

# 黄河口水沙过程变异及其对河口海岸造陆的影响

张治昊, 胡春宏

(中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100044)

**摘要:** 采用实测资料分析和理论探讨的方法, 研究了黄河口海岸造陆与水沙过程变异的关系。研究表明: 黄河口陆域来水来沙是海岸造陆的基础, 来水来沙越大, 造陆面积越大, 水沙过程变异后, 由于水沙的急剧减少, 黄河口海岸造陆速度减缓, 典型岸段严重蚀退造陆面积也大幅减小; 尾间河道萎缩对海岸造陆影响较大, 萎缩越严重, 越不利于海岸的造陆发育。运用多元回归分析建立了黄河口海岸造陆水沙临界综合关系式, 可供科学调控来水来沙实施黄河口海岸防护过程中参考。

**关键词:** 黄河口; 水沙过程变异; 海岸造陆; 演变; 海岸蚀退; 水沙调控

中图分类号: TV148.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2007)03-0336-06

1986年后, 黄河口的来水来沙过程发生了显著的变异, 作为河海交汇的沉积带, 黄河口海岸发育演变经历了复杂的响应过程, 主要特征为海岸的造陆速度逐渐减缓, 甚至出现负增长, 有些岸段表现为强烈蚀退<sup>[1]</sup>。黄河口海岸的蚀退直接造成国土资源流失, 使胜利油田海上油气开发变为陆上开发的战略难以实现, 直接影响到黄河三角洲经济的可持续发展<sup>[2]</sup>; 同时, 水沙的剧减与海岸的蚀退造成了黄河三角洲湿地生态系统的局部性破坏<sup>[3]</sup>, 由此带来了一系列的环境问题。因此, 深入研究水沙过程变异条件下黄河口海岸的演变特征, 对于正确把握黄河口海岸造陆的近期演变规律与发展方向具有重要的实际指导意义。本文在分析黄河口水沙过程变异的基础上, 揭示了黄河口海岸造陆的时空演变特征, 探讨了黄河口海岸造陆演变响应机理, 提出了黄河口海岸造陆水沙临界综合关系式, 试图为科学调控黄河口水沙过程, 抑制黄河口海岸蚀退提供科学依据。

## 1 黄河口水沙过程变异特征

### 1.1 水沙过程变异阶段划分

由图1可见, 利津站1976–2002年来水过程变化幅度较大, 表现出明显的周期性。为削弱其周期性变化的影响, 对其采用指数平滑法进行数据平滑处理, 处理后的数据可直观看: 黄河口清水沟流路年来水量过程线以1986年为转折点, 来水特征发生了明显改变。图2为对相同时段来沙过程做类似的处理, 得出了相同结论。综合分析可知: 黄河口清水沟流路来水来沙过程发生了变异, 以1986年为界, 可分为变异前和变异后两个阶段。

### 1.2 水沙过程变异特征

表1为黄河口利津站变异前、后水文特征值统计, 由表可见, 黄河口清水沟流路水沙过程变异特征为:

①来水来沙大幅度减少, 1986–2002年河口平均年来水量为132亿 $\text{m}^3$ , 仅为1976–1985年平均年来水量339亿 $\text{m}^3$ 的39%, 河口平均年来沙量也由1976–1985年平均值8.3亿t减少到1986–2002年平均值3.3亿t;

收稿日期: 2006-04-27; 修订日期: 2006-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479069); “十一五”国家科学技术支撑计划资助项目(2006BAB06B03)

作者简介: 张治昊(1974–), 男, 山东文登人, 工程师, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: che7688@sohu.com

② 水沙搭配关系恶化, 1976–1985 年河口平均年来沙系数为 0.027, 1986–2002 年河口平均年来沙系数高达 0.064, 为前一时段的 2.4 倍, 表明 1986 年后黄河口水沙搭配关系急剧恶化, 1986 年后的水沙条件为典型的小水带大沙时段; ③ 来沙组成有所变细, 但变化幅度较小, 河口多年平均中值粒径由 1976–1985 年平均值 0.020 mm 变为 1986–2002 年平均值 0.019 mm, 反映了黄河下游河道的调整作用。

