水　利　学　报
2020年4月　SHUILI　XUEBAO　第51卷　第4期

文章编号:0559-9350(2020)04-0402-08

黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究

安催花，鲁　俊，吴默溪，梁艳洁，罗秋实
（黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州　450003）

摘要：考虑黄河未来可能的水资源条件，以及生态保护、经济社会发展多目标对水量年内过程分布需求，根据黄河下游水沙资料、河道冲淤资料，采用实测资料分析、公式计算、数学模型模拟等多种方法研究了有利于黄河下游河流生态良性维持的平衡输沙的沙量阈值。未来进入黄河下游的年来水量为250亿m^3左右，实测资料分析和公式计算表明，未来较小的平衡输沙阈值为2.0～2.2亿t。数学模型计算在小浪底水库等现有工程联合调控作用下黄河下游平衡输沙的临界沙量为2.5亿t。中游古贤水库建成后和小浪底水库联合调度，可以进一步提高汛期的输沙效率，平衡输沙的沙量阈值可进一步提高。研究成果对黄河下游治理具有重要意义，可为黄河泥沙处置措施优化提供技术支撑。

关键词：黄河下游；平衡输沙；沙量阈值；河流生态；数学模型
中图分类号：TV143　**文献标识码**：A　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20190856

1　研究背景

黄河水少沙多，水沙关系不协调，泥沙淤积导致黄河下游形成了举世闻名的地上悬河，形成黄淮海平原的生态屏障。历史上，黄河下游“三年两决口、百年一改道”[1]，洪水泛滥给黄淮海平原造成了深重的灾难。党中央、国务院十分重视黄河下游治理，人民治黄以来开展了大规模的黄河治理保护工作，形成了“上拦下排、两岸分滞”调控洪水，“拦、调、排、放、挖”综合处理和利用泥沙的基本思路[2]，通过控制进入黄河下游的洪水、泥沙，谋求黄河安澜，取得了举世瞩目的成就。但受自然禀赋条件和长期人类活动影响，黄河下游仍存在洪水风险、生态环境脆弱、水资源短缺等突出问题。2019年9月18日，习近平总书记召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会，将黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略，要求保障黄河长治久安。实现黄河下游河床不抬高、促进河道生态良性维持是黄河长治久安的基本要求，其关键是采取泥沙处置措施，控制好进入黄河下游的泥沙量。究竟控制多少是合适的？既要考虑黄河有限的水资源条件，又要综合考虑生态保护、经济社会发展等多目标需求。新形势下，研究解决这一难题意义重大。

以往围绕黄河下游治理开展过大量研究，取得了许多重要研究成果。在黄河下游输沙与河道冲淤演变等基础领域，有关文献论著进行了深入研究，涉及到黄河下游河道水沙输移特性[3-4]，黄河下游冲淤变化规律[5-8]，黄河下游输沙用水量[9-11]，小浪底水库运用前不同水沙特性和河道形态条件下黄河下游河道的输沙用水量，黄河下游河道冲淤平衡时临界水沙条件[12-13]，以及利用汛期黄河下游冲淤平衡时的不同含沙量的临界流量成果，推算了不同水文年黄河下游花园口、高村断面水沙冲淤平衡的临界输沙量[14]等，为科学治理下游河道提供了重要技术支撑，解决了下游治理过程中的许多问题。现有文献论著中，缺少考虑黄河未来水资源条件和多目标需求的平衡输沙研究成果。本文考虑

收稿日期：2019-05-26；网络首发时间：2020-03-26
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200325.1052.005.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0402503)
作者简介：安催花(1963-)，教授级高级工程师，主要从事泥沙研究和水利规划研究。E-mail：anch542@sina.com
通讯作者：鲁俊(1981-)，高级工程师，主要从事泥沙研究和水利规划研究。E-mail：393956425@qq.com

黄河未来可能的水资源条件，以及生态保护、经济社会发展多目标对水量年内过程分布需求，采用实测资料分析、公式计算、数学模型模拟等多种方法，研究提出有利于黄河下游河流生态良性维持的平衡输沙的沙量阈值，为黄河泥沙处置措施优化提供技术支撑。

