

Study of Critical Sediment Discharge under Equilibrium between Scouring and Deposition in the Lower Reaches of the Yellow River

Shijie Zhang

Anhui Provincial Key Laboratory of Water Resources and Hydraulic Engineering, Anhui and Huaihe River Water Resources Research Institute, Bengbu Anhui
Email: shijie8433@163.com

Received: Jun. 16th, 2017; accepted: Jul. 1st, 2017; published: Jul. 7th, 2017

Abstract

The characteristics of scour and deposition of Sanmenxia reservoir and Xiaolangdi reservoir different application period in the lower reaches were analyzed. Based on previous researches on critical flow of different sediment concentration under equilibrium between scouring and deposition in the lower reaches of the Yellow River, using daily flow of Huayuankou and Gaocun hydrologic station, different hydrological years are divided by annual runoff; the typical representative years of different hydrological years are normal water year (from 1976 to 1978), wet water year (from 1982 to 1985) and dry year (from 1986 to 1988). The critical sediment discharges of different hydrologic years were calculated using a summary of the estimation methods. The lower reaches of Yellow River is in equilibrium between scouring and deposition, which is 6.54×10^8 t, 8.83×10^8 t and 3.95×10^8 t in normal year, wet year and dry year respectively, with an average of 6.44×10^8 t. It provides scientific basis for the lower reaches regulation of the Yellow River.

Keywords

Equilibrium between Scouring and Deposition, Critical Sediment Discharge, Lower Reaches of the Yellow River

黄河下游冲淤平衡的临界输沙量研究

张世杰

安徽省水利部淮委水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠
Email: shijie8433@163.com

收稿日期: 2017年6月16日; 录用日期: 2017年7月1日; 发布日期: 2017年7月7日

作者简介: 张世杰(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水土保持与水生态科研与规划设计工作。

文章引用: 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.
<https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.64047>

摘要

本文分析了三门峡水库和小浪底水库不同运用时期黄河下游冲淤特征,在总结分析前人有关黄河下游冲淤平衡时的不同含沙量的临界流量成果的基础上,利用花园口、高村水文站逐日水沙资料,通过年径流量大小划分不同水文年,选择不同水文年典型代表年分别为平水年(1976~1978年)、丰水年(1982~1985年)和枯水年(1986~1988年),利用总结的估算方法,推算出不同水文年黄河下游水沙冲淤平衡的临界输沙量为平水年6.54亿t、丰水年8.83亿t和枯水年3.95亿t,平均值为6.44亿t。研究结果可为黄河下游河道治理提供科学依据。

关键词

冲淤平衡, 临界输沙量, 黄河下游

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

黄土高原严重的水土流失不仅造成当地生态环境脆弱,生活贫困,而且致使黄河下游河道淤积,严重威胁着黄河下游的河道稳定和防洪安全。根据三门峡水库修建以前多年平均,每年有4亿t泥沙淤积在下游河道中,形成著名的“地上悬河”[1]。20世纪90年代进入下游河道泥沙量(以花园口站为代表)仅为1950~1960年间平均值的46.6%。然而,由于径流量大幅度减少,黄河下游河道淤积仍较严重。1986~1999年间,下游河道年均淤积量为2.23亿t,下游各测站3000 m³/s水位年均抬升0.10~0.15 m [2]。为此,黄河水利委员会提出了“维持黄河健康生命”的治河理念,其中安全通畅的水沙通道是黄河健康的重要标志之一[3]。黄河下游河道成为一条地上悬河,是水流携带泥沙长期淤积的结果,洪水携带大量泥沙进入下游河道,因水沙条件的差异在下游河道发生冲刷或淤积。国内外学者对黄河下游河道水沙关系进行了大量研究,如严军和胡春宏[4]根据1950~2000年黄河下游河道实测水沙资料,分析得到黄河下游河道输沙水量与单位输沙水量的计算公式;郭少磊等[5]以1960~1999年黄河下游水沙资料为基础,用统计方法对黄河下游不同量级洪水与不同含沙量洪水的输沙规律进行了分析,提出了实现均衡输沙的水沙条件;袁吉栋等[6]根据1950~2000年黄河下游河道汛期实测径流量和输沙量资料,计算得到下游河段处于冲淤平衡状态时的输沙量、输沙水量与单位输沙水量。黄河下游泥沙冲淤特征也是学者的研究热点,如胡春宏等[7]根据1974~1979年实测水沙资料,得到下游冲淤率为0的临界含沙量为21 kg/m³;龙毓骞等[8]根据1950年以来实测水沙资料研究得到黄河下游临界平衡的含沙量也接近21 kg/m³;韩其为[9]从黄河下游河型沿程变化的实际出发,建立河相系数与流量的关系,研究得出了黄河下游泥沙冲淤的临界流量。上述研究主要侧重黄河下游不同量级流量的输沙量及其关系,而对于黄河下游不同水文年型的冲淤平衡临界输沙量研究较少。并且,黄河上游河段的来水来沙量、不同泥沙颗粒级配以及不同河段河槽条件等均影响着河流输沙能力,如何在上述约束条件下求出河流达到冲淤平衡时的临界输沙量,对于预测下游河道的发展趋势,以及制定合理的河道治理规划和水库调度运行方式具有重要的现实意义和理论价值。因此,笔者在总结分析前人有关黄河下游冲淤平衡时的不同含沙量的临界流量成果的基础上,利用花园口、高村水文站逐日水沙资料,推算出不同水文年黄河下游水沙冲淤平衡的临界输沙量,以期黄河下游河道治理提供科学依据。

