

文章编号:0559-9350(2020)09-1165-10

黄河下游高村-陶城铺河段边界阻力能耗与河床稳定性分析

白玉川¹, 李岩¹, 张金良², 白洋¹, 冀自清¹

(1. 天津大学 河流海岸工程泥沙研究所, 天津 300072; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 从河床边界阻力能耗角度研究河床形态调整规律, 引入河床稳定性指标, 探讨与边界阻力能耗率的相关性。以黄河下游高村至陶城铺河段为研究区域, 采用实测资料、理论解析与数值模拟相结合方法, 基于不同年份河道地形, 计算出不同流量条件下的水力要素与边界阻力能耗率, 分析河床形态调整过程及边界阻力能耗率响应, 讨论了边界阻力能耗率与河床稳定性关系。结果表明: 边界阻力能耗率沿程均值和波动强度随着流量增大而增大; 阻力能耗率随着过水面积或宽深比呈先减小后增大趋势, 且与河床稳定指标呈正相关关系, 但能耗率趋近最小值时, 河床也可能发生下限失稳。通过优化河床断面形态, 维持河床稳定情况下寻求边界阻力能耗率最小, 能够提高河槽的输水输沙能力。

关键词: 黄河下游; 边界阻力能耗; 数值模拟; 河床稳定性

中图分类号: TV143

文献标志码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20200305

1 研究背景

河流是一个具有自我调整的动态系统, 不同时期不同空间所展现的形态(蜿蜒、游荡或顺直)是河流本身为了适应周边环境变化进行的多方面调整。河流行进过程伴随能量和物质的输入与输出, 不断地进行能量传递与转换, 沿程调整河床形态因子、水力因子、泥沙因子等, 调整过程中能量耗散保持最小的趋向性^[1]。

运用能量耗散理论研究河流工程泥沙问题成为水利工程领域一个热门研究方向, 早期杨志达^[2-3]提出的河流最小能耗率和张海燕^[4-5]的最小河流功, 认为河流处于平衡态时河流能耗率或河流功将达到最小, 并用以预测冲积河流在平衡状态下的断面形态。后来众多学者运用能耗理论从河流能量损失、挟沙水流能量转换、河型演化等方面进行较为深入的研究。庞炳东^[6]用流体力学的动能方程解释了主槽内能量损失的物理原因, 描述了滩槽间动量交换的物理图形, 并分析洪水漫滩对流场能量重分布的影响; 舒安平^[7]基于两相挟沙水流紊动能平衡方程, 推导出紊动能转化率及泥沙悬浮效率系数, 探讨了紊动能转化率、泥沙悬浮效率系数和泥沙悬浮功等随含沙浓度的变化规律。陈绪坚等^[8]提出了保持冲积河流稳定的最小能耗率原理和公式, 建立河道输水输沙优化数学模型; 徐国宾等^[9-10]则基于广义流和广义力推导出河流能耗率, 并用于研究黄河下游河型变化与河道演变问题; 孙东坡等^[11]运用能量耗散关系对黄河内蒙段河床形态调整进行了系统地分析。本文第一作者从河流阻力方面研究了河床底沙运动, 并基于河流阻力能耗与河流形态的辩证关系, 引入河流形态参数, 给出河流阻力参数与活动指标的河型判别法^[12-14]。

本文基于以往的研究基础, 从河流阻力角度出发, 获得边界阻力能耗率公式; 根据实测资料数据分析高村-陶城铺河段断面形态、深泓摆动以及沿程纵比降等变化特征; 基于不同年份的河道地

收稿日期: 2020-05-04; 网络首发时间: 2020-09-02

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200901.1436.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979185, 51879182)

作者简介: 白玉川(1967-), 教授, 主要从事河流工程泥沙研究。E-mail: ychbai@tju.edu.cn

通讯作者: 张金良(1963-), 教授级高级工程师, 主要从事河流工程泥沙研究。E-mail: jlzhangyrec@126.com

形, 采用一维水动力数学模型计算出沿程各断面水面宽、水深、比降等水力要素值, 计算不同年份河道的边界阻力能耗率, 引入河床稳定性指标, 探究阻力能耗率与河床断面形态、河床稳定性相关关系。

1 研究河段概括与研究方法

1.1 河段概括 黄河下游河道从河南省孟津县进入平原, 于山东省垦利县注入渤海, 长约 900 km, 河道平面形态上宽下窄(最宽处达 24 km, 最窄处 275 m), 沿程比降上陡下缓, 排洪能力上大下小(花园口 22 000 m³/s, 孙口 17 500 m³/s, 艾山 11 000 m³/s)。黄河下游孟津白鹤-高村为游荡性河段, 高村-陶城铺为过渡性河段, 陶城铺-利津为弯曲性河段, 利津以下为河口段。本文研究范围为高村-陶城铺河段(图 1), 长约 154 km, 河道比降 0.118‰, 弯曲系数 1.26(弯曲系数是流路实际长度与起止点直线距离的比值), 过渡性河段同时包括游荡性河段和弯曲性河段的特性。

