

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.013

# 潮上带盐沼地层盐分分布及形成机制

詹泸成, 梁嘉颖, 何晓冬

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了探究潮上带盐沼系统地层盐分分布规律及其形成机制, 本研究以江苏盐城近岸盐沼湿地为例, 采用电阻率测量和土壤样品分析的方法, 得出土壤孔隙水盐度空间分布, 并分析其与生态地貌类型的关系。结果表明, 盐沼平台 10 m 深度以下地下水盐分较高且空间分布均匀, 5 m 深度以上浅层孔隙水存在显著淡化, 其程度与条带状生态地貌特征相关; 近潮沟区域浅层土壤孔隙水盐度接近海水, 而螃蟹孔洞和互花米草区域下方地层均存在低盐区, 且前者规模更大; 短期潮汐过程仅影响近潮沟区域的局部地层盐分, 螃蟹孔洞明显促进了降水的下渗和脱盐作用, 并有助于地表蒸发和盐分集结, 增大了浅层土壤水盐度的垂向差异, 而植被生长引起的根系优势流和蒸发抑制作用, 有效降低了表层土壤的盐度水平。

**关键词:** 盐沼; 电阻率; 盐度; 潮汐; 螃蟹孔洞; 互花米草

**中图分类号:** P344 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)05-0788-10

滨海盐沼是位于陆地-海洋过渡区域的生态系统, 是滨海湿地系统的重要组成部分, 广泛分布在世界沿海地区<sup>[1]</sup>。盐沼系统在维持生物多样性、抵御风暴潮、固碳等方面发挥着显著的作用<sup>[1-2]</sup>。然而, 自 20 世纪以来, 世界上超过 50% 的原始盐沼已经消失, 生态功能也存在明显退化, 盐沼的保护与修复正受到国际学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。受滩涂围垦、海平面上升、河口悬沙浓度变化、生物入侵等因素的影响, 中国滨海盐沼正面临严峻挑战<sup>[4-5]</sup>。土壤水盐度控制着盐沼生态系统的分布格局, 是影响盐沼稳定性和功能性的关键因素<sup>[2, 6]</sup>。进一步理解滨海盐沼系统的土壤盐度分布和变化机制, 对于滨海湿地保护和修复有重要意义, 符合现阶段中国生态文明建设的战略需求。

在水文、水动力过程的综合作用下, 滨海盐沼土壤含水率、孔隙水盐度等生境因子在不同高程呈现梯度分布, 从而引起生态系统的带状分布<sup>[7-8]</sup>。目前, 国内外的研究主要关注盐沼植被群落分布、演替及其影响因素, 在地表高程、土壤盐度和地下水等对植被群落演替分布的影响方面已有较好的认识<sup>[9-10]</sup>。近年来, 人们开始关注盐沼生态系统对水文、水动力过程的反馈作用, 通过野外采样分析、物理模型试验和数值模拟方法探究植被对地表水动力过程和土壤生物地球化学过程的影响<sup>[11-12]</sup>, 生物孔隙对地表水-地下水交换和土壤蒸发过程的影响<sup>[13-15]</sup>等。江苏沿海拥有中国重要的滨海盐沼生态系统, 前人在该地区地层盐分分布和盐沼水盐运移规律方面开展了初步研究工作。例如, Zhan 等<sup>[16]</sup>结合高密度电法和环境同位素方法, 揭示了盐城条子泥地区的地下水盐度分布和演化规律; Xu 等<sup>[17]</sup>利用该地区土壤开展室内试验和数值模拟, 发现生物孔隙能够显著促进盐沼土壤蒸发过程, 并改变土壤盐度分布; Zhou 等<sup>[18]</sup>在江苏如东盐沼系统的研究发现, 植被种群演替影响着土壤盐分含量, 进而驱动着土壤微生物分布。最近的研究表明, 在受潮汐淹没影响小的区域, 滨海湿地植被对土壤盐度分布的反作用可能对生态系统格局的演变起着关键作用<sup>[19]</sup>。潮上带盐沼地处潮间带向陆地系统过渡带, 地层盐分受潮汐、降雨、蒸发等过程的综合影响, 目前对于潮上带盐沼地层的盐分分布规律及其形成机制, 特别是在生态系统对地层盐分的反馈

收稿日期: 2023-03-10; 网络出版日期: 2023-09-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20230928.1049.002>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3204302); 江苏省博士后科研资助计划项目(2021K350C)

作者简介: 詹泸成(1989—), 男, 江苏宜兴人, 副教授, 博士, 主要从事生态系统中水文、水动力及物质输运过程方面的研究。E-mail: luchengzhan@hotmail.com

作用方面仍然缺乏认识。潮上带盐沼系统盐分如何分布, 生态系统反馈作用如何影响潮上带盐沼的盐分迁移过程等问题亟需开展进一步研究。

本文以江苏盐城大丰区的川东港自然盐沼为例, 通过电阻率层析成像技术, 获取潮上带盐沼系统近潮沟区、螃蟹孔洞区、互花米草植被区地貌单元内的地层孔隙水盐度高分辨率数据; 同时结合土壤剖面水盐参数分析, 揭示真实复杂条件下的地层盐分空间分布规律, 探究潮上带盐沼系统潮汐、大孔隙和植被等因素对地层盐分迁移的影响机制。研究结果将有助于进一步揭示条带状盐沼生态地貌系统对土壤水盐运移的反馈作用, 为盐沼生态保护和修复提供参考。

