

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.023

螃蟹扰动作用对滨海湿地水盐交换的影响

应征涛¹, 詹泸成¹, 唐洪根¹, 辛沛^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为探究生物扰动作用对滨海湿地物质交换的影响,以螃蟹为研究对象进行室内控制试验,模拟了潮汐条件下不同螃蟹密度时沉积物地貌变化和水盐运移情况。结果表明:螃蟹能够将大量地下沉积物搬运至地表,形成起伏多变的微地形,使沉积物表面积明显增大;螃蟹活动能促进地表水与地下水交换,加快浅层土壤的盐分运移过程;地表水与地下水交换量和盐分运移量均随螃蟹密度的增大而明显增大。生物扰动作用是造成沉积物地貌改变的重要因素,进而促进了滨海湿地的水盐交换。

关键词:滨海湿地;生物扰动;螃蟹;沉积物;水盐运移

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0152-06

Effects of crab disturbance on water and salt exchange in coastal wetlands // YING Zhengtao¹, ZHAN Lucheng¹, TANG Honggen¹, XIN Pei^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the effects of bioturbation on material exchange in coastal wetlands, a controlled laboratory experiment that made crabs as research object was conducted to study the effects of different crab densities on sediment geomorphology changes and water and salt transport under simulated tidal conditions. The results showed that crabs carried a large number of deep sediments to the surface, forming a rugged microtopography, which resulted in a significant increase of sediment surface area. Crab activities not only effectively promoted the exchange of surface water and groundwater but also accelerated salt migration process of shallow soil. The amount of surface water and groundwater exchange and salt transport increased significantly with the density of crabs. Therefore, it could be concluded that bioturbation is an important factor affecting sediment geomorphology, which greatly accelerates water and salt exchange in coastal wetlands.

Key words: coastal wetlands; bioturbation; crab; sediment; water and salt transport

滨海湿地(红树林、盐沼、海草床)处于陆地和海洋生态系统的过渡地带,被誉为“地球之肾”,其重要性体现在显著的固碳作用、抵御风暴潮、养分循环以及提供生物栖息地等方面^[1-3]。螃蟹作为主要的大型底栖动物在湿地随处可见,它们在能量流动和物质循环中起着承上启下的重要作用,影响着湿地生态系统的健康,被称为“生态系统工程师”^[4]。

当前,关于生物扰动特别是螃蟹扰动的研究主要集中在营养盐和沉积物相关的野外试验上。Lohrer等^[5]指出生物扰动对沉积物-水界面营养盐交换通量具有重要影响;Dietrich等^[6]强调了生物扰

动影响着沉积物的侵蚀搬运及形成,使得小规模生物扰动可以改变大尺度的沉积物结构;王汗等^[7]通过对不同时段摇蚊幼虫扰动下沉积物的测定,探讨了生物扰动下沉积物-水界面含水率和烧失量的变化规律以及粒径垂向分布规律。螃蟹扰动不仅会影响湿地的碳、氮循环并加速有机物的降解^[8],改变沉积物的组成与物理性质^[9],还会引起地表水与地下水交换量^[10-11]、通气条件^[12]等的变化,其中,地表水和地下水之间的水量交换是湿地生态系统物质迁移转化的重要驱动力^[13]。螃蟹通常将洞穴挖掘至地下含水层,从而形成局部水循环,可促进地下水

基金项目:国家自然科学基金(51579077)

作者简介:应征涛(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: zhengtaoying@hhu.edu.cn

通信作者:辛沛(1980—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: pei.xin@outlook.com

