

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.008

江苏沿海典型盐沼潮沟系统地表水与地下水交换规律

何晓冬,詹泸成,郑 权

(河海大学水利水电学院)

摘要:为进一步探究江苏盐城典型盐沼潮沟系统的地表水与地下水交换过程,通过现场原位连续监测和取样分析获取水量、盐度、同位素等数据,估算了大、小潮期的地表水与地下水交换通量,揭示了地表水与地下水相互作用规律。结果表明:潮汐是引起盐沼潮沟系统地表水与地下水交换的主要驱动因素,其交换量受潮汐条件影响显著,大潮期交换通量可达小潮期的 26~30 倍;潮汐过程中地表水补给量和地下水排泄量相当,虽然净通量可忽略,但地表水与地下水交换会引起地层盐分大量排泄,平均盐分通量可达 140 t/d;盐沼潮沟系统内发生在较大时空尺度下的深层滞留海水排泄过程,对水、盐、热交换的影响不可忽略。

关键词:盐沼;同位素;盐分;地表水与地下水交换;潮汐泵

Surface water and groundwater exchange pattern in a typical coastal salt marsh-tidal creek system of Jiangsu Province

He Xiaodong, Zhan Lucheng, Zheng Quan

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: To gain further insight into the surface water and groundwater exchange process in typical salt marsh-tidal creek systems in Yancheng City, Jiangsu Province, continuous in-situ monitoring and sampling analysis of data including water volume, salinity, and isotopes were conducted, and the exchange fluxes between surface water and groundwater during both spring and neap tides were estimated, revealing the patterns of surface water and groundwater interactions. Results indicate that tides serve as the primary driving force of surface water and groundwater exchange in the salt marsh-tidal creek systems. The exchange flux is markedly influenced by tidal conditions, with exchange flux during spring tides reaching up to 26-30 times that during the neap tides. During the tidal cycles, surface water recharge and groundwater discharge are almost equivalent. Although the net water flux can be neglected, this process causes a significant discharge of stratum salts, with an average salt flux of up to 140 t/d. Furthermore, a discharge process of deeply trapped marine water with a larger space-time scale exists in the study area, which may have non-negligible impacts on water, salt, and heat exchange.

Key words: salt marsh; isotope; salinity; surface water and groundwater exchange; tidal pumping

滨海湿地位于陆地与海洋的过渡地带,被誉为“地球之肾”,包括红树林、盐沼和海草床等^[1-2]。滨海盐沼是我国面积最大、分布最广的滨海湿地系统,在维持生物多样性、抵御风暴潮、调节区域气候、固碳等方面发挥着显著作用^[3-4]。然而,受人类活动和气候变化影响,盐沼湿地的生态功能存在明显退化^[4-5]。我国于 2022 年 10 月印发了《湿地保护规划(2022—2030 年)》,将滨海盐沼湿地列为海岸带重点保护和修复对象。潮汐作用下的海水周期性淹没驱动着滨海盐沼系统的地表水与地下水交换,影响系统内的营养盐和碳循环,是其发挥生态服务功能的关键^[4]。因此,进一步研究滨海盐沼系统的地表水与地下水交换过程,对保护和修复盐沼湿地具有重要意义。

滨海盐沼多为低渗透性淤泥质系统,且发育有大量潮沟,形成复杂的盐沼潮沟系统^[6]。潮汐驱动下的近潮沟区域地表水与地下水交换,常被称作孔隙水交换,是盐沼系统中海底地下水排泄的主要形式,被用于描述盐沼系统中发生在较小时空尺度(通常小于小时和米)下的地表水与地下水交换过程,是滨海盐沼向海洋输送物质的重要途径,影响着近海生态环境质量^[7-10]。潮汐驱动下的孔隙水交换通量较大,同时携带输出

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42477062);国家重点研发计划项目(2022YFC3204302)

作者简介:何晓冬(1998—),男,硕士研究生,主要从事滨海湿地地表水与地下水交换研究。E-mail:347928102@qq.com

通信作者:詹泸成(1989—),男,副教授,博士,主要从事生态系统水动力及物质输运过程研究。E-mail:luchengzhan@hhu.edu.cn

了大量的营养物质和碳,支持海洋生产力和碳封存^[7-8]。然而,相对于渗透性较好的砂质海岸系统,淤泥质盐沼系统水文地质条件更为复杂,存在含水层分层、生物孔隙等各类非均质因素,导致地下水排泄过程在时空尺度上存在极高的变异性^[10]。盐沼潮沟系统中不仅存在常规的孔隙水交换过程,也存在优势流作用下的地表水与地下水交换^[11-14]。基于氡同位素²²²Rn 实测数据建立的质量守恒模型将盐沼潮沟系统视为黑箱子,能够有效地估算地表水与地下水的交换通量,但由于对其地表水与地下水交换规律缺乏足够的认识,在区分不同地下水端元的贡献方面仍存在较大的难度^[15-16]。

江苏大丰麋鹿国家级自然保护区内的盐沼潮沟系统完整,潮沟发育成熟,受人类活动影响较小,在滨海盐沼潮沟系统中具有一定代表性。本文通过在潮沟开展原位连续监测,结合同位素地球化学采样,分析地表水盐度、同位素变化特征,并利用水-盐平衡模型对比大、小潮期的地表水与地下水交换通量,揭示潮汐作用下的地表水与地下水相互作用规律,以期对盐沼湿地生态系统的科学保护和修复提供参考。

