

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.02

# 海河流域典型河流沉积物粒度特征及分布规律

刘静玲<sup>1,2</sup>, 李毅<sup>1,2</sup>, 史璇<sup>1,2</sup>, 尤晓光<sup>1,2</sup>, 孙斌<sup>1,2</sup>, 陈楠楠<sup>1,2</sup>

(1. 水环境模拟国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:** 为了解海河流域典型河流沉积物粒度参数空间分布规律, 对海河典型河流的表层沉积物进行采集并利用 Mstersize2000 激光粒度仪进行粒度分析。结果表明, 海河典型河流沉积物平均粒径差异显著, 分选状况总体较差; 山区水系与平原水系相比, 沉积物平均粒径减小, 呈集中分布, 水动力减弱; 山区自北向南变化明显, 水系沉积物平均粒径减小, 分布集中化, 分选状况变差, 由极正偏—正偏, 向对称方向变化, 峰度向平坦方向趋近, 水动力减弱, 符合粒径自然变化规律; 平原区水系沉积物粒径参数表明南北变化不明显, 因受较多支流、河流—湖泊—洼淀湿地等复杂系统和人为干扰强烈的影响, 南北无显著变化规律。总的来说, 海河流域河流受人为干扰强度较大, 河流沉积物源较为复杂, 栖息地物理完整性差。

**关键词:** 海河流域; 河流沉积物; 粒度特征; 分布规律

中图分类号: P343.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2017)06-0009-11

## Grain size characteristics and distribution regularities of typical river sediments in Haihe River Basin

LIU Jingling<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>, SHI Xuan<sup>1,2</sup>, YOU Xiaoguang<sup>1,2</sup>, SUN Bin<sup>1,2</sup>, CHEN Nannan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In order to understand the spatial distribution of grain size parameters of typical river sediments in Haihe River Basin, the surface sediments of the typical rivers in Haihe River Basin were collected and analyzed with the Mstersize 2000 laser particle size analyzer. The results show that the average grain size of the typical river sediments in Haihe River is significantly different, and the sorting condition is generally poor. Compared with the plain water system, the average grain size of the sediments in the mountainous area is reduced, and the hydrodynamics is weakened. The change of the particle size of the sediments in the mountain area from north to south is obvious, and the average grain size of stream sediment decreases and the distribution is concentrated, sizing condition changes from extreme positive to positive and symmetric, and the kurtosis tends to be flat, the hydrodynamic is weakened. Such change is in accordance with the natural variation of the grain size. However, the grain size parameters of the sediments in the plain water system show that the change between north and south is not obvious. Because of the strong influence of the complex system of many tributaries, rivers, lakes, wetlands and human disturbance, there is no significant change in the north and South. Generally speaking, the intensity of human disturbance is higher in Haihe River basin, the source of river sediment is quite complex, physical integrity of the habitat is poor.

**Key words:** Haihe basin; river; sediment; grain size characteristics; regularities of distribution

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006); 国家自然科学基金(41271496)

作者简介: 刘静玲(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水生态系统管理研究。E-mail: jingling@bnu.edu.cn

沉积物是河流系统的重要组成部分,分析河流沉积物的特征可了解人类活动影响下的环境变化响应<sup>[1-2]</sup>。沉积物也是流域污染物的重要蓄积库,可作为敏感性指标反应污染环境的时空变化趋势<sup>[3]</sup>。沉积物位于相面交界处,对水生态系统具有重要影响<sup>[4]</sup>。

粒度是沉积物的基本性质,受沉积环境、水动力条件、搬运介质及方式等因素的影响<sup>[5-6]</sup>,在沉积环境提取<sup>[7]</sup>、沉积物源解析<sup>[8]</sup>、沉积动力条件反演<sup>[9]</sup>以及特定时间尺度内气候和水动力变化过程的推测<sup>[10]</sup>等方面有着广泛的应用。近几年学者根据沉积物粒度特征对流域水环境特征开展了大量研究,如基于河流表层沉积物粒度组成进行研究区沉积动力分区,探讨研究区沉积环境及水动力条件<sup>[6,11-13]</sup>;基于粒度空间分布研究水库对河流的沉积环境影响<sup>[14-16]</sup>,依据河流沉积物粒度特征分析其与水动力关系<sup>[6,8,17]</sup>等。

笔者对海河流域典型河流表层沉积物进行不同水系粒径参数特征分析,并基于地貌和纬度差异,分别对典型河流沉积物山区和平原水系以及南北水系进行粒度比较与分析,探讨海河流域河流沉积物粒度特征和空间分布规律与水动力以及人为干扰的关系,旨在为海河流域河流物理完整性评估提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

海河流域位于北纬 35° ~ 43°、东经 112° ~ 120°,东临渤海,西倚太行,南界黄河,北以蒙古高原与内陆河流域接界<sup>[18]</sup>,涵盖京、津、冀等 8 个省、市、自治区<sup>[19]</sup>,城市集中,人口密集,是我国政治文化中心和发达地区<sup>[20]</sup>,也是我国水资源开发程度最高的流域<sup>[21]</sup>。流域总面积 31.8 万 km<sup>2</sup>,河流总长度 1.61 万 km,是我国的七大水系之一,北方的主要流域之一,流域由滦河、北三河、永定河、大清河、子牙河、黑龙港运东、漳卫河、徒骇马颊河以及海河干流等九大水系构成(图 1),自东向西依次为滨海平原、内陆平原、山区以及高原地貌<sup>[22]</sup>,地势总体西北高东南低,东部和南部为平原区,西部为山西高原与太行山区,北部是蒙古高原和燕山山区。河系分为两类,一类发源于太行山和燕山背风坡,山区支流集中,汇水面积大,泥沙含量较高;另一类发源于太行山和燕山迎风坡,支流分散,源短流急,突发性强,两类河流交错相间分布。

### 1.2 样品采集和分析

采样时间为 2014 年 8 月,在滦河、北三河、永定河、大清河、子牙河、黑龙港运东、漳卫河、徒骇马颊河等 8 条河流设置采样点,根据各水系的水文状况

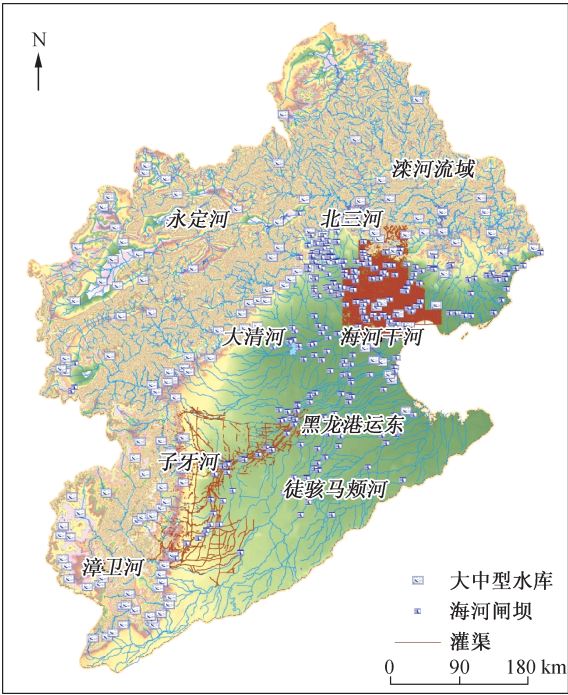


图 1 海河流域九大水系

及水利设施,于各水系上游、中游、下游分别设置采样点。采用抓泥斗式采样器采集表层沉积物样品,在各样点的河心区与漫滩区(离岸 2 ~ 5 m)均平行采集 3 个沉积样,采样深度 10 cm,样品装入密封塑料袋中,保存于 4℃ 环境中。根据《地球化学普查规范》中关于河流沉积物采产方法规定,20 ~ 30 m 河段范围内,可以多点采样并合并成一个样品。本研究根据海河流域水系实际状况,采用 3 个样品合并后进行粒径分析,重复测定 3 次。

