil was leached with these four types solutions, several conclusions were gained by the analysis of the Breakthrough Curves (BTCs) of the Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, and Cl⁻. The “concave” phenomenon which appeared in BTCs of leachate Na⁺ under simulated recycled water irrigation was due to the high contents of indigenous exchanged Na⁺ in sewage irrigated soils, but the retention time of Na⁺ in the soil with high in silt was much longer than one with high in sand; Different forms and concentration of ions in the simulated recycled water and the sewage irrigated soil affected the ion exchange and dissolution-precipitation processes in the soils, which induced the difference of Sodium breakthrough time under the treatments. Long-term recycled water irrigation on sewage irrigated soil with high indigenous HCO₃⁻ and silt contents deduced its infiltrability.

Keywords: recycled water; sewage irrigated soil; salinity; ion exchange and transport; sodium

再生水作为农业灌溉生产的一种重要补充水源, 即能减少污水的排放量, 又能降低对淡水资源的需求

量^[1]。但与淡水相比, 其中仍含有一定量的有害物质, 利用其进行灌溉可能会导致对土壤、作物、地表与地下水的污染以及对人体健康产生影响^[2]。尤其是污水处理后, 钠等一些盐分离子很难被有效祛除^[3]。一般而言, 盐分在土壤中累积会对土壤本身以及农作物生长造成不利影响, 特别是含有过量的交换钠常会使土壤粘粒膨胀和团聚体分散^[4], 尤其当土壤溶液 pH>8.5

收稿日期: 2008-04-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA100205-1); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200701025)

作者简介: 宝哲(1983—), 男, 硕士研究生。

E-mail: baozhe198315@yahoo.com.cn

通讯作者: 杨培岭

时,会造成土壤物理性能的退化,影响水分和空气在土壤中运动,造成土壤侵蚀等^[5-7]。因此长期利用再生水进行灌溉(特别是在蒸发量较大、降雨较少、排水不良的地区)有可能会使土壤中盐分累积,入渗性能下降,导致土壤次生盐碱化以及影响作物的正常生长^[2]。同时由于水资源匮乏我国部分地区已经实施了较长时间污水灌溉(例如 50 年代北京郊区农民就自发地利用城市污水进行灌溉,截止 20 世纪 90 年代初期北京已约有污灌农田 8 万 hm²^[8]),与非污灌土壤相比污灌各层土壤的相关理化参数都有明显的变化^[9],而且目前很多有污灌历史的灌区内仍然继续利用再生水进行农田灌溉、湿地补水等,因此更必要对此类土壤在再生水灌溉淋洗下主要盐分离子交换运移特别是 Na⁺的富集过程做深入性研究,从而针对污灌农田提出合理的再生水安全利用管理模式。

本文根据再生水的基本性质及其主要盐分离子的组成和浓度大小,配制了相应浓度的入渗液,并选取不同污灌年限两种质地的土壤进行室内土柱模拟实验,重点分析了不同组分溶液淋洗土柱下各盐分离子交换运移特征,以期为农业再生水长期生态安全利用提供依据和指导。

1 材料与方法

1.1 试验入渗溶液配制

表 1 为国内外典型 2 级处理污水的各项化学指标测定结果^[10-11],如表所示,各 2 级处理污水中 Na⁺、HCO₃⁻的指标值偏高,并且可能由于季节、污水水源变化以及再生水在灌渠系统传输过程中的二次污染等原因也导致的 Na⁺、HCO₃⁻和 Cl⁻的浓度变异性相对较

大。依据表 1 再生水中主要影响盐分离子的类别和浓度含量,参考其 pH、EC 值等,本研究采用模拟再生水入渗液的方法,以去离子水为试剂加入 CaCl₂、NaHCO₃、NaCl 等溶质进行调配,以此反应再生水中主要阴、阳离子浓度含量以及再生水酸碱度等基本性质,设置了两种入渗液类型,高低 4 种浓度水平。详见表 2、3。