1 研究区概况

江苏省盐城市大丰区川东港南侧的盐沼潮沟湿地系统(33°01'N~33°03'N,120°47'E~120°52'E)属于江苏大丰麋鹿国家级自然保护区,是世界自然遗产的重要组成部分^[17],地处南黄海近海地区,潮汐为不规则的半日潮,平均潮差约为 3.6 m^[9]。在潮汐作用下,盐沼平台被大量潮沟切割,研究时期盐沼植被以互花米草为主。本文选择的潮沟长度约 0.6 km(图 1),潮沟两侧盐沼平台位于潮上带,观测期间高潮时盐沼平台未被淹没,涨潮时最大淹没面积约 70 100 m²,退潮后潮沟底部几乎完全出露。潮沟北部约 900 m 处存在一条入海淡水河流(川东河),河口处修建有挡潮闸(川东闸)。研究区属亚热带季风气候,平均气温为 14.4℃,7 月、8 月气温最高,最低气温一般发生在 1 月;年降水量约 1 100 mm,主要集中在夏季(5—9 月)。

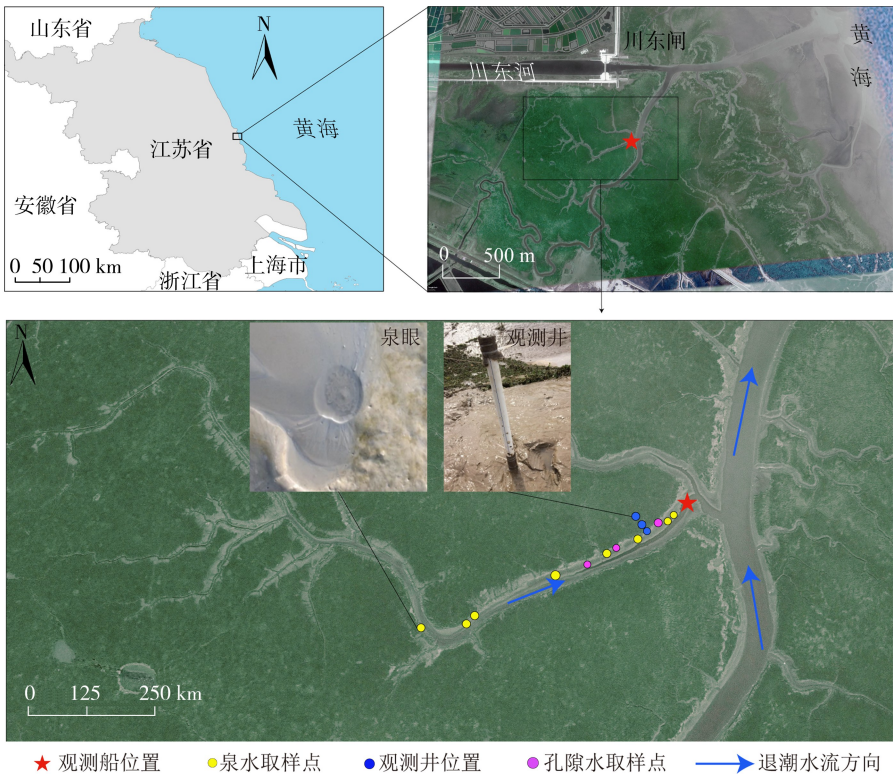


图 1 研究区监测采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring and sampling points in study area

研究区受黄河、淮河、长江三大水系泥沙输入影响,海岸线淤长迅速,形成了广袤的盐沼和滩涂^[18]。自更新世以来,研究区至少经历了 3 次海侵海退过程,形成了多层复杂的含水层结构。地质钻孔数据表明,地表以下 2 m 范围内有一薄层粉质黏土,潜水层主要由全新世粉砂质沉积物构成,深度一般在 40 m 以内,从第一层弱透水层底部至约 400 m 深处存在 4 个主要承压含水层。潜水层地下水主要为淹没时期的海水滞留,盐分较高,浅层地下水受降雨影响存在淡化^[12,14]。随着深度的增加,地下水盐度逐渐降低,深部承压含水层

赋存淡水。盐沼平台沉积物以粉质黏土、粉细砂为主,渗透性较差,但地表植被根系、生物孔洞能够有效促进水盐迁移^[13-14,19]。

2 研究方法

2.1 连续监测

于 2018 年 10 月 11—18 日在所选潮沟出口附近固定观测船(图 1),开展地表水连续监测:①在潮沟底部固定水位计(Solinst Levellogger 3001),连续记录涨落潮过程中的水深,测量间隔为 5 min;②船侧固定多参数水质仪(Hydrolab MS5),记录地表水水温、盐度,测量间隔为 10 min。地表水连续监测持续约 173 h,覆盖了从大潮至小潮过渡期间共 14 个完整的潮汐周期。在附近设置气象站(Vaisala WXT536),以 5 min 为测量间隔记录研究区降水量、气温。利用前期对该潮沟建立的数字高程模型(分辨率 1 m×1 m,高程精度优于 10 cm),结合潮沟水深数据,每 5 min 估算地表水监测点上游的地表总水量和淹没面积,并根据地表总水量变化估算地表水流量(涨潮流入为正,退潮流出为负)^[20]。第 10 个潮汐周期出现降雨过程,降水量为 6.8 mm。

2.2 样品采集及测试

采集了盐沼潮沟系统不同类型水样:①每隔 2 h 采集地表水样品,持续 24 h,在大潮、小潮期分别采样,共采集地表水样品 25 个;②不同深度的地下水,包括潮沟岸坡挖坑后渗出的浅层孔隙水 3 个(深度小于 1 m),观测井内采集的地下水样品 3 个(深度为 3.5 m),退潮后潮沟底部出现的自涌泉水 8 个(深度大于 10 m^[12])。现场用 YSI 测量了所有水样的盐度和温度。用 100 mL 聚乙烯瓶采集水样后密封冷藏,并及时送至河海大学水灾害防御全国重点实验室,选用质谱仪(MAT253)测试水样氢氧稳定同位素组成($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$), $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的精度分别为 2‰和 0.2‰。

