DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2020. 04. 014

淤积刺激下滨海湿地植物根系吸水及土壤水分变化

唐洪根,周廷璋,辛 沛

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于 HYDRUS-1D 模型,研究滨海盐沼湿地中泥沙淤积和地下水位对滨海互花米草根系吸水及土壤水分变化的影响。结果表明:地下水位为 0 cm 时,泥沙淤积对土壤含水率沿土壤深度的分布无影响;地下水位为 -14 cm 时,互花米草根系生长的土壤含水率相对略低,受到泥沙淤积的轻微影响;地下水位为 -28 cm 和 -42 cm 时,泥沙淤积促进互花米草根系吸收土壤表层的水分,加快淤积层土壤水分的消耗,进而改善土壤淤积层的通气条件。在泥沙淤积刺激下,互花米草根系主要吸水区域往淤积层方向垂直上移。

关键词:泥沙淤积;地下水位;互花米草;根系吸水;土壤含水率;滨海湿地;盐沼;HYDRUS-1D 模型
中图分类号:TV138 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2020)04 - 0087 - 06

Stimulation of sediment deposition to root water uptake and soil water change in wetland near sea // TANG Honggen, ZHOU Tingzhang, XIN Pei (*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Based on the HYDRUS-1D model, the effects of sediment deposition and groundwater level on root water uptake and soil water change in *Spartina alterniflora* were studied. The results show that the sediment deposition has no effect on the distribution of soil water content along the depth when the groundwater level is 0 cm. When the groundwater level is -14 cm, the soil water content of the root system of the *Spartina alterniflora* is relatively low, and is slightly affected by sediment deposition. When the underground water level is -28 cm and -42 cm, the sediment deposition promotes the *Spartina alterniflora* root system to absorb moisture from the top of the soil, and quickens the consumption of soil water in silting layer, improving aeration condition of soil silting layer. Under the stimulation of sediment deposition, the main water absorbing area of the *Spartina alterniflora* root system moves vertically upward toward the deposition layer.

Key words: sediment deposition; groundwater level; *Spartina alterniflora*; root water uptake; soil water content; wetland near the sea; salt marsh; HYDRUS-1D model

滨海盐沼湿地是重要的陆地-海洋交界带生态系统,具有调节水质、维持物种多样性、促进全球物质循环以及保护海岸线等重要的生态价值[1-3],对地区乃至全球的气候变化、社会经济发展以及人类生存具有不可替代的作用。近年来,由于海平面上升及人类活动的加剧[4-5],盐沼湿地严重退化,全球的盐沼湿地面积已锐减至 20 世纪的 50% 左右[6]。大量研究认为,海平面上升与泥沙淤积的相互平衡是影响滨海湿地可持续发展的重要因素[4,7-10],而植被是控制泥沙淤积进程的关键因素[7]。植被地上部分能改变水流的运动形式,促进水体中悬浮颗粒的沉降[4,11-12],而其地下根系的分解作用能增加地下土壤有机碳的储备,加快盐沼湿地有利高程的形成,进而削弱海平面上升带来的不利影响[7,13-14]。

目前,国内外研究认为植被生长主要与盐沼湿地的地貌特征、盐度、土壤通气条件、淹没时间等密切相关,其中土壤通气条件被认为是影响植被生长的主要因素[5,15-18]。盐沼土壤中,氧气在孔隙水中的扩散速率和浓度较低,植株根系呼吸所需的氧气取决于土壤的通气情况[18-19]。Pezeshki 等[5]发现盐沼植物主要面临氧气持续供需不足的问题,周期性的潮汐淹没导致盐沼部分区域土壤的曝气条件较

基金项目:国家自然科学基金(51579077)

作者简介:唐洪根(1994—),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: 1224013574@qq.com
通信作者:辛沛,教授。E-mail: pei.xin@outlook.com