2　研究数据、方法

2.1　研究数据　进入黄河下游水沙量主要来自于干流、支流沁河和伊洛河，干流水沙量可用小浪底站（小浪底水库建成前为三门峡站）表示，沁河、伊洛河水沙量分别由武陟站、黑石关站表示。黄河下游干流沿程分布有花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、泺口和利津等多个水文站（见图1），这些水文站有流量、输沙率、含沙量、水位等水文观测资料，经水文部门整编权威发布，同时黄河下游每年通过河道大断面观测由水文部门分析计算提出河道冲淤量。本文利用这些实测资料开展研究。

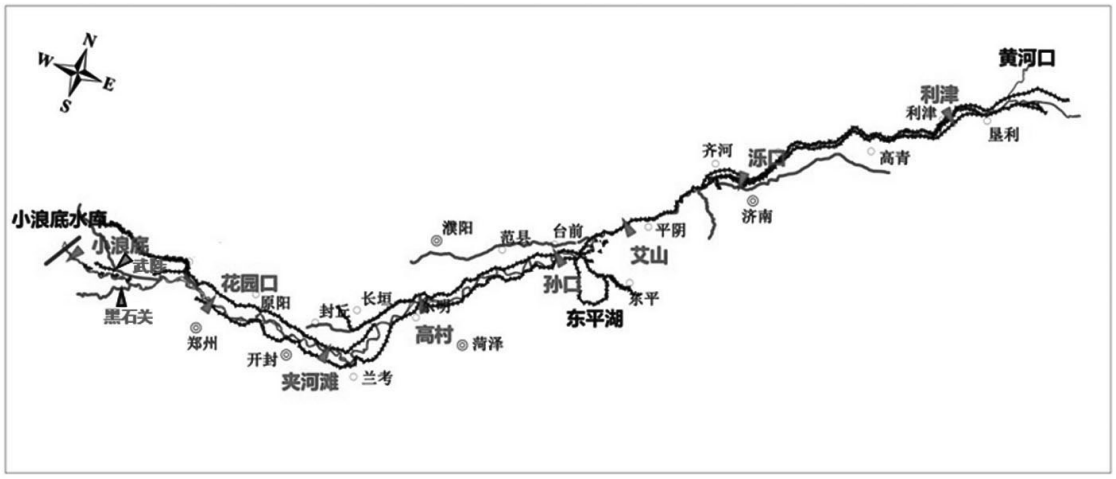


图1　黄河下游水文站分布情况

2.2　研究方法　河道平衡输沙状态也是河道冲淤平衡状态。采用实测资料分析、公式计算与数学模型模拟等多种方法开展研究。研究过程中既考虑汛期通过水沙调控实现高效输沙，也考虑生态保护和经济社会用水需求，在非汛期配置一定的水量，合理配置全年水沙过程。

2.2.1　实测资料分析　（1）河道输沙关系。黄河下游具有“多来多排，少来少排”的特点，不同的来水来沙条件输送至河口的沙量不同。利津断面可代表黄河下游出口的输沙入海量W_{slj}，与进入黄河下游的来水量W_{xhw}、来沙量W_{sxhw}具有如下响应关系：

$$W_{slj}=k_1W_{xhw}+k_2W_{sxhw}+c \tag{1}$$

式中：k_1、k_2为系数，c为常数，均可以通过实测资料回归分析得到。利用黄河下游河道1960年以来至2015年小黑武（指小浪底、黑石关、武陟三站，下同）的实测年水沙量和利津的实测年沙量，回归分析确定系数，得到关系式如下：

$$W_{slj}=0.0172W_{xhw}+0.441W_{sxhw}-3.626 \tag{2}$$

该关系式的相关系数R^2=0.976（见表1），标准误差σ=1.12，相关程度较高，用该式计算得到的利津站输沙量和实测沙量散点关系集中分布在45°线两边（见图2），1960—1986年系列小黑武实测年均水量442.9亿m^3、年均沙量11.75亿t，计算该系列利津年均沙量9.23亿t，与实测利津年均沙量9.17亿t相比，误差约1%；1987—2015年系列小黑武实测年均水量269.4亿m^3、年均沙量4.08亿t，计算该系列利津年均沙量2.84亿t，与实测利津年均沙量2.64亿t相比，误差约7%；小浪底水库运用后的1999—2015年系列小黑武实测年均水量259.9亿m^3、年均沙量0.96亿t，计算该系列利津年均沙量1.29亿t，与实测利津年均沙量1.36亿t相比，误差约5%。图表数据表明计算结果符合实际情况，计

