J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(2):000-000
DOI 10.18307/2027.0252
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

长江中游悬移质输沙对床沙异质粗化过程响应机制*

李林林[1**]，雷　钰[1]，夏军强[2]，周美蓉[2]，邓珊珊[2]，管长椿[1]，张　浩[1]
（1：湖北工业大学河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室，武汉 430068）
（2：武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，武汉 430072）

摘　要：长江中游剧烈的水沙异变诱发坝下游河床系统性冲刷响应，表现出显著的空间分异特征，不均匀粗化过程使得床沙对不同粒径组悬沙沿程补给机制发生结构性改变。本文基于长江中游枝城、沙市和监利水文站 2003—2019 年实测水沙资料，运用马尔可夫随机理论，提出考虑转移概率的水流挟沙力计算新模式，并应用于三峡水库下游荆江河段悬移质输沙量预测，进而揭示其对上游来水来沙、床沙异质粗化及交换过程的响应机制。结果表明：（i）基于泥沙转移概率矩阵，提出适用于长江中游水流挟沙力计算公式，预测精度明显优于传统公式，纳什效率系数（*NSE*）在各水文站均达到 0.7 以上；（ii）悬移质输沙主要集中于汛期，汛期输沙占比分别在枝城、沙市、监利三个水文站由 2003 年的 98%、93%、90%下降至 2019 年的 93%、87%、77%，表明输沙年内空间分布非均匀程度增加；（iii）在其他条件不变的情况下，泥沙转移概率 P_{13} 随流量增大而升高，随床沙粒径增大而迅速降低，在粒径超过 5 mm 后几近为零；含沙量在 0.2 kg/m³以下时，P_{13} 快速上升，随后趋于平稳；（iv）在 2003-2019 年期间，泥沙转移概率 (P_{13}) 与输沙率呈正相关关系，枝城断面 P_{13} 由 0.469 降至 0，沙市断面由 0.691 降至 0.496，监利断面由 0.789 降至 0.742，反映三峡工程下游近坝段河床粗化后对悬沙补给能力显著减弱，并具有显著的空间异质性。相关研究成果可为长江中游近坝河段水沙输移及河床演变分析提供理论基础与技术支撑。

关键词：泥沙转移概率；水流挟沙力；悬沙沿程恢复；床沙异质粗化；长江中游

Response of suspended sediment transport to heterogeneous riverbed coarsening in the Middle Yangtze River*

Li Linlin[1**], Lei Yu[1], Xia Junqiang[2], Zhou Mei-rong[2], Deng Shanshan[1], Guan Changchun[1]& Zhang Hao[1]
(1: *Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan* 430068, *P.R.China*）
(2: *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan* 430072, *P.R.China*）

Abstract: The operation of the Three Gorges Dam has triggered systematic riverbed scouring downstream and induced heterogeneous coarsening of bed sediment, thereby altering the longitudinal supply of bed sediment to suspended load. Using hydrological and sediment data collected at the Zhicheng, Shashi, and Jianli stations from 2003 to 2019, this study applies Markov chain theory to develop a new sediment transport capacity formula that incorporates sediment transition probabilities. This formula is used to analyze spatiotemporal changes in suspended sediment concentration and cross-sectional erosion-deposition processes in the Jingjiang Reach downstream of the dam, and to investigate the characteristics and driving mechanisms of suspended sediment transport following dam operation. The results show that: (1) a new cross-sectional sediment transport capacity formula is established for the Jingjiang Reach based on a three-dimensional sediment transition probability matrix, which outperforms conventional formulas, with Nash-Sutcliffe efficiency coefficients exceeding 0.716 at all stations; (2) suspended sediment transport in the study reach occurs primarily during flood seasons, with the flood-season proportion of total transport decreasing from 98%, 93%, and 90% in 2003 to 93%, 87%, and 77% in 2019 at Zhicheng, Shashi, and Jianli, respectively, indicating growing intra-annual unevenness in sediment transport; (3) under constant

* 2026-02-02 收稿；2026-04-26 收修改稿；2026-06-04 录用。
国家自然科学基金项目（52509094）和湖北省自然科学基金项目（2024AFB265）联合资助。
** 通信作者; E-mail: llrx@hbut.edu.cn

boundary conditions, the sediment transition probability (P13) increases with flow discharge but decreases rapidly as bed sediment grain size increases, approaching zero when grain size exceeds 5 mm; when suspended sediment concentration is below 0.2 kg/m³, P13 rises sharply and then levels off; (4) a positive correlation exists between P13 and sediment transport rate during 2003–2019, with P13 declining from 0.469 to 0 at Zhicheng, and from 0.691 to 0.496 and from 0.789 to 0.742 at Shashi and Jianli, respectively. These changes suggest that bed sediment coarsening near the dam weakens the reach's capacity to supply suspended sediment. This study offers a theoretical basis for analyzing water-sediment transport and channel evolution in reaches adjacent to the Three Gorges Dam in the middle Yangtze River.

Keywords: Sediment transition probability; sediment transport capacity; recovery of suspended load; heterogeneous coarsening of bed material; the Middle Yangtze River

三峡工程自运行以来，在调控长江中上游洪水、保障下游供水与航运方面发挥了重要作用，但同时也显著改变了流域水沙输移格局。由于“清水下泄”效应，坝下游水流的含沙量长期处于严重不饱和状态，进而引发长江中游河段大范围、长距离的河床冲刷，导致泥沙沿程不断恢复。这一过程打破了原有的水沙动态平衡，促使河道通过冲淤调整以适应新的水沙边界条件，从而对防洪安全、航道稳定性及生态系统结构产生深远影响[1-5]。因此，探究水库下游的水沙变化特征与河床响应机制，已成为水库淤积与河床演变研究中的核心问题[6]。