表 2 入渗液类型
Table 2 Types of the influents

试验编号	入渗液组成
1	NaCl 与 CaCl ₂ 的混和溶液
2	NaHCO ₃ 与 NaCl 的混和溶液

表 3 试验分组表
Table 3 Grouping of the experiment

编 号	溶液及浓度 solution concentration/g·L ⁻¹			pH	EC/μS·cm ⁻¹
	CaCl ₂	NaCl	NaHCO ₃		
1.1	0.30	0.800	—	6.37	1 520
1.2	0.30	0.330	—	7.37	960
2.1	—	0.510	0.42	8.23	1 060
2.2	—	0.128	0.29	8.29	488

1.2 试验装置设计

试验是在室内一维垂直饱和土柱中进行的。土柱高 30 cm,内径 5 cm,由有机玻璃加工而成。供试土壤分别为北京市石景山区的衙门口地区以及大兴区的北野厂灌区内的土壤,经调查北野厂灌区已有 30 年污灌历史,自 20 世纪 70 年代开始使用黄村排泄的工业污水和生活污水进行灌溉,近 8 年开始利用污水和地下水联合灌溉的方式进行灌溉,目前灌区内部分区域引用黄村污水处理厂二级出水灌溉农田。石景山衙门口地区累计具有 50 年污灌历史,该地区自 20 世纪 50 年代开始使用北京首钢排出的未经处理的污水进行灌溉,直到 2003 年首钢将污水进行处理后循环使用,衙门口污灌区开始利用地下水进行灌溉。试验取土深度为表层 10~30 cm。土壤取回后经风干过筛(2 mm×2 mm),测定各项参数指标如表 4。根据当地实际测定容重将北野厂灌区和石景山地区土壤分别按干容重 1.5 g·cm⁻³ 和 1.4 g·cm⁻³ 均匀装入有机玻璃柱中,装土高度为 15 cm,每 5 cm 捣实 1 次,捣土结束后把土壤表面划光,继续下一次填装,底部用 5~10 mm 建筑砂做成 5 cm 厚反滤层,每个土柱上端加一层滤纸,添加 2 cm 石英砂,保证供液时溶液能均匀入渗到土壤。用去离子水自下而上缓慢饱和后,用马氏瓶从

表 1 二级处理再生水相关指标
Table 1 Properties of the recycled waters

	①	②	③	④
pH	8.11	8.10	7.76	7.70
EC/μS·cm ⁻¹	1 062~1 447	884~1 060	1 678	624~848
Na ⁺ /mg·L ⁻¹	120~212	84~134	165	112~147
K ⁺ /mg·L ⁻¹	16	13~18	15	10~15
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	98	96~113	125	3~10
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	35	32~50	33	1~3
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹		214~293	434	
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	215~244	106~167	205	33~52

注:①为北京市大兴区北野厂再生水灌区内典型区域采集水样测定的相关指标结果;②为北京市高碑店污水处理厂 2 级处理出水不同时期取样测定结果;③与④选取西班牙和巴西两典型地区用于农田灌溉的 2 级处理出水相关指标测定结果。

表 4 供试土壤的各项指标
Table 4 Properties of the repacked soil columns

	①北野厂土壤	②石景山土壤
	SIS	SIL
土柱		
尺寸/cm	15 long×5 i.d.	15 long×5 i.d.
装土容重/g·cm ⁻³	1.5	1.4
土壤		
分类名称	粉砂壤土	壤土
矿物特征		
	粘粒(2.515%)	粘粒(2.901%)
质地(美国土壤制)	粉粒(75.927%)	粉粒(54.702%)
	砂粒(21.558%)	砂粒(42.398%)
有机质/g·kg ⁻¹	11.8	21.5
全盐量/%	0.34	0.32
pH	8.12	8.01
CEC/cmole·kg ⁻¹ soil	20.8	19.4
交换性离子/mg·kg ⁻¹		
Ca ²⁺	4 720	2 960
Mg ²⁺	527	982
Na ⁺	80.8	61.6
K ⁺	103	97.6
水溶性离子/mg·kg ⁻¹		
Ca ²⁺	43.9	48.6
Mg ²⁺	21.6	12.4
Na ⁺	79.9	71.7
K ⁺	7.8	7.7
Cl ⁻	35.5	24.8
SO ₄ ²⁻	56.1	61.0
HCO ₃ ⁻	247	183