表1　黄河下游利津沙量计算关系式回归分析参数表

系数 k_1	系数 k_2	常数 c	相关系数 R^2	标准误差 σ
0.0173	0.441	3.626	0.976	1.12

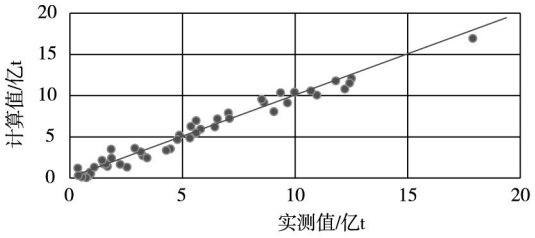


图2　利津站计算沙量与实测沙量比较

算精度较高。

根据上述公式，可以计算得到黄河下游不同来水来条件下的利津沙量。根据实测资料分析得到下游河道年均引水含沙量约为进入黄河下游年均含沙量的0.5倍，据此考虑黄河下游引水量可估算不同来水来沙条件下的引沙量。在此基础上，根据沙量平衡原理[15]，给出不同来水来沙条件下的河道冲淤量(小黑武沙量减去利津站沙量和引沙量即为冲淤量)。分析得出河道平衡输沙的沙量阈值。

(2)河道冲淤量与来沙系数的响应关系。根据黄河下游河道冲淤量与来沙系数的响应关系(见图3)，分析下游河道冲淤平衡条件下的水沙搭配。由图3可知，下游河道由淤积转为冲刷，具有明显的标示范围。来沙系数大于0.01(kg·s)/m^6，河道以淤积为主，来沙系数小于0.01(kg·s)/m^6，河道以冲刷为主。维持下游河道不冲不淤的年来沙系数在0.01(kg·s)/m^{6}左右。按此水沙搭配关系要求，可根据来水量条件估算维持下游河道不冲不淤的来沙量。

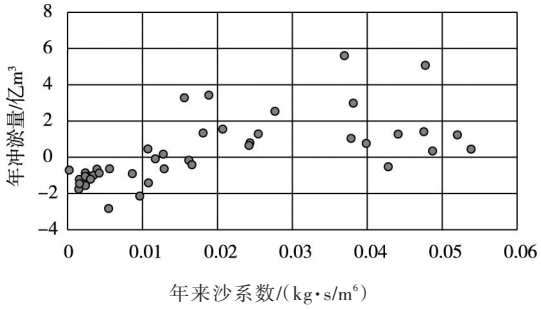


图3　下游河道冲淤量与来沙系数的响应关系

2.2.2　公式计算　在水库与河道冲淤演变的研究文献著作中，很多学者对输沙平衡比降进行了研究，陈文彪、韩琪为、姜乃森、涂启华等基于河流泥沙运动基本理论[16]，利用水流连续方程、均匀流运动方程、水流挟沙力方程等推求得到了河床输沙平衡比降公式。涂启华考虑黄河、渭河、永定河、辽河等多沙和少沙河流水库河道资料，建立的输沙平衡比降公式在黄河规划设计工作中广泛应用。

$$J_p = k\frac{Q_s^{0.5} n d_{50}}{B^{0.5} h^{1.33}} \tag{3}$$

式中：J_p 为输沙平衡比降；k 为经验系数，黄河下游可取140；Q_s 为汛期平均输沙率，t/s；d_{50} 为粒径剂法分析的河道悬移质泥沙中值粒径，mm；n 为河道糙率；B、h 为汛期平均流量 Q 相应的水面宽、水深，m，沙质河床的 $B = 38.6Q^{0.31}$，$h = 0.081Q^{0.44}$。

