

地下水作用条件下粉砂壤土盐分动态研究*

刘广明 杨劲松 李冬顺

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 用粉砂壤土土柱进行了室内模拟试验, 研究不同地下水埋深及其矿化度作用条件下非饱和粉砂壤土的盐分动态规律。在相同地下水埋深情况下, 处于盐分动态平衡状态时的各模拟土柱相同层次土壤溶液浓度, 与地下水矿化度呈良好正相关关系。在相同地下水矿化度条件下, 土体积盐速率与地下水埋深呈负相关关系, 但是各土柱相同埋深土体达到盐分动态平衡状态时的土壤溶液浓度差别不明显。对地下水埋深及地下水矿化度对耕作层土壤溶液浓度的综合作用效果进行了深入分析, 建立了各积盐阶段耕作层土壤溶液浓度的增高值关于此二因素的数理统计模型。

关键词 地下水埋深, 地下水矿化度, 盐分动态

中图分类号 S156.4⁺1

土壤水盐动态包括土壤中盐分状况及其分布情况的时空变化。目前, 对蒸发条件下土壤水盐动态规律的研究已经取得不少成果^[1~4]。但是已有这些成果多是针对不同土壤剖面组成以及不同地下水埋深条件进行研究的, 对于地下水埋深、地下水矿化度不同组合条件下的土壤盐分动态方面的研究则较少。本文旨在通过室内土柱模拟试验, 研究不同地下水埋深、地下水矿化度组合条件下的土壤盐分动态。

长江河口地区是我国重要经济中心之一, 也是我国重要的粮、棉、油、水产等农业商品生产基地。三峡建坝后, 工程调蓄将会使河口地区水盐平衡发生改变, 导致该区土壤演变过程进一步复杂化^[5]。因此, 本项工作运用土柱试验, 模拟工程调蓄可能造成的地下水位和地下水矿化度的变化, 进而研究地下水作用条件下的土壤盐分动态与土壤积盐状况。这对研究长江河口地区土壤次生盐渍化的发生机理, 以及预测与评估该地区土壤盐渍化的发生发展具有重要意义。同时, 也为消除或减轻三峡工程对河口地区生态及环境的影响、建立工程对环境影响的防范对策体系打下一定的理论基础。

1 试验材料及方法

1.1 供试土壤及地下水

供试土壤: 室内土柱模拟试验所用土壤取自长江河口地区典型地带, 为发育于长江冲积物上的脱盐土, 质地为粉砂壤(美国制), 其基本理化性状如表 1 及表 2 所示。

* 中国三峡工程开发公司项目 SX(97)-11-4 和国家重点基础研究发展规划项目 G19990118 的部分内容

收稿日期: 2000-03-21; 收到修改稿日期: 2000-06-07

表1 供试土壤的机械组成分析(美国制)

Table 1 Basic properties of soil from the Changjiang River Estuary

颗粒组成(%)					土壤质地 Texture
Mechanical properties					
> 0.25mm	0.25~ 0.1mm	0.1~ 0.05mm	0.05~ 0.002mm	< 0.002mm	
中砂	细砂	极细砂	粉砂	粘粒	
—	0.5	17.5	77.0	5.0	粉砂壤

表2 供试土壤盐分基本组成

Table 2 Basic salt composition of the soil tested

pH	电导率	全盐量	土壤盐分离子组成(cmolkg^{-1})							
	EC(25℃)	Total salt	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
8.86	0.104	0.364	—	0.176	0.296	0.075	0.240	0.080	0.032	0.196

供试地下水:为模拟河口土壤在地下水作用条件下的盐分动态,试验所用地下水系根据当地地下水样的盐分组成由人工配制而成,其各盐分组成如表3所示。

表3 地下水盐分组成

Table 3 Salt regime of groundwater

盐分种类	摩尔比例	地下水中各类盐分含量	盐分种类	摩尔比例	地下水中各类盐分含量
Salt	Ratio(%)	Salt content in groundwater(gL^{-1})	Salt	Ratio(%)	Salt content in groundwater(gL^{-1})
CaCl_2	10	0.77	MgCl_2	15	0.99
Na_2SO_4	10	0.98	NaCl	65	5.26