2.3 地表水与地下水交换量估算模型

对一个封闭的潮沟地表水系统建立水-盐平衡模型(图 2),系统的水量输入项包括涨潮时潮水流入 V_{in} 、盐沼地层地下水向地表水排泄 V_{g-s} 、降雨补给 V_p ;输出项包括退潮时地表水流出 V_{out} 、地表水向地层补给 V_{s-g} 、蒸散发损失 V_E 。

在一个或多个完整的潮汐周期内,地表水系统水量平衡方程可表示为:

$$V_{in} + V_{g-s} + V_p = V_E + V_{out} + V_{s-g} \tag{1}$$

忽略降雨、蒸发过程引起的盐分总量变化,对应的盐分质量平衡方程可表示为:

$$S_{in} + S_{g-s} = S_{out} + S_{s-g} \tag{2}$$

式中: S_{in} 为涨潮期盐分质量输入; S_{g-s} 为地下水补给地表水的盐分质量; S_{out} 为退潮期盐分质量输出; S_{s-g} 为地表水补给地下水的盐分质量

各部分水、盐通量由现场连续监测数据计算得到,由于冬季蒸发量较小,可忽略,式(1)(2)可进一步表示为:

$$V_{g-s} - V_{s-g} = V_{out} - V_{in} - V_p \tag{3}$$

$$C_g V_{g-s} - C_s V_{s-g} = C_{out} V_{out} - C_{in} V_{in} \tag{4}$$

式中: C_g 为地下水排泄端元的盐度,取地下水样品盐度平均值; C_s 为地表水补给地下水的盐度,取涨潮时期地表水盐度加权平均值; C_{out} 、 C_{in} 分别为退潮和涨潮时期的地表水盐度。式(4)右边计算地表流入、流出盐分时,以 5 min 为时间间隔,在涨潮、退潮期间分别累加求和。联立(3)(4)计算潮汐过程中的 V_{s-g} 和 V_{g-s} ,以此揭示潮汐驱动下的地表水与地下水交换规律。

3 结果与分析

3.1 连续监测结果

14 个潮汐周期内地表水水深、流量、盐度、水温的变化如图 3 所示。监测期间,地表水深变化范围 0 ~

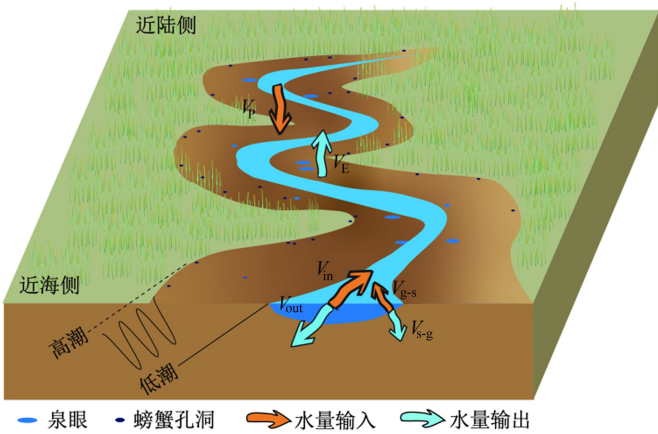


图 2 盐沼潮沟系统水量平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water balance in a salt marsh-tidal creek system

3.98 m,平均水深 1.57 m。本文以 1~4 潮汐周期代表大潮期,平均水深 1.78 m,平均潮差 3.74 m,以 10~13 潮汐周期代表小潮期,平均水深 1.36 m,平均潮差 2.86 m。地表流量变化范围为-6.2 ~7.7 m³/s,呈现明显的周期性变化,流量绝对值最大出现在涨潮、退潮的中期,从大潮期到小潮期流量存在明显降低趋势。监测期间地表水盐度变化范围 0~28.7‰,平均为 12.8‰,无明显周期性规律,高潮期盐度可高达 28.1‰,也可低至 0.7‰。地表水盐度的不规律变化与北部川东河口挡潮闸的影响有关,挡潮闸时常在低潮期开闸排泄淡水,在河口区域聚集的淡水在涨潮时进入附近盐沼潮沟系统,导致部分高水位时期出现低盐度的现象。然而,在退潮期,地表水盐度存在明显的上升趋势,在最低水位时趋于较高盐度水平(>25.0‰),表明退潮时有除海水以外的其他高盐分水补给。监测期间气温变化范围为 9.7~24.6℃,平均 17.2℃,呈现昼夜周期性变化。相较于气温,地表水水温波动小,变化范围为 14.9~22.5℃,平均为 19.2℃。水温随潮汐周期性波动规律明显,涨潮时水温上升,退潮时水温下降。大潮期水温变化范围 14.9~22.3℃,平均值为 18.7℃,小潮期水温变化范围 16.9~22.5℃,平均值为 19.6℃。

