

# 潜水蒸发条件下不同质地剖面的 土壤水盐运动

刘福汉 王遵亲

(中国科学院南京土壤研究所, 210008)

## 摘 要

以全剖面轻壤土、夹粘轻壤土和表层粘土的土柱进行了室内模拟试验,研究在不同潜水位蒸发条件下的土壤水盐运动。潜水蒸发试验分干燥土的湿润和湿土状态的蒸发两个阶段,在相同潜水位情况下,土壤湿润锋到达其表面的速度顺序及日蒸发量大小为全剖面轻壤土>表层粘土>夹粘轻壤土;在1—2m潜水位变幅情况下,夹粘层对土壤水盐运动的影响会超过潜水埋深的影响,并且土壤剖面盐分分布呈现出二个峰值;在蒸发条件下,全剖面轻壤土水分含量从上到下逐渐增加,而夹粘层只影响在其上面的轻壤土水分含量,而不影响其下面土层的水分变化;用3g/L的氯化钠的水溶液模拟作为供蒸发的地下水源情况下,土壤底层有可能产生苏打而发生次生碱化现象。

**关键词** 土柱模拟试验,土壤质地剖面,地下水位,蒸发作用,水盐运动

黄淮海平原是我国最大的河流冲积平原。由于河流砂粘交错沉积,使土壤剖面结构变化繁多,除全剖面轻壤土(一般指1.5—2.0m的厚度,下同)外,还在轻壤土剖面的不同部位夹有不同厚度的粘土层和自地表就覆有不同厚度粘土层的土体结构。而土壤质地和结构在很大程度上影响到土壤的水盐运动<sup>[1-5]</sup>,但到目前为止,对于粘土层的层位、厚度对水盐运移的影响,尚有不同的观点。

本文旨在通过室内土柱模拟试验,进一步研究不同地下水位和不同质地剖面下的土壤水盐运动,这对研究黄淮海平原次生盐渍化的发生原因和为土壤盐渍化的预测预报提供依据有着重大的意义。

## 一、试验材料及方法

### (一) 供试土样及性质

供试土壤样品采自河南省封丘县黄河滩地的非盐渍化土壤。粘质土采自柳园渡口西约200m,系黄河在汛期新淤积的粘质沉积物,采样厚度7—15cm;轻壤土采自三姓庄南滩地,采样厚度0—20cm。两种质地的土壤盐分状况见表1。

### (二) 试验处理

试验用连接而成的玻璃管,直径6cm,土柱编号从No.1到No.9,每一土柱采用“马廖特”装置控制地下水位,土柱潜水位分别为1.0m、1.5m、2.0m,用3g/L氯化钠水溶液作为蒸发水源,在每个

土柱上部各安装 1 个 250 瓦的红外灯,用以模拟光照。在不同潜水位条件下,设置了全剖面轻壤土、不同深度夹有 30cm 厚的粘土层轻壤土和自地表为 30cm 厚的粘土层下垫以轻壤土的处理(表 2)。

表 1 河南省封丘县黄河滩积物土壤盐分状况

Table 1 The salt regime of soil from deposits of the Yellow River in Fengqin county, Henan

土壤 Soil	pH (1:5)	电导率 (25°C) (ds/m)	全盐 Total salt (%)	阴离子 <sup>1)</sup> Anion					阳离子 <sup>2)</sup> Cation			
				$\frac{1}{2} \text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\frac{1}{2} \text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\frac{1}{2} \text{Ca}^{++}$	$\frac{1}{2} \text{Mg}^{++}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
嫩滩 粘质土	6.93	0.391	0.10	—	0.48 0.029	0.35 0.012	0.67 0.032	0.01 0.004	0.66 0.013	0.37 0.005	0.32 0.007	0.01 0.000
低滩 轻壤土	6.89	0.170	0.05	—	0.43 0.026	0.03 0.001	0.07 0.003	0.09 0.006	0.35 0.007	0.16 0.002	0.15 0.003	0.02 0.001