1.2 试验处理

表4 试验处理

Table 4 Groundwater depth and salinity

地下水埋深 Groundwater depth(cm)	土柱号 Soil column No.	地下水矿化度 Degree of mineralization of groundwater(gL^{-1})
85	No. 1	2
	No. 2	4
	No. 3	8
105	No. 4	2
	No. 5	4
	No. 6	8
155	No. 7	2
	No. 8	4
	No. 9	8

1.3 土柱填装及仪表安装

供试土壤经自然风干后,磨细、去杂、过20目筛并搅拌混合均匀。填装土柱时,根据田间土壤实际容重控制及模拟土柱土壤容重为 1.33g cm^{-3} 。

各模拟土柱填装完毕之后,首先由土柱底部供应蒸馏水,以使土体水分含量近似达到田间水分状态。待湿润峰到达土壤表面时,开始安装观测仪表。分别于地下水埋深85厘米土柱的5, 20, 35, 65, 85

本试验设地下水位及地下水矿化度各3个水平(见表4),计9个土柱(试验装置示意图见图1)。

每个土柱顶部布设一红外灯(250W)用以模拟光照,土壤表层温度由自动温控装置控制,设定温度分别为冬季 25°C 、春秋 30°C 、夏季 40°C 。每天从8:30开始至17:30光照约9h。分别于各土柱不同深度处安装盐分传感器,以监测土壤盐分的动态变化,并在同一深度处安装水分张力计以监测土壤水分动态。每一土柱底部都装有一个马利奥特瓶,用以将地下水位控制在设定高度,并且测读地下水消耗量。

厘米深度处、地下水埋深 105 厘米土柱的 5, 20, 35, 50, 65, 95 厘米深度处、以及地下水埋深 155 厘米土柱的 5, 15, 30, 45, 65, 105, 145 厘米深度处埋设仪表。

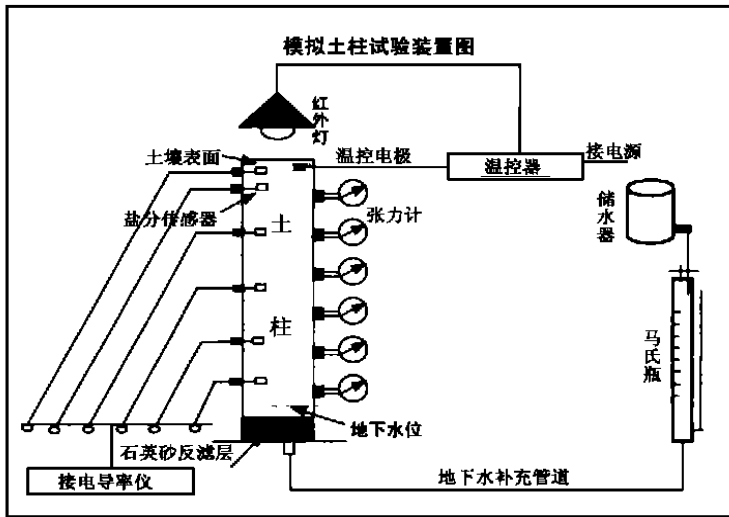


图 1 模拟土柱试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of devices for the simulation experiment

1.4 试验数据观测

仪表安装结束后, 根据试验设计开始用马利奥特装置向各土柱分别供应矿化地下水。考虑到土柱盐分变动速率的差异, 试验开始后第一个月内每两天观测一次, 第二月初至第五月末每三天观测一次, 第六月初至试验结束每四天观测一次。每次分别观测各土柱不同土层土壤溶液的电导率值、水分张力计读数以及地下水消耗量。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面盐分动态

土壤剖面盐分动态可以比较直观地反映出土壤溶液浓度的变化及盐分的积聚过程。首先我们来考察浅地下水埋深、中等矿化度水平的 2 号土柱的土壤剖面盐分动态规律(图 2)。由该图可见: 由于各层土体与地下水位的距离不同, 先在最下层土体开始积盐, 随后依次向上层土体发展。因为相邻两盐分传感器之间的距离不同, 毛管水由下层运行到相邻上层所需时间存在差异, 导致各土层开始迅速积盐的时间呈现不同且有规律性。试验开始后, 由于地下水埋深附近的土体最先受到地下水的影响, 最底层土体积盐最为迅速, 仅经过大约 30 天时间就达到盐分动态平衡状态。埋深 60cm 和 35cm 两处的土体各自在其相邻下层土体进入盐分动态平衡状态后, 才开始迅速积盐, 在此之前积盐非常缓慢。埋深 5cm、20cm 处的土体则因处于土柱上部, 毛管张力梯度较大, 并且各自与其相邻下层土体的间距小, 所以此二处土体分别在相邻下层土体迅速积盐过程中也开始同步积盐, 只不过开始迅速积盐的时间较其相邻下层稍有滞后。最底层土体进入盐分动态平衡状态的时间要比 20cm 埋深处土体的早约 120 天。整个剖面大致经历了 150 天进入了积盐稳定阶段。在积盐稳定阶段, 下部各层土体土壤溶液浓度均保持动态平衡, 只有表层土体土壤溶

