

筑坝拦截对黑河河道沉积物粒度空间分布的影响*

王 昱^{1,2}, 连运涛¹, 冯 起², 王之君¹, 赵维俊³, 刘娟娟¹, 卢世国¹, 张昕雨¹

(1: 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

(2: 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000)

(3: 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 张掖 734000)

摘要: 河流沉积物对流域环境变化具有敏感响应, 其粒度参数能反映沉积环境中物质来源和水动力环境。本文以黑河流域上中游为研究区域, 探究河流沉积物粒度对流域环境变化的响应。从黑河上中游干流 22 个主要控制断面采集河床沉积物样品, 采用筛分法和吸管法对沉积物样品粒度参数进行测定, 并分析其空间分布规律对筑坝拦截为主的环境改变响应。研究结果表明: 受梯级水库建设影响, 黑河上中游泥沙粒径大小差异显著。干流库区泥沙粒径较自然河段明显减小, 分选很好, 呈正偏或极正偏尖锐分布, 而且在库区不同沉积高度上表现出分层沉积特征; 坝下游河段因遭受强烈冲刷, 较自然河段泥沙粒径粗化显著, 分选变差, 偏态趋向极正偏, 峰态尖锐化; 水库回水区受水库壅水及下泄清水的双重制约, 泥沙粒度参数介于自然河段和坝下游河段之间, 整体分选中等, 呈极正偏尖锐分布; 沉积环境分析表明, 上游支流河段沉积物粒度特征受泥沙供给和物源特征的影响较水动力条件显著, 干流河段沉积物粒度特征主要受水动力条件控制。研究结果既符合河流上中游沉积物粒度分布规律, 也反映了河流环境变化对沉积物粒度组成的影响。

关键词: 黑河; 河流沉积物; 粒度; 空间分布; 梯级水库

Effects of dam interception on the spatial distribution of sediment granularities in Heihe River

WANG Yu^{1,2}, LIAN Yuntao¹, FENG Qi², WANG Zhijun¹, ZHAO Weijun³, LIU Juanjuan¹, LU Shiguo¹ & ZHANG Xinyu¹

(1: School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P.R.China)

(3: Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, P.R.China)

Abstract: River sediments respond sensitively to the basin environmental changes and particle size parameters can reflect the material sources and hydrodynamic environment. This article takes the Heihe River as a case to explore the response of river sediment grain size to the basin environmental changes. River sediment samples were collected from 22 sections along the mainstream of the Heihe River. Then, sieving and pipette methods were applied to measure the particle size. Spatial variations of grain size parameters and their responses to the anthropogenic environmental changes of the basin through river damming were analyzed. The results showed that the grain size of the upper and middle reaches of Heihe River was significantly different under the influence of the construction of cascade reservoirs. The grain size of reservoir sediment decreased more obviously in the river section within cascade reservoirs than in the original natural reach, and the sediments are characterized by well-sorted, with acute kurtosis and positive skew or very positive skew. In addition, the sediment grain size shows the characteristics of layered sedimentary at different depositional heights in the reservoirs. The downstream river of the Dam was suffering from strong erosion, and the grain size of bed sediments is coarse and poorly sorted, and the grain size distributions are more positively skewed with sharp kurtosis. The backwater area of the reservoir is restricted by backwater and drainage water, and the sediment particle size is between the original natural river and the

* 国家自然科学基金项目(51669011)、甘肃省自然科学基金重大项目(18JR4RA002)和兰州理工大学红柳扶持学科项目联合资助。2018-12-04 收稿; 2019-01-20 收修改稿。王昱(1979~), 男, 博士, 副教授; E-mail: wangyu-mike@163.com.

downstream river of the dam, with middle sorted sediments, positively skewed grain size distribution and acute kurtosis. Sedimentary environment analysis reveals that the sediments grain size characteristics of upstream tributary are more influenced by material sources than hydrodynamic conditions, while the grain size characteristics of main stream sediments are mainly controlled by hydrodynamic conditions. The results are consistent with the normal pattern of sediment grain sizes distribution in rivers, and also reflect the impact of environmental changes on river sediment grain size composition.

