

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

刘静玲, 包 坤, 李 毅, 郎思思

(水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘 要:分析沉积物粒度空间分布规律对于揭示水库的修建对河流污染物沉积和分布的影响具有重要意义。根据海拔高度与河流走向的关系,在滦河干流与支流采集 75 个表层沉积物样品,对平均粒径、分选系数、偏度系数、峰度系数和粒径差进行分析。结果表明:滦河干流平均粒径为 $142.3\ \mu\text{m}$,分选系数 3.86,偏度系数 0.31,峰度系数 1.26;滦河支流平均粒径为 $208.2\ \mu\text{m}$,分选系数 2.86,偏度系数 0.39,峰度系数 1.25;滦河干流和支流沉积物平均粒径在上中下游差异显著,干流下游($237.1\ \mu\text{m}$)>上游($153.3\ \mu\text{m}$)>中游($71.4\ \mu\text{m}$);支流下游($531.1\ \mu\text{m}$)>上游($60.7\ \mu\text{m}$)>中游($42.4\ \mu\text{m}$);显示出沉积物沿程粗化的空间分布规律;滦河干流与支流沉积物平均粒径之间差异显著,支流($208.2\ \mu\text{m}$)>干流($142.3\ \mu\text{m}$);水库对表层沉积物组分、分选性、偏度和峰度影响显著,水库规模与坝下和坝上沉积物的平均粒径差值呈正相关;建议水资源管理部门加强对河流表层沉积物粒度的监测与分析。

关键词:滦河流域;表层沉积物;粒度;空间分布;水库

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0955-09 doi:10.11654/jaes.2015.05.019

Spatial Distribution Characteristics in Grain Size of River Surface Sediments Under the Influence of Reservoirs in the Luanhe River Basin

LIU Jing-ling, BAO Kun, LI Yi, LANG Si-si

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The Luanhe River is located in northern part of the Haihe River Basin, China. It is an important water source for industry and agriculture in Beijing, Tianjin and Hebei Province. The present study is to investigate the influence of reservoirs on the spatial distribution characteristics in grain size of surface sediments in the Luanhe River. Seventy-five surface sediment samples were collected from the Luanhe River and its main tributaries. Sediments grain size parameters, which included average particle size, Sorting coefficient, Skewness, Kurtosis and degree of average particle size, were measured by a laser particle analyzer. Results showed that the average particle size of surface sediments in the upstream of the Luanhe River or its tributaries was significant different from that in the downstream, demonstrating an obvious trend in terms of surface sediment grain coarsening from upstream to downstream. Furthermore, the size of reservoirs had positive relationship with the degree to which the average particle size of sediment at upstream was different from that at downstream of reservoirs. Our hypothesis was that the twenty-nine large and medium size reservoirs had tremendous impacts on the distribution characteristics in surface sediment grain sizes in the Luanhe River and its tributaries. This study provided fundamental information on the environmental conservation, ecological restoration, and water management of the Luanhe River Basin.

Keywords: Luanhe River Basin; surface sediment; grain size; spatial distribution; reservoirs

收稿日期:2015-02-02

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项:海河流域河流物理过程演变与环境流量保障技术与应用示范(2012ZX07203-006)

作者简介:刘静玲(1962—),女,吉林长春人,博士,教授,主要从事水生态风险评价与生态系统管理研究。E-mail:jingling@bnu.edu.cn

沉积物是河流系统的重要组成部分,表层沉积物是河床底质在一定的水动力条件下长期作用而形成的^[1],通过研究沉积物的粒度参数可以用来识别不同的沉积环境类型^[2],追溯过去发生的自然事件或人类活动^[3],对沉积物的物源及成因进行识别^[4]。随着人类活动范围和强度的扩展,河流污染程度加剧,受污染的河水经过沉降、吸附等作用,污染物质积聚在沉积物中,使其成为二次污染源^[5]。滦河流域地处华北平原,人口密集,工业发达,多环芳烃^[6]及重金属^[7]污染具有很高的生态风险。水体中的污染物极易吸附在表层沉积物上^[8],且主要集中在1 mm 粒径以下的沉积物中^[9],浓度与沉积物粒径具有一定相关性,多环芳烃与重金属在沉积物中的含量与沉积物某一组分含量呈显著正相关关系^[10-11],或者其浓度峰值出现在砂级以下某一粒径区间的沉积物中^[12]。普遍的规律是沉积物粒径越小,其比表面积越大,吸附能力就越强,包含污染物质越多^[13]。不同区域沉积物的粒度参数分布有其特有规律,其空间分布规律是由所处沉积环境的水动力条件、介质运移机制等诸多因素形成的,同时这些因素又受人类活动的影响^[14]。河流上的水利设施阻断了自然河流泥沙迁移变化,进而改变了河流沉积物的组成^[15]及分布^[16]。水库长期蓄水会减少下游区域泥沙输入,造成河床侵蚀^[17],也会导致表层沉积物的粒度粗化^[18],三峡水库在蓄水后,改变了下泄的水沙条件及泥沙输移特性,引起大坝下游河流表层沉积物粒度特性发生改变^[19],随着三峡水库的建成和蓄水运行,造成下游输沙量减小,下游河床出现严重侵蚀,沉积物粒径明显粗化^[20]。沉积物粒度参数具有时空变化特征,通过研究某一河流的沉积物粒度的空间分布规律,可以解析出河流泥沙迁移及河道变化过程^[21]。