注:SIS,Sewage irrigated silt loam(污灌粉砂壤土);SIL,Sewage irrigated silt loam(污灌壤土)。

上面供水,待形成稳定流场后,实测渗透流速,将表面水层中去离子水迅速吸干,瞬时置换为所配制的入渗溶液。根据出水速率,每隔一定时间测定该时间段土壤流出液的体积以及 Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺以及 Cl⁻等的浓度。

1.3 水质化学分析

土壤各段时间流出液离子浓度(包括 Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺和 Cl⁻等)采用 ICS-1500 型离子色谱仪进行观测,以上指标中室内测定各设 3 次重复,并取其均值进行分析。在分析前通过 0.5 μm 玻璃纤维模过滤。

2 结果与分析

如图 1a 所示,由于污灌土壤本身含有较高的 Na 使得流出液浓度初期升高较快,随着配制溶液不断进入土体中,当 $t \approx 4\ 000\ \text{min}$ 时北野厂粉质砂壤土

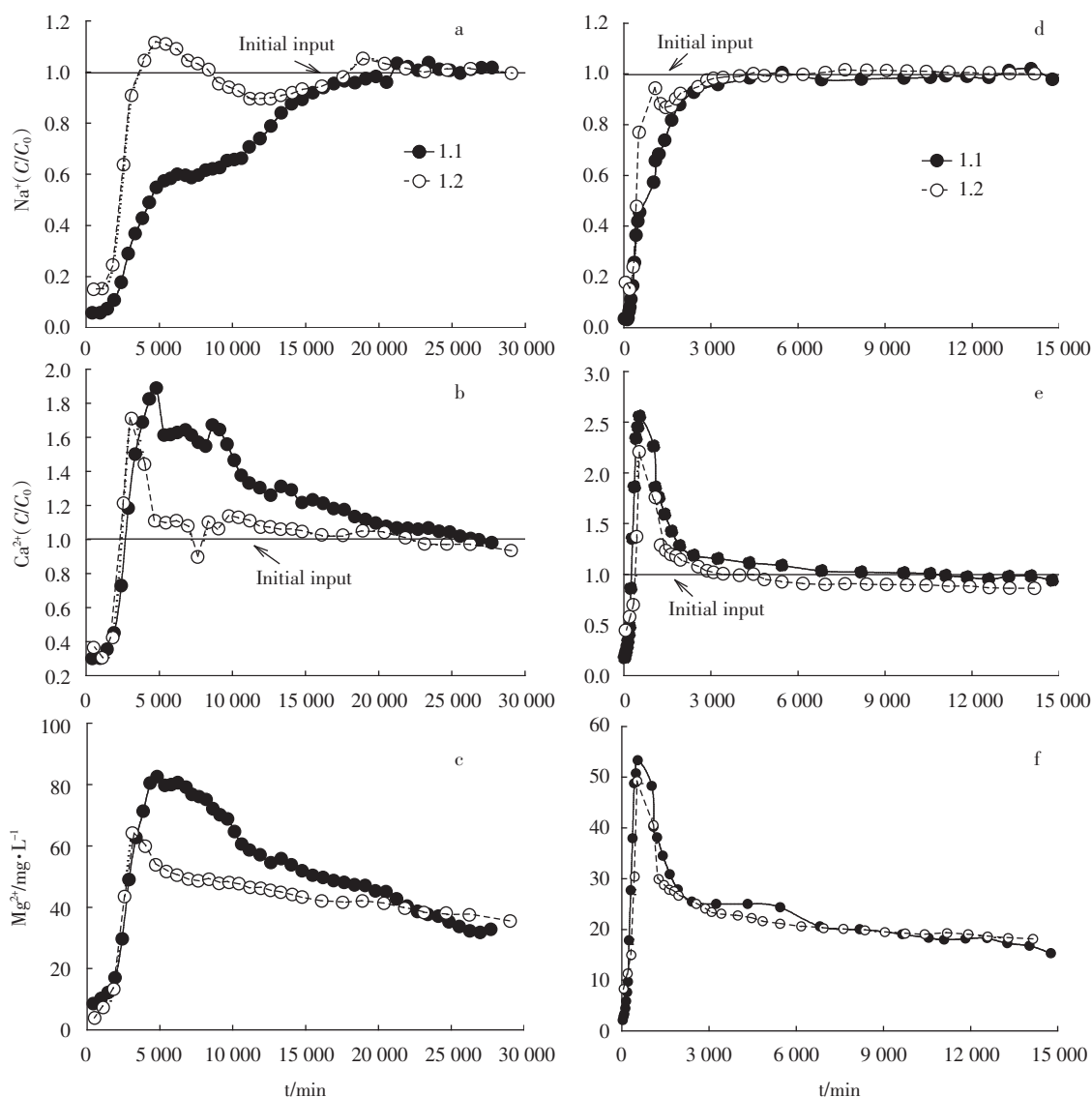
(SIS) 在 1.2 低浓度条件下很快达到并超过配制入渗液中 Na⁺浓度水平,而 1.1 浓度水平下未达到入渗液浓度水平。随着土壤对 Na⁺的吸附作用相对于离子机械运动更加占有优势,同时 Na⁺-Ca²⁺交换反应的充分进行,在 $t \approx 5\ 000\ \text{min}$ 之后 1.2 低浓度水平下流出液浓度出现下降,同时在 $t \approx 5\ 000\ \text{min}$ 左右 1.1 浓度下 Na⁺浓度上升速率也趋于缓慢。当 $t \approx 11\ 300\ \text{min}$ 时,土壤中盐分离子交换反应逐渐达到一个平衡的阶段,1.2 水平下 Na⁺浓度又开始逐渐升高,同时 1.1 水平下 Na⁺浓度上升速率加快接近初始速率,并最终在 $t \approx 22\ 000\ \text{min}$ 时,两种浓度下滤出液中 Na⁺浓度均穿透基本趋于稳定。如图 1e 所示,石景山污灌壤土(SIL)在高低两种浓度下 Na⁺初期也都迅速升高,随后 1.1 浓度水平下 Na⁺浓度上升速度逐渐变缓,而低浓度下在未达到初始入渗值浓度时也出现小幅下降现象,但之后又迅速升高,两种浓度溶液淋洗下流出液 Na⁺都基本在 $t \approx 4\ 000\ \text{min}$ 时实现穿透并趋于稳定。对于石景山壤土而言,高低浓度入渗液淋洗下流出液 Na⁺浓度变化差异并不明显。