3.2 取样分析

根据地表水取样测试结果(图 4),地表水同位素组成及相应的盐度变化明显:大潮采样期间地表水 $\delta^2\text{H}$ 变化范围为-53.3‰~-21.3‰(平均值为-36.2‰), $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为-6.15‰~-1.51‰(平均值为-3.65‰),对应盐度变化范围为 3.3‰~26.6‰(平均值为 14.5‰);小潮采样期间地表水 $\delta^2\text{H}$ 变化范围-59.1‰~-21.1‰(平均值为-39.6‰), $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围-6.96‰~-1.61‰(平均值为-4.19‰),对应盐度变化范围为 1.7‰~27.9‰(平均值为 11.1‰)。 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、盐度与水深呈反相变化趋势。不同类型地下水盐度及同位素组成见表 1。盐沼平台观测孔内地下水盐度最低,重同位素最贫,表明受陆地降水影响显著;潮沟底部泉水盐度最高,重同位素最富集,特征接近海水;潮沟岸坡孔隙水盐度、同位素特征介于前两者之间。

图 3 地表水监测参数变化

Fig. 3 Variations of monitoring parameters in surface water

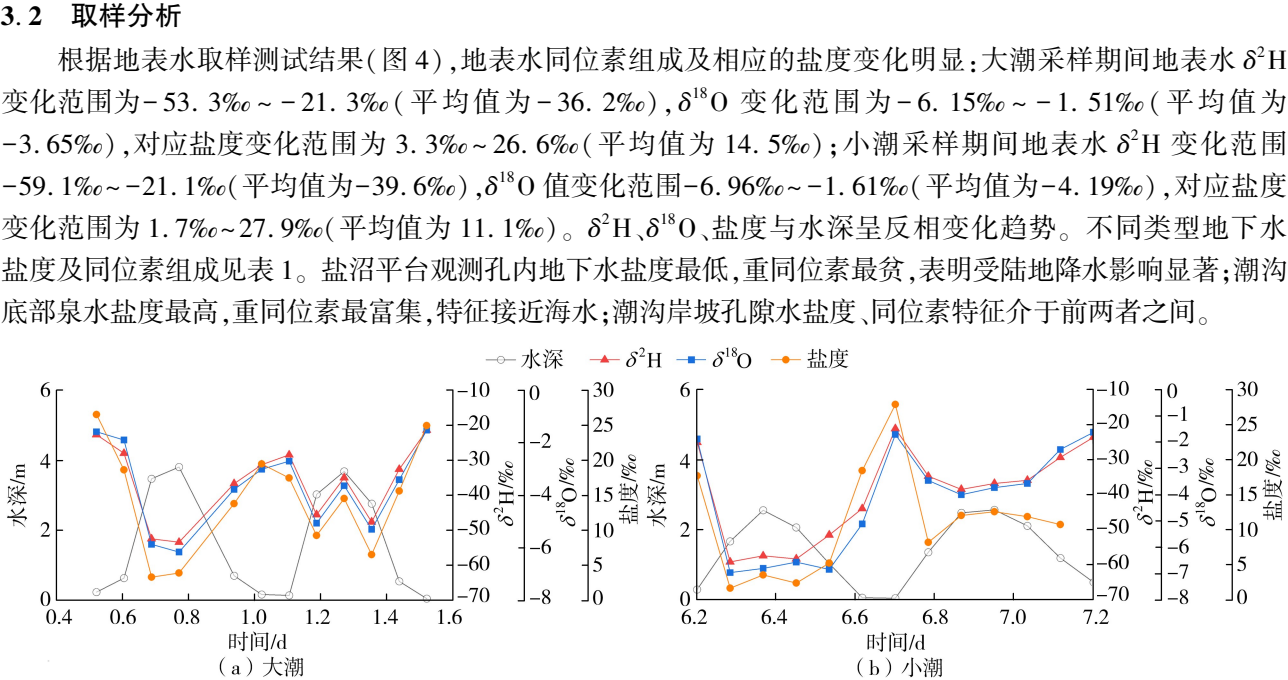


图 4 地表水盐度和同位素组成变化

Fig. 4 Variations of salinity and isotopic composition in surface water

表 1 地下水样品温度、盐度和同位素组成

Table 1 Temperature, salinity, and isotopic composition of groundwater samples

水样类型	深度/m	水温/℃	盐度/‰	同位素组成	
				$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
地表水		14.9~22.5(19.2)	0~28.7(12.8)	-59.1~-17.9(-37.7)	-7.23~-0.75(-3.89)
潮沟岸坡孔隙水	1	19.2~22.2(20.5)	15.2~19.7(18.2)	-25.2~-20.1(-22.6)	-2.30~-1.73(-2.01)
观测孔内地下水	3.5	18.1~20.6(19.7)	12.8~18.0(14.9)	-31.3~-23.8(-28.7)	-3.06~-2.48(-2.82)
潮沟底部泉水	>10	17.7~19.3(18.4)	22.7~27.7(25.3)	-20.4~-18.2(-19.2)	-1.82~-1.10(-1.39)

注:括号中数字为平均值。

3.3 地表水与地下水交换

图 5 为各潮汐周期过程中每 5 min 的水、盐进出通量变化,受地表流量过程的控制,地表水中盐通量整体呈现周期性变化。然而,由于地表水盐度的不规律变化,盐通量在不同潮汐周期的差异较大。涨落潮期,系统向外海输送大量盐分,大潮期的盐分平均净通量为 259 t/d,小潮期盐分平均净通量为 21 t/d,估算的 V_{s-g} 和 V_{g-s} 见表 2。涨落潮期进出水量基本平衡,以最大淹没面积 70 100 km² 计算,大潮期地表水补给率和地下水排泄率均为 79.3 cm/d;小潮期地表水补给率和地下水排泄率分别为 3.0 cm/d 和 2.6 cm/d。

