

DOI: 10.5846/stxb201606281276

赵西梅, 夏江宝, 陈为峰, 陈印平. 蒸发条件下潜水埋深对土壤-柽柳水盐分布的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6074-6080.

Zhao X M, Xia J B, Chen W F, Chen Y P. Effect of groundwater depth on the distribution of water and salinity in the soil-*Tamarix chinensis* system under evaporation conditions. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6074-6080.

蒸发条件下潜水埋深对土壤-柽柳水盐分布的影响

赵西梅^{1,2}, 夏江宝^{2,*}, 陈为峰¹, 陈印平^{1,2}

1 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

2 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

摘要: 盐水矿化度下模拟设置 4 个潜水埋深(0.9、1.2、1.5、1.8 m), 分析不同土层的土壤相对含水量(RWC)、含盐量(S_c)和土壤溶液绝对浓度(C_s)等水盐参数, 及柽柳叶片和新生枝条的含水量及 Na^+ 含量, 探讨盐水矿化度下土壤-柽柳水盐参数对潜水埋深的响应规律。结果表明: 各土层 RWC 与潜水埋深呈负相关, 0.9 m 潜水埋深下各土层的 RWC 均最高, 且各土层 RWC 随土层深度的增加呈先降低后增加的趋势, 其它潜水埋深下各土层 RWC 均逐渐增加, 1.2 m 是地下水所能上升且保持柽柳柱体土壤表层湿润的最高高度。各土层 S_c 和 C_s 与潜水埋深呈抛物线型, 均表现为先增加后降低, 潜水埋深 1.2 m 时, 各土层 S_c 均最高。随土层深度的增加, 各潜水埋深下 S_c 先降低后增加, 而 C_s 呈现减少趋势; 潜水埋深越高, 土层间 C_s 变化幅度越激烈。潜水埋深对柽柳叶片和新生枝条的含水量无显著影响($P>0.05$), 而随潜水埋深的增加, 柽柳叶片 Na^+ 含量逐渐增加, 新生枝条 Na^+ 含量则先增加后降低。从整个柽柳土柱看, 随潜水埋深的增加, 整个土壤剖面的 RWC 均值逐渐降低, 而 S_c 和 C_s 均值先增加后降低, 潜水埋深 1.2 m 是盐分变化的分界点, 建议栽植柽柳的潜水埋深大于 1.2 m。

关键词: 潜水埋深; 水分; 盐分; 分布特征; 柽柳; 土壤

Effect of groundwater depth on the distribution of water and salinity in the soil-*Tamarix chinensis* system under evaporation conditions

ZHAO Ximei^{1,2}, XIA Jiangbao^{2,*}, CHEN Weifeng¹, CHEN Yinping^{1,2}

1 College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

Abstract: In order to investigate the response of water and salt distribution in the *Tamarix*-soil system to groundwater depth under saline conditions, a soil column experiment was carried out with *Tamarix chinensis* planted under four treatments with different groundwater depths (0.9 m, 1.2 m, 1.5 m, and 1.8 m). The soil relative water content (RWC), soil salt content (S_c), and absolute concentration of soil solution (C_s) were determined in different profiles of water content and Na^+ content of the leaves and new branches of *T. chinensis*. The RWC in each soil profile was negatively correlated with the groundwater depth, and the maximum values for each soil layer were observed in groundwater depth treatment that was 0.9 m deep. With the increase in soil depth, the RWC in this treatment increased initially and then decreased, while it constantly increased at other groundwater depths. The results showed that the 1.2 m groundwater depth treatment was the greatest depth to which water could reach and keep the soil surface moist in the soil column planted with *T. chinensis*. With the increase in groundwater depth, S_c and C_s of each soil profile increased initially and then decreased, displaying a parabola pattern. The maximum content at each soil layer was observed in the 1.2 m groundwater depth treatment. With the

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370702, 31570522); 山东省重点研发计划项目(2015GNC111022); 滨州市科技发展计划项目(2011ZC0702); 滨州学院博士学位人员科研启动项目(2014Y04); 滨州学院科研基金项目(BZXYL1108)

收稿日期: 2016-06-28; 网络出版日期: 2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiajb@163.com

increase in soil depth, S_c in all groundwater depth treatments decreased initially and then increased, while C_s decreased gradually. The change range of C_s between soil layers increased with the increase of groundwater depth. Significant differences were not observed ($P>0.05$) between the water content in either the leaves or new branches of *Tamarix* at different groundwater depths, while the content of Na^+ in the leaves increased gradually and that in the new branches decreased after an initial increase. For the whole *Tamarix*-soil column, the mean of RWC decreased gradually with the increase in groundwater depth, whereas the mean of S_c or C_s increased initially followed by a decrease. The groundwater depth of 1.2 m is the demarcation point of salinity change, suggesting that the groundwater depth for *Tamarix* should be more than 1.2 m.