差,进而植被生长呈现出明显的带状分布[20]。同时,植被的蒸腾作用又会影响土壤中的水分消耗,进而改善植被生长区域的土壤通气条件[20]。Unsino等[15]发现远离潮沟的土壤水分运动主要发生在垂直方向,植物蒸腾作用加快地下水分的消耗,在渗透性较低的土壤中存在持久的非饱和区域。在此基础上,Li等[21]考虑土壤孔隙水-气两相流,发现水流中夹杂的气体会提高土壤中的氧气浓度,最好的曝气区域位于潮沟附近。Xin等[22]指出潮汐作用下潮沟附近区域的土壤通气性较好,植物生长受到地下水分的轻微影响;远离潮沟区域的土壤通气条件主要受到植物根系吸水的影响。植物生长与土壤通气密切相关,其蒸腾作用又反过来加快土壤地下水分的损耗,提高植物根系周围的氧化条件,这种植物生长和土壤通气之间的正反馈机制揭示了盐沼湿地复杂的生态水文过程[19-22]。然而,上述研究均重点关注潮汐作用等水动力过程下植物生长和土壤水分之间的反馈关系,未考虑盐沼湿地普遍存在的泥沙淤积现象,也忽略了泥沙淤积引起的植物生长及土壤水分变化。

互花米草凭借其较强的繁殖能力和耐淹、耐盐的特性[23],已逐渐成为我国盐沼湿地的主要物种之一,其扩张面积已达到546 km^2[24],大约占据我国滨海盐沼湿地面积的一半[25]。因此,本研究以互花米草为研究对象,利用HYDRUS-1D模型建立一维水流运动模型,研究泥沙淤积和地下水位对植物根系吸水及土壤水分运移的影响。

1 数值模型

1.1 模型构建

盐沼湿地中互花米草生长区自然泥沙淤积现象十分明显(图1(a))。基于HYDRUS-1D,建立关于土壤-水-植物的一维垂直水流运移模型,概念模型如图1(b)(c)所示。该模型主要考虑由植物蒸腾作用引起的垂直水流运动而忽略横向水流运动。设置不同深度的泥沙淤积和地下水位,模拟淤积深度为0 cm、6 cm、12 cm、18 cm、24 cm,模拟地下水位为0 cm、−14 cm、−28 cm、−42 cm。淤积试验中土样取自盐城市弶港镇海岸的条子泥沙洲,地理位置范围为北纬32°43′~34°28′、东经119°48′~121°15′。通过土壤粒径分级,测得试验土样由黏粒(5%)、粉粒(78%)和砂粒(17%)组成,属于粉砂质壤土。土壤剖面深度与淤积试验中土壤深度设置一致,即原土壤层深度为42 cm,设定原土壤表面为0 cm,向上淤积部分为正值,向下深度为负值(图1(b)(c))。为方便比较和分析,将忽略植株根系生长的计算模型设置为模型1,将考虑泥沙淤积后植株根系生长的计算模型设置为模型2。模型上边界为大气边界条件,下边界为定水头,初始输入数据分别为定潜在蒸散量、定水头数据、初始水头分布、植株叶面积指数和根密度分布。

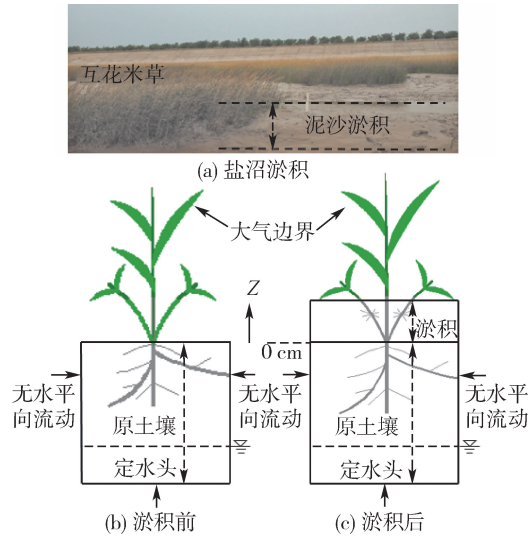

图1 模型示意图

Fig. 1 Model schematic

1.2 模型原理和公式

HYDRUS-1D模型基于一维Richards方程模拟变饱和区域植物根系吸水过程,该方程忽略空气和热梯度对水分运移的影响[26],取向上为正,方程为

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K\left(\frac{\partial h}{\partial z}-1\right)\right]-S(z,t) \tag{1}$$

