

# 不同潜水埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应

夏江宝<sup>1</sup>, 赵西梅<sup>1,2</sup>, 赵自国<sup>1</sup>, 陈印平<sup>1,2</sup>, 刘俊华<sup>1,3</sup>

(1. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603; 2. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018;  
3. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 为探讨盐矿化度下土壤水盐分布特征对潜水埋深的响应规律及其水盐交互效应, 以黄河三角洲建群种柽柳 (*Tamarix chinensis* Lour) 栽植的土壤柱体为研究对象, 模拟设置 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 和 1.8 m 共 6 种潜水水位, 测定分析各水位处理下不同土壤剖面的相对含水率、含盐量及土壤溶液绝对浓度等水盐参数。结果表明: 随潜水水位的增加, 整个土柱水分均值显著降低, 土壤含盐量和溶液绝对浓度均值先升高后降低, 1.2 m 水位是土壤水盐变化的转折点, 此水位下各土壤剖面的含盐量和土壤溶液绝对浓度均达最高。土柱水分和盐分变化幅度最大的水位分别在中水位 0.9~1.2 m, 浅水位 0.6 m, 土壤溶液绝对浓度变化最剧烈的是深水位 1.5~1.8 m。随土壤深度的增加, 土壤水分显著升高, 土壤盐分先降低后升高, 表土层盐分均值最高达 1.36%, 但土壤溶液绝对浓度显著减小。土壤含盐量、土壤相对含水率与潜水水位分别呈极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ) 负相关, 土壤相对含水率与盐分呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。地下盐矿化度下, 柽柳幼苗栽植深度应超过 20 cm 深, 适宜潜水水位在 1.5~1.8 m, 栽植深度以 30~40 cm 较好。研究结果可为地下盐水作用条件下土壤次生盐渍化的防治和柽柳栽植管理提供参考。

**关键词:** 土壤水分; 盐分; 地下水; 潜水水位; 土壤溶液浓度; 柽柳

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.013

中图分类号: S273.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0093-08

夏江宝, 赵西梅, 赵自国, 陈印平, 刘俊华. 不同潜水埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 93—100. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.013 http://www.tcsae.org

Xia Jiangbao, Zhao Ximei, Zhao Ziguang, Chen Yinping, Liu Junhua. Migration characteristics of soil water and salt and their interaction under different groundwater levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 93—100. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.013 http://www.tcsae.org

## 0 引言

土壤盐渍化是中国普遍存在的一种生态灾害类型, 黄河三角洲盐渍化土壤面积占该区域土地总面积的 1/3 以上, 严重的土壤盐渍化是制约黄河三角洲农林业可持续发展的瓶颈因素。全球气候变化导致的海平面上升和海水入侵, 使泥质海岸盐碱地潜水埋藏深度普遍较低, 浅层地下水是泥质海岸盐碱地植被生长关键期的敏感要素和主要水源<sup>[1-3]</sup>, 而与潜水埋深密切相关的土壤盐分和水分是影响黄河三角洲植被分布格局及群落演替的主要因子。在地下水埋藏浅的条件下, 地下水中的盐分极易通过毛管上升作用不断地向地表累积, 形成土壤盐渍化。为表述统一, 本文所描述的潜水埋藏深度均指从土壤表面到潜水面的垂直距离, 简称潜水水位。由于地下水及其矿化度与土壤、植物体中盐分及其水分互为“源-库”关系<sup>[4,6]</sup>, 并且黄河三角洲潜水埋深季节性动态变化显著<sup>[5]</sup>, 因此, 探讨地下水浅埋区的土壤水盐迁移特征及其与潜水水位的作用关

系, 从根源上阐释地下水与土壤中水分和盐分的变化过程及其对次生盐碱化的发生意义重大, 探明不同潜水埋深下土壤水盐变异性与分布规律对于指导农林业生产和生态环境保护也具有十分重要的参考价值。

在干旱的内陆盐碱地或淡水资源缺乏的泥质海岸盐碱地, 受淋融作用及盐分本身对土壤水分较强的亲和力<sup>[7]</sup>和气象因子<sup>[8]</sup>等的影响, 潜水水位的不同是土壤贮水量和盐分差异的主要因素<sup>[9-10]</sup>。研究发现, 土壤水盐运移与潜水埋深密切相关<sup>[1,7]</sup>, 但随着土壤质地<sup>[10-11]</sup>、植被类型<sup>[10,12]</sup>、微地形<sup>[13]</sup>及气候环境<sup>[8]</sup>等因素的不同, 不同土壤剖面的含水率、含盐量与潜水水位的相关性差异较大<sup>[10-11]</sup>, 并且土壤水分和盐分并未完全与潜水水位同步<sup>[13-14]</sup>, 土壤剖面盐分或水分随潜水水位的不同存在着明显的水盐转折点<sup>[13,15]</sup>。目前对土壤水盐动态的研究主要集中在地下水位与土壤水分或土壤盐分单一关系的探讨<sup>[2-3,5,10-11,15]</sup>, 缺少在土壤垂直深度上, 不同土壤剖面含水率、含盐量以及土壤溶液绝对浓度等水盐参数对不同潜水埋深响应关系的探讨, 潜水水位与土壤剖面水分和盐分三者之间的交互效应和作用过程尚不清晰, 以致在盐碱地改良和因潜水水位埋深变化而引起的水盐交互胁迫影响植物生长等方面存在理论和技术难题。土壤层水分、盐分的变动受降雨和灌溉等水分入渗作用的影响, 潜水埋深波动性较大, 野外大田土壤水盐变异性更强, 土壤脱盐积盐过程

收稿日期: 2015-03-26 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31370702); 山东省自然科学基金省属高校优秀青年人才联合基金 (ZR2015JL014)

