

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.008

黄河下游河道冲淤和综合水沙条件研究

孙嘉悦,张 曼,周建军

(清华大学水利水电工程系)

摘要:为揭示水沙变化对黄河下游河道冲淤的影响、提升工程水沙调控减淤效率,根据黄河“多来多排”输沙特性和河流输沙理论,利用水沙资料修订了钱宁等提出的下游河道冲淤公式,得到具有明确物理意义、更能综合体现水沙量和悬沙级配等条件影响的冲淤公式和综合来沙系数公式。结果表明:修订的冲淤公式具有统一参数与系数,在全时段与各时段模拟的冲淤强度都具有较高精度,可用于研究水库拦沙和泥沙级配改变后的黄河下游综合水沙关系和冲淤调控方式;水库拦沙和调控等改变泥沙级配可显著影响下游河道输沙能力;防洪减淤水库“拦粗排细”优化调度能显著减少下游河道淤积,对维护下游河道长期稳定、保障防洪减淤水库防洪能力等具有重要意义。

关键词:河道冲淤;水沙关系;输沙能力;减淤;黄河下游

中图分类号:TV147;TV882.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2026)05-0069-10

Study on channel erosion and deposition and comprehensive flow-sediment conditions in the lower Yellow River

Sun Jiayue, Zhang Man, Zhou Jianjun

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University)

Abstract: To reveal the impacts of changes in flow and sediment on channel erosion and deposition in the lower Yellow River channel and to improve the efficiency of engineering regulation of flow and sediment for de-siltation, the formula for channel erosion and deposition in the lower reach by Chien Ning et al. was revised using flow and sediment data based on the “more incoming, more discharging” sediment transport characteristic of the Yellow River and the river sediment transport theory. Consequently, an erosion and deposition formula and a comprehensive incoming sediment coefficient with a clear physical meaning, which could more comprehensively reflect the effects of conditions such as flow and sediment volume and suspended sediment gradation, were obtained. The results show that the revised formula has a unified parameter and coefficient, and the simulated erosion and deposition intensities in both the full period and individual sub-periods have high accuracy; furthermore, it can be used to study the comprehensive flow-sediment relationship and erosion and deposition regulation mode in the lower Yellow River after reservoir sediment trapping and sediment gradation alteration; altering sediment gradation through reservoir sediment trapping and regulation can significantly affect the sediment transport capacity of the downstream channel; the optimal operation of “trapping coarse sediment and discharging fine sediment” for flood control and de-siltation reservoirs can largely reduce the deposition in the downstream channel, which is of great significance for maintaining the long-term stability of the downstream channel and ensuring the flood control capacity of the reservoirs.

Key words: channel erosion and deposition; flow-sediment relationship; sediment transport capacity; de-siltation; the lower Yellow River

黄河水少沙多,水沙关系不协调,下游为地上悬河,水库和下游河道持续淤积直接影响防洪安全与生态环境^[1]。近年来,受水库拦沙、水沙调控及引水引沙等工程与人类活动的综合影响,黄河下游河道淤积态势得到一定缓解^[2]。然而,这也导致下游来水来沙量大幅锐减,水沙搭配比例及泥沙颗粒级配等水文特征发生了显著变化,这些变化综合影响下游河道的输沙能力与冲淤规律^[3-5]。在小浪底工程投入运行前,尽管下游泥沙比 1960 年前大幅度减少,但下游淤积量和河槽淤积比例明显增大^[6],河槽淤积萎缩、形成“二级悬河”,平滩流量急剧减小^[7-9]。小浪底水库拦沙显著降低了下游河槽,然而 2018—2020 年汛期水库降低水位排沙,进入下游的平均沙量仅 4.46 亿 t/a,却导致大范围淤积,表明下游河道输沙能力已经严重降低。因此,在水

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202701)

作者简介:孙嘉悦(1998—),女,博士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail:jiayuesun1998@163.com

通信作者:周建军(1960—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhoujj@tsinghua.edu.cn

沙条件变化下,依靠水沙调控提升输沙能力、减少淤积,并保障下游当前及长远的防洪安全,正面临新的挑战。

黄河下游河道冲淤在很大程度上取决于输沙水量和输沙量。径流、沙量及其组合搭配,始终是黄河水沙调控的核心。大量研究^[10-12]通过建立下游冲淤与水沙量之间的关系,提出了维持下游河道总体冲淤平衡的临界调控条件。目前,来沙系数(ζ)被广泛用作衡量下游水沙关系的重要指标^[13]。钱宁等^[14]利用黄河“多来多排”输沙特性建立的经验冲淤公式可明确体现来沙系数及其变化对下游河道冲淤的作用和影响,在下游河道冲淤调控中得到广泛应用^[15]。也有研究^[16-18]基于来沙系数分析下游河段冲淤对水沙条件变化的响应关系,并将其作为判定冲淤平衡的关键指标。悬沙粗细同样是影响下游河道冲淤的关键因素。换言之,黄河下游的水沙关系应由水、沙及泥沙级配共同界定。粗细泥沙在沉降与输移特性上的差异,决定了其对下游冲淤过程的不同贡献。粗沙作为下游河槽淤积的主体,一直是黄河中游水土保持治理的重点^[19-21],其对下游淤积的关键作用已有广泛共识^[22-24]。现有模型与方法,包括分组泥沙冲淤计算^[25-26]和不均匀泥沙数学模型^[27-30],均将粒径分组作为重要参数,理论上可区分不同粒径组的冲淤效应,在冲淤模拟、评价及水沙变化影响分析中发挥了重要作用。但必须指出,这些方法仍难以避开经验参数及人为处理(如一维模型中的河宽及横向冲淤分布、二维模型中的挟沙能力等)带来的不确定性,既难以形成可直接用于调控的综合指标,也无法在变化水沙条件下提供明确的决策支持。另一方面,河道型水库虽具有分选功能^[31],理应拦粗排细,但实测数据显示,三门峡水库建成后,花园口断面悬沙中值粒径反而呈增大趋势,这与减淤目标背道而驰。基于上述问题,亟须深入开展水沙条件变化下黄河下游冲淤规律的演变研究,构建一套能兼顾输沙水量、输沙量及泥沙级配变化,且简明实用、可用于实际调控的冲淤计算方法与判断指标体系。