Key Words: groundwater depth; water; salt; distributional characteristics; *Tamarix chinensis*; soil

土壤盐渍化是世界性的土地资源与生态环境领域内亟待解决的重要问题之一,黄河三角洲位于渤海南部的黄河入海口沿岸,该地区植被覆盖率低,生态环境脆弱,盐碱地土壤比重大,盐渍化是制约黄河三角洲农林业可持续发展的瓶颈因素。滨海盐碱地水盐运动复杂^[1],地下水埋深和矿化度是影响土壤水盐分布的主要因素^[2],进而间接影响植被的分布及植物对矿质元素的吸收利用^[3-5]。研究发现,土壤水分运动和蒸发是导致土壤盐分变化的关键因素,而土壤水盐运移与潜水埋深密切相关^[2,6-9],当地下水位上升至一定范围达到临界深度,盐分才能随水分通过毛细管作用积聚于地表。但由于土壤性状^[2,6,10]、地形^[9-10]、植被^[11]及气候环境^[12]等因素的不同,致使土壤的水盐运移与潜水埋深的相关性差异较大^[2],黄河三角洲地区地下水位浅,矿化度高,蒸降比大,盐分更容易通过毛管作用向上迁移,易形成次生盐渍化,导致植被和土地生产力退化严重,加剧了当地的水土流失^[1,7,13]。因此,从地下水埋深的角度开展土壤-植物水盐分布特征及其动态规律的研究,对有效防治土壤次生盐渍化、有效利用地下水资源及耐盐碱植物的栽培管理具有重要的科学意义。

目前国内外学者对地下水位(或潜水埋深)与土壤水盐及植被的研究,多集中在潜水埋深下的灌溉对土壤水盐运移及作物的影响^[14-16],土壤水分或盐分与地下水位的单一关系的探讨^[7,10-11,14,17],以及地下水水位与植被格局、群落演替关系^[1,5,13]、碳氧循环^[18-19]等方面,缺少在地下水-土壤-植物不同介质中的水分和盐分运移特征方面的探讨,特别是在垂直深度上不同土壤剖面及植物主要组织器官等的水盐参数对不同潜水埋深的响应规律尚不清晰。柽柳(*Tamarix chinensis*)是黄河三角洲盐碱地主要水土保持灌木树种,耐盐能力强,具有较好的防风固沙、保持水土和改良土壤功能。针对柽柳生长和分布受潜水埋深影响较大这一问题,本文模拟盐水矿化度设置4个不同的潜水埋深,以柽柳土柱为研究对象,重点探讨蒸发条件下潜水埋深对不同土壤剖面以及柽柳主要组织器官水盐分布的影响,揭示“土壤-柽柳”系统水盐参数对潜水埋深的响应规律,以期为泥质海岸带地下水浅埋区的盐碱地改良和适宜柽柳栽植的水盐生境提供理论依据和技术参考。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验于山东省黄河三角洲生态环境重点实验室的智能温室内进行,土壤类型为潮土,取自黄河下游滩地,自然风干后筛分备用。初始 pH 值为 7.54,土壤容重为 1.32 g/cm^3 ,田间持水量为 37.86%,含盐量达 0.01%。植物选择黄河三角洲地区优势种中国柽柳(*Tamarix chinensis*),实验模拟地下水为黄河三角洲海盐自行配制,因黄河三角洲地区地下水矿化度多介于 14.3—32.4 g/L ^[7],因此,本实验模拟设置盐水矿化度(20 g/L),实测地下水矿化度 20.3 g/L ,pH 值为 7.79,盐度为 1.68%,其地下水离子组成见表 1。

1.2 实验设计

该地区地下水埋深较浅,且受近海距离影响,差异较大,平均潜水埋深 1.1 m ^[1],因此,本研究模拟设置潜水埋深分别为 0.9、1.2、1.5、1.8 m ,每个潜水埋深设 3 个重复。

具体实验设计为:在智能化科研温室内,以高度不同、内径为 30 cm 的 PVC 圆管作为栽植柽柳和模拟地

下水埋深的实验装置,将其放入高×上口直径×底部直径为 0.70 m×0.57 m×0.45 m 的水桶中,为保证地下水温度的均一性,挖沟将水桶埋入土壤中。依据设置的潜水埋深进行 PVC 圆管不同高度的加工,具体高度=模拟潜水埋深+实际淹水深度 0.55 m +顶端 0.03 m 的留沿口,因此,根据模拟 0.9、1.2、1.5、1.8 m 潜水埋深,分别加工高度为 1.48、1.78、2.08、2.38 m 的 PVC 圆管,依据设置的取土深度在 PVC 圆管的四周各打 1 个 2 cm 的孔径作为土壤取样口,并用塞子堵严^[20]。