在水库下游水沙输移过程及河床冲淤方面，以往有很多学者从不同角度开展了大量相关研究[7-11]。从输沙量的变化特征出发，陈飞等[12]研究了丹江口与三门峡等水库下游不同粒径组泥沙的输移量，发现其均未超过建库前的历史水平。侯素珍等[13]以巴彦高勒-头道拐河段为例，指出该段存在“汛期冲刷、非汛期淤积”的周期性特征。师长兴等[14]基于黄河内蒙段多年观测数据，系统分析了水沙条件变化对河床形态演变的驱动作用。程亦菲等[4]则探讨了小浪底水库运行后下游悬移质泥沙分组输移特性，构建了受边界条件与粒径组合共同影响的河床冲淤计算模型。此外，杨云平等[15]通过对 1987—2014 年间的水文与泥沙序列进行系统分析，揭示了三峡水坝下游悬沙恢复与床沙补给机制的耦合关系。尽管现有研究在揭示泥沙输移特征与河床冲淤机制方面取得了诸多成果，但在典型断面悬移质泥沙的输运模拟与输沙率估算方面仍存在局限，尤其在边界条件演化与水沙过程响应的综合建模上尚显薄弱，为进一步理解水库下游输沙机制带来了挑战。

本文基于马尔可夫随机理论，提出考虑泥沙转移概率的水流挟沙力计算新模式，并用于三峡水库下游悬移质输沙量预测与典型断面冲淤过程分析；在此基础上，建立床沙粗化及悬移质输沙率与泥沙转移概率之间的定量关系式，揭示三峡水库运用后长江中游悬沙输移对床沙异质粗化过程响应机制，进而为长江中下游河段泥沙管理与调度提供理论参考与技术支撑。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

荆江河段位于长江中游上段，起于枝城，止于城陵矶，河段总长约 347 km。以藕池口为界，该河段可划分为上荆江与下荆江，长度分别为 172 km 和 175 km[16]。上荆江上段（枝城至杨家垴）河床类型以沙夹卵石为主，床沙粒径较粗、粗化程度较高，河道地形复杂多变；而上荆江下段（杨家垴至藕池口）及下荆江段则为典型沙质河床，床沙以中细砂为主，颗粒级配较为均匀，卵石层埋藏较深。该河段水沙主要来源于上游，其中部分水沙经右岸的松滋口、太平口和藕池口等重要分流口输入洞庭湖，最终于城陵矶汇入长江干流[17-19]。由于其地处三峡水库下游近坝段，且水沙通量变化较大，荆江河段成为三峡水库运行后受“清水下泄”影响最为显著的区域之一，表现为河床冲刷强烈、水沙条件显著变化[20-22]，是研究库下游输沙机制与河床演变规律的典型代表河段。

1.2 数据来源

三峡工程的运用虽使坝下游河段经历持续的河床冲刷，但在某些特定时段，河床会处于相对稳定的冲淤平衡状态。在这些特定时段内，水流中的实测含沙量可近似等于水流挟沙力，这是推导和验证挟沙

力公式的理想条件。因此，本文收集整理了荆江河段枝城、沙市和监利水文站 2003—2019 年处于此类“准平衡状态”的实测水沙资料。为确保所选数据能够真实反映上述稳定状态，本研究将平均床面高程的变化率小于 0.01 m/d 设定为河床处于相对冲淤平衡（即准平衡）状态的定量筛选标准。具体计算与筛选方法如下：首先通过实测水位减去平均水深得到平均床面高程，进而求得相邻测量时段内平均床面高程的变化量，最终计算得出平均床面高程的时间变化率。基于此标准进行严格筛选后，共获取符合条件的实测资料 430 组，包括床沙粒径、悬移质输沙率以及计算断面流量、平均水深、平均流速等水文数据，如表 1 所示。可以看出，收集的悬移质输沙率数据流量范围为 3520 ~ 42400 m^3/s，床沙中值粒径范围在 0.139 ~ 9.95 mm 之间，平均水深在 4.4 ~ 19.2 m 之间，平均流速在 0.44 ~ 2.44 m/s 之间。

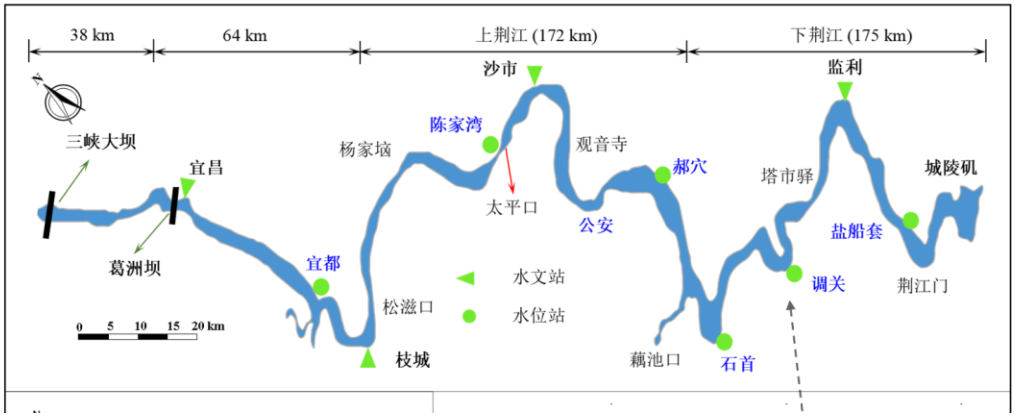


图 1 荆江河段示意图

Fig. 1 Overview of the Jingjiang Reach

表 1 枝城、沙市与监利水文站实测资料结果统计

Tab. 1 Statistics of the measured data at Zhicheng, Shashi and Jianli stations

水文站	实测资料组数	流量/(m^3/s)	平均流速/(m/s)	平均水深/m	悬移质输沙率/($10^3kg/s$)	床沙 D_{50}/mm
枝城站	160	4000~42400	0.44~2.44	8.82~19.2	0.012~39.474	0.23~9.95
沙市站	160	3900~35900	0.63~1.81	4.97~17.1	0.072~15.508	0.18~0.31
监利站	110	3520~24800	0.68~1.98	4.4~15.3	0.149~10.360	0.14~0.25

