

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.01.001

龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游 水沙关系的调控机制

姚文艺¹, 侯素珍¹, 丁 赞²

(1. 黄河水利科学研究院水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 依据龙羊峡、刘家峡水库进出库水沙定位观测资料, 根据河流动力学原理, 分析了水库运用对径流泥沙过程的调节作用及其影响, 揭示了水库对其下游河道水沙关系的调控机制。结果表明: ① 大型水库运用对进、出库径流泥沙的调节作用与水库的运用方式有关, 多年调节的龙羊峡水库对径流为线性调控, 对泥沙为非线性调控, 而不完全年调节的刘家峡水库对径流、泥沙均为线性调控; ② 水库运用对其下游河道水沙关系具有很强的干扰作用, 主要是打破了天然条件下河道通过长期自动调整所形成的输沙规律, 改变了挟沙水流的本构关系; ③ 大型水库运用对水沙关系动力学机制的影响主要归因于重新调整了挟沙水流的平衡条件, 使洪水传播过程中切应力降低, 临界弗劳德数增大, 改变了相对平衡输沙状态, 挟沙水流则需通过淤积增大比降, 满足临界弗劳德数状态下的水流切应力要求, 重新实现挟沙水流的平稳状态, 从而致使水沙关系发生相应变化。

关键词: 大型水库; 调控机制; 水沙关系; 宁蒙河段; 黄河上游

中图分类号: TV14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)01-0001-13

研究水库运用对径流泥沙的调节作用, 揭示水库运用对其河道水沙关系的调控机制, 对于认识水沙变化成因与机理, 优化水库运行方式具有重要意义。大型水库对河流泥沙过程具有很强的调控作用, 往往引起河流生态环境演化^[1-3]、河床演变^[4-5]及水文情势变化^[6-7], 其影响甚至是深远的^[8-9]。关于水库运用对径流泥沙的调节作用已有不少研究, 如 Walling 和 Fang^[10]通过对近年来世界河流入海泥沙通量的变化分析认为, 水库运用是影响近年来入海泥沙通量的重要因素, 而相对来说气候变化的影响有限; Vörösmarty 等^[11]进一步分析表明, 世界上每年有 40% 的径流量、25% 的入海泥沙量被水库拦蓄; Jueyi 等^[12]根据黄河头道拐至府谷河段的观测资料分析发现, 由于水库调节作用, 有 80% 的降雨量不能形成干流的径流量; 多数水库拦沙主要发生在汛期, 水库群联调对泥沙输移的影响作用要比径流的大^[13]; 另一方面, 通过合理的调度, 水库调节也可以塑造出协调的水沙关系, 明显改善下游河道的淤积状况^[14]。

龙羊峡水库、刘家峡水库(简称龙刘水库)是黄河上游干流的大型水利工程, 对黄河径流具有很强的调节能力^[8]。随着黄河上游河道淤积问题的凸显和水沙变化态势的不断加剧, 近几十年来关于龙刘水库运用对黄河上游水沙过程影响的问题已得到多方持续关注^[15]。关于龙刘水库对黄河上游水沙过程的调节作用已经开展了许多研究。Hou 等^[16]研究了龙羊峡水库运用对黄河上游洪水、水沙年内分配及径流泥沙关系的调控影响; Xu^[17]分析了人类活动和气候因素对黄河上游泥沙输移规律的影响, 认为黄河上游水库运用加之灌溉引水引沙极大地改变了水沙组合关系; Yao 和 Xu^[18]进一步分析表明, 龙刘水库运用的主要作用是改变了悬移质泥沙输移规律, 水土保持等人类活动主要是减少了径流泥沙; 赵昌瑞等^[19]通过对黄河上游水沙变化

收稿日期: 2015-10-23; **网络出版时间:** 2016-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20161217.1728.016.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB403303); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB02B03)

作者简介: 姚文艺(1957—), 男, 河南周口人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事河床演变与河道整治、土壤侵蚀与水土保持方面研究。E-mail: wyyao@yrihr.com.cn

原因的揭示认为,黄河上游水沙系列年际变化发生根本性转变的主要决定因素是上游降水量变化、引水量增大及龙刘水库联合运用;马勇等^[20]还分析了龙刘水库运用对干流悬移质泥沙级配的影响。其他还有不少关于龙刘水库对黄河上游水沙输移过程、水沙量年内分配的调控作用以及对径流量及输沙量的调控影响等方面的研究^[21-27],这些成果对认识大型水库运用在黄河上游水沙变化中的作用具有很大应用价值。然而,目前国内外对水库运用调控水沙作用的研究多关注于水库运用前后水沙过程及水沙关系的变化特征与规律方面,而关于大型水库运用对水库下游河道水沙关系调控机制方面的研究还鲜见报道。

本文以黄河上游龙刘水库为研究对象,基于20世纪50年代以来龙刘水库入库、出库水沙定位观测资料,分析了水库运用对出库水沙过程、进出库水沙关系及水库下游河道水沙关系的调节作用,进而根据河流动力学原理,揭示水库运用对水库下游河道水沙关系的调控机制。

1 研究对象、资料及方法

1.1 研究对象

以龙羊峡水库、刘家峡水库为研究对象。龙刘水库位于黄河上游兰州以上干流(图1),龙羊峡水库位于刘家峡水库上游334.5 km处。

1.1.1 刘家峡水库

刘家峡水库建成于1968年,是一座以发电为主,兼有防洪、灌溉、防凌、养殖等综合效益的大型水利工程,上距黄河源头2019 km,下距兰州100 km,控制流域面积18.2万km²,占黄河流域面积的1/4。水库正常蓄水位1735 m,兴利调节库容41.50亿m³,正常水位库容57.00亿m³,为不完全年调节水库,水库系数为16%。设计选用的水文系列为1919—1963年,后延长到1972年,坝址断面多年平均径流量为273.0亿m³、流量为866 m³/s,多年平均输沙量为8940万t,其中支流洮河输沙量2740万t。输沙量往往集中在汛期几场洪水过程中。刘家峡水库的年蓄变量变化不大,水量基本平衡,因此,其年调节水量能力相对有限。