2. 研究资料与方法

黄河下游河道的冲淤平衡与河道来水来沙量密切相关,河道水沙的平衡是一个相对状态,因此,从平均意义上探讨黄河下游冲淤平衡。利用花园口和高村水文站逐日水沙资料(1962~1988年),通过年径流量大小将下游河道划分为不同水文年(丰水年、平水年和枯水年),选择不同水文年典型代表年分别为平水年(1976~1978年)、丰水年(1982~1985年)、枯水年(1986~1988年)。根据黄河流域降雨特性,将1年划分为汛期(7~10月)和非汛期(11月至翌年6月)。利用不同水文年逐日水沙资料,划分不同流量级,统计不同流量级出现频次及占汛期和非汛期总时间(d)的比例(P_i),以 P_i 作为黄河下游冲淤平衡临界输沙量的权重系数,结合前人[9][10]对黄河下游冲淤平衡时不同含沙量的临界流量值,总结出不同流量级临界含沙量。在此基础上,利用加权平均法,计算出汛期和非汛期不同流量级流量的临界含沙量,再乘以汛期和非汛期径流量,即得到汛期和非汛期的临界输沙量。临界含沙量计算公式为[11]:

$$S_c = \sum_{i=1}^n (S_{ci} P_i) \quad (1)$$

式中: S_c 为汛期或非汛期的临界含沙量, kg/m^3 ; S_{ci} 为 i 流量级的临界含沙量, kg/m^3 ; P_i 为 i 流量级出现频次占某时段(汛期或非汛期)的比例, %。

3. 黄河下游冲淤特征

3.1. 三门峡水库不同运用时期的冲淤特征

1960年三门峡水库开始蓄水运用,黄河下游来水来沙的变化使得河道的冲淤情形也随之发生改变[12]。

(1) 蓄水运用期。至1964年10月期间共拦沙44.10亿t,下游河道平均含沙量 10.28 kg/m^3 ,为1960~1996年平均含沙量的38.0%。在此期间下游河道共冲刷泥沙27.80亿t,花园口至利津河段冲刷量占全下游冲刷量的66.0%。

(2) 滞洪排沙期。1964年11月至1973年10月,水库采用滞洪排沙运行方式,平均含沙量达到 38.33 kg/m^3 ,为1960~1996年含沙量平均值的1.43倍,期间河道共淤积泥沙39.42亿t,花园口至利津河段淤积量占全下游的77.6%。

(3) 蓄清排浑运用。1973年11月至1996年6月,下游河段平均含沙量 25.92 kg/m^3 ,为1960~1996年平均值的97%;下游淤积有所减弱,淤积泥沙24.70亿t,其中花园口以上冲刷0.61亿t,淤积主要发生在花园口至艾山河段。

由上述分析可知,除三门峡水库运用初期蓄水运用下游河道发生冲刷外,其余两个运用期,花园口至艾山河段均是主要淤积河段,淤积量分别占全下游的66.8%和85.0%。

3.2. 小浪底水库运用初期下游冲淤特征

黄河小浪底水库于1999年10月开始蓄水,由于水库下泄清水使得下游河道全线冲刷。如表1所示:2000~2007年黄河下游(小浪底至利津河段)汛期来水691.5亿 m^3 ,仅占总来水量的38.1%;同期下游河道汛期来沙4.97亿t,占全部来沙的93.6%,下游年均来沙量不到1986~1999年平均来沙量的9.0%。河道共冲刷15.55亿t,年均冲刷达1.94亿t,其中汛期冲刷10.35亿t,占总冲刷量的66.6%。期间小浪底水库库区年均淤积泥沙约4.20亿t。

由此可见,黄河下游河道的冲淤与来水来沙条件密切相关。从三门峡水库历年冲淤资料来看,下游淤积主要集中在花园口至艾山河段,然而1999年小浪底水库开始运行后,水库下泄清水,下游河道普遍发生冲刷。胡一三和张晓华[13]根据黄河下游多年断面资料研究表明,花园口至高村是二级悬河最为发育的河段,各断面滩槽高差均为负值,大部分达到-1.0m以上。这与黄河下游泥沙淤积主要发生在花园口至高村河段密切相关。通过以上分析,选择黄河下游花园口至高村河段作为研究的代表河段,研究花园口至高村河段达到冲淤平衡时的临界输沙量显得尤为重要。