2 基于随机过程的水流挟沙力计算方法

2.1 水流挟沙力计算方法

基于三维泥沙转移概率矩阵，建立河流断面输沙量与泥沙转移概率之间的定量关系，进而提出长江中游水流挟沙力计算模式：

$$S_{i+1} = f(C_S)S_i P_{13_{i+1}} / P_{13_i} + 0.5S_i - S_i\left(1 - P_{33_i}\right) \tag{1}$$

式中：P_{i+1} 表示某计算断面第 i+1 时刻的泥沙转移概率；P_i 表示某计算断面第 i 时刻泥沙转移概率；S_{i+1} 表示某计算断面第 i+1 时刻水流挟沙力；S_i 表示某计算断面第 i 时刻含沙量，C_S 为来沙系数，f 为关于来沙系数 C_S 的函数；P_{13} 表示泥沙转移概率（即泥沙由静止状态转移为悬移状态的概率）；P_{33} 表示泥沙保持悬移状态不变的概率。

Einstein 首先提出床沙与推移质之间存在相互交换现象，但没有考虑交换过程中的悬移质作用，也没有对交换过程进行随机数学处理[23]。韩其为[24]在研究泥沙运动时，认为泥沙颗粒运动的随机过程可视为无后效的 Markov 过程；并假定水流流速的垂向分速与水平分速相互独立，且泥沙起悬仅与水流垂向流速有关，得到了泥沙颗粒运动、静止状态的转化概率矩阵：

$$P_{ij}=\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix} \tag{2}$$

式中：P 表示状态转移概率矩阵，P_{ij} 为泥沙状态转移概率，表示泥沙颗粒由 i 状态转移到 j 状态的概率（其中：i、j=1、2、3、4，“1”表示静止，“2”表示滚动，“3”表示悬移，“4”表示跃移）。

为了分析三峡水库下游的泥沙输移规律，引入基于泥沙起动概率的三维转移概率矩阵 P，来反应典型断面床沙与悬移质泥沙运动状态的相互转换。若将泥沙悬移和跳跃视为同一运动状态（悬移），那么某一粒径组的三态转移概率矩阵可以表示为：

$$P=\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中：i、j=1、2、3，“1”表示静止，“2”表示滚动，“3”表示悬移。其中，泥沙转移概率 P_{13} 可由式（5）进行计算：

$$P_{33}=P_S\left[P_2+\left(1-P_2\right)P_S\right] \tag{4}$$

$$P_{13}=P_S \tag{5}$$

式中：P_S 为起悬概率，P_2 为不止动概率。

$$P_S=P\left\{\frac{v'}{u_*}\geqslant\left|\frac{\omega}{u_*}\right|\right\}=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_{\frac{\omega}{u_*}}^{+\infty}e^{\left(-\frac{x^2}{2}\right)}dx \tag{6}$$

式中：v’为近底水流的垂向脉动流速，且其服从正态分布；u_*为摩阻流速；ω 为泥沙沉速，可按张瑞瑾公式进行计算。

$$P_2=1-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\frac{U_0}{2u_*}-2.7}^{\frac{U_0}{2u_*}-2.7}e^{-\frac{t^2}{2}}dt \tag{7}$$

式中，U_0 为止动流速。

经实测资料计算，P_{33} 约等于 1，可将水流挟沙力公式进一步简化为：

$$S_{i+1}=f(C_S)S_iP_{13_{i+1}}/P_{13_i}+0.5S_i \tag{8}$$

2.2 公式率定与实测资料验证

上游来沙条件可以影响泥沙交换模式或起动概率，进而对悬移质输沙过程产生影响。例如，当来沙系数增大时，意味着上游水流中携带的悬沙供给更加充沛，可能导致悬移质输沙率的增加。因此，本文用泥沙转移概率 P_{13} 定量描述长江中游沿程床沙对悬移质输沙过程的补给能力。上游来沙条件一般可由来沙系数进行表示：

$$C_S=\frac{S_f}{Q_f} \tag{9}$$

式中：S_f 为含沙量，Q_f 为流量。

由于 C_S 数量级过小，这里取为实际来沙系数的 10^5 倍进行计算。f 与来沙系数 C_S 之间采用一次函数

进行拟合：

$$f(C_S)=a\times C_S\times 10^5+b \tag{10}$$

结合荆江河段 2003-2019 年实测资料，枝城、沙市和监利断面修正系数 a、b 的拟合结果分别为：

$$\begin{aligned} f_z(C_S)&=5.1430\times C_S\times 10^5-0.9281\\ f_s(C_S)&=1.6469\times C_S\times 10^5+0.0007\\ f_j(C_S)&=0.2802\times C_S\times 10^5+0.2116 \end{aligned} \tag{11}$$

为进一步验证本文提出公式的合理性，基于长江中游的实测水沙资料，选取了 3 种已有的挟沙力计算公式进行评价，与本文提出公式进行对比，分析各公式预测挟沙力的效果。

1）曹如轩[25]公式：

$$S_*=0.385\frac{\gamma_m}{\gamma_s-\gamma_m}\cdot\frac{V^3}{gr\omega_{ms}} \tag{12}$$

2）冯普林[26]公式：

$$S_*=81.913\left(\ln\mu_r\right)^{0.8265}R^{0.2066} \tag{13}$$

3）刘兴年[27]公式：

$$S_*=0.211\left[\mu_r\left(\frac{1}{a_m}+S_V\right)R\right]^{0.69} \tag{14}$$

式中：γ_m 为浑水容重；γ_s 为泥沙容重；ω_{ms} 为泥沙群体沉速；r 为水力半径；V 为泥沙流速；μ_r 为浑水相对粘滞系数；S_V 为体积含沙量；$R=V^3/gh\omega$，被定义为 Velikanov 参数。以实测水力泥沙资料为基准，图 2 显示了实测含沙量和以往公式计算值的比较，而表 2 中汇总了上述公式以及本研究提出式（8）的 *NSE* 值，整体看来本文公式预测效果较好。