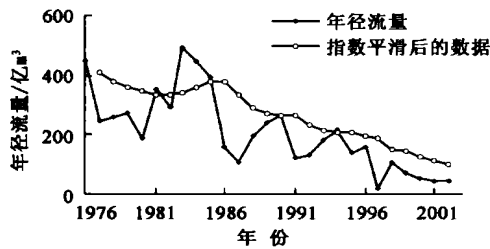


图 1 利津站 1976–2002 年来水量过程线

Fig. 1 Hydrographes of the flow at Lijin station from 1976 to 2002

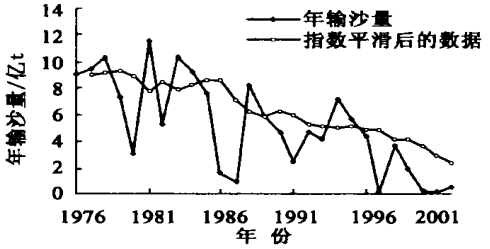


图 2 利津站 1976–2002 年来沙量过程线

Fig. 2 Hydrographes of the sediment at Lijin station from 1976 to 2002

表 1 利津站水文特征值统计

Table 1 Characteristic of hydrology at Lijin station

| 时 段       | 来水量                 |         | 来沙量    |         | 来沙系数                       |         | 中值粒径  |         |
|-----------|---------------------|---------|--------|---------|----------------------------|---------|-------|---------|
|           | 均值/亿 m <sup>3</sup> | 占前一时段/% | 均值/亿 t | 占前一时段/% | 均值/(kg·s·m <sup>-6</sup> ) | 占前一时段/% | 均值/mm | 占前一时段/% |
| 1976–1985 | 339                 |         | 8.3    |         | 0.027                      |         | 0.020 |         |
| 1986–2002 | 132                 | 39      | 3.3    | 40      | 0.064                      | 240     | 0.019 | 95      |

2 黄河口海岸造陆演变过程

2.1 黄河口海岸造陆年际变化特征

黄河口海岸造陆过程与陆域来水来沙条件及尾间河道的演变密切相关。图 3 为黄河口海岸示意图, 由图可见, 1976–1979 年, 清水沟流路处于改道初期的淤积成槽阶段, 尾间河段水流游荡, 摆动不定, 同时入海口门处, 海域较浅, 海洋动力较弱, 大量泥沙被输运至口门附近, 随沙嘴摆动, 均匀淤积于口门两侧, 使原本较平顺的岸线, 呈扇形凸出。在此阶段, 黄河口和附近岸线延伸相对迅速, 造陆速率较快, 年均造陆达 32.5 km<sup>2</sup>。1980–1985 年, 清水沟流路尾间河段基本形成单一顺直型河道, 沙嘴逐渐凸出岸线, 摆动范围较前期明显减小, 以近似于“楔行”向海域淤积延伸, 由于受柯氏力的影响, 推进方向为东南向。由于淤积延伸过程中, 前缘海域逐渐变深, 而海洋动力外输泥沙的作用逐渐增强, 造陆速率相比改道初期有所减缓, 年均造陆为 22.3 km<sup>2</sup>。1986–1995 年, 黄河口水沙过程变异, 黄河口来水来沙急剧减少, 此阶段黄河口海岸线整体变动较大, 其间 1986、1987 年海岸线普遍发生蚀退, 黄河口造陆过程在淤进蚀退中交错进行, 河口沙嘴向海域淤积延伸的形状仍近似于“楔形”, 只是形状较前期变得尖瘦, 推进的方向是东南向, 受柯氏力的影响较前期推进方向明显偏南。淤积延伸过程中, 前缘海域变得更深, 而来水来沙剧烈减少, 所以造陆速率比 1980–1985 年明显减小, 年均造陆为 9.2 km<sup>2</sup>。1996–2002 年, 黄河口流路走清 8 汊河, 1996 年汛期迅速淤成了