### 1 研究区域概况

研究区域位于中国江苏省盐城市大丰区川东港附近的自然盐沼湿地系统( 33°03'N, 120°51'E), 属于大丰麋鹿国家级自然保护区, 已列入世界自然遗产。本研究关注的盐沼-潮沟系统位于潮间带-潮上带的过渡区域, 盐沼平台主要位于潮上带区域, 几乎不受潮汐直接淹没的影响, 但潮汐可通过地表分布的大量潮沟深入盐沼平台。潮汐为不规则半日潮, 平均潮差为 3.6 m, 本研究区退潮后潮沟底部几乎全部出露。盐沼平台植被以互花米草为主, 局部存在碱蓬等高耐盐植物零星分布, 底栖生物丰富, 受螃蟹活动影响显著<sup>[20]</sup>, 地表存在大量螃蟹孔洞( 图 1)。在垂直于潮沟方向上, 地貌呈现明显分带现象, 主要包括潮沟区、近潮沟零星植被区、螃蟹孔洞区、大范围互花米草植被区。该区域属于亚热带季风海洋性气候, 年平均温度为 14.4 °C, 7、8 月温度最高, 最低气温一般发生在 1 月。年平均降水量为 1 067 mm, 夏季( 5—9 月) 降水量约占全年 69%, 冬季( 12—2 月) 单月降水量一般小于 50 mm<sup>[21]</sup>。

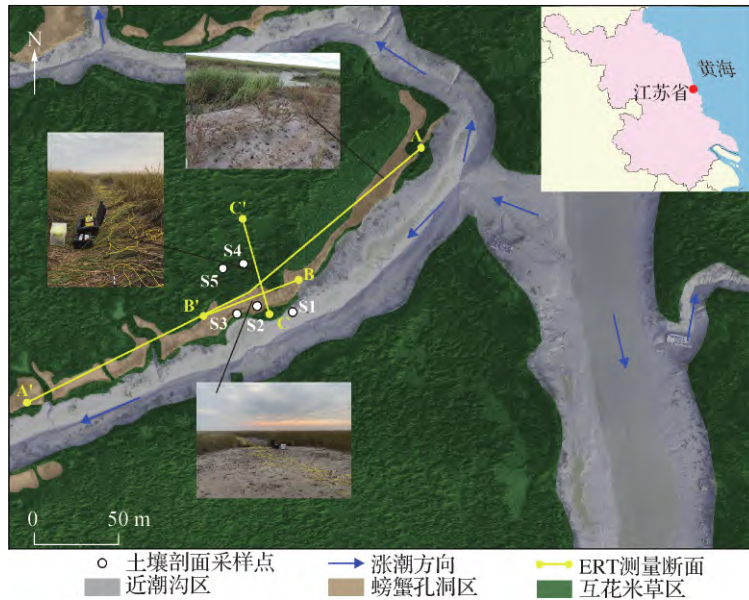


图 1 研究区域观测采样图

Fig. 1 Map of study area with measuring and sampling sites

研究区域属于南黄海近海海域, 海侧动力条件复杂, 黄河与长江携带大量泥沙在此沉积, 形成了广袤的淤泥质滩岸。地层存在巨厚的松散沉积物, 潜水含水层厚度约 25 m, 以粉砂为主, 渗透系数约  $6 \times 10^{-6}$  m/s, 地下水埋深约 1 m, 潜水含水层下部被黏土层划分为多个承压含水层。潜水含水层盐度水平与海水相似, 而深层承压含水层盐度随深度增加而降低, 深部存在淡水含水层<sup>[16]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 电阻率层析成像及土壤采样分析

电阻率层析成像(ERT)能够获取地下电阻率分布特征,被广泛用于石油勘探、地层结构检查、考古等领域<sup>[22]</sup>。对于海岸带系统,电阻率分布能较好地反映地下盐分水平,目前ERT已被成功应用于海水入侵、土地盐碱化和地层水盐分布等方面的研究<sup>[23]</sup>,但在盐沼系统的研究中鲜有涉及。本研究尝试通过ERT方法刻画不同空间尺度下潮上带盐沼系统地层的盐分分布规律,断面布置位置如图1所示,测量时间为2020年12月。A-A'断面平行于潮沟、沿螃蟹孔洞区域布设,电极间距为5 m,测线总长为315 m,测深约54 m,用于获取大尺度范围内的地层盐分空间分布;B-B'是平行于潮沟的小尺度测量断面,电极间距为1 m,总长为63 m,测深约12 m,在A-A'断面基础上进一步揭示浅部地层的盐分情况;C-C'断面垂直于潮沟方向,电极间距为1 m,总长63 m,测深约12 m,覆盖近潮沟区、螃蟹孔洞区和互花米草区,用于揭示不同地貌单元浅部地层盐分分布。此外,对于C-C'断面,分别在高潮位和低潮位开展测量,以探究涨落潮对地下盐分分布的影响。ERT测量仪器为AGI公司生产的SuperSting R8/IP多通道高密度电法仪,电极排列方式采用 Wenner 排列,以获得更高的垂向分辨率,并利用EarthImager 2D软件进行电阻率反演,反演方法为圆滑模型法<sup>[19]</sup>。

为了进一步探究潮汐、螃蟹孔洞和植被覆盖对浅层土壤盐分分布的影响,同时验证ERT反演结果的准确性,同期在各地貌类型区域进行土壤剖面采集和分析,采样位置如图1所示。利用剖面开挖的方法,对1 m深度以内的土壤进行分层采样:在0~20 cm深度内采样深度间隔为5 cm,20~60 cm深度内间隔10 cm,60~100 cm深度内间隔20 cm,每个深度均采集2份平行样品,共获得100个土壤样品。用烘干法测量土样的质量含水率,将干土样与去离子水根据1:5的比例混合,振荡混合3 min后静置,待清浊分层后测定上层清液盐度,并结合质量含水率换算为土壤孔隙水盐度值<sup>[19]</sup>。

