

再生水灌溉对深层包气带土壤盐分离子的影响*

商放泽 杨培岭 任树梅

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 夏玉米/冬小麦轮作期间, 设置3种灌水处理: 地下水灌溉, 灌水定额 52.5 mm; 再生水灌溉, 灌水定额 52.5 mm; 再生水灌溉, 灌水定额 105 mm, 研究了田间 0~450 cm 包气带土壤中主要盐分离子的迁移规律。结果表明: 盐分离子质量比和电导率在土壤中从大到小依次为: 380~450 cm 壤土土层、0~120 cm 壤土土层、120~380 cm 砂土土层; 再生水中可溶性 K^+ 和 Cl^- 表现出较强迁移能力, 影响深度 450 cm, K^+ 在 0~450 cm 土层变化, 但 Cl^- 主要在 0~250 cm 土层变化; 可溶性 Ca^{2+} 和电导率的影响深度为 380 cm, 但主要在 0~120 cm 土层变化; 380~450 cm 壤土土层对盐分离子的迁移起到了阻滞作用, 大幅降低了地下水受到污染的风险。建议利用灌水定额为 52.5 mm 的再生水灌溉, 夏玉米灌水 1 次, 冬小麦灌水 4 次或更少。

关键词: 灌溉 再生水 土壤盐分 电导率

中图分类号: S153 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)07-0098-09

Effects of Reclaimed Water Irrigation on Soil Salinity in Deep Vadose Zone

Shang Fangze Yang Peiling Ren Shumei

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

Abstract: Over the course of one summer maize and winter wheat rotation cycle, three irrigation treatments (ground water with a quota of 52.5 mm; reclaimed water with a quota of 52.5 mm; reclaimed water with a quota of 105 mm) were set up, and in each treatment, the soluble K^+ , Ca^{2+} , Cl^- and the electric conductivity (EC) leaching and migration in 0~450 cm soil were studied. The results showed that the soil salinity content and EC value were in the following descending order: 380~450 cm loam soil layer, 0~120 cm loam soil layer, and 120~380 cm sandy soil layer. Soluble K^+ and Cl^- in reclaimed water had a strong leaching and migration ability, and reached the 450 cm depth, and the influences of reclaimed water irrigation on soluble K^+ and Cl^- changes were mainly in 0~450 cm soil layer and 0~250 cm soil layer, respectively. Soluble Ca^{2+} and EC reached the 380 cm depth, but the influences of reclaimed water irrigation on soluble Ca^{2+} and EC changes were mainly in 0~120 cm soil layer. The 380~450 cm soil layer played a role as a block layer for soil salinity leaching, and decreased the pollution risk of soil salinity ion to groundwater. It suggested that irrigation with reclaimed water with a quota of 52.5 mm, while irrigation 1 time and 4 times or less during the summer maize and winter wheat growing seasons, respectively.

Key words: Irrigation Reclaimed water Soil salinity Electrical conductivity

引言

再生水在农业中的应用具有广阔的前景。再生

水灌溉能提高作物产量^[1-3], 而再生水中较高浓度的盐分离子则可能对土壤产生不利影响, 大部分国内外研究表明短期或长期田间再生水灌溉主要导致

收稿日期: 2012-10-25 修回日期: 2013-01-01

* 国家自然科学基金资助项目(51279204)、水利部公益性行业科研专项资助项目(201101051)和北京市教委建设项目

作者简介: 商放泽, 博士生, 主要从事水土资源与环境研究, E-mail: shangfangze@126.com

通讯作者: 杨培岭, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境、灌溉理论与技术研究, E-mail: yang-pl@163.com

0~30 cm 深度以内土壤盐分的累积^[4-9], 部分研究表明再生水灌溉主要引起盐分的淋洗, 并在下层土壤累积^[10-12], 也有研究表明再生水灌溉不会对土壤盐分产生显著影响^[13-16]。虽然再生水经过处理, 但由于经济技术原因, 一些盐分离子很难被有效去除^[17], 再生水灌溉下盐分离子对包气带土壤的影响有待进一步研究。

北京市再生水灌区已达到 3.33 万 hm^2 ^[18], 并且主要集中在大兴区和通州区, 通州区属于永定河和潮白河冲积平原, 具有特殊的包气带结构。针对以上特点, 本文研究田间再生水灌溉对夏玉米/冬小麦轮作体系中主要盐分离子在 0~450 cm 包

气带土壤中的迁移累积规律, 旨在探讨再生水灌溉过程中可溶性盐分离子的迁移变化及对地下水的污染风险, 为再生水长期灌溉田间作物提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

田间试验在北京市水科学技术研究院农业节水中心试验站进行。将田间观测土壤剖面与实验室粒径分析结果相结合, 把 0~450 cm 包气带土壤分为 12 层, 包气带土壤物理特性见表 1, 土壤基本盐离子和养分指标见表 2。

表 1 土壤物理特性

Tab. 1 Physical properties for experiment soil

土层深度 /cm	不同粒径颗粒质量分数/%			土壤质地	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间持 水率	饱和导水率 / $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
	0~0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~2 mm				
0~20	10.95	49.82	39.23	壤土	1.36	0.298	0.000 180
20~40	10.88	49.02	40.10	壤土	1.59	0.336	0.000 113
40~80	7.14	52.06	40.80	壤土	1.39	0.256	0.000 993
80~120	4.89	34.10	61.01	砂质壤土	1.40	0.422	0.000 810
120~160	1.84	9.53	88.63	砂土	1.45	0.331	0.000 755
160~200	1.20	9.45	89.35	砂土	1.50	0.354	0.000 731
200~250	1.10	9.81	89.09	砂土			
250~300	1.43	11.98	86.59	砂土			
300~350	0.64	4.52	94.84	砂土			
350~380	1.03	5.67	93.30	砂土			
380~400	10.17	56.82	33.01	壤土			
400~450	10.96	57.00	32.04	壤土			

