

黄安定, 蒋雪中, 陈沈良. 黄河三角洲北部自然保护区生态补沙定量分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 15-21.

黄河三角洲北部自然保护区生态补沙定量分析

黄安定¹, 蒋雪中^{2*}, 陈沈良¹

(1 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2 华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200241)

摘要:自 1976 年黄河尾闾改道以来, 流往黄河三角洲北岸的刁口河段结束行水, 海岸失去陆源泥沙补给后在海洋动力的作用下发生持续侵蚀, 黄河三角洲北部自然保护区湿地生态资源面临威胁。为了解黄河三角洲北部自然保护区近几十年来水下地形的冲淤变化, 并对未来侵蚀形势进行估计, 根据黄河三角洲北岸实测水深资料, 运用空间插值分析技术, 计算各时期研究区水下地形并叠加分析。结合黄河利津站历史来水来沙资料的统计, 尝试提出在新水沙形势下对黄河三角洲北岸的分沙补偿侵蚀定量方案。结果表明, 1992—2015 年, 该区常年发生持续冲刷, 年均侵蚀量为 0.29×10^8 t, 年均侵蚀厚度为 0.14 m, 侵蚀速率稳定。经计算, 在干流水库调水调沙期间通过刁口河道以约 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 的流速持续引水 19 d, 可以有效缓解该自然保护区的侵蚀现状, 具体的方案和工程实施仍需后续细化。

关键词:黄河三角洲; 海岸侵蚀; 引沙治理

中图分类号: TV148; X171.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.221

0 引言

海岸带湿地作为全球湿地的重要组成部分, 发育了独特的生态系统, 是动植物重要栖息场所, 具有极高的生态价值^[1]。在海平面上升和河流入海水沙减少的形势下, 海岸的侵蚀后退造成滨海环境水深增大、底质流失、潮水作用增强, 使原有生物的生境受到破坏^[2], 对海岸带湿地生态系统的维持构成威胁。

作为海岸带湿地的保护区域, 位于黄河三角洲北岸刁口河入海口的黄河三角洲北部自然保护区在 1976 年黄河入海流路由刁口河改至清水沟后, 失去径流和泥沙供给达 30 多年, 新流路泥沙扩散无法到达黄河三角洲北岸^[3], 因此, 保护区在面临缺水引起的生态退化的同时, 侵蚀也在所难免。刁口

河作为《黄河河口综合治理规划》指定的备用流路, 是该区域的直接径流和泥沙来源, 其重新启用方式已有众多研究^[4]。2009 年以来, 有关部门对刁口河流路实施数次生态调水, 刁口河流路断流数十年来重新过流, 北部自然保护区缺水现象得到缓解^[5]。有学者对生态调水所带来的效应进行研究, 认为生态调水给湿地生态环境的修复带来一定积极作用^[5-6]。然而, 目前生态调水的目的仅局限于补充湿地所需淡水, 且补充水量较少; 对刁口河调水的研究主要集中在自然保护区的生态修复方面, 对通过引沙缓解北岸自然保护区侵蚀现象的关注较少^[7], 有待进一步研究。

本研究尝试利用水下地形资料, 对黄河三角洲北部自然保护区的侵蚀进行时空定量分析, 结合黄河干流利津站来水来沙情势, 提出启用刁口河流路向北部自然保护区输沙以缓解保护区的海滩侵蚀的初步方案。

1 研究区概况

黄河三角洲北部自然保护区位于黄河故道刁口河入海口两侧原新淤地带, 占地面积 $484.8\ \text{km}^2$, 和位于现行河口的南部自然保护区统称为黄河三

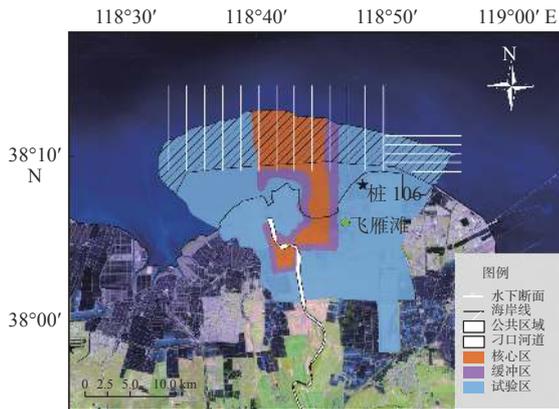
收稿日期: 2019-12-25

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405503); 国家自然科学基金(U1706214)