的流动和化学物质的循环^[14]。

水盐运移是滨海湿地生态系统的重要过程^[15],然而目前考虑生物扰动作用的滨海湿地水盐运移研究相对较少,而由于海潮驱动的地下水流和盐分运移情况异常复杂,已有的相关研究大都以数值模拟为主^[16-17]。Morris^[18]建立了一个水盐平衡模型成功模拟了潮间带沉积物的孔隙水盐度变化;Zhou等^[19]明确了螃蟹洞形成的大孔隙是地下水在蒸发过程中向周围土壤补给的优先路径;Xin等^[12]采用三维模型研究发现螃蟹孔洞的存在增加了潮汐驱动下潮间带的水交换量,改善了土壤通气条件,提高了物质交换的速率;Xiao等^[20]对比了等效连续模型和优先流模型,进一步证明螃蟹孔洞对水盐运移的增强作用,并发现其影响程度从潮沟岸坡到盐沼内部逐渐减小。尽管这些研究揭示了螃蟹对湿地水盐交换的重要性,但都基于数值模拟,通过可控物理试验的研究较少。

本文通过室内水槽控制试验模拟研究潮间带不同密度的螃蟹扰动对沉积物地形和水盐交换量的影响,将生物扰动和地表水与地下水交换、物质交换联系起来,以期为更好地认识盐沼湿地的生态运作方式和科学保护滨海湿地生态系统提供参考。

1 研究方法

1.1 试验设计

试验在模拟潮汐涨落的条件下,通过对比有无螃蟹和控制不同螃蟹密度来探究生物扰动对物质交换的影响。如图1所示,装置主要由试验槽、循环水箱、连通管、升降装置和支架组成。试验槽和循环水箱均由1 cm厚的有机玻璃制作,尺寸分别为80 cm×80 cm×60 cm和100 cm×60 cm×60 cm,中间由垂直的有机玻璃隔为相同容积的两部分,用于对比有螃蟹和无螃蟹的情况。试验槽和循环水箱之间用两根直径2 cm的PVC软管相连,形成连通器保证二者水位一致。利用升降装置控制循环水箱的高

度,模拟试验槽内的淹没和出露过程。另外,试验槽内靠循环水箱一侧距离边壁10 cm处设置了孔径16 mm的筛板,并粘贴0.5 cm厚度的土工布以防止试验中土颗粒流出。

试验所用的土壤取自江苏盐城东台条子泥围垦区外的滩涂湿地(32°50'N,120°58'E),经测定土壤由黏粒(4%)、粉粒(76%)、砂粒(20%)组成,属于粉砂质壤土,晒干后分层填入试验槽至0.4 m厚。试验所用螃蟹为相手蟹(*Sesarma*),是该地区主要的大型底栖动物。为减少螃蟹个体差异的影响,试验选取的螃蟹公母数量一致,尺寸相差不大(壳宽2.8 cm±0.2 cm)。模拟野外半日潮对试验槽进行周期性淹没,潮汐振幅为30 cm,高潮时土体上覆水深10 cm,高水位维持1 h,低水位维持10 h。每个周期用YSI Pro Plus多参数水质分析仪(精度±1.0%)分别在涨落前后共4个时刻测量水体盐度,每个区域均测量5次。另外,在土壤深度10 cm和20 cm处埋设了TDR-315L土壤水分、温度、电导率传感器(精度±1.0%),并在各水体中放置Solinst 3001 Levellogger Edge水位计(精度±0.05%),两者采样间隔均为5 min。共进行两组试验,依据取样地25~45只/m²的螃蟹密度,分别对比了无螃蟹和螃蟹数量为6只、12只的情况。每组试验历时15 d,共模拟30次潮汐变化。

1.2 计算方法

单个试验槽包含150 kg带有盐分的干土和150 L去离子水,参照NY/T 1121.16—2006《土壤检测第16部分:土壤水溶盐总量的测定方法》取样测得土壤平均盐度,由此计算出土壤总盐分为545.5 g。将土壤作为黑箱处理,通过系统物质守恒,可以求得土体水盐变化^[17]。以一次淹没周期为例,根据水位计读数,记录初始试验槽水位为 h_{s1} ,循环水箱水位为 h_{t1} ;升至最高水位淹没状态时,水位分别记为 h_{s2} 和 h_{t2} ,下降至最低水位后记为 h_{s3} 和 h_{t3} ,至下次水位上升前记为 h_{s4} 和 h_{t4} 。另外,试验槽土层高度 $h_0=0.4$ m,土层底面积 $S_s=0.28$ m²,试验槽筛板外水体底面积 $S_w=0.04$ m²,循环水箱底面积 $S_t=0.3$ m²。各指标计算方法如下:

a. 沉积物表面积。沉积物表面积分为地上和地下部分。试验结束后用激光测距仪(精度±1 mm)等距(1 cm)测量地形数据,然后采用ArcGIS 10.5将地形数据生成DEM,得到沉积物地上部分表面积。地下部分采用灌注树脂的方法得到洞穴铸件并通过锡箔包裹法测得各洞穴表面积。

b. 沉积物搬运量和搬运速率。沉积物搬运量利用ArcGIS 10.5中的填挖方分析工具求得,搬运



图1 试验装置

Fig. 1 Experimental devices

速率为单位面积每天的搬运量,按下式计算:

$$\varepsilon = \frac{V}{S_s t} \quad (1)$$

式中: ε 为沉积物搬运速率, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; V 为总搬运量, m^3 ; t 为试验时间,取 $t = 15 \text{ d}$ 。

c. 潮汐水入渗量。通过试验槽增加的水量(循环水箱减少的水量)减去试验槽土体外部的水量求得,按下式计算:

$$Q_{tr} = Q_{in} - S_s(h_{s2} - h_0) - S_w(h_{s2} - h_{s1}) \quad (2)$$

其中 $Q_{in} = S_t(h_{t1} - h_{t2})$

式中: Q_{tr} 为潮汐水入渗量, m^3 ; Q_{in} 为循环水箱中减少的水量, m^3 。

d. 孔隙水排泄量。由两部分组成,一部分是水位下降时的排泄,由循环水箱增加的水量减去试验槽土体外部的水量求得。另一部分则是保持最低水位时(即稳定时段)的排泄量,按下式计算:

$$Q_{pwl} = Q_{out} - S_s(h_{s2} - h_0) - S_w(h_{s2} - h_{s3}) + \Delta Q \quad (3)$$

其中 $Q_{out} = S_t(h_{t3} - h_{t2})$

$$\Delta Q = S_w(h_{s4} - h_{s3}) + S_t(h_{t4} - h_{t3})$$

式中: Q_{pwl} 为孔隙水排泄量, m^3 ; Q_{out} 为循环水箱中增加的水量, m^3 ; ΔQ 为稳定时段的排泄量, m^3 。

e. 盐排泄量。淹没过后土体外水中盐分的总量按下式计算:

$$m_{salt} = m_s \overline{C_s} + m_l \overline{C_l} \quad (4)$$

其中 $m_s = 1000S_w h_{s3}$ $m_l = 1000S_t h_{t3}$

式中: m_{salt} 为盐排泄量, g ; m_s 、 m_l 分别为最低水位时试验槽土体外和循环水箱中的水体质量, kg ; $\overline{C_s}$ 、 $\overline{C_l}$ 为对应区域的平均盐度, 10^{-3} 。

1.3 数据处理

采用 Matlab 2017 绘图,选用 SPSS 19 统计软件中的单因素方差分析判断不同螃蟹密度下孔隙水排泄量、盐排泄量的显著性差异, $P < 0.01$ 为极显著, $0.01 \leq P < 0.05$ 为显著。

2 试验结果与分析

2.1 螃蟹扰动对沉积物地貌的影响

图 2 为试验槽的地貌变化及洞穴形态,由图 2 (a)(c)可以明显看出螃蟹活动对表层沉积物地貌的显著影响,使沉积物表层表现出凹凸不平的地形特征。螃蟹的筑穴行为能使深层沉积物向表层输出(图 2(b)),6 只和 12 只螃蟹时沉积物搬运速率分别达到了 $1145 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1438 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。通过测量地上地形变化量与地下洞穴形态(图 2 (d)),发现扰动作用下沉积物表面积从初始的