### 1.3 样品分析与数据处理

在实验室,各样点表层沉积物经过自然风干,过 10 目筛,取 2 mm 以下的砂、黏土质样品,置于广口瓶中。

沉积物粒度参数采用 Mastersize 2000 激光粒度仪进行湿式测量,测量范围是 0.02 ~ 2800 μm,误差小于等于 1%。测定平均粒径、分选系数、偏度系数和峰度系数等参数,得到沉积物粒度曲线。根据粒度曲线的峰数,绘制峰数比例图。依据沉积物粒度划分标准,将沉积物组分划分为黏土(0 ~ 0.004 mm)、粉砂(0.004 ~ 0.063 mm)、砂(0.063 ~ 2 mm)<sup>[23]</sup>。数据处理及作图分析选用软件 Origin 和 SPSS。

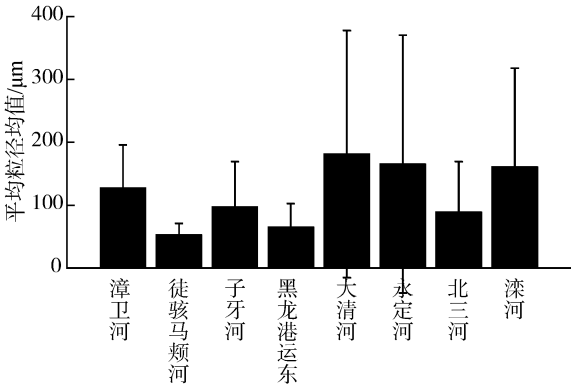
## 2 结果分析

### 2.1 海河典型河流沉积物粒度参数分布比较

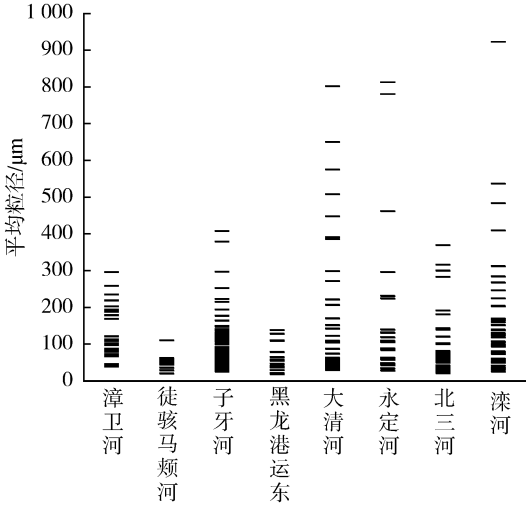
选取漳卫河、徒骇马颊河、子牙河、黑龙港运东、大清河、永定河、北三河和滦河作为海河典型河流进行研究分析。选取沉积物的平均粒径均值、沉积物组分比例、分选系数、偏度系数、峰度系数、峰数比例为本文沉积物粒度参数,对 8 条河流进行对比分析。

2.1.1 平均粒径均值

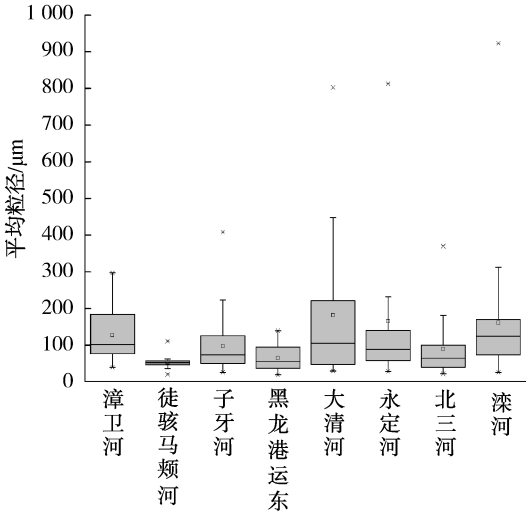
沉积物平均粒径均值描述平均粒径的集中分布趋势(图2),根据其值大小,将典型河流划分3个等级:第一等级粒径最大,包括大清河(181.3 μm)、永定河(165.4 μm)、滦河(160.6 μm)3个水系;第二等级粒径中等,包括漳卫河(127 μm)、子牙河(97 μm)、北三河(89 μm)3个水系;第三等级粒径



(a) 8 条河流沉积物平均粒径均值



(b) 8 条河流沉积物平均粒径值散点图



(c) 8 条河流沉积物平均粒径值箱式图

图2 海河流域8条河流各沉积物平均粒径值及其分布

最小,平均粒径均在 100μm 以下,包括黑龙港运东(64.6 μm)、徒骇马颊河(52.7 μm)2 个水系。

2.1.2 沉积物组分

根据沉积物黏土、粉砂和砂百分含量数据做出三角图(图3),研究各水系沉积物组分。为更好地了解研究区的水动力情况,依据 Morten Pejrup 的新三角图,采用沉积物结构组成来反映其水动力强度,先以砂百分含量的 10%、50%、90% 依次将沉积物分为 A、B、C、D 4 组,再以粉砂/(粉砂 + 黏土)百分比的 20%、50%、80% 将沉积物分为 I、II、III、IV 类,百分比数值越低反映水动力强度越大(图4)。结果表明,8 条河流的黏土含量较低(<10%),粉砂和砂是沉积物的主要组分。第一等级3 个水系(大

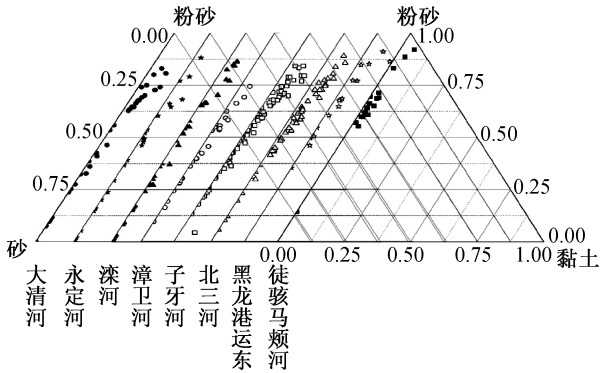
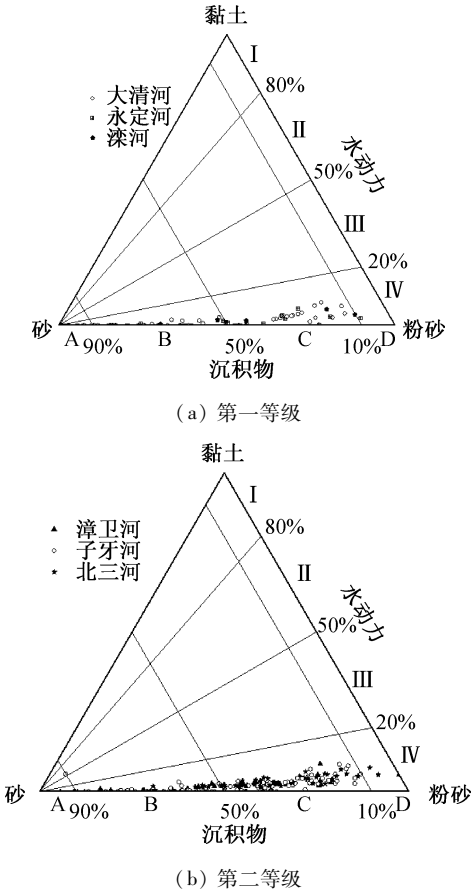