作者简介: 黄安定(1994—), 男, 在读硕士, 主要从事海岸带地貌演变研究工作. E-mail: 51173904003@stu.ecnu.edu.cn

* 通讯作者: 蒋雪中(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事流域—海岸带管理研究工作. E-mail: xzjiang@sklec.ecnu.edu.cn

角洲自然保护区,是中国第2大的海岸带湿地^[8]。保护区从里到外分为核心区、缓冲区和试验区。1990年,东营市政府批准该保护区为当地自然保护区;1992年10月,为保护新生的湿地生态系统,经国务院批准升级为国家级自然保护区,并禁止在核心区开展人类活动^[9]。保护区内有飞雁滩油田,属胜利油田滩海油区。东侧岸段为桩106堤,建于20世纪80年代末^[10],为防护岸段,岸线平直。西侧岸段大部分为自然岸段,岸线弯曲(图1)。



底图为2017年9月30日Landsat 8合成假彩色影像

图1 研究区域和资料

Fig.1 Sketch map of the study area

该区地势平缓,地面顺原河道行水方向呈约0.1‰的比降^[7]。潮汐类型为不正规半日潮,潮差约为1~2 m^[10],潮间带宽度约为12 km。研究区强浪为NE向,波浪频率为10.3%,最大波高约为5 m^[9], $H_{1/10}$ 波高3.1 m^[10]。

2 资料和方法

实测水深数据为1992、2000、2007、2015年黄河三角洲滨海区加密测深断面,平面定位精度<3 m,水深精度为0.4%±5 cm。取覆盖黄河三角洲北部自然保护区的部分,相邻断面距离约为2 km,同一断面相邻点距离约为300 m。投影坐标采用基于北京54地理坐标系的3°分带法高斯-克吕格投影坐标系,中央经线位于117°E,水深起算面为黄海基面。采用ANUDEM插值方法对测深断面进行插值,设定结果像元大小为30 m×30 m,得到各期研究区水下地形栅格,其投影坐标系与原数据保持一致。测深断面为加密测量的断面,保证了插值后水下地形的可靠性。对各期水下地形栅格进行空间叠加和代数计算,绘制水下地形图、等深线图和冲淤变化图。

由于每次测量时瞬时潮位和地形不同,起测点位置并不一致,导致得到的研究区内各期水下地形面积不同。为计算垂直方向年侵蚀厚度,借助ArcGIS的交集运算,获得水下地形的重合区域,利用填挖方工具,计算各期水下地形重合区域在0 m水深以下的容积,在时间上进行趋势分析。以同样的方法,计算水下地形非重合区域的冲淤变化,综合二者得到研究区的年侵蚀土方量。

水沙数据采用黄河利津站2002—2014年日来水来沙数据,对年内流量分配和流速变化进行统计,以确定生态补沙的最佳时段。

3 结果分析

3.1 黄河三角洲北部自然保护区侵蚀分析

3.1.1 水下地形分析

对测深断面水深点插值后得到的各期水下地形(图2),参照2017年海岸线位置,岸坡受侵蚀逐渐后退,1992年以来0 m以上自然保护区面积持续缩小,各年测深断面起测点向海延伸,水下地形面积从1992年至2015年逐渐增大,断面末端水深也不断增加。

进一步比较(表1)可知,1992—2015年研究区平均水深连续增大且增大速率为7 cm/a;最大水深连续增大,增大速率为20 cm/a。自然保护区内桩106海堤提前水深在2007—2015年间>4 m水深的区域在不断扩大。

表1 水下地形水深变化情况

Table 1 Water-depth variation of study area

年份	1992	2000	2007	2015
最大水深/m	4.2	5.9	8.1	8.9
平均水深/m	1.8	2.1	2.8	3.4

3.1.2 冲淤变化分析

对不同年份间地形的冲淤变化进行分析(图3)。从较长年代尺度来看,1992—2015年黄河三角洲自然保护区近岸冲刷较为强烈,平均冲刷深度为2.4 m,最大冲刷厚度可达7.0 m,冲刷最强烈区域位于桩106堤前海域。从较短时间尺度来看,1992—2000年最大冲刷厚度为2.5 m,平均冲刷厚度0.7 m,冲刷最强烈区域分布在保护区边缘。2000—2007年最大冲刷厚度为4.3 m,冲刷最强烈区域集中在桩106堤外,达2~4 m,其它区域冲刷厚度不超过2 m。