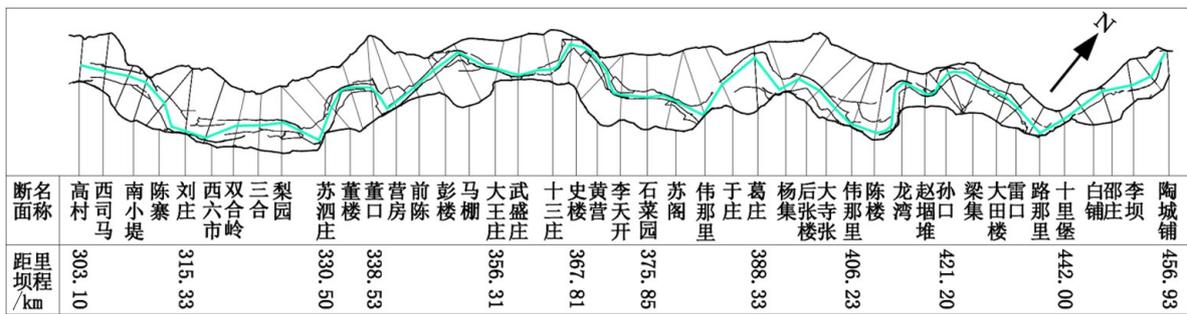


图 1 黄河下游高村-陶城铺河段形态

本次主要采用 2005 年和 2016 年汛前河道地形及汛期水位、流量资料, 由于该河段只有高村、孙口两处测站水位、流量数据, 资料较少, 故借助一维水动力数学模型, 计算出高村-陶城铺河段各断面的水深、水面宽、过水断面面积、比降、流速等数据, 分析流量分别为 1000、2000、3000 和 4000 m³/s 条件下高村-陶城铺河段的边界阻力能耗率变化情况以及与断面形态、河床稳定性之间关系。

1.2 边界阻力能耗率 河流行进过程需克服边界阻力耗能, 为适应周边外界环境变化不断调整自身形态以实现能耗转换与传递。在冲积河流系统中能量是一个转换耗散的过程, 存在不同形式的能量耗散^[15], 其中克服阻力耗能是能量耗散的主要来源。河流在行进过程中会受到不同形式的阻力, 包括床面阻力、水面空气阻力、河道形态阻力等, 这些阻力又统称为河流边界阻力, 水流克服摩擦阻力而消耗能量即为边界阻力耗能。

在给定条件下, 通过对剪切应力与流速梯度乘积进行积分可以获得能量耗散率 P 。在忽略张力对河床、河岸或水面的线性变形后, 考虑流体是不可压缩且无旋情况, 能量耗散率的形式可表示为^[16]:

$$P = \int_{\forall} \left[\tau_{xz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + \tau_{xy} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right] d\forall \quad (1)$$

本研究假设流体为一维流情况(即 $v_y = v_z = 0$), 且忽略二次环流引起的横向剪切应力变化, 即 $\tau_{zy} = 0$,

则式(1)可以化简为:

$$P = \int_{\forall} \left(\tau_{zx} \frac{\partial v_x}{\partial z} + \tau_{yx} \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) d\forall \quad (2)$$

式中: τ_{zx} 为垂向剪切应力, 其中水面剪切应力 $\tau_w = 0$, $\tau_{zx} = \tau_b$; 对于宽浅河流, 忽略河岸剪切应力 τ_{yx} 的影响, 式(2)化简为:

$$P_b = L\chi\tau_b \int_0^h \frac{\partial v_x}{\partial z} dz = L\chi\tau_b u \quad (3)$$

式中： L 为河段长度； χ 为河床湿周； u 为明渠水流垂线平均速度 \bar{u} 。

对明渠均匀流来说，河床边界剪切应力公式可写成：

$$\tau_b = \rho u_*^2 = \frac{1}{8} \lambda \rho u^2 \quad (4)$$

式中， λ 为阻力系数，可用谢才系数 C 来表示，即 $\lambda = \frac{8g}{C^2}$ ，代入上式(4)得：

$$\tau_b = \rho g \left(\frac{u}{C} \right)^2 \quad (5)$$

式(5)代入式(3)整理后，得到单位河段边界阻力能耗率：

$$P_b = \rho \frac{gQ^2}{C^2 AR} \cdot \frac{Q}{A} \quad (6)$$

式(6)为考虑了河流综合阻力的能耗率公式，其中 C 为谢才系数， $C = R^{1/6}/n$ ，也为综合阻力系数； ρ 为密度； g 为重力加速度； Q 为流量； R 为水力半径； A 为过水断面面积。

1.3 一维水动力数学模型的验证 利用一维水动力模型模拟高村至陶城铺河段的水流，其基本方程包括连续方程和运动方程。基于2005年和2016年黄河下游汛前地形和汛期实测水位、流量资料，以汛期(6月15日—10月15日)高村站流量作为入口条件，艾山站水位作为出口条件。其中模型采用的糙率为 $n = au^b$ ，其中 a 为系数， b 为指数，而 a 值参考 $a = R^{2/3} J^{1/2}$ 选取， J 为比降。根据程进豪等^[17]对黄河山东段河床糙率分析结果得到，糙率呈带状分布，黄河下游河道各站不同时期糙率随流量变化的总趋势是相同的，当流量很小时，糙率值较大，且随着流量增大，糙率逐渐减小。

选取孙口站水位资料作为验证条件，验证结果如图2所示，其中圆圈是实测值，实线为计算值，通过对比发现计算值与实测值最大误差不超过0.1 m，验证效果整体较好，可以支撑后续方案模拟。