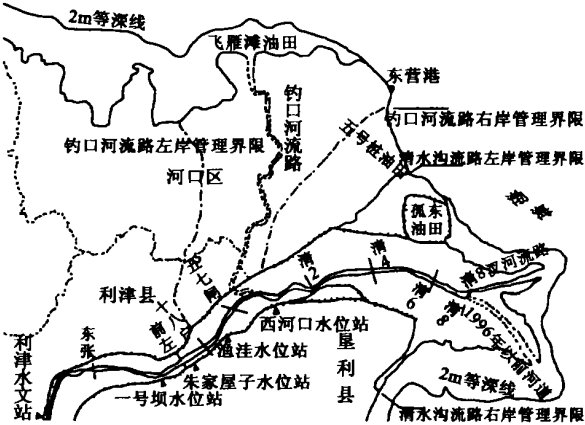


图 3 黄河口海岸示意图

Fig. 3 Sketch of seacoast in the Yellow River estuary

小沙嘴, 之后, 由于来水来沙较小, 甚至出现长时间断流, 黄河口造陆在淤进、蚀退中交替进行, 年均造陆仅为  $2.7 \text{ km}^2$ , 其间 1997 年黄河长时间断流期间, 黄河口造陆过程中表现出大面积蚀退, 当年蚀退面积达  $9.4 \text{ km}^2$ 。河口沙嘴向海域淤积延伸的“楔形”更加瘦小, 推进的方向是东北向, 由于受科氏力的影响, 推进方向逐年稍偏东南方向。

## 2.2 黄河口海岸造陆空间分布特征

黄河口海岸造陆空间分布与流路的入海位置密切相关<sup>[4]</sup>。按照流路的入海位置可将黄河口海岸划分为: 径流补给型岸段、径流停水型岸段、基本稳定型岸段, 三种类型岸段均有各自独特的演变特征。径流补给型岸段是指现行流路入海口门附近的岸段, 其演变特征为: ①淤积、蚀退交替进行, 径流来水来沙较大, 淤积延伸造陆为主, 来水来沙较小, 淤积延伸减缓甚至出现蚀退; ②淤积蚀退变幅较大, 由于径流来水来沙年内分配不均使径流补给型岸段淤积蚀退变幅较大, 演变剧烈。径流停水型岸段是指流路改道或出汉后径流停水后的岸段, 包括 1976 年改道清水沟后的原刁口河流路入海口门附近岸段, 1996 年清 8 出汉后的原流路入海口门附近岸段。该类型岸段演变特征为: 流路停水初期, 海岸线蚀退速率大, 范围广, 以后海岸线蚀退速率逐渐减小, 影响范围也相对缩小。基本稳定型岸段是指远离流路入海位置, 只受海洋动力影响的岸段, 该类型岸段受海流侵蚀的年均强度基本相当, 年均蚀退幅度相对较小。

## 3 黄河口海岸造陆演变机理

### 3.1 水沙过程变异是黄河口海岸造陆减缓甚至是出现蚀退的根本原因

黄河口海岸的独特造陆功能, 历来吸引了水利、地理、海洋等众多学科专家们的共同关注。常军等<sup>[5]</sup>依据黄河口不同时相的卫星图片, 把时段 1977 年 5 月至 2000 年 5 月划分为 17 个子时段, 经过 GIS 叠加分析, 得出了 17 个子时段的黄河口净造陆面积; 程义吉等<sup>[6]</sup>利用 idrisi、surfer8 等软件将 2000 年 5 月至 2002 年 10 月的卫星图片纠正后叠置, 量算出该时段 3 个子时段的黄河口净造陆面积; 在本文的研究中利用了上述学者的黄河口 1977–2002 年 20 个子时段净造陆面积数据。由于受卫星图片成图时间的影响, 上述方法得到的黄河口时段净造陆面积不能严格与水文年相对应, 所以依据利津站水沙资料, 提取出相应子时段的水沙条件。图 4 点绘了黄河口时段造陆面积与水沙条件的关系, 利用回归分析的方法, 得到了黄河口时段造陆面积与水沙条件的回归关系式(表 2)。由图 4 与表 2 可知: 黄河口时段造陆面积与相应时段的来水量、来沙量成正比, 即随着来水来沙量的增大而增大, 随来水来沙量的减小而减小。黄河口时段来沙组成由时段平均中值粒径  $d_{50}$  来表征, 黄河口时段来沙越粗, 造陆面积越大, 来沙越细, 造陆面积越小。1977–2002 年整个时段的黄河口时段造陆面积与来