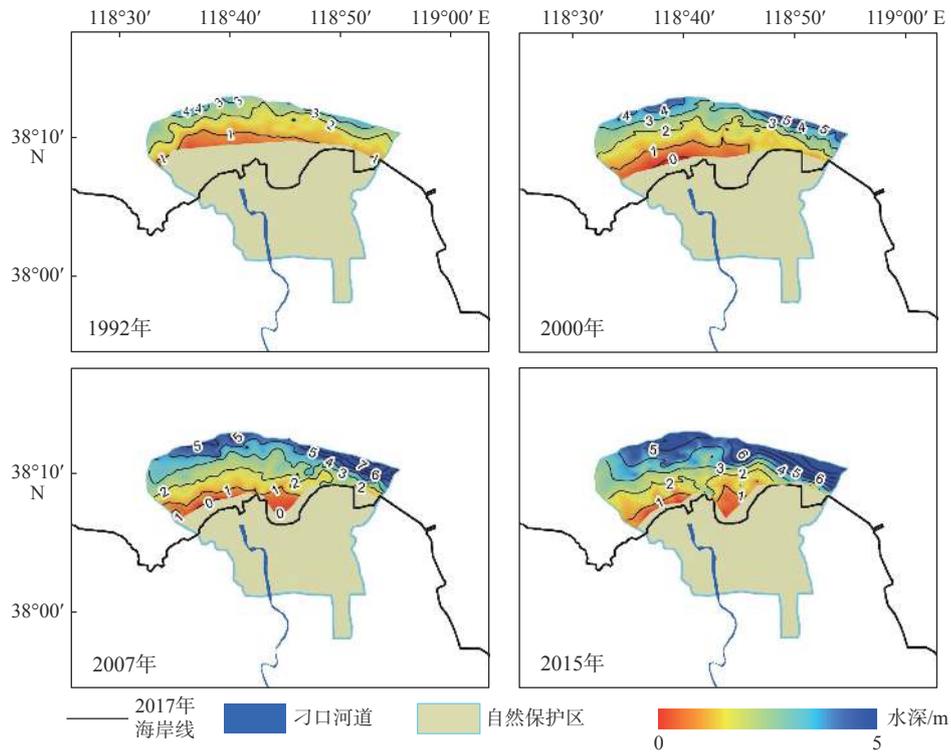


图 2 黄河北部自然保护区内水下地形图

Fig.2 Underwater topography of YRDNNR

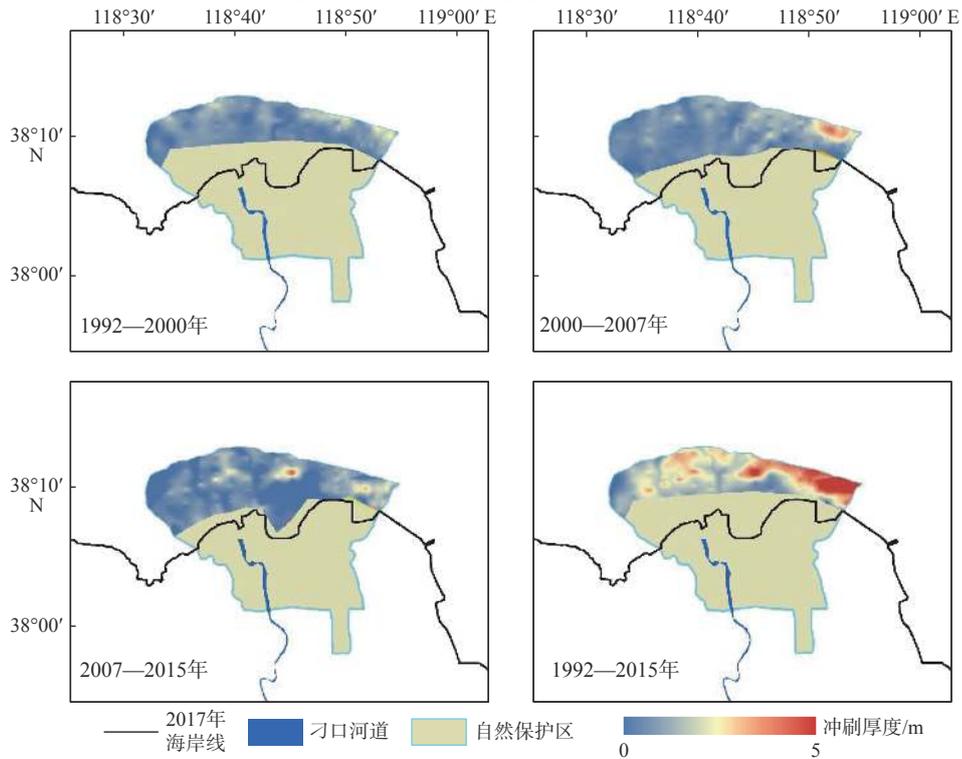


图 3 黄河北部自然保护区冲淤变化图

Fig.3 Erosion and deposition distribution of YRDNNR

2007—2015年平均冲刷深度 0.5 m, 最大冲刷厚度 4.5 m。总体而言,冲刷主要集中在桩 106 堤前海域,

随着近堤脚不断刷深,海堤面临被侵蚀破坏的危险情势。

3.1.3 等深线变化分析

1992—2015 年, 研究区 1~4 m 的等深线呈现不断蚀退的趋势, 但不同深度不同位置等深线蚀退

的速率不一致(图 4)。由于-4 m 以下的等深线只出现于 2007 和 2015 年, 故不作分析。利用 DSAS 软件分析得到各等深线蚀退速率(表 2)。

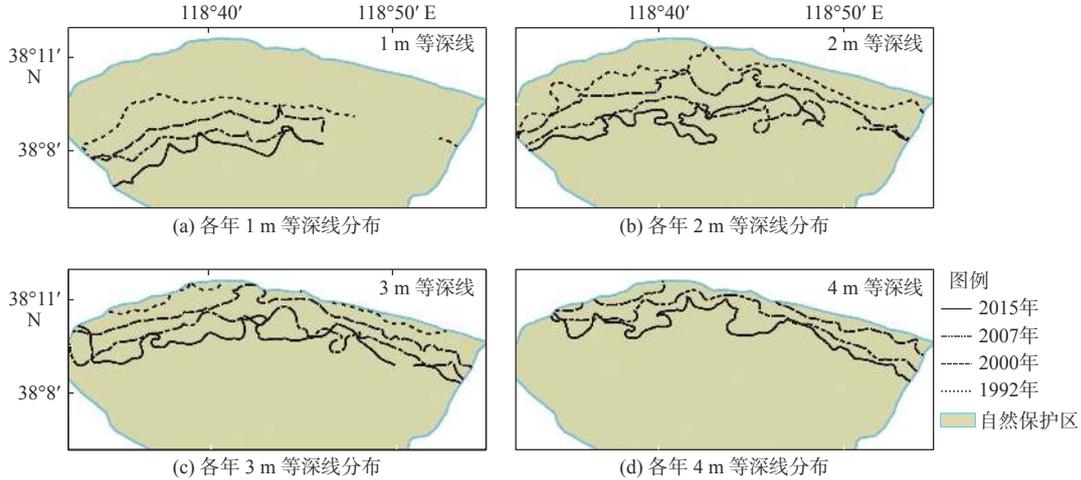


图 4 黄河北部自然保护区不同年份等深线变化图

Fig.4 The contours of YRDNNR in different years

表 2 黄河三角洲北部自然保护区各等深线后退速率
Table 2 The receding rates of isohypsies of YRDNNR