作者简介: 夏江宝, 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植被恢复与生态重建研究。滨州 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 256603。Email: xiajb@163.com

交替频繁<sup>[15-17]</sup>。鉴于上述问题,在无地表水分来源,土壤质地、植物及气候因素相同的情况下,为有效探明盐矿化度条件下,不同稳定的潜埋深下土壤各剖面水分和盐分的分布、聚积及迁移特征,以黄河三角洲建群种柽柳(*Tamarix chinensis* Lour)栽植的土壤柱体为研究对象,在科研温室内模拟设置盐矿化度下 6 个不同的潜水水位,以探讨柽柳栽植条件下不同土壤剖面水盐变化对潜水水位的响应规律,明确对不同土壤层盐分积累显著的潜水水位,揭示潜水水位与土壤盐分积累和水分的动态变化过程及其内在联系,以期为地下盐水作用条件下土壤次生盐渍化的防治和柽柳栽植管理提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤与水样

供试土壤取自黄河下游滩地,土样运回实验室后风干,过 2 mm 筛后均匀混合。土壤类型为潮土,土壤质地为粉砂壤土,初始含水率质量分数为 6.56%,初始含盐质量分数达 0.01%,土壤容重为 1.32 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为 37.86% (质量分数)。地下水为黄河三角洲海盐自行配置, pH 值为 7.47,电导率为 27.36 mS/cm,盐度为 1.68%,矿化度为 20 g/L,属于盐水。

### 1.2 试验设计

黄河三角洲潜埋深较浅,平均埋深为 1.14 m<sup>[18]</sup>,矿化度多介于 14.3~32.4 g/L<sup>[5]</sup>,对紧邻泥质海岸带的黄河三角洲莱州湾柽柳林场调查研究发现,潜水水位多介于 0.3~2.0 m。因此,模拟设置地下水矿化度为 20 g/L,属于盐矿化度范围,潜水水位分别设置浅水位(0.3、0.6 m)、中水位(0.9、1.2 m)和深水位(1.5、1.8 m),具体见表 1 不同潜水水位设计及其对应土柱的土壤取样层次。

表 1 潜水水位及土壤取样层设计

潜水水位类型	水位	土壤取样层深度
Groundwater level type	Groundwater level/m	Depth of soil sampling layer/cm
浅水位	0.3	10、20
Shallow water level	0.6	10、20、30、40、50
中水位	0.9	10、30、50、70、90
Medium water level	1.2	10、30、50、70、90、110、
深水位	1.5	10、40、70、100、130
Deep water level	1.8	10、40、70、100、130、160

### 1.3 试验过程

在山东省黄河三角洲生态环境重点实验室的可控科研温室内进行试验,地处 37°22'56"N、117°58'57"E,温室玻璃透光率超过 90%,室内空气相对湿度平均为 45%±6%,大气温度平均为(25±4)℃。试验前,准备 18 个高 70 cm、桶底内径 45.5 cm、桶上口内径 57 cm 的大水桶;18 个内径 30 cm 但高度不同的聚氯乙烯(polyvinyl chloride resin, PVC)圆管,其高度依据表 1 中设计的潜水水位、实际水位埋深(即 PVC 圆管实际浸水深度,考虑到水桶高度和灌水方便实施,设计实际淹水深为

0.55 m)、顶端高于土壤面空隙层(3 cm)三者之和进行加工,分别为 0.88、1.18、1.48、1.78、2.08 和 2.38 m;依据设置的潜水水位,在 PVC 圆管外围东西南北方向各打 1 个 2 cm 直径的圆孔作为土壤取样口,并用塞子堵严,依据表 1 设置的取土深度进行打孔;PVC 管底部从下到上依次设置石英砂制成的反滤层和透水布,防止底部土壤外漏,淹水区 PVC 管每隔 10 cm 打 1 排 4 个 1 cm 直径的进水口,用透水布堵住,水分从淹水区底部和四周的进水口进入土壤柱体。各处理设 3 个重复。

2014 年 3 月 3 日开始试验,如图 1 所示,首先,以 20 cm 为一个土层按照土壤容重计算填土量,在 PVC 管中装填风干后土壤,填充完毕后,无灌水和施肥等处理措施。然后,挖沟将水桶放入土壤中,以保证地下水温度的均一性,水桶底部与周围土壤隔绝。将装有土壤的 PVC 管放入大水桶中,把配置好的盐水引入大水桶,控制水深持续为 0.55 m,补充 PVC 管因吸水造成的下沉土壤,土柱平衡稳定 5 d 后,将 3 a 生柽柳苗木栽植于各 PVC 管中,苗木统一截干处理,留 60 cm 高,根茎平均为 1.3 cm,每容器可先栽植 2~3 株,苗木栽植初期所有处理统一从 PVC 管上部浇淡水,每 10 d 1 次,每次 4 L,共计 12 L,此后不再进行地上部分的水分供给,正常栽植管理 1 月,成活后留 1 株苗木。在整个试验期间,每 3 d 监测 1 次地下水矿化度和 PVC 圆管实际浸水深度,定时补充地下水以维持水深和地下水矿化度的稳定性。柽柳苗木生长 3 个月后,6 月 6 日开始进行土壤样品采集及水盐参数测定,6 月 10 日样品采集结束。