表 2 土壤盐分和养分状况

Tab. 2 Soil salinity and nutrient contents

土层深度 /cm	pH 值	Na^+ 质量比 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mg^{2+} 质量比 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	SO_4^{2-} 质量比 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	HCO_3^- 质量比 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷质量比 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾质量比 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质质量比 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~20	8.5	72.20	17.33	82.03	324.67	22.85	103.27	12.32
20~40	8.6	76.37	23.00	132.13	371.00	50.90	94.33	12.19
40~80	8.7	88.37	19.56	142.43	188.67	9.03	70.07	6.57
80~120	8.8	68.70	11.05	114.40	134.00	2.47	40.72	4.17
120~160	8.9	27.90	6.18	33.07	139.33	2.21	16.88	0.72
160~200	8.8	28.87	5.64	27.73	136.33	0.90	18.29	0.73
200~250	8.9	28.67	5.98	23.63	136.33	1.06	18.23	0.86
250~300	8.8	24.10	5.81	22.40	157.00	0.66	21.48	0.82
300~350	8.9	23.73	5.28	20.37	139.33	0.80	20.73	0.83
350~380	8.9	24.93	5.20	23.50	131.00	1.46	23.17	1.16
380~400	8.4	135.73	32.20	331.00	358.33	13.60	277.13	19.71
400~450	8.5	90.83	23.90	252.00	180.67	8.99	244.17	19.15

1.2 试验设计

试验设置 3 种灌水处理, 即 CK、T1 和 T2, 分别表示地下水灌水定额为 52.5 mm、再生水灌水定额为 52.5 mm 和再生水灌水定额为 105 mm。2011 年 7 月 5 日人工播种夏玉米, 2011 年 10 月 15 日收获, 行距 55 cm, 株距 25 cm, 生育期 102 d, 分别在

2011 年 7 月 27 日、9 月 3 日和 9 月 23 日对夏玉米进行灌水。在 2011 年 7 月 5 日施底肥, 底肥为过磷酸钙 (P_2O_5 施用量 $65 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 和氯化钾 (K_2O 施用量 $65 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 7 月 22 日和 8 月 31 日分别追施尿素, 每次施纯氮 $75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

2011 年 10 月 19 日人工播种冬小麦, 2012 年

6月23日收获,行距15 cm,生育期245 d,分别在2011年10月25日、2012年4月12日、2012年5月13日和2012年5月30日对冬小麦进行灌水,2011年10月19日施底肥,底肥为过磷酸钙(P_2O_5 ,施用量 65 kg/hm^2),2012年4月12日和5月13日随灌水分别追施尿素,每次施纯氮 75 kg/hm^2 。试验小区面积 $4\text{ m}\times 5\text{ m}$,3个重复,共9个小区,每个小区

用高60 cm、宽30 cm的土埂围住,试验小区之间设置有1.5 m的隔离带,随机排列。试验用再生水为高碑店污水处理厂生产的二级再生水,地下水为在试验站抽取的地下水,试验期间共灌水7次,灌水水质见表3,降水量和灌水量见表4。3种灌水处理小区除灌水类型和灌水定额不同外,田间管理措施均保持一致。

表3 试验期间灌水水质

Tab.3 Quality of irrigation water

时间	灌水类别	pH 值	电导率 $/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
				质量浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
2011-07-27	再生水	7.50	796.00	20.85	75.90	86.45	31.60	87.30	71.30	241.50
	地下水	7.93	713.50	0.68	58.90	113.50	37.60	26.40	75.65	462.00
2011-09-03	再生水	7.48	807.00	14.70	56.15	57.30	22.65	77.45	71.65	181.00
	地下水	7.68	866.00	0.76	50.20	90.50	32.35	27.20	76.05	469.00
2011-09-23	再生水	7.63	972.00	17.65	63.55	69.45	27.40	104.50	91.75	227.00
	地下水	7.54	805.50	0.75	42.85	81.90	27.55	26.95	81.55	423.00
2011-10-25	再生水	7.71	834.50	19.45	71.70	84.05	29.45	114.50	100.50	215.50
	地下水	7.93	666.00	0.67	50.05	94.00	30.75	26.55	80.80	432.50
2012-04-12	再生水	7.43	1155.00	19.90	75.60	89.75	30.30	82.85	69.95	243.00
	地下水	7.79	888.00	0.49	49.40	99.10	29.30	26.10	55.90	422.00
2012-05-13	再生水	7.42	1070.00	19.50	70.05	83.25	29.30	70.50	55.30	251.50
	地下水	7.17	868.00	0.67	49.00	98.10	28.80	20.80	55.80	424.00
2012-05-30	再生水	7.90	919.50	17.90	70.30	92.10	29.05	86.20	78.90	273.00
	地下水	7.41	813.00	0.27	51.40	110.00	28.50	25.50	77.30	436.00
均值	再生水	7.58	936.28	18.56	69.03	80.34	28.54	89.04	77.05	233.21
	地下水	7.63	802.86	0.61	50.26	98.16	30.69	25.64	71.86	438.36

表4 试验期间降水量、灌水次数和总水量

Tab.4 Rainfall, frequency of irrigation and total water during experiment

时间	降水量 $/\text{mm}$	灌水次数	总水量(降水量+灌水量) $/\text{mm}$		
			CK	T1	T2
2011-07-04~2011-08-07	259.0	1	311.5	311.5	364.0
2011-08-07~2011-08-28	112.4	0	112.4	112.4	112.4
2011-08-28~2011-09-19	18.6	1	71.1	71.1	123.6
2011-09-19~2011-10-15	16.7	1	69.2	69.2	121.7
2011-10-15~2011-11-19	0	1	52.5	52.5	105
2011-11-19~2012-04-09	0	0	0	0	0
2012-04-09~2012-05-10	61.1	1	113.6	113.6	166.1
2012-05-10~2012-06-23	21.3	2	126.3	126.3	231.3

1.3 取样和测试分析方法

分别于2011年7月4日(试验前)、2011年8月7日(夏玉米拔节期)、2011年8月28日(夏玉米抽雄期)、2011年9月19日(夏玉米灌浆期)、2011年10月15日(夏玉米收获)、2011年11月19日(冬小麦越冬前)、2012年4月9日(冬小麦拔节期)、2012年5月10日(冬小麦灌浆期)和2012年6月23日(冬小麦收获)采集土壤样品。用荷兰Eijkelkamp公司生产的衬片式土样采集器分0~20、20~40、40~80、80~120、120~160、160~200、200~250、250~300、300~350、350~380、380~400

和400~450 cm共12层分层采集土样。土样测试指标为土壤可溶性 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 质量比和电导率。土壤中电导率采用电导率仪测定;土壤可溶性 K^+ 和 Ca^{2+} 质量比采用电感耦合等离子体发射光谱法测定;土壤可溶性 Cl^- 质量比采用容量法测定。由于可溶性 CO_3^{2-} 在土壤和水中的含量都较小,没有进行监测;本试验中,再生水中可溶性 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 质量浓度比地下水低,而再生水中可溶性 SO_4^{2-} 浓度只是地下水的1.07倍,本文对以上5种盐离子不进行分析。