本文基于输沙平衡关系,结合黄河下游“多来多排”输沙特性及泥沙运动力学中的普适挟沙能力公式,对钱宁等^[14]提出的下游河道冲淤公式进行修订,采用 1952 年以来长期实测的场次洪水冲淤资料进行率定,推求得到物理意义明确、能够适应水沙条件全面变化的下游河道冲淤公式及冲淤平衡判据,并以此为基础初步探讨防洪减淤水库通过“拦粗排细”优化调度的减淤效果,以期工程水沙调控与下游河道防洪减淤实践提供參考。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本文采用的黄河下游干流花园口和利津站 1952—2020 年逐日径流与输沙数据来自《中华人民共和国水文年鉴》,三门峡出入库、小浪底、花园口和利津等站的 1955(1960)—2020 年悬沙级配数据来自黄河水利委员会。黄河流域悬沙粒径测量方法于 1979 年发生变更,1979 年以前采用粒径计法,1980 年开始改用吸管法,导致前后数据存在系统性差异。鉴于标准粒径(吸管法粒径)未能反映细泥沙在静水中的吸附絮凝作用及其对泥沙沉速和水流挟沙能力的影响,而现有泥沙运动理论及公式多建立在沉降粒径基础上,因此本文依据改正方法^[20],将 1980 年以来的分组粒径统一还原为粒径计法粒径,以保证数据序列的一致性与理论适用性。

此外受实测资料限制,本文采用年均悬沙级配代表该年份内场次洪水的悬沙级配。对于黄河下游而言,一般年份洪水期间输沙量占绝对数量,年均悬沙级配主要由洪水期间输沙决定,因此采用年均悬沙级配基本可以反映场次洪水悬沙粗细变化特征及其对河道输沙能力的宏观影响。

1.2 场次洪水统计与实测冲淤强度

基于花园口与利津站 1952—2020 年日均流量过程,选取花园口站各年洪峰流量超过 2 500 m³/s 且能完整演进至利津站的洪水过程(不含最大洪峰流量超过 10 000 m³/s 大漫滩洪水)共 245 场次。这些场次洪水能体现天然和人工调控下的水沙组合和泥沙级配变化。洪水演进到花园口和利津站的起止时间不同,但统计时需保证各站洪水历时相同,以便后续采用沙量平衡法计算冲淤强度^[31]。按沙量平衡,从花园口到利津河段的场次洪水冲淤强度为:

$$D_{sm} = (W_{s1} - W_{s2} + \Delta W_{s1-2})/T \tag{1}$$

式中: D_{sm} 为河段在场次洪水中的实测冲淤强度(即日冲淤量),万 t/d; W_{s1} 、 W_{s2} 分别为河段进口(花园口)和出口(利津)断面输沙量,万 t; ΔW_{s1-2} 为区间沙量,万 t; T 为洪水历时,d。

由于花园口至利津河段几乎没有主要支流汇入,且该河段引黄主要集中在春灌期,而本文统计的场次洪水多发生在汛期,因此可认为场次洪水区间沙量可忽略。245 场实测洪水平均流量范围为 700~7 000 m³/s、

含沙量范围为 0~250 kg/m³, 冲淤强度范围为-1 200 万~4 600 万 t/d (图 1)。

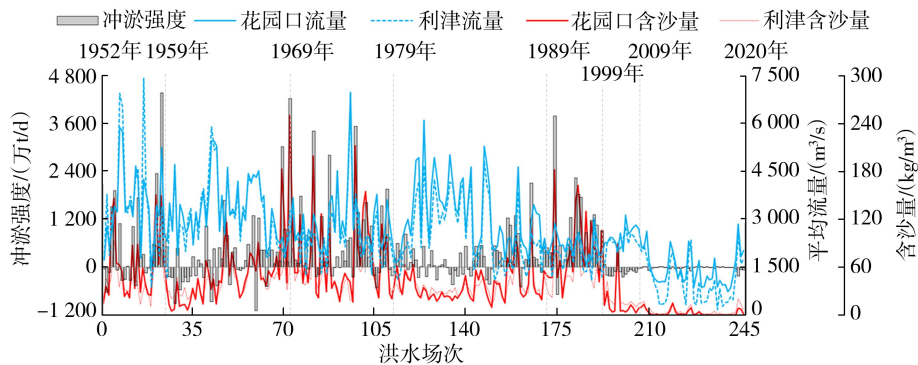
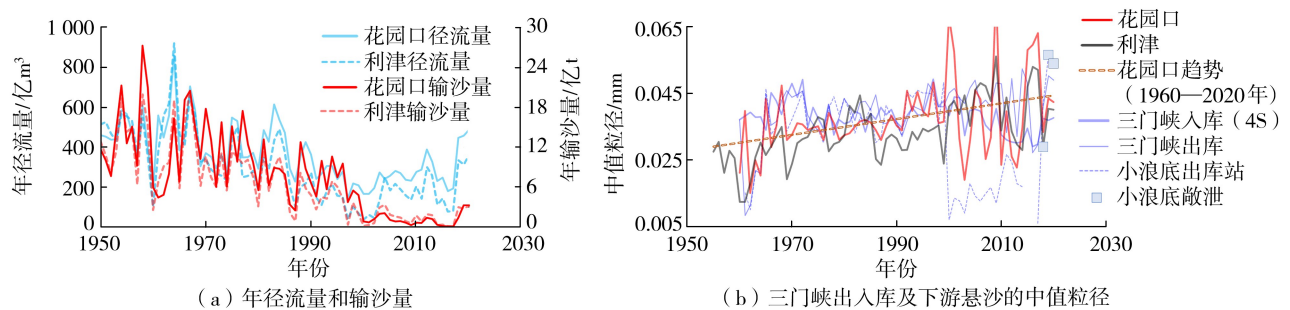


图 1 花园口—利津河段 1952—2020 年 245 场洪水的场次平均流量、含沙量和冲淤强度

Fig. 1 Event-averaged flow, sediment concentration, and erosion and deposition intensity of 245 floods in Huayankou-Lijin reach from 1952 to 2020