流域尺度下对于河流沉积物相关的研究重点关注在河流^[20]、湖泊^[22]或近海生态单元^[23]的沉积物粒度时空分布上。本文以滦河流域为研究区,拟研究滦河干流与主要支流河流表层沉积物中粒度在2 mm 以下的砂、黏土组分的空间分布规律及其成因,并分析大中型水库对沉积物粒度的影响,为滦河流域河道生态修复方案制定和水库合理调度提供科学依据和技术支持。

1 采样与分析方法

1.1 研究区域概况

滦河流域位于华北平原东北部,是海河流域四大子流域之一,位于东经115°30′~119°45′,北纬39°10′~

42°40′,发源于河北省丰宁县巴颜图古尔山麓,流入内蒙古自治区称为闪电河,纳吐力根河后称大滦河,在郭家屯与小滦河汇合后称滦河,经承德地区进入冀东平原,在乐亭县流入渤海,全长885 km,流域面积44 600 km²。其中,山区面积43 940 km²,平原面积810 km²(图1)。滦河水量充沛,支流众多,由上至下大的支流有小滦河、兴州河、伊逊河、蚂蚁吐河、武烈河、老牛河、柳河、瀑河、澈河、青龙河等,在整个海河流域中,滦河流域人为污染干扰较小,是下游经济发达地区的重要水源地(引滦入津工程)。滦河流域水库闸坝等人工水利设施较多,上游有闪电河水库、双山水库、庙宫水库等,中下游建有潘家口水库、大黑汀水库、桃林口水库等大型水库,此3座水库控制了流域面积的90%。

1.2 滦河流域河流表层沉积物的采集

根据滦河水量及水利设施情况,2013年8月在滦河流域设置25个采样点,如图1所示,点位高程即经纬度如表1所示。其中在干流设置15个采样点,L1~L7为上游,L8~L12为中游,L13~L15为下游,在小滦河(XL)、伊逊河(YX1、YX2和YX3)、武烈河(WL)、老牛河(LN)、柳河(LH)、青龙河(QL1、QL2和QL3)等6条支流设置10个采样点,小滦河位于上游,伊逊河、武烈河和老牛河位于中游,柳河和青龙河位于下游。河流表层沉积物用抓泥斗采集,采样深度10 cm,在各个样点的离岸2~5 m区域采集3个平行沉积样,装入聚乙烯袋。

1.3 分析方法

在实验室,将各个样点沉积物自然风干,将块状样品研磨至粉末状,过10目筛,舍弃砾级样品,取2 mm以下砂、黏土质样品,沉积物粒度参数采用激光粒度仪(Microtrac S3500)湿式测量法测定。主要测定平均粒径(Mz)、分选系数(σ 1)、偏度系数(Skewness)和峰度系数(Kurtosis)参数,并计算水库坝下与坝上的平均粒径差($M=M_D-M_U$,其中, M_D 表示水库坝下平均粒径, M_U 表示水库坝上平均粒径)。同时,根据沉积物粒度划分标准,将每个沉积物划分成黏土(0~0.004 mm)、粉砂(0.004~0.063 mm)和砂(0.063~2 mm)^[24]。数据利用Origin软件和SPSS进行作图和分析。