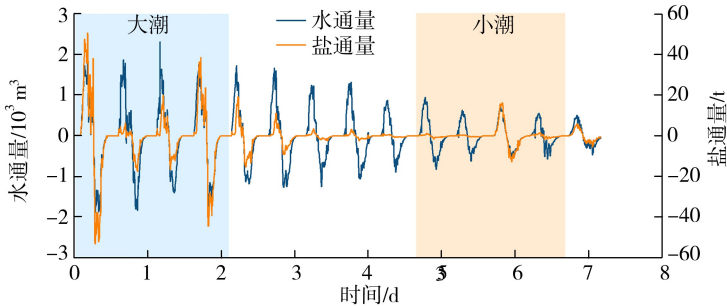


图 5 潮汐周期中地表水的水、盐通量变化量

Fig. 5 Variations of surface water and salt fluxes during tidal cycles

表 2 地表水与地下水交换量估算结果

Table 2 Estimation of surface water and groundwater exchange flux

潮汐	盐净通量/(t/d)	C_s /‰	C_g /‰	V_{s-g} /m ³	V_{g-s} /m ³	地表水平均补给率/(cm/d)	地下水平均排泄率/(cm/d)
大潮	259	14.8	19.5	118 069	118 090	79.3	79.3
小潮	21	7.0	19.5	4 205	3 742	3.0	2.6

4 讨 论

4.1 地表水与地下水交换规律

地表水同位素组成呈现周期性波动,低水位时重同位素富集,高水位时重同位素贫化。由图 6 可知,地表水沿川东河水与地下水之间的混合线分布,进一步揭示了涨落潮期地表水中水体的组分来源,即涨潮期受到较低盐度的河口淡水影响,重同位素逐渐贫化,地表水盐度逐渐降低;退潮期地下水的混合比例上升,重同位素逐渐富集,盐度升高。不同位置和深度的地下水显示出明显的盐度和同位素组成特征差异,这与詹泸成等^[14]利用高密度电法仪的测量结果一致。盐沼平台位于潮上带,几乎不受潮汐淹没影响,3.5 m 深观测孔内地表水盐度最低。根据前期研究,盐沼平台的浅层地下水因降雨入渗而发生明显淡化。潮沟底部泉水盐度最高,主要是因为盐沼下部含水层滞留历史海水,泉水来自潜水层中高盐分地下水的垂向排泄^[12]。近潮沟的浅层孔隙水是盐沼系统中最为复杂的区域,盐度和同位素值整体处于中间水平,这与潮沟岸坡的周期性潮汐淹没、地表水与地下水相互作用有密切关系。

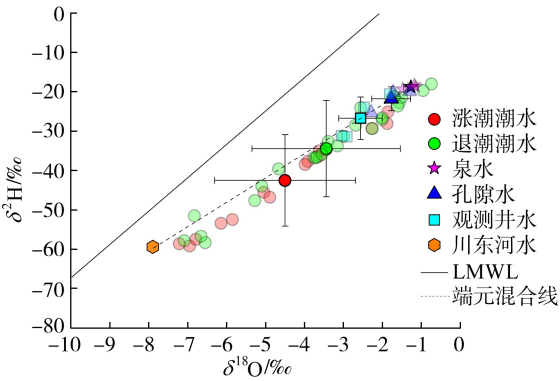


图 6 地表水、地下水 $\delta^2\text{H}\sim\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 6 $\delta^2\text{H}\sim\delta^{18}\text{O}$ relationship of surface water and groundwater

盐沼系统地表水与地下水交换主要受潮汐过程的驱动^[4,21]。涨潮时,潮水通过潮沟进入盐沼系统,并在淹没期间向潮沟岸坡附近地层侧向入渗;退潮时,地下水从潮间带沉积物中渗出,并进入地表水。研究区土壤渗透性较差,且盐沼平台高程较高,地表水的侧向补给难以到达盐沼平台内部,靠近潮沟附近的地层是地表水入渗和地下水排泄的热点区域。潮汐驱动下的近潮沟孔隙水交换,被认为是盐沼系统地表水与地下水交换的主要形式^[7,22-23]。根据采样分析结果(图 3、图 4、图 6),随着退潮时水位下降,地表水盐度、同位素组成逐渐接近潮沟岸坡孔隙水,体现了退潮过程中浅层孔隙水排泄对地表水的补给作用。在接近潮沟岸坡的

高潮位附近区域,存在大量螃蟹等底栖动物的孔洞,能够有效促进地表水和地下水的交换^[13]。

由表 2 可知,大潮期发生在潮沟系统内的地表水补给和地下水排泄通量远超过小潮期,这一现象与 de Sieres 等^[24-26]通过质量平衡模型和达西定律在盐沼系统的研究结果一致。潮间带地表水与地下水交换的驱动力主要来自地表水、地下水之间的水位差。大潮期,研究区地表水位平均值、波动幅度是小潮期的 1.3 倍,对应的地表水与地下水交换量可达小潮期的 26~30 倍,表明在低渗透性盐沼潮沟系统中,潮汐水位条件对地表水与地下水交换通量有显著影响。一方面,大潮期较大的水位变幅引起更大的水力梯度,有助于增大涨潮时地表水向地层入渗和退潮时的地下水排泄速率;另一方面,大潮期潮汐引起的淹没范围更大,且覆盖了高潮滩附近的螃蟹孔洞密集区域,具有更多的地表水与地下水交换优先通道。

盐沼系统发生着不同时空尺度的地表水与地下水交换过程,除了潮汐周期尺度以外,还存在更长时间尺度的交换过程^[25,27]。研究区中,随着退潮时水位的进一步下降,地表水盐度、同位素值进一步升高并超过岸坡孔隙水,逐渐接近潮沟底部泉水的特征。潮沟底部排泄的高盐分泉水并非来自潮汐驱动,在高水位期间仍然发生,是几十年尺度的滞留海水排泄过程^[12]。相对于涨潮期,退潮期的地表水总盐分明显增加,同位素平均值明显增大。虽然本文未能量化泉水的补给量,但这一现象表明,以泉眼形式出现的更大时空尺度的地下水排泄,是低渗透性盐沼系统中不可忽略的地表水与地下水交换形式之一。