时段	时长/a	等深线/m	后退距离/km	后退速率/km·a ⁻¹
1992—2000	8	1	1.6	0.20
		2	1.2	0.16
		3	1.1	0.14
		4	—	—
2000—2007	7	1	1.3	0.18
		2	1.6	0.23
		3	1.3	0.19
		4	1.1	0.16
2007—2015	8	1	0.8	0.10
		2	0.2	0.03
		3	0.7	0.09
		4	0.9	0.12
1992—2015	23	1	3.7	0.16
		2	3.0	0.14
		3	3.0	0.13
		4	—	—

注: 1992 年的 4 m 等深线在研究区范围外, 因此不分析 1992—2000、2000—2015 年的等深线后退情况。

除 1 m 等深线外, 其余等深线走向较为混乱, 这可能是插值方法所致。尽管在局部等深线发生前进, 但是总体是后退的。由表 2 可知, 1992—2015 年黄河三角洲北部自然保护区 1~4 m 等深线均发生后退, 总后退距离为 3~4 km, 年平均后退速率为 0.13~0.16 m。水深较浅处后退速率比较大, 这可能是 0 m 附近受风浪作用更强所致。计算得到 1992—2015 年研究区 2 m 等深线平均后退速率为 0.14 m·a⁻¹, 对比前人计算所得的 1976—1999 年飞雁滩 2 m 等深线平均后退速率 0.34 m·a⁻¹, 说明侵蚀存在一定程度的减缓。

