

咸淡水交替淋溶下土壤盐分运移试验

吕 焯^{1,2} 杨培岭² 管孝艳² 李江华¹ 游艳丽¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044 ; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要 : 为确定咸淡水交替灌溉后土壤盐分的运移规律, 采用 2 g/L、4 g/L 两种矿化度的咸水分别与淡水连续、交替淋溶室内土柱, 初步研究了咸淡水交替淋溶下土壤盐分的变化规律。研究结果表明 : 咸淡水交替淋溶下土壤表层盐分逐渐下移, 两个试验处理的土柱都出现积盐情况, 且 4 g/L 时的积盐量大于 2 g/L 时的积盐量, 土壤溶液中 Na^+ 、 Ca^{2+} 的分布与 EC 值的变化规律基本一致, 在此条件下盐分的增加没有引起土壤的碱化, 灌水结束后, 两个试验处理的土壤溶液 EC 值都小于 4 dS/m, 在作物耐盐的范围内, 可推广应用到大田咸淡水交替灌溉中。

关键词 : 咸淡水交替淋溶 ; 土壤盐分运移 ; 土壤碱化 ; 咸水灌溉

中图分类号 : S275.8 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-764X(2007)06-0090-04

Experimental study on salt movement in soil under saline and fresh water alternate leaching // LÜ Ye^{1,2} YANG Pei-ling², GUAN Xiao-yan², LI Jiang-hua¹, YOU Yan-li¹ (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China ; 2. College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract : Laboratory tests were performed on alternate leaching of soil columns with fresh water and saline water at degree of mineralization of 2 g/L and 4 g/L respectively for preliminary research of the movement laws of salt in soil after saline and fresh water alternate irrigation. The result shows that the salt in soil gradually moves from the surface down toward the bottom under alternate leaching of saline and fresh water, and the salt accumulates in soil columns under the two test conditions, with more salt accumulated if saline water at degree of mineralization of 4 g/L is adopted, and that the distributions of Na^+ and Ca^{2+} as well as the variation of EC value in soil solution are almost the same under two test conditions. Under such test conditions, the increase of salt content in soil does not cause soil alkalinization, and the EC values of soil solution under the two irrigation conditions are both less than 4 dS/m after irrigation, which are within the range of salt tolerance of crops. Thus, the saline and fresh water alternate irrigation could be applied to fields for crop planting.

Key words : saline and fresh water alternate leaching ; salt movement in soil ; soil alkalinization ; saline water irrigation

我国水资源总量丰富, 但人均水资源量不足, 区域性缺水 and 季节性缺水也是我国水资源的一大特征^[1]。我国微咸水资源丰富, 据初步统计^[2], 整个华北平原浅层咸水资源达 75 亿 m^3 。虽然西北干旱、半干旱地区存在较为丰富的地下咸水、微咸水资源, 却未能得到有效的开发利用^[3], 各地的咸水灌溉试验证明了咸水可以用来进行农田灌溉^[4-6]。充分挖掘咸水、微咸水利用潜力, 做到以咸补淡已成为解决水资源短缺的关键。

目前利用咸水灌溉的主要方式有咸水灌溉、咸淡水混合灌溉、咸淡水交替灌溉。研究表明^[7-8], 在有一定的淡水资源条件下, 采用咸水与淡水交替轮灌是一种较好的咸水利用方式。本文通过室内咸淡水交替淋溶土柱试验初步研究土壤盐分运动的变

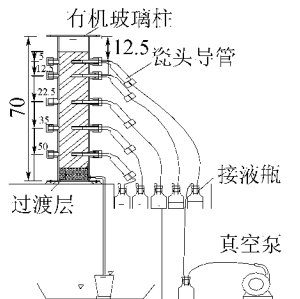
化规律, 旨在为咸水的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验系统及方法

整个试验系统包括试验土柱和供水设备, 试验设备见图 1。试验土柱用 1 mm 厚的有机玻璃制作, 高 70 cm, 截面内径 15 cm, 分别在试验土柱侧面 5 cm、12.5 cm、22.5 cm、35 cm、50 cm 处开圆形的取样口, 分别在开孔处埋设陶土头土壤溶液提取器, 以提取土壤溶液, 在试验前按 1.5 g/ cm^3 的密度分层 (每层厚 5 cm) 均匀填装土, 采用马氏瓶对土柱供水进行试验。整个试验过程中共灌水 6 次 (连续灌, 即咸水—淡水—咸水—淡水—咸水—淡水)。