式中:θ为土壤含水率;h为压力水头,cm;t为时间,d;z为水流运动路径长度,cm;$S(z,t)$为根系吸水项;K为非饱和渗透系数,cm/d。

采用Van Genuchten模型描述土壤含水率、非饱和渗透系数与压力水头的关系:

$$\theta=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m} & h<0\\ \theta_s & h>0\end{cases} \tag{2}$$

$$K=K_sS_e\left[1-(1-S_e^{1/m})^m\right]^2 \tag{3}$$

其中

$$m=1-1/n$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}$$

式中:θ_s为饱和含水率;θ为土壤含水率;θ_r为残余含水率;S_e为相对饱和度;K_s为土壤饱和渗透系数;α、n、m为经验拟合系数,l取0.5。

根系吸水速率$S(z,t)$是指植物根系在单位体积土壤中单位时间内吸收的土壤水分,主要受到水分胁迫、盐分胁迫和根系分布的影响[26-27]。需要注意的是,在本模型中不考虑盐分胁迫,计算公式为

$$S(z,t)=\alpha(h)b(z)T_p \tag{4}$$

式中：T_p为植物潜在蒸腾率；$b(z)$为根系吸水分布函数；$\alpha(h)$为土壤水分胁迫函数。

土壤水分胁迫可采用S形函数[28]描述：

$$\alpha(h) = 1/[1 + (h/h_{50})^p] \quad (5)$$

式中：h_{50}为根系吸水速率减小50%所对应的压力水头，cm；p为经验参数。

植物潜在蒸腾速率T_p定义为理想条件下植物在单位时间内从土壤中吸收的土壤水分，利用叶面积指数和消光系数对潜在蒸散量进行分割[29]：

$$E_s = ET_c e^{-kI_{LAI}} \quad (8)$$

$$T_p = ET_c - E_s \quad (9)$$

式中：ET_c为植物潜在蒸发蒸腾量，cm/d；E_s为土壤潜在蒸发量，cm/d；I_{LAI}为植物叶面积指数；k为消光系数，取为0.39。

1.3 根系分布函数

本文开展不同淤积深度下(0 cm、6 cm、12 cm、18 cm、24 cm)互花米草根系生长的试验，依据Satchithanantham等[30]和李会杰[31]的研究方法，采用植物根干重沿土层深度的分布来描述植物根系的空间分布。根据淤积试验中沿土层深度6 cm间隔的根干重分布，通过插值法计算得到根系沿土层深度的分布$b'(z)$，再标准化得到根系吸水函数$b(z)$。将淤积深度为0 cm的根系分布函数$b_1(z)$输入到忽略根系生长的模型1中，对应淤积深度6～24 cm的根系分布函数$b_2(z)$输入到考虑根系生长的模型2中(图2)：