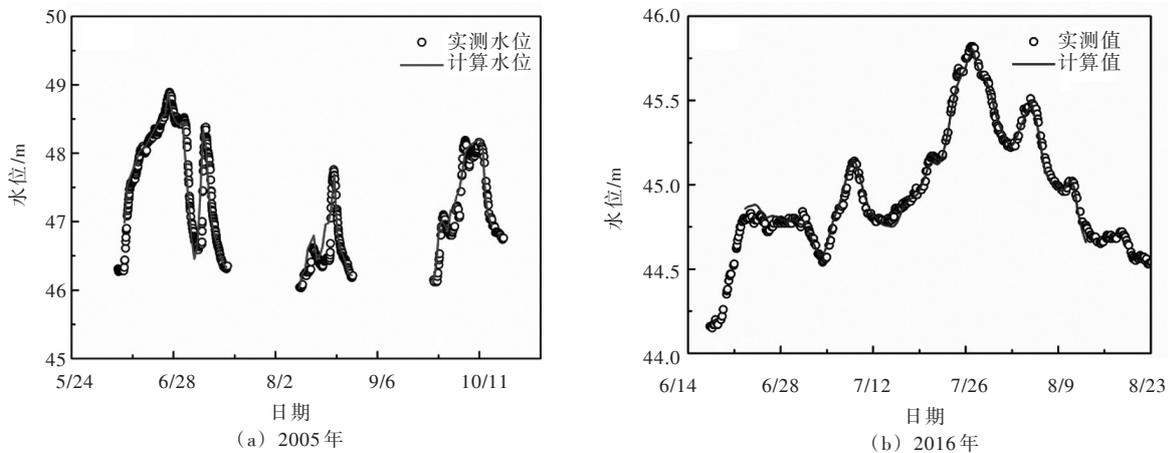


图2 黄河下游孙口站水位验证

2 河床形态调整过程及边界阻力能耗率响应关系

2.1 河床形态调整分析 河床形态可分为横断面形态、纵剖面形态和平面形态，横断面形态量化方法有槽宽、槽深、断面面积、湿周及宽深比等，纵剖面表现形式主要体现在沿程河床比降的变化，而平面形态的量化方式有弯曲系数、曲率半径、弯距、摆幅等^[18]。黄河下游为典型的复式断面河道，横断面形态复杂，其中滩地宽阔具有滞洪沉沙的功能，主槽区域是输水输沙的主要通道。本次我们主要从河槽深泓的平面摆动、横断面变化及沿程纵向比降三个方面来探讨河床形态调整规律。

河床平面活动性与河流能量的沿程分配有关，主要通过弯曲系数、深泓点摆幅及断面形态等方

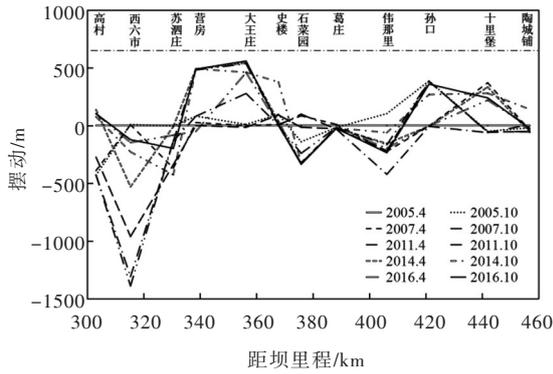


图3 以2005年汛前地形为基准深泓左右摆动情况

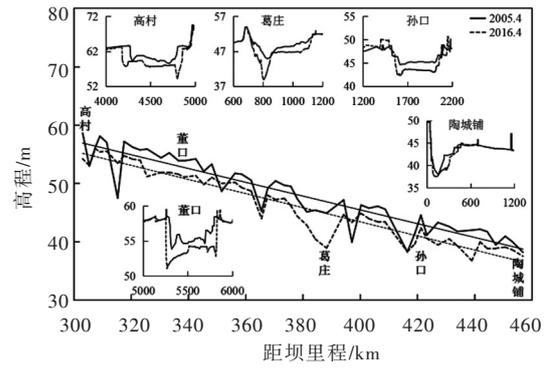


图4 高村-陶城铺河段沿程比降及部分主槽断面形态

面来体现能量的沿程耗散特性^[11]。这里以2005年汛前深泓为基准，根据实测数据资料统计了高村-陶城铺河段从2005到2016年实测断面深泓点摆动情况，如图3所示(向左摆动为负值，向右摆动为正值)。从不同时期的对比情况可以看出，不同年份河床横向摆动幅度差别较大，其中高村断面深泓的平均摆动幅度可达263 m，孙口断面为200 m，而陶城铺断面仅为46 m。深泓的摆动幅度受汛期来水来沙影响较大，汛期冲淤量越大，深泓的摆动幅度也越大。随着河流向下游推进，其平面摆动幅度是呈减小趋势，河床断面对水流的束缚力增强，河床抗冲刷性也得到显著提高。

水沙条件的变化不仅影响河道深泓的摆动，同时也对横断面形态有着重要作用。黄河下游河床冲刷时主槽横断面形态的调整取决于河道特性、河段位置，既有可能出现断面展宽，又有可能出现断面趋于窄深^[19]。小浪底水库运用以来，由于低含沙水流的长期下泄，黄河下游河道多年冲刷下切导致河床不断粗化，冲刷强度减弱，河道展宽逐渐明显，其中高村、董口和孙口断面处在相对顺直的河道(图1)，同时存在下切冲深和展宽侵蚀(图4)，河槽形态更趋近梯形断面；而葛庄和陶城铺断面处在弯道的顶点位置，主要以下切冲深为主，两侧侵蚀较少，主槽断面形态偏向“V”型发展。

河床纵向形态可以用河床比降和凹度两个指标来表示^[20]，其中河床比降是一个河段的落差与水平距离的比值，而凹度就是河流纵剖面向下凹的程度。小浪底水库运行后，黄河下游河道出现持续冲刷趋势，河床在冲刷过程，沿程比降变化不大。图4为高村-陶城铺河段汛前河床纵比降沿程变化，2005年的河床平均比降为0.118‰，2016年为0.12‰，这两年河床深泓线凹度值也均接近1，尽管局部河床冲淤调整较大，但凹度值变化不大，表明河床纵剖面在冲刷过程中，以近似于平行下切方式调整，2016年汛前河床高程平均比2005年汛前低约0.92 m。