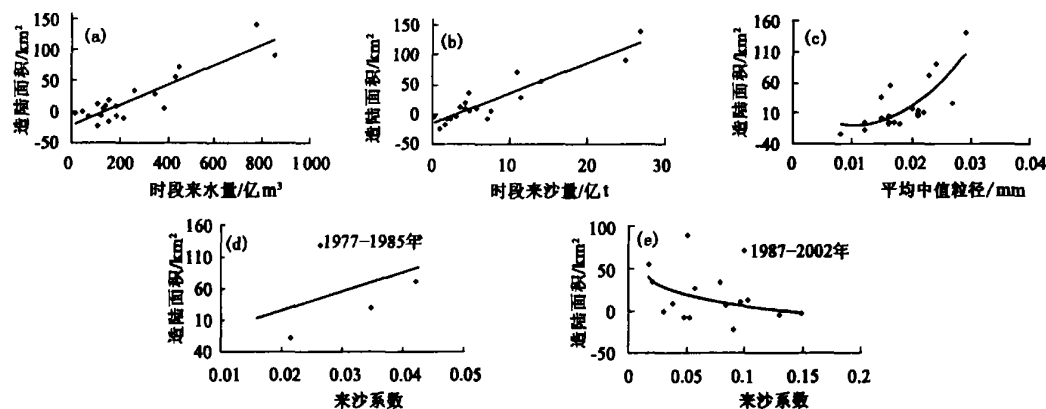


图 4 黄河口海岸造陆面积与水沙条件的关系

Fig. 4 Relationship between the epirogenic area of seacoast and the condition of flow sediment in the Yellow River estuary

沙系数关系点群散乱，基本无规律可循，但以 1986 年为界，分别建立 1977– 1985 年、1986– 2002 年两时段二者的关系可看出，水沙尚未变异前，黄河口时段造陆面积随来沙系数增大而增大；水沙过程变异后，两者的关系发生了改变，黄河口时段造陆面积随来沙系数增大而减少，其原因主要是由水沙过程变异造成的。水沙过程变异后，虽然来沙系数增加，但进入黄河口的实际沙量却是大幅度减小，故造陆面积反而减少，甚至蚀退，从而导致时段造陆面积与来沙系数的关系发生了根本变化。比较表 2 中 5 个关系式的相关系数  $R$  值的大小可知，黄河口时段造陆面积与水沙条件相关程度从大到小依次为来沙量、来水量、来沙组成、来沙系数。来沙量作为黄河口造陆的物质基础，与黄河口造陆面积关系最密切；由于水沙难以分割，造陆面积与来水量的关系也较密切。相比之下，来沙组成、来沙系数与造陆面积的关系要明显偏弱，表中 1986– 2002 年造陆面积与来沙系数的关系式的相关系数  $R$  值小于 1977– 1985 年相关系数  $R$  值，表明水沙过程变异，造陆面积与来沙系数的相关程度明显降低。综上分析可知：黄河口海岸造陆过程与陆域水沙条件密切相关，陆域来水来沙是黄河口海岸造陆的基础，来水来沙量越大，黄河口海岸造陆面积越大，水沙过程变异后，由于陆域来水来沙量的急剧减少，黄河口海岸造陆速率明显变缓，至 20 世纪 90 年代末，甚至出现造陆面积的负增长，海岸线明显蚀退。