黄河下游河床上宽下窄、比降上陡下缓，夹河滩以上平均河床比降超过0.23‰，而艾山以下平均河床比降仅为0.1‰，不足夹河滩以上比降的一半。受其影响，下游河道输沙能力沿程减弱。从历史和未来一段时期看，下游河床比降不会发生大的变化。因此，将艾山以下河床比降作为输沙平衡比

降，根据其河道条件，利用式(3)反推维持输沙平衡条件下的沙量，公式形式如下：

$$W_s = \left(\frac{B^{0.5} h^{1.33} J_p}{knd_{50}} \right)^2 \times \Delta T \tag{4}$$

式中：W_s 为汛期沙量；ΔT 为汛期时长。

2.2.3 数学模型模拟 采用一维恒定流悬移质不平衡输沙模型。模型的基本控制方程为水流连续方程、水流运动方程、泥沙连续方程及河床变形方程。

水流连续方程：

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}X} + q_l = 0 \tag{5}$$

水流运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}X}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA\left(\frac{dZ}{dX} + J\right) + U_l q_l = 0 \tag{6}$$

泥沙连续方程(分粒径组)：

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(QS_k\right) + \gamma' \frac{\partial A dk}{\partial t} q_{sk} = 0 \tag{7}$$

河床变形方程：

$$\gamma' \frac{\partial Z_{bk}}{\partial t} = \alpha_k \omega_k \left(S_k - S_{*k}\right) \tag{8}$$

其中：Q 为流量；A 为过水断面面积；Z 为水位；J 为能坡；S 为含沙量；A_d 为断面冲淤面积；q_l 为单位流程上的侧向出(入)流量(出为正，入为负)；U_l 为侧向出(入)流流速在主流方向上的分量；q_s 为单位流程上的侧向输沙率(出为正，入为负)；γ' 为泥沙干容重；Z_b 为河床高程；α 为恢复饱和系数(根据实测资料分析率定)；ω 为沉速；S_* 为水流挟沙力；X 为流程；t 为时间；k 为粒径组编号。

水流挟沙力采用张红武公式[17-18]，对高含沙洪水适应性好，在黄河上应用广泛，计算公式如下：

$$S_* = K\left[\frac{\left(0.0022 + S_v\right)U^3}{\kappa \frac{\lambda_s - \lambda_m}{\lambda_m} gh\omega_m} \ln\left(\frac{h}{6D_{50}}\right)\right]^m \tag{9}$$

式中：λ_s、λ_m 为泥沙和浑水密度；κ 为卡门常数[18-19]；S_v 为体积含沙量；ω_m 为混合沙挟沙力的代表沉速；D_{50} 为床沙的中值粒径；K、m 分别为挟沙力系数和指数，取值 K =2.5、m=0.62。

泥沙沉速采用张瑞瑾公式：

在滞性区(泥沙粒径 $d < 0.1$mm)

$$\omega = 0.039 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{v} \tag{10}$$

在紊流区(泥沙粒径 $d > 4$mm)

$$\omega = 1.044 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gd} \tag{11}$$

在过渡区(泥沙粒径 0.1mm $< d <$ 4mm)

$$\omega = \sqrt{\left(13.95\frac{v}{d}\right)^2 + 1.09\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gd} - 13.95\frac{v}{d} \tag{12}$$

式中，黏滞系数 v 的计算公式为：

$$v = \frac{0.0179}{\left(1 + 0.0337 \times t + 0.000221 \times t^2\right) \times 10000} \tag{13}$$