数据用EXCEL 2007和SPSS 17.0软件进行分

析处理。

2 结果与分析

2.1 再生水灌溉对土壤中可溶性 K⁺ 的影响

再生水和地下水中 K⁺ 质量浓度分别为 18.56、0.61 mg/L, 再生水中 K⁺ 质量浓度是地下水的 30.43 倍, 是相差最大的盐分离子。夏玉米/冬小麦轮作期间土壤可溶性 K⁺ 的动态变化如图 1 所示。夏玉米生育期间, 第 1 次取样土壤中可溶性 K⁺ 只在 0~20 cm 和 380~450 cm 土层中存在, 2011 年 7 月 5 日施入氯化钾底肥, 期间降水 259 mm, 灌水 1 次, 至第 2 次取样, CK 处理土壤中 K⁺ 淋溶到 20~40 cm 土层, 而 T1 和 T2 处理已经淋溶到 380 cm 深,

表明再生水中的 K⁺ 随水分向深层土壤迁移。第 2 次至第 3 次取样期间, 降水 112.4 mm, 至第 3 次取样, 3 种处理土壤中 K⁺ 质量比总体增大, 原因是氯化钾底肥在大量水分的作用下开始溶解释放, 并被水分淋洗, CK 处理土壤中由氯化钾底肥产生的 K⁺ 迁移到 250 cm 深。第 3 次至第 5 次取样期间, 降水 35.3 mm, 灌水 2 次, 由于抽雄期后夏玉米对 K⁺ 的需求增加, 氯化钾底肥和 2 次灌水带来的 K⁺ 大部分被夏玉米根系利用, 被水分淋洗的 K⁺ 较少。冬小麦生育期间, 第 6 次至第 7 次取样期间, 没有降水和灌水, 土壤中 K⁺ 分布类似。第 7 次至第 9 次取样期间, 降水 82.4 mm, 灌水 3 次, 集中灌水使 K⁺ 更容易被淋洗至深层土壤, 同时由灌水带入的 K⁺ 和存在

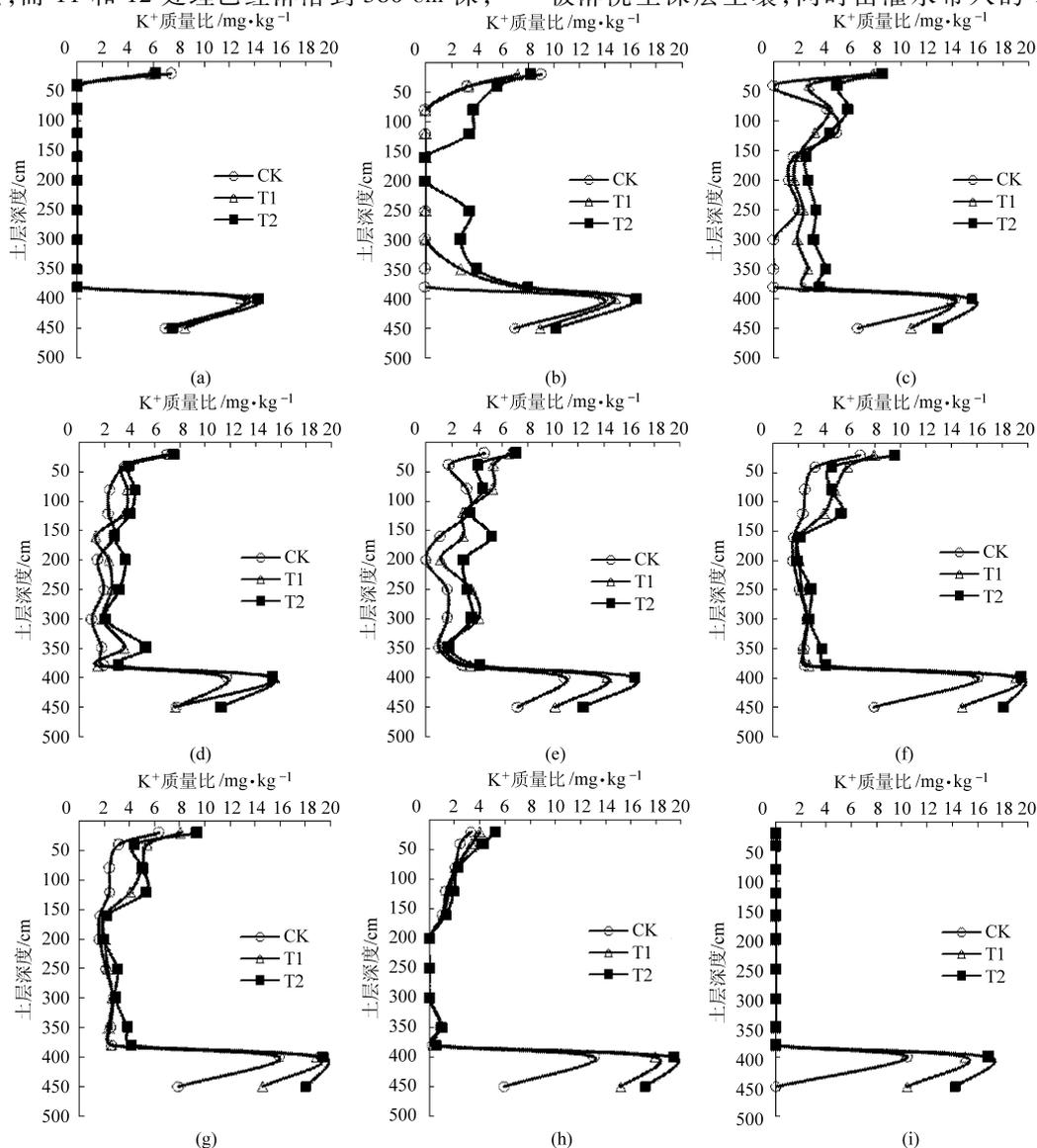


图 1 再生水灌溉对夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中可溶性 K⁺ 的影响

Fig. 1 Effect of reclaimed water irrigation on soil soluble K⁺ content in one summer maize and winter wheat rotation cycle