2.2 边界阻力能耗率响应

2.2.1 沿程水面宽、水深变化

主槽是输水输沙的主要区域，主槽的宽度与深度是体现河道断面形态的主要因子，分析这些断面形态要素的时空变化，可以追溯出不同时期河道地形对边界阻力能耗分布调整的影响。基于一维水动力数学模型，计算出不同流量条件下高村-陶城铺河段各断面的水面宽与水深，分析流量从1000~4000 m³/s变化时沿程水面宽和平均水深的变化趋势。2005年河道地形情况，平均水深从2.53 m增大到4.02 m，增幅58.88%；水面宽从397 m增大到477 m，增幅20.18%。2016年河道地形情况，平均水深从2.32 m增大到4.30 m，增幅85.28%；平均水面宽从504 m增大到601 m，增幅19.17%。综上所述，随流量增大，水深变化幅度明显大于水面宽，水深对洪水响应的灵敏度要大于水面宽。

图5和图6分别流量为4000 m³/s条件下水面宽 B 与水深 h 沿程分布， B 和 h 沿程呈上下起伏变化，为了更好的分析 B 和 h 沿程变化情况，我们采用均方根来判断沿程波动强度：

$$\sigma = \sqrt{(X - \bar{X})^2} \quad (7)$$

式中： σ 为均方根，表示波动强度； X 为沿程水面宽 B 或水深 h 变化值， \bar{X} 为水面宽 B 或水深 h 的沿程平均值。根据式(7)计算出不同流量条件下水面宽 B 和水深 h 的波动强度，如表1所列。

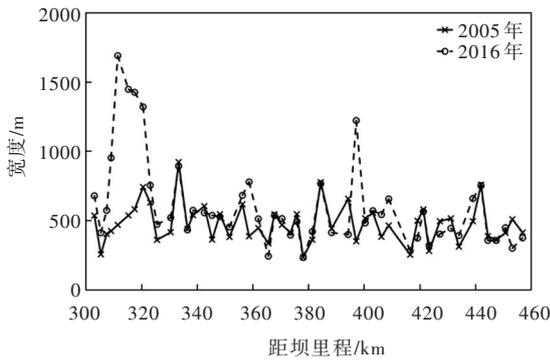


图5 不同时期河宽沿程变化 (流量为4000m³/s)

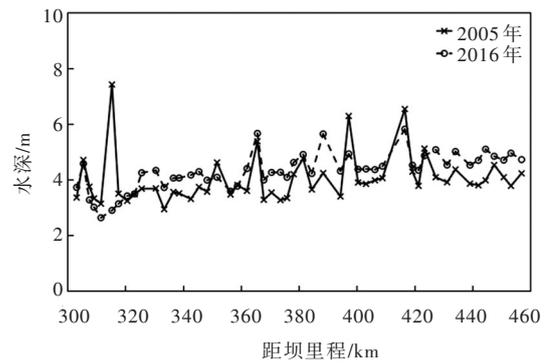


图6 不同时期水深沿程变化 (流量为4000m³/s)

表1 高村-陶城铺河段水面宽、水深沿程均值及波动强度

流量 Q $/(m^3/s)$	2005年				2016年			
	水面宽 B/m	σ_B	水深 h/m	σ_h	水面宽 B/m	σ_B	水深 h/m	σ_h
1000	397	111	2.53	1.19	504	202	2.32	0.56
2000	417	129	3.02	1.04	549	248	3.05	0.57
3000	442	134	3.56	0.93	582	294	3.71	0.62
4000	477	139	4.02	0.86	601	317	4.30	0.67

由表1数据可知,在2005年地形条件下,流量从1000增至4000 m³/s时水深沿程波动强度 σ_h 呈减小趋势,减小幅度为28%,而水面宽沿程波动强度 σ_B 呈逐渐增大趋势,增大幅度约25%。2016年地形条件下 σ_h 随流量增加变化范围较小,基本上维持在0.6左右,但是 σ_B 随着流量增加,其增幅高达57%,沿程波动变得强烈。水面宽和水深沿程起伏波动正是边界阻力能耗沿程分配的特性,波动强度越小,说明河道断面形态沿程变化不大,河道趋近相对平衡状态。

2.2.2 沿程边界阻力能耗率 利用一维水动力数学模型计算不同河道地形于不同流量(分别为1000、2000、3000和4000 m³/s)条件下的过水断面、水力半径、比降和平均流速等水力要素,并根据式(6)计算相应的边界阻力能耗率,图7(a)(b)分别为2005年和2016年高村至陶城铺河段的边界阻力能耗率沿程变化情况。