表 1 地下水离子组成

Table 1 Groundwater ionic composition

离子 Ion	K ⁺ / (μg/mL) Potassium	Na ⁺ / (mg/mL) Sodium	Ca ²⁺ / (μg/mL) Calcium	Mg ²⁺ / (μg/mL) Magnesium	Cl ⁻ / (mg/mL) Chlorine	CO ₃ ²⁻ / (mg/L) Carbonate	HCO ₃ ⁻ / (mg/L) Icarbonate	SO ₄ ²⁻ / (μg/mL) Sulfate
含量 Content	18.17	7.10	55.88	95.11	11.52	16.92	158.32	376.07

为保证装置的透水性和防止底部土壤外漏,实际水位埋深的 0.55 m 淹水区 PVC 管每隔 10 cm 打 4 个 1 cm 孔径的进水口,用透水布堵住,PVC 圆管底部用透水布包住后,铺反滤层以保证水分从淹水区底部和四周的进水口进入土壤柱体。土柱填土量根据土壤容重计算,以 20 cm 为一层填充,层间压实。将长势一致,大小相当,根茎平均为 1.3 cm 的 3 a 生柽柳苗木统一截干 60 cm,栽植于不同高度的 PVC 管中,每个装置先栽植 2—3 株,正常栽植管理 1 月后,进行模拟水位-矿化度的控制,成活后留 1 株苗木^[20]。具体模拟装置见实景图 1。



图 1 柽柳土柱模拟装置实景图

Fig.1 Photo of soil-Tamarix chinensis system

1.3 样品采集及指标测定

2014 年 2 月准备试验,3 月初完成试验布设,6 月份进行土壤、柽柳新生枝条和叶片水盐参数的测定。结合文献^[7, 14, 17],土样采集间距设计为:90—120 cm 深度内,20 cm 为 1 层,含取表土层 10 cm;超过 120 cm 深度,每 30 cm 为 1 层,含取表土层 10 cm 处,为方便描述,将每土柱的土层从上到下描述为表土层、浅土层、中土层、深土层和底土层。选取长势、采光方位及叶龄大致相同的柽柳新生枝条和叶片,用于含水量和 Na⁺的测定。上述取样及测定均为 3 个重复。

采用日本 HORIBA U-52 多参数水质测定仪测定模拟地下水中盐度、电导率和 pH 值。采用残渣烘干法测定土壤含盐量,烘干法测定土壤重量含水量,并根据以下公式计算土壤相对含水量和土壤溶液绝对浓度,土壤相对含水量(RWC,%)=(土壤重量含水量/田间持水量)×100。土壤溶液绝对浓度(C_s,%)=土壤含盐量(占干土重%)/土壤含水量(占干土重%)×100^[20]。柽柳新生枝条和叶片含水量采用烘干法测定,先于 105 °C 杀青 15min,再于 80—90 °C 下烘至恒重。植物研磨,过 80 目筛,参照 LY/T1270—1999 测定柽柳叶片、新生枝条中的全量 Na⁺。

1.4 数据处理

采用 EXCEL 2003 进行数据处理、作图,SAS9.0 进行方差分析和差异显著性比较,其中百分数的方差分析先换算为平方根,然后求平方根的反正弦,再进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同潜水埋深对各土层相对含水量的影响

由图 2 可知,随潜水埋深的增加,各相同土层的土壤相对含水量(RWC)多表现为逐渐降低,潜水埋深 0.9 m 时,各土层的 RWC 均最高,表现为典型的潜水埋深越低,整个土壤层水分含量越高的变化趋势,这与魏

彬^[11]、李彬^[14]等研究规律相符。其中,随潜水埋深的增加,表土层 RWC 呈快速下降的趋势,与潜水埋深 0.9 m 相比,其它 3 个潜水埋深下的表土层 RWC 分别下降了 77.50%,83.30%,88.02%,且该 3 个潜水埋深下表土层的 RWC 差异不显著($P>0.05$)。这可能因为潜水埋深低时,表土层 RWC 主要受大气蒸发力和毛管上升水的影响,但当潜水埋深大于 1.2 m,由于潜水埋深的增加,水分传输距离超过毛细管作用的临界,地下水对表土层的补给减少,致使表土层水分缺乏,且变幅降低^[10]。浅土层和中土层的 RWC 随潜水埋深增加均呈降低趋势,潜水埋深 0.9 m 的土壤 RWC 显著高于其它潜水埋深($P<0.05$),但超过 1.2 m 后,各潜水埋深对这两个土层无显著影响($P>0.05$)。深土层的 RWC 呈先降低后逐渐平稳的趋势,超过潜水埋深 1.5 m 后,深土层的 RWC 无显著差异($P>0.05$)。