2 结果与讨论

2.1 滦河干流河流表层沉积物粒度参数空间分布规律

从滦河干流15个采样点河流表层沉积物粒度参数测定结果可以看出(图2),滦河干流沉积物的分选

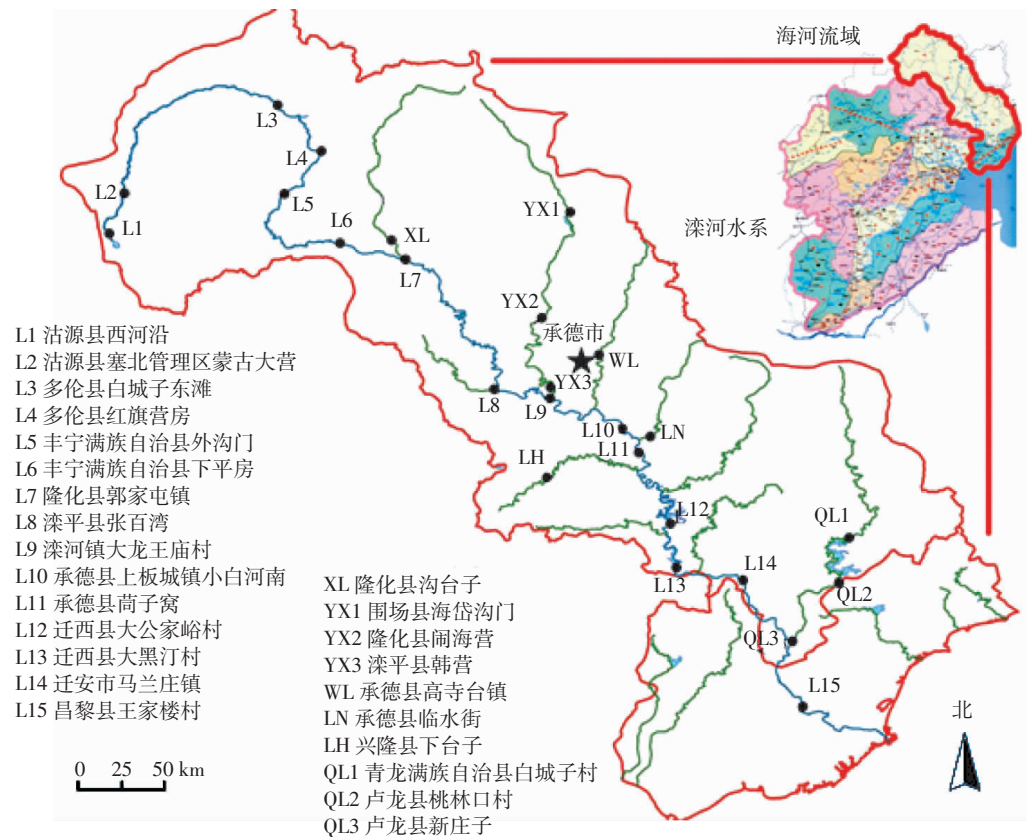


图 1 滦河流域采样点位置分布

Figure 1 Location of sampling sites within the Luanhe River Basin

表 1 滦河干流与支流采样点基本信息

Table 1 Basic information of sampling points

采样点位	海拔高度/m	经纬度	采样点位	海拔高度/m	经纬度
L1	1420	115°78' E, 41°70' N	L14	65	118°61' E, 40°13' N
L2	1360	115°84' E, 41°88' N	L15	13	118°87' E, 39°56' N
L3	1230	116°53' E, 42°28' N	XL	587	117°04' E, 41°67' N
L4	1195	116°72' E, 42°07' N	YX1	921	117°83' E, 41°79' N
L5	1155	116°56' E, 41°87' N	YX2	555	117°71' E, 41°31' N
L6	882	116°81' E, 41°65' N	YX3	456	117°75' E, 41°01' N
L7	780	117°10' E, 41°58' N	WL	302	117°96' E, 41°15' N
L8	482	117°49' E, 40°99' N	LN	272	118°19' E, 40°78' N
L9	366	117°74' E, 40°95' N	LH	428	117°73' E, 40°60' N
L10	280	118°07' E, 40°81' N	QL1	345	119°22' E, 40°30' N
L11	255	118°14' E, 40°71' N	QL2	82	119°03' E, 40°12' N
L12	200	118°28' E, 40°39' N	QL3	42	118°83' E, 39°85' N
L13	106	118°31' E, 40°19' N			

注: L1~L15 为滦河干流; XL~QL3 为滦河支流。

性整体很差(分选系数:1.80~4.66)。15 个采样点的沉积物粒度基本正偏(偏度系数:−0.20~0.57),中下游比上游更加正偏。中下游粒度峰态呈现出更尖锐的趋势(峰度系数:1.10~2.13)。

中上游沉积物平均粒径变化较小且相对集中,下游有较大波动,其中 L13 和 L15 两点平均粒径明显变大(最高值在 L13 点为 409.9 μm)(图 3)。滦河流域地貌变化与河流走向一致,由高原经山地过渡到平原,

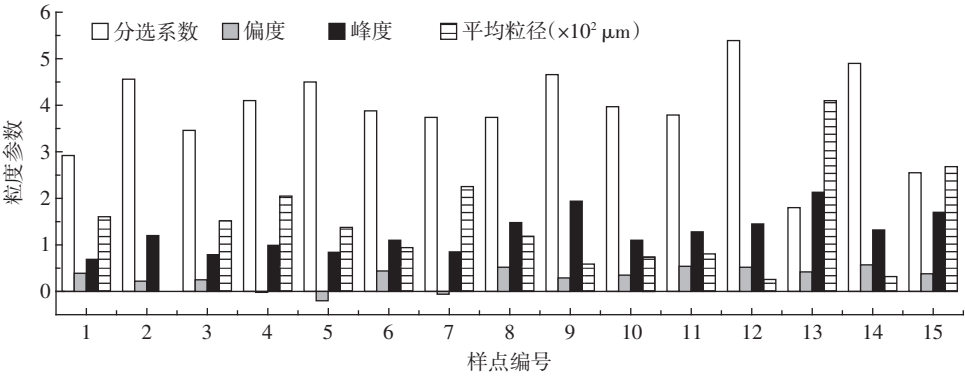


图 2 滦河干流各样点沉积物粒度参数

Figure 2 Surface sediments grain size parameters in Luan River

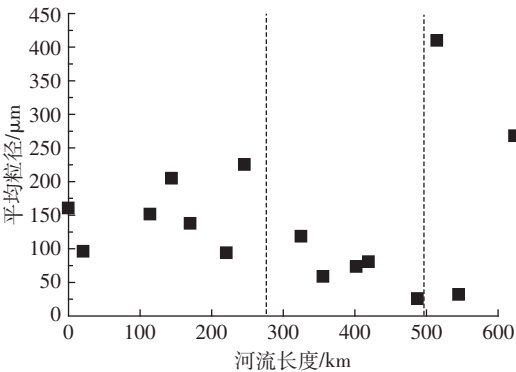


图 3 滦河干流沉积物平均粒径

Figure 3 Average particle size of surface sediments in Luan River

而流域地貌的变化是河流沉积物特征变化的一个自然影响因素,由此研究采样点海拔高度与河流走向的关系(图 4),通过线性回归(Pearson's $r=-0.97$)发现沿河向下样点海拔呈线性下降趋势,而平均粒径空间分布不规则的波动显示出地形环境不是滦河沉积物粒径变化的关键影响因子。