3.1.4 侵蚀土方量计算和预测

从 0 m 水平面到海底的容积的变化可以表征侵蚀量。容积增大, 则海岸侵蚀, 反之亦然。以 0 m 水深为起算水深, 统计该深度以下容积的变化(表 3)。

表 3 自然保护区各期水下地形 0 m 水深以下容积
Table 3 The volumes below 0 m of underwater topography in YRDNNR

	/10 ⁸ m ³			
年份	1992	2000	2007	2015
重合区域	2.95	4.11	5.61	6.89
非重合区域	0	0.40	0.70	0.96
总研究区域	2.95	4.51	6.31	7.85

以年份为自变量, 重合、非重合区域和总区域 0 m 水深以下容积为因变量进行趋势分析(图 5), 相

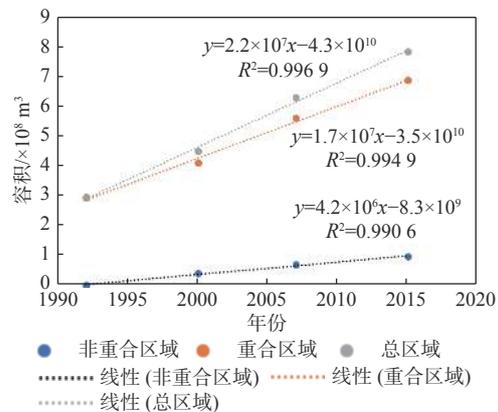


图 5 黄河三角洲北部自然保护区 0 m 水深以下容积变化

Fig.5 The trend of volumes below 0 m in YRDNNR

关系数 R^2 均 >0.99 。这说明该区域在过去约 30 年来, 在缺少泥沙供给的单一海洋动力作用下, 持续侵蚀。计算得重合区域年侵蚀土方量为 $0.17 \times 10^8 \text{ m}^3$, 得平均年侵蚀厚度为 0.14 m。结合非重合区域侵蚀量, 黄河三角洲北部自然保护区年总侵蚀土方量为 $0.22 \times 10^8 \text{ m}^3$, 又根据师长兴研究所得黄河三角洲海岸表层沉积物干容重 1.36 g/cm^3 ^[11], 则自然保护区年侵蚀量为 $0.29 \times 10^8 \text{ t}$ (表 4), 该计算结果能够预估未来黄河三角洲北部自然保护区的侵蚀速率。

表 4 不同时段研究区海域冲淤变化
Table 4 The scour rates in different time period

时段/年	时长/a	冲刷量/ 10^8 t	年均冲刷量/ 10^8 t	平均冲刷深度/m
1992—2000	8	2.13	0.27	0.09
2000—2007	7	2.44	0.35	0.14
2007—2015	8	2.10	0.26	0.10
1992—2015	23	6.67	0.29	0.14

3.2 利津站来水来沙分析

气候变化和人类变化造成过去几十年来黄河入海水沙量阶梯式减少^[12-13]。利津站的来水来沙通常可以代表黄河入海水沙量^[14], 按 1997—2017 年利津站日水沙量计算, 这期间利津站多年平均年输沙量为 $1.24 \times 10^8 \text{ t}$, 若未来利津站年输沙量能维持在这个水平, 理论上能够满足黄河三角洲北岸的泥沙需求。

利津站一年当中的来水来沙分配是自然降水和人为调控的共同结果。由于黄河水少沙多, 下游河床不断淤积堆高, 为使黄河水沙平衡, 实现下游持续冲刷, 管理部门实行“调水调沙”, 即利用水库的调节库容, 适时蓄存和泄放, 对天然水沙过程进行调整^[15]。调水调沙期间, 小浪底水库开启, 形成人造洪峰, 对黄河下游河道冲刷, 并排泄水库内的泥沙。因此, 调水调沙期间径流量、输沙量占了全年重要的比例。黄河调水调沙在短时间内将大量水沙输送入海, 截至 2013 年, 调水调沙期间入海水沙通量分别占全年的 27.6% 和 48.9%。黄河悬浮泥沙浓度在调水调沙期间为 $17.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平时则为 $6.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。^[16]