试验共选取矿化度为 4 g/L 克和 2 g/L 的灌溉水



(a) 装置示意图(单位: cm)



图 1 试验装置

对土柱进行淋溶,重复 3 次。灌水后当土壤含水量达到田间持水量的 70% 时进行下一次灌水,灌水量根据 SL207—98《节水灌溉技术规范》中有关参数和试验地的实际情况采用公式(1)计算:

$$m = 10h(\beta_1 - \beta_2) \frac{\rho_{\pm}}{\rho_{\text{水}}} \quad (1)$$

式中: m 为设计净灌水定额, mm; $\rho_{\pm}$ 为计划湿润层土壤干密度, g/m^3 ; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度, g/m^3 ; h 为土壤计划湿润层深度, 咸水取 40 cm, 淡水取 58 cm; β_1 , β_2 为土壤适宜含水率的上、下限(质量分数), 分别取 95% 和 65%; β 为田间持水率, 取 26%。

灌溉用水用 CaCl_2 和 NaCl 加去离子水配置, CaCl_2 和 NaCl 的用量按公式(2)计算:

$$58.5\alpha(\text{Na}^+) + 111\alpha(\text{Ca}^{2+}) = \lambda \text{ 或 } 4) \quad (2)$$

$$\text{SAR} = \frac{\alpha(\text{Na}^+)}{\sqrt{\frac{\alpha(\text{Ca}^{2+})}{2}}} = 10$$

式中 $\alpha(\text{Na}^+)$, $\alpha(\text{Ca}^{2+})$ 分别为 Na^+ 和 Ca^{2+} 的物质的量浓度, mol/L , SAR 中 Na^+ , Ca^{2+} 的浓度单位均为 mmol/L 。

根据公式(1)~(2), 计算灌溉水的水量和水质如表 1 所示。

表 1 灌溉用水水质与用量

水质	矿化度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	灌水量/ mL	NaCl 用量/g	CaCl_2 用量/g	电导率 EC / ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	pH	SAR
咸水	2	800	0.52	1.07	3.57	6.78	10
咸水	4	800	0.77	2.43	6.05	6.36	10
淡水		1000			0.36	7.58	

1.2 供试土壤

供试土壤取自内蒙古巴彦淖尔市水利科学研究所长胜试验站扰动土壤, 将供试土壤自然风干, 过

2 mm 筛, 对土样进行基本理化性质的分析, 土壤颗粒组成分析结果见表 2, 土壤基本化学性质见表 3。

表 2 试验土壤的颗粒组成

颗粒直径/mm	质量分数/%	颗粒直径/mm	质量分数/%
1.0 ~ 0.25	0.11	0.01 ~ 0.005	4.05
0.25 ~ 0.05	13.78	0.005 ~ 0.001	4.05
0.05 ~ 0.01	66.87	< 0.001	11.14

注: 试验土壤为粉质壤土。

表 3 试验土壤的化学特性

电导率 EC / ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	pH	土壤中离子质量比/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
		Na^+	Ca^{2+}	Cl^-
0.48	8.09	0.255	0.045	0.1154

1.3 测定方法

试验中土壤密度、饱和含水率采用环刀法测定; 土壤颗粒组成采用比重计法测定; 按 1:5 的土水比浸提土样, 采用 DDS-307 型电导率仪测定土壤溶液的 EC 值, Na^+ 质量浓度用火焰光度计法测定, Ca^{2+} 质量浓度采用 EDTA 滴定法测定, Cl^- 质量浓度采用 AgNO_3 滴定法测定。