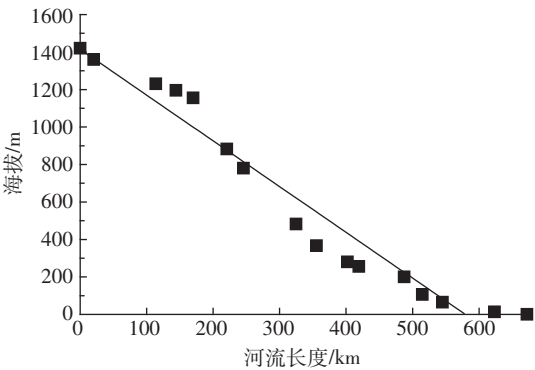


图 4 沿河纵向各采样点海拔高度变化

Figure 4 Longitudinal altitude variation of all sampling points in Luan River

利用 SPSS 软件进行回归分析,研究滦河中上游沉积物粒径变化规律并分析成因(图 5)。结果表明,上游河段沉积物平均粒径有增大趋势(最高值在 L7 点为 $225.3\text{ }\mu\text{m}$),而中游河段逐渐变小(最低值在 L12 点为 $25.7\text{ }\mu\text{m}$)。滦河上游闸坝众多,导致下游河水含沙量变小,造成河道沉积物粗化^[20]。Katie H 和 Costigan 等^[15]对美国 Ninnescah 河 200 km 河段的 11 个表层沉积物进行研究,分析发现 11 个表层沉积物粒径出现了细化的趋势。从本文与 Katie H 等研究分别得出的沉积物粒径沿程细化方程可以看出(表 2),滦河流域水利设施相对较多,而上游水库是造成沉积物粒径波动的重要因素。

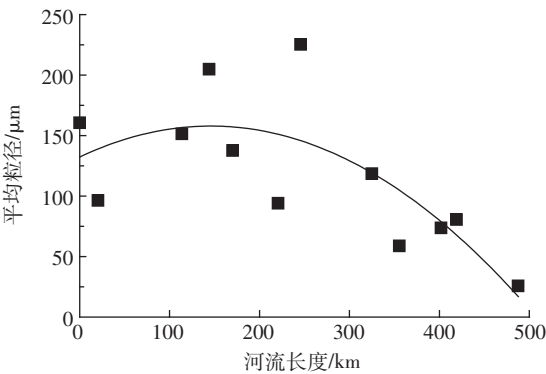


图 5 滦河干流中上游沉积物平均粒径

Figure 5 Average particle size of surface sediments in upper and middle reaches of Luan River

为了较全面地反映出沉积物颗粒的组成变化,将其划分为黏土、粉砂和砂(图 6)。从 L1 到 L9 点黏土的含量几乎为 0,下游地区有缓慢增长的趋势,但是整体含量较小,最高点出现在 L14,也仅为 5.5%,而粉砂和砂的含量占总体的比例近 95%。其中砂的含量变化与平均粒径的变化趋势较为一致,上游地区砂

表 2 表层沉积物粒径沿程细化方程

Table 2 Downstream fining equation of surface sediment grain size

研究区域	点位/个	河段长度/km	方程	参考文献
滦河流域	12	500	$y=132.3+0.35x-0.001\ 21x^2(R^2=0.56,F=5.7,P=0.026)$	本研究
美国 Ninneseah 河	11	200	$y=e^{-0.003\ 2x}(R^2=0.44,F=7.0,P=0.027)$	[15]

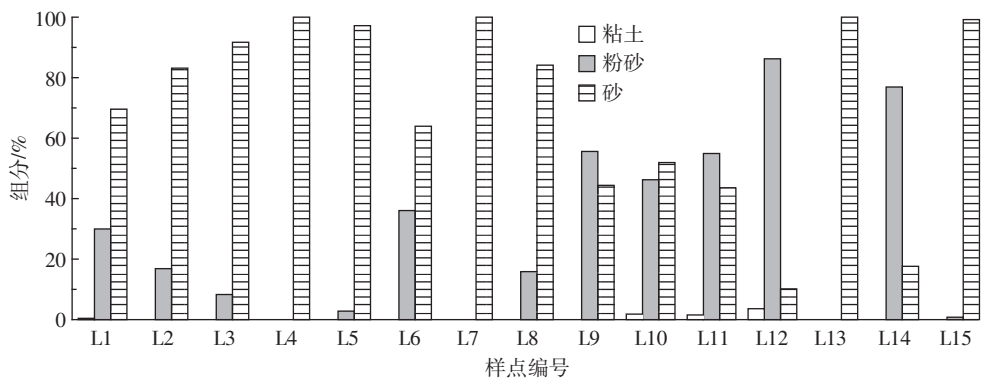


图 6 滦河流域表层沉积物组分变化

Figure 6 Composition distribution of surface sediments in Luan River

的含量占优势,中游地区砂与粉砂含量相当,下游出现波动。其中上游地区的 L4、L5 和 L7 三个样点沉积物砂的含量几乎达到 100%,这也说明了上游水库对沉积物组分的显著影响。