4.2 地表水与地下水交换的水-盐-热效应

海岸带海底地下水排泄包括陆源地下水排泄和再循环海水,其中后者占 90%以上^[16]。海岸带系统的地表水与地下水交换过程对应了海水的局部再循环过程,海水在水力梯度驱动下在界面发生不同时空尺度的交换,该过程对陆海净流量贡献不大^[16]。根据水盐平衡模型结果,观测期间地表水对地层的补给量和地下水排泄量基本相当,表明研究区盐沼潮沟系统的地表水与地下水交换过程并没有引起显著的地表水量变化。虽然该过程产生的净通量几乎可以忽略,但对于维持盐沼生态系统具有重要作用。涨潮时地表水向周围含水层补给,引起地下水位上升,退潮时地下水携带地层物质向潮沟排泄,该过程被称为“潮汐泵”。波动的地下水通过毛细作用向浅层土壤补给并通过蒸散发向大气耗散,与地表降雨过程共同调节着浅层土壤的水盐平衡,对地表植被、底栖动物生长起关键作用^[28]。此外,地表水与地下水交换过程动态调节了浅层土壤的饱和度,对植物根系呼吸、微生物降解等生物地球化学过程具有重要影响^[29-31]。

盐分是盐沼系统中最关键的物质之一,地表水盐度水平影响微生物群落组成和生物化学过程^[32-33],而地下水盐分的时空分布直接决定了盐沼生态系统格局的分布和演变^[14,34]。盐分分布受不同高程下的地表水与地下水交换过程、降雨、蒸发等过程共同控制,再加上地层分层、生物扰动、植被生长等各类非均质因素的影响^[13-14,31,35],盐沼地层地下水盐分也存在较大的空间差异。降雨和蒸发过程主要引起表层的盐分变化,而地表水与地下水交换过程驱动着盐沼系统内部的盐分输运。由表 2 可知,盐沼潮沟系统向外部输送大量盐分,平均盐分通量可达 140 t/d。潮上带盐沼平台存在明显淡化^[14],盐随水走,地层中减少的盐分通过地下水排泄进入地表潮沟,并最终汇入海洋。研究区盐沼地层是由陆海动力作用下的泥沙淤积而成,过程中海水盐分以孔隙水的形式保留在地层中,由于地层的低渗透性,盐分在较长时间尺度下缓慢向外排泄。除了潮汐驱动下的地表水与地下水交换携带盐分排泄以外,盐沼潮沟系统存在更大时空尺度上的盐分排泄过程^[36-37]。地球物理测量和地球化学分析证实,潮沟底部出现的泉水是发生在至少数十年尺度下的深层古海水盐分排泄过程^[12]。地表水盐度在退潮时甚至超过了盐沼内部地下水盐度水平,表明除了潮间带地表水与地下水交换以外,更深处的地下水排泄过程对盐沼系统盐分平衡的作用应当受到进一步关注。

地表水与地下水交换过程除了影响盐沼系统水、盐等物质循环以外,还影响着热交换,参与能量循环过程。相对于地表水,地下水温度相对稳定,除了近地表地下水受气温波动影响和更深层地下水受地温梯度影响以外,浅层含水层系统地下水温度一般稳定在全年气温平均值附近^[4]。本研究中地表水温度存在明显波动,虽然观测期间地表水平均温度与地下水温度之间相差不大,但地表水与地下水交换过程对盐沼地层和地表水温度的影响不可忽略。一方面,潮汐驱动下水-土界面的地表水与地下水交换调节了附近盐沼地层的温度分布,与大气边界共同控制着盐沼地层的温度分布和变化,驱动着系统内部的生物地球化学过程^[38]。另一方面,温度较为恒定的地下水排泄进入地表系统后,改变了地表水的温度水平和时空分布,对近海地表水生态系统和微生物活动都有重要的影响^[33]。近年来,海岸带系统地下水排泄的热效应开始逐渐受到关注^[38-40],盐沼潮沟系统地表水与地下水交换所引起的热效应机制和重要性需引起重视。值得注意的是,本

研究中以泉眼形式出现的深层地下水排泄,在排泄地层盐分的同时也改变着地表水的温度变化,特别是在温度差异较大的夏季和冬季,该过程将如何影响地表水生态系统,需开展进一步研究。

5 结 论

- a. 受潮汐作用下的咸淡水混合过程影响,江苏典型盐沼潮沟系统地表水同位素组成和盐度存在明显的时间变化。地下水同位素和盐度特征存在显著的空间差异,与降雨入渗、潮汐淹没、深层地下水排泄有关。
- b. 盐沼潮沟系统地表水与地下水交换主要受潮汐驱动,涨潮时地表水向地层入渗,退潮时地下水向地表排泄。地表水与地下水交换量受潮汐条件影响显著,平均水位更高、振幅更大的大潮期交换通量可达小潮期的 26~30 倍。
- c. 潮汐过程中地表水补给量和地下水排泄量相当,引起的净水通量可忽略,但地表水与地下水交换引起地层盐分大量排泄,平均盐分净通量可达 140 t/d。值得注意的是,系统内存在的深层滞留海水排泄过程,对水、盐、热通量的影响不可忽略。

参考文献:

[1] 李金帅,郝天象,杨萌,等. 中国自然湿地生态系统碳循环关键过程及增汇途径[J]. 中国科学:地球科学,2024,54(8): 2478-2495. (Li Jinshuai,Hao Tianxiang,Yang Meng,et al. Key processes of carbon cycle and sink enhancement paths in natural wetland ecosystems in China[J]. Scientia Sinica Terrae,2024,54(8):2478-2495. (in Chinese))

[2] 牟晓杰,刘兴土,阎百兴,等. 中国滨海湿地分类系统[J]. 湿地科学,2015,13(1):19-26. (Mou Xiaojie,Liu Xingtu,Yan Baixing,et al. Classification system of coastal wetlands in China[J]. Wetland Science,2015,13(1):19-26. (in Chinese))

[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] Xin Pei,Wilson A,Shen Chengji,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.