式中：γ_s 为泥沙容重；γ 为浑水容重；t 为水温。

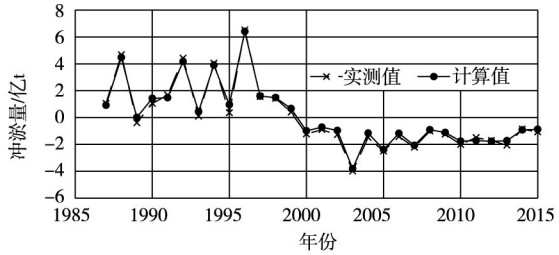


图4　数学模型计算冲淤量与实测冲淤量对比

数学模型考虑了不同含沙量对泥沙沉速及水流挟沙力的影响，能够适应黄河下游高、低含沙量水流条件下的河床冲淤变化，可进行沿程水位、沿程冲淤量、沿程各断面的流量及含沙量模拟计算。该模型在黄河规划设计研究中进行过大量应用，本文利用1987年至2015年实测资料，对模型有关参数进行了重新验证，验证后式(8)中的恢复饱和系数α取值范围为：冲刷状态下0.02～0.04，淤积状态下0.002～0.009(河道比降小、水深大的河段取值偏大，反之偏小，绝大部分河段断面取值0.005～0.009，个别断面取值最小为0.002)。验证后的模型计算下游河段冲淤量结果见图4，可以看到，模型计算冲淤量包含了淤积状态和冲刷状态两种不同情况，与实测冲淤量均能基本相符，用于模拟下游河道冲淤平衡临界状态是可信的。

3　计算与分析

3.1　计算条件　黄河下游河道冲淤与来水来沙条件密切相关，不同来水条件下游河道冲淤平衡的沙量不同。1960年代以来，进入黄河下游的径流量持续减少，年均水量由1919—1959年的476.3亿m^3减少至2000—2018年的250.5亿m^3。有关方面在径流变化原因和未来径流量预估上，做了大量研究工作，现状下垫面条件下未来进入黄河下游的水量可能在210～280亿m^3左右[20-21]。考虑黄河下游实测来水量和未来预估水量，本文研究黄河下游的水量条件采用250亿m^3。

水量过程考虑了小浪底水库等现状工程的调节作用，小浪底水库按照正常运用期考虑。设置不同来沙情景方案，采用1959—2008年共计50年系列，设计年均水量为250亿m^3，来沙情景1、2、3的年均沙量分别为2.0亿t、2.5亿t、3.0亿t，泥沙粒径参考相应年份的实测值，不同情景水沙量过程见图5和图6。可以看到，水沙量有明显的丰枯变化。以多年平均来沙2.5亿t情景为例，50年系列的最大年沙量为5.98亿t，最小年沙量为0.12亿t，设计水沙量过程能够反映黄河水沙特点[2]。

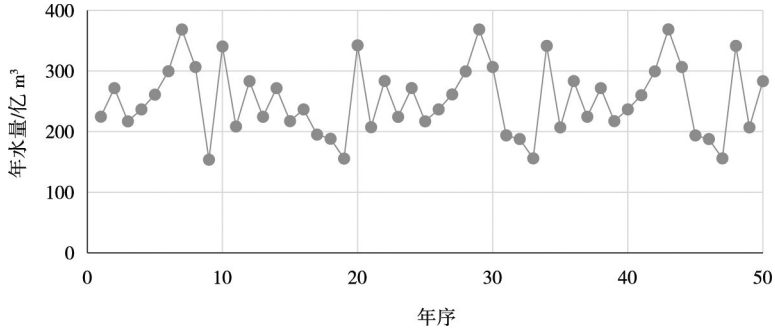


图5　进入黄河下游的设计水量过程

计算考虑黄河下游河道内外生态保护、经济社会发展用水量和过程需求，黄河下游分配引水99.86亿m^3，过程见表2。

模型计算采用的河道边界条件为2018年汛前地形。

3.2　计算结果　(1)实测资料分析结果。根据实测资料分析的河道输沙关系，计算不同来水来沙条件下河道输沙和冲淤变化，见图7。进入黄河下游的年均来水量250亿m^3，年均来沙量3亿t时，计算输