图3 海河流域典型河流沉积物组分三角图



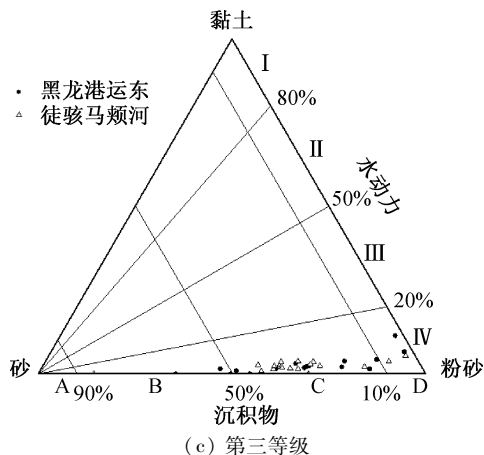
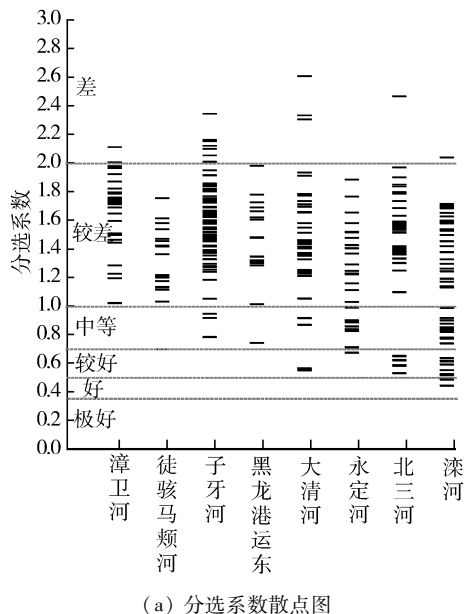
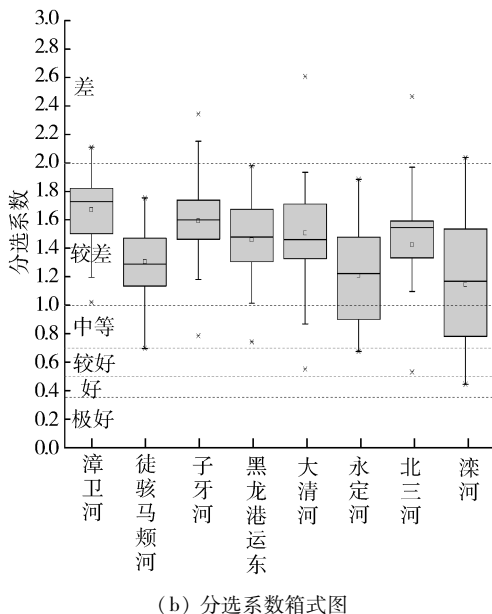


图 4 海河流域典型河流沉积物 Pejrup 图

河、永定河、滦河)沉积物最靠近砂端,第三等级 2 个水系(黑龙江运东、徒骇马颊河)沉积物最靠近粉砂端,与粒径均值分布规律一致。研究区沉积物均位于 Pejrup 图中 IV 区,说明水动力总体较强,第

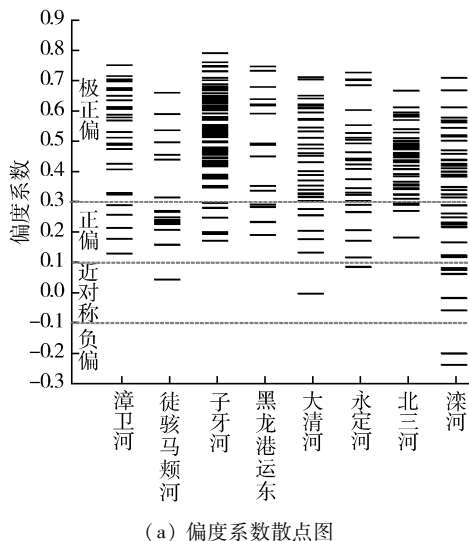


(a) 分选系数散点图

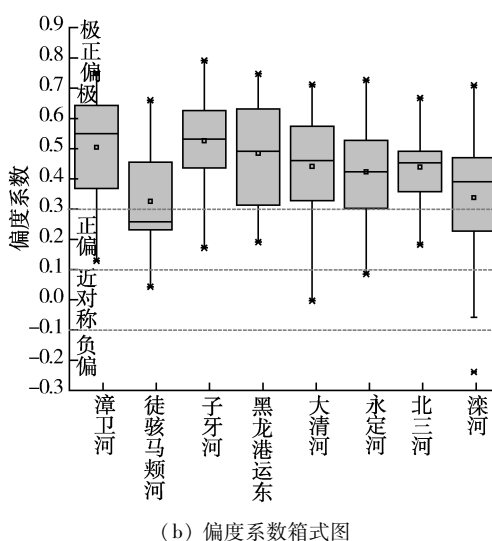


(b) 分选系数箱式图

图 5 海河流域 8 条河流沉积物分选系数分布



(a) 偏度系数散点图



(b) 偏度系数箱式图

图 6 海河流域 8 条河流沉积物偏度系数分布

一、二等级水系沉积物总体位于 B、C 区,第三等级水系沉积物主要位于 C、D 区,说明前者较后者流动性强。海河典型河流沉积物随粒径均值增大,粉砂含量减少,砂含量增大,流动性加强,水动力总体较强。

### 2.1.3 分选系数

分选系数反映沉积物粒度的集中趋势,分选性好,粒度分布集中。海河典型河流的沉积物分选系数(图 5)表明研究区分选整体较差,分选状况自好到差依次为:滦河、永定河、北三河、徒骇马颊河、黑龙江运东、大清水系、子牙河水系、漳卫河水系,其中,滦河、永定河、徒骇马颊河分选状况较好。

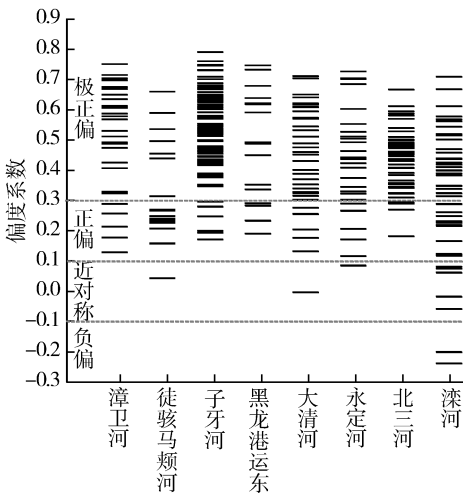
### 2.1.4 偏度系数

偏度系数反映沉积物粒度分布的对称性。海河典型河流沉积物偏度系数(图 6)表明,研究区大部分处于正偏与极正偏区间,沉积物粒度集中在粗端,

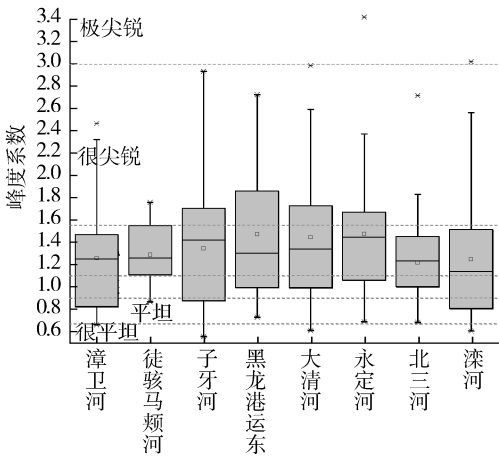
滦河水系有部分样点处在对称与负偏区间,沉积物粒度集中在细端。各水系按照正偏程度由小到大划分为三部分,第一部分是滦河与徒骇马颊河水系,第二部分是永定河、大清河、黑龙港运东与北三河水系,第三部分为漳卫河与子牙河水系。

2.1.5 峰度系数

峰度系数反映粒度频率曲线尖锐程度,海河典型河流沉积物峰度系数分布(图7)表明,研究区沉积物峰度分布区间较大,主要集中在平坦、正态、尖锐和很尖锐区间,其中子牙河与黑龙港运东水系沉积物粒度分布较尖锐。