[5] 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):eabn1479.

[6] Schwarz C,van Rees F,Xie Danghan,et al. Salt marshes create more extensive channel networks than mangroves[J]. Nature Communications,2022,13(1):2017.

[7] Chen Xiaogang,Santos I R,Hu Duofei,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.

[8] Chen Xiaogang,Santos I R,Zhan Lucheng,et al. Large porewater exchange reshapes saltmarsh carbon and greenhouse gas budgets on local and global scales[J]. Science China Earth Sciences,2024,67(7):2195-2209.

[9] Yau Y Y Y,Xin Pei,Chen Xiaogang,et al. Alkalinity export to the ocean is a major carbon sequestration mechanism in a macrotidal saltmarsh[J]. Limnology and Oceanography,2022,67(Sup2):S158-S170.

[10] 陈小刚,李凌,杜金洲. 红树林和盐沼湿地间隙水交换过程及其碳汇潜力[J]. 地球科学进展,2022,37(9):881-898. (Chen Xiaogang,Li Ling,Du Jinzhou. Porewater exchange and the related carbon sink potential in mangroves and saltmarshes[J]. Advances in Earth Science,2022,37(9):881-898. (in Chinese))

[11] Xiao Kai,Wu Yuchen,Pan Feng,et al. Widespread crab burrows enhance greenhouse gas emissions from coastal blue carbon ecosystems[J]. Communications Earth & Environment,2024,5(1):437.

[12] Zhan Lucheng,Xin Pei,Chen Jiansheng,et al. Sustained upward groundwater discharge through salt marsh tidal creeks[J]. Limnology and Oceanography Letters,2024,9(1):62-69.

[13] 应征涛,詹泸成,唐洪根,等. 螃蟹扰动作用对滨海湿地水盐交换的影响[J]. 水资源保护,2021,37(3):152-157. (Ying Zhengtao,Zhan Lucheng,Tang Honggen,et al. Effects of crab disturbance on water and salt exchange in coastal wetlands[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):152-157. (in Chinese))

[14] 詹泸成,梁嘉颖,何晓冬. 潮上带盐沼地层盐分分布及形成机制[J]. 水科学进展,2023,34(5):788-797. (Zhan Lucheng,Liang Jiaying,He Xiaodong. Salt distribution and formation mechanism in supratidal saltmarsh stratum[J]. Advances in Water Science,2023,34(5):788-797. (in Chinese))

[15] 刘花台,郭占荣. 海底地下水排泄的研究进展[J]. 地球科学进展,2014,29(7):774-785. (Liu Huatai,Guo Zhanrong. A review on submarine groundwater discharge[J]. Advance in Earth Sciences,2014,29(7):774-785. (in Chinese))

[16] Zhang Yan, Wang Xuejing, Xue Yan, et al. Advances in the study of submarine groundwater discharge (SGD) in China[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(10): 1948-1960.

[17] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 盐城自然保护区盐沼植被分布动态监测及驱动力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 88-95. (Luo Feng, Dai Jiancheng, Chen Zhipeng, et al. Dynamic monitoring and driving force analysis of salt marsh vegetation distribution in Yancheng Nature Reserve[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 88-95. (in Chinese))

[18] 李静,张亚年,梁杏,等. 江苏滨海平原弱透水层封存的古咸水及其运移过程[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 90-98. (Li Jing, Zhang Yanian, Liang Xing, et al. Paleo-salt porewater trapped in the clayey aquitard and its transport processes in Jiangsu coastal plain[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 90-98. (in Chinese))

[19] Xiao Kai, Pan Feng, Santos I R, et al. Crab bioturbation drives coupled iron-phosphate-sulfide cycling in mangrove and salt marsh soils[J]. Geoderma, 2022, 424: 115990.

[20] Maher D T, Santos I R, Golsby-Smith L, et al. Groundwater-derived dissolved inorganic and organic carbon exports from a mangrove tidal creek: the missing mangrove carbon sink? [J]. Limnology and Oceanography, 2013, 58(2): 475-488.

[21] Guimond J, Tamborski J. Salt marsh hydrogeology: a review[J]. Water, 2021, 13(4): 543.

[22] Santos I R, Eyre B D, Huettel M. The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: a review [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 98: 1-15.

[23] Burnett W C, Bokuniewicz H, Huettel M, et al. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone[J]. Biogeochemistry, 2003, 66(1/2): 3-33.

[24] de Sieyes N R, Yamahara K M, Layton B A, et al. Submarine discharge of nutrient-enriched fresh groundwater at Stinson Beach, California is enhanced during neap tides[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(4): 1434-1445.

[25] 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): 4198-4207.

[26] de Sieyes N R, Yamahara K M, Paytan A, et al. Submarine groundwater discharge to a high-energy surf zone at Stinson Beach, California, estimated using radium isotopes[J]. Estuaries and Coasts, 2011, 34(2): 256-268.