1.3 水沙特征

黄河下游水沙条件发生的剧烈变化(图 2)与大型水库的建设与运行密切相关。天然时期(1952—1959 年)来水、来沙量较大,但下游河道(花园口—利津段)淤积相对较少(输沙量法计算的淤积比为 18.7%)。1961—1964 年三门峡蓄水运行期间大量拦沙^[32],花园口、利津多年平均悬沙粒径分别为 0.024、0.022 mm,下游河道冲刷量约为 15.2 亿 m³。1965—1973 年三门峡改为滞洪排沙运用方式,蓄水位大幅降低,前期水库内淤积的泥沙被冲刷出库,出库悬沙粒径显著增加,下游河道回淤 23.3 亿 m³;1974—1985 年三门峡改蓄清排浑运用方式,水库“拦粗排细”作用减弱,下游来沙量偏小,河道时段淤积量约为 6 亿 m³,其中后期冲刷为主、利津悬沙粒径明显变粗,主河槽有较多冲刷。1986 年龙羊峡水库建成投入运行,汛期削峰、非汛期调平流量,加之气候变化和中游水保工程^[33],下游水沙量逐步减小,花园口悬沙粒径缓慢变粗、接近三门峡入库粒径。2000 年小浪底水库投入运用,下泄清水或低含沙水流,进入下游的水量持平但沙量急剧减少,小浪底出库泥沙很细,但花园口悬沙粒径迅速回升,截至 2017 年下游冲刷 14.75 亿 m³;2018—2020 年小浪底水库汛期降低水位,下泄沙量略有增加(平均输沙量为 4.46 亿 t/a),库中淤积的粗沙被冲刷出库,小浪底出库悬沙中值粒径超过历史最大值,下游输沙能力显著降低,较多河段淤积。2000 年后花园口与利津悬沙粒径整体变粗,其中利津多年平均悬沙中值粒径达到 0.042 mm,为历史最大值。



注:三门峡入库(4S)悬沙粒径是龙门、华县、河津和状头干支流 4 站加权平均。

图 2 1952—2020 年黄河下游水沙变化

Fig. 2 Variations in flow and sediment in the lower Yellow River from 1952 to 2020

可见,1952—2020 年期间黄河下游水沙条件的变化不仅体现在径流量和输沙量的减少上,悬沙粒径亦发生了显著改变。尽管同期三门峡入库泥沙呈细化趋势,但基于线性趋势分析,三门峡工程以来花园口泥沙粒径整体上是增加的,1999 年以后花园口悬沙中值粒径较此前时段的增幅约为 25%。泥沙粒径变化对下游河道冲淤规律及输沙能力调整的影响不容忽视。因此,在黄河水沙变化与冲淤调控研究中,亟须将泥沙级配纳入考量。

1.4 河道冲淤计算公式的修正

钱宁等^[14]基于“多来多排”输沙特性,利用天然时段(1952—1959 年)及 1969—1974 年实测场次洪水冲

淤数据,选取未发生普遍漫滩的场次进行统计分析,构建了场次洪水冲淤强度公式:

$$D_s = 137Q^2 \frac{S}{Q} - 0.33 \left(\frac{S}{Q} \right)^{0.75} \tag{2}$$

式中: D_s 为下游冲淤强度,万 t/d ; S 为场次洪水平均含沙量, kg/m^3 ; Q 为场次洪水平均流量, m^3/s 。

式(2)能够依据上游水沙条件,对下游河道冲淤状况进行宏观估算,其形式简洁、实用性强,已被广泛应用于黄河下游冲淤研究及河道治理实践^[15],尤其对水库调水调沙具有重要指导意义。然而,式(2)主要依靠经验统计方法建立,缺少详细的理论依据和明确的物理含义,且主要依据为 1974 年前的实测场次洪水冲淤数据。1986 年以来,受上游水库调控影响,黄河下游水沙条件发生显著变化,尤其是来沙粒径组成明显改变。在此背景下,式(2)已难以有效反映上述变化,导致计算可靠性下降,需要进一步完善。完善前应先明确理解式(2)中各相关项的河流动力学含义,然后基于充分的理论依据和更多实测资料进行统计分析。首先将式(2)改写为一般形式:

$$D_s = \alpha(QS - \beta_0 S^{0.75} Q^{1.25}) \tag{3}$$

式中: α 、 β_0 为系数。式(3)中第一项 QS 为河道上游进口断面的输沙率,因此式(3)实质上为河道上下断面间的沙量平衡关系,则后一项代表出口断面的输沙率。按此理解, α 应是输沙率与冲淤强度之间的量纲转换系数,即 $\alpha = D_s/QS = 10^4 \times 10^3 / 24 / 3\,600 = 116$ 。虽然与式(2)中的回归系数 137 接近(也说明原统计回归系数具有一定的合理性),但作为量纲转换系数的意义更明确,不会造成来沙系数(S/Q)较大时淤积量计算值明显偏大的不合理现象。式(3)后一项实质上是假设出口断面输沙率与下游河道输沙能力成正比。在洪水调度中,一般难以得知河段冲淤量和出口断面输沙量,因此用输沙能力度量河段冲淤程度是合理的。由于黄河下游河道输沙具有“多来多排”输沙特性,输沙能力与上游来沙含沙量具有正比关系^[34]:

$$Q_s = k S_u^a Q^b \tag{4}$$

式中: Q_s 为输沙能力, kg/s ; a 、 b 为经验指数, $a = 0.7 \sim 0.9$, $b = 1.1 \sim 1.3$; k 为比例系数,与河床边界条件及来沙颗粒组成等有关。赵业安等^[34]认为 S_u 为上游进口断面床沙质含沙量,这不能反映总悬浮细沙对综合沉降的影响,故本文采用钱宁等^[14]观点,认为它是全沙含沙量。因此,假设出口断面输沙量与输沙能力成正比即得到式(3)的后一项,其中 β_0 根据实测资料率定。