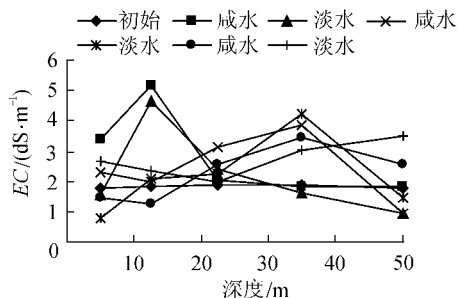
2 结果分析

2.1 土壤盐分运移规律

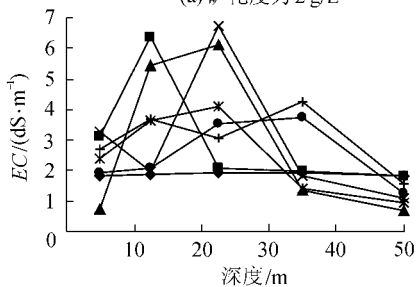
一般土壤溶液电导率与土壤含盐量之间的关系为: 土壤溶液含盐量(mg/L)是土壤溶液电导率(dS/m)的 640 倍^[9], 这表明土壤溶液电导率与土壤溶液含盐量成正比, 因此可以用土壤溶液电导率表征土壤中盐分含量的高低。

2.1.1 土壤 EC 值的变化规律

每次灌水后各层土壤溶液 EC 值的变化见图 2。从图 2(a) 可以看出: 第 1 次灌咸水后, 盐分主要积累



(a) 矿化度为 2 g/L



(b) 矿化度为 4 g/L

图 2 各层土壤溶液 EC 值随灌水情况的变化

于土壤表层,随着深度的增加,盐分逐渐变小;第2次经过淡水淋洗后,原本累积于土壤表层的盐分被淋洗下移,且12.5 cm深处的EC值达到最大;第3次灌咸水和第4次淡水淋溶后盐分积聚层下移到35 cm深处;第5次咸水灌入后土壤溶液的EC值仍是在35 cm深处达到最大;但经过最后一次淡水淋洗后盐分明显积聚在50 cm处,且各层的EC值差异明显变小。在整个灌水过程中,5 cm,12.5 cm,22.5 cm,35 cm深处的EC值总体呈下降趋势,而50 cm深处的EC值是增大的,灌水结束后各层的EC值大小关系为50 cm > 35 cm > 5 cm > 12.5 cm > 22.5 cm,表明灌水期间盐分逐渐下移,最后在底层积盐。从整个灌水期来看,土壤盐分随着灌水次数的增加而下移。

从图2(b)可以看出:第1次灌咸水后,各层土壤溶液的EC值均增大,变幅最大的是12.5 cm深处,达245%;第2次灌淡水后,盐分积累层下移到22.5 cm深处,在此次灌水过程中,除22.5 cm深处EC值增大外其他各层都有不同程度的降低,这主要是淡水的淋洗作用所致,其中5 cm深处EC值降低得最为明显,变化率达-76%;第3次灌水后,除了12.5 cm深处外其他各层均有不同程度的增加,此次灌水后盐分积累最多的仍是22.5 cm深处,达到了整个灌水过程中EC值的最大值;经过淡水淋洗后,与上一次淡水淋洗不同的是,此次12.5 cm深处EC值增大;再次灌咸水后,盐分下移且累积到35 cm深处;最后经过淡水淋洗后,各层土壤溶液EC值呈现35 cm > 12.5 cm > 22.5 cm > 5 cm > 50 cm的规律,在整个过程中,50 cm深处的变化都不大,说明灌水对此层没有明显影响。

整个灌水结束后,矿化度为2 g/L的咸水淋溶土柱后土壤中盐分下移到50 cm深处,而矿化度为4 g/L的下移到35 cm深处,说明较高矿化度的咸水对土壤的入渗性影响也较大。

2.1.2 水盐平衡分析

本试验条件下,自灌水开始到试验结束55 cm深处土层的水量平衡方程为

$$S = I - E - \Delta W \tag{3}$$

式中:S为流出水量,L;I为灌水量,L;E为蒸发量,L; ΔW 为在整个试验过程中土层含水量变化,L。

整个试验过程的水量平衡分析见表4,从表4中可以看出,在整个灌水过程中,各个处理的试验土柱的水量是基本平衡的,相对误差均较小。

对土体中易溶性盐进行盈亏分析是了解土体盐分变化趋势、评价微咸水灌溉效果的重要方法,微咸水灌溉后土壤积盐量的大小与试验土壤初始含盐

表4 水量平衡分析结果

咸水矿化度/ (g·L ⁻¹)	初始含水量/ L	灌水量/ L	最终含水量/ L	流出水量/ L	蒸发量/ L	相对误差/ %
2	15.92	5.4	15.02	2.88	1.91	10.0
4	15.92	5.4	16.54	2.88	1.91	0.3