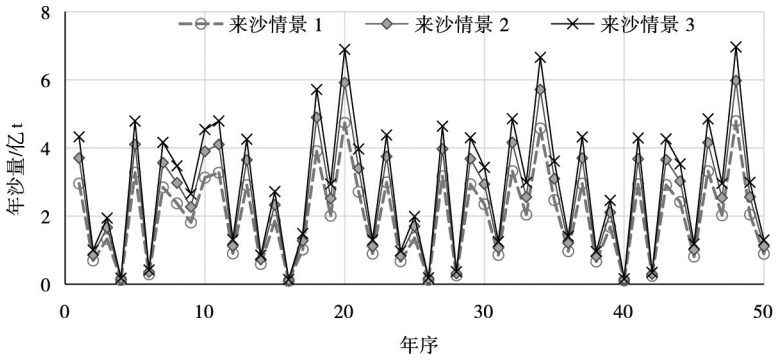


图 6　进入黄河下游的设计沙量过程

表 2　黄河下游水量年内分配情况

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
分配引水量/亿 m^3	2.38	8.23	16.54	17.49	13.62	9.49	5.51	4.04	7.55	8.54	3.49	2.99
利津生态基流/(m^3/s)	100	100	100	75	150	150	220	220	220	220	100	100

送至利津站的年均沙量为 2.02 亿 t，下游河道年均淤积 0.38 亿 t；年均来沙量 2.6 亿 t 时，计算输送至利津站的年均沙量为 1.85 亿 t，下游河道年均淤积 0.23 亿 t；年均来沙量 2.2 亿 t 时，计算输送至利津站的年均沙量为 1.67 亿 t，下游河道年均淤积 0.09 亿 t；年均来沙量 1.8 亿 t 时，计算输送至利津站的年均沙量为 1.49 亿 t，下游河道年均冲刷 0.05 亿 t。可以看到，黄河下游来水 250 亿 m^3，若进入黄河下游的来沙超过 2 亿 t，下游河道都将发生轻微淤积，该来水条件下维持黄河下游冲淤平衡的沙量约 2 亿 t。

除此之外，根据下游河道冲淤量与来沙系数的响应关系，维持黄河下游冲淤平衡的年来沙系数为 0.01(kg·s)/m^6。以黄河下游年均来水量 250 亿 m^3、来沙系数 0.01(kg·s)/m^6 搭配沙量，推算得到维持下游河道冲淤平衡的来沙量为 2.0 亿 t。

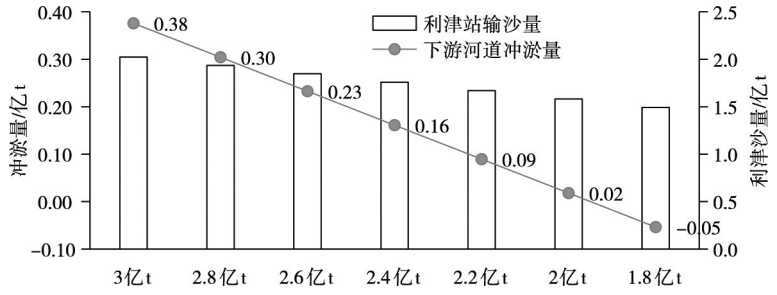


图 7　不同来沙情景下游河道输沙与冲淤情况

(2)公式计算结果。进入黄河下游年均来水量 250 亿 m^3，考虑黄河下游引水指标分配情况和实际耗水情况，分析艾山断面年平均水量约 190 亿 m^3，其中汛期水量 95 亿 m^3 左右，平均流量 894 m^3/s。参考实测资料，艾山至利津河段的河槽糙率取 0.014，悬移质泥沙中数粒径取 0.018 mm(按粒径剂法折算为 0.031 mm)，平均河床比降取 0.1‰，依据输沙平衡公式反算艾山断面汛期沙量为 1.7 亿 t（见表 3)，考虑 2000 年以来河段非汛期来沙量 0.3 ~ 0.5 亿 t，则得到艾山至利津河段平衡输沙的沙量为 2.0 ~ 2.2 亿 t。

表 3　黄河下游艾山汛期沙量公式计算结果

W/亿 m^3	Q /(m^3/s)	B /m	h /m	j	k	n	d_{50} /mm	Q_s /(t/s)	W_s /亿 t
250	894	317.3	1.6	0.0001	140	0.014	0.031	16.0	1.7

(3)数学模型模拟计算结果。根据一维恒定流悬移质不平衡输沙模型，对不同来沙情景条件下的下游河道冲淤变化进行计算，不同来沙情景下游河道累计淤积量过程见图 8。由图可知，小浪底水库