Keywords: Heihe River; river sediment; grain size; spatial distribution; cascade reservoirs

河流沉积物是河床底质在一定水动力条件下长期作用而形成的,通过研究沉积物粒度特征可以识别不同的沉积环境类型,进而间接掌握气候变化和人类活动对流域环境变化的影响^[1-3]。研究表明,沉积物的粒度特征空间分布规律受泥沙供给、物源特征、水动力条件、介质运移机制等诸多因素影响,同时这些因素又受人类活动的干扰^[4-6]。流域水库大坝的修建,尤其是梯级水库联合运用阻断了天然河流水沙迁移变化,进而会改变河流沉积物的组成及分布^[7];水库长期蓄水会减少对下游区域水沙输入,造成河床侵蚀,导致河流沉积物粒度粗化^[8]。此外,河流沉积物是水体化学物质如营养盐和污染物的重要载体,泥沙粒度的改变将使化学物质迁移行为发生变化^[9-10]。因此,开展河流沉积物粒度特征空间分布规律和河流水沙变迁关系研究,对流域生态修复和水库合理调度具有重要意义。

黑河流域作为我国第二大内陆河流域,是河西走廊绿洲赖以生存和经济社会持续发展的重要水资源基地^[11]。近年来,上游干流的水电梯级开发极大地改变了河流的水沙变化^[12],这会对中下游河道演变、河流生态系统变化乃至河西走廊农业发展带来一系列影响^[13-16]。本文以黑河干流为研究区域,研究干流河道中泥沙粒度参数的空间分布规律,分析水电梯级建设对泥沙粒度的影响,为黑河流域生态修复方案制定和科学合理利用水资源提供科学依据和技术支持。

1 黑河流域水文泥沙及水电开发概况

黑河发源于祁连山北麓,流域范围介于 $37^{\circ}45' \sim 42^{\circ}40'N$, $96^{\circ}42' \sim 102^{\circ}04'E$ 之间,流经青海、甘肃、内蒙古三省区,干流全长821 km,流域总面积 $14.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。黑河以莺落峡、正义峡为界划分上中下游,其中上游分为东、西两岔。东岔为八宝河,长约75 km,祁连站是其控制性水文站;西岔又名野牛沟河,长约175 km,札马什克站是其控制性水文站。这两股干流在青海省祁连县黄藏寺汇合后形成黑河干流流入甘肃境内,干流向北穿行于高山峡谷中,约95 km流程至莺落峡进入中游河西走廊,经张掖市甘州区、临泽县、高台县,从正义峡穿过北山,流出河西走廊进入下游额济纳,最终汇入东、西居延海。

黑河上游海拔为2600~4300 m,寒冷阴湿,多年平均气温 $-5 \sim 4^{\circ}\text{C}$,年降水量在200 mm以上,局部高山带年降水量可达600~700 mm,年均融水量约 $4.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。中游平原区年降水量不足200 mm,下游平原区年降水量少于50 mm。黑河干流的径流补给来源有大气降水、冰雪融水和地下水等,但大气降水是径流的主要补给来源,约占90%^[17]。黑河上游多年平均输沙量为 $1.88 \times 10^6 \text{ t}$,河床多为砾质和沙质河床,其泥沙主要来自出山口至上游地区,是由降水和降水形成的坡面径流冲刷流域内表层土壤形成,而中游河道泥沙大部分为上游挟带,另有部分是大洪水期间水流冲刷河床和河岸形成,还有少部分为中游灌溉水下渗后回归至河道的水量挟带所致,干流各测站的泥沙含量见表1,河道特征见表2。

表1 黑河干流主要水文泥沙特征^{*}

Tab.1 Characteristics of river hydrology and sediment along the mainstream of the Heihe River

站名	含沙量/(kg/m ³)	输沙率/(kg/s)	年输沙量/(\times 10 ⁴ t)	侵蚀模数/(t/km ²)
札马什克站	1.49	37.91	116.81	240.41
祁连站	0.85	12.47	39.36	160.51
黄藏寺—莺落峡	1.30	64.59	187.87	187.81
莺落峡—正义峡	1.44	42.80	146.20	218.00

* 数据来源于甘肃省水文水资源局(1968—2013年)。

表 2 黑河河道特征
Tab.2 Channel characteristics of the Heihe River

河段	河长/km	河床高程/km	落差/m	河道比降/%	河谷宽/m	河谷深/m
野牛沟	175	2603~4850	2247	8.5	50~400	—
八宝河	75	2603~4400	1797	9.3	50~400	—
黄藏寺—莺落峡	95	1630~2603	900	9.1	20~100	4~30
莺落峡—正义峡	185	1352~1630	348	2.03	400~800	2~2.5

黑河水能丰富,上游干流水能资源蕴藏量为 106.88×10^4 kW,可开发量为 52.8×10^4 kW,年发电量为 38.48×10^8 kW·h. 上游干流共计规划了黄藏寺等 8 座梯级水电站,从上之下分别为黄藏寺、宝瓶河、三道湾、二龙山、大孤山、小孤山、龙首二级(西流水)和龙首一级,其中以大孤山和宝瓶河两大水电站为核心. 此外,在两条支流交汇处的上游支流野牛沟河末端建有地盘子电站. 截至所有样品采集完成时干支流已建成的水电站有 8 座(表 3).