量、灌溉水带入的盐量、试验终期含盐量和流出溶液的含盐量有关。试验土壤的盐分盈亏变化可用如下平衡式表示^[11]:

$$\Delta S = (S_e + S_0) - (S_b + S_i) \tag{4}$$

式中: ΔS 为土体中储盐量的变化,g; S_e 为灌水终期土壤含盐量,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 灌溉水带入的盐量,g。

本试验土体的盐分平衡分析见表5,从表5可知试验相对误差在10%以内,表明各个处理的试验土体的盐分是基本平衡的。交替淋溶土柱后出现盐分积累情况,且矿化度为4 g/L的盐分积累大于2 g/L的盐分积累,也就是说较高矿化度的咸水淋溶带来较多的盐分积累。

表5 盐分平衡分析结果

咸水矿化度/ (g·L ⁻¹)	初始含盐量/ g	灌入水含盐量/ g	最终含盐量/ g	流出水含盐量/ g	相对误差/ %
2	18.84	6.17	24.30	0.055	2.7
4	18.84	9.98	31.62	0.049	9.9

2.1.3 可溶性盐的变化规律

a. Na⁺的分布。灌水后各层土壤溶液Na⁺质量浓度的变化见图3,从图3可以看出经过咸淡水交替淋溶后,两种矿化度各层土壤溶液Na⁺质量浓度较初始值都是增加的,但较第1次灌水后土壤溶液Na⁺质量浓度而言,Na⁺在5 cm,12.5 cm深处总体上呈下降趋势,22.5 cm这层的深处经过咸淡水交替灌

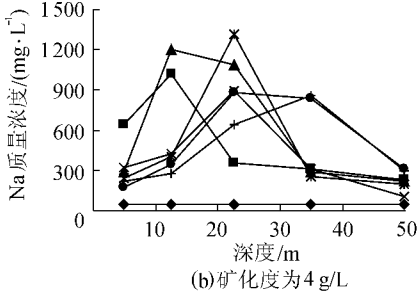
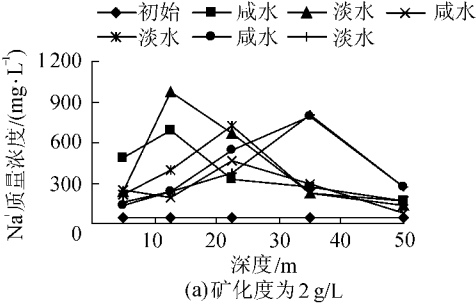


图3 灌水后各层土壤溶液Na⁺质量浓度的变化

溉后土壤溶液 Na^+ 质量浓度变化不大,但在灌水过程中该层 Na^+ 质量浓度的变化幅度较大;而 35 cm, 50 cm 深处的 Na^+ 质量浓度基本呈上升趋势,从整个土壤剖面来看,随着深度的增加土壤溶液 Na^+ 质量浓度增加,且矿化度为 4 g/L 的咸水灌入后各层土壤溶液 Na^+ 质量浓度比矿化度为 2 g/L 时的大。

b. Ca^{2+} 的分布。灌水后各层土壤溶液 Ca^{2+} 质量浓度的变化见图 4,从图 4 中可以看出 Ca^{2+} 分布变化的规律与 Na^+ 的变化基本是一致的。总的来说,虽然整个灌水结束后各层土壤溶液 Ca^{2+} 的质量浓度都要大于初始值,但与第 1 次灌咸水后相比, 5 cm, 12.5 cm 深处 Ca^{2+} 质量浓度是减小的,而 22.5 ~ 50 cm 深处是增加的,也就是说, Ca^{2+} 的分布是处于下移趋势的,这与 EC 值的变化趋势大体一致。