液浓度继续显著增加。处于这一阶段, 下部各层土体的土壤溶液浓度大致相等, 都近似等于地下水矿化度, 但是同时呈现出由最底层向上依次稍有增加的趋势; 表层土体盐速率进一步增大, 土壤溶液浓度迅速增加, 这是由于此时下层土体中盐分保持动态平衡, 借毛管水作用上升运行的矿化地下水中的盐分均只在表层积聚。

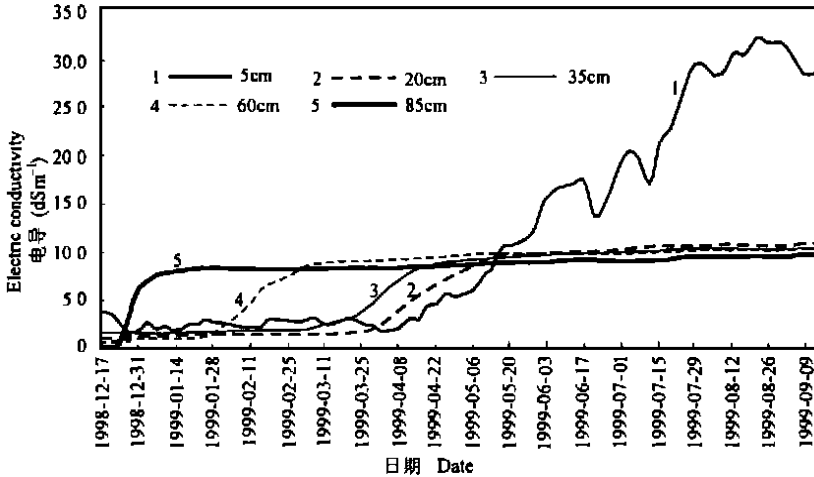


图2 模拟土柱剖面盐分动态(No.2 土柱)

Fig. 2 Salt dynamics in profile of No. 2 soil column

图2中埋深5cm处土体盐分动态曲线在6月20日附近明显下凹, 这是6月17日进行表层采样并调节表层温度至 40°C , 导致该处土体水分平衡被破坏, 新的水分平衡尚未形成, 水分含量出现明显上升造成的; 7月15日前的显著下凹是因为7月6至10日温控不正常; 8月31日后表层盐分动态曲线下凹则是9月3日进行了表土回填的结果。

从其他几个处理的土柱监测结果看, 地下水埋深85cm的各模拟土柱经过150天左右时间都进入积盐稳定阶段。地下水埋深105cm的各土柱则用220天左右时间进入积盐稳定阶段。试验开始270天后, 7号土柱105cm深度以及8号土柱145cm深度以下的土体, 达到了盐分动态平衡状态; 9号土柱的145厘米深度处土体则仅呈现动态平衡趋势。

2.2 地下水矿化度对土壤盐分的影响

地下水矿化度对土体土壤溶液浓度有明显影响, 导致其他条件相同情况下土柱积盐规律仍有显著区别。此处以较浅地下水埋深情况为例(图3)来说明这一影响。该图反映出地下水埋深85厘米土柱35厘米深度处土体土壤溶液浓度的动态变化规律。由该图可见: 在地下水埋深条件相同情况下, 试验开始大约70天后, 1、2、3号土柱35cm深度处土体开始明显积盐, 其积盐速率随着矿化度的升高依次显著增大。此外, 地下水矿化度不同导致进入盐分动态平衡状态后, 同深度处土体的土壤溶液浓度差异非常显著: 1号土柱35cm深度处土壤溶液电导值仅为 5dSm^{-1} 左右, 2号土柱该处土壤溶液电导值约为 10dSm^{-1} , 而3号土柱同深度处土壤溶液电导值则近似为 15dSm^{-1} 。可见, 进入盐分动态平衡状态后, 地下水埋深85cm的各模拟土柱35cm埋深处的土壤溶液浓度, 与地下水矿化度呈明显正相关。本研究中, 各种地下水矿化度的差异不是非常大, 故潜水借毛管水上