### 2.2 基于电阻率的土壤孔隙水盐度估算模型

Archie<sup>[24]</sup>在1942年建立了岩石中孔隙水电阻率与体电阻率之间的关系,随后Winsauer等<sup>[25]</sup>和Waxman等<sup>[26]</sup>将这一关系拓展应用至松散介质中,得到了优化后的Archie公式,具体表示为

$$\rho_b = \frac{a}{\phi^m S_r^n} \rho_w \quad (1)$$

式中: $\rho_b$ 为体电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $\rho_w$ 为孔隙水电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $a$ 为迂曲度;  $\phi$ 为孔隙度,%;  $S_r$ 为饱和度,%;  $m$ 为胶结系数;  $n$ 为饱和指数。

在海岸带系统中,由于土壤孔隙水盐度较高(低 $\rho_w$ 值),体电阻率主要受孔隙水电阻率(盐度)控制,饱和度的影响可以忽略,同时考虑到本研究区地下水位埋深较浅(约1 m),土体饱和度较高<sup>[27]</sup>,故本研究中 $S_r$ 近似取为1。根据前人在研究区附近的采样测试结果,土壤孔隙度取40%<sup>[15]</sup>。研究区盐沼系统表层土壤以淤泥质砂黏土为主,潜水层主要以粉砂、粉细砂为主。Oh等<sup>[28]</sup>和Salem等<sup>[29]</sup>给出了不同土质的迂曲度、胶结系数的参考值,结合研究区域的土质情况,本研究中 $a$ 取0.88, $m$ 取1.6。将上述参数取值代入式(1)后,本文中孔隙水电阻率与体电阻率之间的关系即简化为

$$\rho_w = 0.2623 \rho_b \quad (2)$$

Fofonoff等<sup>[30]</sup>以及Poisson等<sup>[31]</sup>建立了利用电导率推算盐度的方法,该方法适用于盐度范围为2‰~42‰、温度范围为0~30℃的溶液,主要包括以下公式:

$$E_C = \frac{1}{\rho_w} \quad (3)$$

$$R = \frac{E_C}{E_{C_0}} \quad (4)$$

$$S = 27.01R + 22.14R^2 - 39.56R^3 + 49.39R^4 - 32.86R^5 + 8.88R^6 \quad (5)$$

式中:  $E_c$  为实际孔隙水电导率, S/m;  $E_{c_0}$  为盐度 35‰ 的标准海水在 15 °C 和标准大气压下的电导率, 其数值约等于 4.291 4 S/m;  $R$  为孔隙水电导率和  $E_{c_0}$  的比值;  $S$  为孔隙水盐度, ‰。在本文中忽略了温度对电导率的影响。

本文首先根据实测体电阻率数据, 利用式 (2) 计算孔隙水电阻率, 然后利用式 (3) 一式 (5) 估算实际孔隙水盐度值。为了验证该估算模型的可信度, 将实测土壤样品的盐度数据与模型估算结果 (相应采样点附近数值) 进行对比 (图 2), 结果显示该模型的均方误差 ( $E_{RMS}$ ) 仅为 0.933, 表明该模型能够较好地估算实际孔隙水盐度。

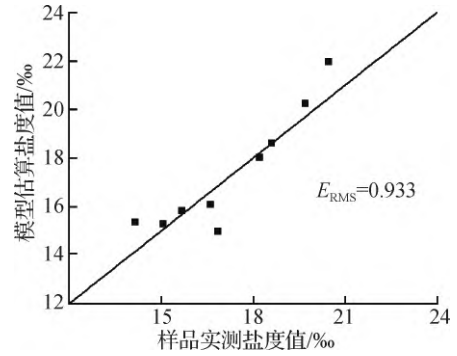


图 2 实测盐度和模型估算结果对比  
Fig. 2 Comparison between measured and modeled salinity results

### 3 结果及讨论

#### 3.1 盐沼地层孔隙水盐度整体分布规律

根据 A-A' 剖面电阻率测试结果推算孔隙水盐度, 得出了盐沼系统较大尺度范围内的地层孔隙水盐度分布情况, 如图 3 所示, 剖面电阻率反演迭代次数为 3, 均方误差为 0.94%。地层孔隙水盐度空间变化范围大, 为 8‰~51‰, 整体盐度水平较高, 平均值为 27‰, 并呈现出明显的垂向变化。研究区位于南黄海区域, 近岸海水盐度在 30‰左右<sup>[27]</sup>, 以此为参考值可以将测量范围内的地层孔隙水盐度分为 I、II、III 3 个区域 (图 3)。

地层孔隙水盐度在垂向上总体呈先升高后降低的趋势。I 区深度主要为 0~10 m, 孔隙水盐度水平低于海水, 主要在 15‰~26‰ 范围波动, 这可能与地表淡水下渗有关。研究区属于潮上带, 只有特大潮或风暴潮时才会被短暂淹没, 其浅层土壤盐度在降雨脱盐作用影响下会明显降低<sup>[32]</sup>。II 区深度主要为 10~30 m, 孔隙水盐度较高, 局部可超过 35‰。这一高盐度含水层与前人在附近区域的研究结果相吻合<sup>[19]</sup>。研究区潜水层系统主要由粉砂土组成, 渗透性差, 加上地势平坦, 水力梯度较小, 水动力条件不足, 地下水更新流动缓慢<sup>[33]</sup>。相关研究表明, 全新世海侵以来的古海水仍然大量保留于潜水含水层的中下部区域<sup>[27]</sup>, 与此处的高盐度层相对应。III 区的孔隙水盐度水平较 II 区明显降低, 盐度呈现出随深度增加而降低的趋势。结合水文地质资料, 这一深度范围对应于潜水层和第一承压层之间的弱透水层过渡区域, 与潜水层相比, 研究区承压层地下水盐度明显降低<sup>[27]</sup>。