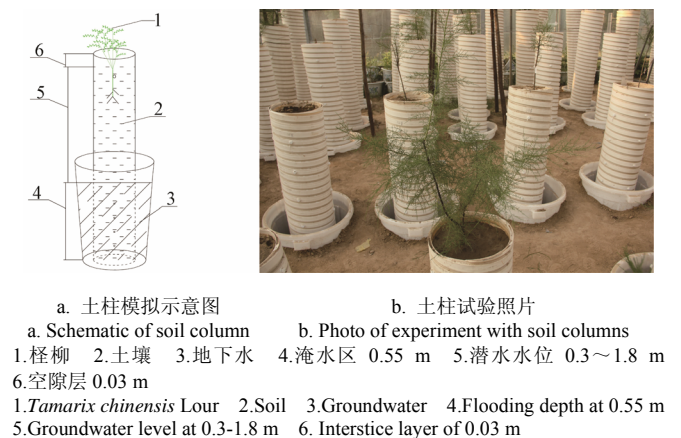


图 1 栽植柽柳的土柱模拟示意图和实景图  
Fig.1 Schematic diagram and photo of soil columns with *Tamarix chinensis*

### 1.4 样品采集及指标测定

依据前期获得的不同土壤层水盐变化规律,结合文献<sup>[13,19-20]</sup>,土壤剖面采集样品间距设计见表 1,每潜水水位处理分别取 3 个土柱样品作为 3 次重复。土壤盐分的测定采用残渣烘干法,水土比 5:1,烘干法测定质量含水率,土壤相对含水率(relative water content, RWC)为土壤质量含水率占田间持水率的百分数, %。参考文献<sup>[21]</sup>,土壤溶液绝对浓度( $C_s$ )为土壤含盐量(占干土质量分数, %)与土壤含水率(占干土质量分数, %)的比例, %。地下水矿化度

采用重量法测定，地下水中盐度、电导率和 pH 值的测定采用日本 HORIBA U-52 多参数水质测定仪。

1.5 数据处理

试验数据采用 EXCEL 2007 和 SPSS16.0 软件进行差异显著性和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面含水率随潜水水位的变化规律

图 2a 为不同潜水水位下各土柱土壤剖面的含水率变化。由图 2a 可知，浅水位 0.3 m 时，土壤剖面 RWC 无显著差异 ( $P>0.05$ )，在其他水位时，土壤剖面水分随

土壤深度的增加呈显著增加趋势，但这种增加趋势随潜水水位的变深而逐渐变缓。在相同的土壤深度下，随潜水水位的升高土壤水分显著降低，浅水位下土壤水分最高。随土壤深度的增加，土壤剖面 RWC 的变化幅度逐渐降低，在 10 cm 的表土层，土壤 RWC 在 6.42%~87.64% 之间，表土层 RWC 变化幅度和标准偏差均最大，分别达 81.22%和 33.82%。在潜水水位达 1.2 m 时表土层 RWC 开始明显降低，在试验过程中也发现在潜水水位低于 1.2 m 时，所有土柱的表层均保持湿润状态。各土柱最底土层 RWC 在 64.42%~84.21%之间，变幅和标准偏差均最低，分别为 19.79%和 6.38%。

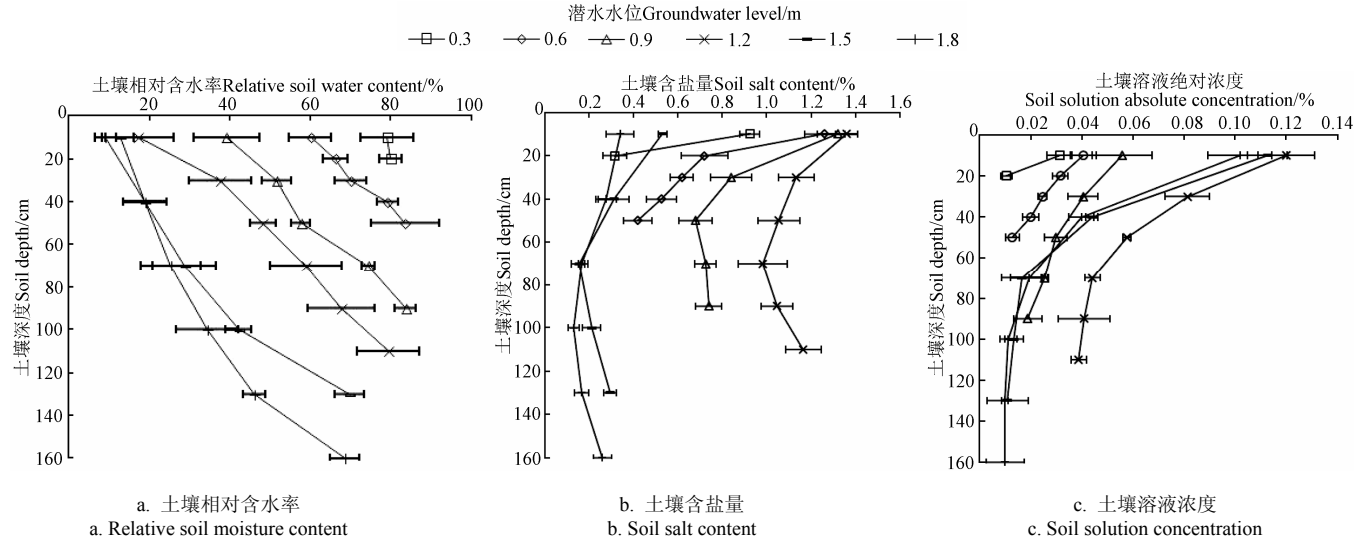


图 2 不同潜水水位下各土壤剖面的含水率、含盐量和土壤溶液变化

Fig.2 Changes of soil moisture, salt content and soil solution concentration under different groundwater level in soil profiles

由表 2 可知，不同潜水水位下各土柱整个土壤剖面 RWC 变幅和标准偏差分别在 17.26%~73.21%和 7.41%~22.70% 之间，土壤 RWC 的变幅和标准偏差随潜水水位的变深先升高后降低，浅水位为 0.3 m 时，土壤 RWC 变化幅度和标准偏差均最低；中水位为 1.2 m 时，RWC 变幅最高；深水位为