- (a) 2011-07-04 第 1 次取样 (b) 2011-08-07 第 2 次取样 (c) 2011-08-28 第 3 次取样
- (d) 2011-09-19 第 4 次取样 (e) 2011-10-15 第 5 次取样 (f) 2011-11-19 第 6 次取样
- (g) 2012-04-09 第 7 次取样 (h) 2012-05-10 第 8 次取样 (i) 2012-06-23 第 9 次取样

土壤中的 K^+ 被拔节期后快速生长的冬小麦大量吸收,至冬小麦收获,380 cm 以上土层中已经没有可溶性 K^+ ,与第 1 次取样相比,CK、T1 和 T2 处理 380 ~ 400 cm 土层中 K^+ 质量比分别增大 -22.4%、16.3% 和 18.1%,再生水灌溉使土壤中可溶性 K^+ 随水分淋洗迁移,在 380 ~ 400 cm 壤土土层中累积。

夏玉米播种至抽雄期、冬小麦拔节期至收获土壤中 K^+ 变化幅度最大,这与该时期作物生长旺盛、降水多、灌水频繁和气温高有关。再生水和地下水中 K^+ 质量浓度的差异是引起土壤中 K^+ 质量比差异的主要原因。3 种处理土壤中 K^+ 平均质量比在 0 ~ 120 cm 土层为 2.77、3.57、4.22 mg/kg;在 120 ~ 380 cm 土层为 0.985、1.53、2.16 mg/kg;在 380 ~

450 cm 土层为 9.84、13.49、15.26 mg/kg,3 种处理在 3 类土层中差异显著,土壤剖面中 K^+ 平均质量比从大到小依次为 T2、T1、CK,说明再生水灌溉使 450 cm 深度以内土壤中 K^+ 质量比明显增加。

2.2 再生水灌溉对土壤中可溶性 Ca^{2+} 的影响

再生水和地下水中 Ca^{2+} 质量浓度分别为 69.04、50.26 mg/L,再生水中 Ca^{2+} 质量浓度是地下水的 1.37 倍。夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中可溶性 Ca^{2+} 的动态变化如图 2 所示。夏玉米生育期间,第 1 次至第 2 次取样期间,施过磷酸钙底肥,期间降水 259 mm,灌水 1 次,至第 2 次取样,0 ~ 120 cm 土层 3 种处理 Ca^{2+} 质量比从大到小依次为 T2、T1、CK,同时 3 种处理 Ca^{2+} 在 200 ~ 250 cm 土层中有少

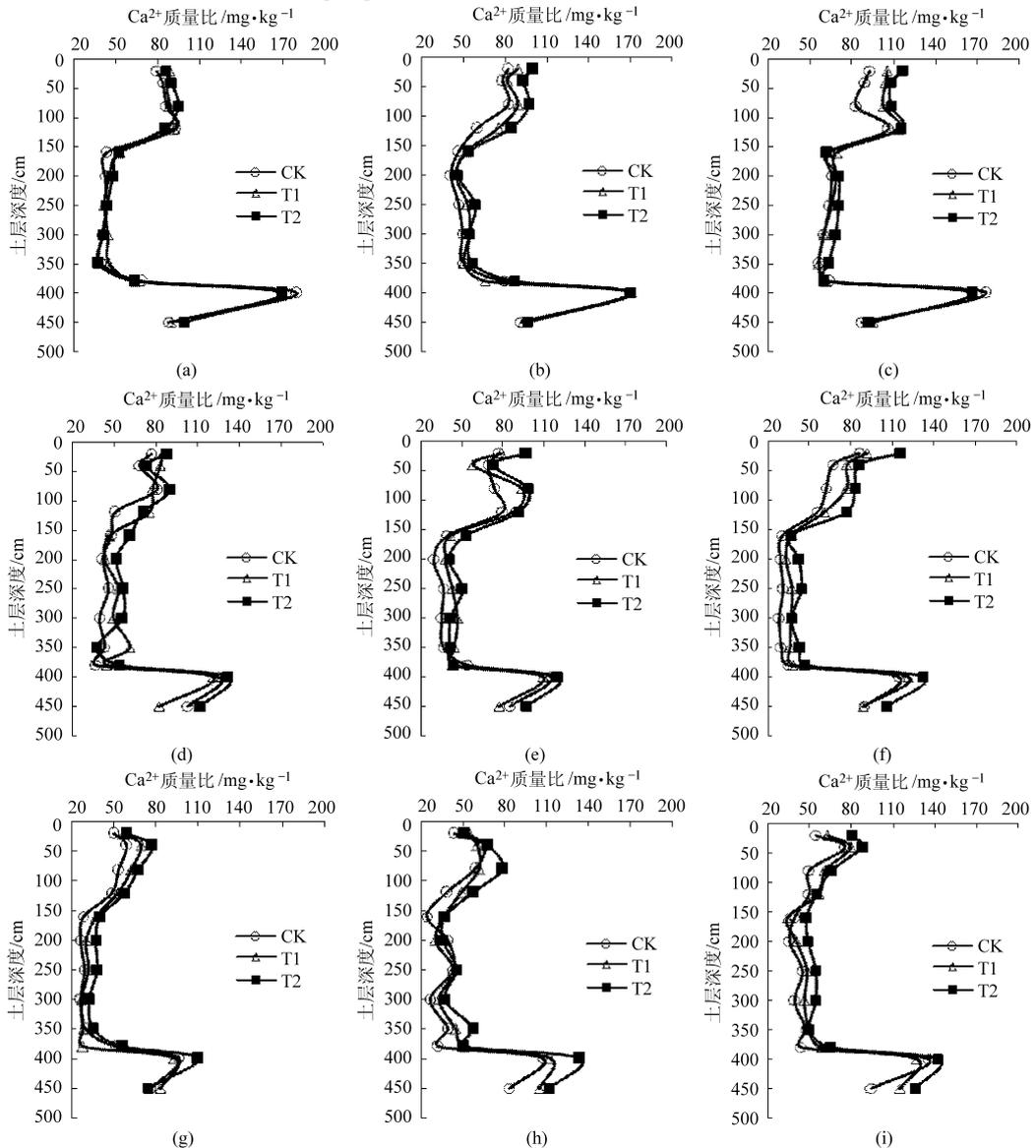


图 2 再生水灌溉对夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中可溶性 Ca^{2+} 的影响

Fig. 2 Effect of reclaimed water irrigation on soil soluble Ca^{2+} content in one summer maize and winter wheat rotation cycle