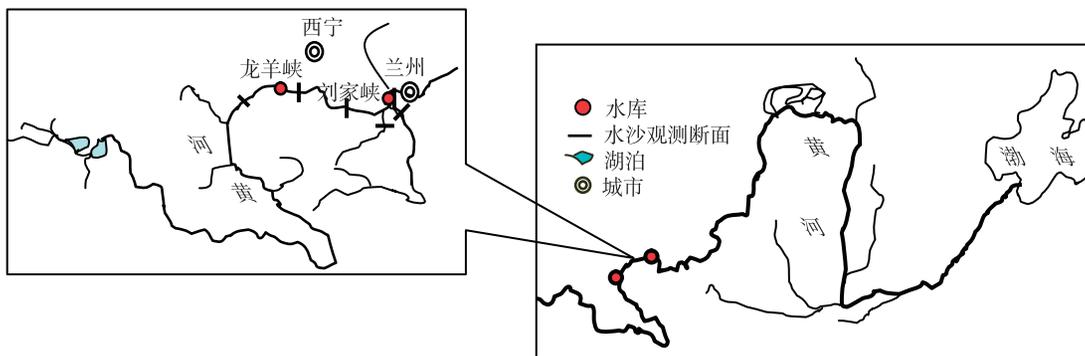


图1 龙羊峡水库、刘家峡水库位置示意

Fig. 1 Sketch of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir

1.1.2 龙羊峡水库

龙羊峡水库建成于1986年,是一座以发电为主,兼有防洪、灌溉、供水等多年调节综合利用的大型水利工程,上距黄河源头1684.5 km,水库正常蓄水位2600 m,调节库容193.6亿m³,正常水位库容达247.0亿m³。龙羊峡水库运用分两个阶段,1986年10月—1989年10月为初期蓄水阶段,1989年11月以后为正常运用阶段。在初期蓄水阶段,蓄水位达到2575 m;在水库正常运用阶段,7—10月以蓄水为主,11—4月以补水为主,5月份有蓄水也有补水,6月份以蓄水为主。该水库蓄变量年际间变化很大,年蓄水量最大为117.0亿m³(2005年),最小为4.300亿m³(1997年)。1986年以来龙刘水库联合运用。为配合龙羊峡水库初期蓄水运用,刘家峡水库很长时间均在低水位运行,龙羊峡水库正常运用后,刘家峡水库运用水位提高,大

部分时间维持在 1 730 m 左右。龙刘水库联合运用后, 对黄河上游水沙关系形成很大的调控作用, 宁蒙河道的来水来沙条件发生变化, 尤其是水沙关系发生显著调整, 对河道冲淤演变带来很大影响。

1.2 资料

龙羊峡水库进出库干流水文站分别为唐乃亥、贵德; 刘家峡水库进库干流水文站为循化, 支流洮河水文站为红旗、大夏河水文站为折桥, 出库干流水文站为小川(图 1), 干流水文站均为国家基本测站, 多建于 20 世纪 50 年代初期, 观测系列相对较长, 资料精度高, 测站基本情况见表 1。水沙资料均采用由黄河水利委员会整编刊印的《黄河流域水文年鉴》。

为进一步分析龙刘水库运用对进入宁蒙河段水沙关系的调控作用及水沙关系变化的临界, 统计了兰州水文站 1919—2012 年径流量、输沙量资料, 兰州水文站测验始于 1934 年, 其前至 1919 年的径流量、输沙量资料系由黄河水利委员会分别会同有关单位插补延长的, 并编印了《1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计》^[28] 年鉴。

表 1 龙刘水库河段干流水文站基本情况

Table 1 Hydrological stations in the main streams of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir

测站	至河源 距离/km	经度	纬度	控制流域 面积/万 km ²	建站时间	基面高程/m	站址
唐乃亥	1 552	100°09'	35°30'	12. 20	1955-09	2 500	青海省兴海县
贵德	1 742	101°24'	36°02'	13. 37	1954-01	2 100	青海省贵德县
循化	1 908	102°30'	35°50'	14. 55	1945-10	1 600	青海省循化县
小川	2 019	103°20'	35°56'	18. 18	1948-01	1 500	甘肃省永靖县

1.3 分析方法

利用双累计曲线方法定量判识水沙关系发生变化的年际临界。双累积曲线(Double Mass Curve, DMC)方法是由美国学者 Merriam^[29] 于 1937 年提出的。所谓双累积曲线方法就是在直角坐标系中绘制同期内一个变量的时段累积值与另一个变量相应时段累积值的关系线, 根据累积关系曲线分析两个变量之间响应关系的变化趋势, 并判断其变化时间和变化量。双累积曲线法的理论基础是自变量的累积值与因变量的累积值成正比, 在直角坐标上可以表示为一条直线, 其斜率为两要素对应点的比例常数。如果双累积曲线的斜率发生突变, 则意味着两个变量之间的比例常数发生了改变。若两个变量累积值之间直线斜率发生改变, 那么斜率发生突变点所对应的年份就是两个变量累积关系出现突变的时间。

2 水库运用对水沙关系的调控作用

2.1 水库运用对出库水沙过程的影响

图 2、图 3 分别为龙羊峡水库进出库年径流量、年输沙量变化过程。在 1986 年龙羊峡水库投入运用前, 其进库控制水文站唐乃亥的年径流量与出库控制水文站贵德的年径流量变化过程具有较好的同步性, 且相差不大, 从多年平均角度看, 贵德径流量较唐乃亥大 8.060 亿 m³。至 1986 年以后, 两者的同步性减弱, 尤其是大水年份, 水库蓄水量增加, 出库径流量明显减少, 且贵德与唐乃亥的径流量之差变幅增大, 为 50.00 亿~100.0 亿 m³。流量过程的坦化特别是大流量过程的消失或削减, 大大降低了水库下游河道的输沙动力, 对宁夏和内蒙古河道而言, 输沙能力降低将会减少汛期的冲刷或甚而增加淤积。

对年输沙量的调节作用明显不同于对年径流量的调节。在龙羊峡水库运用前, 贵德输沙量较唐乃亥输沙量年均大 0.130 亿 t, 两者的变化过程亦具有很好的同步性, 经统计分析, 其间呈正相关关系; 在水库运用后, 进出库输沙量变化过程的同步性大大减弱, 虽然进库水文站唐乃亥的输沙量年际间变化较大, 而出库水文站贵德的年际间输沙量变幅很小, 基本在 0.030 亿 t 左右, 仅为入库输沙量 0.260 亿 t 的 11% 左右。贵德输沙量在水库运用后减少 90.20%, 远大于径流量的减幅。应当说明的是, 龙羊峡水库入库沙量不仅包含了唐

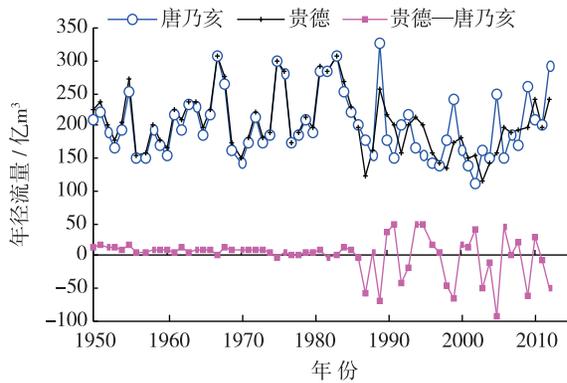


图2 龙羊峡进出库年径流量变化过程

Fig. 2 Variation of runoff volume transporting into and out of Longyangxia Reservoir

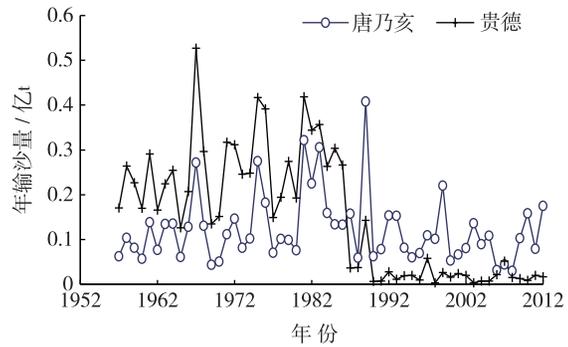


图3 龙羊峡进出库年输沙量变化过程

Fig. 3 Variation of sediment transporting into and out of Longyangxia Reservoir

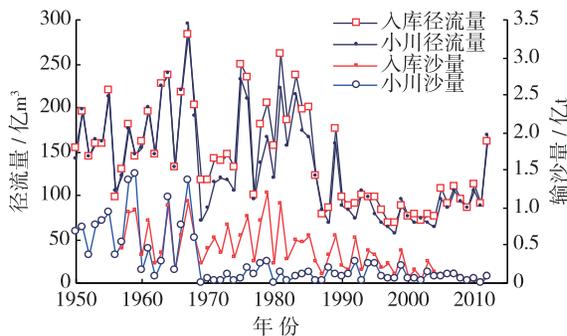


图4 刘家峡水库进出库水沙变化过程

Fig. 4 Variation of flow and sediment transporting into and out of Liujiaxia Reservoir