如图 1b、图 1c、图 1e、图 1f 所示:初期由于饱和污灌土壤中本身含有的 Ca²⁺、Mg²⁺被带入进流出液中,同时随着入渗液中 Na⁺的不断进入,土壤中更多的交换性 Ca²⁺、Mg²⁺被配制液中的 Na⁺代换出来,使流出液中 Ca²⁺、Mg²⁺浓度增加显著。SIS 在 1.1 高浓度水平下, Ca²⁺浓度达到 $C/C_0=1.9$ 左右之后开始逐渐下降,当 $t \approx 26\ 000\ \text{min}$ 时流出液 Ca²⁺浓度开始低于初始入渗离子浓度值;在 1.2 水平下 Ca²⁺(C/C_0)达到 1.6~1.8,但之后下降幅度较大,到 $t \approx 5\ 000\ \text{min}$ 时接近 $C/C_0=1.0\sim 1.2$,随着反应的进行,土壤中交换性二价离子被不断析出,趋于一个相对稳定值并且逐渐低于初始入渗 Ca²⁺浓度水平。两种 Na⁺浓度水平入渗液淋洗下 Ca²⁺浓度最终都缓慢下降并低于入渗液 Ca²⁺水平,表明部分 Ca²⁺、Mg²⁺与污灌土壤本身含有的 HCO₃⁻以及 SO₄²⁻发生络合、沉淀反应,以沉淀形式滞留在土壤中,随着灌水时间的推延会堵塞土壤孔隙导致土壤入渗性能的下降。SIL 在高低 Na⁺浓度水平淋洗下, Ca²⁺、Mg²⁺穿透曲线变化趋势、幅度基本类似,都是在前期显著增加然后迅速下降保持平稳前进,但在 1.2 浓度水平下,当 $t=4\ 500\ \text{min}$ 时,流出液 Ca²⁺浓度开始并一直低于初始入渗液 Ca²⁺浓度水平,而 1.1 高浓度水平下基本稳定在入渗液浓度水平。可以推知,对于石景山壤土而言低 Na⁺浓度水平淋洗下 Ca²⁺更易滞留在土壤中,也可能有一小部分与土壤本身的 HCO₃⁻及 SO₄²⁻