表 3 黑河上游水电站开发情况
Tab.3 Hydropower development on the mainstream of the upper Heihe River

电站名称	装机容量/($\times 10^4$ kW)	总库容/($\times 10^8$ m ³)	年平均发电量/($\times 10^8$ kW·h)	全部机组投产时间
地盘子电站	1.60	0.0028	0.72	2004 年 9 月
宝瓶河电站	12.30	2.150	4.10	2012 年 7 月
三道湾电站	11.20	0.053	4.00	2009 年 5 月
二龙山电站	5.05	0.811	1.74	2007 年 9 月
大孤山电站	6.50	1.410	2.01	2009 年 7 月
小孤山电站	10.20	0.014	3.91	2006 年 7 月
龙首二级电站	15.70	0.862	5.28	2004 年 8 月
龙首一级电站	5.20	0.132	1.98	2002 年 4 月

2 材料与方法

2.1 样品采集

水库蓄水运行后,库区受回水影响,水面比降和流速等水力因素减弱,水流挟沙能力降低,泥沙在库区发生淤积. 由于下游侵蚀基准面变化的不同,泥沙在水库淤积表现为库区淤积和变动回水区淤积,二者的冲淤特性有一定差异. 库区泥沙呈现出显著的累积性淤积特点,而变动回水区是指最高与最低库水位的两个回水末端范围内的库段,由于其蓄水期为库区河道而汛期为天然河道的双重特性,泥沙淤积具有河道和库区的双重性质^[18]. 此外,库区淤积使下泄水流变清,引起下游河床冲刷变形,会导致河流沉积物粒度粗化. 为分析水电开发对黑河干流泥沙的冲淤特性,采样区域分别设为自然河段、水库回水区、大坝下游河段和库区 4 类区域.

本次实验在黑河干流选择 22 个主要控制断面采集河床沉积物(图 1). 在干流自然河道上根据水文站的分布情况和河流交汇以及所属行政区域设置 9 个采样点(H1、H3、H4、H17~H22);大坝下游河段采样点根据梯级水库建设位置,在干流河道最上和最下的两个大坝设置 4 个采样点(H5、H6、H15 和 H16);根据其位置的典型性,在水库回水区设置 4 个采样点(H7、H8、H10 和 H12),在库区设置 5 个采样点(H2、H9、H11、H13 和 H14). 自然河段、大坝下游河段和水库回水区河段的样品采集于 2016 年 12 月,库区样品因冬天冰冻封面,于 2017 年 8 月补充采集. 在自然河段、大坝下游河段和水库回水区采集岸边表层泥沙,采样深度不超过 10 cm;库区泥沙采用彼得逊采泥器采集,其中在 H2(地盘子电站)采样点,在枯水期采样时赶上库区放空清淤,进入库区分层采样,分层高度为 3 m. 各采样区域采集 3 个平行沉积样,装入聚乙烯袋.