另一方面,水流输沙能力 $Q_s = Q\Phi$,其中挟沙能力 Φ 是反映河道输沙特征的重要指标。根据泥沙运动力学中常用的挟沙力公式^[35],河流挟沙能力与水沙条件的关系为:

$$\Phi = K \left(\frac{U^3}{gH\omega} \right)^m \tag{5}$$

式中: U 为断面平均流速, m/s ; H 为水深, m ; ω 为混合沙加权平均沉速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; K 、 m 分别为挟沙能力系数和指数,对于黄河干支流而言 $m = 0.77$ ^[35]。可见河流输沙能力受悬沙沉速(与悬沙粒径有关)影响,式(2)只能在来沙粗细变化不大的情况下成立。对于黄河下游而言,河道纵向坡降随时间变化不大,在给定坡降(J)和糙率系数($n \propto D_{65}^{1/6}$, D_{65} 为河床表面泥沙中小于该粒径泥沙占比为 65%的粒径)条件下,考虑到河道平均宽度满足河相关系^[36] $B \propto Q^{0.5}$,由式(5)和水流谢才公式^[35]可得到河流输沙能力:

$$Q_s \propto K \left(\frac{J}{n^2} \right)^{1.2m} \frac{Q^{1+0.3m}}{\omega^m} \tag{6}$$

黄河下游含大量细颗粒的混合沙,其沉降特性与一般粒径较粗的高含沙水流存在显著差异^[34]。在较低含沙量条件下,细沙絮凝作用可增大颗粒沉速;而当含沙量升高时,絮凝结构逐渐发展为网状,致使颗粒间沉降相互阻碍,综合沉速反而减小。钱意颖等^[37]针对混合沙静水群体沉降随含沙量变化的规律,开展了多组试验,发现较粗混合沙的沉降特性与一般高含沙水流基本一致,而较细混合沙(中值粒径为 0.042 mm)则表现出显著的絮凝效应。若忽略极低含沙量情形,试验数据表明黄河混合沙平均沉速与含沙量成反比关系:

$$\omega \propto w/S_u^c \tag{7}$$

式中: w 为静水沉速, $w = \sum p_i w_i$, m/s ; c 为指数; p_i 、 w_i 分别为分组 i 的悬沙比例和沉速^[38]。黄河泥沙中含有一定比例的黏性细颗粒,式(7)显示沉速在低含沙量时增大(甚至超过静水沉速)和高含沙量时剧烈减小,符合一般絮凝作用的规律^[35]。将式(7)代入式(6),并令 $a = cm$ 、 $b = 1 + 0.3m$ 、 $K_1 = K(J/n^2)^{1.2m}$,得到与式(4)

相似的另一“多来多排”输沙能力公式：

$$Q_s = \frac{K_1}{w^m} S_u^a Q^b$$

(8)

指数 $c=0.94\sim1.00$ 时,平均沉速式(7)可拟合钱意颖等^[37]较细混合沙的试验结果。取 $m=0.77$ 时,可得 $a=0.724\sim0.77$ 和 $b=1.231$ 。由此得到的式(8)与式(4)指数完全一致,且包含泥沙粗细变化,二者在理论上完全等效,只是式(4)是在近似假设泥沙粗细不变的特殊条件下得到的。将式(2)对应时段(1952—1959 年,1969—1974 年)的平均静水沉速记为 w_0 ,可将式(8)更明确表示为：

$$Q_s = K_0 \left(\frac{w_0}{w} \right)^m S_u^a Q^b$$

(9)

式中： K_0 为挟沙能力系数,由此可得到既与一般河流泥沙运动规律相吻合、又能兼容式(4)中“多来多排”输沙特性的输沙能力公式。假设出口断面输沙率与输沙能力成正比,用式(9)的输沙能力替代式(3)的出口断面输沙率则得到修订的下游冲淤强度：

$$D_s = \alpha \left[QS - \beta \left(\frac{w_0}{w} \right)^m S_{du}^a Q_d^b \right]$$

(10)

式中： Q_d 为出口断面流量, m^3/s ; β 为比例系数; S_{du} 为出口断面的上游来水含沙量, kg/m^3 。计算 S_{du} 时,可采用距利津站较近的冻口站或直接采用利津站含沙量作为“多来多排”因子,反映出口输沙特征。因此,修订后的冲淤强度公式(式(10))包含了沉速变化,能够反映悬沙粒径整体粗细变化对河道输沙能力的影响,可计算在水沙量与泥沙级配共同变化下的河道冲淤强度。

1.5 确定 β

式(10)的比例系数 β 需通过实测资料率定。采用最小二乘法,定义式(1)计算实测淤积强度(D_{sm})与式(10)计算冲淤强度(D_s)的误差为：

$$\varepsilon = \sum \{ \alpha [QS - \beta (w_0/w)^m S_{du}^a Q_d^b] - D_{sm} \}^2$$

(11)

当拟合误差最小时 ($d\varepsilon/d\beta=0$) 可得 β ：

$$\beta = \frac{\sum (\alpha QS - D_{sm}) (w_0/w)^m S_{du}^a Q_d^b}{\alpha \sum [(w_0/w)^m S_{du}^a Q_d^b]^2}$$

(12)

基于式(12),分别根据式(2)对应时段(1952—1959 年,1969—1974 年)和三门峡蓄水后(1961—2020 年)实测场次洪水水沙资料可率定得到式(3)与式(10)的系数 β_0 与 β 。

2 公式验证与讨论

2.1 公式验证

利用不同公式(表 1)对黄河下游 1952—2020 年场次洪水冲淤强度进行模拟计算,其中算例 0 完全采用原经验参数。各算例的冲淤强度计算值与实测值如图 3 所示,整体和各时段计算结果与实测值的 R^2 见表 2。由表 2 可知,修订公式不仅物理意义更为明确,且 R^2 ($R^2=0.80$ 和 $0.84,0.81$) 都较式(2) ($R^2=0.74$) 有所提高。其中式(3)的拟合效果优于式(2)表明采用具有物理意义的量纲转换系数 $\alpha=116$ 更符合实际情况;而式(10)进一步引入沉速项,与实测资料拟合相关性更高。

表 1 黄河下游 245 场洪水冲淤强度模拟计算对比方案

Table 1 Comparison schemes for simulation of erosion and deposition intensity of 245 floods in the lower Yellow River					
公式	算例编号	S_{du} 计算断面	Q_d 计算断面	相关参数	β_0 或 β
式(2)	0	花园口	花园口	$\alpha=137, a=0.75, b=1.25$	0.33
式(3)	1	冻口	利津	$\alpha=116, a=0.75, b=1.25$	0.39
式(10)	2	冻口	利津	$\alpha=116, c=1, m=0.77$	0.41
	3	利津	利津	$a=0.75, b=1.25$	0.38