2800 cm^2 分别增加到了 7298 cm^2 和 8461 cm^2 。虽然最大增幅达到 202%,但是 12 只螃蟹时的表面积仅比 6 只螃蟹时的表面积增加了 16%,这是因为存在多个螃蟹共用洞穴的现象。与此同时,螃蟹扰动造成的沉积物搬运量也分别达到 4810 cm^3 和 6041 cm^3 ,分别占表层 10 cm 厚沉积物总量的 18% 和 21.6%(表 1)。

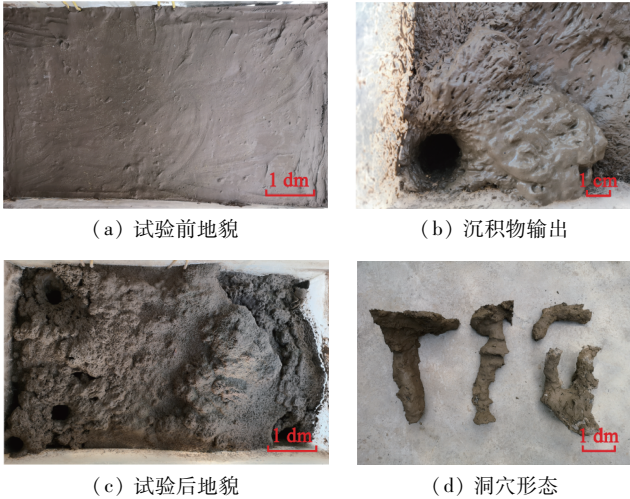


图 2 地貌变化及洞穴形态

Fig. 2 Landform change and morphology of burrows

表 1 螃蟹扰动对沉积物地形的影响

Table 1 Effects of crab disturbance on sediment topography

螃蟹数量/只	沉积物表面积/ cm^2	沉积物搬运量/ cm^3
0	2800	0
6	7298	4810
12	8461	6041

2.2 螃蟹扰动对水盐交换量的影响

为分析螃蟹扰动对水盐运移的影响,将有螃蟹(12 只)和无螃蟹的情况进行了对照试验,试验过程中的水量与盐分变化见图 3 和图 4。由每次潮汐作用下进入土体的水量(图 3(a))可以看出其入渗量总体保持稳定,但有螃蟹时的入渗量明显大于无螃蟹时。无螃蟹时的平均入渗量为 $(2.01 \pm 0.44) \text{ L}$,而有螃蟹时达到了 $(3.58 \pm 0.33) \text{ L}$,增加了 78.1%。孔隙水排泄量也表现为有螃蟹时大于无螃蟹时(图 3(b)),无螃蟹和有螃蟹的孔隙水平均排泄量分别为 $(1.93 \pm 0.42) \text{ L}$ 和 $(3.19 \pm 0.59) \text{ L}$ 。排泄量普遍小于入渗量,水量损失可能是由蒸发导致。由此可见,螃蟹的存在明显增加了系统与外界的水量交换。如图 4(a)所示,土壤初始总盐分相同,其变化趋势均为先下降后趋于稳定。土壤总盐分从 545.5 g 分别减小至 328.1 g (有螃蟹)和 375.0 g (无螃蟹),最大时两者相差 53.1 g ,差异量达到了 9.73%。图 4(b)为不同深度土壤盐度随时间的变化趋势,可以看出无论有无螃蟹的影响,20 cm 深度

处的土壤盐度均基本保持不变,这是因为水位变化最低只到土壤 20 cm 深度处,使得该深度附近的水量和物质交换较弱。而深度 10 cm 处土壤盐度变化幅度较大,均表现出先平稳后加速下降最后趋于稳定的变化规律。对比两者盐度开始下降的时刻,无螃蟹时该拐点出现在试验开始后 125 h 左右,而有螃蟹影响时为试验开始后约 70 h,时间缩短了近一半,盐度的变化明显提前,螃蟹扰动促进了表层土壤盐分的排出。