2.2 实验测试分析

对采集到的泥沙样品经加 H₂O₂溶液去除有机质、滚筒碾压分散处理后,对粒径大于 0.063 mm 的采用筛

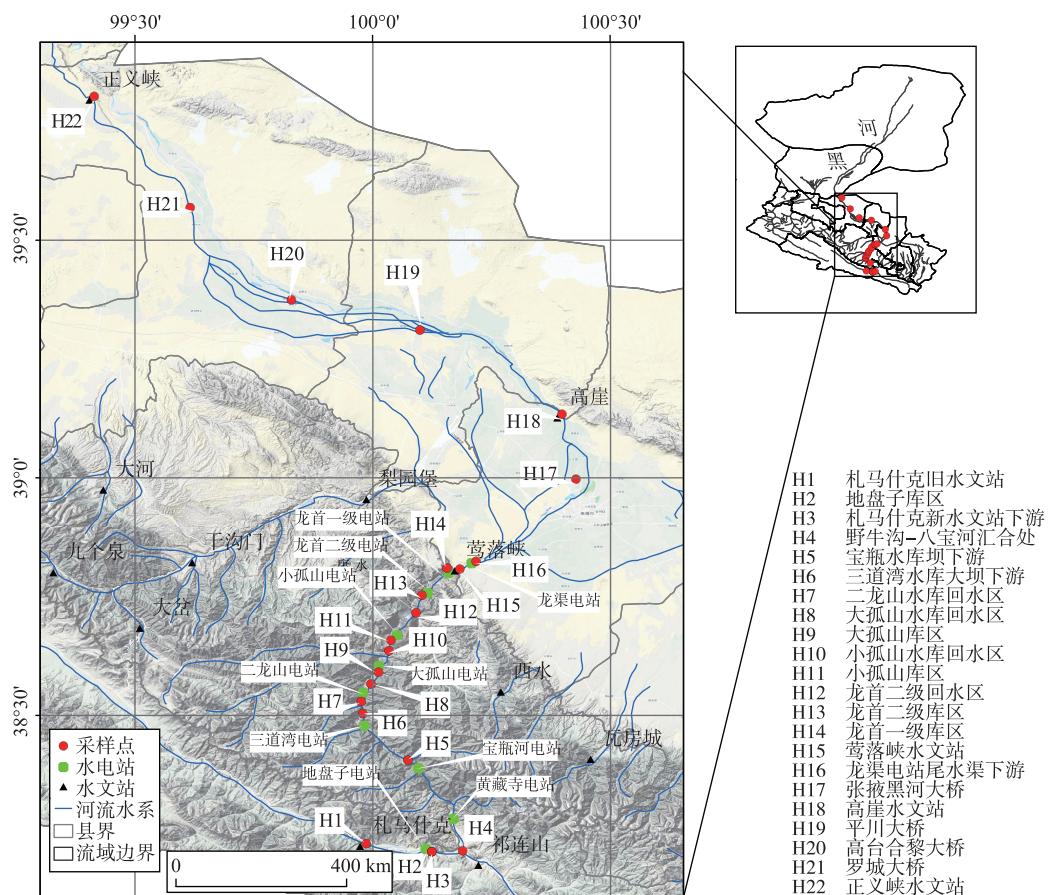


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of the sampling sites

分法, 小于 0.063 mm 的采用吸管法进行样品粒径测定, 同时分别计算两种分析方法得到的沙样占总沙样的分配比例, 将两种方法测得的泥沙粒度分布统一合并分析。选用中值粒径 (D_{50})、平均粒径 (D_{mean})、分选系数 (δ)、偏态 (SK)、峰度 (K_c) 等参数对泥沙粒径特征进行分析计算。粒度参数计算与分析采用 Folk 和 Word^[19]提出的粒度参数计算方法与粒度参数分级标准(表 4)。

表 4 粒度参数分级标准
Tab.4 Grain size grades parameters

分选程度	δ	偏态等级	SK	峰度等级	K_c
分选很好	<0.35	极负偏	-1.00~-0.30	很平坦	<0.67
分选好	0.35~0.50	负偏	-0.30~-0.10	平坦	0.67~0.90
分选中等	0.50~1.00	近对称	-0.10~0.10	中等尖锐	0.90~1.11
分选差	1.00~2.00	正偏	0.10~0.30	尖锐	1.11~1.56
分选很差	2.00~4.00	极正偏	0.30~1.00	很尖锐	1.56~3.00
分选极差	>4.00			非常尖锐	>3.00

3 结果与分析

3.1 黑河干流河道表层沉积物粒度参数沿程分布规律

用筛分法和吸管法相结合的方法对河床沉积物样品进行粒径测定后,根据 Folk 和 Word^[19]提出的粒度分析方法,计算黑河干支流 22 个采样点沉积物粒径的中值粒径、平均粒径、分选系数、偏态、峰度等粒度参数,结果见表 5。

由表 5 可知,黑河上中游干流自然河段各采样点 H1、H3、H4 和 H17~H22,除 H20 采样点受河道采砂影响沉积物中值粒径和平均粒径较大外,其余各采样点沉积物中值粒径和平均粒径基本趋于水平,数值变化不大;水库回水区各采样点沉积物的中值粒径和平均粒径较自然河段有所增大,而在大坝下游河段各采样点沉积物的中值粒径和平均粒径较自然河段明显增大,且中值粒径和平均粒径在 H16 采样点(龙渠电站尾水渠下游)达到最大值 0.94 mm 和 1.42 mm。从分选系数来看,黑河干流自然河段的变化范围为 0.04~0.31,分选系数小,属分选很好,最小值出现在 H3 采样点;水库回水区的变化范围为 0.11~0.64,较自然河段有所增大,分选变差,除 H10 和 H12 采样点属分选中等外,其余两个采样点属分选很好;大坝下游河段的变化范围为 0.62~1.10,其分选系数较自然河段明显增大,其中最大值 1.10 出现在 H15 和 H16 采样点,属分选差,其余两个采样点属分选中等。从偏态系数来看,黑河干流自然河段的变化范围为 -0.08~0.60,其偏态等级以极正偏为主,兼有正偏和近对称;水库回水区的变化范围为 0.09~0.66,其偏态等级以极正偏为主;大坝下游河段的变化范围为 0.46~0.77,属极正偏,较自然河段更加趋于极正偏。从峰度系数上来看,黑河干流自然河段的变化范围为 0.77~2.47,其峰度等级以尖锐和很尖锐为主;水库回水区的变化范围为 0.93~2.50,峰度等级以很尖锐和中等尖锐为主,兼有尖锐;大坝下游河段的变化范围为 0.74~2.53,其中除 H5 采样点的峰度系数为 2.53,属很尖锐外,其余 3 个采样点峰度属平坦和中等尖锐,与自然河段相比,峰态趋于平坦。