根据利津站日水沙量, 计算调水调沙以来年内入海水沙分配情况。分析统计得出 2002—2014 年期间, 调水调沙总天数达 250 d, 平均每年 19 d (表 5)。利津站平均每年输沙量为 $1.5 \times 10^8 \text{ t}$, 其中调水调沙期间输沙量为 $0.54 \times 10^8 \text{ t}$, 占全年输沙量的 35.9%。调水调沙期间多年平均流量为 2002—2014 年各年调水调沙期间悬沙浓度平均值为 $14.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 而平

时悬沙浓度平均值为 $6.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 前者是后者的 2 倍多。由此可知, 调水调沙使 30% 以上的黄河泥沙集中在 20 d 左右排向下游, 是生态补沙的绝佳时机。

3.3 调水补沙方案设计

研究区位于黄河三角洲强侵蚀岸段, 有学者曾提出治理该岸段应从“治沙”入手, 考虑“保沙”和“调沙”2 个方面^[17]。本文仅从“调沙”角度设计调水方案, 考虑当前利津站的年内水沙分配、刁口河河道的淤积流量等因素, 选取一年当中合适的时段, 采取水闸扬水, 河道疏浚等措施, 对北岸自然保护区进行调水, 以达到缓解自然保护区侵蚀的目的。

根据前文分析, 黄河入海水沙集中在调水调沙期间。该时段与自然保护区淡水湿地关键需水期基本吻合^[18], 也是历年生态调水的最佳时期。因此, 选择调水调沙期间在生态调水的基础上进行北岸调水分沙补偿, 能以最小的成本输运尽可能多的泥沙, 并同时达到较好的生态效益。据统计, 2010、2011、2012 年 3 次利用小浪底水库的调水调沙对黄河三角洲北岸进行了生态调水尝试, 期间引沙量分别为 20.81×10^4 、 21.17×10^4 、 $24.40 \times 10^4 \text{ t}$ ^[19], 与计算所得北部自然保护区年侵蚀量相比, 差距较大, 因此, 从引沙减缓侵蚀的角度来看, 有必要在目前生态调水的基础上加大引水量。

根据调水调沙期间和平时利津站来水的含沙量计算所需水量。估算公式如下:

$$M = S_{\text{调}} Q_{\text{调}} T_{\text{调}} + S_{\text{平}} Q_{\text{平}} T_{\text{平}}$$

式中: M 为年总引沙量, 取值为 $0.29 \times 10^8 \text{ t}$ 。 Q 为引流量; S 为含沙量, 取 2012—2014 多年平均值, 其中 $S_{\text{平}}$ 取 $6.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $S_{\text{调}}$ 取 $14.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T 为调水时间。

可分为以下情况: ①只于调水调沙期间引水补沙; ②只于平时引水补沙; ③调水调沙期间和非调水调沙期间综合引水补沙。

若只于调水调沙期间引水补沙, 根据多年调水调沙的平均天数 19 d, 向北岸输沙流量应为 $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。该值小于刁口河流路主槽的最大泄洪能力 $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4], 可保证泥沙的有效运输。同时该流量小于多年调水调沙期间平均流量 $2198 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 能确保分沙期间现行流路的流量达到该流路河口地区 6、7 月调水调沙期间的生态保障流量 (6 月份为 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 7 月份为 $430 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[20]), 从而不影响现行流路的社会功能和自然生态功能。该方案分沙流量约为 20 亿 m^3 , 远大于 2010 年 4 月该自然保护区生态调水量

3 500 万 m^3 , 若付诸实施需要投入更多扬水船等引水设施或工程的建设; 另外, 该方案在调水调沙期间刁口河对利津站流量的分流比例达到 50% 以上, 有学者指出分流量太大时有可能影响现行清水沟分流口以下的取水^[21], 并提出 6—10 月刁口河分流 40% 的方案, 因此方案实施后需要对现行流路大量分流后所受影响进行评估。

考虑到某些年份调水调沙天数较少, 仅为 10 d 左右, 可以采取调水调沙和平时综合引沙的方案, 在平时以一定流量向北岸补沙(表 6)。近年来, 由于一些原因, 调水调沙并没有进行, 可在汛期进行适当的引沙, 或在平时以 $300 m^3 \cdot s^{-1}$ 向北岸持续引沙。表中数值均基于长期统计的参数, 在应用中应根据实际流量、含沙量进行调整。