比较滦河干流上中下游的沉积物粒度参数和沉积物组分(图 7 和图 8),可以看出,滦河沉积物平均粒径从大到小为:下游(237.1 μm)>上游(153.3 μm)>中游(71.4 μm),上中下游差异显著($P<0.05$);沉积物的分选性在上中下游都很差,上游和下游相对好于中游;沉积物粒度在上游正偏,中下游比上游更加正偏;沉积物粒度峰态从上中下游依次呈现出更尖锐的趋势;粘土含量在中下游都极低,分别为 1.4%和 1.8%,上游为 0~0.4%;砂含量在上中下游差异显著,其中在

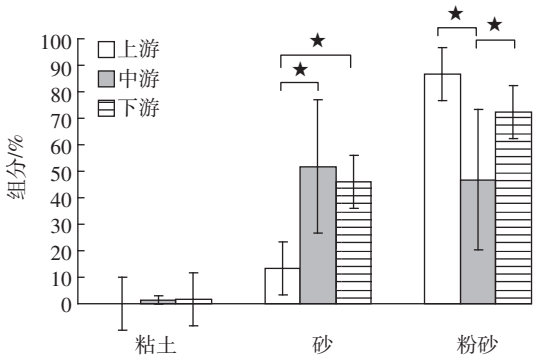


图 8 滦河干流上中下游沉积物组分对比

Figure 8 Composition distribution of surface sediments on the middle and lower reaches of Luan River

中游含量最高(51.8%);粉砂含量分别在中上游和中下游差异显著,上游(86.5%)>下游(72.3%)>中游(46.8%)。

2.2 滦河支流河流表层沉积物粒度参数空间分布规律

从 6 条主要支流沉积物粒度参数可以看出(图 9),滦河支流小滦河、伊逊河、武烈河、老牛河、柳河和青龙河的沉积物平均粒径依次呈先减后增的趋势,从小滦河的 60.7 μm 到武烈河下降最低为 30.7 μm,再到青龙河达到最大为 922.8 μm,6 条支流按照从滦河上游到下游的顺序,沉积物平均粒径呈先减后增的趋势,其中下游的柳河和青龙河显著增大,整体分选性较差,下游两条河流分选稍好(分选系数:1.40~5.36),整体呈极正偏(偏度系数:0.22~0.57),峰态尖锐,而滦

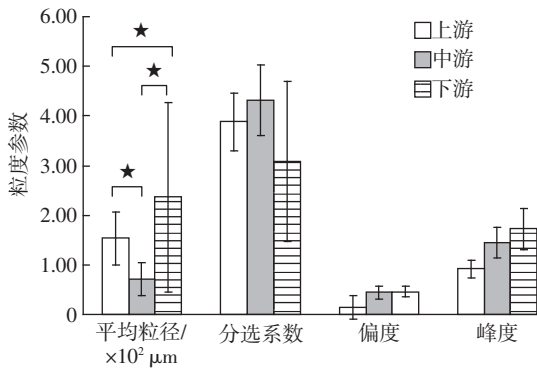


图 7 滦河干流上中下游粒度参数对比

Figure 7 Surface sediments grain size parameters on the middle and lower reaches of Luan River

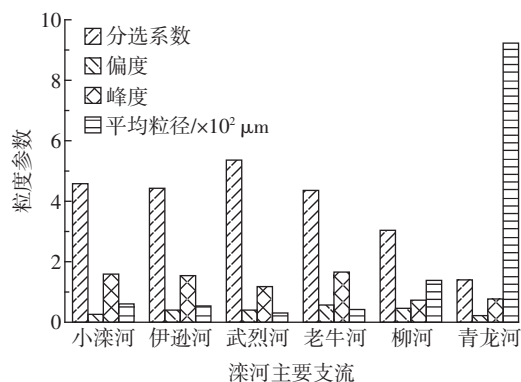


图9 滦河主要支流沉积物粒度参数

Figure 9 Surface sediments grain size parameters in six tributaries

河下游两条支流峰度较为平坦(峰度系数:0.73~1.59)。

从6条主要支流沉积物组分比例可以看出(图10),砂组分变化与平均粒径一致,最低点出现在武烈河为12.1%,最高点在青龙河为98.1%,粉砂和黏土变化趋势与之相反,粉砂含量在武烈河达到最高点为84.3%,最低点在青龙河含量只有1.9%,而黏土只在中游的伊逊河、武烈河和老牛河出现,含量顺次升高,最大值为4.5%。从滦河流域支流上水库分布来看,这种变化很可能与闸坝的干扰作用有关。

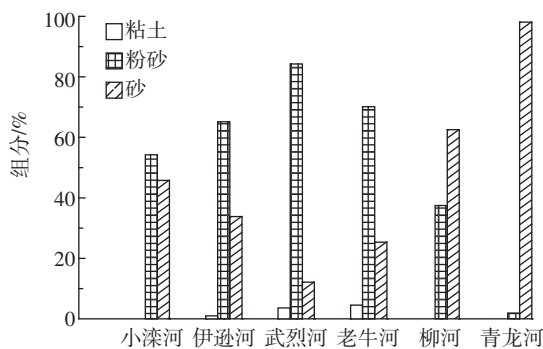


图10 滦河主要支流表层沉积物组分

Figure 10 Composition of surface sediments in six tributaries

比较滦河支流上中下游的沉积物粒度参数和沉积物组分(图11和图12),可以看出,滦河沉积物平均粒径从大到小为:下游(531.1 μm)>上游(60.7 μm)>中游(42.4 μm),下游与中上游差异极显著($P<0.01$);沉积物的分选性在上中下游都很差,下游相对好于中上游;沉积物粒度在上中下游都正偏;沉积物粒度峰态的尖锐程度从上中下游依次呈现出减小的趋势;粘土含量在中游较低,在上下游几乎为0;砂在中游含量最高,下游最低;粉砂含量变化规律与干流