随土层深度的增加,潜水埋深为 1.2、1.5、1.8 m 时,RWC 逐渐增加,潜水埋深为 1.2 m 时底土层和深土层的土壤含水量分别为 69.14%和 67.76%,两者无显著差异($P>0.05$),这可能由于取土时这两层的土壤间距较小,土壤通过毛管作用力可以到达深土层,且保持较高的含水量。而当潜水埋深为 0.9 m 时,各土层 RWC 随土壤深度的增加呈先降低后增加的趋势,表土层、底土层和深土层三者无显著差异($P>0.05$),当潜水埋深较浅时,潜水靠近土壤表层,地下潜水面形成的毛管水很容易带到表土层,土壤表层的水分含量较高,这与 Jeevarathinam 研究结论类似^[3]。从图 2 可以看出,在潜水埋深达 1.2 m 时,表土层 RWC 开始明显降低,当潜水埋深增加时,地下水到土壤表层的距离增加,水分的传导能力降低,致使表土层或浅土层土壤含水量下降,各土层间含水量差异显著($P<0.05$),实验中也发现表层土湿润的柽柳土柱,其潜水埋深都不高于 1.2 m,即地下水所能上升且保持土壤表层湿润的最高高度为 1.2 m。从整个土柱来看,四个潜水埋深从低到高平均 RWC 逐渐降低,依次为 69.85%,47.99%,34.86%和 34.01%,变化幅度逐渐变小。

2.2 不同潜水埋深对各土层含盐量的影响

由图 3 可知,随潜水埋深的增加,各相同土层下土壤含盐量(S_c)均先增加后降低,呈抛物线型,潜水埋深 1.2 m 的 S_c 均最高,其中,潜水埋深 0.9 m 和 1.2 m 下表土层的 S_c 无显著差异($P>0.05$),但潜水埋深 1.5 m 和 1.8 m 下 S_c 分别比 0.9 m 潜水埋深下降了 0.36%,74.66%;4 个潜水埋深下浅土层和表土层的 S_c 的变化较大,

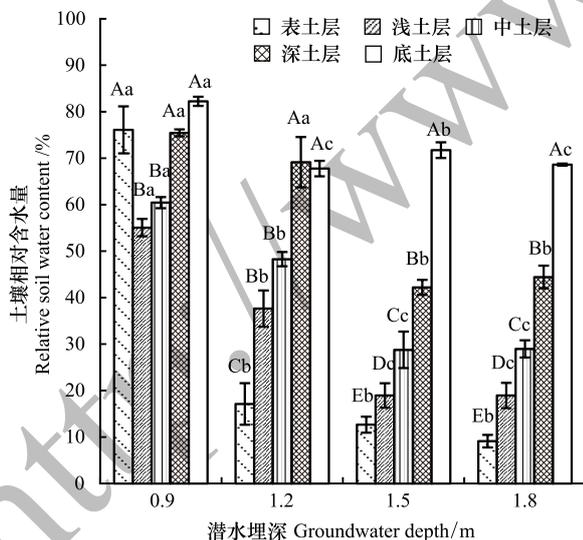


图 2 不同潜水埋深下各土层相对含水量的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of the relative soil water content in different soil layers to the groundwater level

图中不同大写字母表示同一潜水埋深下不同土层间差异显著,不同小写字母表示同一土层在不同潜水埋深间差异显著($P<0.05$);图中数据为平均值±标准差($n=3$)

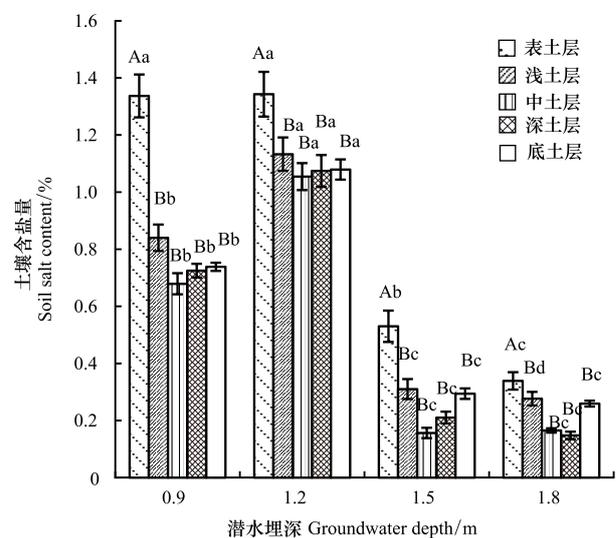


图 3 不同潜水埋深下各土层含盐量的分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of the soil salinity in different soil layers to the groundwater level