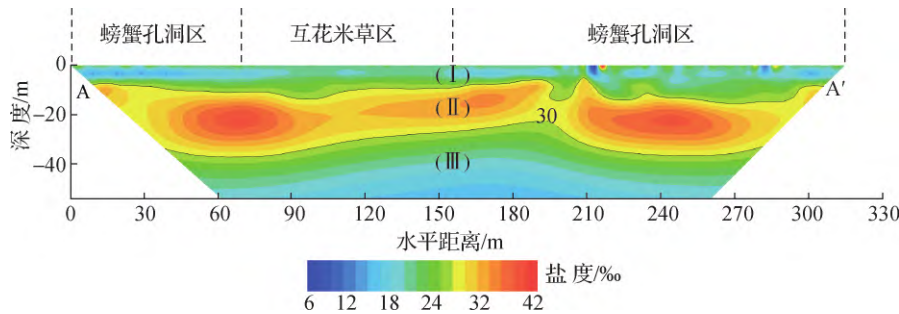


图 3 A-A' 剖面孔隙水盐度分布  
Fig. 3 Porewater salinity distribution of A-A' profile

在水平向上, I 区与 II、III 区的孔隙水盐度分布特征有所差异。I 区孔隙水盐度在水平方向上分布不均匀, 特别是在 5 m 深度以上存在大量盐度低于 18‰ 的不规则斑块, 这与 Zhan 等<sup>[16]</sup> 在研究区南部围垦区的结

果相似。这一特征与地表的生态地貌类型有关，该测线地表以螃蟹孔洞地貌类型为主，存在少量互花米草区域，螃蟹孔洞区域下方的浅层孔隙水盐度明显更低，下节将对此进一步分析。II、III区的孔隙水盐度水平分布相对均匀，表明该深度范围内孔隙水盐度受外界因素影响较小。研究区潜水层和弱透水层渗透性较差，地下水流动较缓慢<sup>[33]</sup>，地表过程对深处的孔隙水盐度无明显影响。

### 3.2 不同生态地貌区浅层孔隙水盐度特征

B-B'和C-C' 2个ERT测量剖面从较小空间尺度上进一步显示了潜水层顶部约12 m深度范围内的孔隙水盐分分布情况。平行于潮沟方向、地表以螃蟹孔洞为主的B-B'剖面电阻率反迭代次数为2，均方误差为1.35%。从剖面上看(图4(a))，孔隙水盐度在垂向上随深度增加呈上升趋势。0~2 m深度范围内广泛分布低盐层，模型估算的孔隙水盐度范围为6‰~26‰，平均值仅为15‰，2~5 m深度范围孔隙水盐度梯度变化明显，而5~12 m深度内整体上盐度较高，接近海水水平。图4(b)、图4(c)分别显示了高、低潮时期垂直于潮沟方向的12 m深度范围内(C-C'剖面)的盐度分布情况，2个时期剖面的电阻率反迭代次数均为1，均方误差分别为2.70%和2.57%。对比发现，地层中孔隙水盐度在不同潮位条件下未发生明显变化，表明短周期的潮汐过程没有对盐沼地层盐分产生显著影响，地层孔隙水盐度变化的时间尺度较大，水盐运输过程缓慢。与B-B'剖面相类似，孔隙水的淡化现象同样发生在5 m以上的深度，因此下文将对该深度范围内的盐度特征进行重点分析和讨论。

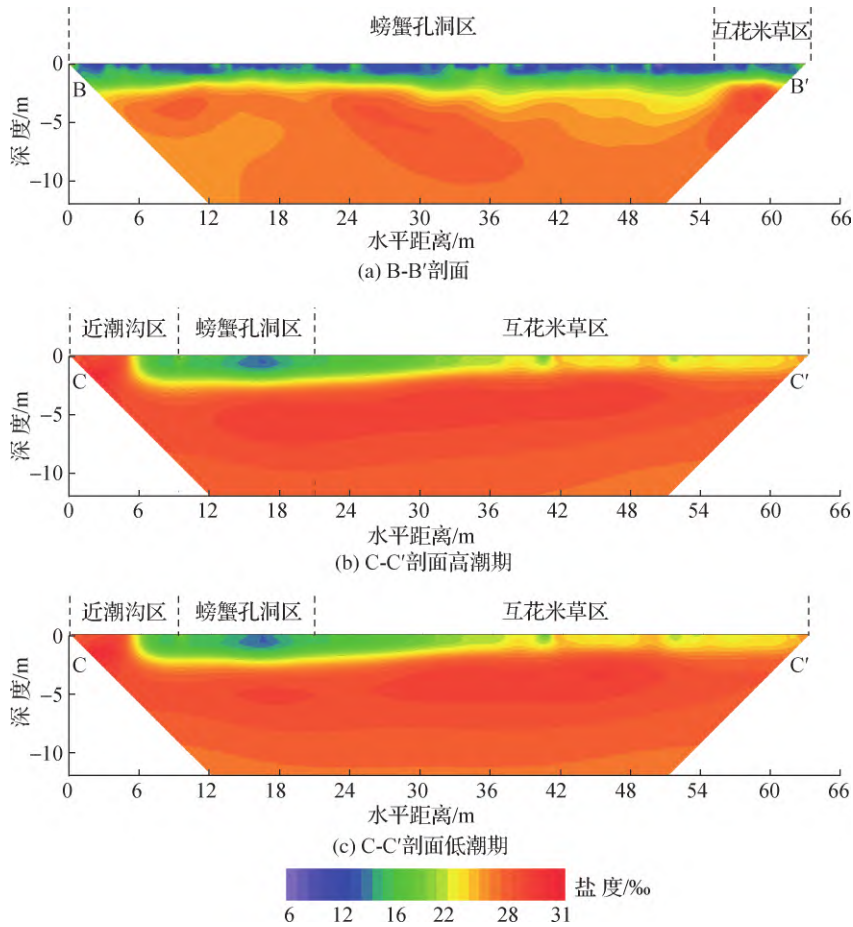


图 4 B-B'剖面 and C-C'剖面孔隙水盐度分布

Fig. 4 Porewater salinity distributions of B-B' profile and C-C' profile

以C-C'剖面为例，根据地貌情况将剖面分为近潮沟区、螃蟹孔洞区和互花米草区3个区域，图5显示了不同地貌单元区域5 m深度范围内的浅层孔隙水盐度平均值及其垂向变化情况。近潮沟区(测线水平距离