乃亥输沙量,也包含了唐乃亥—贵德区间的未控输沙量。根据刘家峡水库运用前后的进出库水沙过程分析(图4),刘家峡水库对径流量的调节作用相对较小,而对泥沙的调节作用比较明显。由于刘家峡水库为不完全年调节,水库运用主要对径流量年内分配影响较大,而对年径流量影响很小,在水库运用前后进出库径流量基本接近(表2)。而对于输沙量来说,在1968年水库运用后至1986年单库运用前,出库沙量就已大幅度减少,减幅达79.3%。在两库联合运用期,入库沙量减少,但年均出库沙量却与前一时段的水平接近。与天然时期相比,在刘家峡水库单库运用期,其出库沙量较入库沙量减少78.4%,龙刘水库联合运用后,出库沙量减少46.6%。

表2 刘家峡水库径流泥沙特征值统计

Table 2 Statistic of characteristic of runoff and sediment in Liujiaxia Reservoir

控制水文站	时段	径流量/亿 m^3			输沙量/亿t			汛期占全年比例/%	
		非汛期	汛期	全年	非汛期	汛期	全年	径流量	输沙量
入库站(循化+红旗+折桥)	1920—1968年	110.3	166.4	276.7	0.124	0.584	0.708	60.1	82.5
	1969—1986年	114.8	173.4	288.2	0.156	0.571	0.727	60.2	78.5
	1987—2010年	132.9	91.70	224.6	0.074	0.223	0.298	40.8	74.8
出库站(小川)	1920—1968年	107.8	164.7	272.5	0.137	0.620	0.757	60.4	81.9
	1969—1986年	141.4	145.7	287.1	0.062	0.094	0.157	50.7	60.2
	1987—2010年	139.1	85.00	224.1	0.048	0.111	0.159	37.9	69.9

2.2 水库运用对进出库水沙关系的影响

(1) 水库运用对来沙系数的影响。来沙系数或称水沙系数是表征水沙组合关系的重要指标之一,是单位流量的含沙量,或实测含沙量与临界含沙量的比值^[30]。根据龙羊峡水库进出库年来沙系数分析(图5),在1986年以前,入库断面唐乃亥来沙系数远较贵德的小,但到其后,在唐乃亥来沙系数基本不变甚而个别年份还有增大的情况下,贵德来沙系数大大减小,两者过程线上下位置发生变化。1986年之前唐乃亥的来沙系数变化范围为0.005~0.0010(kg·s)/m⁶,平均为0.0008(kg·s)/m⁶,到贵德增至0.0017(kg·s)/m⁶,增大1倍多,且年际间变幅增大。自1987年以后,唐乃亥来沙系数平均为0.0010(kg·s)/m⁶,贵德平均来

沙系数仅为 $0.0003(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$, 后者只有前者的 30%。

在 1968 年以前, 刘家峡水库进出库来沙系数同步变化, 且除个别年份外均相差不大。1968 年以后, 出库来沙系数明显减小(图 6)。统计表明, 1969—1986 年出库来沙系数平均仅 $0.0008(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$, 远小于入库平均值 $0.0029(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$; 除 1988 年、1992 年外, 1987 年后入库来沙系数呈不断减小趋势, 而出库来沙系数较之前有所增大, 平均为 $0.0010(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$, 较前一时期增加约 1/4, 由此说明随着死库容淤满, 1987 年后刘家峡水库拦沙作用有所降低。同时, 在 1987 年后刘家峡水库的进出库来沙系数变化过程接近于 1968 年以前的态势, 具有较好的同步性。

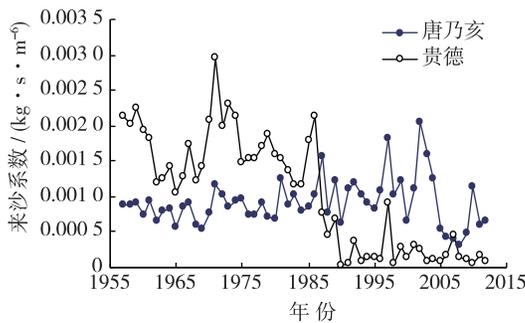


图 5 龙羊峡水库进出库来沙系数变化过程

Fig. 5 Variation of incoming sediment coefficient into and out of Longyangxia Reservoir

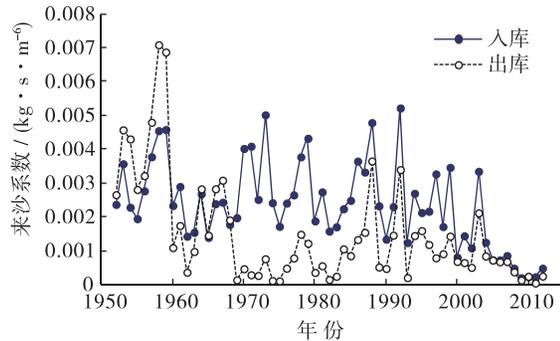


图 6 刘家峡水库进出库来沙系数变化过程

Fig. 6 Variation of incoming sediment coefficient into and out of Liujiaxia Reservoir

(2) 出库水沙关系对水库运用的响应。图 7 进一步验证了水库运用对入库水沙关系的调节作用。在龙羊峡水库运用前后, 入库断面唐乃亥的水沙关系并没有发生明显变化, 而出库断面贵德的水沙关系在水库运用后却发生极大调整。龙羊峡水库运用前唐乃亥、贵德的水沙关系均呈幂函数形式, 水量越大输沙量越大; 龙羊峡水库运用后, 在出库径流量为 100.0 亿~ 250.0 亿 m^3 内, 在相同径流量条件下出库站贵德的输沙量大减少, 且两者关联性明显减弱, 即无论贵德径流量多大, 其输沙量均变化于 0.030 亿 t 左右。

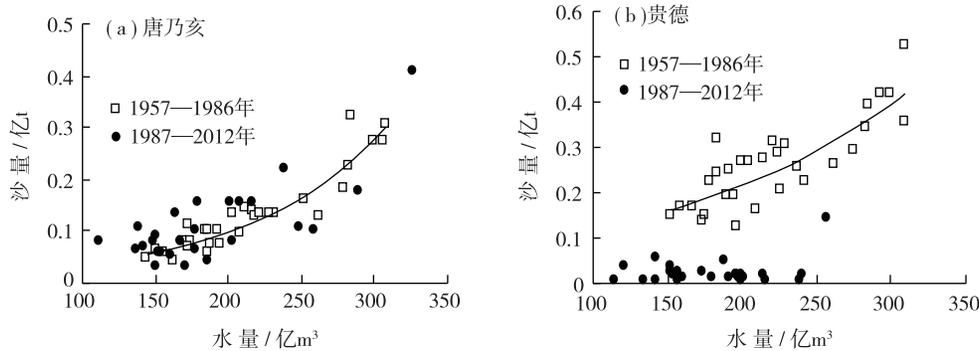


图 7 龙羊峡水库进库、出库年水沙关系

Fig. 7 Annual relation between runoff and sediment into and out of Longyangxia Reservoir