1) 分子代表阴离子的毫克当量,单位为 cmol/kg, 分母为阴离子的百分含量,单位为%。

2) 分子代表阳离子的毫克当量,单位为 cmol/kg, 分母为阳离子的百分含量,单位为%。

表 2 土柱潜水位和土壤质地剖面

Table 2 Groundwater depths and soil profiles of texture in soil columns

潜水位 Groundwater depth (m)	土柱号 Soil column No.	土壤质地剖面 Soil profiles of texture
1.0	No. 1	全剖面轻壤土
	No. 2	0—35cm 轻壤土, 35—65cm 粘土层, 65—100cm 轻壤土
	No. 3	0—30cm 粘土层, 30—100cm 轻壤土
1.5	No. 4	全剖面轻壤土
	No. 5	0—60cm 轻壤土, 60—90cm 粘土层, 90—150cm 轻壤土
	No. 6	0—30cm 粘土层, 30—150cm 轻壤土
2.0	No. 7	全剖面轻壤土
	No. 8	0—85cm 轻壤土, 85—115cm 粘土层, 115—200cm 轻壤土
	No. 9	0—30cm 粘土层, 30—200cm 轻壤土

供试土壤样品在室内自然风干后,磨细,去掉根系、碎石等杂物,过 20 孔筛,搅拌混合均匀后,控制容重  $1.5\text{g}/\text{cm}^3$  计算土壤重量,分次等量填装土柱,为使土柱各处的容重一致,每次填装的土层厚度控制为 5cm,并且在土层之间进行刨毛,土柱的最下部装有石英砂作为反滤层。

### (三) 分析方法

试验结束后,拆土柱,同时每一层测定土壤的含水量,再按要求将土柱中的土壤按层风干磨细,过 20 孔筛。

测试土壤溶液为 1:5 土水比浸提液,土壤溶液电导率用 DDS-11A 型电率仪测定, pH 值用 pH-2 型酸度计测定,  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  用常规滴定法,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  用离子火焰光度计法,其它离子用离子色谱仪测定。

## 二、结果与讨论

### (一) 毛管水上升及湿润锋的观测

将风干土壤样品填装到土柱后,从石英砂反滤层开始供水,进入试验的第一阶段。

在这一阶段的观测中发现,在刚开始供水时,各种干的质地剖面型土柱,潜水通过毛管作用,其湿润锋缘十分清晰整齐,上升速度最快的是第一天,以后逐渐下降;随着土柱的湿润,不论土壤质地剖面如何,湿润锋逐渐不明显,其中有粘土夹层的土柱又不如全剖面轻壤土的土柱,但其锋缘仍是整齐的。在同一潜水埋深下,有粘土夹层的土柱,其湿润锋到达土柱表面所需的时间比全剖面轻壤土柱和表粘土柱所需时间要延长,而表粘层土柱又较全剖面轻壤土柱所需时间长,即不同土壤质地剖面的土壤毛管水上升速度是全剖面轻壤土>有表粘层轻壤土>有夹粘层轻壤土(表3)。

表3 不同潜水埋深情况下,湿润锋到达土柱表面所需时间

Table 3 The time of wetting front reaching soil surface in soil columns under conditions of different groundwater depths

潜水位 Groundwater depth (m)	土柱号 Soil column No.	土体构型 Soil pattern	所需时间 Time (day)	湿润顺序 Wetting order
1.0	No. 1	全剖面轻壤土	9	全剖面轻壤土>表 粘>夹粘
	No. 2	夹粘	33	
	No. 3	表粘	26	
1.5	No. 4	全剖面轻壤土	15	全剖面轻壤土>表 粘>夹粘
	No. 5	夹粘	117	
	No. 6	表粘	47	
2.0	No. 7	全剖面轻壤土	33	全剖面轻壤土>表 粘>夹粘
	No. 8	夹粘	283	
	No. 9	表粘	85	

上述现象的产生与粘土的性质有关,粘粒的表面积大,毛管孔隙直径很小,对土壤毛管上升水流摩擦阻力大,吸附力强,因而传导慢,降低了毛管水上升的速度。对于不同潜水位的不同土壤质地剖面的土柱来说,其湿润锋到达其表面所需的时间与潜水位高低密切相关,潜水位高者,需时短,传导速度快,潜水位低者,需时长,传导速度慢。