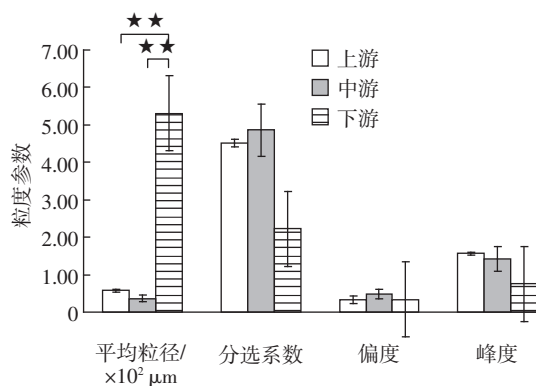


图11 滦河支流上中下游粒度参数对比

Figure 11 Surface sediments grain size parameters on the middle and lower reaches of six tributaries

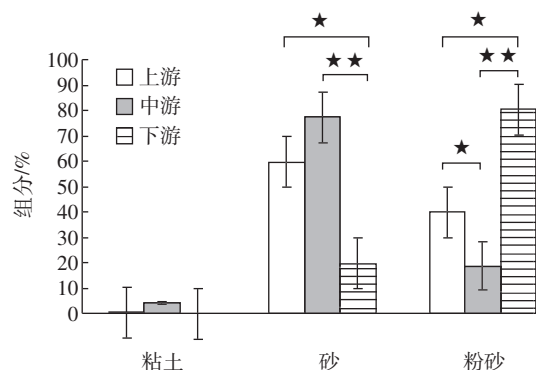


图12 滦河支流上中下游沉积物组分对比

Figure 12 Composition distribution of surface sediments on the middle and lower reaches of six tributaries

不同,下游(80.3%)>上游(39.8%)>中游(18.7%)。

2.3 滦河干流与支流表层沉积物粒度参数和沉积物组分的差异

比较滦河干流与支流的沉积物粒度参数和沉积物组分(图13和图14),可以看出,滦河干流与支流沉积物平均粒径差异显著($P<0.05$),支流(208.2 μm)>干流(142.3 μm),支流高于干流31.9%;滦河干流与支流的沉积物的分选性都很差;沉积物粒度都正偏;粒度峰态都很尖锐。粘土含量在滦河干流和支流都较低,支流高于干流43.4%;砂含量在干流与支流差异显著,其中支流高于干流45.0%;粉砂含量在干流与支流差异显著,干流高于支流34.3%。

2.4 滦河流域大中型水库对沉积物粒度空间分布的影响

选取滦河中游支流伊逊河上的庙宫水库,滦河干流的潘家口和大黑汀水库,滦河下游支流青龙河上的桃林口水库等4个大型水库作为研究对象,其中潘家

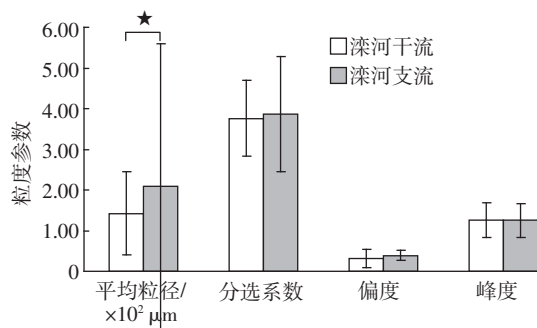


图 13 滦河干流与支流粒度参数对比

Figure 13 Surface sediments grain size parameters in six tributaries and Luan River

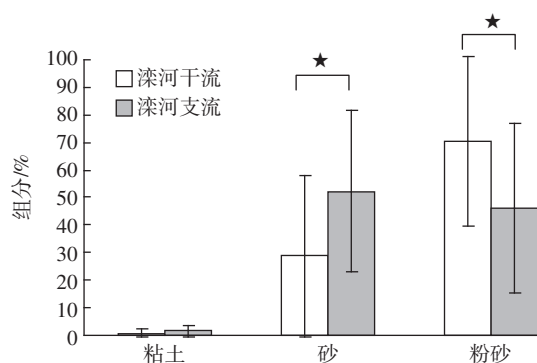


图 14 滦河干流与支流沉积物组分对比

Figure 14 Composition of surface sediments in six tributaries and Luan River

口水库与大黑汀水库地理位置相对较近而且在实际情况中联合调用,将其作为一个整体来考虑。从滦河流域三个大型水库坝上和坝下沉积物平均粒径与组分对比可以看出(图 15),庙宫水库、潘家口大黑汀水库及桃林口水库坝下沉积物平均粒径与沉积物组分均有增长趋势。潘家口大黑汀水库、桃林口水库和庙宫水库坝下沉积物平均粒径分别增大 94.6%、50.5%