[27] Santos I R, Burnett W C, Chanton J, et al. Land or ocean?: assessing the driving forces of submarine groundwater discharge at a coastal site in the Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114(C4): C04012.

[28] Chen Xiaogang, Zhu Peiyuan, Zhang Yan, et al. Plum rain enhances porewater greenhouse gas fluxes and weakens the acidification buffering potential in saltmarshes[J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128686.

[29] 张胜东,赵世彬,陈烨,等. 海底地下水排放对南黄海沿岸海水细菌群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12): 4942-4952. (Zhang Shengdong, Zhao Shibin, Chen Ye, et al. Effects of submarine groundwater discharge on bacterial community structure in the coastal waters of South Yellow Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12): 4942-4952. (in Chinese))

[30] Wilson A M, Evans T, Moore W, et al. Groundwater controls ecological zonation of salt marsh macrophytes[J]. Ecology, 2015, 96(3): 840-849.

[31] Xu Xinghua, Xin Pei, Zhou Tingzhang, 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.

[32] 李雪,董杰,韩广轩,等. 黄河三角洲典型滨海盐沼湿地土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放对水盐变化的响应[J]. 植物生态学报, 2023, 47(3): 434-446. (Li Xue, Dong Jie, Han Guangxuan, et al. Response of soil CO₂ and CH₄ emissions to changes in moisture and salinity at a typical coastal salt marsh of Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(3): 434-446. (in Chinese))

[33] 周光扬,周鹏鹏,王广才,等. 海岸带地下水中氮生物地球化学过程研究进展[J]. 环境化学, 2024, 43(3): 987-998. (Zhou Guangyang, Zhou Pengpeng, Wang Guangcai, et al. Research progress on nitrogen biogeochemical processes in coastal groundwater [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(3): 987-998. (in Chinese))

[34] 詹泸成,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 Lucheng, Ma Fenyan, Chen Jiansheng, 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))

[35] Zhan Lucheng, Xin Pei, Chen Jiansheng. Subsurface salinity distribution and evolution in low-permeability coastal areas after land reclamation: field investigation[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128250.

[36] Wang Ya, Jiao J J. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 438-439: 112-124.

[37] Larsen F,Tran L V,van Hoang H,et al. Groundwater salinity influenced by Holocene seawater trapped in incised valleys in the Red River delta plain[J]. Nature Geoscience,2017,10(5):376-381.

[38] Yu Xiayang,Xin Pei,Pu Li. Thermal effects on flow and salinity distributions in heterogeneous coastal aquifers with fixed-flux inland boundaries[J]. Frontiers in Environmental Science,2022,10:1002587.

[39] Nguyen T T M,Yu Xiayang,Pu Li,et al. Effects of temperature on tidally influenced coastal unconfined aquifers[J]. Water Resources Research,2020,56(4):e2019WR026660.

[40] Pu Li,Xin Pei,Nguyen T T M,et al. Thermal effects on flow and salinity distributions in coastal confined aquifers[J]. Water Resources Research,2020,56(10):e2020WR027582.

(收稿日期:2024-10-14 编辑:刘晓艳)

(上接第 44 页)

[11] 李铠峰,赵超,李文戡,等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025,53(1):25-30. (Li Kaifeng,Zhao Chao,Li Wenyu,et al. Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):25-30. (in Chinese))

[12] 徐嘉远,邹磊,夏军,等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):104-110. (Xu Jiayuan,Zou Lei,Xia Jun,et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):104-110. (in Chinese))

[13] 刘莉,梁霄,Wang Qunjun,等. 基于深度学习的改进 ERRIS 径流预报实时校正模型[J]. 水资源保护,2024,40(6):155-164. (Liu Li,Liang Xiao,Wang Qunjun,et al. Improved ERRIS model for real-time correction of streamflow forecast based on deep learning[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):155-164. (in Chinese))

[14] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护,2024,40(3):106-115. (Ju Qin,Wu Jinyu,Wang Xingping,et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):106-115. (in Chinese))

[15] 嵇晓燕,杨凯,陈亚男,等. 基于 ARIMA 和 Prophet 的水质预测集成学习模型[J]. 水资源保护,2022,38(6):111-115. (Ji Xiaoyan,Yang Kai,Chen Ya'nan,et al. An ensemble learning model for water quality forecast based on ARIMA and Prophet [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):111-115. (in Chinese))

[16] Sahoo B B,Jha R,Singh A,et al. Long short-term memory (LSTM) recurrent neural network for low-flow hydrological time series forecasting[J]. Acta Geophysica,2019,67(5):1471-1481.

[17] Wang Yiyang,Wang Wenchuan,Xu Dongmei,et al. A compound approach for ten-day runoff prediction by coupling wavelet denoising,attention mechanism,and LSTM based on GPU parallel acceleration technology[J]. Earth Science Informatics,2024,17(2):1281-1299.

[18] Hosseini F,Prieto C,Álvarez C. Hyperparameter optimization of regional hydrological LSTMs by random search;a case study from Basque Country,Spain[J]. Journal of Hydrology,2024,643:132003.

[19] 王维,鞠琴,王国庆,等. CN05.1 格点降水数据在渭河流域适用性评估及应用[J]. 水文,2022,42(6):88-92. (Wang Wei,Ju Qin,Wang Guoqing,et al. Applicability assessment of CN05.1 gridded precipitation dataset in Weihe River Basin[J]. Journal of China Hydrology,2022,42(6):88-92. (in Chinese))

[20] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报,2013,56(4):1102-1111. (Wu Jia,Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013,56(4):1102-1111. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-14 编辑:刘晓艳)