表 5 黑河干支流河床沉积物粒径特征参数

Tab.5 Characteristic sediment grain size parameters in the bed sediments of Heihe River

采样点位	D_{16}/mm	D_{25}/mm	D_{50}/mm	D_{75}/mm	D_{84}/mm	$D_{\text{mean}}/\text{mm}$	δ	SK	K_G
H1	0.10	0.12	0.16	0.21	0.23	0.19	0.07	0.20	1.30
H3	0.07	0.08	0.10	0.12	0.15	0.11	0.04	0.34	1.25
H4	0.13	0.14	0.16	0.21	0.23	0.24	0.07	0.44	1.81
H5	0.34	0.46	0.66	0.92	1.21	0.90	0.62	0.46	2.53
H6	0.42	0.54	0.81	1.88	2.42	1.22	0.95	0.60	0.98
H7	0.14	0.17	0.26	0.41	0.51	0.34	0.18	0.40	1.10
H8	0.12	0.13	0.18	0.25	0.31	0.23	0.11	0.47	1.53
H10	0.16	0.21	0.37	0.70	0.99	0.70	0.64	0.66	2.44
H12	0.16	0.22	0.36	0.63	0.83	0.62	0.53	0.60	2.50
H15	0.23	0.29	0.52	2.12	2.68	1.10	1.10	0.77	0.74
H16	0.26	0.52	0.94	2.34	2.92	1.42	1.10	0.51	0.75
H17	0.13	0.14	0.17	0.22	0.24	0.20	0.06	0.37	1.33
H18	0.12	0.13	0.16	0.20	0.22	0.17	0.05	0.15	1.18
H19	0.09	0.10	0.15	0.19	0.20	0.15	0.05	-0.08	0.77
H20	0.13	0.15	0.26	0.52	0.65	0.46	0.31	0.60	1.35
H21	0.13	0.15	0.18	0.25	0.31	0.25	0.10	0.49	1.70
H22	0.08	0.09	0.14	0.20	0.23	0.26	0.13	0.45	2.47

比较黑河干流上中游各采样点沉积物粒度参数(图 2)可以看出,黑河上中游河段沉积物平均粒径从小到大为:上游干流河段宝瓶水库坝下游至龙渠电站尾水渠下游(0.82 mm)>中游干流河段龙渠电站尾水渠下游至正义峡河段(0.25 mm)>上游支流野牛沟河段(0.18 mm),表明受梯级水库建设的影响,河流沉积物粒径在梯级水库河段较自然河段明显增大。沉积物的分选性在黑河干流自然河段都属分选很好,宝瓶水库坝

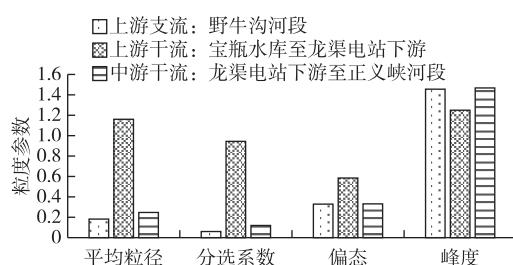


图 2 黑河干流中上游粒度参数的空间分布
(平均粒径单位为 mm, 分选系数、偏态和峰度无单位)

Fig.2 Surface sediments grain size parameters on the middle and upper reaches of Heihe River

值粒径和平均粒径均较小,其中 H13 采样点沉积物的中值粒径和平均粒径为所有采样点中的最小值,分别为 0.014 和 0.06 mm;而 H11(小孤山库区)采样点处沉积物的中值粒径、平均粒径较其他库区采样点(H9、H13 和 H14)偏大。这是因为在丰水期采样时,小孤山库区正在进行泄水排沙,库区水动力条件发生改变,底部表层颗粒较细的泥沙组分极易被水流携带冲刷进入下游,粒径较大的颗粒泥沙组分则滞留于库区底部。根据粒度参数的分级标准,小孤山库区沉积物的粒径分选很好,偏态属正偏,峰度属中等尖锐;而 H9、H13 和 H14 等库区沉积物的粒径分选很好,偏态属极正偏,峰度属很尖锐。

表 6 黑河干流库区沉积物粒径特征参数

Tab.6 Characteristic sediment grain size parameters in the reservoir area of Heihe Basin

采样点位	D_{16}/mm	D_{25}/mm	D_{50}/mm	D_{75}/mm	D_{84}/mm	$D_{\text{mean}}/\text{mm}$	δ	SK	K_G
H2-1	0.270	0.310	0.420	0.700	0.870	0.66	0.44	0.64	2.10
H2-2	0.510	0.610	0.900	1.000	2.400	1.35	0.90	0.60	3.13
H2-3	0.140	0.200	1.400	2.800	3.110	1.48	1.26	0.20	0.55
H9	0.019	0.021	0.033	0.051	0.085	0.07	0.04	0.62	2.30
H11	0.055	0.076	0.116	0.166	0.205	0.12	0.07	0.17	1.07
H13	0.004	0.011	0.014	0.086	0.124	0.06	0.06	0.86	1.15
H14	0.004	0.008	0.026	0.027	0.109	0.07	0.04	0.59	2.33