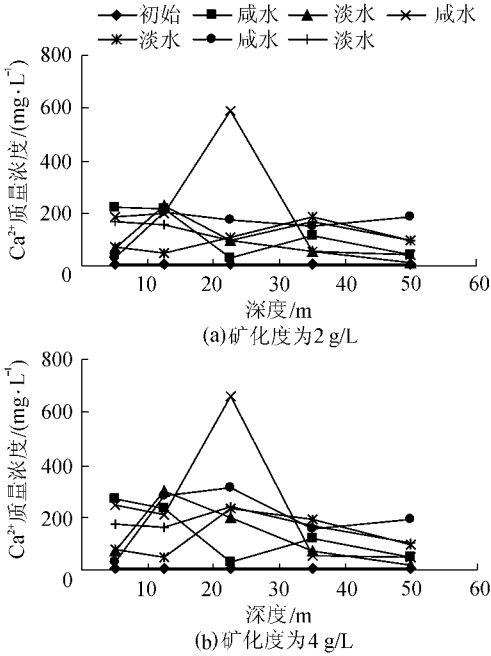


图 4 灌水后各层土壤溶液 Ca^{2+} 质量浓度的变化

2.2 EC 值与 SAR 值的相关性

根据公式(5)计算出两个处理下每次灌水后各层土壤溶液的 SAR 值,整个土柱的平均 EC 值与 SAR 值的关系如图 5 所示。从图 5 中可以看出 EC 值与 SAR 值并没有很好的相关性。随着 EC 值的增加 SAR 值并没有增大,表明盐分的增加并不会引起土壤的碱化。

$$SAR = \frac{\alpha(\text{Na}^+)}{\sqrt{\frac{\alpha(\text{Ca}^{2+})}{2}}} \quad (5)$$

3 结 论

a. 对于一咸一淡交替淋溶模式,随着淡水的淋洗土壤中盐分并没有一直在表层积聚,而是逐渐下移,矿化度为 2 g/L 的灌溉水多次灌溉后盐分最

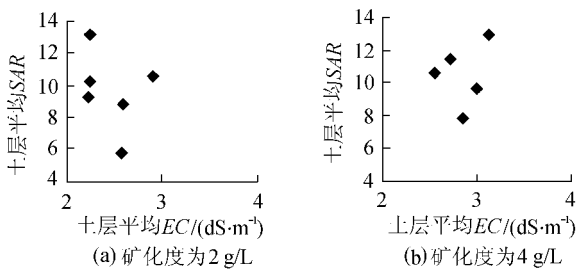


图 5 EC 值与 SAR 值的关系

终积聚在 50 cm 深处,矿化度为 4 g/L 的灌溉水多次灌溉后盐分最终在 35 cm 深处积聚。灌水结束后,两个试验处理的土柱都出现积盐情况,且矿化度为 4 g/L 时的盐分积累大于矿化度为 2 g/L 时的盐分积累。

b. 整个试验过程中,土柱的水分与盐分基本处于平衡状态,相对误差均在 10% 以内,这也体现了试验的合理性。

c. 在试验过程中,土壤溶液的 Na^+ , Ca^{2+} 的分布规律与 EC 值的变化规律大体一致,且矿化度为 4 g/L 的咸水灌入后各离子质量浓度比矿化度为 2 g/L 时的大。

d. EC 值与 SAR 值没有相关性,在灌水过程中, SAR 值不随 EC 值的增大而增大,表明盐分的增大并没有引起土壤的碱化。

参考文献:

[1] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].北京:科学出版社,2000.
[2] 王卫光,王修贵,沈荣开,等.微咸水灌溉研究进展[J].节水灌溉,2003(2):9-11.
[3] 刘昌明,陈志恺.中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
[4] 尉宝龙.咸水灌溉技术试验研究[J].山西水利科技,1999(3):88-90.
[5] 赵清.咸水灌溉高冰草试验研究[J].节水灌溉,1998(6):12-14.
[6] 王明治.咸水灌溉芹菜试验研究[J].东北水利水电,2000,18(8):25-26.
[7] AL-SULAIMI J, VISWANATHAN M N, NAJI M et al. Impact of irrigation on brackish groundwater lenses in north Kuwait[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31: 75-90.
[8] 郭永辰,陈秀玲.咸水与淡水联合运用的灌溉策略[J].河北水利科技,2000,21(S1):16-21.
[9] 水利部国际合作司,水利部农村水利司.美国国家灌溉工程手册[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
[10] 黄强,李生秀,宋郁东.咸水灌溉沙地后的水盐运移规律[J].土壤学报,2003(4):547-552.
[11] 李韵珠,李保国.土壤溶质运移[M].北京:科学出版社,1998.

(收稿日期 2007-07-31 编辑 骆超)