1.5 m 时，标准偏差最高。分析表明，潜水水位的增加可导致土壤剖面水分之间的变异性显著增大。整个土壤剖面 RWC 均值 (29.66%~79.42%) 随潜水水位增加显著降低，其中潜水水位在 0.3、0.6、0.9、1.2 和 1.5 m 下的土壤 RWC 均值分别是 1.8 m 下的 2.68、2.41、2.29、1.74 和 1.18 倍。

表 2 不同潜水水位下整个土柱的水盐参数

Table 2 Soil water and salt parameters under different groundwater level in soil columns

潜水水位 Groundwater level/m	土壤相对含水率 Relative soil water content/%			土壤含盐量 Soil salt content/%			土壤溶液绝对浓度 Soil solution absolute concentration/%		
	均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变化幅度 Range	均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变化幅度 Change range	均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变化幅度 Change range
0.3	79.42 a	7.41	17.26	0.62 c	0.36	0.71	0.02 c	0.01	0.03
0.6	71.52 bc	8.82	26.73	0.71 c	0.31	1.00	0.03 bc	0.01	0.03
0.9	67.84 c	12.84	40.43	0.86 b	0.26	0.88	0.04 b	0.01	0.05
1.2	51.51 d	21.47	73.21	1.13 a	0.14	0.59	0.06 a	0.02	0.09
1.5	34.86 e	22.70	65.88	0.30 d	0.14	0.52	0.04 b	0.03	0.11
1.8	29.66 f	20.66	62.64	0.22 d	0.09	0.29	0.03 bc	0.04	0.11

注：表中的土壤水盐参数均值为 3 个土柱的平均值，字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Mean of soil water and salt parameters is average of 3 soil columns, and different letters represent significant differences ( $P<0.05$ ).

2.2 土壤剖面含盐量随潜水水位的变化规律

图 2b 为不同潜水水位下各土柱土壤剖面的含盐量变化。由图 2b 可知，浅水位下各土柱剖面含盐量随土壤深度的增加显著降低 ( $P<0.05$ )；在中水位和深水位下，

各土柱剖面含盐量随土壤深度的增加先降低再升高。从盐分均值来看，各土柱土壤表层含盐量最高，表现出强烈的表聚性，在中间层 50~70 cm 土壤深时含盐量达最低值，此后随土壤深度的增加含盐量有所升高，这可能

与土壤蒸发促使地下水中的盐分向上运移, 减弱了地下水与中间层土壤的联系, 使其土壤积盐受地下水的影响趋弱或减缓, 孙九胜等也发现潜埋深与土壤积盐有类似规律<sup>[20]</sup>。从潜水水位来看, 不同土壤剖面中水位 1.2 m 下的土壤含盐量均最高。从土壤层次来看, 不同潜水水位下 10 cm 表土层含盐量均最高, 含盐量在 0.28%~1.36% 之间, 其变幅和标准偏差最大, 分别达 1.22% 和 0.42%, 其中表土层含盐量在潜水水位 1.2 m 时分别是 0.3 m 和 1.8 m 水位下的 1.15 和 3.12 倍。可见, 表土层盐分受潜水水位影响波动性较大。

由表 2 可知, 不同潜水水位下各土柱整个土壤剖面含盐量变幅和标准偏差分别在 0.29%~1.00% 和 0.09%~0.36% 之间, 随潜水水位的增加, 土壤含盐量变幅先升高后降低, 标准偏差逐渐降低。在浅水位为 0.6 m 时, 土壤含盐量变化幅度最高; 在 0.3 m 时, 含盐量标准偏差最大; 在深水位为 1.8 m 时, 土壤含盐量变幅和标准偏差均最低。整个土壤剖面含盐量均值 (0.22%~1.13%) 随潜水水位增加先升高后明显降低, 在中水位 1.2 m 时土柱盐分达最高, 各剖面土壤盐分也达最高值 (1.05%~1.36%), 潜水水位在 0.3、0.6、0.9、1.5 和 1.8 m 下的土壤盐分均值分别比 1.2 m 盐分均值下降 45.18%、37.27%、23.55%、73.44% 和 80.31%。上述分析表明 (表 2 和图 2b), 潜水水位超过 1.2 m 后, 土壤含盐量明显降低, 参考柽柳生长适宜的耐盐范围在 1.2% 左右和不耐淹性<sup>[1]</sup>, 盐矿化度下柽柳幼苗生长适宜的潜埋深应大于 1.2 m, 在 1.5~1.8 m 潜埋深下较好。结合土壤层含盐量和含水率数值, 栽植深度过浅, 土壤水分会过低, 苗木易处于干旱胁迫状态, 同时考虑到栽植成本, 建议柽柳幼苗在中水位和深水位的栽植深度以 30~40 cm 为宜。

### 2.3 土壤剖面溶液绝对浓度随潜水水位的变化规律

图 2c 为不同潜水水位下各土柱土壤剖面的溶液绝对浓度变化。由图 2c 可知, 各土柱土壤溶液绝对浓度 ( $C_s$ ) 均值随土壤深度的增加显著降低, 其中浅水位和中水位下, 不同土层  $C_s$  随土壤深度的增加整体呈显著下降趋势, 而在深水位下,  $C_s$  随土壤深度的增加先急剧下降至 70 cm 深, 此后呈现平稳变化趋势。从潜水水位来看, 不同土壤剖面中水位 1.2 m 下的  $C_s$  均最高。从土壤层次来看, 不同潜水水位下 10 cm 表土层  $C_s$  均最高,  $C_s$  在 0.03%~0.13% 之间, 其变幅和标准偏差最大, 分别达 0.11% 和 0.04%; 而越接近底土层, 土壤  $C_s$  变化相对比较稳定, 这可能由于土壤底层紧邻潜水水位, 土壤水分接近饱和状态, 致使含盐量比较稳定。可见, 表土层  $C_s$  受潜水水位影响波动性较大。