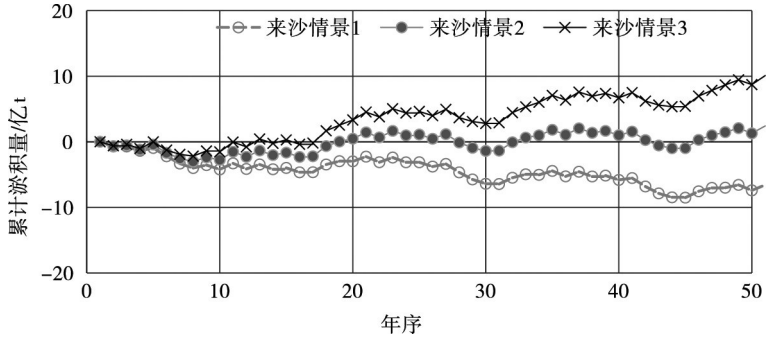


图8　黄河下游不同来沙情景下游河道冲淤过程

正常运用期，黄河来水250亿m^3，来沙情景1年均沙量2.0亿t，下游河道总体呈冲刷下切趋势，50年末累计冲刷量为7.4亿t；来沙情景3年均沙量3.0亿t，下游河道总体呈淤积抬升趋势，50年末累计淤积量为8.7亿t；来沙情景2年均沙量2.5亿t，下游河道冲淤交替变化，基本维持平衡。

(4)分析与讨论。综上结果表明，黄河下游来水250亿m^3时，实测资料分析得到黄河下游平衡输沙的沙量为2.0亿t左右，公式计算得到的平衡输沙的沙量为2.0～2.2亿t。实测资料分析方法按年为时段进行计算，公式计算方法按汛期、非汛期计算，未能充分反映小浪底水库等现状工程的调水调沙作用。计算结果可代表未来较小的平衡输沙阈值。

数学模型模拟按日计算，考虑了小浪底水库等现状工程的调节作用，相比按年或按汛期、非汛期计算，有水库调节作用塑造更利于下游河道输沙的水沙过程，计算得到的平衡沙量阈值为2.5亿t左右，大于实测资料分析和公式计算结果。

古贤水库位于黄河中游北干流河段，壶口瀑布上游约10.1 km处。水库总库容129.42亿m^3，调水调沙库容20.10亿m^3，建成后和小浪底水库联合调节，可以进一步提高汛期的输沙效率，平衡输沙的沙量阈值可进一步提高[22]。

4　结论

(1)黄河水资源短缺，水量配置既要考虑汛期通过水沙调控实现高效输沙，也要考虑生态保护和经济社会用水需求，在非汛期配置一定的水量，合理配置全年水沙过程。平衡输沙的沙量不能全部按高效输沙考虑。

(2)利用黄河下游实测水沙与河道冲淤资料，研究了下游河道输沙关系、冲淤与来沙系数的响应关系，计算了黄河下游不同来水来沙条件下的河道沙量和冲淤量，得出黄河下游来水250亿m^3时，下游平衡输沙的沙量阈值为2.0亿t；考虑黄河下游河床比降变化和输沙能力变化，利用输沙平衡公式计算下游艾山至利津河段输沙平衡条件下的沙量阈值为2.0～2.2亿t，可代表未来较小的平衡输沙阈值。

(3)按照黄河来水量250亿m^3，设计黄河下游50年系列不同的来沙情景，利用一维恒定流悬移质不平衡输沙模型计算了黄河来沙2.0亿t、2.5亿t、3.0亿t三个情景的河道冲淤变化，计算结果表明，在小浪底水库调节作用下，黄河来沙2.5亿t情景下游河道冲淤交替变化，基本能够维持平衡。

参　考　文　献：

[1]　胡一三．中国江河防洪丛书——黄河卷[M]．北京：中国水利水电出版社，1996．
[2]　黄河水利委员会．黄河流域综合规划[R]．郑州：黄河水利委员会，2013．
[3]　李文文，傅旭东，吴文强，等．黄河下游水沙突变特征分析[J]．水力发电学报，2014，33(1)：108-113．
[4]　胡春宏．黄河水沙变化与下游河道改造[J]．水利水电技术，2015，46(6)：10-15．