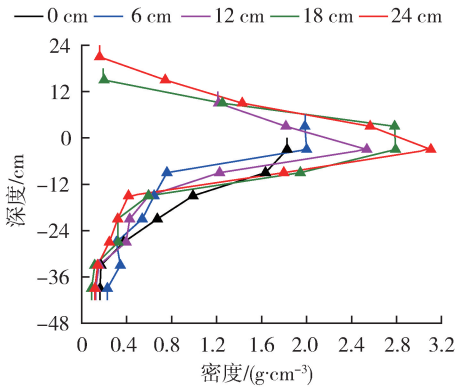

图2 不同淤积深度下根系分布函数

Fig. 2 Distribution function of roots under different deposition depths

$$b(z) = b'(z) \Big/ \int_0^{L_r} b'(z) \quad (10)$$

$$\int_0^{L_r} b(z)\,dz = 1 \quad (11)$$

式中：$b'(z)$为插值得到的根系分布函数；L_r为最大根系深度，cm；z为土壤深度，cm。

1.4 模型建立

a. 边界条件和土壤剖面设置。上边界为大气边界，直接输入恒定潜在蒸散量ET_c=1.0 cm/d和恒定叶面积指数I_{LAI}=4；下边界输入模拟不同地下水位下的定水头，L_1=0 cm、L_2=−14 cm、L_3=−28 cm、L_4=−42 cm。土层剖面深度分别为Z_1=42 cm、Z_2=48 cm、Z_3=54 cm、Z_4=60 cm、Z_5=66 cm，分别对应淤积深度0 cm、6 cm、12 cm、18 cm、24 cm。

b. 参数设置。土壤水力参数采用HYDRUS-1D模型自带的土壤参数(粉砂质壤土)[32-33]，K_s=10.8 cm/d、θ_s=0.45、θ_r=0.067、α=0.02 cm^{-1}、n=1.41、l=0.05，其中淤积层土壤性质与原土壤相同，两者土壤参数设置一致。由于本文主要研究不同淤积深度和地下水位对植物根系吸水和土壤水分的影响，而目前关于互花米草植株受到土壤水分胁迫的参数还未得到明显的量化，根据Grinevskii[33]和Hessini等[34]的研究成果，最终确定水分胁迫参数h_{50}=−2 000 cm、p=3。如图2所示，模型1所有计算模型均输入淤积深度0 cm的根系分布函数$b_1(z)$，模型2中输入随淤积深度变化的根系分布函数$b_2(z)$。

c. 本文涉及过程为一维垂直水流稳态运动，稳态模拟结果不受初始条件影响。

2 结果与讨论

2.1 浅水位下泥沙淤积对土壤水分的影响

土壤深度0 cm以上为土壤淤积层，0 cm以下为原土壤层。试验发现泥沙淤积对互花米草地上生物量未产生较为明显的影响，地上生物量变化范围为5.0～7.5 g/株。为简化模型设计，不考虑植物地上生物量的变化可能引起的土壤蓄水量的变化，且假定植物叶面积指数为定值，因此认为土柱中土壤含水率的差异完全是由植物蒸腾作用所引起的。当地下水位为0 cm时，泥沙淤积对土壤含水率沿深度的分布没有明显的影响。如图3(a)所示，不同淤积深度下的土壤饱和度之间没有明显差异，均保持在0.9～1.0范围内。当淤积深度不超过18 cm时，模型1和模型2的土壤饱和度在土层垂直方向的分布大小和趋势完全一致。当模拟淤积深度为24 cm时，模型2中的淤积表层土壤饱和度略低于模型1，但随着土层深度的增加，两者之间没有明显的区别。模拟结果表明，地下水位为0 cm时，土壤毛细作用较强，植物蒸腾作用引起的水分消耗低于地下水分的补给，土壤水分几乎不受泥沙淤积的影响。

如图3(b)所示，给定地下水位−14 cm后，发现土壤含水率的差异主要集中在淤积深度为12 cm、18 cm和24 cm的淤积层土壤中，其他两组(0 cm、6 cm)之间未有明显的区别。以淤积深度24 cm为例，模型2中的土壤饱和度在淤积层区域相对较低，