图中不同大写字母表示同一潜水埋深下不同土层间差异显著,不同小写字母表示同一土层在不同潜水埋深间差异显著($P<0.05$);图中数据为平均值±标准差($n=3$)

而当潜水深超过 1.5 m 时,随潜埋深的增加,中土层、深土层和底土层的 S_c 均无显著差异 ($P>0.05$)。这可能是因为土壤质地、结构、孔隙度和含水量等因素对土壤水盐运移的影响程度差异较大,致使地下水中盐分进入土壤的动力不一致,各土壤剖面盐分的积累不同^[6-8, 13]。盐分随水分运移^[21],模拟地下盐水中的盐分随土壤毛管水流向土壤表层,在无降水和灌水的条件下,潜水蒸发加剧了浅土层土壤盐分的积累^[10],使盐分在表层累积,当潜埋深较浅时,潜埋深小于潜水蒸发临界深度,盐分随地下水通过毛管作用到达土表,土壤 RWC 较高,表土层聚集的土壤盐分增大了渗透压,降低了水分蒸发^[22],致使 S_c 降低。本研究中 4 个潜埋深均出现了盐分表聚现象,而底土层的盐分受到底层饱和含水量的影响,盐分在一定的程度上受到外界影响较小。

随土层深度的增加,4 个潜埋深下 S_c 均表现为先降低后增加,表土层与其它土层间差异均显著 ($P<0.05$), S_c 最低均出现中土层,这可能与怪柳的耐盐特性有关,研究表明,栽植怪柳能在一定程度上降低土壤含盐量^[20, 23],而怪柳为深根系植物,根系生长速度较快,从栽植到采样根系集中分布层为 50—70 cm,该范围内由于根系的吸收,土壤含盐量呈降低趋势。从整个土柱的平均含盐量来看,随潜埋深的增加,土柱剖面平均含盐量也表现为先增加后减少,潜埋深 1.2 m 是盐分变化的分界点,0.9、1.5、1.8 m 潜埋深下整个土柱的平均含盐量分别为潜埋深 1.2 m 时的 75.99%、26.40%、20.88%,下降幅度逐渐变小。这与管孝艳研究结论^[2]相似,即潜埋深愈大,潜水蒸发强度愈小,盐分累积速度相应减少。

2.3 不同潜埋深对各土层土壤绝对溶液浓度的影响

由图 4 可知,随潜埋深的增加,各土层土壤溶液绝对浓度 (C_s) 均表现为先增加后降低的趋势,呈抛物线型,潜埋深 1.2 m C_s 均最高,与土壤含盐量的趋势一致。其中,潜埋深 1.2 m 时表土层 C_s (0.18%) 分别是 0.9、1.2、1.8 m 潜埋深下的 3.24 倍、1.62 倍和 1.80 倍,4 个潜埋深下表土层和浅土层 C_s 变化明显,但超过 1.2 m 后,相同土层下 C_s 趋于稳定,潜埋深对其影响较小。这可能因为土壤表层土壤盐分和水分均变化较大,而底部水分比较稳定,1.2 m 是土壤盐分变化的拐点,所以 C_s 表现出和 S_c 相似分布规律。

随土层深度的增加,4 个潜埋深下各土层 C_s 逐渐降低,各潜埋深下 C_s 随土层深度的增加,变化趋于稳定,深土层与底土层均无显著差异 ($P>0.05$),而各潜埋深下表土层 C_s 变化较大,表土层 C_s 与其它土层间差异均达到显著 ($P<0.05$),潜埋深 1.2 m 下的浅土层、中土层、深土层和底土层 C_s 分别为表土层的 44.60%、31.86%、22.92% 和 23.26%,这可能由于底层土壤接近

地下水,土壤水分接近饱和,而盐分又比较稳定,致使 C_s 趋于稳定。从整个土柱来看,各土柱的平均 C_s 表现先增加后减少,和土壤平均含盐量在整个土柱的分布规律一致,即潜埋深越深,土层间 C_s 变化幅度越激烈,这与潜埋深越大,土壤盐分累积速度越小,水分在整土柱中的分布差异越明显有关。