### (二) 蒸发阶段的水盐运动

1. 潜水的蒸发速率 表4列出了9个土柱的潜水蒸发累计量和日蒸发量,从表中可看出潜水埋深和土壤质地剖面对潜水蒸发的影响。在相同的外界条件下,同一埋深的潜水位,全剖面轻壤土的累计蒸发量和日蒸发量大于表粘层轻壤土,表粘层轻壤土大于夹粘层轻壤土(8号土柱由于蒸发日数少,只用日蒸发量相比较)。随着潜水位埋深增大,同质剖面潜水的蒸发量相应的减少。

在潜水埋深为1.0m和1.5m的情况下,由于夹粘层对潜水蒸发的影响,使得潜水埋深较小的夹粘轻壤土土柱的蒸发量反而小于潜水埋深较大的全剖面轻壤土土柱的蒸发

表4 不同土柱的潜水累计蒸发量和日蒸发量

Table 4 The amount of total and daily groundwater evaporation in different soil columns

潜水位 Groundwater depth (m)	土柱号 Soil column No.	观测天数 Observation time (day)	累计蒸发量 Total evaporation capacity (ml)	日蒸发量 Daily evaporation capacity (ml)
1.0	No. 1	321	1134	3.53
	No. 2	321	615	1.92
	No. 3	321	798	2.49
1.5	No. 4	321	726	2.26
	No. 5	321	337	1.05
	No. 6	321	594	1.85
2.0	No. 7	321	459	1.43
	No. 8	163	52	0.32
	No. 9	321	440	1.37

量,如 1.0m 夹粘土柱(2号土柱),其日蒸发量为 1.92ml,而 1.5m 全剖面轻壤土土柱(4号土柱)的日蒸发量为 2.26ml; 1.5m 夹粘土柱(5号土柱)的日蒸发量为 1.05ml,而 2.0m 全剖面轻壤土(7号土柱)为 1.43ml。由此可见,在潜水埋深较小的情况下,夹粘土层对土壤水分运行的影响会超过潜水埋深变化的影响。

从表 5 可以看出,同一潜水位情况下,粘土层层位对土壤水分蒸发的影响,夹粘土层比表粘土层的潜水蒸发量小,即夹粘层对潜水蒸发的阻滞力较大。

表5 粘土层部位对潜水蒸发量的影响

Table 5 The effect of Position of clay layer on the evaporation of groundwater

潜水位 Groundwater depth (m)	土柱号 Soil column No.	累计蒸发量 Total evaporation capacity (ml)
1.0	2号(夹粘)	615
	3号(表粘)	798
1.5	5号(夹粘)	337
	6号(表粘)	594

2. 土柱的水分含量状况 全剖面轻壤土,从表层到底部,土壤含水量逐渐升高,随着潜水埋深的增大,土壤表层含水量与下部含水量之差也逐渐增大(图 1)。而有粘土层存在的土柱,不管是表粘层还是夹粘层,粘土层含水量相对较高。有夹粘层的土柱,粘土层以下的含水量比粘土层以上的含水量要高得多(图 2)。这是由于粘土层以上土壤水分蒸发量大于通过粘土夹层的水分量。对于有表粘层存在的土柱,除 0—2cm 由于强烈蒸发使其水分含量较低外,2—30cm 的粘土层中的含水量亦相对较高(图 3)。