- (a) 2011-07-04 第 1 次取样 (b) 2011-08-07 第 2 次取样 (c) 2011-08-28 第 3 次取样
 (d) 2011-09-19 第 4 次取样 (e) 2011-10-15 第 5 次取样 (f) 2011-11-19 第 6 次取样
 (g) 2012-04-09 第 7 次取样 (h) 2012-05-10 第 8 次取样 (i) 2012-06-23 第 9 次取样

量累积,说明水分的淋洗作用使 Ca^{2+} 迁移到该土层。第2次至第3次取样期间,过磷酸钙底肥溶解释放出的 Ca^{2+} 被 112.4 mm 的降水淋洗,土壤中 Ca^{2+} 在 250 cm 以上土壤中增大,并在 80 ~ 120 cm 土层中大量累积。第3次至第5次取样期间,降水 35.3 mm,灌水 2 次,夏玉米从抽雄期到收获,对水分和盐分离子的需求较大,被淋洗的 Ca^{2+} 较少,但存在于土壤中的水分和 Ca^{2+} 则继续向土壤深层运动,至第5次取样,380 ~ 400 cm 土层中 Ca^{2+} 质量比减少,表明水分到达该层,并使该层 Ca^{2+} 产生淋洗。冬小麦生育期间,第6次至第7次取样期间,没有降水和灌水, Ca^{2+} 只在 0 ~ 120 cm 土层中有小幅波动。第7次至第9次取样期间,降水 82.4 mm,灌水 3 次,但 Ca^{2+} 主要在 250 cm 以上土壤中变化。

夏玉米播种至抽雄期土壤剖面中 Ca^{2+} 变化幅度较大,与该时期降水量大、气温高有关。土壤中 Ca^{2+} 平均质量比在 0 ~ 120 cm 壤土土层、120 ~ 380 cm 砂土土层和 380 ~ 450 cm 壤土土层中差异显著 ($\alpha < 0.05$),土壤剖面中 Ca^{2+} 平均质量比从大到小依次为 T2、T1、CK,再生水和地下水中 Ca^{2+} 质量浓度的差异及灌水量的多少是引起土壤中 Ca^{2+} 质量比差异的主要原因。与 CK 相比, T1 处理 0 ~ 120 cm 土层、120 ~ 380 cm 土层和 380 ~ 450 cm 土层 Ca^{2+} 质量比分别增大 11.00%、6.95% 和 0.74%,说明相同灌水定额下,再生水灌溉主要增加 120 cm 土层中的 Ca^{2+} 质量比,但 120 ~ 380 cm 砂土土层中水分迁移较容易,所以 Ca^{2+} 在该层也波动变化,而灌水对 380 cm 以下土壤影响较小。

2.3 再生水灌溉对土壤中可溶性 Cl^- 的影响

再生水和地下水中 Cl^- 质量浓度分别为 89.04、25.64 mg/L,再生水中 Cl^- 质量浓度是地下水的 3.47 倍。夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中可溶性 Cl^- 的动态变化如图 3 所示。第1次至第3次取样期间,施氯化钾底肥,降水 371.4 mm,灌水 1 次,至第3次取样,0 ~ 120 cm 土层中 Cl^- 分布由随深度增加而逐渐减小变为随深度增加逐渐增大,表明水分对由氯化钾底肥溶解释放的 Cl^- 和再生水中的 Cl^- 的淋洗作用明显,3 种处理 Cl^- 质量比在 120 ~ 250 cm 土层中从大到小依次为 T2、T1、CK,再生水灌溉使 Cl^- 质量比增加,灌水越多, Cl^- 增加也越多。第3次至第6次取样期间,降水 35.3 mm,灌水 3 次,灌水使 Cl^- 在土壤中大量迁移, Cl^- 在 250 cm 以上土层中增加明显, T2 处理在 80 ~ 120 cm 和 380 ~ 400 cm 土层中大量累积,表明 Cl^- 在土壤中迁移能力强,夏玉米根系不能较好吸收再生水中的 Cl^- 。第7次至第9次取样期间,降水 82.4 mm,灌水 3

次, Cl^- 主要在 0 ~ 120 cm 土层中变化并有增加趋势。

夏玉米生育期间土壤中 Cl^- 质量比变化幅度较大,在冬小麦生育期间变化较小。3 种处理土壤中 Cl^- 平均质量比从大到小依次为 T2、T1、CK, Cl^- 平均质量比在 0 ~ 120 cm 土层中分别为 13.35、18.38、23.44 mg/kg; 在 120 ~ 380 cm 土层中分别为 8、10.8、13.76 mg/kg, 3 种处理在 2 个土层差异显著 ($\alpha < 0.05$)。与 CK 处理相比, T1 和 T2 处理使 380 ~ 450 cm 土层中 Cl^- 质量比分别增加 5.3% 和 41.2%,说明灌水定额为 52.5 mm 时,再生水灌溉不会使土壤中 380 ~ 400 cm 土层 Cl^- 明显增加,而大量再生水灌溉导致 Cl^- 在该土层显著增加。

2.4 再生水灌溉对土壤中电导率的影响

再生水和地下水中电导率分别为 936.29、802.86 $\mu\text{S}/\text{cm}$,再生水中电导率是地下水的 1.17 倍。夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中电导率的动态变化如图 4 所示。第1次至第2次取样期间,降水 259 mm,灌水 1 次,施过磷酸钙和氯化钾底肥,追施尿素一次,灌水和肥料溶解释放产生的盐离子随水分迁移,至2次取样,土壤中电导率增大,特别是 0 ~ 120 cm 土层中电导率增大最多,250 cm 以下 3 种处理电导率接近,表明灌水水质和灌水量主要影响 250 cm 深度以内土壤中的电导率,250 ~ 380 cm 以下土壤中电导率的小幅增加是由施肥造成的。第2次至第3次取样期间,降水 112.4 mm,肥料中的盐离子继续随水分溶解而迁移,至第3次取样,土壤中电导率在 0 ~ 120 cm 土层增加。第3次至第4次取样期间,降水 18.6 mm,灌水 1 次,夏玉米从抽雄期至灌浆期,夏玉米根系大量吸收水分和盐分,至第4次取样,土壤中电导率大幅降低。第4次至第5次取样期间,降水 16.7 mm,灌水 1 次,土壤中电导率主要在 0 ~ 120 cm 土层变化,在 80 ~ 120 cm 土层累积。第5次至第9次取样期间,降水 82.4 mm,灌水 4 次,降水和灌水集中在 4 ~ 6 月,此时冬小麦从拔节期至收获,生长旺盛,灌水中盐离子被冬小麦根系大量吸收,电导率主要在 0 ~ 120 cm 土层变化。