2.3 公式计算精度分析

为分析本文公式计算精度，采用纳什效率系数（NSE）来评价公式计算精度：

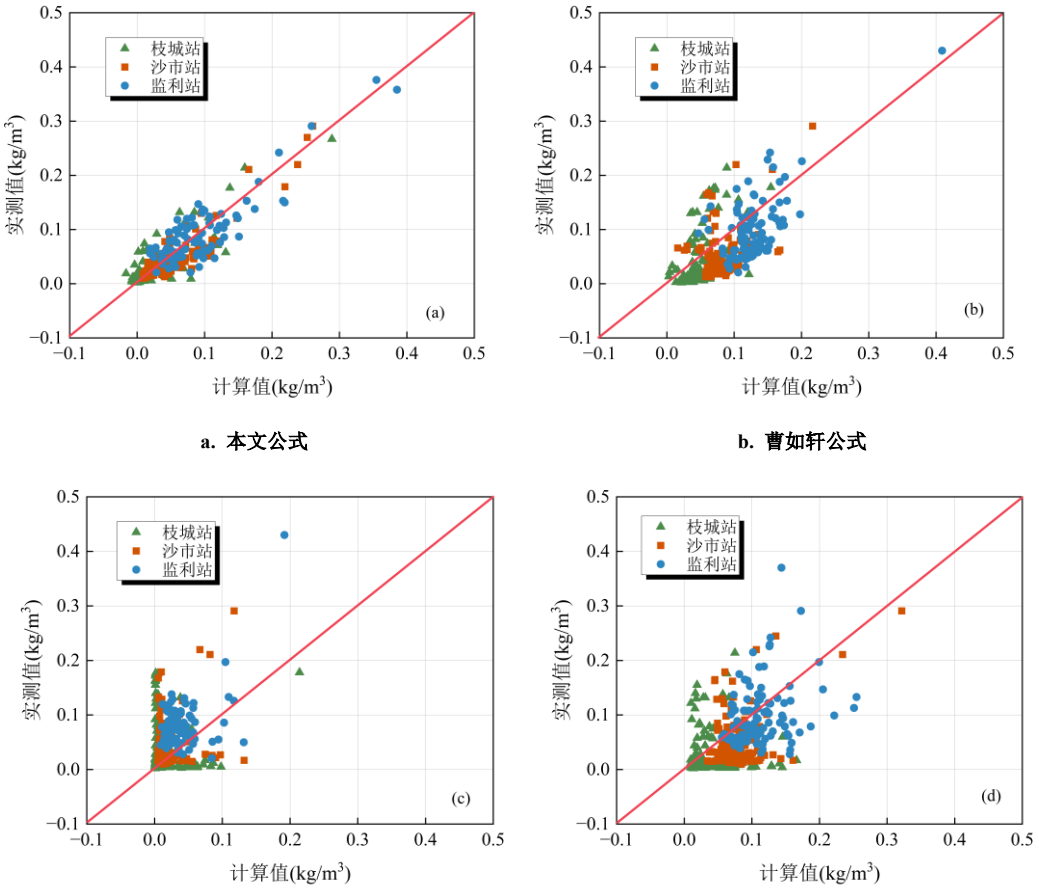
$$NSE=1-\frac{\sum\left(Q_i-Q_s\right)^2}{\sum\left(Q_i-\overline{Q}\right)^2} \tag{15}$$

式中：Q_i 为实测值，Q_S 为计算值，$\overline{Q}$ 为平均值。*NSE* 的值范围从负无穷大到 1，其中：$NSE=1$ 表示公式计算值与实测数据符合较好；$NSE=0$ 表示公式计算值和实测值的平均值非常接近；$NSE<0$ 表示公式计算值拟合效果差。*NSE* 越接近 1，说明计算精度越高。表 2 给出了各公式 *NSE* 计算结果。

表 2 典型断面 *NSE* 比较

Tab.2 Comparison of typical section NSE

公式	本文公式	曹文轩公式	冯普林公式	刘兴年公式
枝城站	0.716	0.416	0.367	0.414
沙市站	0.828	0.359	0.348	0.407
监利站	0.747	0.437	0.405	0.397



a. 本文公式 **b. 曹如轩公式**

c. 冯普林公式 **d. 刘兴年公式**

图 2 基于不同水流挟沙力公式的各水文站含沙量计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between measured sediment concentration and calculated sediment concentration by different sediment transport capacity formulas at hydrological stations

3 悬移质输沙对床沙异质粗化过程的响应分析

3.1 典型断面悬移质输沙年际变化规律

根据 2003—2019 年各水文站悬移质汛期占比的年际变化趋势（图 3）可知，荆江河段各站汛期输沙贡献率均呈显著的波动下降态势，且在空间上表现出“上游高、下游低”及“下移幅度沿程增大”的特征。其中，上游枝城站的汛期占比始终处于较高水平且下降速率较慢，而处于下荆江的监利站受三峡水库蓄清排浑及河床长距离冲刷补给的影响，其占比下降趋势最为明显，反映出下游河段非汛期河床起沙对输沙量的贡献日益突出。自三峡水库蓄水运行以来，汛期悬移质输沙量占比分别在枝城、沙市、监利三个水文站由 2003 年的 98%、93%、90%下降至 2019 年的 93%、87%、77%，表明悬移质输沙仍主要集中于汛期；但由于床沙粗化的时空分布异质性，导致年内输沙的空间分布更不均匀，但非汛期输沙的相对贡献有所增强。因此，本文在建立悬移质输沙率计算模型时，采用汛期与非汛期数据进行拟合，以提高模型适应性与精度。

三峡水库运行后，大量泥沙在库区被拦截，导致下游出库泥沙显著减少，近坝河段出现典型的悬沙粗化现象。图 4 展示了 2003—2019 年典型断面悬移质输沙率及其中值粒径 d_{50} 的年际变化特征。由图 4（a）可见，枝城站床沙平均粒径由 2003 年的 0.011 mm 增至 2019 年的 0.023 mm；沙市站由 0.019 mm