在相同潜水埋深情况下,从有粘土夹层土壤与全剖面轻壤土剖面中水分含量比较可以看出,夹粘层对其上面的土壤水分含量影响大而对其下面土层中水分含量变化影响小。

3. 潜水蒸发与土壤积盐的关系 (1) 盐分的表聚性: 盐分主要是累积在表层

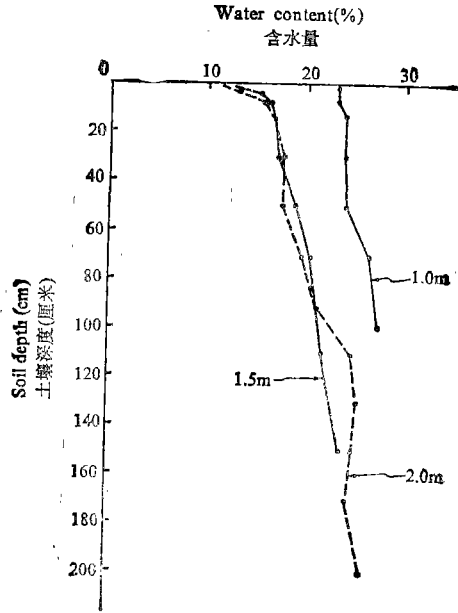


图 1 全剖面轻壤土含水量变化

Fig. 1 The change of water content of homogeneous sandy loam soil profiles

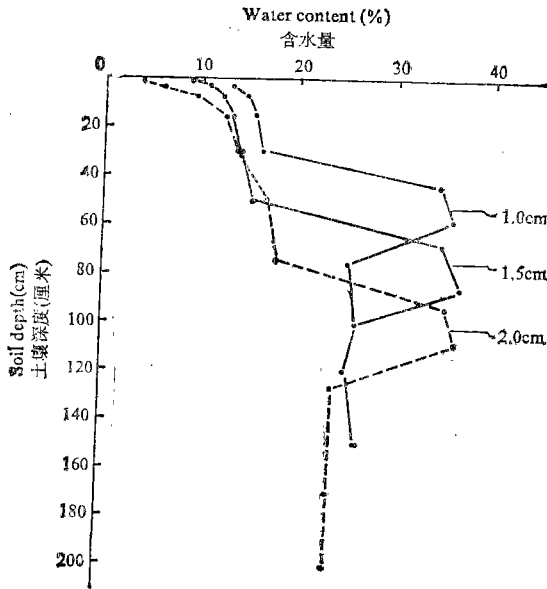


图 2 有夹粘层存在的轻壤土剖面含水量变化  
Fig. 2 The change of water content of sandy loam soil profiles with interbedded clay layer

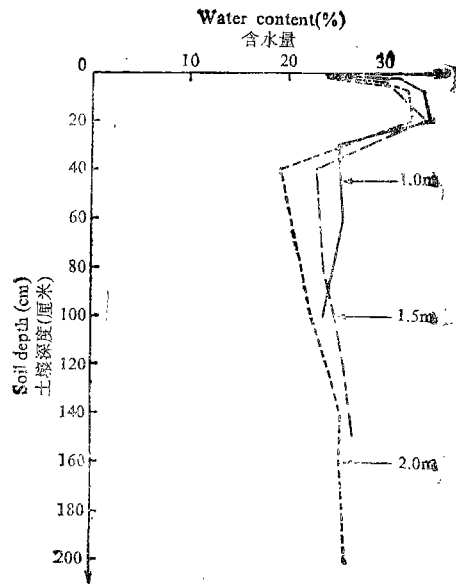


图 3 有表粘层存在的轻壤土剖面含水量变化  
Fig. 3 The change of water content of sandy loam soil profiles with a surface clay layer

10cm 以内, 而 30cm 以下的盐分含量很低, 以 1 号土柱为例, 0—2cm 全盐含量为 3.795%, 2—5cm 为 1.047%, 5—10cm 为 0.179%。再如 7 号土柱, 0—2cm 全盐含量

表 6 有夹粘层存在的轻壤土剖面盐分含量  
Table 6 The salt content of sandy loam soil profiles with interbedded clay layer

2 号土柱

深度 Depth (cm)	0—2	2—5	5—10	10—20	20—35	35—50 (粘土层)	50—65 (粘土层)	65—85	85—100
全盐 Total salt (%)	3.038	0.736	0.097	0.063	0.065	0.118	0.135	0.111	0.106

5 号土柱

深度 Depth (cm)	0—2	2—5	5—10	10—20	20—40	40—60	60—75 (粘土层)	75—90 (粘土层)	90—110	110—130	130—150
全盐 Total salt (%)	2.577	0.528	0.070	0.054	0.060	0.063	0.124	0.138	0.098	0.109	0.122

8 号土柱

深度 Depth (cm)	0—2	2—5	5—10	10—20	20—40	40—60	60—85	85—100 (粘土层)	100—115 (粘土层)	115—140	140—160	160—180	180—200
全盐 Total salt (%)	1.348	0.468	0.069	0.076	0.077	0.084	0.082	0.130	0.126	0.093	0.093	0.112	0.135