从时段的拟合效果看,天然时段(1952—1959 年)和下游淤积为主(1965—1974 年和 1986—1999 年)时段的拟合效果更好,在冲刷为主时段(1960—1964 年、1975—1985 年和 2000 年以后)则相对较差。冲刷条件

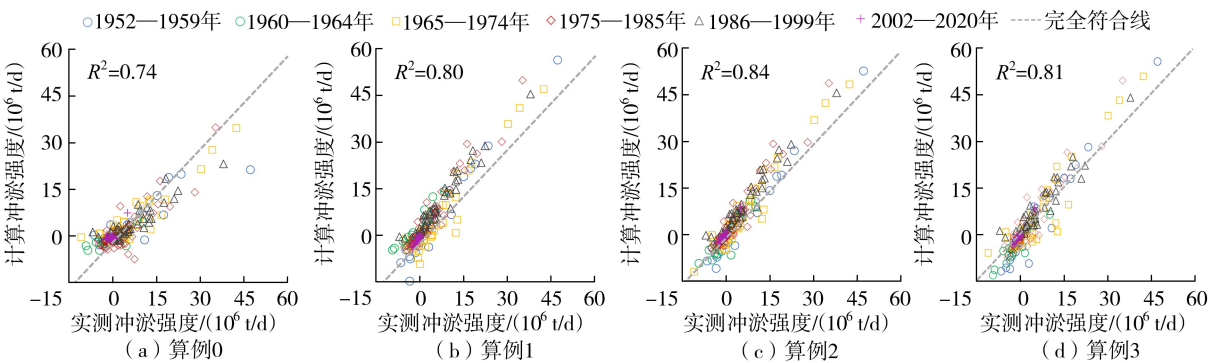


图3 花园口—利津河段 1952—2020 年洪水冲淤强度模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured values of flood erosion and deposition intensity in Huayuankou-Lijin reach from 1952 to 2020 sub-periods

表2 黄河下游冲淤公式全时段和分时段拟合结果

Table 2 Fitting results of erosion and deposition formula for the lower Yellow River in full period and individual sub-periods

时间段	D_{50}/mm	$w/(\text{cm/s})$	R^2					
			算例0	算例1	算例2	算例2*	算例3	算例3*
1952—2020 年	0.034	0.181	0.74	0.80	0.84	0.85	0.81	0.82
1952—1959 年	0.027	0.131	0.74	0.88	0.93	0.95	0.86	0.87
1960—1964 年	0.022	0.127	0.58	0.52	0.64	0.75	0.61	0.71
1965—1974 年	0.029	0.135	0.82	0.86	0.90	0.90	0.83	0.83
1975—1985 年	0.036	0.156	0.66	0.75	0.79	0.80	0.77	0.78
1986—1999 年	0.030	0.140	0.72	0.85	0.85	0.85	0.89	0.89
2000—2020 年	0.042	0.213	0.52	0.49	0.74	0.75	0.66	0.70

注：*算例是计算时将β减小10%的结果。

下,下游河道泥沙恢复饱和和受床沙粗细等边界条件限制,致使出口输沙量与输沙能力之间存在较大偏差。一方面,冲刷引起的床沙粗化会削弱河道输沙能力;另一方面,冲刷导致的河道纵坡降调平亦将进一步降低输沙能力。为此,合理的处理方式应将糙率、坡降等因素纳入修正因子进行统一率定。然而,相关实测资料严重匮乏,率定工作面临较大困难。为考察冲刷条件下河道输沙能力的降低效应,在算例2和3中将比例系数减小10%,以模拟出口输沙能力降低10%对计算结果的影响。结果表明,两算例各时段的相关系数均有提高。据此可见,在实际应用中,冲刷阶段适当减小该比例系数,可取得更好的模拟效果。当然,若要实现冲刷情景的严格定量计算,仍需进一步获取床沙粗化程度、糙率系数等实测数据。

根据上述比较,黄河下游洪水冲淤与包括泥沙级配变化因素在内的水沙条件相关性更高,修订公式能更全面地反映水沙变化对下游河道冲淤的综合影响,物理意义更为明确。近几十年来和今后相当长时期内,黄河下游水沙都受到水库调度控制,泥沙级配变化尤为显著,因此引入平均沉速作为修正因子更符合实际情况且更能适应下游实际冲淤计算的需要。这对工程控制下的黄河下游水沙调控和河道淤积控制具有重要意义。

2.2 讨论与分析

2.2.1 修订公式的应用问题

式(10)第2项在计算时采用下游实测资料,但是在实际应用中下游水沙资料一般未知,直接应用还存在困难,这也是钱宁等^[14]采用进口水沙资料的主要原因。在水沙调控体系下,防洪一般需要控制下游洪水漫滩,在调度决策中假设下游沿程取水汇流量较小也是合理的。因此,可假设场次洪水上下游平均流量不变,只需考虑河道冲淤对下游泥沙含沙量修正。根据输沙平衡,扣除冲淤量即可得出口含沙量 $S_d = S - D_s/\alpha Q$,考虑到下游河道相对冲淤强度 $(D_s/\alpha QS)$ 较小, $(1 - D_s/\alpha QS)^a \approx 1 - aD_s/\alpha QS$,因此在 $a = 0.75$ 和 $b = 1.25$ 条件下可以得到一个完全依据上游水沙资料计算的近似公式:

$$D_s = \alpha \varphi QS \left(\frac{\beta}{\zeta^{0.25}} \left(\frac{w_0}{w} \right)^m \right)^{\frac{1}{b}}$$

(13)

式中 $\varphi = [1 - 0.75(\beta/\zeta^{0.25})(w_0/w)^m]^{-1}$ 。近似修订公式(13)相比于式(2)在理论层面上更具合理性。但是

需要强调的是,式(13)只在下游淤积相对于来沙量较小时候成立,在较严重冲刷时由于出口泥沙主要不受进口泥沙控制,不建议采用。为评价采用进口资料计算的效果,采用式(13)和 0.9β 计算冲刷情景,得到所有场次洪水下游平均冲淤强度与综合来水来沙条件的关系(图4)。如果仍然与实测的冲淤资料对比,式(13)的相关程度降低($R^2=0.65$),由于没有考虑实际洪水中沿途水沙变化, R^2 降低是合理的。实际洪水调度中,在可假设沿岸流量不变的条件下,用式(13)可以得到合理且比较准确的下游冲淤预测结果。