(a) 峰度系数散点图



(b) 峰度系数箱式图

图7 海河流域8条河流沉积物峰度系数分布

2.1.6 峰数比例

沉积物粒径的频率曲线可分析泥沙沉积的物源,单峰对称曲线表明沉积物为单一物源的自然状态,多峰不对称分布表明泥沙沉积含有多种物质成分<sup>[7]</sup>。根据沉积物粒度曲线的峰数比例,可分析海河流域8条河流的泥沙物源。

沉积物粒度频率曲线的峰数可反应沉积物物源与沉积环境。海河典型河流沉积物粒度曲线的峰数

比例(图8)表明,具有单峰分布沉积物的只有滦河、大清河、漳卫河水系。滦河水系的单、双峰沉积物比例高于其他水系,其4、5峰沉积物分布比例小于其他水系,沉积物源较简单,受人类烦扰少,沉积环境较好,与之前学者根据PAHs的污染情况得到的沉积环境结论相一致<sup>[24]</sup>。北三河、永定河、大清水系4、5峰沉积物比例相对较大,河流情况较复杂,沉积物来源较多。综上,除滦河水系外,由南到北各水系沉积物4、5峰比例有增大趋势而1、2、3峰相应变小。

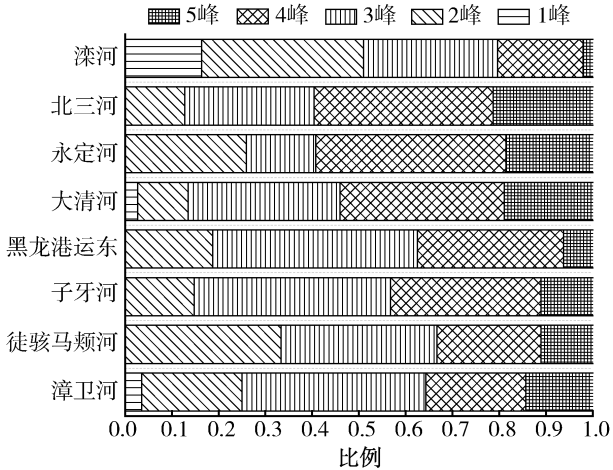


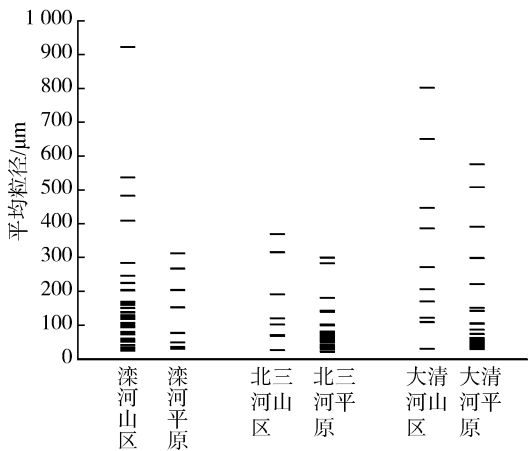
图8 海河流域8条河流沉积物粒度曲线1~5峰比例分布

2.2 海河流域山区与平原水系沉积物粒度参数分布差异比较

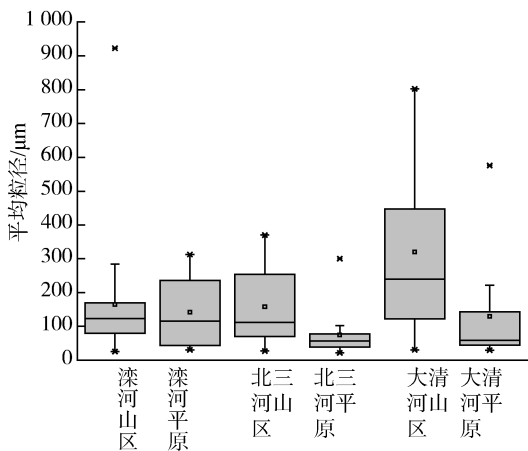
选取海河流域北部的滦河水系(滦河山区与滦河平原)、北三河水系(北三河山区与北三河平原)、大清水系(大清河山区,大清河平原)、海河流域南部的漳卫河水系(漳卫河山区与漳卫河平原)、子牙河水系(子牙河山区与子牙河平原)作为研究对象,分析山区与平原沉积物粒度差异。

2.2.1 海河流域北部山区

海河流域北部三个水系的山区与平原沉积物平均粒径对比(图9)和峰数比例对比(图10)表明,由山区到平原沉积物平均粒径呈减小趋势,水动力条件增强,与山区水系沉积物粒度相比,平原水系平均粒径相对较小且分布集中。滦河水系山区与平原粒径总体差异不明显,山区仅个别样点沉积物粒径值远大于平原区。北三河由山区到平原,1~3峰各比例下降,4~5各峰比例增大,沉积环境复杂化,沉积物来源增多,大清河由山区到平原,1~3峰总体比例下降,但单、双峰增多,该区域受人为扰动小,沉积环境简单,4~5峰各比例减少,复杂环境增多。滦河自山区到平原,单、双峰比例增多,3~5峰各比例减少,表明受人类干扰区域减少,沉积环境变好。



(a) 平均粒径散点图



(b) 平均粒径箱式图

图 9 滦河、北三河、大清河山区与平原沉积物平均粒径比较

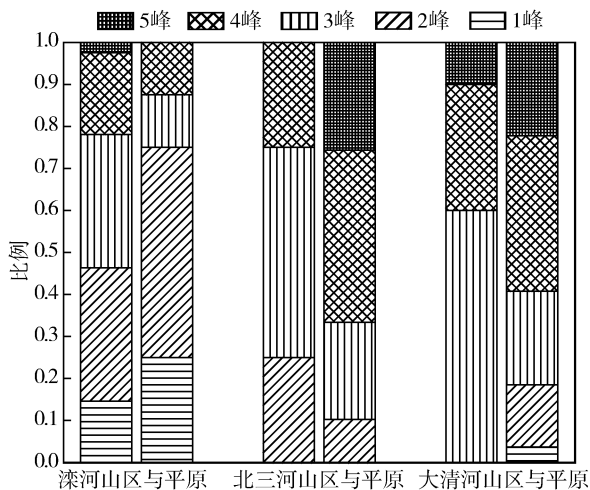
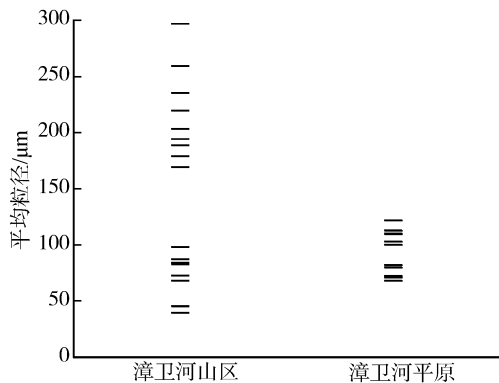


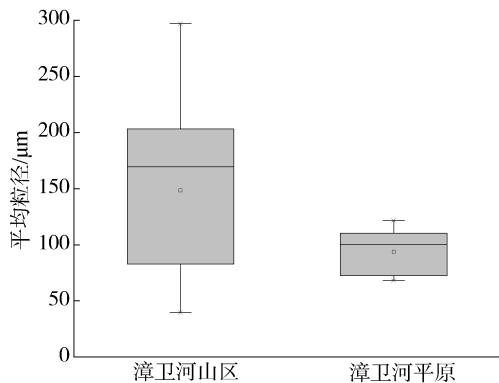
图 10 滦河、北三河、大清河山区与平原沉积物  
粒度曲线峰数比例

### 2.2.2 海河流域南部山区

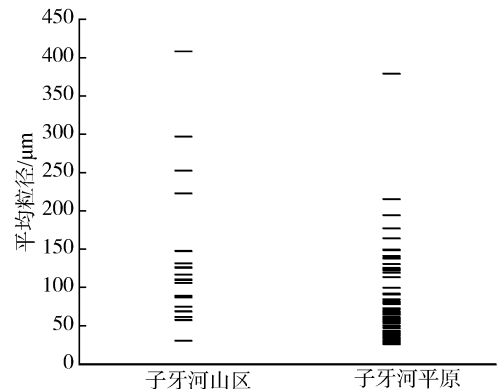
海河流域南部山区与平原水系沉积物平均粒径 (图 11) 与峰数比例 (图 12) 对比表明, 由山区到平原, 平均粒径值有逐渐减小且分布集中的趋势 ( $p < 0.01$ ), 水力条件增强, 1 ~ 3 峰沉积物比例减小, 4 ~ 5 峰沉积物比例增大, 沉积环境复杂化, 沉积物源增多。