表 5 2002—2014 年黄河调水调沙利津站水沙信息

Table 5 The water and sediment flux of Lijin Hydrological Gauging Station during water-sediment modulation period between 2002 and 2014

年份	调水调沙时间/(月.日)	天数	年输沙量/ $10^8 t$	调水调沙输 沙量/ $10^8 t$	输沙量 比例/%	径流量 比例/%	调水调沙平均悬 沙浓度/ $(kg \cdot m^{-3})$	平时悬沙浓 度/ $(kg \cdot m^{-3})$	调水调沙平均 流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	平时流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$
2002	7.4-7.15	12	0.54	0.25	45.49	25.97	22.67	9.53	1 051.8	101.9
2003	9.6-9.18	13	3.70	0.97	26.33	11.40	44.33	15.96	1 956.2	561.5
2004	6.19-7.13	25	2.58	0.58	22.46	19.94	14.60	12.55	1 835.2	541.8
2005	6.9-7.1	23	1.91	0.52	27.04	15.65	15.97	8.00	1 629.0	590.3
2006	6.10-6.29	20	1.49	0.54	36.33	21.37	13.18	6.28	2 370.5	505.7
2007	6.19-7.7 7.29-8.7	29	1.47	0.82	34.64	17.65	15.23	4.36	2 139.0	518.1
2008	6.22-7.9	18	0.77	0.58	74.89	26.98	14.70	1.82	2 525.9	354.7
2009	6.22-7.10	18	0.56	0.41	72.38	28.23	10.84	1.63	2 411.3	318.1
2010	6.22-7.12	21	1.67	0.66	39.34	23.14	14.74	6.84	2 460.6	499.0
2011	6.24-7.10	17	0.93	0.35	37.64	18.91	10.00	3.87	2 372.4	496.8
2012	6.24-7.16	22	1.83	0.60	33.05	17.05	12.55	5.22	2 533.6	790.7
2013	6.22-7.12	21	1.73	0.54	31.41	21.75	10.53	6.39	2 840.0	623.7
2014	7.3-7.13	11	0.30	0.17	57.26	16.94	8.92	1.36	2 037.3	310.3
多年平均	-	19	1.50	0.54	35.85	20.42	14.71	6.75	2 198.0	477.9

表 6 设计引沙方案

Table 6 The schemes of sediment transport

方案	流量和引沙天数指标
只于调水调沙期间引沙	$T_{\text{平}} = 0, Q_{\text{平}} = 0, T_{\text{调}} = 19 \text{ d}, Q_{\text{调}} = 1 200 m^3 \cdot s^{-1}$
只于平时引沙	$T_{\text{平}} = 166 \text{ d}, Q_{\text{平}} = 300 m^3 \cdot s^{-1}, T_{\text{调}} = 0, Q_{\text{调}} = 0$
调水调沙和平时综合引沙	$T_{\text{平}} = 79 \text{ d}, Q_{\text{平}} = 300 m^3 \cdot s^{-1}, T_{\text{调}} = 10 \text{ d}, Q_{\text{调}} = 1 200 m^3 \cdot s^{-1}$

4 结论

黄河三角洲北部自然保护区在黄河改走现行河道后, 缺少水沙补给, 在海洋潮流和波浪持续作用下严重侵蚀, 最大水深持续增大, 增大速率为 $20 \text{ cm} \cdot a^{-1}$; 1~4 m 等深线持续后退, 后退速率为 $0.13 \sim 0.16 \text{ km} \cdot a^{-1}$; 年均侵蚀土方量为 $0.29 \times 10^8 \text{ t}$, 年均侵蚀厚度为 0.14 m。目前实施的生态调水的输沙量仍远小于北部自然保护区的侵蚀量。

按照目前黄河干流自然入海水沙通量, 提出在调水调沙期进行补沙, 通过刁口河故道, 以约 $1 200 m^3 \cdot s^{-1}$ 的流速向刁口河输水 19 d, 则可基本平衡北部自然保护区的侵蚀。在调水调沙天数较少的年份, 可以在平时或者汛期进行适当补沙, 以补偿该地区海岸侵蚀, 维持自然保护生态。

参考文献:

- [1] 周云轩, 田波, 黄颖, 等. 我国海岸带湿地生态系统退化成因及其对策[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1157-1166.