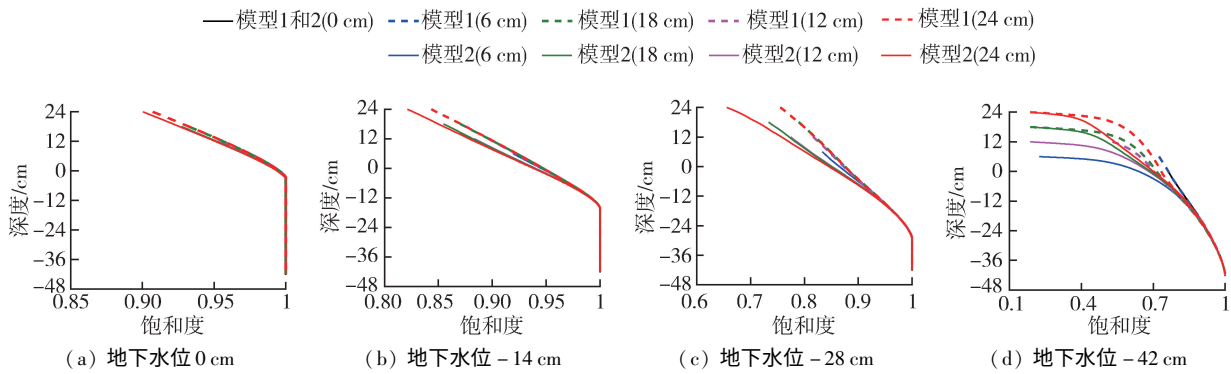

图 3　不同地下水位和不同淤积深度下土壤饱和度随土壤深度变化

Fig. 3　Variation of soil saturation with soil depth under different groundwater levels and different silting depths

且在土壤表层处差异最明显，差异程度随土层深度的增加而逐渐减小，而后在原土壤层区域无差异。当淤积深度较低时，模型 1 和模型 2 的计算结果一致，土壤饱和度随土层深度增加而变化不大，均保持在 0.9 ~ 1.0。由模型结果可知，当淤积深度较高时，地下水分补给的能力相对较低，淤积层内植物根系吸水作用加快土壤表层水分的消耗，进而引起土壤饱和度减小。但随着土壤深度的增加，根系吸水能力降低，且土壤的毛细作用增强，模型 1 和模型 2 中的土壤处于饱和状态。

2.2　深水位下泥沙淤积对土壤水分的影响

当模拟地下水位为 −28 cm 时，模型 1 和模型 2 的土壤饱和度差异集中在淤积层土壤中，而原土壤层的含水率差异不大（图 3(c)所示）。随着淤积深度的增加，淤积层土壤水分含量的差异更加明显，即在淤积深度 24 cm 表层土壤饱和度相差最大，模型 2 的土壤饱和度减小了 0.1。当淤积深度为 6 cm 时，模型 2 中土壤饱和度略低于模型 1；当淤积深度达到 24 cm，模型 2 中淤积层土壤水分含量明显低于模型 1，且差异程度随着土壤深度的增加而逐渐减小。与模型 1 相比，模型 2 考虑了植物根系在土壤淤积层的吸水作用，加快土壤表层的水分消耗，进而减小淤积层土壤饱和度。

如图 3(d)所示，模拟地下水位 −42 cm 时，泥沙淤积后土壤含水率明显减小，且变化区域集中在土壤淤积层。当淤积深度为 6 cm 或 12 cm 时，模型 2 中的土壤饱和度沿土壤深度 0 ~ 6 cm 内变化较快，大约增加了 0.4，随后增加趋势比较平缓，而模型 1 中土壤饱和度沿土壤深度均匀增加。与模型 1 相比，模型 2 中的土壤饱和度明显降低，且最大差值发生在淤积深度为 6 cm 的土壤表层，减小了 0.5。当模拟淤积深度为 18 cm 或 24 cm 时，模型 1 与模型 2 之间的土壤饱和度差值沿土层深度先增大后减小，且在土壤表面以下 6 ~ 12 cm 区域内达到最大。当地下水位为 −42 cm 时，淤积深度 18 cm 或 24 cm 土壤表层水分无法得到地下水分的补给，表层水分含水量均降低至土壤残余含水率。随着土壤深度的增加，土壤毛细作用增强，向上补给的水分逐渐增多，不同的根系吸水分布是造成土壤水分含量差异的主要原因。在原土壤区域，地下水分向上补给能力较强，所以模型 1 和模型 2 中土壤饱和度差别不大。