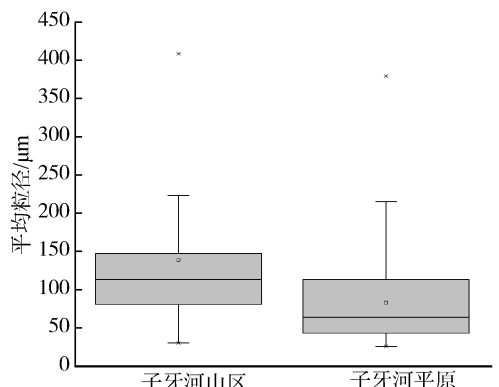
(a) ZW 山区与平原沉积物平均粒径散点图



(b) ZW 山区与平原沉积物平均粒径箱式图

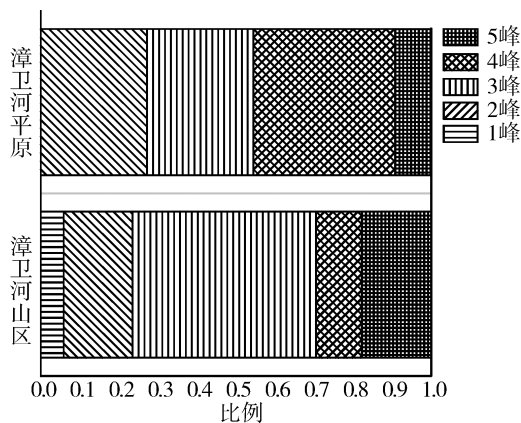


(c) ZY 山区与平原沉积物平均粒径散点图

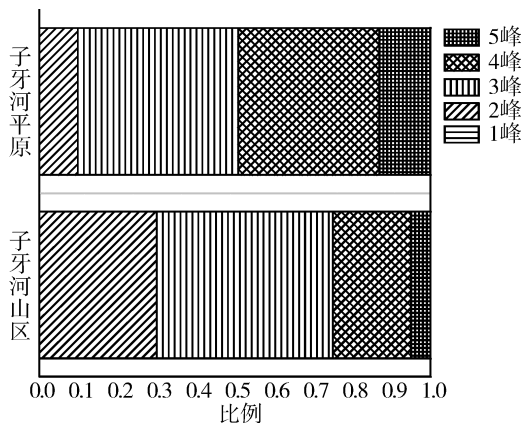


(d) ZY 山区与平原沉积物平均粒径箱式图

图 11 漳卫河水系 (ZW)、子牙河水系 (ZY) 山区与平原沉积物平均粒径比较



(a) 漳卫河水系



(b) 子牙河水系

图 12 漳卫河与子牙河水系沉积物粒度曲线峰数比例

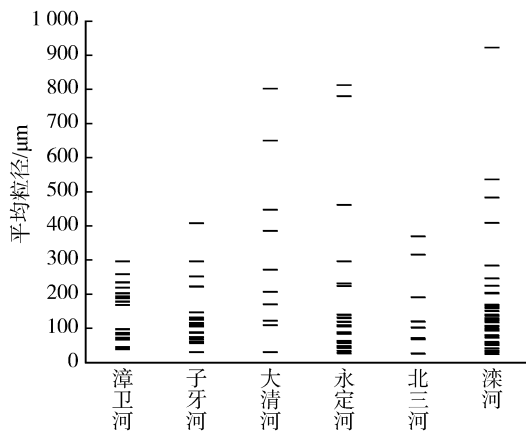
## 2.3 海河流域山区及平原水系沉积物粒度参数分布的南北差异分析

海河流域源近流急,从北向南共计分为 9 大水系,呈扇面形分布,汇入渤海湾。不同水系的水环境污染状况不同,各自水系从物理完整性的角度探索人为活动的影响及粒径变化可能有所不同。海河流域山区水系由南至北包括漳卫河、子牙河、大清河、永定河、北三河和滦河山区 6 个水系。平原水系由南至北为漳卫河、徒骇马颊河、子牙河、黑龙港运东、大清河、北三河和滦河冀东平原共计 7 个水系。分析山区及平原两组水系的粒度参数,可探究粒度参数分布的纬度是否存在差异。

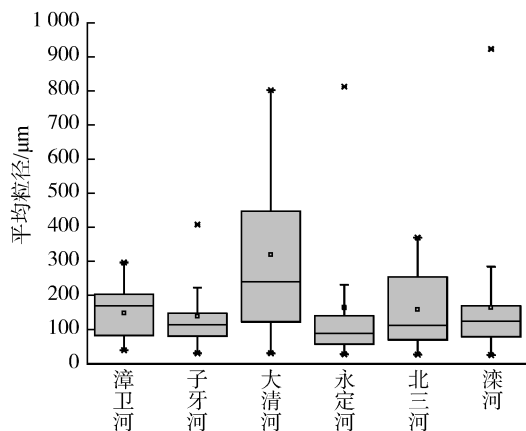
### 2.3.1 山区

海河流域山区水系沉积物粒度参数分布(图(13))自北向南,水系沉积物平均粒径分布集中化,分选状况变差,水动力条件增强。其中永定河与滦河山区出现较多分选中等、较好和好的样点。

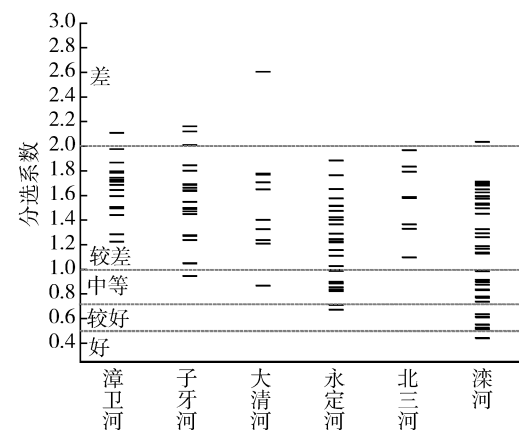
偏度系数变化不显著,其中滦河与永定河水系有部分样点处于对称区间,其他水系均处于正偏或极正偏区间,沉积物粒度分布偏粗端,无明显的南北差异,其中永定河水系峰态最为尖锐。