2.4 不同潜埋深对怪柳叶片和新生枝条含水量的影响

从图 5 可以看出,随潜埋深的增加,怪柳叶片和新生枝条的含水量总体呈先降低后增加的趋势,叶片含水量在 73.60%—74.26% 之间,差异不显著 ($P>0.05$),且各潜埋深间变化幅度很小;怪柳新生枝条含水量比叶片低,不同潜埋深下新生枝条含水量无显著差异 ($P>0.05$),但随潜埋深增加其含水量逐渐降低,不同潜埋深间的新生枝条含水量变化幅度大于叶片,当潜埋深达到 1.5 m 时,新生枝条含水量显著小于叶片

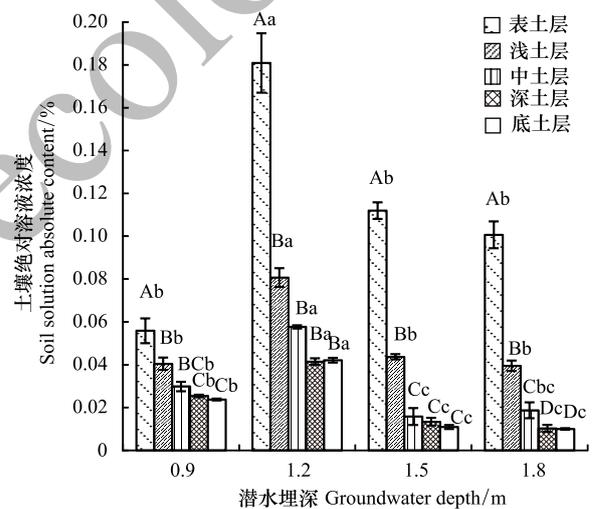


图 4 不同潜埋深下各土层土壤溶液绝对浓度的分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of the soil solution concentration in different soil layers to the groundwater level

图中不同大写字母表示同一潜埋深下不同土层间差异显著,不同小写字母表示同一土层在不同潜埋深间差异显著 ($P<0.05$); 图中数据为平均值±标准差 ($n=3$)

($P < 0.05$), 即潜水埋深对柽柳新生枝条含水量的影响显著大于叶片。从柽柳新生枝条和叶片累积含水量来看, 随潜水埋深的增加, 累积含水量先降低后增加, 各潜水埋深间差异不显著 ($P > 0.05$), 当潜水埋深达 1.5 m 时, 累积含水量最低。产生这种现象的原因可能与柽柳的生物学习性有关, 柽柳耐干旱又耐水湿, 发达的根系可从深层土壤中吸水^[23], 在新生枝条、叶片中再分布, 模拟实验中地下水水源稳定, 栽植装置中的水分及根系所处的土壤水分可满足柽柳的生长, 在植物正常生态水位和耐受范围内, 所以不同潜水埋深对植物同一器官水分含量影响较小。

2.5 不同潜水埋深对柽柳叶片和新生枝条 Na^+ 含量的影响

从图 6 可以看出, 随潜水埋深的增加, 柽柳叶片 Na^+ 含量呈逐渐增加的趋势, 而新生枝条 Na^+ 含量先增加后降低。1.2、1.5、1.8 m 潜水埋深下叶片 Na^+ 含量分别比 0.9 m 最低 Na^+ 含量 (36.72 mg/g) 增加 3.49%, 19.59% 和 94.00%, 当潜水埋深小于 1.5 m 时, 叶片 Na^+ 含量差异不显著 ($P > 0.05$), 由于柽柳为泌盐植物, 其吸收的盐分最终通过叶片、皮孔等器官释放, 而叶片为主要泌盐器官^[24], 泌盐能力高于新生枝条, 盐分较少保留在叶片内, 因此, 在一定潜水埋深范围内, 柽柳叶片的 Na^+ 含量差异不大。潘婷婷^[25] 研究表明, 土壤含水量较低时, 柽柳泌盐腺的泌盐能力下降, 本研究中浅土层和中土层的土壤含水量随潜水埋深的增加而降低, 因此, 当潜水埋深为 1.8 m 时, 柽柳叶片的泌盐能力较低, 叶片中的 Na^+ 含量最高。