4 讨论

4.1 黑河干流沉积物粒度空间分布对梯级筑坝拦截的响应

根据对黑河上中游干流河床沉积物粒度参数沿程变化的分析(图 3),从中值粒径和平均粒径看,在水电站库区采样点出现较低值,反映了原来的河段变为库区后沉积环境改变,水流变缓,水动力变弱,泥沙分层淤积,上层泥沙较细;而地盘子电站库区中值粒径和平均粒径较其他库区采样点的偏大,这是因为地盘子电站为上游支流野牛沟河段末端的引水式电站,加之河床多为砾质床沙,由于库区水动力条件改变,流速减缓,大量粗颗粒泥沙淤积在库区,而且在库区不同沉积高度上表现出分层沉积特征,即粒径较大的泥沙先行沉积,粒径较细的泥沙沉积在库区表层,粒径组份范围也随之变窄。在水库坝下游河段,其中值粒径和平均粒径出现较大值,这说明受梯级水库建设的影响,大坝下泄的清水提高了河流的携沙和冲刷能力,加之黄藏寺至莺落峡河段地势高峻,河道落差较大,水流流速增大明显,水动力较强,下泄清水使得大坝下游河段沉积物粗化明显。这也从分选系数表现出来,龙渠电站和三道湾电站坝下游河段的分选系数高达 1.10 和 0.94,与自然河段相比,其沉积物粒径分选明显变差,偏态更加趋于极正偏,峰度趋于平坦分布。

在黑河上中游干支流自然河段上,上游支流野牛沟河段的比降、流速、水动力较中游河段大,理论上其

下游至龙渠电站尾水渠下游河段沉积物分选最差;黑河干流上中游沉积物偏度都属极正偏,其中宝瓶水库坝下游至龙渠电站尾水渠下游河段比上游支流野牛沟河段和中游龙渠电站尾水渠下游至正义峡河段更加极正偏;沉积物粒度峰态从沿程上呈现出趋于平坦的趋势。

3.2 黑河干流库区沉积物粒度参数空间分布特征

从黑河干流库区沉积物粒径特征参数(表 6)可以看出,在所有库区采样点中 H2 采样点沉积物的粒度特征参数与其余 4 个库区采样点相比明显较大,而且随采样深度的增加,中值粒径和平均粒径随之增大,其分选变差,偏态趋于正偏,峰度趋于平坦;H9、H11、H13 和 H14 等库区采样点沉积物的中

中值粒径和平均粒径应较大,偏态以正偏为主,峰态也以尖锐为主,但黑河上游支流野牛沟河段的中值粒径和平均粒径较中游自然河段小。这主要归因于上游支流野牛沟河道宽浅散乱,札马什克水文站多年平均流量仅为 $23.67\text{ m}^3/\text{s}$,加之近年来黑河上游一系列生态建设保护工程的实施,水土流失减少,且河床岩性多为卵砾石,河流含沙量降低。水库回水区河段的中值粒径和平均粒径较自然河段大,但小于坝下游河段,其偏度和峰度也表现出相同的规律,表明黑河干流水库回水区河段受水库壅水及下泄清水的双重制约,泥沙有冲有淤,双重影响是造成水库回水区河段泥沙粒度参数介于自然河段和坝下游河段的主要原因。总体上看,黑河上游支流主要受自然环境控制,上游高原区河谷宽坦,水流含沙量低,沉积物粒度较小,分选较好,呈正偏尖锐分布;干流上游区受到梯级大坝的影响,加之处于高山峡谷,水流湍急,河床沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,分选变差,偏态趋向极正偏,峰态尖锐化,而且库区在不同沉积高度上表现出分层沉积特征;干流中游区地势平缓,河道宽浅,水动力条件变弱,使得河床沉积物粒径变细,且细组分百分比较高,分选很好,主要呈极正偏尖锐分布。