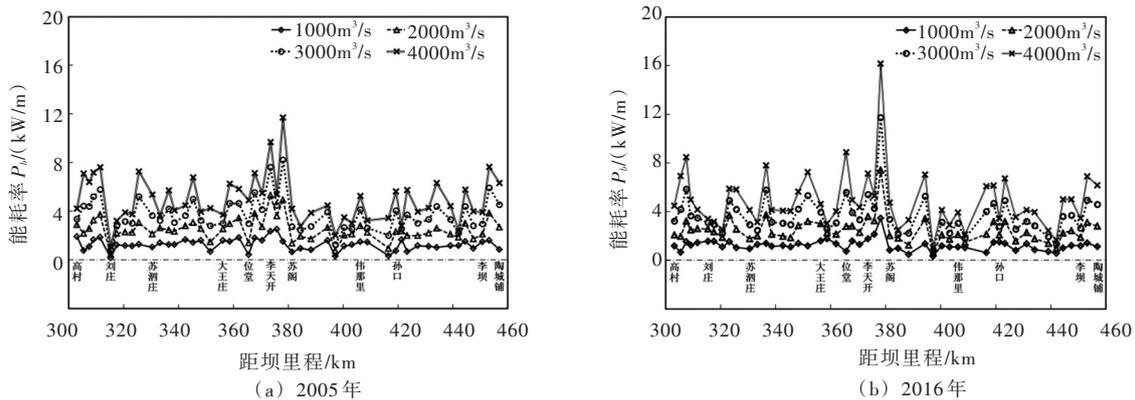


图7 高村-陶城铺河段沿程边界阻力能耗率变化

计算结果表明,随着流量的增大,边界阻力能耗率也随之增加,当流量为1000 m³/s时,单位长度边界阻力能耗率 P_b (以下简称 P_b 或阻力能耗率)沿程波动幅度较小,2005年沿程均值 \bar{P}_b 为1.26 kW/m,2016年 \bar{P}_b 为1.25 kW/m;流量为2000 m³/s时, P_b 沿程波动幅度有所增大,2005年 \bar{P}_b 为2.50 kW/m,2016年 \bar{P}_b 为2.46 kW/m。当流量进一步增大到3000 m³/s乃至4000 m³/s时,河槽水流与边界接触面积逐渐增大, P_b 波动幅度明显增大,3000 m³/s流量时,2005年 \bar{P}_b 为3.73 kW/m,2016年 \bar{P}_b 为3.67 kW/m;

表2 不同河段边界阻力能耗率均值与波动强度 (4000m³/s)

河段	2005年		2016年	
	$\overline{P_b}$ /(kW/m)	σ_p	$\overline{P_b}$ /(kW/m)	σ_p
高村-刘庄	5.61	2.29	5.41	1.75
西六市-位堂	4.82	1.20	4.89	1.79
史楼-苏阁	7.27	2.63	7.11	4.15
于庄(二)-孙口	3.64	1.05	3.88	1.77
影唐-陶城铺	4.99	1.42	4.46	1.61

流量为4000 m³/s时, 2005年 $\overline{P_b}$ 为4.99 kW/m, 2016年 $\overline{P_b}$ 为4.90 kW/m。综上所述, 在相同流量条件下, 2016年 $\overline{P_b}$ 比2005年略小, 但是相差不大, 说明高村-陶城铺河段的河槽形态经过长达十余年的冲刷调整, 除了河床纵比降近似平行下切或少数断面发生较大的形态调整外, 其它断面几何形态并没有发生太大的改变, 2016年的河道断面形态整体上与2005年比较相似。

采用均方根 $\sigma_p = \sqrt{(P_b - \overline{P_b})^2}$ 来表示边界阻力能耗率沿程波动强度, 均方根值越大, 则边界阻力能耗率波动越大, 河道越远离相对平衡态, 反之趋向相对平衡态。4000 m³/s级流量是小浪底水库调水调沙的控制性流量, 也是黄河下游高效输沙流量和平滩流量, 本次对这一级流量进行重点分析。

同一河道不同河段 P_b 差距较大, 有的河段 P_b 很大, 超过16 kW/m, 如徐码头(二)断面; 有的河段 P_b 很小, 小到1.03 kW/m, 如石菜园断面。本次把高村-陶城铺河段按照 P_b 沿程变化规律, 分为若干个河段进行详细讨论(表2), 并绘制成图8, 能够清晰直观对比不同河段的均值和波动强度。

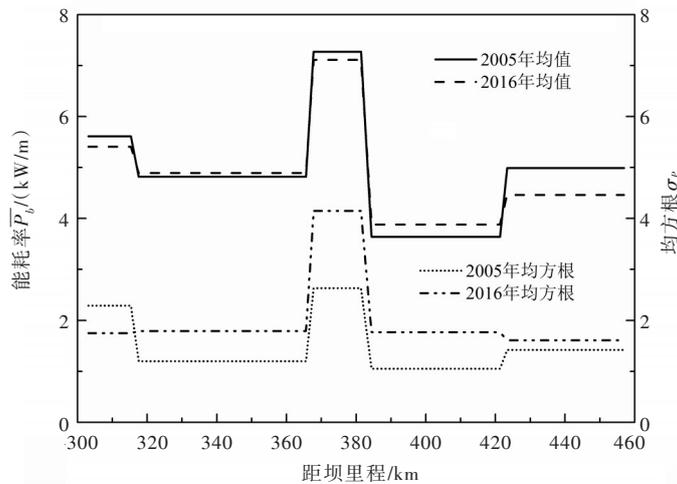


图8 流量为4000m³/s边界阻力能耗率均值与波动强度

从表2和图8可知, 2005年 $\overline{P_b}$ 和 σ_p 最小的河段为于庄(二)-孙口河段, $\overline{P_b}$ =3.64 kW/m, σ_p =1.05; 2016年 $\overline{P_b}$ 和 σ_p 最小的河段也是于庄(二)-孙口河段, 其值分别为3.88 kW/m和1.77, 说明该河段断面形态沿程变化不大, 断面稳定性要高于其它河段。史楼-苏阁之间河段的 P_b 波动最大, 该河段的河槽断面形态沿程调整比较剧烈, 从而使得 P_b 波动幅度远超其他河段。另外, 不同年份河道地形计算的 $\overline{P_b}$ 相差不大(如图8), 但2016年 σ_p 值除了高村-刘庄河段外, 其它河段的 σ_p 均高于2005年, 表明2016年河床断面形态沿程调整强度要高于2005年, 不利于维持河槽的稳定。