表 2 造陆面积与水沙条件关系统计

Table 2 Statistics of the relationship between the epeirogenic area and the condition of flow sediment

| 变量       | 因变量           | 回归关系式                                      | 相关系数 $R$ | 时 段        |
|----------|---------------|--------------------------------------------|----------|------------|
| 造陆面积 $A$ | 来水量 $W$       | $A = 0.12W - 14.35$                        | 0.85     | 1977– 2002 |
|          | 来沙量 $W_s$     | $A = 3.92W_s - 10.73$                      | 0.88     |            |
|          | 来沙组成 $d_{50}$ | $A = 186.695d_{50}^2 - 2.516d_{50} - 4.73$ | 0.75     |            |
|          | 来沙系数 $\rho$   | $A = 2.876\rho - 48.74$                    | 0.64     | 1977– 1985 |
|          |               | $A = -19.27\ln\rho - 47.22$                | 0.53     | 1986– 2002 |

3.2 尾间河道萎缩不利于黄河口海岸造陆

黄河口的来水来沙是通过尾间河道输送到口门区的，所以尾间河道的输水输沙能力直接影响黄河口海岸造陆发育。水沙过程变异后，尾间河道萎缩严重，纵比降变缓，横断面形态变的宽浅，输水输沙能力大幅度降低<sup>[7]</sup>。作为输沙通道，在相同的来水来沙情况下，淤积在尾间河槽中泥沙量占来沙量的比例明显增大，输送到口门区的泥沙量占来沙量的比例必然减小。水沙过程变异，使黄河口来沙绝对数量大幅度减小，而尾间河道输水输沙能力的降低，输送到口门区的泥沙比例也在减小，两者综合的结果必然是：输送到口门区的泥沙的绝对数量大幅度减小。黄河口海岸造陆与来水来沙条件密切相关；输送到口门区的泥沙量大幅度减小，减缓了黄河口海岸造陆发育，其突出的特征表现为黄河口海岸造陆速度减缓，甚至出现蚀退。综合上述分析，尾间河道萎缩对黄河口海岸造陆影响较大，尾间河道萎缩越严重，越不利于黄河口海岸造陆发育。

3.3 海洋动力与海域地形条件对黄河口海岸造陆的影响

黄河口属弱潮河口，潮汐类型较多，分为不规则半日潮和不规则全日潮。黄河口海流的主要成分是潮流，潮流在整个渤海区是旋转流，在岸边，由于海岸限制了潮流的旋转，椭圆椭率小于 0.1，属于沿岸往复流。王恺忱等<sup>[8]</sup>分析近期三条流路的海域地形资料表明，清水沟流路海域的地形较浅，海底坡度较缓，比神仙沟和钓口河海域的天然地形条件要差一些，所以，从海岸造陆的角度讲，现行清水沟口门海域的地形条件对造陆是有利的。水沙过程变异后，来水来沙的剧烈减少及利津以下河道水沙量沿程严重减少使得口门区的径流和潮流的耦合程度降低，在非汛期多数时间内，抵达口门的径流量接近为 0，只有潮流日复一日的作用于口门区，所以径流的减少削弱了径流对口门流场的控制作用，使潮流对口门流场控制作用相对突出，这必然会改变口门附近海洋动力输沙的模式、多少和方向，进而塑造出与新的动力条件相应的海域地形。所以海岸演变是河道径流泥沙、海洋动力条件和海域地形条件共同作用的结果，径流水沙过程变异直接造成口门河海耦合动力的变化，从而影响了海岸造陆演变过程。

4 黄河口海岸造陆水沙临界阈值分析

水沙过程变异后,黄河口来水来沙持续衰减,无径流补给的岸段严重蚀退,口门附近的净造陆面积也越来越小,当水沙减少到一定程度,口门附近海岸也开始蚀退,标志着黄河口海岸开始全线蚀退。黄河口海岸全线蚀退直接造成国土资源流失、生态环境恶化,必须引起高度重视,因此,探求黄河口海岸软防护的水沙调控参考关系式,对抑制黄河口海岸蚀退具有重要的现实指导意义。