发生反应产生沉淀。

如图 2a、图 2c 所示, Na^+ 浓度初期都迅速上升, 而北野厂污灌土壤在 2.2 浓度水平下, $t \approx 8\,000\text{ min}$ 时达到峰值 ($C/C_0=0.85$ 左右) 未实现穿透, 而图 1a 中由于其入渗液中含有 Ca^{2+} 初期抑制 Na^+ 与土壤本身的 Ca^{2+} 进行交换反应, 使其 Na^+ 初期实现穿透。随着入渗液中 HCO_3^- 以及土壤本身 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 的溶解沉淀反应的进行, 以及 $\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}$ 充分交换, Na^+ 被吸附在土壤胶体上, 流出液 Na^+ 浓度开始下降, 当 $t=25\,000\text{ min}$ 时又开始逐渐升高表明交换反应基本接近平衡阶段, 伴随入渗液中不断有 Na^+ 的进入使流出液 Na^+ 浓度呈缓慢增加趋势直到 $C/C_0=1$ 趋于稳定。在 2.1 高浓度水平

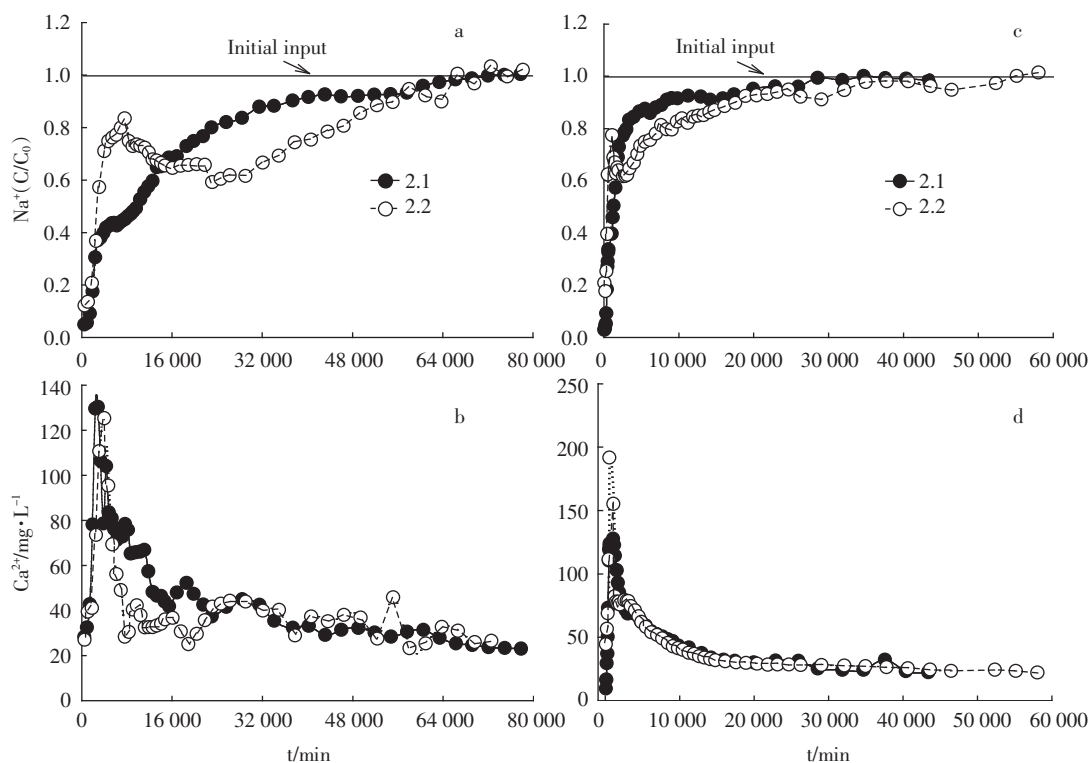
下, Na^+ 浓度也一直升高, 且增加速率逐渐变小, 最终实现穿透。对于石景山污灌土壤而言, 低浓度入渗液下 Na^+ 浓度也出现小幅下降现象, 但持续时间较短, 之后又迅速升高直到完全置换。如图 2b 所示, SIS 在配制液淋洗下尤其在低浓度水平下流出液 Ca^{2+} 浓度曲线均变化很不稳定。可推知, 由于依据再生水浓度组分大小配制的入渗液中加入一定量的 HCO_3^- , 是 SIS 中 Na^+ 初期迅速升高未穿透及其 Ca^{2+} 浓度曲线后期不稳定的主要原因, 而 SIL 中, 砂粒含量较高粉粒较低, 水分入渗较快, 使离子的机械运动相对于吸附化学反应更加占优势, 运移时间较快, 流出液浓度并未出现波动情况。