3 边界阻力能耗率与断面形态、河床稳定性关系

3.1 边界阻力能耗率与断面形态关系 水流对河床的塑造是边界阻力能耗长期累积的过程, 与河道

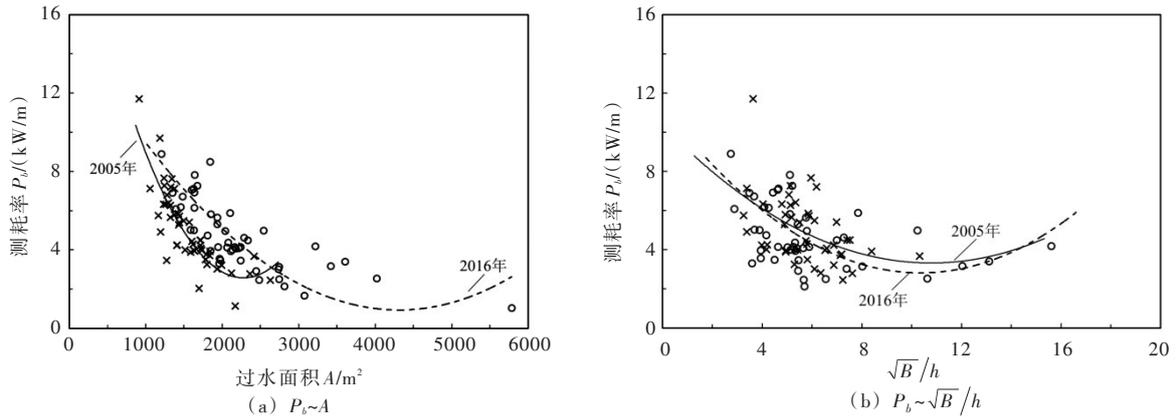


图9 边界阻力能耗率与过水面积、断面形态关系 (4000m³/s)

断面形态密切相关。河槽过水断面面积 A 、宽深比 \sqrt{B}/h 等形态变量能够反映河道过流能力与断面形态调整趋势，通过分析边界阻力能耗率 P_b 与 A 、 \sqrt{B}/h 之间的相关关系(图9(a)(b))，可以追溯河床形态调整的规律。在4000 m³/s流量条件下， P_b 首先随着河槽过水面积 A 或宽深比 \sqrt{B}/h 的增加而减小，达到约束条件下的最小值后随 A 或 \sqrt{B}/h 的增大呈逐渐增大趋势。从图9(a)可以看出，不同年份的河道地形导致阻力能耗率达到最小值时的过水面积也不一样，2005年 $P_{b\min}=2.6$ kW/m时， A 约为2300 m²，而2016年 $P_{b\min}=1.226$ kW/m时对应的 A 约为4200 m²。从图9(b)阻力能耗率 P_b 与宽深比 \sqrt{B}/h 的关系可以看出，4000 m³/s流量条件下高村-陶城铺河段的宽深比大多集中在4~8范围内，2005年河道 \sqrt{B}/h 约为11时， P_b 趋向最小，而2016年河道 \sqrt{B}/h 约等于10时， P_b 才趋向最小。

上述关系表明，阻力能耗率与断面形态变量之间的关系并不是简单的增减关系，而是呈非线性变化。河道形态变量的调整通常相互作用，相互影响，使得阻力能耗与河槽形态之间关系变得复杂，不同河道断面形态，边界阻力能耗率达到的最小值也不一样。当河道断面形态发生改变，边界阻力能耗也作出相应的调整，反过来又影响断面形态的调整进程，从而导致能耗率最小值很难达到，但是经过不断调整河道断面形态，会逐渐趋向外界约束条件下的最小值。

3.2 边界阻力能耗率与河床稳定性关系 冲积河流具有自动调节作用，在一定时段内，流域来水来沙条件和边岸抗冲稳定不变，则河流响应这些条件调整自身空间形态，使河宽、水深、比降及弯道形态等维持一个相应的稳定值，此时称河流处于平衡状态^[21]。但是，在天然河流中绝对的、静止的平衡是不存在的，往往是以相对平衡(也称动态平衡)的方式存在(图10(a))。

冲积河流的河床是由松散泥沙颗粒所组成，一定条件下会发生冲淤变化，在一定时间间隔，如果所取河段比较长，各地的冲淤变化就可能相互抵消，该河段处于相对平衡状态^[22]。某一长河段处于相对平衡状态，局部河床会受到不同程度的扰动，围绕一个平均值不断波动，如果扰动幅度在一定范围内且随时间推进逐渐变小，则该河床处于稳定状态；如果扰动幅度随时间延长逐渐增大，超过了稳定界限，则认为该河床处于不稳定状态(图10(b))。

通过前面计算分析可知，河床边界阻力能耗率围绕均值上下波动(图7)，在一定条件下处于相对平衡状态，波动幅度愈小愈趋近平衡状态。当河流处于相对平衡状态，局部河床可能是不稳定的。对于既定的来水来沙和不同形态的断面，河床亦具有不同的稳定