[5] 张敏，黄河清，张晓华.黄河下游漫滩洪水冲淤规律[J]. 水科学进展，2016，27(2)：165-175.
[6] 李远发，朱彩萍，朱超，等.大洪水时黄河下游河道冲淤规律[J]. 人民黄河，2010，32(12)：35-37.
[7] 刘继祥，郜国明，曾芹，等.黄河下游河道冲淤特性研究[J]. 人民黄河，2000，22(8)：11-12.
[8] 张艳艳，吴保生，傅旭东. 黄河下游河道场次洪水输沙特性分析[J]. 水力发电学报，2012，31(3)：70-76.
[9] 岳德军，侯素珍，赵业安，等. 黄河下游输沙水量研究[J]. 人民黄河，1996(8)：32-33.
[10] 严军，胡春宏. 黄河下游河道输沙水量的计算方法及应用[J]. 泥沙研究，2004(4)：25-32.
[11] 刘小勇，李天宏，赵业安，等. 黄河下游河道输沙用水量研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2002，10(3)：253-262.
[12] 梁志勇，刘继祥，张厚军，等.黄河洪水输沙与冲淤阈值研究[M]. 郑州：黄河水利出版社，2004.
[13] 姚文艺，郜国明.黄河下游洪水冲淤相对平衡的分组含沙量阈值探讨[J]. 水科学进展，2008，19(4)：467-474.
[14] 张世杰.黄河下游冲淤平衡的临界输沙量研究[J]. 水资源研究，2017，6(4)：401-406.
[15] 安催花，鲁俊，钱裕，等. 黄河宁蒙河段冲淤时空分布特征与淤积原因[J]. 水利学报，2017，48(2)：195-215.
[16] 涂启华，杨赉斐. 泥沙设计手册[M]. 北京：中国水利出版社，2006年.
[17] 张红武，张耀先. 黄河泥沙科学的新进展[J]. 黄河水利职业技术学院学报，1999(3)：1-6.
[18] 张红武，张清. 黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河，1992(11)：7-9
[19] 柳小珊，卢金友，廖小永，等.卡门常数研究现状及存在的问题[J]. 长江科学院院报，2014(6)：1-6.
[20] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M]. 北京：科学出版社，2016.
[21] 王煜，彭少明，武见，等. 黄河“八七”分水方案实施30 a回顾与展望[J]. 人民黄河，2019，41(9)：6-19.
[22] LUO Qiushi，WU Moxi，WAN Zhanwei，et al. Research on Synergistic Evolution Between the River Channel and Floodplain in the Lower Yellow River[C]//E-proceedings of the 37th IAHR World Congress，2017.

The threshold value of equilibrium sediment transport in the Lower Yellow River

AN Cuihua，LU Jun，WU Moxi，LIANG Yanjie，LUO Qiushi
(*Yellow River Engineering Consulting Co.，Ltd.，Zhengzhou* 450003，*China*)

Abstract：Considering the possible water resource conditions of the Yellow River in the future，and the annual demand of water distribution process for multi-objective of ecological protection and social-economic development，the sediment threshold of equilibrium transportation in favor of maintaining the river ecology in the lower Yellow River was studied by means of the analysis of measured data，formula calculation and mathematical model simulation on the basis of the water and sediment data and river erosion data in the lower Yellow River. About 25 billion m^3 of water will enter the lower Yellow River annually，and the threshold value of equilibrium sediment transport calculated by the measured data analysis and theoretical formula is 200-220 million tons，and the critical value of equilibrium sediment transport calculated by mathematical model is 250 million tons under the combined regulate and control of Xiaolangdi Reservoir and other existing engineering conditions. After the completion of Guxian reservoir and Xiaolangdi Reservoir in the middle Yellow River，the sediment transport efficiency can be further improved，and the threshold value of equilibrium sediment transport can be further increased. The research results are of great significance to the regulation of the lower Yellow River and can provide technical support for the optimization of sediment disposal measures of the Yellow River.

Keywords：The Lower Yellow River；equilibrium of sediment transport；threshold of sediment；river ecology；mathematical model

(责任编辑：李福田)