升运行的速度应为近似一致, 从而导致等地下水埋深土柱相同深度土体达到盐分动态平衡所需的时间应该是相同的。由图 3 可见, 地下水埋深 85cm 的各土柱 35cm 深度处土体达到盐分动态平衡所需的时间稍有差异(1 号模拟土柱大约需 110 天时间, 2、3 号模拟土柱大致用了 130 天), 这可能是由于三个土柱填装的容重等性质不可能完全相同的缘故。

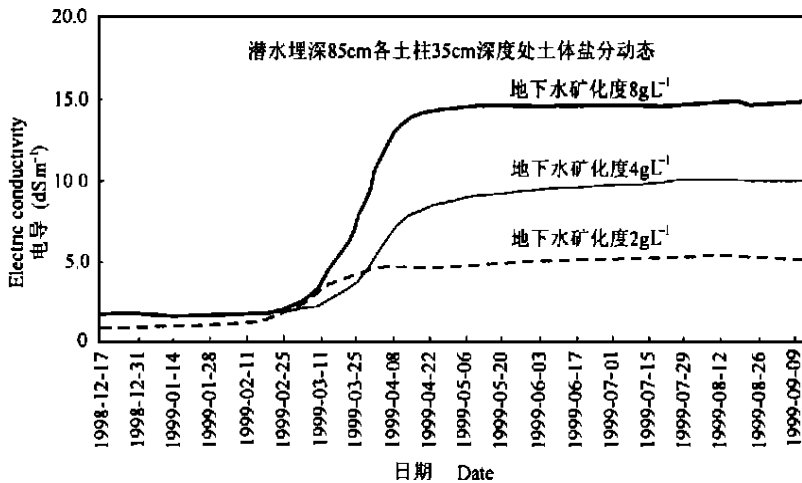


图 3 等地下水埋深不同地下水矿化度模拟土柱土壤盐分动态

Fig. 3 Salt dynamics of soils at the same groundwater level

从其他地下水埋深土柱的分析结果来看, 地下水埋深 105cm 的各模拟土柱所有同一层次的积盐规律, 都与地下水埋深为 85cm 的各土柱 35cm 深度处土体积盐规律相似, 只不过各层开始迅速积盐的时刻有先后。地下水埋深 155cm 的各土柱由于各自地下水矿化度不同, 分别有不同深度(7 号土柱 105cm 以下, 8 号土柱 145cm 以下, 9 号土柱未观测到)土体进入了盐分动态平衡状态, 其余各层土体土壤溶液浓度继续呈极缓慢增加状态。

2.3 地下水埋深对土壤盐分的影响

经过对实测数据的分析发现, 地下水埋深对土壤积盐规律亦有显著影响。在此以较高地下水矿化度模拟土柱为例阐述地下水埋深对土壤积盐规律的影响。图 4 反映了 8gL^{-1} 地下水矿化度条件下, 不同地下水埋深模拟土柱 20cm 深度处土壤盐分动态规律。由此图可以清楚地看出地下水埋深影响土壤盐分动态的规律: 随着地下水埋深逐渐增大, 各模拟土柱开始迅速积盐的时间差别非常明显。3 号土柱试验开始后第 3 个月末起快速积盐; 6 号土柱大约经过 4 个月时间开始快速积盐; 9 号土柱则在试验开始后的 9 个月内一直呈现几乎不变的极缓慢积盐状态。由此可以初步得出这样的结论: 当地下水埋深达到 155cm 时, 在试验条件下以毛管水形式上升的地下水已经无法快速到达土柱表面; 在该地下水条件下土壤积盐强度不大。从开始快速积盐到进入盐分动态平衡状态, 各模拟土柱 35cm 深度处土体的积盐速率也有明显差异。进入积盐稳定阶段后, 等地下水矿化度的各模拟土柱同层土体盐土壤溶液浓度的差别很小, 由图 4 可见 3 号与 6 号土柱 20cm 深度处土壤电导值只相差约 0.5dSm^{-1} 。