刘家峡水库出库水文站小川的水沙关系变化也表明(图 8), 水库运用后水沙函数关系也有较大调整。在刘家峡水库开始运用的 1968 年前, 其出库水文站为上迳, 上迳年径流量与年输沙量之间具有较好的线性关系; 1958 年 9 月位于上迳上游的盐锅峡水库开始施工, 在施工期及开始运用后以及至刘家峡水库运用前的 1960—1968 年, 盐锅峡水库滞洪拦沙, 相同水量下沙量减少, 而且大水时减得少、小水期减得多, 但沙量与水量仍具有明显的线性关系。同时, 水量较大时, 输沙量随着水量增加而增加, 并逐渐趋于 1960 年以前的水平, 说明盐锅峡水库的影响已经很小。到 1968 年刘家峡水库运用至 1986 年龙羊峡水库运用以来, 出库

沙量与水量的关系不甚明显,相同水量的输沙量大大减少,在年径流量最大达到400.0亿 m^3 的条件下,最大输沙量仍不足0.400亿t,仅为以往最大输沙量1.60亿t的1/4。

(3) 进出库水沙关系变化对水库运用的响应。为进一步分析水库运用对进出库径流量、输沙量的影响及其调控规律,分别统计了不同时段龙羊峡水库进出库水量关系、进出库沙量关系(图9)。

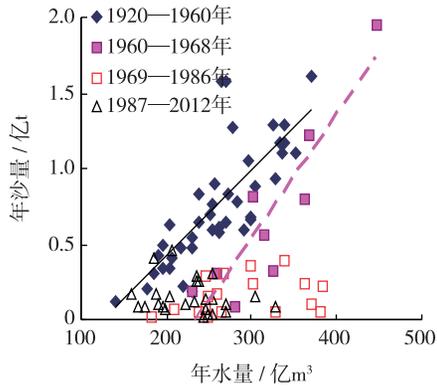


图8 小川站水沙关系变化

Fig. 8 Variations of relationship between runoff and sediment of Xiaochuan

龙羊峡水库运用前,唐乃亥水量与贵德水量具有很好的线性关系,但水库运用后,两者的相关程度大大减弱,同时衰减相当明显,相对唐乃亥而言,贵德年水量衰减率约达到80%,不过两者年水量之间基本上仍呈线性关系。从进出库的流量关系也可进一步看出(图10),龙羊峡水库、刘家峡水库对径流的调节均是线性的,且龙羊峡水库的调节作用远大于刘家峡水库的作用。

在水库运用前,唐乃亥输沙量与贵德输沙量之间呈幂函数关系,但是在水库运用后,除了出库泥沙量明显减少外,且两者的关系表现出多项式形式,显然,这与水库对径流量的调节机理不相同。根据数理统计分析,当龙羊峡水库入库沙量小于0.150亿t时,水库对径流量的调节作用大于对泥沙量的调节作用。

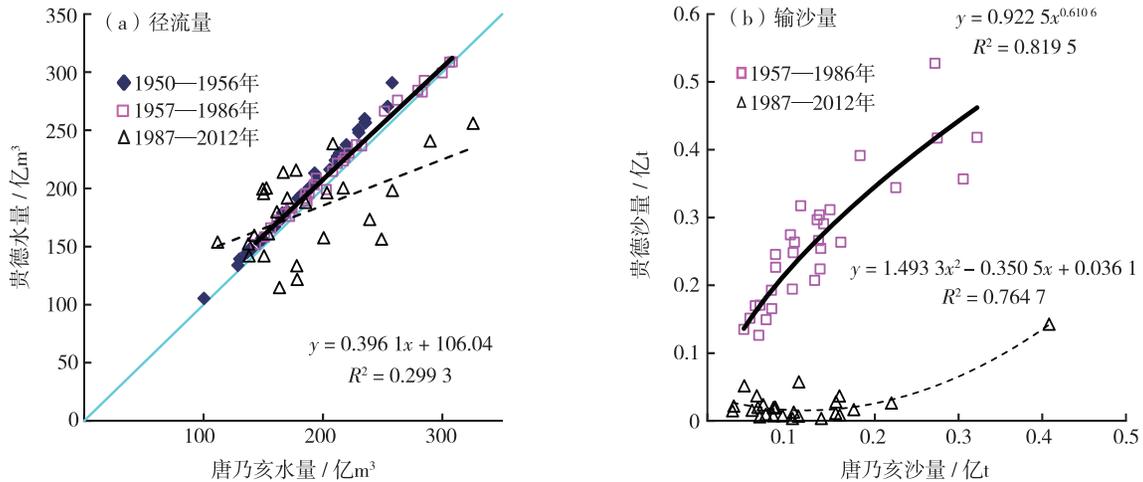


图9 贵德与唐乃亥(上站)年径流量、年输沙量关系

Fig. 9 Annual relation between runoff and sediment of Guide and Tangnaihai

通过对刘家峡水库进出库输沙量关系进一步分析,在刘家峡水库建成前的1952—1968年,该水库运用后至龙羊峡水库运用前的1969—1986年,两库联合运用后的1987—2012年,各时段的进出库输沙量均有较好的线性关系(图11,图中横坐标“三站”系指循化、红旗和折桥),但相同入库输沙量下的出库输沙量有明显降低(表3),在刘家峡水库运用后的两个时期,出库输沙量仅分别为水库运用前的20.85%、28.45%,即水库的拦沙能力在运用前期相对较高,而随着历时增加,水库拦沙能力有所降低,如1987—2012年,在相同入库沙量下,出库沙量较1969—1986年增加了近8%。

综上所述表明,龙刘水库对进出库径流泥沙的调控规律不同。龙刘水库对径流量的调节均属于线性的;龙羊峡水库对泥沙的作用为非线性调节,而刘家峡水库对泥沙的作用则为线性调节。

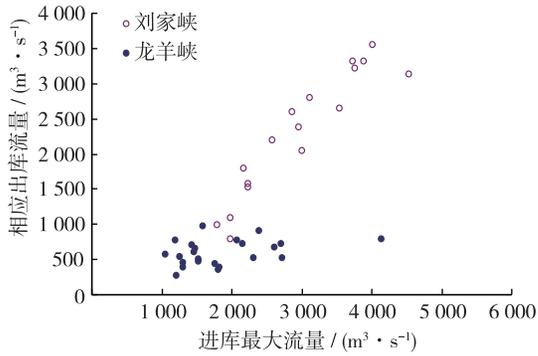


图 10 龙羊峡、刘家峡水库进出库流量关系
Fig. 10 Annual discharge relation into and out reservoirs of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir

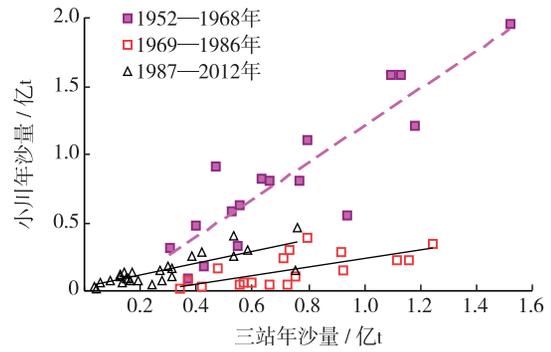


图 11 刘家峡水库出库年沙量与入库沙量
Fig. 11 Relation between annual sediment load into and out of Liujiaxia Reservoir

表 3 刘家峡水库进出库输沙量关系

Table 3 Sediment relation between into and out of Liujiaxia Reservoir

时段	公式形式	公式参数		相关系数 R	备注
		k	b		
1952—1968 年	$W_{si} = kW_{so} + b$	1.493 3	-0.346 0	0.93	W_{si} 、 W_{so} 分别为进出库输沙量; k 、 b 分别为系数和常数。
1969—1986 年		0.311 4	-0.069 3	0.69	
1987—2012 年		0.427 8	0.034 3	0.80	

2.3 水库运用对其下游河道水沙关系的影响

水库运用对径流泥沙的调节作用不仅表现在改变了进出库水沙关系, 并直接影响水库下游河道水沙关系发生变化。分别以距刘家峡水库出库断面 100 km、460 km 的兰州、下河沿水文站实测水沙过程变化为例。根据兰州、下河沿 1919—2012 年的径流量与输沙量双累计曲线分析(图 12), 20 世纪 60 年代末以前近 50 年期间, 兰州、下河沿径流量和输沙量基本上呈同步变化趋势, 两者有着较强的线性相关关系, 在不同年代尺度内, 其相关关系的斜率无明显变化。但在此时期之后, 输沙量减幅均大于径流量减幅, 曲线斜率变缓, 即单位径流量的输沙量明显减少。兰州、下河沿的径流泥沙关系均在 1968 年、1986 年、2000 年发生变化, 其中前两个突变点与龙刘水库投入运用的时间节点一致, 由此说明水库调控对工程下游河道水沙关系产生了较大影响。

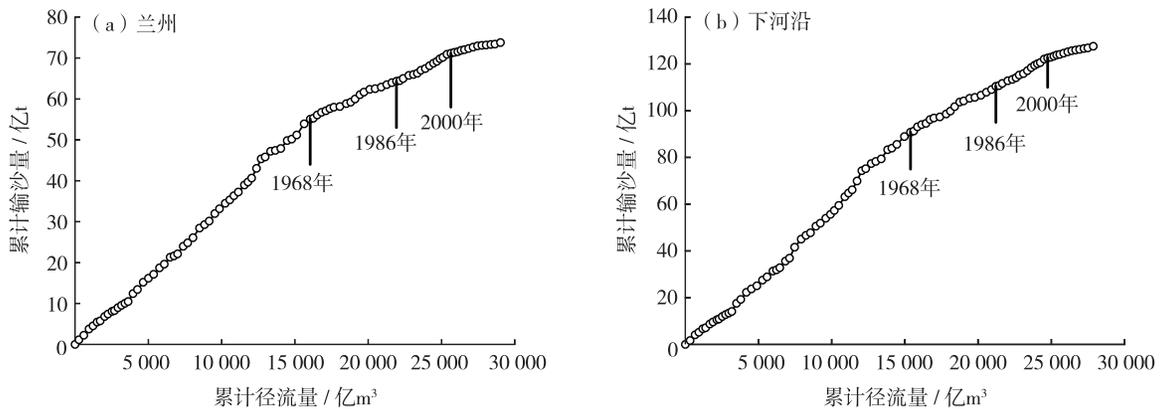


图 12 代表断面 1919—2012 年径流量与输沙量双累计曲线

Fig. 12 Runoff-sediment yield cumulative curve of representing cross-sections from 1919 to 2012

为进一步分析龙刘水库运用对其下游河道水沙关系变化规律,建立了20世纪50年代以来唐乃亥、兰州、下河沿径流输沙关系(图13)。自20世纪50年代以来的3个不同时段,唐乃亥的径流输沙关系的相关性较高,且点据较为集中分布于同一带,而兰州、下河沿径流输沙关系自刘家峡水库运用后已发生很大变化。在1968年以前,径流量与输沙量基本上呈正比直线相关,而自刘家峡水库运用后,径流输沙关系发生很大变化,一是相同径流量下的输沙量减少;二是两者的相关性大大减弱,在所测验的径流量变化幅度内,尽管径流量有明显增大,但输沙量并没有出现随之不断增加的趋势。

因此,水库调控对其下游河道水沙关系具有较强的影响作用。

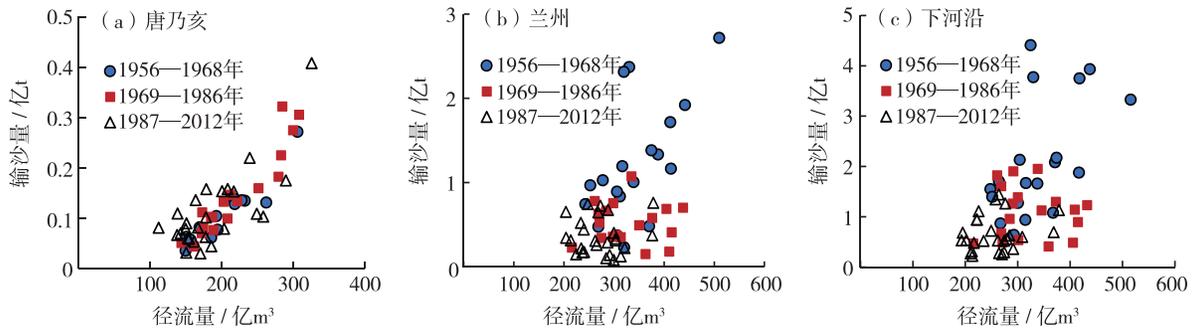


图13 代表断面实测径流与输沙关系

Fig. 13 Relations between measured runoff and sediment of representing cross-sections

3 水库运用对水库下游水沙关系的调控机制

龙刘水库均具有防洪功能,在汛期对水沙的调节作用较强,其主要表现为对洪水过程的调控。由图14

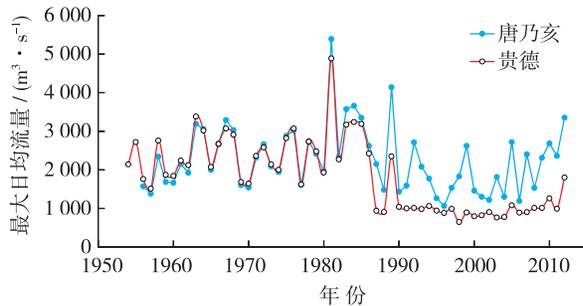


图14 唐乃亥和贵德最大日均流量过程

Fig. 14 Maximum daily discharge process at Tangnaihai and Guide

龙羊峡水库运用后的贵德最大日均流量过程分析,1986年以前,龙羊峡水库进库站唐乃亥、出库站贵德的最大日均流量的过程线吻合且量值接近。但1986年后两者的过程线极不吻合,而且最大日均流量相差很大,贵德的最大日均流量基本上稳定在1000 m³/s左右。另据实测资料分析^[31],黄河上游河道输沙主要集中在汛期较大流量的场次洪水,在没有水库调控干扰下,兰州大于2000 m³/s的洪水天数占汛期天数的60%以上,其水量占50%以上,但龙刘水库运用后,其天数占比降至40%左右,水量占比不足20%。根据河流动力学原理,水库运用对洪水运动特性的改变,会导致挟沙水流能量的再分配,从而导致水沙关系发生新的变化。