以黄河口 1977– 2002 年 20 个子时段的净造陆面积  $A$  为因变量,以相应时段水沙条件为自变量,建立黄河口造陆面积与水沙因子的多元回归方程式:

$$A = 0.026W + 2.58W_S + 1099.66d_{50} + 24.46\rho - 29.28$$

(1)

式(1)的复相关系数  $r = 0.89$ ,  $F$  值为 13.69,大于  $F$  临界值 3.05,显著性分析概率  $P$  小于 0.0001,各项统计参数见表 3,计算值与实测值的比较如图 5 所示。式(1)的复相关系数明显高于单个因子与造陆面积的关系,表明运用上式是可以根据未来水沙因子的变化对黄河口造陆面积进行估算。由式(1)各项的系数可知黄河口造陆面积随相应时段的来水量、来沙量、来沙中值粒径的增大(或减小)而增大(减小),这与单因素分析的结果是一致的。对于来沙系数而言,尽管水沙变异特殊时段,造陆面积与其关系发生了改变,但从长系列年份数据综合分析的结果表明造陆面积与来沙系数呈正相关关系。

表 3 回归关系式各项统计参数

Table 3 Statistical parameters of the formulas

| 项目   | 平方和       | 自由度 | 平方和均值     | $F$ 值  | 概率水平        |
|------|-----------|-----|-----------|--------|-------------|
| 回归分析 | 16 119.11 | 4   | 4 029.777 | 13.688 | 0.000 067 9 |
| 残差   | 4 416.09  | 15  | 294.406   |        |             |
| 总计   | 20 535.20 | 19  |           |        |             |

近年来,黄河口水沙过程变异,河海动力对比发生变化,黄河口海岸的造陆逐渐减少,蚀退逐渐加重,引起了人们的普遍关注。显然,当造陆大于蚀退时,时段造陆面积为净增长;当造陆小于蚀退时,时段造陆面积为负增长;当二者相当时,黄河口时段造陆处于临界平衡状态。以式(1)为基础,令左端为零,可得

$$0.026W + 2.58W_S + 1099.66d_{50} + 24.46\rho = 29.28$$

(2)

式(2)的物理意义十分明确,当相应时段水沙因子满足上述关系式时,此时段黄河口海岸造陆面积为零,即黄河口造陆处于临界平衡状态,可将该式称作黄河口海岸造陆水沙临界综合关系式。由于受各种因素制约,近期无法利用修筑海堤对黄河口海岸实施全线硬防护的背景下,式(2)的提出对实施黄河口海岸的软防护有一定的现实指导意义。1999 年开始实施的黄河全流域水量统一调度措施使科学调控黄河口来水来沙过程,利用径流泥沙补给对黄河口海岸实施软防护成为可能。目前黄河水利委员会实施的水量统一调度管理措施明确的是对利津站流量进行一定的控制,以满足该地区最低生态需水量,应丰富其内涵,将控制黄河口海岸不发生侵蚀所需的水量考虑进去。在调控水沙过程中,管理部门不仅要控制来水量单个水沙指标,还应同时考虑来水量、来沙量、来沙组成、来沙系数 4 个重要的水沙因子,利用黄河口海岸造陆水沙临界综合关系式,求出黄河口海岸不被蚀退的临界综合水沙条件,在实际操作中,努力使实际水沙条件大于或等于临界综合水沙条件,才能确保黄河口海岸不被蚀退。利用式(2)调控黄河口水沙过程,可改变调控指标的单一性,丰富了调控内容。同时,调控单个水沙指标是对唯一解进行控制,难度较大,而满足式(2)的 4 个水沙指标是组合解,调控过程中由控制单值变为了控制范围,大大增加了调控的灵活性,提高了调控的可操作性,降低了调控的难度。综上所述,利用黄河口海岸造陆水沙临界综合关系式调控水沙过程,使水沙调控过程变得更加科学合理,对于科学管理黄河口海岸,防止海岸侵蚀有重要的参考价值。