Initial input: 初始浓度, a b c: 北野厂粉质砂壤土 (SIS), d e f: 石景山污灌壤土 (SIL)

图 1 1.1、1.2 浓度水平下污灌土壤中流出液主要盐分离子浓度随时间变化

Figure 1 Breakthrough curves of Na^+ Ca^{2+} and Mg^{2+} through the two sewage irrigated soils in 1.1 and 1.2 solutions

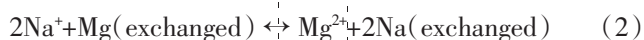
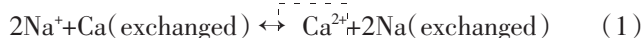


Initial input: 初始浓度, a, b: 北野厂粉质砂壤土 (SIS), c, d: 石景山污灌壤土 (SIL)

图2 在2.1、2.2组分浓度水平下污灌土壤中流出液主要盐分离子浓度随时间变化

Figure 2 Breakthrough curves of Na^+ and Ca^{2+} through the two sewage irrigated soils in 2.1 and 2.2 solutions

综合以上分析:1、两种污灌土壤在1.2、2.2浓度水平入渗液淋洗下,由于污灌土壤中本身含有较多的交换性 Na^+ ,流出液中的 Na^+ 穿透曲线均出现先升高再下降又缓慢升高的下凹现象,但在北野厂粉质砂壤土中所持续时间以及下凹幅度均明显大于在石景山壤土中;而在1.1、2.1高浓度水平下影响并不显著;同时石景山土壤中因其砂砾比重较大在高低两种浓度下 Na^+ 的运移曲线并无明显差异。基于以上表明,土壤质地对 Na 的运移产生显著影响;对于粉粒含量较高的污灌土壤而言,在使用再生水进行灌溉淋洗的过程中,应适当延长灌水管理时间,防止 Na^+ 在土壤中的富集。2、配制淋洗液中 Ca^{2+} 加快了 Na^+ 的穿透进程,而 HCO_3^- 则使 Na^+ 吸附滞留在土壤中时间更长。



根据离子化学反应方程式(1)~(4),表明各盐分离子在土壤中发生的化学反应的相互抑制性是导致不同组分浓度水平下穿透时间的显著差异的主要原因。3、随着时间的推进,1.1和1.2入渗液中部分 Ca^{2+} 会与北野厂污灌土壤本身含有较高的 HCO_3^- 以及 SO_4^{2-} 发生络合、沉淀反应,以沉淀形式滞留在土壤中,对其入渗性能产生影响;在石景山污灌壤土中相对于1.1浓度水平在1.2低 Na 浓度水平下($C_{\text{Na}} \approx 129.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)部分 Ca^{2+} 更易滞留在土壤中,表明污灌壤土主要基于机械作用而非吸附作用对 Ca^{2+} 有一定的保持作用;2.1、2.2入渗液中加入 HCO_3^- 对北野厂粉质砂壤土影响显著,而对于石景山壤土而言反映并不明显,表明在污灌壤土中由于其粗砂含量相对较高,水分机械运动较快,即使在有 HCO_3^- 进入下沉沉淀溶解反应并不显著,相反在粉粒含量较高的土壤中水分入渗缓慢导致在淋洗过程中反应更加充分。