0~5 m) 浅层孔隙水盐度整体上处于较高水平, 平均值为 26‰, 最高盐度达 30‰。这一单元距离潮沟较近, 受潮汐驱动的地表水-地下水交换影响, 浅层孔隙水体现出较高比例的海水成分, 且整体上垂直方向变化趋势不明显<sup>[15]</sup>。螃蟹孔洞区(测线水平距离 10~20 m) 浅层孔隙水呈现出明显的低盐度特征, 平均值为 20‰, 1.5 m 深度内盐度仅为 16‰左右, 这一结果与 B-B' 剖面一致。与其他地貌单元区域对比, 螃蟹孔洞区浅层孔隙水盐度最低, 并且呈现出明显的随深度增加而增大的趋势, 具有较大的垂向差异。互花米草区(测线水平距离 20~64 m) 浅层孔隙水平均盐度为 24‰, 与其他地貌单元相比处于中间水平, 孔隙水盐度也呈现出随深度增加而增大的趋势。

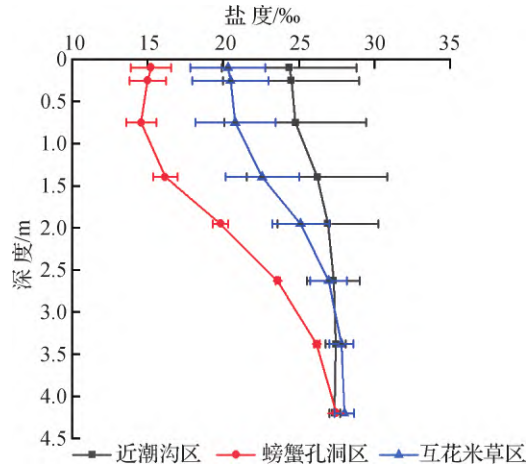


图 5 不同地貌单元 5 m 深度内孔隙水盐度垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of porewater salinity within 5 m depth of different geomorphic units

对比 3 个地貌单元的结果可以看出, 在 5 m 深度范围内, 随着深度增加, 不同地貌单元区域的孔隙水盐度从表层的不同低盐度水平逐渐增大至接近海水水平。这一现象表明, 潮上带盐沼平台地层孔隙水盐分主要来自海水, 但浅层孔隙水受到了不同程度的淡化作用, 其淡化程度和范围与地表的条带状生态地貌类型高度关联。在靠近潮沟岸坡的区域, 浅层孔隙水盐度接近海水, 无明显淡化现象; 在植被稀少的螃蟹孔洞区域下方, 低盐度分布范围较大, 且存在向两侧和深处扩展的趋势(图 4(b)); 在盐沼平台内的互花米草生长区域, 浅层孔隙水也有明显淡化趋势, 但其程度和范围相对较小。

### 3.3 潮上带盐沼系统浅层土壤盐分分布的形成机制

结合表层 1 m 深度以内的分层土壤含水率、孔隙水盐度结果(图 6), 可以进一步揭示浅层土壤盐分分布的影响因素和形成机制。近潮沟区域表层 1 m 深度内的土壤含水率平均值为 37%, 处于较高水平; 孔隙水盐度平均值为 19‰, 含水率、盐度在垂直方向上无明显变化趋势。该区域接近高潮位, 在大潮期间可受潮汐淹没影响, 咸淡水在此混合交互。潮汐驱动的地表水-地下水交换和土壤溶质运移主要发生在这一近潮沟区域<sup>[1]</sup>, 因此维持了该区域较高的含水率水平和垂向较为均匀的盐度。由于滨海盐沼系统往往具有较低的渗透性<sup>[1]</sup>, 在没有螃蟹孔洞、植物根系存在的区域, 地表水-孔隙水交换作用极其缓慢, 土壤水盐含量整体上处于较稳定的状态。在高潮、低潮期间的 ERT 测量结果无明显差异(图 4), 同样表明潮上带盐沼系统地层的整体水盐特征不会对潮汐过程作出迅速响应, 土壤水盐状态是长期演化的结果。

螃蟹孔洞区表层 1 m 深度内的土壤含水率随深度增加而增大, 但处于相对较低水平, 平均值仅为 27%; 土壤孔隙水盐度在 12‰~45‰之间, 平均值为 19‰。表层 20 cm 深度内盐度呈现出随深度增加而快速降低的趋势, 垂向差异接近 30‰。深度 20 cm 以内土壤的低含水率、高盐度特征与前人在滨海盐碱地的研究结果吻合<sup>[2,14]</sup>, 这与表层的强烈蒸发和盐分集结作用有关。该区域螃蟹孔洞长度约 1~1.5 m<sup>[20]</sup>, 作为连通地下水的优先流通道, 有利于地下水向上迁移, 不断为地表蒸发提供水源, 导致盐分在土壤表层积累, 形成高于海水的盐分特征<sup>[17]</sup>。从本研究结果上看, 蒸发和盐分集结主要发生在表层 20 cm 深度范围内。20 cm 深度以