由表 2 可知, 不同潜水水位下各土柱整个剖面  $C_s$  的变幅和标准偏差分别在 0.03%~0.11% 和 0.01%~0.04% 之间, 随潜水水位的增加  $C_s$  变幅和标准偏差呈升高趋势, 可见整个土柱土壤溶液绝对浓度在浅水位下变化稳定, 而中水位和深水位下波动性较大, 变化剧烈。各个土柱整个剖面  $C_s$  均值随潜水水位增加先升高后明显降低, 在中水位 1.2 m 时整个土柱的  $C_s$  均值达最高, 潜水水位在

0.3、0.6、0.9、1.5 和 1.8 m 下的  $C_s$  均值分别比 1.2 m 下降 67.71%、59.57%、45.78%、39.43% 和 51.16%。

### 2.4 土壤水盐参数与潜水水位的相关性分析

表 3 为土柱水盐参数及其与潜水水位的相关系数。从整个土壤剖面水盐参数与潜水水位的相关性来看, 土壤含盐量、土壤相对含水率与潜水水位分别呈极显著 ( $P<0.01$ ) 和显著 ( $P<0.05$ ) 负相关, 土壤相对含水率与盐分呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 土壤溶液绝对浓度与含盐量、含水率分别呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ) 和负相关 ( $P<0.01$ )。分析表明, 随潜水水位的加深, 整个土柱的含水率和含盐量均降低, 土壤盐分随土壤水分的上升而增加。由于土壤溶液绝对浓度受土壤质量含水率和含盐量的共同影响, 与潜水水位的相关性较小。

表 3 土壤水盐参数及其与潜水水位的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil water and salt parameters and groundwater level

水盐参数 Soil water and salt parameters	潜水水位 Groundwater level	土壤相对含水率 Relative soil water content (RWC)	土壤含盐量 Soil salt content ( $S_c$ )
RWC	-0.680*		
$S_c$	-0.465**	0.315**	
$C_s$	0.081	-0.484**	0.422**

注: \*表示  $P<0.05$  显著相关; \*\*表示  $P<0.01$  极显著相关。 $C_s$ , 土壤溶液绝对浓度。

Note: \* indicate significant correlation at  $P<0.05$ ; \*\* indicate significant correlation at  $P<0.01$ .  $C_s$  is soil solution absolute concentration.

## 3 讨论

### 3.1 土壤水分与潜水水位的互作效应

本研究表明, 土壤水分随潜水水位加深明显减低, 两者呈极显著负相关, 这与沙漠绿洲区<sup>[11]</sup>和地下水浅埋区<sup>[19]</sup>土壤含水率与地下水埋深存在显著负相关性的结论类似。潜埋深较浅时, 地下水可通过毛细管作用充分供给包气带, 土壤含水率增大<sup>[3,22]</sup>; 而随潜埋深的增加, 地下水向上运动达到表土层和浅土层的路径越长, 受重力作用和毛细管作用的减弱, 水分上行速度减弱, 并且湿润锋处的土壤水势梯度越来越小, 致使表土层或浅土层水分含量降低形成干燥层, 导致土壤剖面含水率随潜埋深的增加显著减小。表土层相对含水率受潜水水位的影响明显高于底土层 (图 2a), 这是因为土壤剖面越靠近潜水水位, 包气带输水能力越强, 土壤水分变异性越低; 致使底土层土壤水分变化幅度和离散程度较小。潜水水位  $<0.9$  m 时, 10 cm 表土层含水率较高且剖面变化幅度较小, 这与浅水位下土壤表层含水率主要受大气蒸发力和毛管支持水的双重作用有关<sup>[23-24]</sup>。但在潜水水位大于 1.2 m 后, 表土层相对含水率较低且变幅也较小, 这主要是因为随潜水水位变深, 地下水对土壤表层的补给量减少, 超过毛细管作用的临界深度, 致使土壤表层形成水分缺乏的干土层。相关研究表明, 潜埋深高低可明显改变土壤水分含量、土壤水分亏缺量和土壤水重力水库容等水分参数<sup>[3,6,25]</sup>。克里雅绿洲土壤剖面水分自上而下呈逐渐增大趋势, 土壤含水率与地下水埋深之间的关系也逐渐增强, 其中以 15~20 cm 土壤含水率与地

下水埋深的负相关性最强<sup>[11]</sup>，而本研究发现在浅土层 20~40 cm 时土壤含水率与潜水水位负相关性最强 ( $R=-0.965$ )。但也有研究发现，当潜水埋深 $>1.0$  m 时，表层 0~10 cm 土壤水分与潜水水位没有相关性<sup>[19]</sup>。

### 3.2 土壤盐分与潜水水位的互作效应

土壤因潜水蒸发而积盐的过程一般与潜水水位从高到低的回降过程相对应，持续到潜水水位降至临界深度以下<sup>[14]</sup>，当潜水埋深大于蒸发极限深度时<sup>[4]</sup>，地下水难以被输送到土壤浅土层。相关研究发现，浅埋深水位下，土壤盐分随潜水埋深的增加而减小，两者之间可满足负相关<sup>[14,23,26]</sup>或指数关系<sup>[4,13,15,27]</sup>，但土壤盐分与潜水埋深两者又并非同步升降<sup>[14]</sup>，当潜水埋深达到一定深度时土壤电导率趋于恒定值，而这一恒定值与潜水埋深呈正比<sup>[13]</sup>。而本研究表明，土壤各剖面含盐量随潜水水位的增加先升高后降低，但所有潜水水位下仍表现为土壤表层含盐量最高，表聚现象明显，只是潜水水位的不同导致土壤表层积盐效果差异较大。