根据龙羊峡水库库区水沙垂向分布特点,将其概化为分层模式,即上层为清水运动层、下层为泥沙输移层^[32-33]。挟沙水流经水库调节再分配后,双层流动的动力学特性均发生改变。其中双层流动间动力交换将很大程度上改变水沙关系。泥沙输移层可视为宾汉体,其本构关系为

$$\tau = \tau_{\min} + \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

式中: τ 为切应力; τ_{\min} 为宾汉体剪切应力; u 为水流的垂线流速; μ 为动力黏滞系数; y 为垂向坐标。

将式(1)沿 y 坐标积分,同时考虑到 $u(y=0) = 0$, 可得到如下关系:

$$u(y) = \frac{1}{\mu} \left[(\tau_1 - \tau_{\min} + \rho_m g h J_0) y - \frac{1}{2} \rho_m g h J_0 y^2 \right] \quad (2)$$

式中: τ_1 为双层间切应力; ρ_m 为浑水密度; J_0 为底坡; h 为清水层水深; g 为重力加速度。

由式(2)可见, 在黏性很高的泥沙输移层内的垂线流速一般可认为满足线性分布。

根据双层流动的应力分布, 可得到如下关系:

$$\tau_{\min} + \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=h_1} = \tau_1 \quad (3)$$

式中: h_1 为泥沙输移层厚度。

清水层水流动量方程满足:

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh \left[J_0 - \frac{\tau_1}{\rho_w gh} \right] \quad (4)$$

式中: ρ_w 为清水密度。

将式(2)和式(3)代入清水层水流动量方程(4)后, 可得

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh \left[\frac{\rho_w - \rho_m + \rho_m h_1}{\rho_w} J_0 - \frac{\tau_1}{\rho_w gh} \right] \quad (5)$$

泥沙输移层水沙动量方程满足:

$$\frac{\partial h_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial h_1 u_1^2}{\partial x} + gh_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} = gh_1 \left[J_0 - \frac{\tau_{bs} - \tau_1}{\rho_w gh} \right] \quad (6)$$

式中: τ_{bs} 为宾汉体床面切应力。

考虑到式(5)、式(6)及连续方程为非线性双曲方程, 直接求解难度较大。为获得挟沙水流临界失稳的判据, 本文对泥沙输移层采用线性扰动处理: $u_1 = U + u'_1$, $h_1 = H + h'_1$, 可得

$$\frac{\partial h'_1}{\partial t} + H \frac{\partial u'_1}{\partial x} + U \frac{\partial h'_1}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u'_1}{\partial t} + U \frac{\partial u'_1}{\partial x} + g \frac{\partial h'_1}{\partial x} + g S_0 \left[\frac{2Uu'_1}{u_{aver}} - \frac{4h'_1}{3H} \left(1 + \frac{3\tau_{bs}}{4\tau_1} \right) \right] = 0 \quad (8)$$

式中: U 为输沙层恒定流流速; u'_1 为扰动流速; H 为恒定流水深; h'_1 为扰动水深; u_{aver} 为输沙层垂线平均流速, 其满足如下关系:

$$u_{aver} = \frac{h'_1}{6\mu} \left(\frac{\tau_{bs} - \tau_{\min}}{\tau_{bs} - \tau_1} \right)^2 (2\tau_{bs} + \tau_{\min} - 3\tau_1) \quad (9)$$

为了揭示双层流动间动力学作用机制, 本文引入量纲一数 $\psi = \tau_{bs}/\tau_1$, 以度量宾汉体床面切应力与双层界面切应力的比值。从 ψ 表达式可以看出, 量纲一数 ψ 由两部分构成: ① 极限剪切应力 τ_{bs} , 表达了泥沙输移层的流变特性; ② τ_1 , 由清水层的运动参数构成, 反映清水层的运动特性。因此, 量纲一数 ψ 起到了连接双层流动的重要作用, 表征了两层间相互作用对水流运动及稳定性的影响。同时本文引入另一个量纲一数 $\delta = \tau_{\min}/\tau_1$, 以度量宾汉体床面屈服切应力与双层界面切应力的比值。将 $\psi = \tau_{bs}/\tau_1$, $\delta = \tau_{\min}/\tau_1$ 代入式(8)经整理后可得

$$\frac{\partial u'_1}{\partial t} + U \frac{\partial u'_1}{\partial x} + g \frac{\partial h'_1}{\partial x} + U J_0 \mu \left[\frac{12u'_1(\psi - 1)^2}{h'_1 \tau_1 g (\psi - \delta)^2 (2\psi + \delta - 3)} - \frac{4h'_1}{3Re} \left(1 + \frac{3\psi}{4} \right) \right] = 0 \quad (10)$$

式中: Re 为恒定流雷诺数, $Re = UHg/\mu$ 。

将式(7)和式(10)交叉求导可得波系方程

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_1 \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial x} \right) h'_1 + \frac{2gJ_0}{U} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \left(\frac{12(\psi - 1)^2}{\tau_1 g (\psi - \delta)^2 (2\psi + \delta - 3)} + \frac{\psi}{2Re} \right) U \frac{\partial}{\partial x} \right) h'_1 = 0 \quad (11)$$

式中: $\lambda_1 = U + \sqrt{gH}$; $\lambda_2 = U - \sqrt{gH}$ 。

式(11)作为典型的波系方程, 其决定了双层流动的临界判据, 即运动波速与正向动力波波速达到平衡时

$$U + \sqrt{gH} = \left(\frac{12(\psi - 1)^2}{\tau_1 g (\psi - \delta)^2 (2\psi + \delta - 3)} + \frac{\psi}{2Re} \right) U \quad (12)$$

从式(12)可获得双层流动失稳的判据——临界弗劳德数 Fr_c ，即

$$\frac{U}{\sqrt{gH}} = \left(\frac{12(\psi - 1)^2}{\tau_1 g (\psi - \delta)^2 (2\psi + \delta - 3)} + \frac{\psi}{2Re} - 1 \right)^{-1} \quad (13)$$