已有研究认为，泥沙淤积主要是通过增加地形高程来减少海水的持续淹没时间，进而改善土壤表层的通气条件，为植被生长创造有利的条件[17]。本文模型研究发现，泥沙淤积后植株根系在土壤淤积层的吸水作用能够加快土壤表层的水分消耗，增加土壤表层的曝气时间，进而改善植物生长所需的通气条件；同时，较好的通气条件又能保证植物根系的有氧呼吸，促进植物的生长，模拟结果较好地补充解释了泥沙淤积后植被生长和土壤通气条件之间的正反馈关系。

2.3　泥沙淤积和地下水位对植物根系吸水分布的影响

如图 4 所示，模型 2 中植物根系沿土壤剖面的吸水分布主要受到泥沙淤积的影响，模型 1 植物根系吸水分布与泥沙淤积深度及地下水位均无明显关系。以地下水位 0 cm 为例，模型 1 不考虑植物根系生长，根系吸水区域主要分布在土壤表层 0 ~ 18 cm 内，吸水能力随着土壤深度的增加而逐渐减小，且不随淤积深度变化而变化（图 4(a)），主要与植物的根系分布有关（图 2）。模型 2 考虑了泥沙淤积后植物的根系生长，模拟不同深度的泥沙淤积后植物根系吸水分布变化明显。当淤积深度为 6 cm 时，模型 2 中植物根系的主要吸水区域分布在土壤深度 −6 ~ 12 cm 内，吸水速率随着土壤深度的增加而逐渐减小，如图 4(a)。当淤积深度超过 6 cm，模型 2 中植物根系吸水能力随土层深度呈现出先增加后减小的趋势，最大值出现在土壤深度 −6 ~ 6 cm 范围内。如图 4(b) ~ (c)，设置模拟地下水位为 −14 cm 和 −28 cm，发现模型 1 和模型 2 的植物根系吸水分

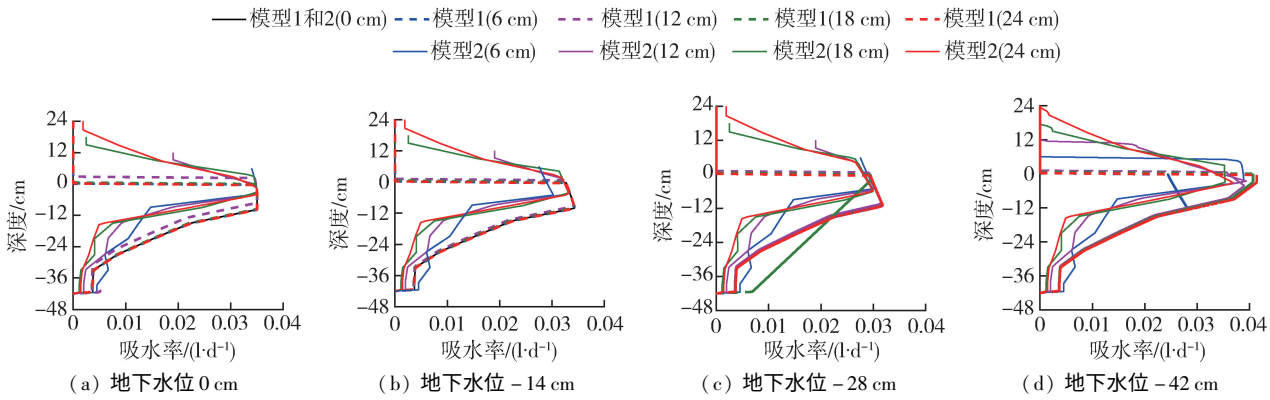

图 4　不同地下水位下及不同淤积深度下根系吸水分布

Fig. 4　Distribution of root water uptake under different groundwater level and deposition depth

布趋势与地下水位为 0 cm 的结果类似，呈现出相同的变化趋势。当地下水位为 −42 cm 时，除去土壤表层水分含量太低（图 3(d)），植物在土壤表层吸水速率为 0，其他根系吸水分布趋势无明显变化。