增至 0.022 mm；监利站床沙平均粒径变化较为剧烈，2003 年为 0.022 mm，至 2006 年急剧增大至 0.141 mm，随后减小至 2013 年的 0.020 mm，最终于 2019 年增至 0.238 mm。总体上，三站泥沙中值粒径呈现出“监利站＞沙市站＞枝城站”的空间分布特征，反映出下游河段悬沙组成的粗化趋势明显，且粗化程度随距离三峡水库的增加而增大。

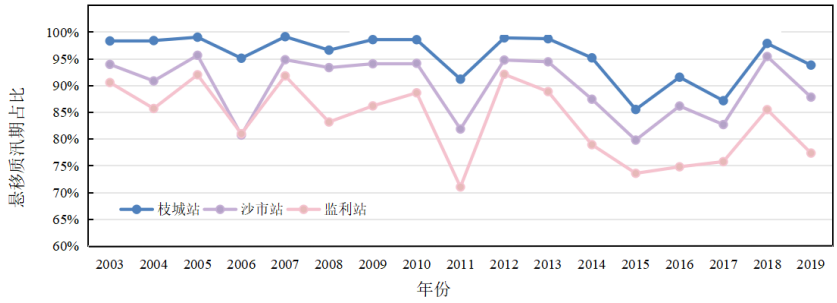


图 3 2003—2019 年水文站悬移质汛期占比年际变化

Fig. 3 Interannual changes in the flood-season suspended sediment proportionat hydrological stations from 2003 to 2019

图 4（b）显示，三峡及其上游水库群的蓄水拦沙作用显著削弱了进入中游河段的沙源供给，坝下游河道发生持续冲刷，水流含沙量沿程逐渐恢复。受其影响，三站年均悬移质输沙率均呈显著下降趋势：枝城站由 2003 年的 4.13 t/s 下降至 2019 年的 0.35 t/s，减幅达 91.5%；沙市站由 4.34 t/s 降至 0.59 t/s，减幅为 86.4%；监利站则由 4.12 t/s 降至 1.34 t/s，减幅为 67.5%。结果表明，三峡水库运行对近坝段输沙能力影响显著，且影响程度随河段下移逐渐减弱。

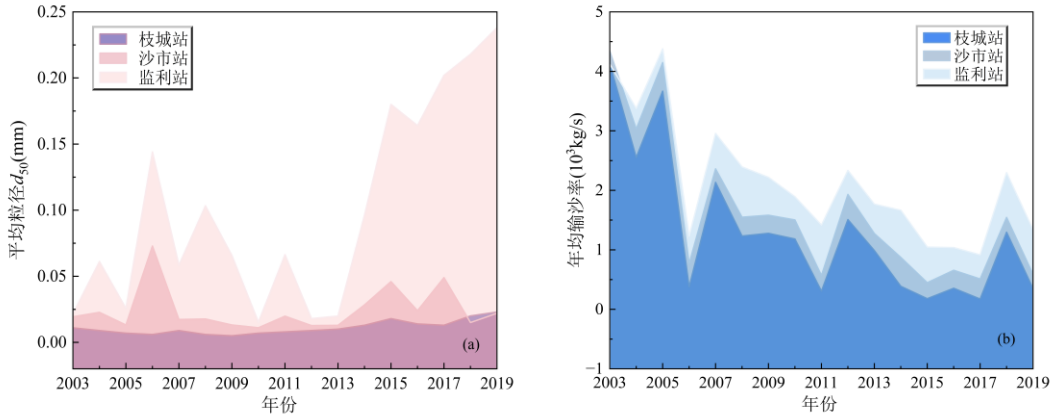


图 4 荆江河段 2003-2019 年悬移质输沙率及泥沙平均粒径变化过程

Fig. 4 Suspended sediment transport rate and average particle size of sediment in the Jingjiang Reach from 2003 to 2019

3. 2 长江中游床沙补给能力时空变化规律

为深入分析三峡水库运行对近坝段河床演变及悬移质输沙能力的影响，图 5 给出了该库运行后 2003-2019 年间枝城、沙市和监利水文站泥沙转移概率 P_{13} 的变化特征。由图可见，枝城断面泥沙转移概率的年均值约为 0.13，沙市断面约为 0.58，监利断面则达 0.74，呈现出由近坝向下游逐渐增大的趋势。这表明三峡水库蓄水运行后，近坝段床沙粒径呈粗化趋势，导致泥沙转移概率 P_{13} 减小，悬移质输沙能力随之明显下降，且该趋势具有持续加剧的可能性。进一步分析 P_{13} 的时间序列变化，从 2003—2019 年，枝城站的泥沙转移概率 P_{13} 由 0.469 大幅降至 0，沙市站由 0.691 降至 0.496，监利站则由 0.789 微降至 0.742。整体上看，泥沙转移概率呈下降态势，尤其是近坝断面变化显著。该现象表明下游河床对悬沙的补给能

力持续减弱，且在空间上呈现显著的异质性。

3.3 悬移质输沙与泥沙转移概率定量关系

图 6 给出了枝城、沙市和监利水文站 2003—2019 年平均输沙率与泥沙转移概率 P_{13} 的关系。结果表明，各断面输沙率与 P_{13} 值之间存在显著的正相关关系，表明悬移质输沙率随泥沙转移概率 P_{13} 的增加而增大。从数值上看，枝城站的年均 P_{13} 为 0.13，沙市站为 0.58，监利站为 0.74，呈现出明显的空间梯度特征：枝城站 < 沙市站 < 监利站。造成上述差异的主要原因在于三峡水库运行后对下游河床造成了持续性冲刷，致使近坝段河床颗粒组成发生显著变化，表现为床沙粒径逐步增大，河床粗化程度加剧。枝城站因距离三峡水库较近，河床粗化最为严重，床沙对悬沙的补给能力最弱，致使 P_{13} 值最低。相比之下，沙市站和监利站距坝址较远，河床粗化现象相对减弱，悬沙供给能力逐步增强，泥沙转移概率也相应提高。在监利站，由于所处河段粒径较细，P_{13} 值达到最高，表明其悬移质输沙能力最强。