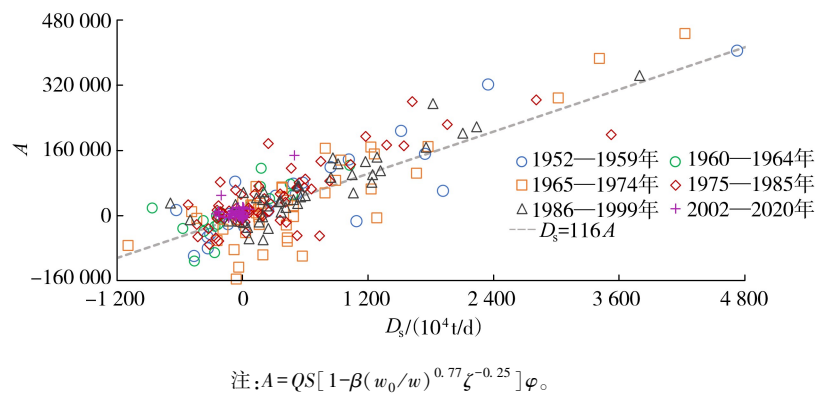


图 4 式(13)计算的下游场次洪水平均冲淤强度与来水来沙条件的关系

Fig. 4 Relationship between event-averaged flood erosion and deposition intensity in the lower reach calculated using Eq. (13) and incoming flow and sediment conditions

2.2.2 综合来沙系数

水沙关系是影响下游河道冲淤的重要因素,来沙系数通常被作为定量反映水沙关系和判断冲淤的重要指标^[39]。由式(2),当下游河道处于冲淤平衡时 $\zeta=0.012$,这与一般通过来沙系数判断下游冲淤平衡的临界来沙系数($0.01\leq\zeta_c\leq0.015$ ^[39])一致。根据式(13),假设泥沙沉速 $w\approx w_0$,则在冲淤平衡时可得 $\zeta=0.021\sim0.028$,比上述界限值略大。但是考虑到沉降速度影响,式(13)给出的临界来沙系数应该是 $\zeta_c=\beta^4(w_0/w)^{4m}$ 。由于1960年以来黄河下游(花园口)泥沙粒径有增加趋势(图2(b)),考虑到实际的沉速变化后,由式(13)给出的冲淤平衡来沙系数仍与原来的经验来沙系数的变化范围基本一致。作为一般情况,式(13)在考虑泥沙级配变化后,影响下游河道冲淤的综合来沙系数应为:

$$\xi = \zeta \left(\frac{w}{w_0} \right)^{4m} \tag{14}$$

综合来沙系数在原来水沙条件基础上,可进一步反映泥沙级配变化对下游河道冲淤的影响。

2.2.3 水库拦粗排细减淤等作用

在正常和合理调度下,河道型防洪减淤水库都具有明显的泥沙分选作用^[30]。粗沙一般会在库尾变动回水段优先淤积,细沙则主要淤积到永久回水库段和坝前,适当控制坝前水位可使细沙大量排出水库。式(14)表明水库拦粗沙不仅可以减小下游来沙量,而且还可通过减小下泄悬沙粒径、降低沉速,进一步减小综合来沙系数,从而对下游河道发挥更大的减淤作用。

泥沙的粗细程度通常由中值粒径(D_{50})与平均沉速(w)综合表征。其中,平均沉速是反映泥沙沉积特性的关键物理参数。为进一步揭示粗沙对下游冲淤的主导作用,表3统计对比了1960—2020年花园口所有年份分组泥沙比例与 D_{50} 和 w 的线性相关性。 D_{50} 与粒径小于0.01 mm 分组泥沙比例的 R^2 最高,细沙比例很大程度决定了 D_{50} ,相关性较高的粗沙是0.05~0.1 mm 分组比例。与 w 相关度最高的分组泥沙比例是粒径范围为0.1~<0.25 mm 的粗沙, $R^2=0.958$;小于0.01 mm 分组泥沙比例的 R^2 较小,0.05~<0.1 mm 分组比例的 R^2 为0.274,粒径小于0.05 mm 泥沙比例

表 3 花园口分组泥沙比例(质量分数 p_i)与 D_{50} 和 w 的相关性($m=0.77$)

Table 3 Correlation of proportion of fractional sediment at Huayuankou (mass proportion p_i) with D_{50} and w ($m=0.77$)			R^2	
泥沙分组	分组粒径/mm	$p_i/\%$	D_{50}	w
1	<0.01	23.80	-0.843	-0.477
2	0.01~<0.025	15.90	-0.749	-0.618
3	0.025~<0.05	22.20	-0.173	-0.624
4	0.05~<0.1	29.60	0.699	0.274
5	0.1~<0.25	7.72	0.681	0.958
6	≥ 0.25	0.65	0.495	0.843

的 R^2 为负;0.25 mm 以上分组比例很小, R^2 反而降低; w 与粒径大于 0.1 mm 粗沙比例的二次拟合 R^2 达到 0.9462 (图 5(a), D 为粒径)。因此, 粒径大于 0.1 mm 的粗沙比例几乎可以决定下游泥沙的平均沉速, 成为影响综合来沙系数的主要因素, 对下游河道冲淤构成重要的作用。

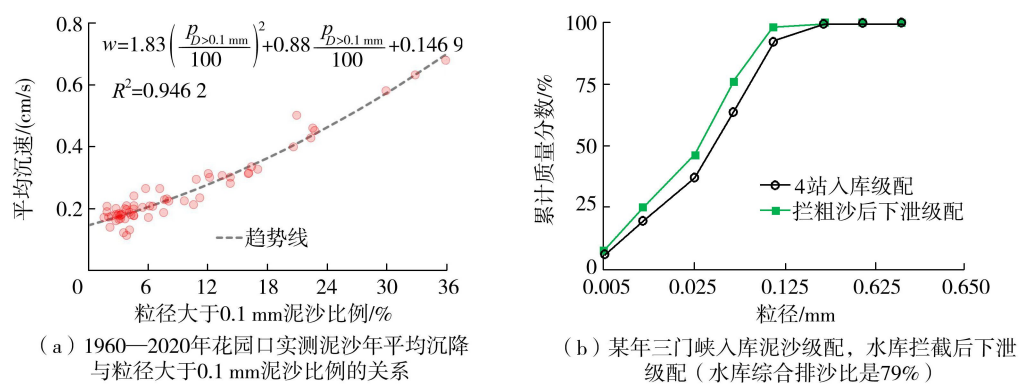


图5 黄河下游悬沙平均沉速的决定因素和粗沙淤积特性示例

Fig. 5 Example of determinants of average fall velocity of suspended sediment and characteristics of coarse sediment deposition in the lower Yellow River