与模型 1 相比，模型 2 结合植物根系在淤积层的向上生长，植物吸水区域包含淤积层和原土壤层，主要吸水区域向上迁移了 6 ~ 12 cm，加快消耗土壤表层的水分，但在原土壤层根系吸水能力降低，这与之前得到泥沙淤积促进土壤表层的水分消耗的结果一致。泥沙淤积刺激植物的根系生长，提高根系主要吸水区域的土壤深度，进而加快土壤表层水与地表水之间的水分循环，改善土壤表层中的营养条件，有利于盐沼植物的生长和繁殖，此模拟结果从生态水文方面补充解释了泥沙淤积可减缓湿地退化的现象[7,10]。

3　结　论

a. 当地下水位较高（0 cm 和 −14 cm）时，不同淤积深度下的土壤饱和度变化趋势不大。当地下水位为 0 cm 时，土壤饱和度保持在 0.95 ~ 1.0 范围内，泥沙淤积对土壤饱和度没有影响。当地下水位为 −14 cm 时，淤积深度较高（18 cm 和 24 cm）的淤积层土壤中，考虑根系生长后得到的土壤饱和度相对略低，土壤饱和度受到泥沙淤积的轻微影响。

b. 当地下水位较低（−28 cm 和 −42 cm）时，泥沙淤积通过影响植物根系生长，进而引起土壤饱和度在淤积层区域的差异。与不考虑根系生长的模型 1 结果相比，模型 2 中土壤饱和度明显较低，且差异程度随着土层深度的增加而逐渐减小，而后在原土壤层差异消失。

c. 植物根系吸水分布主要受到泥沙淤积的影响。泥沙淤积能改变植物的根系吸水区域，即包含土壤淤积层和原土壤层，进而促进土壤淤积层水分的消耗。

参考文献：

[1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[2] ZEDLER J B, KERCHER S. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2005, 30: 39-74.

[3] 季晓翠，王建群，傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护，2019，35(2)：78-83. (JI Xiaocui, WANG Jianqun, FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 78-83. (in Chinese))

[4] MORRIS J T, SUNDARESHWAR P, NIETCH C T, et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level [J]. Ecology, 2002, 83(10): 2869-2877.

[5] PEZESHKI S. Wetland plant responses to soil flooding [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 46(3): 299-312.

[6] DONNELLY J P, BERTNESS M D. Rapid shoreward encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98(25): 14218-14223.

[7] KIRWAN M L, MEGONIGAL J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise [J]. Nature, 2013, 504: 53-60.

[8] MUDD S M, HOWELL S M, MORRIS J T. Impact of dynamic feedbacks between sedimentation, sea-level rise, and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82(3): 377-389.

[9] KIRWAN M L, GUNTENSPERGEN G R. Response of plant productivity to experimental flooding in a stable and a submerging marsh [J]. Ecosystems, 2015, 18(5): 903-913.

[10] BAUSTIAN J J, MENDELSSOHN I A. Hurricane-induced

sedimentation improves marsh resilience and vegetation vigor under high rates of relative sea level rise[J]. Wetlands,2015,35(4):795-802.

[11] STAGG C L,MENDELSSOHN I A. Controls on resilience and stability in a sediment-subsidized salt marsh[J]. Ecological Applications,2011,21(5):1731-1744.

[12] NEPF H M. Flow and transport in regions with aquatic vegetation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2011,44(1):123-142.

[13] BLUM L K. Spartina alterniflora root dynamics in a Virginia marsh[J]. Marine Ecology-Progress Series,1993,102(1):169-178.

[14] BLUM L K,CHRISTIAN R R. Belowground production and decomposition along a tidal gradient in a Virginia salt marsh[J]. The Ecogeomorphology of Tidal Marshes,2004,59(4):47-73.

[15] URSINO N,SILVESTRI S,MARANI M. Subsurface flow and vegetation patterns in tidal environments[J]. Water Resources Research,2004,40(5):191-201.