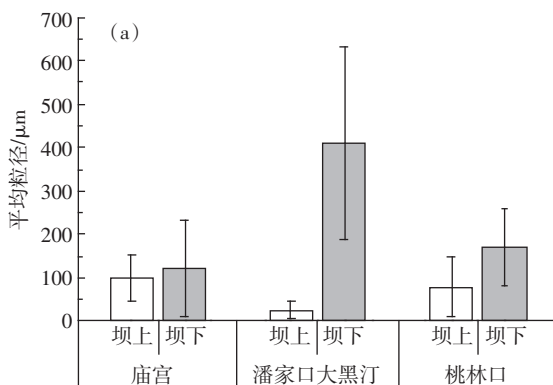


图 15 滦河流域三个大型水库上下游沉积物平均粒径与组分对比

Figure 15 Contrast of sediment Mz and composition between upstream and downstream of three reservoirs within Luanhe River Basin

和 20.6%,平均粒径差值大小为:潘家口大黑汀水库 (387.8 μm)>桃林口水库 (99.3 μm)>庙宫水库 (25.4 μm),水库库容与沉积物平均粒径变化呈正相关(图 16)。潘家口大黑汀水库坝上和坝下沉积物中黏土与粉砂的含量从 3.6%、86.2%均降到 0,而砂的含量骤增至 100%,桃林口坝上和坝下沉积物中粉砂的含量由 52.6%降到 9.5%,砂从 47.4%升至 90.5%,庙宫水库坝上和坝下沉积物中黏土从 0 增至 1.9%,粉砂与砂的变化不大。从三个大型水库相关参数可以看出(表 3),水库的存在是造成滦河流域河流沉积物粗化

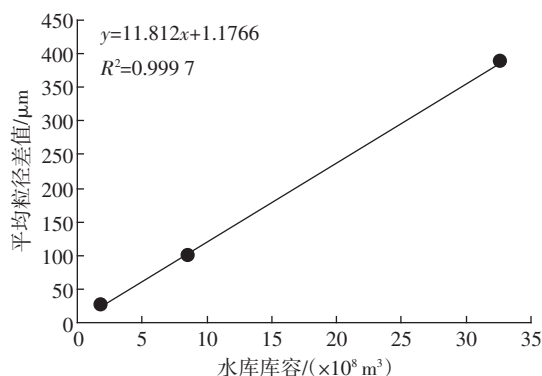


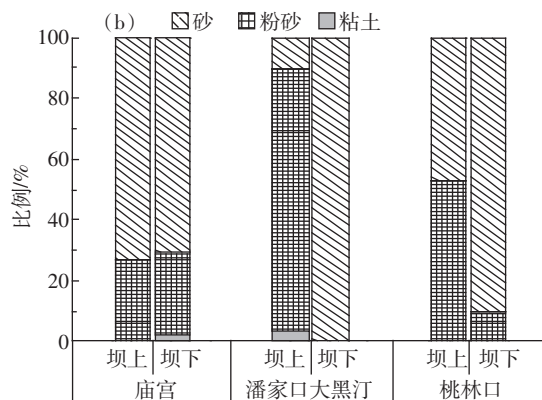
图 16 水库库容与平均粒径差值的相关性

Figure 16 The correlation of reservoir and difference between the average particle size

表 3 滦河大型水库参数

Table 3 Parameters of main reservoirs within the Luanhe River Basin

水库参数	庙宫	潘家口	大黑汀	桃林口
集水面积/ km^2	2370	33700	1400	5060
最大库容/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	1.83	29.3	3.37	8.59
最大坝高/m	44.2	107.5	52.8	74.5
装机容量/kW	1500	150000	21600	20000



的关键因素,这种作用在建有大型水库的滦河流域中下游地区尤为明显,水库的干扰作用也是导致滦河下游地区沉积物平均粒径大幅波动变化的主要原因。

3 结论

(1)滦河干流上游沉积物平均粒径分别与中游和下游差异显著,中游与下游差异较显著,下游($237.1\ \mu\text{m}$)>上游($153.3\ \mu\text{m}$)>中游($71.4\ \mu\text{m}$),显示出沉积物沿程粗化的空间分布规律;表层沉积物组分中粘土含量中下游分别为1.4%和1.8%,上游0~0.4%;砂含量在中游含量最高为51.8%;粉砂含量上游(86.5%)>下游(72.3%)>中游(46.8%)。

(2)滦河支流下游沉积物平均粒径与中上游差异极显著,下游($531.1\ \mu\text{m}$)>上游($60.7\ \mu\text{m}$)>中游($42.4\ \mu\text{m}$),沉积物沿程粗化;表层沉积物组分中的粘土和砂含量变化与滦河干流一致,粉砂含量变化规律与干流不同,下游(80.3%)>上游(39.8%)>中游(18.7%)。

(3)滦河干流与支流沉积物平均粒径差异显著,支流($208.2\ \mu\text{m}$)>干流($142.3\ \mu\text{m}$);表层沉积物组分中粘土和砂含量支流高于干流,分别达43.4%和45.0%;粉砂含量干流高于支流34.3%。

(4)滦河流域三个大型水库坝下沉积物平均粒径均增大,平均粒径差值大小为:潘家口大黑汀水库($387.8\ \mu\text{m}$)>桃林口水库($99.3\ \mu\text{m}$)>庙宫水库($25.4\ \mu\text{m}$),水库规模与沉积物的粒径变化呈正相关,水库对表层沉积物组分、分选性、偏度和峰度影响显著。

4 管理建议

(1)水资源管理部门应加强对滦河干流和支流表层沉积物粒度的监测与分析;

(2)由于水库造成坝上和坝下河段物理形态和河流纵向完整性发生改变,应关注其潜在生态风险的定量化评估。

参考文献:

- [1] 林炳煌. 泉州湾沉积物粒度和元素组成特征及其沉积环境意义[D]. 厦门:厦门大学, 2009.
LIN Bing-huang. Characteristics of sediment granularity, element geochemistry and their significance for identifying sedimentary dynamic environment in the Quanzhou Estuary[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [2] 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. 海洋科学, 2012, 36(2): 129-135.
JIN Bing-fu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(2): 129-135.