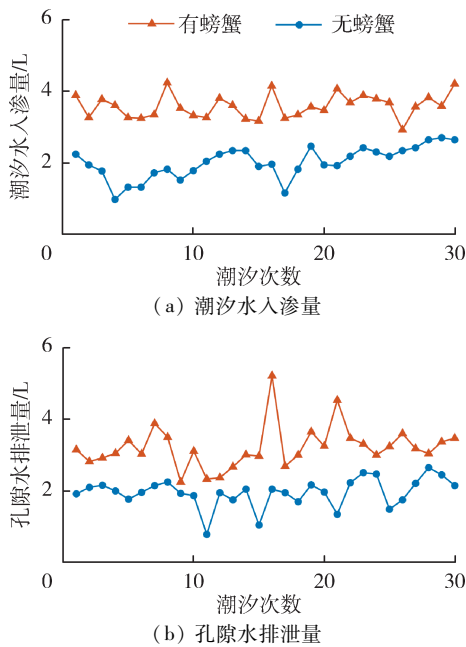


图3 螃蟹扰动对水量交换的影响

Fig. 3 Effects of crab disturbance on water exchange

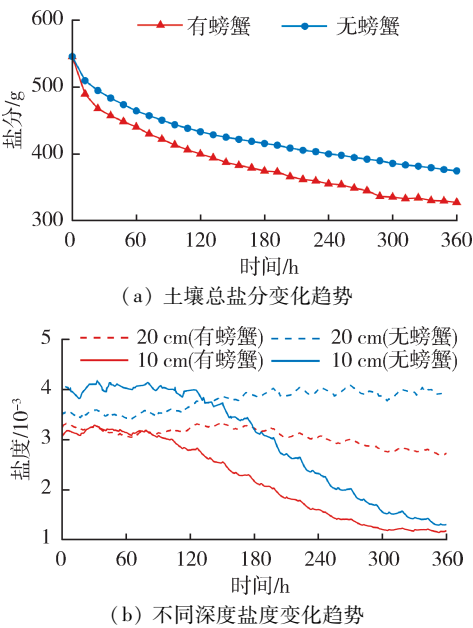


图4 螃蟹扰动对盐分变化的影响

Fig. 4 Effects of crab disturbance on salt changes

2.3 不同螃蟹密度对水盐运移的影响

为了探究不同螃蟹密度对水盐运移的影响,对

无螃蟹和螃蟹数量为 6 只和 12 只的情况进行对比分析。从图 5 可以看出螃蟹扰动均明显增加了孔隙水排泄量,6 只和 12 只螃蟹时的平均排泄量分别为 2.92 L 和 3.17 L,螃蟹数量的变化对排泄量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。在无螃蟹的对照组中,孔隙水排泄量主要集中在稳定时段(即水位保持最低时),占总量的 72.9%,而水位下降时排泄量相对较小。但有螃蟹的试验组与对照组相反,孔隙水主要在水位下降时排泄,6 只和 12 只螃蟹时的排泄量分别占总量的 56.6% 和 59.1%。另外,螃蟹数量变化并不影响稳定时段的孔隙水排泄量,可见螃蟹扰动引起的孔隙水排泄量增加主要发生在水位下降时段,这是因为相比于水位下降时的快速排泄,稳定时段的水力梯度相差不大。

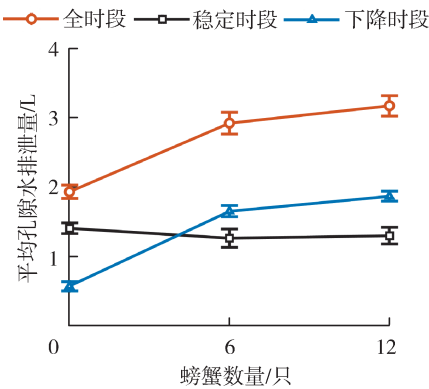


图5 不同螃蟹数量时的孔隙水排泄量

Fig. 5 Pore water excretion on different crab numbers

平均入渗量和盐排泄速率结果见表 2,可以发现不同螃蟹密度时的入渗量均显著增加,但 6 只到 12 只螃蟹时的增加量比无螃蟹到 6 只螃蟹时的增加量有所减少。而平均盐排泄速率分别为 19.77 g/(m·d)、26.76 g/(m·d) 和 29.74 g/(m·d),生物扰动作用提高了盐排泄速率,不同螃蟹数量之间的排泄量有明显差异。单因素方差分析结果显示,螃蟹密度对盐排泄速率影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表2 螃蟹密度对水盐交换的影响