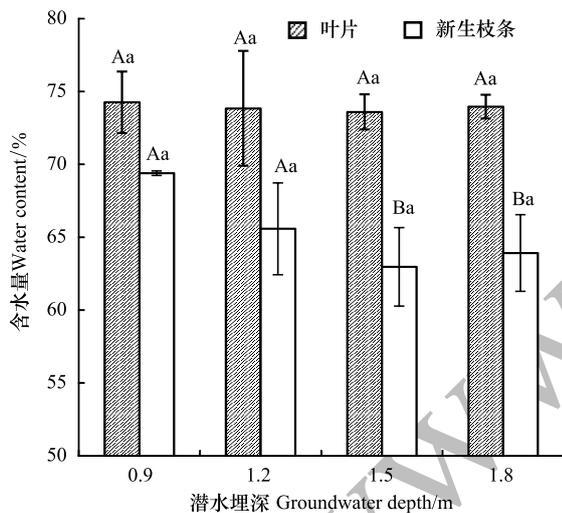


图 5 不同潜水埋深下柽柳叶片和新生枝条含水量的分布特征

Fig. 5 Water contents of *Tamarix chinensis* leaves and new branches at different groundwater depths

图中不同大写字母表示同一潜水埋深下不同植物器官间差异显著, 不同小写字母表示同一植物器官在不同潜水埋深间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)

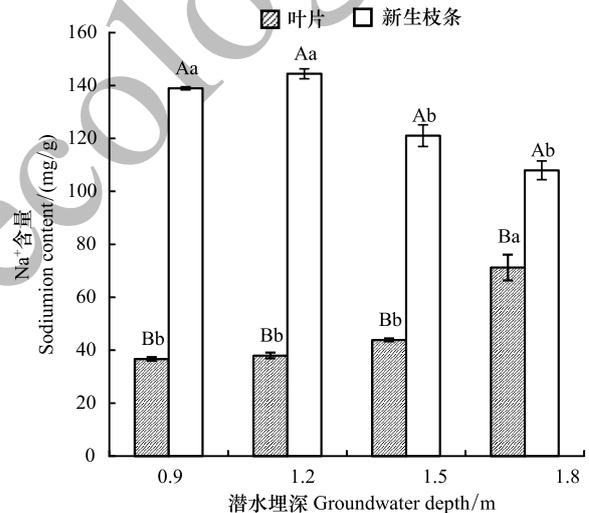


图 6 不同潜水埋深下柽柳叶片和新生枝条 Na^+ 含量的分布特征

Fig. 6 Na^+ contents of *Tamarix chinensis* leaves and new branches at different groundwater depths

图中不同大写字母表示同一潜水埋深下不同植物器官间差异显著, 不同小写字母表示同一植物器官在不同潜水埋深间差异显著 ($P < 0.05$); 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)

随潜水埋深的增加, 柽柳新生枝条的 Na^+ 含量先增加后降低, 1.2 m 潜水埋深是新生枝条 Na^+ 含量差异变化的拐点, 潜水埋深 0.9、1.5、1.8 m 时柽柳新生枝条 Na^+ 含量分别比 1.2 m 最高 Na^+ 含量 (144.44 mg/g) 下降 3.80%, 14.19%, 25.26%。新生枝条与叶片 Na^+ 含量随潜水埋深变化规律有较大差异, 各潜水埋深下新生枝条与叶片的 Na^+ 含量均差异显著 ($P < 0.05$), 这可能因为新生枝条的泌盐腺较少, 不能满足盐分的大量快速释放, 大量的盐离子进入鳞叶并通过叶片释放^[24-25], 在新生枝条中分泌的盐分更大程度上与根系集中分布层的土壤含盐量相关, 本研究中柽柳根系集中分布层的土壤含盐量呈现先增加后降低的趋势, 与新生枝条 Na^+ 含量的规律一致。

3 结论

随潜水埋深的增加,各土层土壤相对含水量(RWC)总体呈降低趋势,表土层 RWC 呈快速下降,土层间降低幅度有差异,潜水埋深 0.9 m 时各土层 RWC 均最高。随土层深度的增加,潜水埋深为 0.9 m 时,各土层 RWC 先降低后增加,而其它潜水埋深 RWC 逐渐增加。当潜水埋深达 1.2 m 时,表土层 RWC 开始明显降低,地下水能上升且保持土壤表层湿润的最高高度为 1.2 m。

随潜水埋深的增加,各土层土壤含盐量(S_C)和土壤溶液绝对浓度(C_S)均先增加后降低,呈抛物线型,潜水埋深 1.2 m 时两参数均最高。随土层深度的增加,各潜水埋深下 S_C 均先降低后增加,且随潜水埋深的增加,变化幅度减缓,即潜水埋深愈大,潜水蒸发强度愈小,盐分累积速度相应减少。同一潜水埋深下,各土层 C_S 随土层深度的增加而逐渐降低,且潜水埋深越大,土层间 C_S 变化幅度越激烈。