在相同的土壤剖面层，土壤含盐量与潜水水位并非呈现单一线性相关（图 2b）。这主要是因为一般野外实际生境下，地下水与土壤水之间存在一个相互作用相互影响的内部自适应自调节过程<sup>[14,19]</sup>，而本模拟试验是在矿化度和潜水水位稳定的条件下开展的，即有足够的地下水和盐分来补充因潜水蒸发带走的水盐，因此，土壤含盐量随潜水水位的增加并未完全表现出降低趋势，而是表现为先升高后降低，在潜水水位达 1.2 m 时，各剖面土壤含盐量均达最高。另一方面，以中水位 1.2 m 为界，可发现在潜水水位低于 1.2 m 时，各土壤剖面盐分随潜水水位的变浅而降低，这可能是因为潜水水位较低时，土壤含水率较高，聚集在表层的土壤盐分增大了渗透压，降低了蒸发速率<sup>[7,28]</sup>，致使土壤盐分呈下降趋势；而潜水水位超过 1.2 m 时，各土壤剖面盐分随潜水水位的变深而降低，两者也可满足负相关，这与相关结论类似<sup>[14,23,26]</sup>。土壤盐分随潜水水位的波动性变化趋势，可能与土壤表层活性积盐和土体内积盐方式的不同有关<sup>[4]</sup>，当潜水埋深小于潜水蒸发临界深度时，地下水主要通过毛管薄膜水达到土壤表层，形成活性积盐，但当水位过低时，土壤盐分在表层迅速聚集类似形成一种结皮性质的保护层，降低了水分蒸发，致使含盐量有降低趋势；当潜水埋深大于潜水蒸发临界深度时，盐分不能达到地表，部分盐分聚集在土壤中形成残余盐土<sup>[4]</sup>。表土层含盐量在潜水水位 1.2 m 时分别是浅水位 0.3 m 和深水位 1.8 m 下的 1.15 和 3.12 倍。陈永富等研究也发现，新疆喀什地区表层土壤积盐速率随潜水埋深的增大而减小且趋势明显，其中潜水埋深 25 cm 是 50 cm 的 2 倍多<sup>[23]</sup>。分析表明，不同土壤剖面的最高含盐量对应着某一特定的潜水水位，土壤盐分随潜水埋深的变化过程应存在潜水水位转折点，1.2 m 水深应该是土壤盐分聚集发生转变的潜水水位，此水位下土壤柱体盐分聚集最高。

表土层 0~10 cm 含盐量变化幅度最大，其他土层差异较小，这与内蒙古河套盐渍化灌区土壤表层 0~20 cm 电导率随潜水埋深增加变化幅度最大的结论类似<sup>[13]</sup>。李

彬等研究发现，内蒙古河套盐渍化灌区土壤电导率与地下水埋深的指数相关性随潜水埋深增加逐层下减，表层电导率与潜水埋深的函数相关性最强<sup>[13]</sup>；孙九胜等研究发现，克拉玛依农业开发区耕层、底层土壤含盐量与潜水埋深呈负相关，中层土壤含盐量与地下水埋深相关性不明显<sup>[20]</sup>。可见，不同土壤剖面的积盐程度除了与潜水水位密切相关外，还与土壤结构<sup>[10-11]</sup>、植被类型<sup>[6,12,22]</sup>和气象因子<sup>[8,13,24]</sup>有关，但潜水埋深是土壤发生盐渍化的一个决定性条件<sup>[25,29-30]</sup>，从防止区域土壤盐渍化的角度考虑，应采取合理措施将潜水埋深控制在不因蒸发而使土壤积盐的深度，结合土壤表土层盐分较高的潜水水位（图 2b），柽柳幼苗生长适宜的潜水水位应大于 1.2 m，在 1.5~1.8 m 潜水埋深下较好。

土壤渍水、水分亏缺或含盐量过高均可影响植物生长，而土壤溶液绝对浓度是表征植物生长状况与土壤水分、盐分关系的重要参数，可较好反映植物生长所需的土壤水盐状态<sup>[21]</sup>。土壤柱体的溶液绝对浓度在表土层最高，随土壤深度的增加显著下降，这与土壤上层含盐量高、土壤水分低，而底土层含盐量较低、土壤水分较高有关。从土柱各剖面土壤水分、盐分及土壤溶液绝对浓度来看，结合实际生境和栽植成本，盐水矿化度条件下，柽柳幼苗栽植深度应尽量超过 20 cm 深，建议柽柳幼苗在中水位和深水位的栽植深度以 30~40 cm 为宜。

## 4 结 论

随潜水水位的增加，不同土柱的相对含水率均显著降低，土壤剖面水分在中水位 0.9~1.2 m 变化最剧烈，在浅水位 0.3~0.6 m 变化最稳定。随土壤深度的增加，不同潜水水位下土壤相对含水率均呈升高趋势，但表土层水分变幅最大，变异性最强。

随潜水水位的变深，不同土柱的盐分和土壤溶液绝对浓度均先升高后降低，1.2 m 水位是土壤水盐变化的转折点，此水位下土柱含盐量和土壤溶液绝对浓度均达最高。浅水位下土壤盐分随土壤深度的增加显著下降，中水位和深水位下土壤盐分随土壤深度的增加先降低后升高，土壤剖面盐分变化剧烈程度表现为浅水位 $>$ 中水位 $>$ 深水位。随土壤深度的增加，各潜水水位下土壤溶液绝对浓度逐渐降低，其剖面变化幅度表现为深水位变化最剧烈，其次是中水位，而浅水位最稳定。