为 3.020%, 2—5cm 为 1.164%, 5—10cm 为 0.136%, 10—20cm 为 0.057%。因此对于盐渍土应以耕层 [0—20 (30)cm] 含盐量来划分土壤盐渍度较为适宜, 因为以耕层计算能够反映盐分的实际情况, 在种子发芽期和幼苗期, 根系活动主要表现在土壤表层和亚表层, 如果在 20—30cm 以上出现积盐层, 一般对植物正常生长发育即发生影响, 此外, 由于水分状况变化而引起盐分变化的范围, 也是以 0—20(30)cm 内最明显。因此, 如果以更深的土层的含盐量作为划分盐土的依据, 经过加权平均, 盐渍土甚至可以变化非盐渍土, 则不能完全反映盐土的性状及其对植物的影响<sup>[6]</sup>。(2) 有夹粘层存在的土柱, 土壤剖面盐分的分布呈现出两个峰值, 即表土层的含盐量高于下部土层, 粘土夹层中盐分含量略高于其上下的轻壤土(表 6)。根据土柱中所装粘土的重量及蒸发试验前后的土壤含盐百分量可计算出整个粘土层的含盐量。试验前 2 号土柱、5 号土柱和 8 号土柱粘土层的含盐量均为 127.2g, 而试验结束后其含盐量分别为 160.3g, 168.6g 和 162.8g, 均比试验开始前的原始含盐量要高。这说明粘土夹层对盐分有明显的阻滞作用。(3) 以相同潜水位的土柱比较, 潜水位为 1.0m 的土柱, 表层积盐强度分别为全剖面轻壤土>表粘层土壤>夹粘层土壤; 而潜水位为 1.5m 的土柱和 2.0m 的土柱, 有表粘层土柱的含盐量反而略高于全剖面轻壤土, 有夹粘层存在的土柱表层含盐量最低(表 7)。从理论上讲, 应该是全剖面轻壤土的积盐强度大于有表粘层的土柱, 因为粘土层的存在使土壤剖面中毛管水流速度减弱, 潜水蒸发量降低(表 4)。但由于试验用的粘土含盐量高出轻壤土一倍, 按照粘土及轻壤土的含盐百分量, 可以计算出整个土柱中土壤的含盐总量。其结果为 4 号土柱 (1.5m 全剖面轻壤土) 含盐总量为 317.9g; 6 号土柱 (1.5m 表粘层土柱) 为 381.5g; 7 号土柱 (2.0m 全剖面轻壤土) 为 423.9g; 9 号土柱 (2.0m 表粘层土柱) 为 487.5g。根据上述计算结果, 有表粘层存在的土柱含盐总量比全剖面轻壤土的含盐总量要高, 所以会出现有表粘层的土柱表层含盐量略大于全剖面轻壤土。至于 1.0m 全剖面轻壤土土柱的表层含盐量高于表粘土柱, 这是由于强烈的潜水蒸发作用。而有夹粘层的土体构型则有明显的抑盐作用。(4) 比较不同潜水位的土柱可以发现, 7 号土柱、9 号土柱表层的含盐量相当高, 甚至比潜水位为 1.0m、1.5m 的有些土柱的含盐量还高(表 7), 这是因为在供水过程中, 土壤本身所含的盐分被水流携带到土壤表层累积, 土柱愈高, 所携带表聚的盐分也愈多。由此可见, 在土壤发生盐渍化的初期, 土壤本身的原始含盐量也明显地参与了表层盐分的累积, 甚至较从地下水中的盐分向上运移得还快。(5) 土壤 pH 值从上到下逐渐增加, 有的 pH 值超过 9(表 8)。这与在土壤剖面底层出现高的  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  有关。可能是地下水中的 NaCl 和土体中原含有的可溶性  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  发生了化学反应而形成苏

表 7 土柱表层 (0—2cm) 土壤全盐含量

Table 7 The total salt content of soil column surface

土柱号 Soil column No.	潜水位 1.0m Groundwater depth (1.0m)			潜水位 1.5m Groundwater depth (1.5m)			潜水位 2.0m Groundwater depth (2.0m)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
全盐 Total salt (%)	3.795	3.038	3.122	3.134	2.577	3.546	3.020	1.348	3.366