Table 2 Effects of crab numbers on water and salt exchange		
螃蟹数量/只	平均入渗量/L	盐排泄速率/(g·m ⁻¹ ·d ⁻¹)
0	2.01 ± 0.08	19.77 ± 1.12
6	3.16 ± 0.11	26.76 ± 1.66
12	3.58 ± 0.09	29.74 ± 2.83

3 讨论

试验过程中的螃蟹洞穴主要集中在试验槽壁周围和靠近水箱的区域,这是由螃蟹生物特性和沉积物性质所决定的。一方面,螃蟹喜欢在坚硬的结构

附近筑穴,因为这些结构可以提供有效的支撑^[21];另一方面,更湿润的沉积物有利于蟹类进行最初和持续的觅食,因此含水率是决定螃蟹定居的重要因素^[14]。螃蟹的扰动作用直接影响了沉积物地貌,使得沉积物表层表现出凹凸不平的地形特征。扰动后的凹凸地形高程差均超过 5 cm,该结果也进一步验证了蟹类活动是造成滨海湿地潮间带微地形起伏多变的重要因素^[22]。需要说明的是,洞穴形态和地形测量是在试验结束后进行的,事实上在试验期间螃蟹会不断修缮或重新筑穴,所以实际扰动量及其对地貌的影响会更大。Iribarne 等^[23]的野外试验表明,螃蟹对沉积物搬运周转速率可高达 $5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,两年不到时间就可以将研究区湿地所有沉积物扰动一遍。螃蟹通过筑穴、觅食等活动,大大增加了沉积物与水的接触面,促进了孔隙水与上覆地表水之间的交换,这有利于沉积物中盐分的扩散和运移。

螃蟹扰动作用促进了地表水与地下水之间的水量交换,这与 Xin 等^[12]的数值模拟结果相符。螃蟹筑穴形成的孔洞不仅增加了每次淹没时入渗到土体内的水量,而且作为优先通道能使水快速进入沉积物深处,使沉积物的干湿变化更快^[24]。这使得孔洞周围沉积物由非饱和变为饱和状态的时间大大缩短,深层孔隙水压力随之增大,从而减小了表层和深层土的水力梯度,对表层渗透起抑制作用^[25]。当水位下降时,孔隙水在沉积物中通过平流向外排泄,在水土交界面附近形成的孔洞减小了渗流路径,进而加速这一过程。因此,生物扰动在较大程度上促进了地表水与地下水的交换,其在湿地水动力和物质运输过程中的作用不可忽略。

螃蟹密度是影响水盐运移的主要因子,孔隙水排泄量与盐排泄速率均随着螃蟹密度的增加而增大。野外盐沼湿地土壤通常呈现分层现象,渗透系数较小的粉质黏土沉积于粉质砂层之上^[9]。尽管上部沉积物的低渗透性阻碍了土壤盐分向外扩散,但是生物扰动有效增大了溶质的交换速率。一方面,土壤接近饱和时,螃蟹孔洞主导着水流,使土壤整体渗透性提高^[26];另一方面,在高潮淹没时螃蟹活动对水体的搅动,也加速了溶质在孔隙与上覆水之间的交换^[27]。另外,试验中螃蟹数量设置为 6 只和 12 只,分别对应条子泥湿地取样区螃蟹的平均密度和较大的密度。研究发现自然条件下,尤其是红树林湿地地区,螃蟹密度会存在大于 $100 \text{ 只}/\text{m}^2$ 的极端情况^[28],然而极高的密度可能会导致湿地生态系统健康与平衡遭到破坏,这需要进行更深入的研究。