- [3] Sun L G, Zhou X, Wang Y H. Identification of paleo-events recorded in the Yellow Sea sediments by sorting coefficient of grain size[J]. *Plos One*, 2012, 7(9): 1-6.
- [4] 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 Fu-yuan, MA Hai-zhou, FAN Qi-shun, et al. The application of grain-size analysis in sediments provenance discriminant[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2012, 20(1): 49-56.
- [5] Petra V, Nastja R S, Tadej D. An evaluation of trace metal distribution and environmental risk in sediments from the Lake Kalimanci (FYR Macedonia)[J]. *Environ Earth Sciences*, 2013, (70): 761-775.
- [6] 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.
- [7] Zhang L L, Liu J L. In situ relationships between spatial-temporal variations in potential ecological risk indexes for metals and the short-term effects on periphyton in a macrophyte-dominated lake: A comparison of structural and functional metrics[J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23(4): 553-566.
- [8] 曹志国, 刘静玲, 栾 芸, 等. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评价与来源辨析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 246-253.
CAO Zhi-guo, LIU Jing-ling, LUAN Yun, et al. Pollution characteristics, risk assessment and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments and water of the Luan River, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 246-253.
- [9] Koigoora S, Ahmad I. Spatial variation of potentially toxic elements in different grain size fractions of marine sediments from gulf of Mannar, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(9): 7581-7589.
- [10] Sun L, Zhang 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.
- [11] 徐 勇, 马绍赛, 陈聚法, 等. 大沽河湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1209-1216.
XU Yong, MA Shao-sai, CHEN Ju-fa, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in Dagou River wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1209-1216.
- [12] 翟 萌, 卢新卫, 黄 丽, 等. 渭河(杨凌-兴平段)表层沉积物中重金属的粒径分布特征及污染评价[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 94-98.
ZHAI Meng, LU Xin-wei, HUANG Li, et al. Particle size distribution and pollution assessment of heavy metals in the surface sediment from Yangling to Xingping reach of the Wei River[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(4): 94-98.
- [13] Krishna A K, Mohan K R. Metal contamination and their distribution in different grain size fractions of sediments in an industrial development area[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 90(2): 170-175.

- [14] 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 Yuan-ye, et al. Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain size distribution in Changjiang Estuary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3):445-455.
- [15] Katie H C, Melinda D D, Joshua S P, et al. Longitudinal variability in hydraulic geometry and substrate characteristics of a Great Plains sand-bed river[J]. *Geomorphology*, 2014, 210:48-58.
- [16] 赵晨, 董世魁, 刘世梁, 等. 漫湾大坝上下游沉积物重金属与营养元素分布特征及环境风险评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2417-2444.
- ZHAO Chen, DONG Shi-kui, LIU Shi-liang, et al. Distribution and environmental risk assessment of heavy metals and nutrients in sediments of upstream and downstream of Manwan Dam[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9):2417-2444.
- [17] Melis T S, Korman J, Kennedy T A. Abiotic & biotic responses of the Colorado River to controlled floods at Glen Canyon Dam, Arizona, USA[J]. *River Research and Applications*, 2012, 28(6):764-776.
- [18] Curtis K E, Renshaw C E. Temporal and spatial scales of geomorphic adjustments to reduced competency following flow regulation in bed-load-dominated systems[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(1/2):105-117.
- [19] 吴佩鹏, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 三峡水库蓄水前后下游河床沉积物渗透系数的变化分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6):98-102.
- WU Pei-peng, SHU Long-cang, LU Cheng-peng, et al. An analysis of the changes in the riverbed sediment hydraulic conductivity in the downstream channel before and after the Three Gorges Reservoir impoundment[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6):98-102.
- [20] 罗向欣. 长江中下游、河口及邻近海域底床沉积物粒径的时空变化[D]. 上海:华东师范大学, 2013.
- LUO Xiang-xin. The spatial and temporal variation in sediment grain-size in middle and lower Yantze River, Yangtze Estuary and the off-shore area adjacent to Yangtze Estuary[D]. Shanghai:East China Normal University, 2013.
- [21] Wang Z J, Chen Z Y. Downstream grain size variation to interpret river-channel process-form in the middle-lower Yangtze River, China[C]// Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 2008.
- [22] 马龙, 吴敬禄, 温军会, 等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(4):646-650.
- MA Long, WU Jing-lu, WEN Jun-hui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4):646-650.
- [23] 刘世昊, 丰爱平, 夏东兴, 等. 辽东湾西岸典型岬湾海滩表层沉积物粒度分布特征及水动力条件浅析[J]. 沉积学报, 2014, 32(4):700-707.
- LIU Shi-hao, FENG Ai-ping, XIA Dong-xing, et al. Grain size distribution of surface sediments of two typical headland-bay beaches on western Liaodong Bay, Bohai Sea and simply analysis of hydrodynamic conditions[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4):700-707.
- [24] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *Journal of Geology*, 1922(30):377-392.