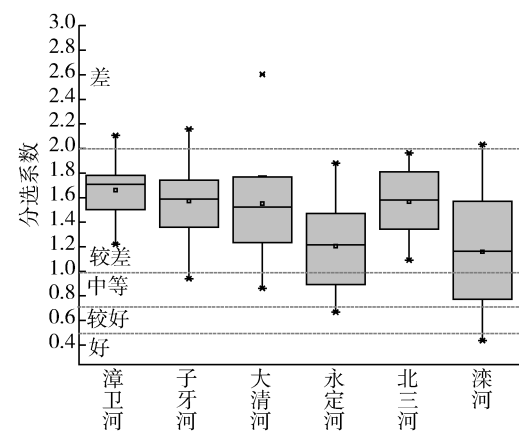
(a) 平均粒径散点图



(b) 平均粒径箱式图



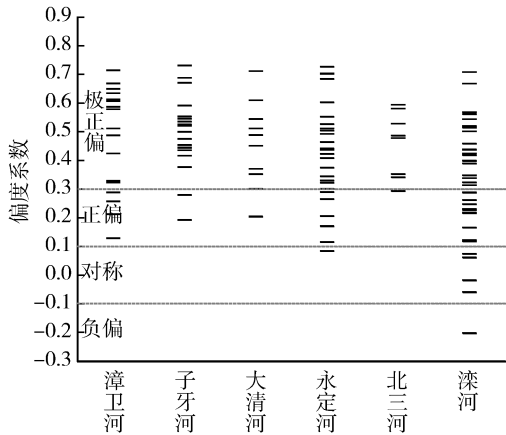
(c) 分选系数散点图



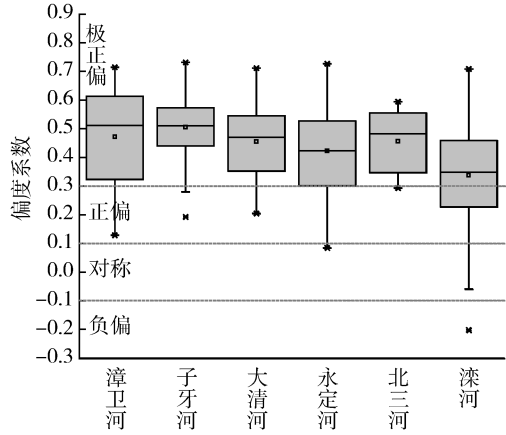
(d) 分选系数箱式图

2.3.2 平原

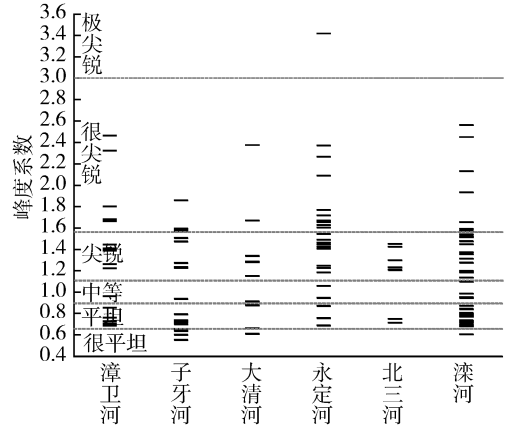
海河流域平原地区 7 个水系的沉积物粒度参数 (图 14) 总体上南北无明显变化规律。沉积物平均粒径均值自北向南表现出减小的趋势且分布集中化,水动力条件减弱,其中子牙河平原水系平均粒径高于同纬度的漳卫河水系,子牙河平原地区来自上游山区的支流较多,同时人工开挖河道,如滏阳新河、滏东排河、石津总干渠等,可能导致了这一区域河流水动力增强,沉积物粒径增大。大清河水系淀西平原区出现了若干平均粒径值较高的样点,超过了其他北部平原水系,原因同样在于白洋淀以上来自山区支流较多,同时支流上游分布众多水库,水库的存在对下游河道侵蚀作用较大。滦河平原水系分选最好。研究区平原水系沉积物偏度系数变化规律不明显,除徒骇马颊河水系外从北向南沉积物偏度有向正偏—极正偏的变化趋势,而峰度系数除北三河水系外北到南沉积物峰态系数由很尖锐向平坦变化趋势。