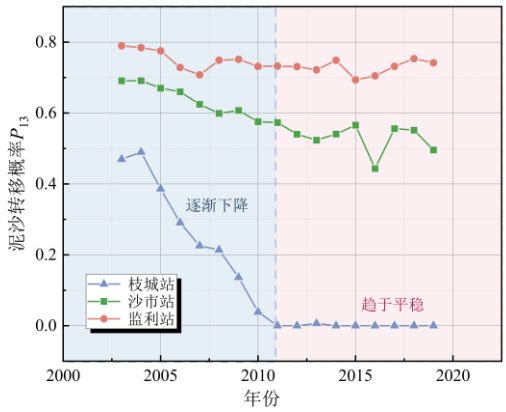


图 5 水库运用后典型断面泥沙转移概率计算结果

Fig. 5 The calculation results of sediment suspension probability for typical cross-sections after reservoir operation

此外，为深入探究不同流量级条件下 P_{13} 对悬移质输沙率的影响规律，在假定床沙平均粒径为 0.22 mm 的条件下，分别设置三种不同流量工况（Q_f =10000 m³/s、20000 m³/s、30000 m³/s），计算泥沙转移概率 P_{13} 与悬移质输沙率之间的响应关系，结果如图 7 所示。可以看出，在其他参数保持不变的条件下，P_{13} 与悬移质输沙率呈明显正相关关系，且随流量增大，该正相关性更加显著。具体而言，当 Q_f =10000 m³/s 时，P_{13} 的平均值为 0.673，对应的悬移质输沙率为 0.922 t/s；当 Q_f 提升至 20000 m³/s 时，P_{13} 提高至 0.721，悬移质输沙率显著上升至 4.120 t/s；进一步增大流量至 30000 m³/s 时，P_{13} 增至 0.769，对应的输沙率达 11.582 t/s。以上分析表明，泥沙转移概率 P_{13} 的增大不仅反映了床沙对悬沙的增强供给能力，也显著提升了水体对悬移质的输运效率。同时，流量 Q_f 作为主要影响因素之一，在放大 P_{13} 对输沙率影响的同时，也直接增强了输沙能力。

3.4 悬移质输沙对床沙异质粗化过程的响应

图 8 反映了枝城、沙市和监利三站泥沙转移概率 P_{13} 与床沙粒径 d 之间的关系变化。分析结果表明，三个典型断面均表现出显著的负相关趋势，即床沙粒径越小，其对应的转移概率越高；而随着粒径增大，泥沙转移概率 P_{13} 迅速下降。具体来说，监利站在粒径较小时（接近 0 mm）显示出最高的转移概率，接近 1，表明该断面的床沙颗粒更容易对悬沙进行补给。沙市站的转移概率整体略低于监利站。枝城站的转移概率最低，尤其是小粒径泥沙部分，其转移概率明显低于沙市和监利站。此外，随着粒径的增加，转移概率均呈现出快速下降的趋势，并在粒径超过 5 mm 后，泥沙转移概率 P_{13} 趋近于 0，表明床沙粗化后的泥沙颗粒相对稳定，不易起动。

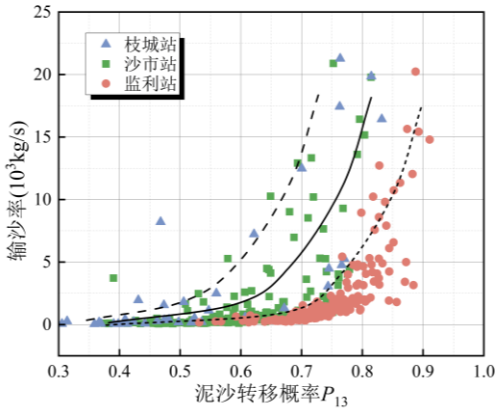


图 6 泥沙转移概率与悬移质输沙率关系曲线

Fig. 6 The relationship between sediment transition probability and suspended sediment transport rate

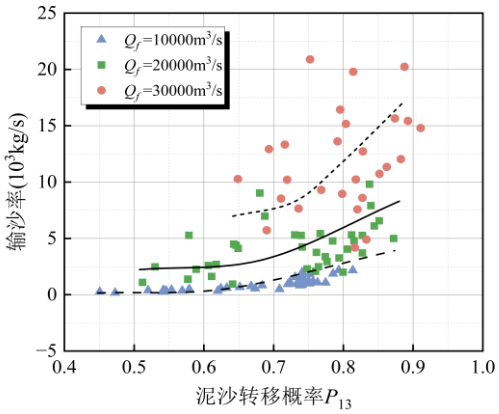


图 7 不同流量级下泥沙转移概率与悬移质输沙率关系曲线

Fig. 7 The relationship between sediment transport probability and suspended sediment transport rate at different water discharge

图 9 给出了不同含沙量条件下泥沙转移概率 P_{13} 的变化特征。整体来看，随着含沙量 S_f 的增加，泥沙转移概率 P_{13} 呈现出先快速上升后趋于平缓的变化趋势。在含沙量较低的区域（S_f<0.1 kg/m³），泥沙转移概率随 S_f 的增加而迅速升高，表明在低含沙量条件下，泥沙更容易发生转移。当含沙量超过某一临界值后（大约在 S_f=0.2 kg/m³ 附近），转移概泥沙率的增长速率明显趋缓，最终趋于一个稳定值，接近 0.8。此外，不同站点的数据分布显示了一定的差异性。监利站实测数据在含沙量较高时（S_f>0.4 kg/m³）显示出较高的泥沙转移概率，在相似的含沙量条件下，监利站的泥沙转移概率高于枝城站和沙市站。沙市站实测含沙量主要分布在 0< S_f <0.4 kg/m³，且在中等含沙量条件下（S_f ≈ 0.2 ~ 0.3 kg/m³），其 P_{13} 略高于枝城站，表现出一定的补给优势。枝城站实测数据主要分布在 0< S_f<0.3 kg/m³，整体 P_{13} 水平较低，尤其在低含沙量区间，其转移概率提升幅度缓慢，反映出河床粗化后悬沙供给能力的减弱。