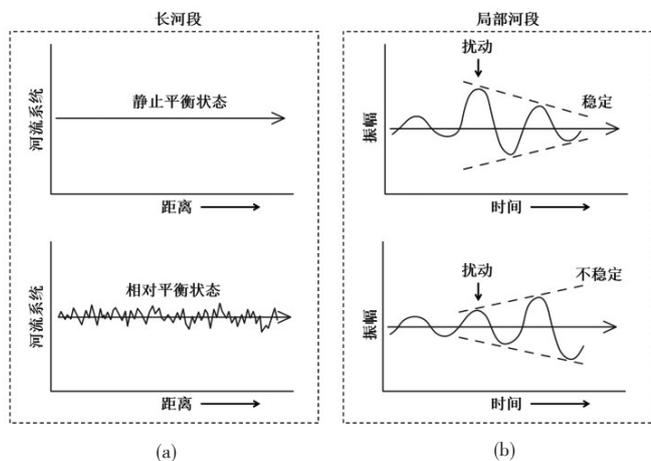


图10 河流系统平衡状态类型与河床稳定性示意

表3 黄河下游高村-陶城铺河段中值粒径变化

断面名称	里程/km	中值粒径 d_{50}/mm	
		2005年4月	2016年4月
高村(四)	303.1000	0.0720	0.131
苏酒庄(二)	330.5020	0.1110	0.092
彭楼(二)	348.2140	0.1020	0.128
杨集	394.3100	0.0910	0.092
孙口	421.3000	0.0950	0.100
十里堡	442.0000	0.0760	0.088
陶城铺	456.9300	0.1110	0.102

性，本次采用河床稳定性指标来说明河床的稳定性，并把边界阻力能耗率与河床稳定性指标进行关联分析。其中，河床稳定性指标^[23]如下：

$$KK = \frac{\tau_b}{\tau_B + \tau_c} \quad (8)$$

式中： τ_B 为床面浑水极限剪切应力； τ_c 为清水床面泥沙起动剪切应力； τ_b 为床面剪切应力。为方便计算，本文采用王尚毅等^[24-25]的方法来计算浑水极限剪切应力 τ_B 和 τ_b 床沙临界剪切应力：

$$\tau_B = 0.0064C_m + 0.098C_m^2 \quad (9)$$

$$C_m = 0.788 + 0.2221gd_{50} \quad (10)$$

$$\tau_c = K^*(\gamma_s - \gamma)d_{50} \quad (11)$$

式中： C_m 为床面含沙浓度，%； d_{50} 为床沙中值粒径，mm； K^* 为泥沙起动系数，本文取0.062。

表3为黄河下游高村-陶城铺河段部分河段床沙中值粒径。通过计算获得2005年和2016年河床稳定性指标 KK 与边界阻力能耗率 P_b 的关系，如图11所示。

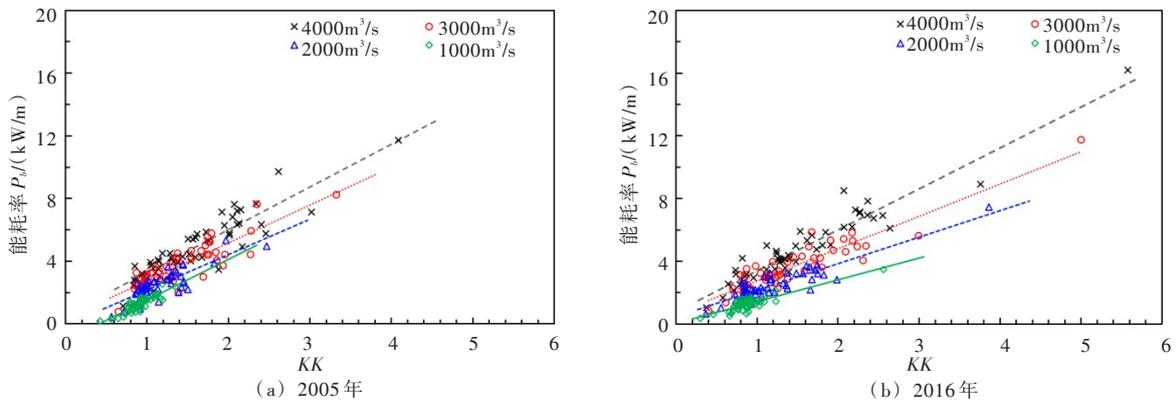


图11 边界阻力能耗率 P_b 与河床稳定性指标 KK 关系

从图11可知，边界阻力能耗率与河床稳定性指标呈正相关关系，河床稳定性指标 KK 值愈大，阻力能耗率 P_b 也愈大。不过并不是 KK 值愈大，河床愈不稳定，而是当 KK 值在一定范围内，河床处于不冲不淤，能够保持稳定状态，当 KK 值大于或小于这个范围，则河床是不稳定的。王尚毅等^[26]提出了河床稳定性条件，并采用黄河花园口和高村共50组数据计算得出， KK 值约在 $0.8 \leq KK \leq 1$ 范围内时，河床是稳定的；当 KK 值大于1，河床处于上限失稳；当 KK 值小于0.8，河床处于下限失稳。

由计算可知，在流量 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时， KK 值多数位于 $0.8 \sim 1.0$ 范围内，大部分河床处于稳定状态，对应的边界阻力能耗率也相对较小，沿程波动幅度不大，高村-陶城铺河段处于相对平衡状态(图7)。随着流量的增大，河床稳定性指标 KK 值也随之变大，在流量为 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 KK 值大于1的数据增多，大部分河床处于上限失稳状态；维持河床稳定的河段也有不少，而这部分河段对应的边界阻力

能耗率 P_b 相对较小,如2005年孙口断面和2016年大寺张断面,其 P_b 值分别为280 kW/m和293 kW/m。然而,边界阻力能耗率趋向最小值时并不意味河床也处于稳定状态,如1000 m³/s流量条件下边界阻力能耗率趋向最小时,依然存在一些断面的河床稳定性指标小于0.8,处于下限失稳状态。

4 结论

本文利用理论解析、数学模型及实测资料分析相结合的方法,研究黄河下游高村至陶城铺河段的边界阻力能耗率与断面形态、河床稳定之间的关系,主要结论如下:

恒定流量条件下,河床边界阻力能耗率围绕均值上下波动,随着流量逐渐增大其均值和沿程波动强度也越大,河流逐渐远离相对平衡态,反之趋向相对平衡态。河床断面形态的改变引起边界阻力能耗率做出相应的调整,边界阻力能耗率 P_b 随河床断面形态(过水面积 A 或宽深比 \sqrt{B}/h)呈先减小后增大的趋势。在流量4000 m³/s条件下,边界阻力能耗率趋向最小值时,2016年汛前河道的过流能力明显高于2005年汛前河道,表现在宽深比有所减小,过水面积更大。

边界阻力能耗率 P_b 与河床稳定性指标 KK 具有很好的线性关系, P_b 随着 KK 值减小而减小,但并不是 P_b 越小,河床稳定性越好,而是当 KK 处在0.8~1.0之间,河床断面能够维持稳定状态。运用边界阻力能耗率结合河床稳定性指标,通过优化断面设计保持河床稳定条件下使边界阻力能耗率趋向最小,能够提高河道的过流与输沙能力。

参 考 文 献:

- [1] 孙东坡. 河流系统能量分配耗散关系的分析[J]. 水利学报, 1999(3): 49-53.
- [2] YANG C T, SONG C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105(7): 769-784.
- [3] YANG C T, SONG C C S, WOLDENBERG M J. Hydraulic geometry and minimum rate of energy dissipation [J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1014-1018.
- [4] CHANG H H, HILL J C. Minimum stream power from rivers and deltas[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1977, 103(12): 1375-1389.
- [5] CHANG H H. Minimum stream power and river channel patterns [J]. Journal of Hydrology, 1979, 41(3): 303-327.
- [6] 庞炳东. 河流洪水流场中的能量分布 [J]. 水利学报, 1997(5): 36-41.
- [7] 舒安平, 张科利, 费祥俊. 高含沙水流紊动能转化与耗散规律 [J]. 水利学报, 2007, 38(4): 383-388.
- [8] 陈绪坚, 胡春宏. 基于最小可用能耗率原理的河流水沙数学模型 [J]. 水利学报, 2004, 35(8): 38-45.
- [9] 赵丽娜, 徐国宾. 基于广义流和广义力的河流能耗率推导[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(12): 90-93.
- [10] 徐国宾, 赵丽娜. 基于能耗率的黄河下游河型变化趋势分析[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 622-626.
- [11] 孙东坡, 杨真真, 张立, 等. 基于能量耗散关系的黄河内蒙段河床形态调整分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 653-661.
- [12] 白玉川, 王令仪, 杨树青. 基于阻力规律的床面形态判别方法[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 81-87.
- [13] 杨树青, 白玉川, 徐海珏. 基于河流阻力能耗的河型判别方法[J]. 水力发电学报, 2019, 38(8): 61-74.
- [14] XIN W Y, XU H J, BAI Y C. River pattern discriminant method based on resistance parameter and activity indicators[J]. Geomorphology, 2018, 303(FEB.15): 210-228.
- [15] KNIGHTON D. Fluvial Forms and Processes[M]. London: E. Arnold, 1984.
- [16] MOLNÁR P, RAMÍREZ J A. Energy dissipation theories and optimal channel characteristics of river networks [J]. Water Resources Research, 1998, 34(7): 1809-1818.
- [17] 程进豪, 安连华, 王华, 等. 黄河山东段河床糙率分析[J]. 水利学报, 1997(1): 40-44, 84.
- [18] 周银军. 河床形态冲刷调整量化及其对阻力的影响初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.

- [19] 夏军强, 吴保生, 王艳平. 近期黄河下游河床调整过程及特点 [J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 301-308.
- [20] 陆中臣, 周金星, 陈浩. 黄河下游河床纵剖面形态及其地文学意义 [J]. 地理研究, 2003, 22(1): 30-38.
- [21] 邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [22] 钱宁. 冲积河流稳定性指标的商榷 [J]. 地理学报, 1958, 25(2): 128-144.
- [23] 徐遂. 冲积河流河床的稳定性条件 [D]. 天津: 天津大学, 1987.
- [24] 王尚毅. 泥质冲积河流及河口泥沙问题的一种数学模型解 [J]. 天津大学学报, 1978(2): 93-114.
- [25] WANG S, SHEN H W. Incipient sediment motion and riprap design [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(3): 520-538.
- [26] 王尚毅, 顾元, 郭传镇. 河口工程泥沙数学模型 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990.

Energy dissipation of boundary resistance and stability analysis of riverbed of Gaocun to Taochengpu reach in lower Yellow River

BAI Yuchuan¹, LI Yan¹, ZHANG Jinliang², BAI Yang¹, JI Zhiqing¹

(1. Institute for Sediment, River and Coast Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The regulation of riverbed morphology adjustment is explored, in view of riverbed boundary resistance energy dissipation, and the correlation between energy dissipation rate and riverbed stability index is analyzed. Taking Gaocun to Taochengpu reach in the lower Yellow River as the research area, based on the topography of the river in different years, the energy dissipation rate and hydraulic elements under different discharges are calculated by using the methods, including the measured data, theoretical analysis and numerical simulation. It is found that the mean value and fluctuation intensity of energy dissipation rate increased with the increase of the discharge; the energy dissipation rate displays a trend to decrease firstly then increase with the increasing of the flow area or width depth ratio. In addition, there is significant positive correlation between the energy dissipation rate and the riverbed stability index. However, the riverbed may also not remain stable, when the energy dissipation rate approaches the minimum value. By optimizing the section configuration of the river bed and seeking the minimum energy dissipation rate of the boundary resistance under the condition of the river bed remains stable, the water and sediment transport capacity of the river channel will be improved.

Keywords: lower Yellow River; boundary resistance energy dissipation rate; numerical simulation; riverbed stability

(责任编辑: 李福田)