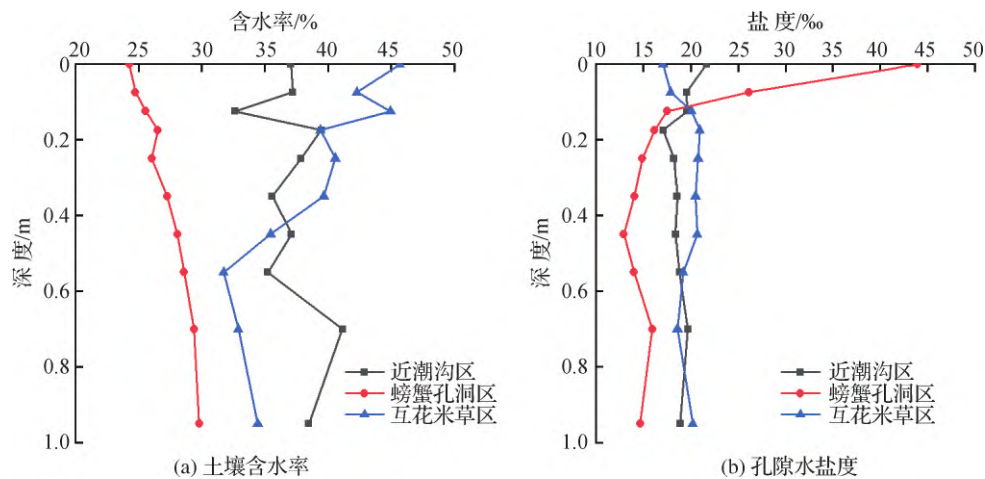


图6 土壤剖面含水率和孔隙水盐度垂向分布

Fig.6 Vertical distributions of water content and porewater salinity in soil profiles

下土壤盐度、含水率均明显低于其他地貌单元。结合 ERT 观测结果,这一低盐度范围可以延伸到 1.5 m 深度附近,与该区域螃蟹孔洞的长度相当<sup>[20]</sup>。在低渗透性地层条件下,连通地下水的螃蟹孔洞作为优先流通道,不仅可促进土壤蒸发,降低土壤含水率,也可显著促进降雨入渗和地下水运动<sup>[15]</sup>。在螃蟹孔洞密集分布区域,大气降水可通过这些大孔隙快速进入土壤深处并补给地下水系统,进而促进地层盐分排泄,长期作用下逐渐降低地层盐分含量。从不同尺度的 ERT 结果上看,该低盐度区域存在较大的空间规模,在水平和垂直方向上存在扩张趋势,表明螃蟹孔洞对盐沼地层盐分特征的影响在潮上带区域极为显著。由此可见,螃蟹孔洞在较大程度上改变了潮上带盐沼的地表蒸发和入渗过程,进而显著影响着土壤水盐分布。

互花米草区表层 1 m 深度内的土壤含水率范围为 32% ~ 43%,平均值为 39%,随深度增加呈下降趋势,但总体接近饱和水平;孔隙水盐度平均值为 19‰,明显低于海水水平。20 cm 深度以上盐度较低,约 15‰ ~ 20‰;20 ~ 50 cm 深度内盐度相对较高,主要在 20‰ 左右变化,显示出了明显的淡水入渗和盐分向下输运过程。土壤表层 40 cm 深度以内的土壤含水率显著高于其他区域,而孔隙水盐度水平明显低于其他区域,这与前人的研究结果相符<sup>[34]</sup>。植被区土壤水分消耗主要包括植被蒸腾和土壤蒸发,而本研究采样时间为 12 月,此时互花米草处于枯萎阶段,蒸腾作用较弱,并且在较高的植被覆盖率下,土壤蒸发作用会显著削弱,这是土壤含水率高的主要原因<sup>[35]</sup>。此外,植物根系的提水作用会进一步增加根系周围的土壤含水率<sup>[36]</sup>,形成浅层土壤含水率随深度增加而下降的趋势。在上述过程影响下,土壤表层含水率处于较高水平,这一特征与螃蟹孔洞区域存在着明显的差异。另一方面,对于低渗透性的土壤,植被根系的存在可明显改善土壤结构,利于地表水分下渗<sup>[37]</sup>。互花米草发达的根系大部分密布于 30 cm 深度范围内<sup>[38]</sup>,可作为优势流通道促进降雨入渗,并携带盐分向下迁移,导致盐分在密集分布的根系区下方积累,形成根系中上区域附近盐度较低、下方盐度相对较高的垂向变化特征。此外,耐盐植物在拒盐、泌盐等方面也会在一定程度上改变浅层土壤水盐状态<sup>[19]</sup>,但在本研究中不作重点关注。由此可见,潮上带盐沼植被同样能够通过改变蒸发、入渗等过程,影响地层水盐分布,但与螃蟹孔洞相比,其影响深度相对较小。

盐沼系统位于陆地-海洋过渡区域,其土壤盐分分布是海洋潮汐淹没、陆地淡水输入、降雨和蒸发等水文过程动态作用的结果<sup>[1]</sup>。在这些过程的作用下,垂直于潮沟的不同高程位置形成了不同的土壤水盐条件,从而引起盐沼生态系统的条带状分布<sup>[7]</sup>。根据上述研究结果,在潮上带盐沼系统内,螃蟹孔隙、植物生长等生态因素会进一步引起水文过程变化,对土壤盐分迁移和演化产生关键的影响。如图 7 所示,潮汐淹没过程维持着潮间带及其附近区域的盐分长期稳定,也是盐沼深部地层盐分的主要来源,但由于地层渗透性低,短时间内潮汐对地层盐分的影响可以忽略。在不受潮汐淹没影响的潮上带区域,螃蟹孔洞和植物根系在较大程度上控制了降雨入渗和地表蒸发过程,对浅层土壤水盐条件存在明显的反馈作用。螃蟹孔洞能有效促进降