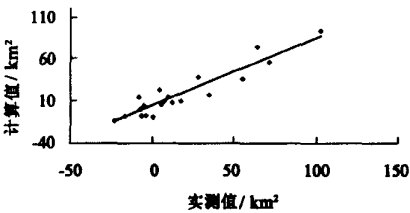


图 5 黄河口时段造陆面积计算值与实测值的关系

Fig 5 Relationship between the epirogenic area of seacoast and the condition of flow sediment in the Yellow River estuary

## 5 结 论

(1) 1986年后, 利津站来水来沙过程发生了变异, 年际间水沙剧烈减少, 水沙搭配关系恶化, 典型水文条件两极分化, 黄河口水沙过程变异是上述各种水沙条件变异综合作用的结果。黄河口水沙过程变异导致口门区的水沙特征发生了显著变化: 径流和海流的耦合程度降低; 口门外径流的控制作用减弱, 海流的控制作用增强, 海流动力的输沙作用相对突出。

(2) 水沙过程变异必然会引起黄河口海岸演变的剧烈响应, 其突出特征为海岸的造陆速度逐渐减缓, 有些岸段表现为强烈蚀退。黄河口陆域来水来沙是海岸造陆的基础, 来水来沙越大, 造陆面积越大, 水沙变异后, 由于水沙的剧烈减少, 造陆面积也大幅减小; 尾间河道萎缩对海岸造陆影响较大, 萎缩越严重, 越不利于海岸的造陆发育。

(3) 黄河口海岸的蚀退直接造成国土资源流失、生态环境恶化, 极大威胁了黄河三角洲的可持续发展, 必须加以控制。综合分析黄河口造陆面积与水沙因子的多元关系式, 给出了黄河口海岸造陆水沙临界综合关系式(2), 在调控黄河口来水来沙对海岸实施软防护的过程中, 可利用该式求出确保黄河口海岸不被蚀退的综合水沙临界条件, 对黄河口海岸的科学管理有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 胡春宏, 等. 黄河水沙过程变异及河道的复杂响应[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 胡春宏, 曹文洪. 黄河口水沙变异与调控I [J]. 泥沙研究, 2003(5): 1- 8.
- [3] 姚文艺, 赵业安, 汤立群, 等. 黄河下游河道断流灾害研究[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 18- 25.
- [4] 胡春宏, 张治昊. 水沙过程变异条件下黄河口拦门沙的演变响应与调控[J]. 水利学报, 2006(5): 78- 83.
- [5] 常 军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系[J]. 地理研究, 2004(5): 339- 345.
- [6] 程义吉, 杨晓阳, 管春城, 等. 黄河三角洲及现行河口海岸蚀退观测研究[R]. 东营: 黄河口治理研究所, 2003.
- [7] 张治昊, 胡春宏. 黄河口水沙变异及尾间河道的萎缩响应[J]. 泥沙研究, 2005(5): 13- 21.
- [8] 王恺忱. 黄河口发展影响预估计算方法[J]. 泥沙研究, 1998(3): 9- 14.

## Variation of the processes of flow and sediment and its effect on epeirogenesis of seacoast in the Yellow River estuary<sup>\*</sup>

ZHANG Zhi hao, HU Chun hong

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the erosion of parts of seacoast after the variation of flow and sediment in the Yellow River estuary, we research on the relationship between the epeirogenesis of seacoast and the variation of flow and sediment using the methods of field data analyses and theoretical study. The research results show that the flow and sediment coming from land is the foundation of the epeirogenesis of seacoast, the bigger the incoming flow and sediment is the bigger the area of the epeirogenesis. After the variation of flow and sediment, the epeirogenic area of seacoast reduces greatly because the decrease of the incoming flow and sediment. The atrophy of tail channels affects greatly on epeirogenesis of seacoast, the heavier the atrophy of tail channels, the less advantageous the epeirogenesis of seacoast. By using the methods of the regress analysis, the synthetical critical mathematical relationship of the epeirogenesis of seacoast is established. It provides reference usage during the process of controlling the incoming flow and sediment to defend seacoast in the Yellow River estuary.

**Key words:** Yellow River estuary; variation of flow and sediment; epeirogenesis of seacoast; evolution; seacoast erosion; controlling of flow and sediment

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 50479069).