地下盐水矿化度条件下，不同潜水水位下柽柳幼苗栽植深度应以浅土层为主，至少超过 20 cm 深为宜，比较适宜的潜水水位在 1.5~1.8 m，栽植深度建议以 30~40 cm 为主。本文仅从潜水水位的角度探讨了柽柳苗木生长初期不同土壤剖面的水盐变化，受植物生长节律的影响尚未从柽柳根系生长发育、地上生物量变化以及植物蒸腾耗水等方面对土壤水盐运移机理进行探讨。在下一步的研究中，将在盐水矿化度的不同潜水水位下，对栽植柽柳的土柱进行持续的季节水盐动态监测，同时结合柽柳地上、地下形态学特征以及蒸散等参数，对土柱水盐变化的迁移动态及其驱动机制进行深入探讨。



## [参 考 文 献]

- [1] 赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 等. 不同生境条件下中国柽柳空间分布点格局分析[J]. 生态科学, 2011, 30(2): 142—149.  
Zhao Xinsheng, Cui Baoshan, Sun Tao, et al. Analysis of spatial point pattern of *Tamarix chinensis* in different habitats[J]. Ecological Science, 2011, 30(2): 142—148. (in Chinese with English abstract)
- [2] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 689—694.  
An Lesheng, Zhao Quansheng, Ye Siyuan, et al. Water-salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 689—694. (in Chinese with English abstract)
- [3] Laversa D A, Hannahb D M, Bradleyb C. Connecting large-scale atmospheric circulation, river flow and groundwater levels in a chalk catchment in southern England[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523(1): 179—189.
- [4] 樊自立, 马英杰, 张宏, 等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 8—13.  
Fan Zili, Ma Yingjie, Zhang Hong, et al. Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River Drainage Basin[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [5] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲典型地区地下水位与土壤盐分空间分布的指示克立格评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2118—2124.  
Yao Rongjiang, Yang Jingsong. Evaluation on spatial distribution of groundwater depth and soil salinity by indicator kriging in a typical area of Yellow River Delta[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(6): 2118—2124. (in Chinese with English abstract)
- [6] Chaudhuri S, Ale S. Long-term (1930-2010) trends in groundwater levels in Texas: influences of soils, landcover and water use[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 379—390.
- [7] Jordán M M, Navarro-Pedreno J, García-Sánchez E, et al. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-Arid conditions: geological and environmental implications[J]. Environmental Geology, 2004, 45(4): 448—456.
- [8] Nippert J B, Jr Butler J J, Kluitenberg G J, et al. Patterns of *Tamarix* water use during a record drought[J]. Oecologia, 2010, 162(2): 283—292.
- [9] 杨劲松, 姚荣江. BP 神经网络在浅层地下水矿化度预测中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 5—12.  
Yang Jinsong, Yao Rongjiang. Application of BP neural network model in prediction of shallow groundwater mineralization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(3): 5—12. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵新风, 李伯岭, 王伟, 等. 极端干旱区 8 个绿洲防护林地土壤水盐分布特征及其与地下水关系[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 75—79.  
Zhao Xinfeng, Li Bailin, Wang Wei, et al. Characteristic of soil moisture and salinity distribution in eight forests and its relationship with groundwater in extreme arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [11] 魏彬, 海米提·依米提, 王庆峰, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤含水量的相关性[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1110—1116.  
Wei Bin, Yimiti Haimiti, Wang Qingfeng, et al. Correlation of burial depth of groundwater and soil water content in the Keriya Oasis, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1110—1116. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘虎俊, 刘世增, 李毅, 等. 石羊河中下游河岸带植被对地下水位变化的响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 335—341.  
Liu Hujun, Liu Shizeng, Li Yi, et al. Response of riparian vegetation to the change of groundwater level at middle and lower reaches of the Shiyang River[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2): 335—341. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李彬, 史海滨, 闫建文, 等. 节水改造后盐渍化灌区区域地下水埋深与土壤水盐的关系[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 117—122.  
Li Bin, Shi Haibin, Yan Jianwen, et al. Relation between groundwater depth and soil water and salt after water saving reform in salinization irrigation district[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 117—122. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王水献, 周金龙, 董新光. 地下水浅埋区土壤水盐试验分析[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(3): 52—56.  
Wang Shuixian, Zhou Jinlong, Dong Xinguang. Experimental analysis on the soil water and salt dynamic variation in shallow groundwater areas[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2004, 27(3): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [15] 常春龙, 杨树青, 刘德平, 等. 河套灌区上游地下水埋深与土壤盐分交互效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4/5): 315—319.  
Chang Chunlong, Yang Shuqing, Liu Deping, et al. Interaction effect of groundwater depth and soil salinization in the upper of Hetao irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(4/5): 315—319. (in Chinese with English abstract)
- [16] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明, 等. 基于模糊神经算法的区域地下水盐分动态预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 142—150.  
Yu Shipeng, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Regional groundwater salinity dynamics forecasting based on