夏玉米播种至抽雄期,土壤中电导率在 0 ~ 120 cm 土层变化最大,但影响深度为 380 cm,而在冬小麦生育期,电导率影响深度为 120 cm。土壤中电导率在 0 ~ 120 cm 壤土土层、120 ~ 380 cm 砂土土层和 380 ~ 450 cm 壤土土层中有显著差异 ($\alpha < 0.05$)。土壤剖面中电导率从大到小依次为 T2、T1、CK,电导率平均值在 0 ~ 120 cm 土层中分别为 138.63、158.17 和 177.71 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 在 120 ~ 380 cm 土层中分别为 78.11、79.46 和 90.21 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 在 380 ~ 450 cm

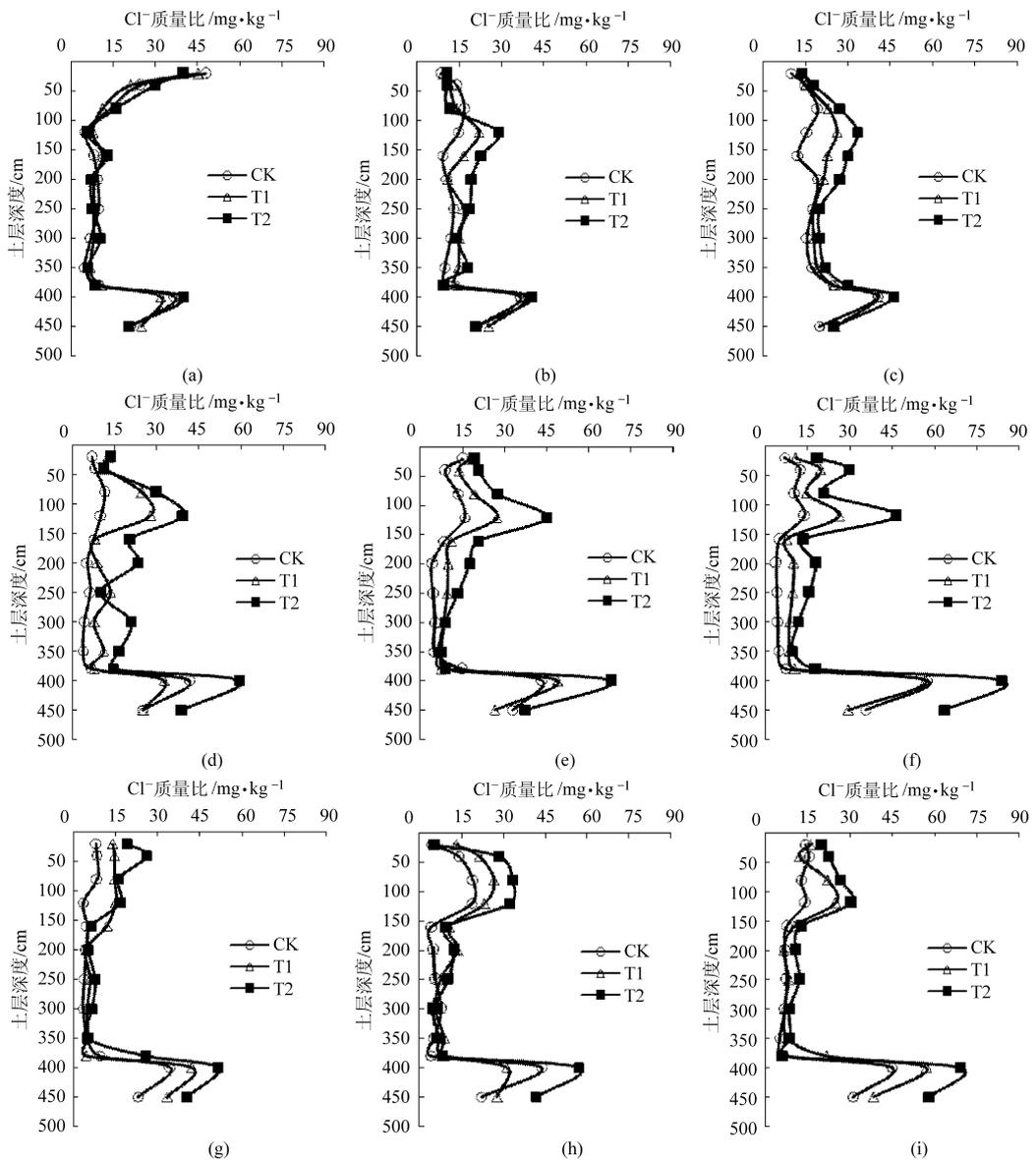


图3 再生水灌溉对夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中可溶性 Cl^- 的影响

Fig. 3 Effect of reclaimed water irrigation on soil soluble Cl^- content in one summer maize and winter wheat rotation cycle

- (a) 2011-07-04 第1次取样 (b) 2011-08-07 第2次取样 (c) 2011-08-28 第3次取样
 (d) 2011-09-19 第4次取样 (e) 2011-10-15 第5次取样 (f) 2011-11-19 第6次取样
 (g) 2012-04-09 第7次取样 (h) 2012-05-10 第8次取样 (i) 2012-06-23 第9次取样

土层中分别为 226.50、232.72 和 251.97 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。与 CK 处理相比, T1 和 T2 处理在 0~120 cm 土层中增加 14.10% 和 28.19%, 在其他 2 个土层增幅较小, 特别是 T1 处理, 在 120 cm 深度以下电导率平均值几乎与 CK 处理无差别, 表明灌水定额为 52.5 mm 的再生水灌溉主要增加 0~120 cm 深度以内土壤电导率。

3 讨论

本次试验用再生水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 的质量浓度比地下水还低, 这与其他学者试验用再生水中盐分离子含量有一定差异^[11], 可能是污水处理厂的二级再生水水质在这段时期得到改善。0~450 cm 包气带土壤中, 0~120 cm 为壤土、120~380 cm 为砂土、