本试验仅仅研究生物密度的单因素影响,并未

加入洞穴形态、空间分布等其他生物因素。另外,实际情况下滨海湿地还受到潮汐、蒸发、降雨等非生物因素的影响,使得物质交换过程更为复杂。因此,生物扰动作用下的水动力过程和物质交换机理尚需进一步研究。

4 结 论

a. 螃蟹扰动增加了沉积物表面积,扩大了水土接触面,并且促使深层沉积物向表层输出。

b. 生物扰动能促进地表水与地下水交换和浅层盐分运移。螃蟹扰动显著增加了入渗量和孔隙水排泄量,并加速了土壤浅层盐分运移,整体盐排泄量增加。

c. 螃蟹密度对滨海湿地水盐交换量有显著影响。螃蟹密度增大后,地表水和地下水交换量和盐分运移速率均明显增大。

参考文献:

- [1] 唐洪根,周廷璋,辛沛. 淤积刺激下滨海湿地植物根系吸水及土壤水分变化[J]. 水资源保护,2020,36(4):87-92. (TANG Honggen, ZHOU Tingzhang, XIN Pei. Stimulation of sediment deposition to root water uptake and soil water change in wetland near sea[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):87-92. (in Chinese)).
- [2] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics[J]. Nature Geoscience,2011,4(5):293-297.
- [3] GEDAN K B, KIRWAN M L, WOLANSKI E, et al. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm[J]. Climatic Change,2011,106(1):7-29.
- [4] 胡知渊,鲍毅新,程宏毅,等. 中国自然湿地底栖动物生态学研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(5):959-968. (HU Zhiyuan, BAO Yixin, CHENG Hongyi, et al. Research progress on ecology of natural wetland zoobenthos in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(5):959-968. (in Chinese)).
- [5] LOHRER A M, THRUSH S F, GIBBS M M. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions[J]. Nature,2004,431(7012):1092-1095.
- [6] DIETRICH W E, PERRON J T. The search for a topographic signature of life [J]. Nature, 2006, 439 (7075):411-418.
- [7] 王汗,燕文明,宋兰兰,等. 摇蚊幼虫扰动对沉积物-水界面结构特征的影响[J]. 水资源保护,2017,33(5):177-182. (WANG Han, YAN Wenming, SONG Lanlan, et al. Bioturbation effects of *Chironomus plumosus* on structural characteristics of sediment-water interface[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):177-182. (in