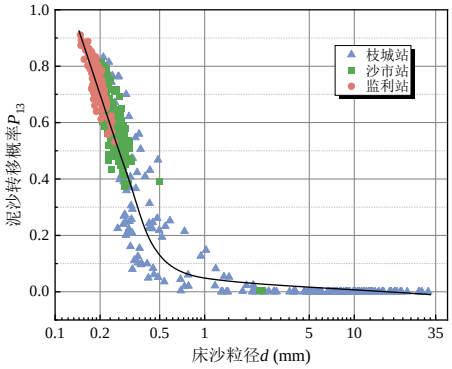


图 8 泥沙转移概率与床沙粒径关系曲线

Fig. 8 The relationship between sediment transition probability and bed sediment grain size

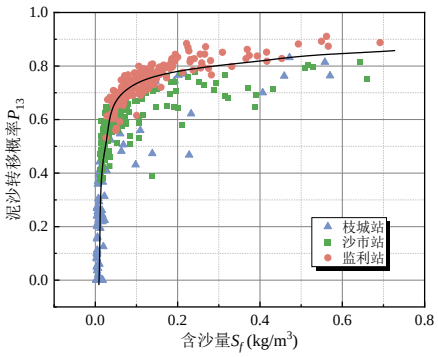


图 9 含沙量与泥沙转移概率关系曲线

Fig. 9 The relationship between sediment concentration and sediment transition probability

坝下游床沙粗化呈现显著的空间异质性，主要受距坝距离及水流剪切力沿程衰减的影响。枝城站距坝最近，水流冲刷动能大，细颗粒泥沙被大量带走，形成严重的床沙粗化；而监利站距坝较远，水流动能衰减且有沿程泥沙补给，粗化程度相对较轻。这种异质粗化直接改变了床面边界条件：随着床沙粒径

d 的增大，泥沙颗粒的隐蔽效应和抗冲刷能力增强，导致泥沙转移概率 P_{13} 迅速下降。因此，床沙异质粗化过程在空间上结构性地削弱了上游近坝段河床对悬沙的补给能力，是导致悬沙差异化输移的重要因素。

5 结论

长江中游作为三峡工程近坝河段，其床沙调整与悬移质输沙过程显著受到上游水库群蓄水拦沙的叠加影响。因此，本文基于三峡水库运行后荆江河段 2003-2019 年水沙资料与河床演变特征分析，结合马尔可夫随机理论，提出考虑泥沙转移概率的水流挟沙力计算方法，揭示了长江中游荆江河段悬移质输沙机制，及其沿程补给作用对床沙粗化过程的响应规律。本文主要结论如下：

1）本文提出的基于泥沙转移概率的水流挟沙力计算方法，能够有效反映荆江河段悬沙输移与河床调整过程的随机特性，在各水文站均表现出优于传统公式的预测精度与适应性。

2）三峡水库运行后，长江中游悬移质输沙仍集中于汛期；但由于床沙异质粗化等原因的影响，其年内空间分布非均匀程度增加，汛期输沙主导地位有所减弱，非汛期输沙贡献小幅度提升。

3）泥沙转移概率对水沙及河床边界条件响应显著，其值随流量增大而升高，随床沙组成粗化而迅速降低；在低含沙量条件下随含沙量增加而快速上升，含沙量较高后渐趋稳定。

4）近坝段河床持续粗化导致其对悬移质泥沙的补给能力显著减弱，泥沙转移概率总体呈下降趋势，反映出河床逐渐趋于稳定、可冲刷泥沙资源减少的演变特征。

6 参考文献

[1] Xu QX. Study of sediment deposition and erosion patterns in the middle and downstream Changjiang mainstream after impoundment of TGR. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(2): 146-154. [许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究. 水力发电学报, 2013, **32**(2): 146-154.]

[2] Hu CH, Zhang XM, Zhao Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 725-733. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.009. [胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析. 水科学进展, 2020, **31**(5): 725-733.]

[3] Yao SM, Xing GD, Chen D. Changes in sediment transport rate in the midstream of Yangtze River before and after the construction of Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(8): 10-16. DOI: 10.11988/ckyyb.20211393. [姚仕明, 邢国栋, 陈栋. 三峡建库前后长江中游河道输沙率变化分析.长江科学院院报, 2022, **39**(8): 10-16.]

[4] Cheng YF, Xia JQ, Zhou MR *et al.* Effects of grouped suspended sediment transport on channel evolution in the Lower Yellow River. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(3): 506-517. [程亦菲, 夏军强, 周美蓉等. 黄河下游不同河段分组悬沙输移对河床冲淤的影响. 水科学进展, 2022, **33**(3): 506-517.]

[5] Xu QX, Dong BJ, Yuan J *et al.* Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 650-661. DOI: 10.18307/2023.0221. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 650-661.]

[6] Fu KD, Huang HQ, Zhong RH *et al.* Reservoir-induced downstream changes of water, sediment and channel morphology: A literature review. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(9): 1239-1250. [傅开道, 黄河清, 钟荣华等. 水库下游水沙变化与河床演变研究综述.地理学报, 2011, **66**(9): 1239-1250.]

[7] Qian N, Zhang R, Li JF *et al.* A preliminary study on the mechanism of selfregulation of sediment transport capacity in thelower Huang he (the Yellow River). *Acta Geographica Sinica*, 1981, **36**(2): 143-156. [钱宁, 张仁, 李九发等. 黄河下游挟沙能力自动调整机理的初步探讨. 地理学报, 1981, **36**(2): 143-156.]

[8] Zheng YS, Liu SJ, Peng H *et al.* Analysis on the influencing factors of sediment transport capability of the typical alluvial reaches of the Yellow River. *Yellow River*, 2012, **34**(10): 34-36. [郑艳爽, 刘树君, 彭红等. 黄河典型冲积性河道输沙能力影响因素分析.人民黄河, 2012, **34**(10): 34-36.]