雨快速进入地层并向更深处和周围渗透,大大降低了浅层地层盐分,且地表蒸发盐分集结明显,形成较大的盐度垂向分布梯度。互花米草植被生长区域内,植物根系引起的优势流入渗和高覆盖度引起的蒸发减弱,明显降低了植物根围区的浅层土壤盐分水平。由此可见,潮上带盐沼系统中螃蟹活动、植物生长等生物因素对地层盐分演化的影响极为显著,在相应的物理模型试验或数值模拟研究中应当予以充分考虑。

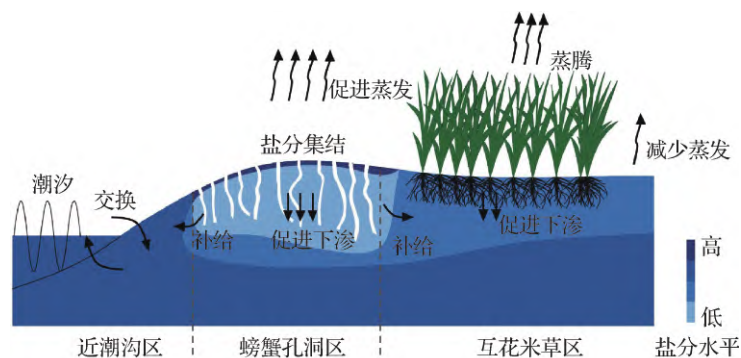


图7 盐沼生态地貌系统对地层盐分分布的反馈作用机制

Fig. 7 Feedback mechanism of saltmarsh ecogeomorphic system on subsurface salt distribution

## 4 结 论

本文以江苏盐城的典型自然盐沼湿地为例,结合地球物理探测和样品分析,揭示了潮上带盐沼系统的土壤盐分空间分布,阐述了盐沼生态地貌系统对土壤水盐迁移的反馈作用机制。主要结论如下:

(1) 高密度电阻率层析成像方法能够有效地揭示潮上带盐沼地层盐分分布特征,现场测量结果表明,研究区潜水含水层盐度整体接近海水水平,但10 m深度以上的地下水存在明显的淡化现象。

(2) 浅层土壤孔隙水淡化在5 m深度内较显著,其程度和规模与盐沼地表的条带状生态地貌特征高度关联:近潮沟区域浅层孔隙水无明显淡化现象;螃蟹孔洞区域孔隙水盐度最低,低盐区分布范围大;互花米草区域浅层孔隙水也有明显淡化趋势,但主要发生在植物根系深度范围内。

(3) 潮上带盐沼系统中,螃蟹孔洞和植物生长对土壤水盐条件存在明显的反馈作用机制:螃蟹孔洞能有效促进降雨向土壤深处渗透并淡化盐分,且有助于地表蒸发和盐分集结;植物引起的优势流入渗和对蒸发的削弱作用,显著降低了植物根系区的土壤水盐度。

### 参考文献:

- [1] XIN P, WILSON A, SHEN C J, et al. Surface water and groundwater interactions in salt marshes and their impact on plant ecology and coastal biogeochemistry [J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(1): e2021RG000740.
- [2] SHEN C J, ZHANG C M, XIN P, et al. Salt dynamics in coastal marshes: formation of hypersaline zones [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(5): 3259–3276.
- [3] TEMMINK R J M, LAMERS L P M, ANGELINI C, et al. Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots [J]. *Science*, 2022, 376(6593): 594–601.
- [4] GU J L, LUO M, ZHANG X J, et al. Losses of salt marsh in China: trends, threats and management [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 214: 98–109.
- [5] POIRIER E, van PROOSDIJ D, MILLIGAN T G. The effect of source suspended sediment concentration on the sediment dynamics of a macrotidal creek and salt marsh [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 148: 130–138.
- [6] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6663.
- [7] FENG Y, SUN T, ZHU M S, et al. Salt marsh vegetation distribution patterns along groundwater table and salinity gradients in