式(13)说明临界弗劳德数与量纲一参数 ψ 和 δ 密切相关，若水库运用引起挟沙水流异常传播，水深和流速会同时出现失稳，水流切应力变化，且这种扰动会随水流传播而增大，即水库对洪水过程的调节将会导致水流动力学特性发生变化。由式(13)可以绘制水流失稳时的 $Fr_c \sim Re$ 中性曲线，将洪水过程划分为 $Fr < Fr_c$ 的稳定区和 $Fr > Fr_c$ 的失稳区。当洪水过程一旦遭受外界干扰发生变异时，其动力平衡条件会随之被打破，即水沙输移动力条件发生变化。例如，根据2004年、2010年贵德站实测洪水数据得到其临界曲线见图15。通过水库调控，处于失稳状态下的挟沙水流在传播过程中河床切应力会有所减弱， ψ 值减小，在相同雷诺数条件下的临界弗劳德数增大。根据河床演变学原理，为达到新的河床冲淤平衡状态，挟沙水流需相应调整其输沙能力，而这一过程可通过调整水流自身流态来实现。与之相耦合的过程是，河道产生纵向淤积使得河床比降增大，过流动能增加，进而增加水流弗劳德数，且临界弗劳德数越大，挟沙水流欲达到新的平衡状态所需的河床淤积程度应越强。为实现新的输沙平衡状态所引起的河床淤积必然会使河道水沙关系发生相应变化。因此，河床调整迫使挟沙水流输沙能力与临界弗劳德数的变化，也就阐释了水库运用导致水沙关系产生变化的动力学机制。

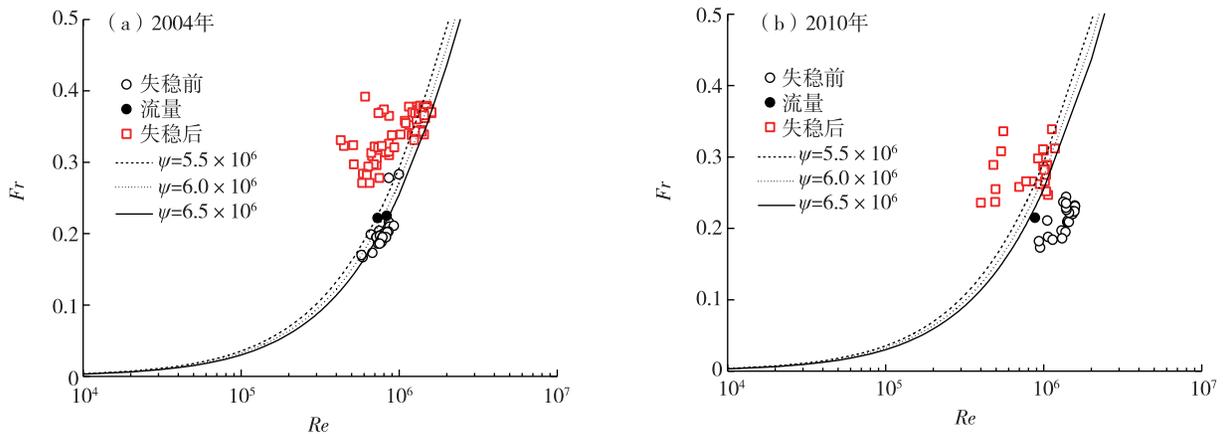


图15 贵德站2004年、2010年实测洪水临界曲线

Fig. 15 Flood field data and critical curve of 2004 and 2010 at Guide station

4 结 论

(1) 大型水库运用对进出库径流、泥沙的影响与水库运用方式有关。对于多年调节的龙羊峡水库而言，在水库运用前后，水库进、出控制断面的径流量关系均为线性，而输沙量关系在运用前为线性，运用后进出库输沙量关系为非线性；对于不完全年调节的刘家峡水库而言，水库运用前后进出库控制断面的径流量关系、输沙量关系都是线性的。

(2) 龙刘水库下游河道水沙关系变化出现3个时间临界点，其中1968年、1986年分别对应于刘家峡水库开始单库运用、龙刘水库开始联合运用的年份。水库对下游河道水沙关系的影响主要是降低了水流输沙能力，打破了天然条件下河道通过长期自动调整所形成的输沙规律，改变了挟沙水流的本构关系。

(3) 大型水库运用对水沙关系的调控机制主要在于改变了挟沙水流动力平衡条件，使处于失稳状态下

的挟沙水流在传播过程中床面切应力减弱,相同雷诺数条件下的临界弗劳德数增大,为达到新的河床冲淤平衡状态,河道产生纵向淤积,使得河床比降增大,水流动能增加,从而带来了河道水沙关系发生变化。临界弗劳德数增大越多,所需的河床淤积程度也越强,水沙关系变化也会越大。

由于黄河水沙输移规律复杂,龙刘水库运用影响因素多,要深入认识龙刘水库运用对水沙关系变化的作用,还需要就水沙变化对水库调控参数的响应规律等作进一步研究。

参考文献:

- [1] 汪恕诚. 论大坝与生态[J]. 水力发电, 2004, 30(4): 1-5. (WANG S C. On the dam and ecology [J]. Hydropower, 2004, 30(4): 1-5. (in Chinese))
- [2] 刘兰芬. 河流水电开发的环境效益及主要环境问题研究[J]. 水利学报, 2002(8): 121-128. (LIU L F. Environmental benefits river hydropower development and the major environmental issues [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(8): 121-128. (in Chinese))
- [3] 麻泽龙, 程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 748-753. (MA Z L, CHENG G W. Cascade development of river ecological environmental impact of progress [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 748-753. (in Chinese))
- [4] KINGSFORD R T. Ecological impacts of dams, water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia[J]. Austral Ecology, 2000, 25(2): 109-127.
- [5] KONDOLF G M, SWANSON M L. Channel adjustments to reservoir construction and instream gravel mining, Stony California[J]. Environmental Geology and Water Science, 1993(21): 256-269.
- [6] 王兆印, 刘成, 余国安, 等. 河流水沙生态综合管理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 395-463. (WANG Z Y, LIU C, YU G A. Integrated management of water, sediment and ecology of rivers[M]. Beijing: Science Press, 2014: 395-463. (in Chinese))
- [7] 胡春宏, 王延贵, 张世奇, 等. 官厅水库泥沙淤积与水沙调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 216-252. (HU C H, WANG Y G, ZHANG S Q. Guanting reservoir sedimentation and water and sediment regulation [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003: 216-252. (in Chinese))
- [8] 汪岗, 范昭. 黄河水沙变化研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 175. (WANG G, FAN Z. Yellow River water and sediment variations [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002: 175. (in Chinese))
- [9] 焦恩泽. 黄河水库泥沙[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 359-379. (JIAO E Z. Yellow River reservoir sediment [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2004: 359-379. (in Chinese))
- [10] WALLING D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39: 111-126.
- [11] VÖRÖSMARTY C J, MEYBECK M, FEKETE B, et al. The potential impact of neo-castorization on sediment transport by the global network of rivers[C]//WALLING D E, PROBST J L. Human Impact on Erosion and Sedimentation(Proc Rabat Symposium, April 1997), IAHS Publication No 245. Wallingford: IAHS Press, 1997: 261-273.
- [12] JUEYI S, JAKSON P, LIU C, et al. Characteristics of sediment transport along a river reach with a reservoir [J]. International Journal of Sediment Research, 2005, 20(2): 89-101.
- [13] LIU X Y, HE D M. A new assessment method for comprehensive impact of hydropower development on runoff and sediment changes [J]. J Geogr Sci, 2012, 22(6): 1034-1044.
- [14] LI W X, LIU J X, WAN Z W. Regulation of flow and sediment in the Yellow River [J]. International Journal of Sediment Research, 2007, 22(2): 103-113.
- [15] 姚文艺, 徐建华, 冉大川, 等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011: 1-10. (YAO W Y, XU J H, RAN D C, et al. Changes in water and sediment of the Yellow River basin situation analysis and evaluation [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2011: 1-10. (in Chinese))
- [16] HOU S Z, GUO Y, WANG P. Effect of Longyangxia reservoir on the variation of water and sediment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 385/386: 372-377.
- [17] XU J X. Decreasing trend of sediment transfer function of the upper Yellow River, China, in response activity and climate change