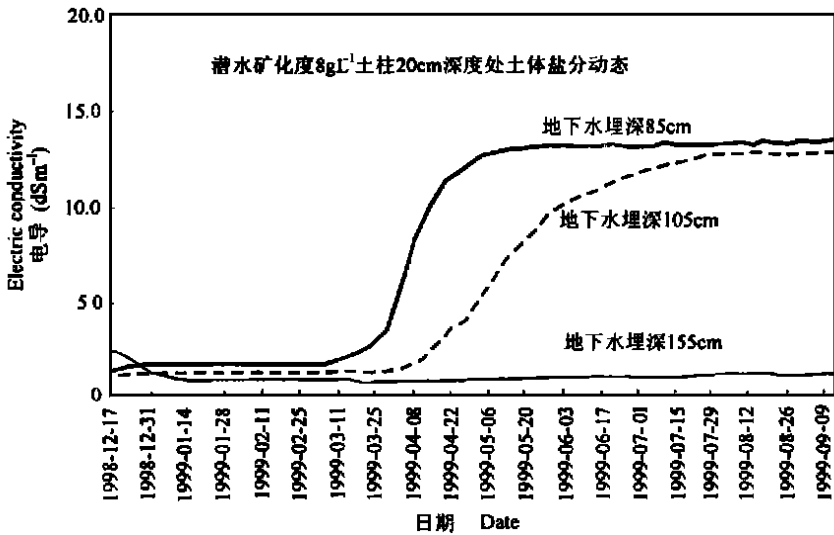


图4 等地下水矿化度不同地下水埋深模拟土柱土壤盐分动态

Fig. 4 Salt dynamics of soils at different depth under the same groundwater salinity

地下水矿化度 2g L^{-1} 、 4g L^{-1} 模拟土柱基本盐分动态规律(以 20cm 深度处土体为例)如表 5 所示。由此表可见,地下水矿化度为 2g L^{-1} 、 4g L^{-1} 的模拟土柱与地下水矿化度为 8g L^{-1} 的土柱相比,积盐规律相似:随着地下水埋深逐渐增大,开始迅速积盐的时间依次延长,但是进入盐分动态平衡状态后,地下水矿化度相同的各土柱同一深度处土壤溶液电导率基本相同。

表 5 地下水矿化度 2g L^{-1} 、 4g L^{-1} 模拟土柱盐分动态基本特征¹⁾

Table 5 Basic characteristics of soil salt dynamics under the condition of different groundwater salinities

地下水矿化度 Groundwater salinity (g L^{-1})	土柱号 Column No.	开始迅速积盐时间 Time when salt accumulated more quickly (d)	达到动态平衡时土壤溶液的电导值 EC (in dynamic equilibrium of salt) (dS m^{-1})
2	1(85) ²⁾	80	4.8
	4(105)	120	4.6
	7(155)	150	/
4	2(85)	100	10.4
	5(105)	110	9.0
	8(155)	240	/

1) 因 7、8 号土柱至今尚没有开始明显积盐,此处开始迅速积盐时间对此二土柱而言是指开始较为明显积盐时间。

2) 括号内数值为地下水埋深(cm)。

2.4 耕作层(0~40cm)土壤溶液浓度增高值统计模型

试验开始后第九个月末时,地下水埋深 85cm 的 1、2、3 号模拟土柱耕作层中土壤溶液电导率值分别是试验初始时对应值的 6~11 倍;地下水埋深 105cm 的 4、5、6 号模拟土柱耕作层的土壤溶液电导率值分别是相应初始值的 3~8 倍;地下水埋深 155cm 的 7、8、9 号模拟土柱耕作层的土壤溶液电导率值与其对应初始值相比则没有明显变化。由此,试验揭示出河口地区局部土壤盐化主要受地下水埋深、地下水矿化度的影响。为了综合评

价它们的作用效果, 对试验数据进行了多元回归, 建立了各积盐阶段耕作层土壤溶液浓度的增高值与地下水埋深、地下水矿化度二因素之间关系的数理统计模型(见表 6)。依据此模型, 可以对地下水埋深、地下水矿化度共同影响条件下, 不同积盐阶段耕作层土壤积盐量进行初步预测。