[9] Shen GQ, Zhang YF, Zhang M. Characteristics on floods and sediment transport in the Lower Yellow River since the Xiaolangdi Reservoir

impoundment. *Journal of Sediment Research*, 2020, **45**(6): 59-66. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.06.010. [申冠卿, 张原锋, 张敏. 小浪底水库运用后黄河下游河道洪水与泥沙输移特性. 泥沙研究, 2020, **45**(6): 59-66.]

[10] Li YT, Xue JL, Sun ZH *et al*. Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(4): 1-13. DOI: 10.11660/slfdxb.20210401. [李义天, 薛居理, 孙昭华等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化. 水力发电学报, 2021, **40**(4): 1-13.]

[11] Xia JQ, Cheng YF, Zhou MR *et al*. River regime evolution and simulation technique in wandering section of the lower Yellow River. *China Water Resources*, 2023(20): 20-25. [夏军强, 程亦菲, 周美蓉等. 黄河下游游荡段河势演变及模拟技术.中国水利, 2023(20): 20-25.]

[12] Chen F, Li YT, Tang JW *et al*. Analysis of group-sized sediment transport downstream a reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, **29**(1): 164-170. [陈飞, 李义天, 唐金武等. 水库下游分组沙冲淤特性分析.水力发电学报, 2010, **29**(1): 164-170.]

[13] Hou SZ, Chang WH, Wang P *et al*. Fluvial processes in Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2010, **35**(3): 44-50. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2010.03.005. [侯素珍, 常温花, 王平等. 黄河内蒙古河段河床演变特征分析. 泥沙研究, 2010, **35**(3): 44-50.]

[14] Shi CX, Fan XL, Shao WW *et al*. Channel change of the Inner Mongolian reach of the Yellow River and its causes. *Geographical Research*, 2013, **32**(5): 787-796. [师长兴, 范小黎, 邵文伟等. 黄河内蒙河段河床冲淤演变特征及原因.地理研究, 2013, **32**(5): 787-796.]

[15] Yang YP, Zhang MJ, Li YT *et al*. Suspended sediment recovery and bedsand compensation mechanism affected by the Three Gorges Project. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(7): 1241-1254. [杨云平, 张明进, 李义天等. 长江三峡水坝下游河道悬沙恢复和床沙补给机制.地理学报, 2016, **71**(7): 1241-1254.]

[16] He QH, Yu DQ, Wang LC *et al*. Evolution process and characteristics of lower Jingjiang paleo-channel in recent 400 years. *Earth Science*, 2020, **45**(6): 1928-1936. [贺秋华, 余德清, 王伦澈等. 近400多年下荆江河段古河道演变过程及特征.地球科学, 2020, **45**(6): 1928-1936.]

[17] Hu GW, Mao DH, Li ZZ *et al*. Characteristics and driving factors of runoff and sediment changes fluxes into the Dongting Lake from three outlets in Jingjiang River during past 60 years. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(1): 129-142. [胡光伟, 毛德华, 李正最等. 荆江三口60a来入湖水沙变化规律及其驱动力分析.自然资源学报, 2014, **29**(1): 129-142.]

[18] Zhang R, Zhang SH, Xu W *et al*. Flow regime of the three outlets on the south bank of Jingjiang River, China: An impact assessment of the Three Gorges Reservoir for 2003–2010. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, **29**(8): 2047-2060. DOI: 10.1007/s00477-015-1121-6.

[19] Chen B, Li ZW, Hu XY *et al*. Morphological adjustment and diversion discharge prediction in the three outlets channel of the Jingjiang River. *Water*, 2022, **14**(21): 3479. DOI: 10.3390/w14213479.

[20] Liu XQ. Research on riverbed adjustment response of Jingjiang reach under the change of flow and sediment. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2017, **15**(3): 911-922. DOI: 10.15666/aeer/1503_911922.

[21] Zhu LL, Yang X, Xu QX. Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(7): 1184-1194. DOI: 10.11821/dlxb201707005. [朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应. 地理学报, 2017, **72**(7): 1184-1194.]

[22] Fan YY, Hu CY, Chen MF. Response of bed evolution in Jingjiang River to water and sediment process before and after operation of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2020, **51**(10): 1-6. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.10.001. [樊咏阳, 胡春燕, 陈莫非. 三峡水库蓄水前后荆江河段冲淤与水沙过程响应. 人民长江, 2020, **51**(10): 1-6.]

[23] Sun ZL, Zhu YK. A study on Einstein's bedload transport formula. *Journal of Sediment Research*, 1991, **16**(1): 20-26. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1991.01.004. [孙志林, 祝永康. Einstein推移质公式探讨. 泥沙研究, 1991, **16**(1): 20-26.]

[24] Han QW, He MM. Statistical theory of sediment movement. *Chinese Science Bulletin*, 1980, **25**(2): 82-84. [韩其为, 何明民. 泥沙运动统计理论. 科学通报, 1980, **25**(2): 82-84.]

[25] Hong J, Gao YH, Fan BL. Appraisement on verification methods of sediment carrying capacity formulae. *Journal of Sediment Research*, 2009, **34**(3): 57-61. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2009.03.009. [洪建, 高幼华, 范北林. 水流挟沙力公式检验方法的评价. 泥沙研究, 2009, **34**(3): 57-61.]

[26] Feng PL, Ma XY, Li Q *et al*. Research on the total load sediment-carrying capacity formula of suspended sediment in the lower Weihe River. *Yellow River*, 2012, **34**(9): 1-5, 23. [冯普林, 马雪妍, 李茜等. 渭河下游悬移质全沙水流挟沙力公式研究.人民黄河, 2012, **34**(9): 1-5, 23.]

[27] Liu XN, Cao SY, Huang E *et al*. Study on the sediment transport capacity. *Journal of Sediment Research*, 2000, **25**(4): 35-39. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2000.04.009. [刘兴年, 曹叔尤, 黄尔等. 粗细泥沙挟沙能力研究. 泥沙研究, 2000, **25**(4): 35-39.]