- [2] 张晓龙. 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [3] 李九发, 时连强, 应铭, 等. 黄河河口钩口河流路亚三角洲岸滩演变与抗冲性试验[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 14.
- [4] 王开荣, 李岩, 于守兵, 等. 黄河刁口河备用流路现状及保护工程措施探讨[J]. *中国水利*, 2017(1): 15-19.
- [5] 葛海燕. 刁口河尾间黄河三角洲自然保护区生态补水效果评估[J]. *山东林业科技*, 2012, 42(5): 34-36.
- [6] 李士国, 李延波. 黄河刁口河流路生态补水试验及效果分析[C]// 第三届全国河道治理与生态修复技术交流研讨专刊. 北京: 中国水利技术信息中心, 2015: 13.
- [7] 孙莉, 司晓磊, 廖展强. 黄河三角洲北区湿地生态需水量研究[J]. *人民黄河*, 2010, 32(12): 112-113.
- [8] FANG H L, XU J. Land cover and vegetation change in the Yellow River Delta nature reserve analyzed with Landsat Thematic Mapper data[J]. *Geocarto International*, 2000, 15(4): 43-50.
- [9] FAN Y S, CHEN S L, ZHAO B, et al. Monitoring tidal flat dynamics affected by human activities along an eroded coast in the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2018, 190(7): 396.
- [10] 燕峒胜, 蒲高军, 张建华, 等. 黄河三角洲胜利滩海油区海岸蚀退与防护研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [11] 师长兴, 章典, 尤联元, 等. 黄河口泥沙淤积估算问题和方法: 以钩口河亚三角洲为例[J]. *地理研究*, 2003(1): 49-59.
- [12] 陈沈良, 谷硕, 姬泓宇, 等. 新入海水沙情势下黄河口的地貌演变[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(5): 61-67.
- [13] WANG H J, YANG Z S, SAITO Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3/4): 331-354.
- [14] 刘静. 黄河河口三角洲湿地生态补水实践[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/1022/7012052163001153.shtml>, 2019-7-4: 22-24.
- [15] 杨作升, 李国刚, 王厚杰, 等. 55年来黄河下游逐日水沙过程变化及其对干流建库的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 9-18.
- [16] 司敬玲, 张月明. 黄河三角洲刁口河生态调水实践[J]. *人民黄河*, 2013, 35(2): 30-32, 35.
- [17] YU Y G, SHI X F, WANG H J, et al. Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Huanghe (Yellow River): The special role of Water-Sediment Modulation[J]. *Anthropocene*, 2013, 3: 72-82.
- [18] 李国英. 黄河首次调水调沙[J]. *科学*, 2003, 55(1): 41-44, 2.
- [19] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策[J]. *水利学报*, 2004(7): 1-6, 13.
- [20] 王建中, 王道席. 黄河河口地区生态流量调度初步研究[C]// 第三届黄河国际论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2007: 3-8.
- [21] 陈雄波, 雷鸣, 王鹏. 清水沟、刁口河流路联合运用方案比选[J]. *海洋工程*, 2014, 32(4): 117-123.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE ECOLOGICAL SEDIMENT REPLENISHMENT AT THE NORTHERN NATURE RESERVE OF YELLOW RIVER DELTA

HUANG Anding¹, JIANG Xuezhong^{2*}, CHEN Shenliang¹

(1 State Key Laboratory of Estuarine and Coast, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2 School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The northern coast of the Yellow River Delta has lost its sediment supply from the Yellow River basin and experienced continuous erosion under ocean power since the cut-off of Diaokou River in 1976. The ecological resources of wetland in the Yellow River Delta Northern Nature Reserve (YRDNNR), located at the mouth of the Diaokou River, are thus under threat. The erosion of YRDNNR was evaluated by using spatial analysis technique based on the topography data measured on the north bank of the Yellow River Delta in this paper. The results show that from year 1992 to 2015, continuous erosion occurred in this area, the annual erosion volume reached 2.856×10^4 t, the annual eroded thickness was 9.3 cm, and the erosion rate remained rather stable. Based on the historical runoff of Lijin hydrological station of the Yellow River, the paper tries to put forward a quantitative scheme to compensate the erosion in the YRDNNR. According to the analysis, during the period of water-sediment modulation, water diversion through Diaokou River at a flow rate of $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ for 19 days can effectively alleviate the erosion of the reserve.

Key words: Yellow River Delta; coastal erosion; sediment replenishment