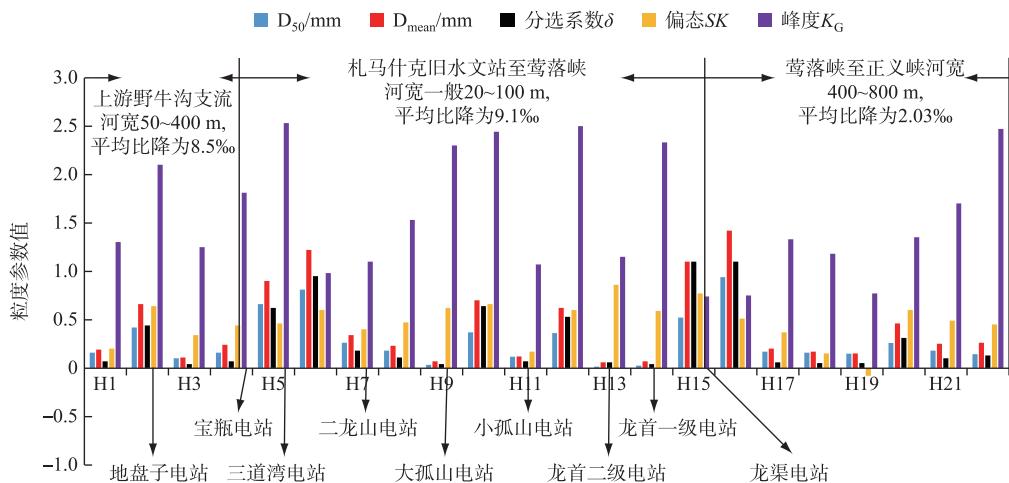


图3 黑河干流河床沉积物粒度参数的沿程变化

Fig.3 Change of grain size parameters of bed sediments in the mainstream of the Heihe River

4.2 黑河干流不同河段沉积环境探讨

物源和水动力的强弱变化能够产生差异性的沉积环境,而不同的沉积环境又能直接通过沉积物组分和粒度参数组合关系反映出来^[20]。根据Churchand Kellerhals的河床沉积物向下游沿程变细理论,河床沉积物的颗粒大小与河流水动力相适应。水动力越强,沉积物越粗,反之沉积物越细^[21-22]。一般河流愈往下游,比降愈小,流速也越小,与之相适应的河床沉积物也越细。但是,从黑河干流河道具体的取样断面粒度数据来看,“沿程细化”只是一种趋势性的、较宏观的现象,其粒度空间分布规律受泥沙供给和筑坝拦截影响显著,“沿程细化”趋势更为复杂。上游支流野牛沟河段的水动力条件较中游河段大,但其中值粒径和平均粒径却比中游自然河段小,说明上游支流河段沉积物粒度特征受泥沙供给和物源特征的影响较水动力条件显著。就各河段而言,库区河段的中值粒径和平均粒径较水库回水区河段的小,表明在泥沙供给和物源特征相同的情况下,黑河干流库区河段的水动力条件小于水库回水区河段。从上游干流自然河段和坝下游河段的中值粒径和平均粒径分析表明,在泥沙供给和物源特征变化不大的情况下,大坝下游的水动力条件强于自然河段。

5 结论

本文对黑河沉积物粒度参数的空间分布规律进行了分析,探究了沉积物对该流域环境变化的响应,得到以下结论:

- 1) 黑河干流上游宝瓶水库坝下游至莺落峡河段的平均粒径与上游支流野牛沟及干流中游相比差异显

著,从大到小为:宝瓶水库坝下游至莺落峡河段(0.82 mm)>干流中游(0.25 mm)>上游支流野牛沟(0.18 mm),表明受梯级水库建设的影响,河流沉积物粒径在梯级水库建设河段较自然河段明显增大。

2)受水电梯级开发影响,黑河干流库区泥沙粒径较自然河段明显减小,分选很好,呈正偏或极正偏尖锐分布,而且在库区不同沉积高度上表现出分层沉积特征,即粒径较大的泥沙先行沉积,粒径较细的泥沙沉积在库区表层;坝下游河段较自然河段泥沙粒径粗化显著,分选变差,偏态趋向极正偏,峰态尖锐化;水库回水区受水库壅水及下泄清水的双重制约,泥沙粒度参数介于自然河段和坝下游河段之间,整体分选中等,呈极正偏尖锐分布。

3)沉积环境分析表明,黑河上游支流野牛沟河段沉积物粒度特征受泥沙供给和物源特征的影响较水动力条件显著,而干流河段沉积物粒度特征主要受河流水动力条件控制,其中库区的水动力条件小于水库回水区河段,坝下游河段的水动力条件强于自然河段。