380~450 cm 为壤土, 即呈“壤土-砂土-壤土”的包气带结构特点。从土壤水机理分析, 在同一吸力条件下, 120 cm 以上壤土比 120 cm 以下砂土含水率高, 或者说在相同含水率下, 上层壤土的土壤水吸力大于下层砂土的土壤水吸力, 导致水分和盐分离子从壤土到砂土迁移较困难, 所以 80~120 cm 壤土土层中盐分离子呈现累积状态; 相反, 水分从 380 cm 以上砂土迁移到 380 cm 以下壤土相对容易, 对盐分的淋洗作用也较显著。从土壤物理特性分析, 380~450 cm 土层为壤土, 壤土的饱和含水率和田间持水率都较大, 对水分和溶质的容纳、吸持、涵养能力都较强, 水分和盐分离子不容易继续迁移, 所以导致盐分离子在 380~450 cm 壤土中大量累积。从再生水

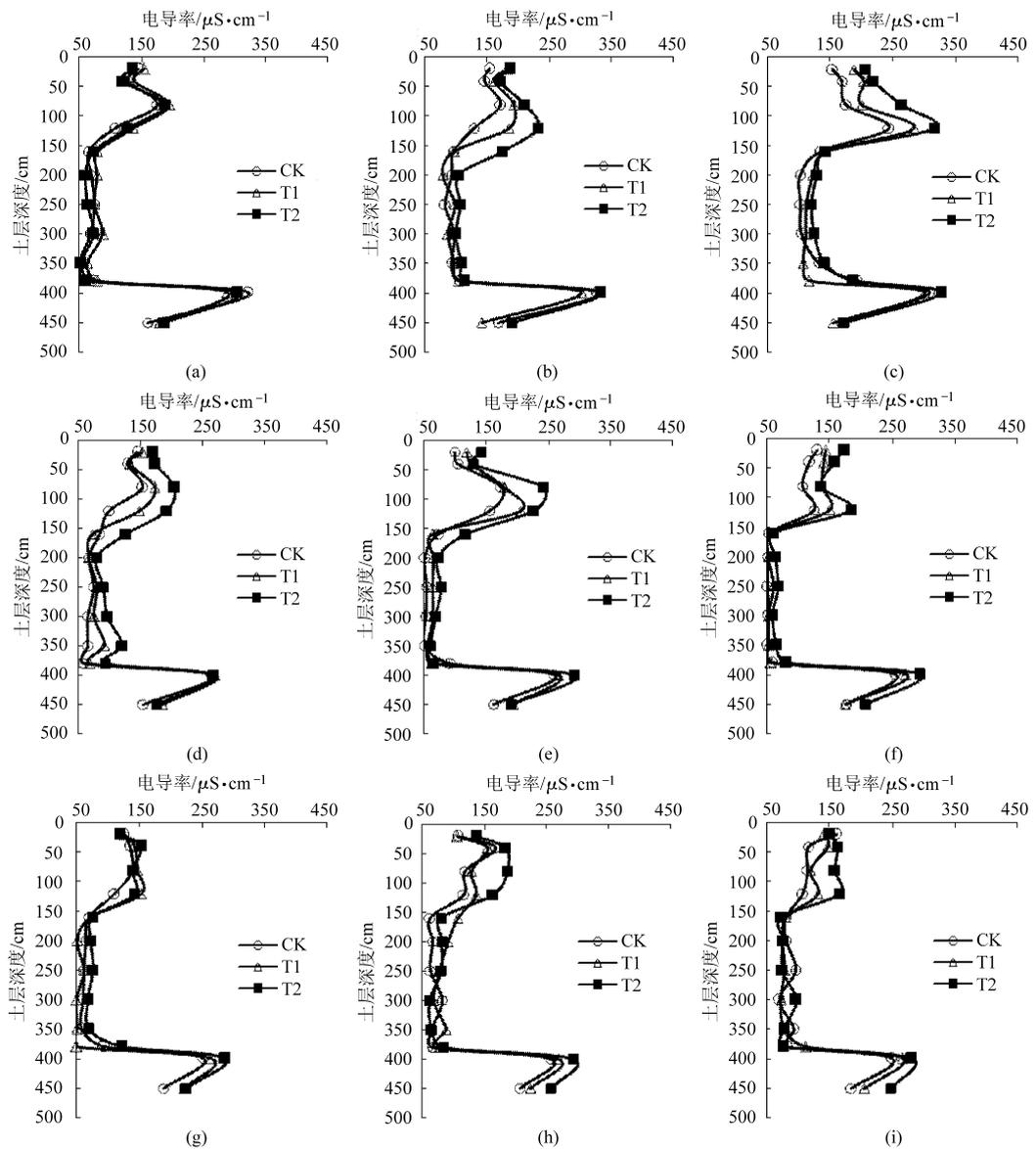


图 4 再生水灌溉对夏玉米/冬小麦轮作期间土壤中电导率的影响

Fig. 4 Effect of reclaimed water irrigation on soil electrical conductivity in one summer maize and winter wheat rotation cycle

- (a) 2011-07-04 第 1 次取样 (b) 2011-08-07 第 2 次取样 (c) 2011-08-28 第 3 次取样
 (d) 2011-09-19 第 4 次取样 (e) 2011-10-15 第 5 次取样 (f) 2011-11-19 第 6 次取样
 (g) 2012-04-09 第 7 次取样 (h) 2012-05-10 第 8 次取样 (i) 2012-06-23 第 9 次取样

特性分析,再生水灌溉后生物膜数量的增加^[19]以及灌水中盐离子对土壤入渗性能的影响^[20]都会影响到盐离子在土壤中的分布。本研究中 0~120 cm 壤土土层和 380~450 cm 壤土土层中盐离子质量比和电导率分别是 120~380 cm 砂土土层的 1.68~2.29 倍和 2.51~8.27 倍,表明包气带土壤中土壤质地和土壤质地对土壤中的结构影响了盐离子和电导率在土壤中的质量比。本次试验在半湿润季风气候、田间“少次多量”的灌水制度、雨热同期及“壤土-砂土-壤土”的特殊包气带结构下进行,发现盐离子迁移深度超过 100 cm,部分盐离子甚至迁移至 450 cm 深,与其他国内外研究结果有一定差异,因为这些研究区域大都为干旱-半干旱气候

地区,降水量极少、蒸发量较大,水分的输入少而蒸发损失大,对盐离子的淋洗作用小,另外,这些地区包气带土壤质地相对均一、没有砂土层,不易导致盐离子的快速迁移^[2,7,10-11]。