以三门峡某年入库泥沙级配为例(图 5(b)),假设水库拦截 0.25~<0.5、0.1~<0.25、0.05~<0.1、0.025~<0.05 和 0.01~<0.025 mm 分组的 85%、80%、40%、8%、5% 和 1% (按防洪减淤定位的水库完全可以做到)、总拦沙率 21%,则出库泥沙细化、平均沉速减小(入库和出库 w 分别为 0.239、0.135 cm/s)。如果仍以临界来沙系数 $\zeta_c = \beta^4 (w_0/w)^{4m}$ 计算,上述水库拦粗沙调度可将下游河道同流量条件下不淤泥沙的含沙量提高 4.8 倍,这意味着即使水库尽量下泄泥沙,下游河道的淤积强度也可得到显著降低。黄河中游大型工程以防洪减淤为核心建设目标,除特大洪水情形外,常规运行下“拦粗排细”与预留防洪库容的防洪目标高度一致,防洪能力可得到充分保障。水库排沙效果与坝前水位密切相关,若能依据减淤定位合理确定汛限水位,则上述优化调度完全可以实现。同时,黄河泥沙具有较强的吸附能力,且富含磷等生源物质,是黄河水域及邻近海洋初级生产力的重要营养来源,这也是黄河以有限径流支撑广阔流域生境的关键原因。然而,干流大型水库的大量拦沙已显著改变了泥沙及磷等物质的河流通量^[40-41],大坝拦截使得原本输向下游和海洋的生源物质滞留于河流上游,转化为潜在的污染源,这是大坝对河流生态环境的主要影响之一^[42-43]。按前述优化调度原则,可在保障下游减淤的前提下尽可能多排细沙,促进磷等物质通量趋于平衡。因此,优化调度不仅对当前和长远防洪安全具有重要意义,也是水利工程面向流域生态环境保护、切实降低不利影响的重要发展方向。

3 结 论

- a. 钱宁等提出的黄河下游冲淤公式(式(2))简明、对河道冲淤评估十分重要,但公式局限于经验统计和短期资料,不能反映下游泥沙级配变化的影响。本文基于此提出物理意义更为明确、能全面体现水沙关系及其综合作用的修订公式,利用 1952—2020 年 245 场洪水冲淤资料对公式系数进行率定,得到统一的参数和系数,全时段和分段冲淤计算相关性都得到提高(在以冲刷为主时段的相关性相对较差,但理论框架可给出主要原因,通过调整经验参数适当降低冲刷期间输沙能力可以显著提高相关性)。
- b. 来沙系数是表征黄河水沙关系及判别河道冲淤状态的重要指标。本文基于修订后的冲淤公式,提出了能够综合反映水沙总量与悬沙级配变化的综合来沙系数;其中,代表冲淤平衡的临界来沙系数更能体现变化条件下河道冲淤的发展趋势。综合来沙系数更合理和全面反映河流粗沙对下游河流淤积的作用,可以为保障防洪减淤工程切实按照“拦粗排细”调度运行提供定量调控指标。
- c. 水库拦蓄粗泥沙,可显著提高黄河下游河道冲淤平衡的临界来沙系数,并增强河道的输沙能力。在当前来水量持续减少和未来流域侵蚀趋势不确定的背景下,通过水库拦截粗沙以延缓工程拦沙寿命和节约下游输沙用水,具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 陈艳萍,蒋倩倩,刘晶婕. 黄河流域“水资源生态保护高质量发展”空间均衡性诊断[J]. 水利经济,2024,42(1):14-20. (Chen Yanping,Jiang Qianqian,Liu Jingjie. Spatial equilibrium diagnosis of “water resources-ecological protection-high-quality development” in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(1):14-20. (in Chinese))

[2] Chu Zhongxin. The dramatic changes and anthropogenic causes of erosion and deposition in the Lower Yellow (Huanghe) River since 1952[J]. Geomorphology,2014,216:171-179.

[3] Wang Shuai,Fu Bojie,Piao Shilong,et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience,2016,9(1):38-41.

[4] Cheng Yifei,Xia Junqiang,Zhou Mirong,et al. Recent variation in channel erosion efficiency of the Lower Yellow river with different channel patterns[J]. Journal of Hydrology,2022,610:127962.

[5] 吴腾,申孙平,李涛,等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):401-405. (Wu Teng,Shen Sunping,Li Tao,et al. Influence of operation of Sanshenggong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):401-405. (in Chinese))

[6] Zhang Min,Huang Heqing,Carling P A,et al. Sedimentation of overbank floods in the confined complex channel-floodplain system of the Lower Yellow River,China[J]. Hydrological Processes,2017,31(20):3472-3488.

[7] 张金良,仝亮,王卿,等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):41-49. (Zhang Jinliang,Tong Liang,Wang Qing,et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):41-49. (in Chinese))

[8] 端木礼明,张遂芹. 河南黄河二级悬河形成及治理对策[J]. 中国水利,2003(12):58-59. (Duanmu Liming,Zhang Suiqin. Forming,present condition and control measures of secondary suspended rivers of the Yellow River in Henan Province[J]. China Water Resources,2003(12):58-59. (in Chinese))

[9] 张金良. 黄河下游滩区再造与生态治理[J]. 人民黄河,2017,39(6):24-27. (Zhang Jinliang. Reconstruction and ecological management of the Lower Yellow River floodplain[J]. Yellow River,2017,39(6):24-27. (in Chinese))

[10] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报,2016,35(10):1-11. (Hu Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(10):1-11. (in Chinese))

[11] 安催花,鲁俊,吴默溪,等. 黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究[J]. 水利学报,2020,51(4):402-409. (An Cuihua,Lu Jun,Wu Moxi,et al. The threshold value of equilibrium sediment transport in the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(4):402-409. (in Chinese))

[12] 陈翠霞,朱呈浩,赵翔,等. 小浪底水库调控后黄河下游冲淤规律与水沙调控指标[J]. 水科学进展,2024,35(4):606-616. (Chen Cuixia,Zhu Chenghao,Zhao Xiang,et al. Scouring and silting law of the Lower Yellow River and water and sediment regulation indicators after the regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Advances in Water Science,2024,35(4):606-616. (in Chinese))

[13] Wu Baosheng,Xia Junqiang,Fu Xudong,et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River,China [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2008,33(10):1585-1601.