- neuro-fuzzy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 142—150. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王相平, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 54—63.
- Wang Xiangping, Yang Jingsong, Yao Rongjiang, et al. Irrigation regime and salt dynamics for rice with brackish water irrigation in coastal region of North Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 54—63. (in Chinese with English abstract)
- [18] 范晓梅. 黄河三角洲土壤盐渍化时空动态及水盐运移过程模拟[D]. 北京: 中国科学院, 2010.
- Fan Xiaomei. The Spatiotemporal Dynamics of Saline Soils and Combining Water and Salt Simulation in the Yellow River Delta [D]. Beijing: CAS, 2010.
- [19] 吴启侠, 朱建强, 刘凯文. 地下水浅埋区 3 种水分的定量关系分析[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(3): 604—606.
- Wu Qixia, Zhu Jianqiang, Liu Kaiwen. Analysis on quantitative relationship among three kinds of water in shallow groundwater farmland[J]. Hubei Agricultural Science, 2009, 48(3): 604—606. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙九胜, 耿庆龙, 常福海, 等. 克拉玛依农业开发区地下水埋深与土壤积盐空间异质性分析[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(8): 1471—1476.
- Sun Jiusheng, Geng Qinglong, Chang Fuhai, et al. Spatial distribution pattern quantitative analysis of soil salt accumulation and groundwater depth in the Karamay agricultural development zone[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(8): 1471—1476. (in Chinese with English abstract)
- [21] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 作物水盐联合胁迫效应与水分高效利用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [22] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 128—136.
- Hao Yuanyuan, Xu Xu, Huang Quanzhong, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 128—136. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陈永宝, 胡顺军, 罗毅, 等. 新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的关系[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 75—81.
- Chen Yongbao, Hu Shunjun, Luo Yi, et al. Relationship between salt accumulation in topsoil of deserted land and groundwater in areas with shallow groundwater table in Kashi, Xinjiang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 75—81. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张川, 闫浩芳, 大上博基, 等. 表层有效土壤水分参数化及冠层下土面蒸发模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 102—107.
- Zhang Chuan, Yan Haofang, Oue Hiroki, et al. Parameterization of surface soil available moisture and simulation of soil evaporation beneath canopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 102—107. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王若水, 康跃虎, 万书勤, 等. 水分调控对盐碱地土壤盐分与养分含量及分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 96—104.
- Wang Ruoshui, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. Effects of water regulation methods on soil salt, nutrient content and its distribution in overlying saline wasteland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 96—104. (in Chinese with English abstract)
- [26] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 45—51.
- Yao Rongjiang, Yang Jingsong. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in plough layer and shallow groundwater in the Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(8): 45—51. (in Chinese with English abstract)
- [27] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202—1210.
- Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1202—1210. (in Chinese with English abstract)
- [28] 宫兆宁, 宫辉力, 邓伟, 等. 浅埋条件下地下水-土壤-植物-大气连续体中水分运移研究综述[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 365—373.
- Gong Zhaoning, Gong Huili, Deng Wei, et al. An overview of water movement in groundwater-soil-plant-atmosphere continuum with shallow water table[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(Supp.1): 365—373. (in Chinese with English abstract)
- [29] Ruan B Q, Xu F R, Jiang R F. Analysis on spatial and temporal variability of groundwater level based on spherical sampling model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 573—579.
- [30] Rudzianskaite A, Sukys P. Effects of groundwater level fluctuation on its chemical composition in karst soils of Lithuania[J]. Environmental Geology, 2008, 56(2): 289—297.

## Migration characteristics of soil water and salt and their interaction under different groundwater levels

Xia Jiangbao<sup>1</sup>, Zhao Ximei<sup>1,2</sup>, Zhao Ziguo<sup>1</sup>, Chen Yinping<sup>1,2</sup>, Liu Junhua<sup>1,3</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China;

2. College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 3. College of Biology and Environment,

Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Soil salt and water closely related to groundwater depth mainly affect vegetation distribution pattern and community succession of the Yellow River Delta. Thus, it is important to explain the changing process of water and salt in groundwater and soil and their effects on the occurrence of the secondary salinization. This study aimed to understand the response of soil water-salt distribution characteristics to groundwater depth and their interactive effects under saline groundwater conditions. To achieve the objective, a laboratory experiment was carried out in a controllable greenhouse of Shangdong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, China in 2014. Soils were collected from Yellow River downstream and air-dried. A total of 18 soil columns planted with *Tamarix chinensis* Lour, a constructive species in the Yellow River Delta were prepared and the soil columns were made of polyvinyl chloride resin. These soil columns were immersed into saline water that simulated groundwater levels of 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 and 1.8 m. The water-salt parameters (such as relative soil water content, soil salt content and soil solute absolute concentration) of different soil column profiles were measured. The results showed that: 1) Relative soil water content of soil columns was greatly decreased as the level of groundwater increased while soil salt content: soil moisture fluctuated dramatically for treatment of groundwater level 0.9-1.2 m and was stable for groundwater level 0.3-0.6 m; 2) Soil solution absolute concentration increased first and then decreased, and the turning point of soil water and salt content occurred at level of groundwater 1.2 m, under which soil salinity and soil solution absolute concentration of soil profiles were both the highest; 3) The maximum variation of water content, salt content and soil solution absolute concentration occurred for treatments of the level of groundwater 0.9-1.2 m, 0.6 m and 1.5-1.8 m, respectively; 4) As soil depth increased, the relative soil water content also increased, the soil salt content fell first and then rose up to 1.34% at surface layer, while soil solution absolute concentration decreased; From the soil surface down the soil profile, the change range and degree of relative soil water content and soil solution absolute concentration decreased gradually with increasing groundwater level; The groundwater level corresponding to the highest salt content of all soil profiles was 1.2 m; and 5) Soil salt content and relative soil water content had significant negative correlations with level of groundwater at  $P<0.01$  and  $P<0.05$ , respectively, and a significant positive correlation ( $P<0.01$ ) was observed between relative soil water content and soil salt content. Based on changes in soil moisture, salinity and soil solution absolute concentration, the *T. chinensis* should be planted 20 cm at least of soils, preferably 30-40 cm under saline groundwater conditions. The suitable level of groundwater was between 1.5 and 1.8 m. The results can provide important information for the prevention of soil secondary salinization, and the planting and management of *T. chinensis* under saline groundwater conditions.

**Key words:** soil moisture; salinity; groundwater; groundwater level; soil solution concentration; *Tamarix chinensis* Lour