- [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(2): 311-325.
- [18] YAO W Y, XU J X. Impact of activity and climate change on suspended sediment load: the upper Yellow River, China[J]. *Environ Earth Sciences*, 2013, 70(3): 1389-1403.
- [19] 赵昌瑞, 赵明旭, 关磊. 黄河上游干流各控制站水沙变化规律分析研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2014, 50(4): 1-4, 10. (ZHAO C R, ZHAO M X, GUAN L. Variation of water and sediment of the Yellow River upstream of each station analysis [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2014, 50(4): 1-4, 10. (in Chinese))
- [20] 马勇, 张正平, 喇承芳. 黄河上游泥沙级配变化规律分析[J]. *甘肃水利水电技术*, 2009, 45(8): 4-6. (MA Y, ZHANG Z P, LA C F. The upper reaches of the Yellow River silt gradation variation analysis [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2009, 45(8): 4-6. (in Chinese))
- [21] 王秀杰, 练继建. 近 43 年黄河上游来水来沙变化特点[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(3): 3-6. (WANG X J, LIAN J J. Nearly 43 years of changes in the upper reaches of the Yellow River runoff and sediment characteristics [J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(3): 3-6. (in Chinese))
- [22] 王彦成, 王铁钧, 郭少宏, 等. 黄河内蒙古段近期水沙变化分析[J]. *内蒙古水利*, 1999(3): 40-41. (WANG Y C, WANG T J, GUO S H, et al. Recent changes in the analysis of water and sediment of Yellow River in Inner Mongolia [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 1999(3): 40-41. (in Chinese))
- [23] 饶素秋, 霍世青, 薛建国, 等. 黄河上中游水沙变化特点分析及未来趋势展望[J]. *泥沙研究*, 2001(2): 74-77. (RAO S Q, HUO S Q, XUE J G, et al. Analysis on the characteristics of runoff and sediment and the outlook of their tendency in the future in the upper and middle Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2001(2): 74-77. (in Chinese))
- [24] 程秀文, 尚红霞, 傅崇进. 80 年代龙羊峡、刘家峡水库运用及上游来水来沙变化[J]. *人民黄河*, 1992(5): 19-21, 22. (CHENG X W, SHANG H X, FU C J. Operation of Longyangxia reservoir and Liujiaxia reservoir and the variation of incoming water and sediment from upper streams in 1980s [J]. *Yellow River*, 1992(5): 19-21, 22. (in Chinese))
- [25] 尚红霞, 郑艳爽, 张晓华. 水库运用对宁蒙河道水沙条件的影响[J]. *人民黄河*, 2008, 30(12): 29-30. (SHANG H X, ZHENG Y S, ZHANG X H. Influence of reservoir operation on water and sediment conditions on Inner Mongolia reaches [J]. *Yellow River*, 2008, 30(12): 29-30. (in Chinese))
- [26] 侯素珍, 王平, 楚卫斌. 黄河上游水沙变化及成因分析[J]. *泥沙研究*, 2012(4): 46-52. (HOU S Z, WANG P, CHU W B. Analysis of water and sediment changes in upper Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(4): 46-52. (in Chinese))
- [27] 申冠卿, 张原峰, 侯素珍, 等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响[J]. *泥沙研究*, 2007(1): 67-75. (SHEN G Q, ZHANG Y F, HOU S Z, et al. Impact of water and sediment regulation by reservoirs in the upper Yellow River on Inner Mongolia reaches [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(1): 67-75. (in Chinese))
- [28] 水利部黄河水利委员会. 1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计 [R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2001. (Yellow River Conservancy Commission. Statistics of water and sediment characteristic value in major hydrological stations of the Yellow River from 1919 to 1951 and from 1991 to 1998 [R]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Commission, 2001. (in Chinese))
- [29] MERRIAM C F. A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley [M]. Washington: Transactions, American Geophysical Union, 1937: 471-476.
- [30] 吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨[J]. *人民黄河*, 2008, 30(4): 15-16. (WU B S, SHEN G Q. Approach to physical meaning of coming sediment coefficients [J]. *Yellow River*, 2008, 30(4): 15-16. (in Chinese))
- [31] 姚文艺, 高亚军, 安催花, 等. 百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 1-9. (YAO W Y, GAO Y J, AN C H, et al. Analysis of trend of runoff and sediment load in upper and middle reaches of Yellow River at century scale [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 1-9. (in Chinese))
- [32] 钱宁, 万兆惠. 近底高含沙流层对水流及泥沙运动影响的初步探讨[J]. *水利学报*, 1965(4): 1-20. (CHIEN N, WAN Z H. The effects of sediment concentration gradient on the characteristics of flow and sediment motion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1965(4): 1-20. (in Chinese))
- [33] 方宗岱, 胡光斗. 巴家嘴水库实测高含沙水流特性简介[J]. *泥沙研究*, 1984(1): 73-75. (FANG Z D, HU G D. Brief introduction to the characteristics of measured hyperconcentrated flow in Bajiazui reservoir [J]. *Journal of Sediment Research*, 1984(1): 73-75. (in Chinese))

Effects on flow and sediment in the upper Yellow River by operation of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir *

YAO Wenyi¹, HOU Suzhen¹, DING Yun²

(1. MWR Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control in the Loess Plateau, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The regulation mechanism of Longyangxia and Liujiaxia Reservoir on runoff and sediment process is one of the key scientific problems to recognize flow and sediment variation in the Yellow River and optimize the reservoir operation modes. According to the located-observation data of water and sediment in Longyangxia and Liujiaxia Reservoirs, this paper analyzes the regulation and effect of reservoir to runoff and sediment process and reveals the controlling mechanism for the relationship between water and sediment. The main understandings achieved are: ① The regulation of large reservoir operation on runoff sediment is related to the operation mode of the reservoir. The pluriennial regulation of Longyangxia Reservoir results in the linear regulation of runoff and nonlinear regulation of sediment transport. The incomplete annual regulation of Liujiaxia Reservoir results in both linear regulation of runoff and sediment; ② Reservoir operation on the Regulation of runoff and sediment has a strong disturbance to the downstream water and sediment relation. It broke the sediment law under natural conditions of the river formed by long-term automatically adjustment and changed the constitutive relation of runoff sediment; ③ The effects of large reservoir operation on the dynamic mechanism for the relationship of water and sediment regulation mainly reflect in adjusting the dynamic equilibrium conditions of sediment-laden flow in which the shear stress decreased in the process of flood propagation. It makes the critical Froude number increase, resulting in the sediment-laden flow by siltation to increase gradient ratio to meet the critical water shear stress requirements of the Froude number state and reach the steady state of sediment-laden flow to stress the relationship between water and sediment change accordingly.

Key words: large reservoir; regulation mechanism; relationship between flow and sediment; Ningxia-Inner Mongolia reach; upper reach of the Yellow River

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2011CB403303) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-year Plan Period(No. 2012BAB02B03).