- Yellow River Estuary under the influence of land reclamation[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 82–90.
- [8] 陈一宁, 陈鹭真, 蔡廷禄, 等. 滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(5): 1055–1065. (CHEN Y N, CHEN L Z, CAI T L, et al. Advances in biogeomorphology in coastal wetlands and its application in ecological restoration[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 1055–1065. (in Chinese))
- [9] ZHANG X L, ZHANG Z H, WANG W, et al. Vegetation successions of coastal wetlands in Southern Laizhou Bay, Bohai Sea, Northern China, influenced by the changes in relative surface elevation and soil salinity[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: 112964.
- [10] GUIMOND J, TAMBORSKI J. Salt marsh hydrogeology: a review[J]. *Water*, 2021, 13(4): 543.
- [11] GE J Z, YI J X, ZHANG J T, et al. Impact of vegetation on lateral exchanges in a salt marsh–tidal creek system[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(8): e2020JF005856.
- [12] WANG G D, WANG M, XUE Z S, et al. Vegetation regulates element composition of soils by enhancing organic matter accumulation in the salt marshes of Liao River delta, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 888605.
- [13] XIAO K, WILSON A M, LI H L, 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.
- [14] ZHOU T Z, XIN P, LI L, et al. Effects of large macropores on soil evaporation in salt marshes[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124754.
- [15] XU X H, XIN P, ZHOU T Z, et al. Effect of macropores on pore–water flow and soil conditions in salt marshes subject to evaporation and tides[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 261: 107558.
- [16] ZHAN L C, XIN P, CHEN J S. Subsurface salinity distribution and evolution in low–permeability coastal areas after land reclamation: field investigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128250.
- [17] XU X H, XIN P, ZHOU T Z, et al. Effects of large macropores on saline water evaporation from marsh soil[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(3): e2022WR033276.
- [18] ZHOU Z D, HUA J F, XUE J H. Salinity drives shifts in soil microbial community composition and network complexity along vegetation community succession in coastal tidal flats[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 276(13): 108005.
- [19] 詹沪成, 马芬艳, 陈建生, 等. 条子泥围垦区水盐特征与植被分布的关系[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 127–138. (ZHAN L C, MA F Y, CHEN J S, et al. Relationship between water salinity and vegetation distribution in the Tiaozini reclamation area[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 127–138. (in Chinese))
- [20] CHEN X G, SANTOS I R, HU D F, et al. Pore–water exchange flushes blue carbon from intertidal saltmarsh sediments into the sea[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2022, 7(4): 312–320.
- [21] 张宇, 钟平安, 万新宇, 等. 近 57 年江苏沿海降水量演变特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2): 198–201, 205. (ZHANG Y, ZHONG P A, WAN X Y, et al. Evolution characteristics of precipitation along the coastal area of Jiangsu Province in recent 57 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(2): 198–201, 205. (in Chinese))
- [22] DIALLO M C, CHENG L Z, ROSA E, et al. Integrated GPR and ERT data interpretation for bedrock identification at Cléricy, Québec, Canada[J]. *Engineering Geology*, 2019, 248: 230–241.
- [23] WANG P, ZHANG X Y, HAO Y R, et al. Evaluating salinity variation and origin in coastal aquifer systems with integrated geophysical and hydrochemical approaches[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(23): 34038–34054.
- [24] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the AIME*, 1942, 146(1): 54–62.
- [25] WINSAUER W O, SHEARIN H M, MASSON P H, et al. Resistivity of brine–saturated sands in relation to pore geometry[J]. *AAPG Bulletin*, 1952, 36(2): 253–277.
- [26] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivities in oil–bearing shaly sands[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1968, 8(2): 107–122.
- [27] 侯国华, 高茂生, 党显璋, 等. 江苏盐城滨海地区浅层地下咸水的水盐来源及咸化成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(4): 48–59. (HOU G H, GAO M S, DANG X Z, et al. Water and salt sources and salinization of shallow saline groundwater in the coastal area of Yancheng, Jiangsu[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(4): 48–59. (in Chinese))
- [28] OH T M, CHO G C, LEE C. Effect of soil mineralogy and pore–water chemistry on the electrical resistivity of saturated soils[J].

- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(11): 06014012.
- [29] SALEM H S, CHILINGARIAN G V. The cementation factor of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 23(2): 83-93.
- [30] FOFONOFF N P, MILLARD R C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater [J]. Unesco Technical Papers in Marine Science, 1983, 44: 6-9.
- [31] POISSON A, LEBEL J, BRUNET C. Influence of local variations in the ionic ratios on the density of seawater in the St. Lawrence area [J]. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers, 1980, 27(10): 763-781.
- [32] 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 [J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3241-3252. (SUN D B, LI Y Z, YU J B, et al. Spatial distribution and eco-stoichiometric characteristics of soil nutrient elements under different vegetation types in the Yellow River Delta wetland [J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 3241-3252. (in Chinese))
- [33] HAN L J, LIU D W, CHENG G S, et al. Spatial distribution and genesis of salt on the saline playa at Qehan Lake, Inner Mongolia, China [J]. Catena, 2019, 177: 22-30.
- [34] HE B, CAI Y L, RAN W R, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field [J]. Catena, 2015, 127(4): 129-134.
- [35] ZHAI L, WANG X, WANG P, et al. Vegetation and location of water inflow affect evaporation in a subtropical wetland as indicated by the deuterium excess method [J]. Ecohydrology, 2019, 12(4): e2082.
- [36] ALAGELE S M, JOSE S, ANDERSON S H, et al. Hydraulic lift: processes, methods, and practical implications for society [J]. Agroforestry Systems, 2021, 95(4): 641-657.
- [37] WANG H F, ZHU X A, ZAKARI S, et al. Assessing the effects of plant roots on soil water infiltration using dyes and hydruS-1D [J]. Forests, 2022, 13(7): 1095.
- [38] 龙孟苓. 入侵植物互花米草对九段沙湿地有机碳库的影响研究 [D]. 上海: 上海大学, 2017. (LONG M L. The impact of invasive smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* Loisel) on organic carbon stock in Jiuduansha wetland [D]. Shanghai: Shanghai University, 2017. (in Chinese))

## Salt distribution and formation mechanism in supratidal saltmarsh stratum\*

ZHAN Lucheng, LIANG Jiaying, HE Xiaodong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To explore the distribution pattern and formation mechanism of salt in the stratum of supratidal saltmarsh system, the coastal saltmarsh wetland in Yancheng, Jiangsu Province, was considered in this study. The spatial distribution of soil porewater salinity was obtained through resistivity measurement and soil sample analysis, and the corresponding relationship with ecogeomorphology was further revealed. As a result, the groundwater salinity below the depth of 10 m is relatively high and uniformly distributed, while shallow porewater above 5 m depth is significantly desalinated. The degree of porewater desalination is related to the characteristics of zonal ecogeomorphology. Salinity of shallow porewater in the near-creek area is close to that of seawater. However, the shallow stratum underneath the crab hole area and *Spartina alterniflora* area has much lower salinity, with the former presenting a larger spatial scale. The short period tidal process only affects the localized salinity near the tidal creek. The crab holes significantly promote the infiltration of rainwater and its desalination effect, and contribute to near-surface evaporation and salt accumulation, increasing the vertical difference of shallow soil water salinity. The root preferential flow and evaporation inhibition caused by vegetation growth effectively reduce the salinity level of surface soil.

**Key words:** saltmarsh; electrical resistivity; salinity; tide; crab hole; *Spartina alterniflora*

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3204302) and the Postdoctoral Research Fund of Jiangsu Province, China (No. 2021K350C).