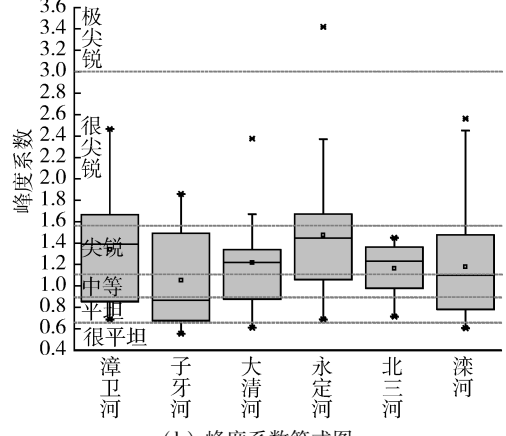
(e) 偏度系数散点图



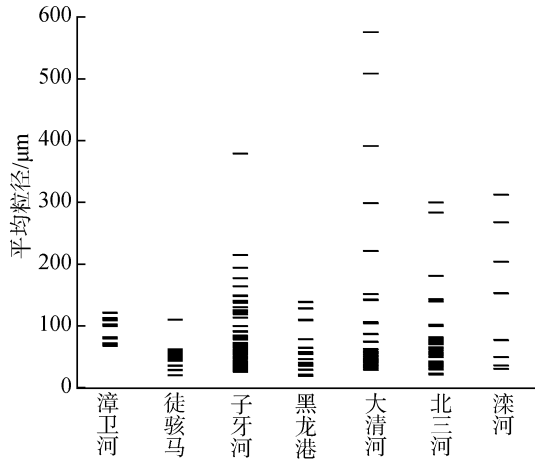
(f) 偏度系数箱式图



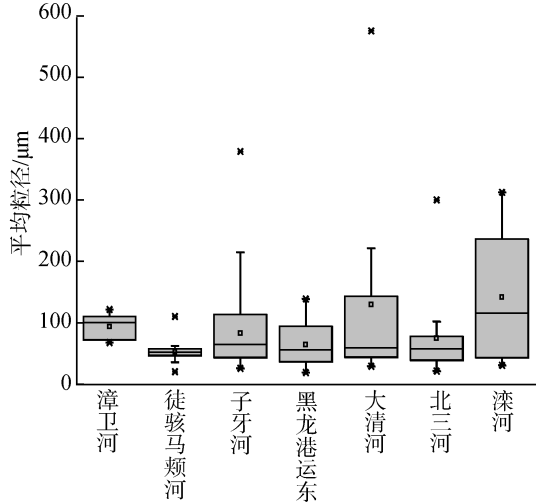
(g) 峰度系数散点图



(h) 峰度系数箱式图



(a) 平均粒径散点图



(b) 平均粒径箱式图

图 13 海河流域山区部分各水系沉积物粒度参数分布

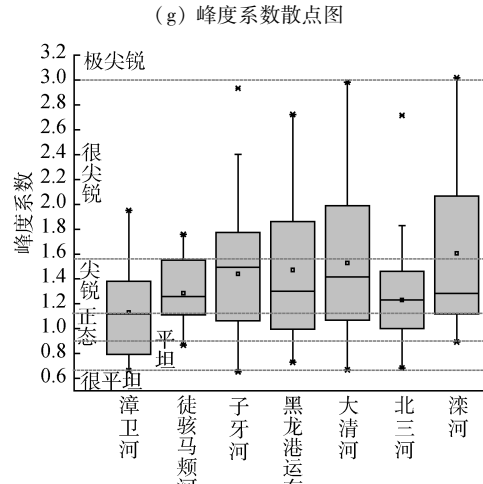
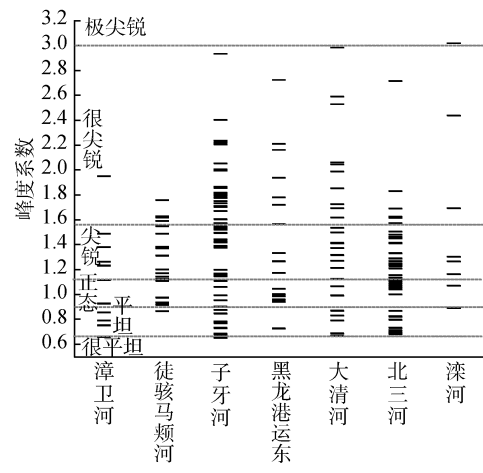
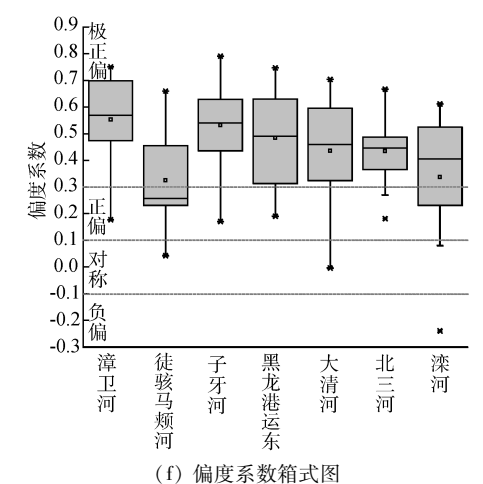
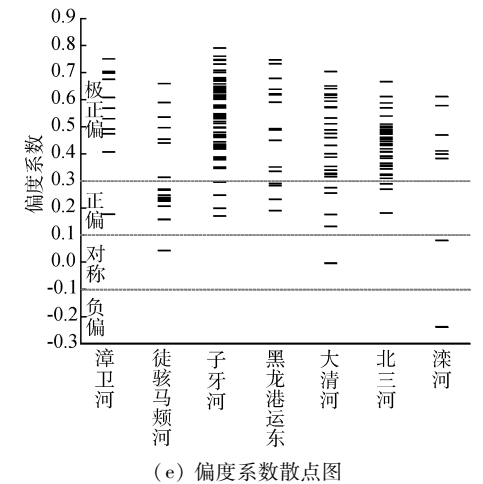
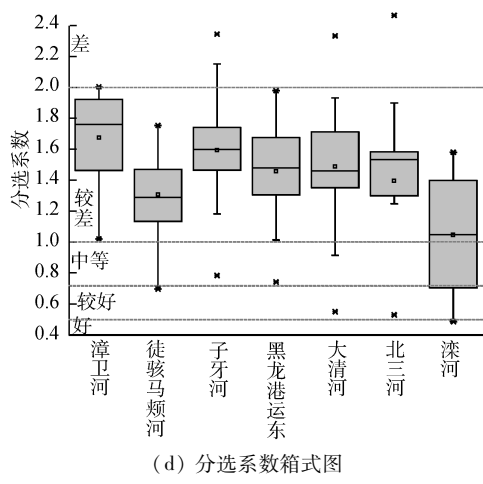
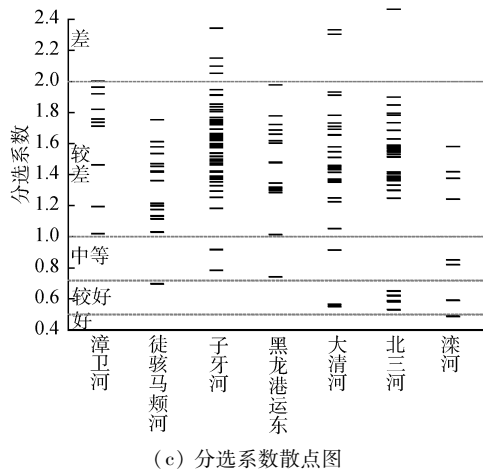


图 14 海河流域平原部分各水系沉积物粒度参数分布

### 3 结 论

- a. 海河典型河流沉积物平均粒径差异显著, 大清河 ( $181.3 \mu\text{m}$ ) > 永定河 ( $165.4 \mu\text{m}$ ) > 滦河 ( $160.6 \mu\text{m}$ ) > 漳卫河 ( $127 \mu\text{m}$ ) > 子牙河 ( $97 \mu\text{m}$ ) > 北三河 ( $89 \mu\text{m}$ ) > 黑龙港运东 ( $64.6 \mu\text{m}$ ) > 徒骇马颊河 ( $52.7 \mu\text{m}$ ), 粉砂和砂是沉积物的主要组分, 黏土含量较低 ( $< 10\%$ ), 总体分选水平较差, 基本处于正偏与极正偏区间, 粒度集中在粗端, 峰度分布区间较大, 集中在平坦、正态、尖锐和很尖锐区间, 粒度曲线具有多峰, 说明研究区河流受人为干扰强度较大, 河流沉积物源较为复杂, 栖息地物理完整性差。
- b. 海河流域山区水系与平原水系相比, 沉积物平均粒径减小, 呈集中分布, 水动力减弱, 其中滦河水系山区与平原差异不显著; 其他水系 4~5 峰比例随山区到平原而增大, 沉积环境复杂化, 受人为干扰增大。
- c. 海河流域山区与平原区水系沉积物粒径参数变化规律不同。山区自北向南变化明显, 水系沉积物平均粒径减小, 分布集中化, 分选状况变差, 由极正偏-正偏, 向对称方向变化, 峰度向平坦方向趋

近,水动力减弱,符合粒径自然变化规律。平原区水系沉积物粒径参数表明南北变化不明显,因受较多支流、河流-湖泊-洼淀湿地等复杂系统和人为干扰强烈的影响,南北无显著变化规律。

海河流域河流生态系统栖息地物理完整性是生态系统恢复重建和水环境改善的前提条件,各种人为干扰例如土地利用变化、岸带人工化和闸坝建设等均对河流沉积物的结构与组成产生重要的影响,应在河流生态系统管理中加强对河流底质的物理、化学和生态因子进行一体化的系统监测和分析,建议特别是在水库闸坝上下点位设置固定监测点位,对于不同水平年和年内丰平枯季节粒径变化进行长期的监测,可为河流栖息地完整性评估与生态修复提供科学数据和技术支撑。

参考文献:

[ 1 ] 傅开道,杨文辉,苏斌,等 流域环境变化的河流沉积物粒度响应:澜沧江案例[J]. 地理科学进展,2015,34(9):1148-1155. (FU Kaidao,YANG Wenhui,SU Bin,et al. Response of river sediments to basin environmental changes:a case study of the Lancang River[J]. Progress in Geography,2015,34(9):1148-1155. (in Chinese))

[ 2 ] 谢倩雯,李一平,孔文. 沉积物再悬浮测量方法综述[J]. 水资源保护,2015,31(6):141-149. (XIE Qianwen,LI Yiping,KONG Wen. Review on methods of measuring sediment re-suspension[J]. Water Resources Protection,2015,31(6):141-149. (in Chinese))

[ 3 ] 朱林,汪院生,邓建才,等. 长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征[J]. 水资源保护,2015,31(6):135-140. (ZHU Lin,WANG Yuansheng,DENG Jiancai,et al. Spatial distribution and contamination characteristics of nutrients in surface sediment of Changdang Lake[J]. Water Resources Protection,2015,31(6):135-140. (in Chinese))

[ 4 ] 燕文明,刘凌,周利,等. 里下河地区代表性浅水湖泊表层沉积物可转化态氮的赋存特征[J]. 水资源保护,2015,31(5):30-34. (YAN Wenming,LIU Ling,ZHOU Li,et al. Occurrence characteristic of transferable nitrogen forms in sediments on surface of representative shallow lakes of Lixiahe Region[J]. Water Resources Protection,2015,31(5):30-34. (in Chinese))

[ 5 ] 刘红,何青,王元叶,等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. 沉积学报,2007,25(3):445-455. (LIU Hong,HE Qing,WANG Yuanye,et al. Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang Estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2007,25(3):445-455. (in Chinese))

[ 6 ] 邓程文,张霞,林春明,等. 长江河口区末次冰期以来沉积物的粒度特征及水动力条件[J]. 海洋地质与第四纪地质,2016(6):185-198. (DENG Chengwen,ZHANG

Xia,LIN Chunming,et al. Grain-size characteristics and hydrodynamic conditions of the Changjiang esturine deposits since last glacial [J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2016(6):185-198. (in Chinese))

[ 7 ] 黄广,陈沈良,胡静. 南汇东滩沉积物粒度特征及其与水动力的关系[J]. 海洋湖沼通报,2008(1):32-38. (HUANG Guang,CHEN Shenliang,HU Jing. Sediment characteristics and its relationship to hydrodynamic on Nanhui subfluvial flat [J]. Transactions of Oceanology & Limnology,2008(1):32-38. (in Chinese))

[ 8 ] SUN L,ZANG S. Relationship between polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and particle size in dated core sediments in Lake Lianhuan,Northeast China[J]. Science of the Total Environment,2013,461/462:180-187.