不同潜水埋深下,桉柳叶片含水量高于新生枝条,潜水埋深对桉柳叶片及新生枝条含水量均无显著影响。随潜水埋深的增加,桉柳叶片 Na^+ 含量逐渐增加,而新生枝条 Na^+ 含量先升高后降低。

从整个桉柳土柱来看,潜水埋深可显著影响盐水矿化度下桉柳土柱的水盐参数。随潜水埋深的增加,整个土柱的 RWC 均值逐渐降低,而 S_C 和 C_S 均值先增加后降低,潜水埋深 1.2 m 是盐分变化的分界水位,且随潜水埋深的增加,土壤水盐参数的下降幅度逐渐变小。因此,根据水盐变化规律,建议栽植桉柳幼苗的潜水埋深应大于 1.2 m,栽植深度尽量避开表土层的高含盐量。

参考文献 (References):

- [1] 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: 中国科学院研究生院, 2010.
- [2] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 吕焯, 付小军. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210.
- [3] Jeevarathinam C, Rajasekar S, Sanjuán M A F. Vibrational resonance in groundwater-dependent plant ecosystems. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 33-42.
- [4] Fu B H, Burgher I. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, 2015, 113: 59-68.
- [5] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 温小虎, 高猛. 地下水与植被关系的研究进展. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 36-40, 44-44.
- [6] 罗金明, 王永洁, 邓伟, 叶雅杰, 张晓平. 浅地下水埋深微域尺度苏打盐渍土的积盐机理探讨. 土壤学报, 2010, 47(2): 238-245.
- [7] 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. 农业工程学报, 2007, 23(8): 45-51.
- [8] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应. 水科学进展, 2011, 22(5): 689-695.
- [9] Chaudhuri S, Ale S. Long-term (1930-2010) trends in groundwater levels in Texas: influences of soils, landcover and water use. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 379-390.
- [10] 陈永宝, 胡顺军, 罗毅, 田长彦, 尹传华. 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. 土壤学报, 2014, 51(1): 75-81.
- [11] 魏彬, 海米提·依米提, 王庆峰, 许宁, 李建涛. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤含水量的相关性. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1110-1116.
- [12] Lavers D A, Hannah D M, Bradley C. Connecting large-scale atmospheric circulation, river flow and groundwater levels in a chalk catchment in southern England. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 179-189.
- [13] 安乐生. 黄河三角洲地下水水盐特征及其生态效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [14] 李彬, 史海滨, 闫建文, 李祯, 张建国, 周俊. 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. 水土保持学报, 2014, 28(1): 117-122.
- [15] 亢连强, 齐学斌, 马耀光, 乔冬梅, 李平, 黄仲冬, 樊向阳. 不同地下水埋深条件下再生水灌溉对冬小麦生长的影响. 农业工程学报, 2007, 23(6): 95-100.
- [16] 刘战东, 刘祖贵, 俞建河, 南纪琴, 秦安振, 肖俊夫. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7): 617-624.
- [17] 常春龙, 杨树青, 刘德平, 符鲜, 杜丽云. 河套灌区上游地下水埋深与土壤盐分互作效应研究. 灌溉排水学报, 2014, 33(4/5): 315-319.
- [18] 杨帆, 安丰华, 杨洪涛, 王志春. 松嫩平原苏打盐渍土区不同潜水埋深下羊草的光合特征. 生态学报, 2016, 36(6): 1591-1598.
- [19] 张佩, 袁国富, 庄伟, 薛沙沙. 黑河中游荒漠绿洲过渡带多枝桉柳对地下水位变化的生理生态响应与适应. 生态学报, 2011, 31(22): 6677-6687.
- [20] 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. 农业工程学报, 2015, 31(15): 93-100.
- [21] 张骛, 王振华, 王久龙, 李文昊. 蒸发条件下地下水对土壤水盐分布的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 229-233, 253-253.
- [22] Jordán M M, Navarro-Pedreño J, García-Sánchez E, Mateu J, Juan P. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-Arid conditions: geological and environmental implications. *Environmental Geology*, 2004, 45(4): 448-456.
- [23] 赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 吕卷章, 路峰. 不同生境条件下中国桉柳空间分布点格局分析. 生态科学, 2011, 30(2): 142-149.
- [24] 陈阳, 王贺, 张福锁, 郝金标, 何奕昆. 新疆荒漠盐碱生境桉柳盐分分泌特点及其影响因子. 生态学报, 2010, 30(2): 511-518.
- [25] 潘婷婷. 刚毛桉柳 Na^+ 积累及泌盐功能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011.