6 参考文献

- [1] Liu JL, Bao K, Li Y et al. Spatial distribution characteristics in grain size of river surface sediments under the Influence of reservoirs in the Luanhe River Basin. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 955-963. [刘静玲, 包坤, 李毅等. 漾河流域水库对河流表层沉积物粒度空间分布影响的研究. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 955-963.]
- [2] Yang YP, Zhang MJ, Li SZ et al. Transport patterns of the coarse and fine sediments and its causes in the downstream of the Three Gorges Dam. *J Lake Sci*, 2017, 29(4): 942-954. DOI: 10.18307/2017.0418. [杨云平, 张明进, 李松喆等. 三峡大坝下游粗细颗粒泥沙输移规律及成因. 湖泊科学, 2017, 29(4): 942-954.]
- [3] Guo XY, Wang W, Wang GL et al. Within-lake distributions of grain-size components and environmental implications based on the survey of lake surface sediment of Chinese monsoon marginal area. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 677-691. [郭晓阳, 王维, 王国良等. 季风边缘区湖泊表层沉积物粒度组分分布特征与影响因素. 地理研究, 2016, 35(4): 677-691.]
- [4] Fu KD, Yang WH, Su B et al. Response of river sediments to basin environmental changes: a case study of the Lancang River. *Progress in Geography*, 2015, 34(9): 1148-1155. [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. 地理科学进展, 2015, 34(9): 1148-1155.]
- [5] Katie HC, Melinda DD, Joshua SP et al. Longitudinal variability in hydraulic geometry and substrate characteristics of a Great Plains sand-bed river. *Geomorphology*, 2014, 210: 48-58.
- [6] Sun L, Zang S. Relationship between polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and particle size in dated core sediments in Lake Lianhuan, Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2013, 461/462: 180-187.
- [7] Zhao C, Dong SK, Liu SL et al. Distribution and environmental risk assessment of heavy metals and nutrients in sediments of upstream and downstream of Manwan Dam. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9): 2417-2425. [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. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2417-2425.]
- [8] Curtis KE, Renshaw CE. Temporal and spatial scales of geomorphic adjustments to reduced competency following flow regulation in bed-load-dominated systems. *Geomorphology*, 2010, 118(1/2): 105-117.
- [9] Melis TS, Korman J, Kennedy TA. Abiotic & biotic responses of the Colorado River to controlled floods at Glen Canyon Dam, Arizona, USA. *River Research and Applications*, 2012, 28(6): 764-776.
- [10] Curtis KE, Renshaw CE. Temporal and spatial scales of geomorphic adjustments to reduced competency following flow regulation in bedload-dominated systems. *Geomorphology*, 2010, 118(1/2): 105-117.
- [11] Ding YJ, Ye BS, Liu SY et al. Impact of climate change on the alpine streamflow during the past 40 a in the middle part of the Qilian Mountains, Northwestern China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(3): 193-199. [丁永建, 叶伯生, 刘时银. 祁连山中部地区40a来气候变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2000, 22(3): 193-199.]
- [12] Wang Y, Lian YT, Fan YW et al. Variations of runoff and sediment load and its causes in upper reaches of Heihe River basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 39(2): 1-9. [王昱, 连运涛, 范严伟等. 黑河流域上游水沙变化特征及成因分析. 水土保持通报. 2018, 39(2): 1-9.]
- [13] Xu JX. The influence of watershed factors and human activities on the sediment transport function in the lower Yellow River. *Science in China: Series D*, 2004, 34(8): 775-781. [许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响]

- 响. 中国科学: 地球科学, 2004, **34**(8): 775-781.]
- [14] Li CX, Yang SY, Fan DD et al. The change in Changjiang suspended load and its impact on the delta after completion of Three-Gorges Dam. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(5): 495-500.[李从先, 杨守业, 范代读等. 三峡大坝建成后长江输沙量的减少及其对长江三角洲的影响. 第四纪研究, 2004, **24**(5): 495-500.]
- [15] Brandt SA. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 2000, **40**(4): 375-401.
- [16] Bogen J, Bønsnes TE. The impact of a hydroelectric power plant on the sediment load in downstream water bodies, Svartisen, northern Norway. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1): 273-280.
- [17] Zhao LJ, Yin L, Xiao HL et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin. *Chinese Sci Bull*, 2011, **56**(1): 58-67.[赵良菊, 尹力, 肖洪浪等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据. 科学通报, 2011, **56**(1): 58-67.]
- [18] Tang RJ, Chen L, Yang Y et al. Riverbed deformation and navigation-obstructing characteristics of Sanjiaoqi shoal at fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir. *Port & Waterway Engineering*, 2015, **449**(1): 110-114.[唐荣婕, 陈立, 杨阳等. 三峡水库变动回水区三角碛浅滩冲淤与碍航特性分析. 水运工程, 2015, **449**(1): 110-114.]
- [19] Folk RL, Ward WC. Brazos river bar: a study in the signification of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, **27**: 3-27.
- [20] Qiao SQ, Shi XF, Wang GQ et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, **32**(4): 139-147.[乔淑卿, 石学法, 王国庆等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨. 海洋学报, 2010, **32**(4): 139-147.]
- [21] Church M, Kellerhals R. On the statistics of grain size variation along a gravel river. *Canadian Journal of Earth Science*, 1978, **7** (15): 1151-1160.
- [22] Rice S, Church M. Which tributaries disrupt downstream fining along gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 1998, **22**(1): 39-56.