[ 9 ] 李小妹,严平,钱瑶,等. 西拉木伦河流域地表沉积物粒度、化学元素分布特征[J]. 干旱区研究,2017,34(1):191-199. (LI Xiaomei,YAN Ping,QIAN Yao,et al. Spatial distribution of grain size and chemical elements in surface sediments in the Xar Moron River Basin[J]. Arid Zone Research,2017,34(1):191-199. (in Chinese))

[10] 安福元,马海州,樊启顺,等. 粒度在沉积物物源判别中的运用[J]. 盐湖研究,2012,20(1):49-56. (AN Fuyuan,MA Haizhou,FAN Qishun,et al. The application of grain size analysis in sediments provenance discriminance[J]. Journal of Salt Lake Research,2012,20(1):49-56. (in Chinese))

[11] 刘朝,师育新,戴雪荣,等. 钱塘江河口区不同河段表层沉积物粒度特征及其对水动力的响应[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2016(6):182-191. (LIU Chao,SHI Yuxin,DAI Xuerong,et al. Grain size characteristics of the surface sediments from the Qiantang River Estuary and their implication for sedimentary hrdrodynamics[J]. Journal of East China Normal University (Nature Science),2016(6):182-191. (in Chinese))

[12] 王中波,李日辉,张志珣,等. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J]. 海洋地质与第四纪地质,2016(6):101-109. (WANG Zhongbo,LI Rihui,ZHANG Zhixun,et al. Grain size composition and distribution pattern of seafloor sediments in Bohai Bay and adjacent areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2016(6):101-109. (in Chinese))

[13] 肖晓,石要红,冯秀丽,等. 北部湾表层沉积物粒度分布规律及沉积动力分区[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2016,46(5):83-89. (XIAO Xiao,SHI Yaohong,FENG Xiuli,et al. Surface sediment characteristic and dynamics in Beibu Gulf [J]. Periodical of Ocean University of China (Nature Science),2016,46(5):83-89. (in Chinese))

[14] 刘静玲,包坤,李毅,等. 滦河流域水库对河流表层沉积物粒度空间分布影响的研究[J]. 农业环境科学学报,2015,34(5):955-963. (LIU Jingling,BAO Kun,LI Yi,et al. Spatial distribution characteristics in grain size of river

- surface sediments under the influence of reservoirs in the Luanhe River Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5): 955-963. (in Chinese))
- [15] 王艳杰,唐红渠,姜仕军. 流溪河水库沉积物粒度的时空分布及其沉积动力学意义[J]. 生态科学, 2015, 34(3): 1-6. (WANG Yanjie, TANG Hongqu, JIANG Shijun. Spatial and temporal distributions of sediment grain size and their implications for depositional dynamics in Liuxihe Reservoir [J]. Ecological Science, 2015, 34(3): 1-6. (in Chinese))
- [16] 徐晓君,杨世伦,张珍. 三峡水库蓄水以来长江中下游干流河床沉积物粒度变化的初步研究[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 103-107. (XU Xiaojun, YANG Shilun, ZHANG Zhen. Variation in grain size of sediment in middle and lower Changjiang River since impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(1): 103-107. (in Chinese))
- [17] 任韧希子,陈沈良. 黄河三角洲的沉积动力分区[J]. 上海国土资源, 2012, 30(2): 62-68. (REN Renxizi, CHEN Shenliang. Sediment dynamics in the littoral zone of the yellow river delta[J]. Shanghai Land & Resources, 2012, 30(2): 62-68. (in Chinese))
- [18] 江波,欧阳志云,苗鸿,等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2236-2244. (JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al. Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2236-2244. (in Chinese))
- [19] 张洪,林超,雷沛,等. 海河流域河流耗氧污染变化趋势及氧亏分布研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2324-2335. (ZHANG Hong, LIN Chao, LEI Pei, et al. Trends of pollution by the oxygen-consuming substances and the distribution of oxygen deficiency in the Haihe River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(8): 2324-2335. (in Chinese))
- [20] 盖美,耿雅冬,张鑫. 海河流域地下水生态水位研究[J]. 地域研究与开发, 2005, 24(1): 119-124. (GAI Mei, GENG Yadong, ZHANG Xin. Research on groundwater ecology water level of Haihe River Basin [J]. Areal Research and Development, 2005, 24(1): 119-124. (in Chinese))
- [21] 范兰池,朱龙基,戴乙. 海河流域入河排污口变化及对策分析[J]. 海河水利, 2013(1): 13-15. (FAN Lanchi, ZHU Longji, DAI Yi. Analysis on the change and countermeasure of sewage outlet in Haihe River Basin [J]. Haihe Water Resources, 2013(1): 13-15. (in Chinese))
- [22] 王宏,杨霓云,沈英娃,等. 海河流域几种典型有机污染物环境安全性评价[J]. 环境科学研究, 2003, 16(6): 35-36, 52. (WANG Hong, YANG Niyun, SHEN Yingwa, et al. Safety assessment on several organic pollutants of the Haihe River Valley [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(6): 35-36. (in Chinese))
- [23] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [24] LIU J L, ZHANG J, LIU F, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment of typical estuaries and the spatial distribution in Haihe River Basin [J]. Ecotoxicology, 2014, 23(4): 486-494.
- (收稿日期:2017-05-09 编辑:彭桃英)

(上接第8页)

- [61] RAKOWSKA M I, KUPRYIANCHYK D, HARMSSEN J, et al. In situ remediation of contaminated sediments using carbonaceous materials[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, 31(4): 693-704.
- [62] TOMBÁČZ E, SZEKERES M. Surface charge heterogeneity of kaolinite in aqueous suspension in comparison with montmorillonite[J]. Applied Clay Science, 2006, 34(1): 105-124.
- [63] ZHOU D, ABDEL-FATTAH A I, KELLER A A. Clay particles destabilize engineered nanoparticles in aqueous environments[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(14): 7520-7526.
- [64] WANG H, DONG Y, ZHU M, et al. Heteroaggregation of engineered nanoparticles and kaolin clays in aqueous environments[J]. Water Research, 2015, 80: 130-138.
- [65] LIU J, HWANG Y S, LENHART J J. Heteroaggregation of bare silver nanoparticles with clay minerals [J]. Environmental Science: Nano, 2015, 2(5): 528-540.
- [66] ZHAO J, LIU F, WANG Z, et al. Heteroaggregation of graphene oxide with minerals in aqueous phase [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(5): 2849-2857.
- [67] SOTIRELIS N P, CHRYSIKOPOULOS C V. Heteroaggregation of graphene oxide nanoparticles and kaolinite colloids [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 736-744.
- [68] YIN W Z, YANG X S, ZHOU D P, et al. Shear hydrophobic flocculation and flotation of ultrafine Anshan hematite using sodium oleate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 652-664.
- [69] CHEKLI L, ZHAO Y X, TIJING L D, et al. Aggregation behaviour of engineered nanoparticles in natural waters: characterising aggregate structure using on-line laser light scattering[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 284: 190-200.
- [70] TELEKI A, WENGELER R, WENGELER L, et al. Distinguishing between aggregates and agglomerates of flame-made TiO<sub>2</sub> by high-pressure dispersion[J]. Powder Technology, 2008, 181(3): 292-300.
- (收稿日期:2017-06-23 编辑:徐 娟)