灌水定额为 52.5 mm 的再生水灌溉期间,盐离子在深层土壤的迁移累积量相对较小,同时该区域地下水埋深约 10 m,盐离子对地下水的污染风险较低。夏玉米生育期间灌水 3 次,但夏玉米生育期降水量占全年降水量的 83.2%,同时该时期气温最高,所以夏玉米生育期间盐离子迁移淋洗非常活跃,而冬小麦生育期间灌水 4 次,但降水量只占 16.8%,盐离子的迁移累积相对不活跃。综合考虑北京地区夏玉米/冬小麦灌溉制度和再生水灌溉

对包气带土壤盐分、对替换淡水资源的影响,建议夏玉米生育期间减少灌水次数至1次,冬小麦灌水次数为4次或更少,可长期利用再生水进行夏玉米/冬小麦的田间灌溉。

4 结论

(1)土壤质地和包气带结构影响再生水灌溉下土壤中盐分离子质量比和电导率,从大到小依次为380~450 cm 壤土土层、0~120 cm 壤土土层、120~380 cm 砂土土层,380~450 cm 壤土土层对盐分离子迁移起到了阻滞作用。

(2)可溶性 K^+ 和 Cl^- 在土壤中迁移能力较强,对包气带土壤影响深度达450 cm, K^+ 在0~450 cm 土层中都有大幅变化,但 Cl^- 主要在0~250 cm 土层变化;可溶性 Ca^{2+} 和电导率对包气带土壤的影响深度达380 cm,但主要在0~120 cm 土层变化。

(3)盐分离子在夏玉米生育期间迁移淋洗活跃,再生水灌水定额越大,盐分离子在土壤中的迁移和累积量越大。不同处理盐分离子质量比和电导率在土壤中从大到小依次为 T2、T1、CK。

(4)建议利用灌水定额为52.5 mm 的再生水灌溉,夏玉米灌水1次,冬小麦灌水4次或更少。

参 考 文 献

- Zavadil J. The effect of municipal wastewater irrigation on the yield and quality of vegetables and crops[J]. Soil & Water Research, 2009, 4(3):91~103.
- Wang J F, Wang G X, Wanyan H. Treated wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: wastewater recycling in the loess area of China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(9):1 093~1 099.
- Vazquez-Montiel O, Horan N J, Mara D D. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(10~11):355~362.
- 魏益华,徐应明,周其文,等. 再生水灌溉对土壤盐分和重金属累积分布影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3):5~8. Wei Yihua, Xu Yingming, Zhou Qiwen, et al. Effects of irrigation with reclaimed water on soil salinize-alkalization and heavy metal distribution[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3):5~8. (in Chinese)
- 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 salinize-alkalization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4):101~104. (in Chinese)
- 侯贤贵,杨培岭,任树梅. 再生水灌溉对土壤盐碱性影响的大田试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2):17~20. Hou Xiangui, Yang Peiling, Ren Shumei. Field experimental on effects of soil salification and basification characteristics under irrigation with reclaimed water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2):17~20. (in Chinese)
- Angin I, Yaganoglu A V, Turan M. Effects of long-term wastewater irrigation on soil properties[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2005, 26(3):31~42.
- 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.
- Qian Y L, Mecham B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(3):717~721.
- 薛彦东,杨培岭,任树梅,等. 再生水灌溉对土壤主要盐分离子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)
- 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 CSAE, 2010, 26(5):34~39. (in Chinese)
- Crooks V E, Quigley R M. Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(2):349~362.
- 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.
- 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.
- 苗战霞,黄占斌,侯利伟,等. 再生水灌溉对玉米根际土壤特性和微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):62~66. Miao Zhanxia, Huang Zhanbin, Hou Liwei, et al. The effect of irrigation with reclaimed water on soil peculiarity and microorganism quantity of maize root zone[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1):62~66. (in Chinese)

- the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15):65~71. (in Chinese)
- 24 杨新民, 杨文治, 马玉玺. 纸坊沟流域人工刺槐林生长状况与土壤水分条件研究[J]. 水土保持研究, 1994, 3(1):31~35.
Yang Xinmin, Yang Wenzhi, Ma Yuxi. Study on the condition growing of the man-made locust woodland and moisture eco-environment in the small watershed of Zhifanggou [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1994, 3(1):31~35. (in Chinese)
- 25 Psssioura J B. Soil conditions and plant growth [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2):311~318.
- 26 Araki H, Iijima M. Stable isotope analysis of water extraction from subsoil in upland rice (*Oryza sativa* L.) as affected by drought and soil compaction [J]. Plant and Soil, 2005, 270(1~2):147~157.
- 27 Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108(3):389~411.
- 28 Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(14):7362~7366.
- 29 Lee J E, Oliveira R S, Dawson T E, et al. Root functioning modifies seasonal climate [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(49):17576~17581.
- 30 Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in Cerrado savannas of central Brazil [J]. Functional Ecology, 2005, 19(4):574~581.
- 31 Nepstad D C, de Carvalho C R, Davidson E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures [J]. Nature, 1994, 372(6507):666~669.
- 32 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):203~207.
Cheng Liping, Liu Wenzhao. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on loess tableland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9):203~207. (in Chinese)
- 33 王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 52(6):835~842.
Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Liu Gang, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau [J]. Science China: Earth Sciences, 2009, 52(6):835~842. (in Chinese)
- 34 Nippert J B, Wieme R A, Ocheltree T W, et al. Root characteristics of C_4 grasses limit reliance on deep soil water in tall grass prairie [J]. Plant and Soil, 2012, 355(1~2):385~394.
- 35 Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma, 2013, 193~194:300~310.

~~~~~

(上接第 106 页)

- 16 张洪生, 张克强, 韩烈保, 等. 再生水灌溉对绿地土壤环境的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊 1):78~84.  
Zhang Hongsheng, Zhang Keqiang, Han Liebao, et al. Effects of reclaimed water irrigation on soil environment of greenbelt [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(Supp. 1):78~84. (in Chinese)
- 17 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):319~323.  
Jiao Zhihua, Huang Zhanbin, Li Yong, et al. The effect of reclaimed water irrigation on soil performance and the microorganism [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2):319~323. (in Chinese)
- 18 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 CSAE, 2009, 25(12):22~25. (in Chinese)
- 19 李贵兵, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水条件下灌水器内生物膜生长对流量的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3):33~38.  
Li Guibing, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Effects of growth of biofilm to emitters flow in emitter of reclaimed wastewater irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):33~38. (in Chinese)
- 20 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):101~107.  
Xiao Juan, Jiang Peifu, Guo Xiufeng, et al. Effect of water quality on wetting front moving and salt-water distribution under negative hydraulic head [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):101~107. (in Chinese)