[16] SNEDDEN G A,CRETINI K,PATTON B. Inundation and salinity impacts to above-and belowground productivity in *Spartina patens* and *Spartina alterniflora* in the Mississippi River deltaic plain:implications for using river diversions as restoration tools[J]. Ecological Engineering,2015,81:133-139.

[17] HOWES B L,DACEY J W H,GOEHRINGER D D. Factors controlling the growth form of Spartina alterniflora:feedbacks between above-ground production,sediment oxidation,nitrogen and salinity[J]. Journal of Ecology,1986,74(3):881-898.

[18] 张权,杨柳燕,高燕,等. 湿生植物根系泌氧能力与其结构相关性研究[J]. 水资源保护,2016,30(4):117-121.(ZHANG Quan,YANG Liuyan,GAO Yan,et al. Oxygen release abilities of wetland plants' roots and relation with root structures[J]. Water Resources Protection,2016,30(4):117-121.(in Chinese))

[19] DACEY J W,HOWES B L. Water uptake by roots controls water table movement and sediment oxidation in short Spartina marsh[J]. Science,1984,224(4648):487-499.

[20] PEZESHKI S,DELAUNE R. Soil oxidation-reduction in wetlands and its impact on plant functioning[J]. Biology,2012,1(2):196-221.

[21] LI Hailong,LI Ling,LOCKINGTON D. Aeration for plant root respiration in a tidal marsh[J]. Water Resources Research,2005,41(6):1397-1408.

[22] XIN Pei,KONG Jun,LI Ling,et al. Modelling of groundwater-vegetation interactions in a tidal marsh[J]. Advances in Water Resources,2013,57:52-68.

[23] WANG Qing,AN Shuqing,MA Zhijun,et al. Invasive *Spartina alterniflora*:biology,ecology and management[J]. Journal of Systematics and Evolution,2006,44(5):559-588.

[24] LIU Mingyue,MAO Dehua,WANG Zongming,et al. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of Mainland China:new observations from Landsat OLI images[J]. Remote Sensing,2018,10(12):1933-1951.

[25] GU Jiali,LUO Min,ZHANG Xiujuan,et al. Losses of salt marsh in China:trends,threats and management[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2018,215(15):98-109.

[26] ŠIMŮNEK J,ŠEJNA M,SAITO H,et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water,heat,and multiple solutes in variably saturated media[M]. Riverside:Department of Enviromental Sciences University of California Riverside,2013.

[27] FEDDES R A,BRESLER E,NEUMAN S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems[J]. Water Resources Research,1974,10(6):1199-1206.

[28] 华祖林,钱蔚,顾莉. 改进型 LM-BP 神经网络在水质评价中的应用[J]. 水资源保护,2008,24(4):22-25.(HUA Zulin,QIAN Wei,GU Li. Application of improved LM-BP neural network in water quality evaluation[J]. Water Resources Protection,2008,24(4):22-25.(in Chinese))

[29] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[J]. Food and Agriculture Organization,Rome,1998,300(9):20-36.

[30] SATCHITHANANTHAM S,KRAHN V,RANJAN R S,et al. Shallow groundwater uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone[J]. Agricultural Water Management,2014,132:101-110.

[31] 李会杰. 旱区河滩湿地水盐运移与根系吸水的模型模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.

[32] CARSEL R F,PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. Water Resources Research,1988,24(5):755-769.

[33] GRINEVSKII S O. Modeling root water uptake when calculating unsaturated flow in the vadose zone and groundwater recharge[J]. Moscow University Geology Bulletin,2011,66(3):189-201.

[34] HESSINI K,MARTíNEZ J P,GANDOUR M,et al. Effect of water stress on growth,osmotic adjustment,cell wall elasticity and water-use efficiency in Spartina alterniflora[J]. Environmental and Experimental Botany,2009,67(2):312-319.

(收稿日期:2019-10-08　编辑:彭桃英)