[14] 钱宁,张仁,赵业安,等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J]. 地理学报,1978,33(1):13-24. (Chien Ning,Zhang Ren,Zhao Ye'an,et al. The improvements of the Lower Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica,1978,33(1):13-24. (in Chinese))

[15] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州:黄河水利出版社,1996.

[16] 陈界仁,官学文. 黄河下游河道萎缩过程初步分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(5):501-504. (Chen Jieren,Guan Xuewen. Analysis of lower Yellow River shrinkage[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(5):501-504. (in Chinese))

[17] 许炯心. 黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系[J]. 泥沙研究,2009(4):45-50. (Xu Jiongxin. Sediment transport efficiency of floods in the Lower Yellow River in relation with water-sediment combination and channel geometry[J]. Journal of Sediment Research,2009(4):45-50. (in Chinese))

[18] 张金良,练继建,张远生,等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J]. 水利学报,2020,51(8):897-905. (Zhang Jinliang,Lian Jijian,Zhang Yuansheng,et al. Coordination degree of water-sediment relationship of the Yellow River and regulating effect of the backbone reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(8):897-905. (in Chinese))

[19] 钱宁,王可钦,阎林德,等. 黄河中游粗沙来源区及其对黄河下游冲淤的影响[C]//河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 光华出版社,1980: 184-195.

[20] 徐建华,吕光圻,张胜利,等. 黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2000.

[21] 徐建华,林银平,吴成基,等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2006.

[22] Xu Jiongxin,Hu Chunhong,Chen Jianguo. Effect of suspended sediment grain size on channel sedimentation in the lower Yellow River and some implications[J]. Science in China Series E: Technological Sciences,2009,52(8):2330-2339.

[23] 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. (Yao Wenyi,Gao Guoming. Study on threshold of grouping sediment concentration about floods scouring and silting relative balance in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2008,19(4):467-474. (in Chinese))

[24] 高璐,徐向舟,张红武. 持续冲刷期內黄河下游河床演变特点分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):73-79. (Gao Lu,Xu Xiangzhou,Zhang Hongwu. Characteristics of channel adjustment in Lower Yellow River during continuously scouring period [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):73-79. (in Chinese))

[25] 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[J]. 水科学进展,2022,33(3):506-517. (Cheng Yifei,Xia Junqiang,Zhou Meirong,et al. Effects of grouped suspended sediment transport on channel evolution in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2022,33(3):506-517. (in Chinese))

[26] 申冠卿,张原峰. 黄河高含沙洪水调控与局部河段滞沙研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2017.

[27] 李肖男,钟德钰,王彦君,等. 变化环境下黄河下游治理模式对河床冲淤的影响[J]. 水力发电学报,2017,36(9):60-74. (Li Xiaonan,Zhong Deyu,Wang Yanjun,et al. Effect of training strategies on fluvial process in Lower Yellow main stream under hydrological changes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(9):60-74. (in Chinese))

[28] Van Maren D S,Winterwerp J C,Wu B S,et al. Modelling hyperconcentrated flow in the Yellow River[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(4):596-612.

[29] 张防修,史玉品,王明,等. 黄河下游河道冲淤模型的构建与验证[J]. 人民黄河,2019,41(3):26-30. (Zhang Fangxiu,Shi Yupin,Wang Ming,et al. Construction and verification of the channel scouring and siltation model in the Lower Yellow River[J]. Yellow River,2019,41(3):26-30. (in Chinese))

[30] Zhou Jianjun,Zhang Man,Cao Huiqun. Removing coarse sediment by sorting of reservoirs[J]. Science China Technological Sciences,2011,54(4):903-913.

[31] 申冠卿,张原峰,尚红霞. 黄河下游河道对洪水的响应机理与泥沙输移规律[M]. 郑州: 黄河水利出版社,2008.

[32] 唐德善. 三门峡水库对黄河冲淤分析[J]. 河海大学学报,1996,24(6):77-82. (Tang Deshan. Analysis of Sanmenxia Reservoir-induced sourcing and silting in the trunk of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University,1996,24(6):77-82. (in Chinese))

[33] Wang Junjie,Shi Bing,Zhao Enjin,et al. The long-term spatial and temporal variations of sediment loads and their causes of the Yellow River Basin[J]. Catena,2022,209:105850.

[34] 赵业安,潘贤弟,樊左英,等. 黄河下游河道冲淤情况及基本规律[C]//黄河水利委员会水利科学研究所. 科学研究论文集(第1集): 泥沙、水土保持. 郑州: 河南科学技术出版社,1989.

[35] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社,1991.

[36] Leopold L B,Maddock T J. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications[M]. Washington:U. S. Government Printing Office,1953.

[37] 钱颖颖,杨文海,赵文林,等. 高含沙水流的基本特性[C]//中国水利学会. 河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 光华出版社,1980(1): 184-195.

[38] SL 42—2010 河流泥沙颗粒分析规程[S].

[39] 胡春宏. 黄河水沙过程变异及河道的复杂响应[M]. 北京: 科学出版社,2005.

[40] Syvitski J P M,Vörösmarty C J,Kettner A J,et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. Science,308(5720):376-380.

[41] Maavara T,Parsons C T,Ridenour C,et al. Global phosphorus retention by river damming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(51):15603-15608.

[42] Zhou Jianjun,Zhang Man,Lu Pingyu. The effect of dams on phosphorus in the Middle and Lower Yangtze river[J]. Water Resources Research,2013,49(6):3659-3669.

[43] 周建军,张曼. 当前长江生态环境主要问题与修复重点[J]. 环境保护,2017,45(15):17-24. (Zhou Jianjun,Zhang Man. On the forefront ecological and environmental problems of the current Yangtze River and restoration priorities[J]. Environmental Protection,2017,45(15):17-24. (in Chinese))