- Chinese))
- [8] 陈晓旋,陈淑云,曾从盛,等. 螃蟹对闽江河口湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征影响[J]. 环境科学学报,2018,38(3):1179-1188. (CHEN Xiaoxuan, CHEN Shuyun,ZENG Congsheng,et al. Effect of crabs on soil carbon, nitrogen, phosphorus concentration and ecological stoichiometry in Minjiang River estuarine wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3):1179-1188. (in Chinese))
 - [9] ESCAPA M,MINKOFF D R,PERILLO G M,et al. Direct and indirect effects of burrowing crab *Chasmagnathus granulatus* activities on erosion of southwest Atlantic Sarcocornia-dominated marshes [J]. Limnology and Oceanography,2007,52(6):2340-2349.
 - [10] CAROL E S,KRUSE E E,POUSA J L. Influence of the geologic and geomorphologic characteristics and of crab burrows on the interrelation between surface water and groundwater in an estuarine coastal wetland[J]. Journal of Hydrology,2011,403(3/4):234-241.
 - [11] 范伟,章光新,李然然. 湿地地表水-地下水交互作用的研究综述[J]. 地球科学进展,2012,27(4):413-423. (FAN Wei, ZHANG Guangxin, LI Runran. Review of surface groundwater-surface water interactions in wetland [J]. Advances in Earth Science,2012,27(4):413-423. (in Chinese))
 - [12] XIN Pei, JIN Guangqiu, LI Ling, et al. Effects of crab burrows on pore water flows in salt marshes[J]. Advances in Water Resources,2009,32(3):439-449.
 - [13] 王磊,章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水文化联系研究[J]. 湿地科学,2007,5(2):166-173. (WANG Lei, ZHANG Guangxin. Hydrochemical interaction between surface water and groundwater in Zhalong wetland[J]. Wetland Science,2007,5(2):166-173. (in Chinese))
 - [14] STIEGLITZ T C, CLARK J F, HANCOCK G J. The mangrove pump; the tidal flushing of animal burrows in a tropical mangrove forest determined from radionuclide budgets [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 102:12-22.
 - [15] 吴明洲,王锦国,陈舟. 沿海滩涂淤泥质粘土水盐迁移试验分析[J]. 水资源保护,2016,32(3):137-142. (WU Mingzhou, WANG Jinguo, CHEN Zhou. Experimental analysis on soil water and salt migration of mucky clay in coastal shoal [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3):137-142. (in Chinese))
 - [16] WILSON A M, EVANS T B, MOORE W S, et al. What time scales are important for monitoring tidally influenced submarine groundwater discharge? Insights from a salt marsh [J]. Water Resources Research, 2015, 51(6):4198-207.
 - [17] MOFFETT K B, GORELICK S M, MCLAREN R G, et al. Salt marsh ecohydrological zonation due to heterogeneous vegetation-groundwater-surface water interactions [J]. Water Resources Research, 2012, 48(2):W02516.
 - [18] MORRIS J T. The mass balance of salt and water in intertidal sediments: results from North Inlet, South Carolina [J]. Estuaries, 1995, 18(4):556-567.
 - [19] ZHOU Tingzhang, XIN Pei, LI Ling, et al. Effects of large macropores on soil evaporation in salt marshes [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584:124754.
 - [20] XIAO Kai, WILSON A M, LI Hailong, et al. Crab burrows as preferential flow conduits for groundwater flow and transport in salt marshes: a modeling study [J]. Advances in Water Resources, 2019, 132:103408.
 - [21] BERTNESS M D, MILLER T. The distribution and dynamics of *Uca pugnax* (Smith) burrows in a New England salt marsh [J]. Journal of Experimental Marine Biology Ecology, 1984, 83(3):211-237.
 - [22] 邱冬冬,路峰,闫家国,等. 滨海湿地生态系统工程师对潮间带土壤环境的影响机制 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(1):9-16. (QIU Dongdong, LU Fen, YAN Jiaguo, et al. Impact of ecosystem engineers on intertidal edaphic environment in coastal wetland: mechanisms involved [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2018, 54(1):9-16. (in Chinese))
 - [23] IRIBARNE O, BORTOLUS A, BOTTO F. Between-habitat differences in burrow characteristics and trophic modes in the southwestern Atlantic burrowing crab *Chasmagnathus granulata* [J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 155:137-145.
 - [24] HENDRICKX J M, FLURY M. Uniform and preferential flow, mechanisms in the vadose zone, conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone [M]. Washington, D. C. : National Academy Press, 2001:149-187.
 - [25] XIN Pei, YU Xiayang, LU Chunhui, et al. Effects of macropores on water flow in coastal subsurface drainage systems [J]. Advances in Water Resources, 2016, 87:56-67.
 - [26] HUGHES C E, BINNING P, WILLGOOSE G R. Characterisation of the hydrology of an estuarine wetland [J]. Journal of Hydrology, 1998, 211(1/2/3/4):34-49.
 - [27] SANDNES J, FORBES T, HANSEN R, et al. Bioturbation and irrigation in natural sediments, described by animal-community parameters [J]. Marine Ecology Progress, 2000, 197(1):169-179.
 - [28] SKOV M, VANNINI M, SHUNULA J, et al. Quantifying the density of mangrove crabs: *Ocypodidae* and *Grapsidae* [J]. Marine Biology, 2002, 141(4):725-732.

(收稿日期:2020-05-10 编辑:熊水斌)