打,从而有可能使土壤逐渐产生次生碱化。

表 8 土壤剖面中 pH 值的变化和  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的含量

Table 8 The change of pH and the contents of  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$  in soil profiles

1 号土柱

深度 Depth (cm)	0—2	2—5	5—10	10—20	20—40	40—60	60—80	80—100
pH	7.68	7.50	7.96	8.16	8.39	8.26	8.56	8.72
$\frac{1}{2} \text{CO}_3^{2-}$ [cmol(+)/kg]	—	—	—	—	—	—	0.04	0.04
$\text{HCO}_3^-$ [cmol(+)/kg]	0.21	0.13	0.21	0.29	0.41	0.45	0.39	0.48

2 号土柱

深度 Depth (cm)	0—2	2—5	5—10	10—20	20—35	35—50	50—65	65—85	85—100
pH	7.74	7.78	8.10	7.90	8.04	8.30	8.32	8.80	9.04
$\frac{1}{2} \text{CO}_3^{2-}$ [cmol(+)/kg]	—	—	—	—	—	—	—	0.07	0.07
$\text{HCO}_3^-$ [cmol(+)/kg]	0.18	0.14	0.18	0.20	0.21	0.45	0.64	0.41	0.43

3 号土柱

深度 Depth (cm)	0—2	2—5	5—10	10—30	30—50	50—70	70—100
pH	7.41	7.68	7.78	8.40	8.48	8.42	9.24
$\frac{1}{2} \text{CO}_3^{2-}$ [cmol(+)/kg]	—	—	—	—	—	—	—
$\text{HCO}_3^-$ [cmol(+)/kg]	0.13	0.16	0.30	0.47	0.39	0.45	0.41

注: 由于土柱较多, 仅列出 1、2、3 号土柱的 pH、 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的数据, 其它土柱的 pH、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  都有相同的变化趋势。

### 参 考 文 献

1. 中国科学院土壤及水土保持研究所等, 1961: 华北平原土壤。科学出版社。
2. 罗焕炎等, 1965: 层状土中毛管水上升的实验研究。土壤学报, 第 13 卷 3 期, 312—324 页。
3. 袁剑防等, 1980: 粘土夹层对地下水上升运行的影响。土壤学报, 第 17 卷 1 期, 94—100 页。
4. 李鹤珠等, 1985: 蒸发条件下粘土层与土壤水盐运移。盐渍土的水盐运动, 161—174 页, 北京农业大学出版社。
5. 尤文瑞, 1987: 蒸发条件下非饱和粉砂壤土水盐动态。黄淮海平原治理与开发研究文集, 1—14 页, 科学出版社。
6. 祝寿泉、王遵亲, 1989: 关于盐土和碱土分类问题。中国盐渍土分类分级文集, 1—11 页, 江苏科学技术出版社。



## SALT-WATER DYNAMICS IN SOIL PROFILES OF DIFFERENT TEXTURE UNDER GROUNDWATER EVAPORATION CONDITION

Liu Fuhan and Wang Zunqin

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008*)

### Summary

Indoor soil column simulating experiment was carried out to study salt-water dynamics in homogeneous sandy loam, sandy loam with interbedded clay layer and sandy loam with surface clay layer under conditions of different groundwater depths. The results obtained show that the evaporation of groundwater is involved in the two stages, i.e. the wetting of dry soil and the evaporation of soil water in moist soil. Under the condition of same groundwater depth, the speed of wetting front reaching soil surface in soil column and the amount of daily groundwater evaporation followed the order: homogeneous sandy loam > soil with surface clay layer > sandy loam with interbedded clay layer. It was also found that within 1—2m variation range of groundwater table, the influence of interbedded clay layer on groundwater evaporation was greater than that of groundwater depth, and two salt peaks occurred in soil profiles. Under evaporation condition, water content increased gradually from top soil to bottom soil in homogeneous sandy loam, and interbedded clay layer only affected the water regime in soil above the interbedded clay layer. Under the experimental condition of using groundwater containing 3g/L NaCl for evaporation, secondary alkalization could occur owing to the formation of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{NaHCO}_3$  in bottom soils.

**Key words** Soil column simulating experiment, Soil texture profile, Groundwater depth, Evaporation, Salt-water dynamics