3 结论

(1)不同质地土壤在模拟再生水入渗液淋洗下 Na^+ 穿透曲线出现下凹现象,但在石景山污灌壤土中表

现不显著,与污灌土壤中本身含有较高浓度的 Na^+ 有关。因此对于粉粒含量较高的污灌土壤而言应制定合理的再生水灌溉淋洗制度,防止 Na^+ 在土壤中的富集。

(2)不同组分入渗溶液中以及污灌土壤本身含有的盐分离子在不同程度上影响土壤中发生的离子化学反应的进行,导致各组分浓度水平下 Na^+ 穿透时间的显著差异;不同质地的污灌土壤对模拟再生水溶液中的 HCO_3^- 反应差异也十分显著,对于粉粒比重较大且本身含有较高浓度的 HCO_3^- 的污灌土壤而言,再生水灌溉可能会对土壤入渗等物理性指标产生更加不利的影响。因此,针对这种质地的污灌土壤在利用再生水灌溉时,应进行合理的土地处理措施,改善其入渗排水性能^[12]。

本文只是在室内条件下,对再生水中典型浓度盐分离子在污灌土壤中的交换运移过程作初步研究。对于再生水而言,其组成成分非常复杂,其他一些离子、有机物和微生物等进入土壤后都会对其理化过程产生重要影响,因此针对长期再生水灌溉下不同类型土壤中各种离子的吸附交换规律,以及对其发生盐碱化危害的预报都有待进一步深入的系统研究。

参考文献:

- [1] 杨林林, 杨培岭, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 82-85.
YANG Lin-lin, YANG Pei-ling, REN Shu-mei, et al. Experimental studies on effects of reclaimed water irrigation on soil physicochemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 82-85.
- [2] 黄冠华. 再生水农业灌溉安全的有关问题研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 26-35.
HUANG Guan-hua. The safety use of treated wastewater for irrigation in agriculture[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(1): 26-35.
- [3] Simon Toze. Reuse of effluent water-benefits and risk[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 80: 147-159.
- [4] Halliwell D J, Barlow K M, Nash D M. A review of the effects of wastewater sodium on soil properties and their implications for irrigation systems[J]. *Aust J Soil Res*, 2001(39): 1259-1267.
- [5] Suarez D L, Rhoades J D, Savado R, et al. Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984 (48): 50-55.
- [6] Gupta R K, Abrol I P. Salt affected soils: their reclamation and management for crop production[J]. *Adv Soil Sci*, 1990(11): 223-288.
- [7] Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amounts of water on desalinization and permeability behaviour of chloride and sulphate-dominated saline soils[J]. *Agric Water Manage.* 1996(31): 225-235.
- [8] 董克虞, 杨春惠, 林春野. 北京市污水农业利用区划的研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
DONG Ke-yu, YANG Chun-hui, LIN Chun-ye. The study on the useage of sewage in agriculture [M]. Beijing: China Environment Science Press, 1993.
- [9] 杨林林. 再生水灌溉对土壤理化性质及盐分运移影响的试验研究[D]. 中国农业大学硕士学位论文, 2006.
YANG Lin-lin. Experimental study on the effects of reclaimed water irrigation on soil physicochemical properties and salinity migration[D]. *Master Degree of China Agricultural University*, 2006.
- [10] Esteller M V, Morell I, Almeida C. Physico-chemical processes in a vadose zone during the infiltration of treated wastewater used for irrigation: application of the NETPATH model[J]. *Environmental Geology*, 2001(40): 923-930.
- [11] Thomas V Gloaguen, M -Gristina Forti, Yves Lucas, et al. Soil solution chemistry of a *Brazilian oxisol* irrigated with treated sewage effluent[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88: 119-131.
- [12] Valentina Lazarova, Akica Bahri. Water reuse for irrigation-agriculture, landscapes, and Turf Grass[M]. CRC PRESS, 2005.