表 6 各模拟土柱土壤耕作层不同积盐阶段土壤溶液浓度增高值模型¹⁾

Table 6 Models of salt contents in cultivated horizons

时间 Time (y- m- d)	积盐阶段 Period	公式 Model	R	n
1998. 12. 17~ 1999. 3. 10	极缓慢积盐	$Y = 2.5309 - 0.0728X_1 - 0.0232X_2$	0.926**	9
1999. 3. 10~ 1999. 7. 20	快速积盐	$Y = 18.345 + 0.9720X_1 - 0.1440X_2$	0.914**	9
1999. 7. 20~ 1999. 9. 13	缓慢积盐	$Y = 65.458X^3 - 54.164X^2 + 9.4576X + 0.5575$	0.920**	9

1) Y 为某阶段耕作层土壤溶液浓度的增高值 dSm^{-1} ; X_1 为地下水矿化度 gL^{-1} ; X_2 为地下水埋深 cm ; $X = X_1 / X_2$; 积盐阶段是根据耕作层积盐速率的高低划分的。

此处耕作层(0~40cm)土壤溶液电导率是根据加权平均得出的。如地下水埋深 85cm 的土柱中, 分别在 5、20、35cm 等处装设有盐分传感器。设土柱某次此三个盐分传感器读数依次为 X_1, X_2, X_3 , 则对应时间的该土柱耕作层土壤溶液电导率为 $Y = (10X_1 + 20X_2 + 10X_3) / 40$ 。各积盐阶段耕作层土壤溶液浓度增高值指对应积盐阶段末、初耕作层土壤溶液电导率的差值。

3 结论

(1) 当地下水埋深达到 155cm 时, 在试验条件下以毛管水形式上升的地下水已经无法快速到达土柱表面; 无论地下水矿化度如何, 在该地下水埋深条件下土壤积盐强度不大。

(2) 地下水埋深显著影响土壤盐分运移速率, 但是地下水埋深不同、地下水矿化度相同情况下, 各模拟土柱的同一深度土层处于盐分动态平衡状态时的土壤溶液浓度差别不明显。

(3) 地下水矿化度条件不同时, 等地下水埋深土柱相同层次土体处于盐分动态平衡状态时的土壤溶液浓度, 与地下水矿化度呈显著正相关关系。

(4) 地下水埋深及地下水矿化度对耕作层土壤溶液浓度的综合作用效果可用统计模型表示。

致 谢 陈德明副研究员、李海峰同学在本研究进行过程中给予了大量协助, 在此谨表谢意。

参 考 文 献

1. 尤文瑞, 孟繁华, 肖振华. 蒸发条件下非饱和粉砂壤土盐动态. 见俞仁培主编. 土壤水盐动态和盐碱化防治. 北京: 科学出版社, 1987. 1~14
2. 孟繁华, 尤文瑞, 王福利. 蒸发条件下非饱和粘土水盐动态的研究. 见俞仁培, 尤文瑞主编. 土壤盐化、碱化的监测与防治. 北京: 科学出版社, 1993. 74~82
3. 欧阳丽, 孟繁华, 肖振华等. 蒸发条件下有粘土夹层粉砂壤土水盐动态. 见俞仁培, 尤文瑞主编. 土壤盐化、碱化的

监测与防治. 北京: 科学出版社, 1993. 61~ 73

4. 刘福汉, 王遵亲. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动. 土壤学报, 1993, 30(2): 173~ 181

5. 蔡述明, 马毅杰, 朱海虹等. 三峡工程与沿江湿地及河口盐渍化土地. 北京: 科学出版社, 1997, 154

SALT DYNAMICS IN SOIL PROFILES UNDER CONDITION OF DIFFERENT GROUNDWATER DEPTHS AND SALINITIES

Liu Guang-ming Yang Jing-song Li Dong-shun

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Summary

An indoor soil column simulation experiment was carried out to study salt dynamics in silt loam with different groundwater depths and salinities. The results obtained show that groundwater depth and salinity are both dominant factors affecting salt dynamics in soil profiles. Under condition of the same groundwater depth, when soils at the same depth reach dynamic equilibrium of salt, there is notable difference in soil solution salinity that is in positive correlation to groundwater salinity. Under condition of the same groundwater salinity, velocity of salt accumulation is in negative correlation to groundwater depth, but soil solution salinities at the same depth in different soil columns are similar after the soils there enter into dynamic equilibrium of salt. In order to value the effect of groundwater depth and salinity on salt dynamics, the models were built.

Key words Soil column simulation experiment, Groundwater depth, Groundwater salinity, Salt dynamics