4. 临界输沙量研究

以前人[9] [10]对黄河下游河道冲淤临界含沙量和流量关系的研究结果为基础, 总结出不同流量级的临界含沙量, 即流量级为<1000、1000~2000、2000~3000 和 3000~4000 m³/s 的临界含沙量分别为 10、20、25 和 35 kg/m³。以花园口至高村河段为代表, 依据孙高虎等[14]根据花园口水文站逐年径流量与多年平均值(1961~1999 年)比值的变异程度得出的水文年型, 即平水年(1976~1978 年)、丰水年(1982~1984 年)和枯水年(1986~1988 年)平均径流量分别为 411.1 亿 m³、525.7 亿 m³ 和 292.3 亿 m³, 并统计各流量级流量出现频次, 见表 2。

根据式(1)和表 2 计算出不同水文年汛期和非汛期达到冲淤平衡的临界含沙量, 由于流量大于 4000 m³/s 以后下游河道易发生冲刷和漫滩现象[12], 故忽略此流量级的临界含沙量计算。利用典型代表年汛期和非汛期来水量, 求得不同水文年典型代表年份汛期和非汛期临界输沙量(表 3)。花园口断面不同水文年典型代表年份汛期和非汛期临界输沙量分别为平水年 4.60 和 1.94 亿 t、丰水年 5.95 和 2.88 亿 t、枯水年 2.43 和 1.52 亿 t, 不同水文年临界输沙量分别为平水年 6.54 亿 t、丰水年 8.83 亿 t 和枯水年 3.95 亿 t, 平均值为 6.44 亿 t。也就是说在平均状态下, 进入下游河道泥沙在 6.44 亿 t 左右时, 下游河道将处于临界的冲淤平衡状态; 当进入下游河道泥沙大于 6.44 亿 t 时, 下游河道将处于淤积状态; 相反, 当来沙量小于 6.44 亿 t 时, 下游河道将出现冲刷。

而高村断面不同水文年典型代表年份汛期和非汛期临界输沙量分别为平水年 4.25 和 1.64 亿 t、丰水年 5.88 和 2.47 亿 t、枯水年 2.00 和 1.22 亿 t, 不同水文年临界输沙量分别为平水年 5.89 亿 t、丰水年 8.35 亿 t、枯水年

Table 1. Condition of water and sediment with annual distribution of scour and deposition in the lower reaches of the Yellow River
表 1. 2000~2007 年黄河下游水沙条件及冲淤的年内分布

| 年份 | 时段 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2000~2007 |
|--------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 径流量(10 ⁸ m ³) | 汛期 | 49.9 | 46.5 | 91 | 135.2 | 83.2 | 86.4 | 82.2 | 117.1 | 691.5 |
| | 非汛期 | 105.9 | 132.1 | 112.8 | 77.1 | 202.7 | 149.6 | 198.5 | 142.8 | 1121.5 |
| | 全年 | 155.8 | 178.6 | 203.8 | 212.3 | 285.9 | 236 | 280.7 | 259.9 | 1813 |
| 输沙量(10 ⁸ t) | 汛期 | 0.05 | 0.24 | 0.73 | 1.19 | 1.43 | 0.45 | 0.33 | 0.55 | 4.97 |
| | 非汛期 | 0 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0.07 | 0.18 | 0.34 |
| | 全年 | 0.05 | 0.26 | 0.74 | 1.23 | 1.43 | 0.47 | 0.4 | 0.73 | 5.31 |
| 冲刷量(10 ⁸ t) | 汛期 | -0.3 | -0.27 | -0.93 | -3.27 | -1.14 | -1.64 | -0.95 | -1.85 | -10.35 |
| | 非汛期 | -0.93 | -0.92 | -0.63 | -0.34 | -0.71 | -0.35 | -1.85 | -0.47 | -6.2 |
| | 全年 | -1.23 | -1.19 | -1.56 | -3.61 | -1.85 | -1.99 | -2.80 | -2.32 | -16.55 |

注: 数据引自《小浪底水库拦沙初期运用分析评估报告》(黄河水利委员会, 2007 年)。“-”表示冲刷。

Table 2. Typical characteristics of annual flood and non-flood seasons daily flow characteristics in Huayuankou Hydrological station
表 2. 花园口水文站典型代表年汛期和非汛期逐日流量特征

| 流量级(m ³ /s) | 平水年 | | | | 丰水年 | | | | 枯水年 | | | |
|------------------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| | 汛期 | | 非汛期 | | 汛期 | | 非汛期 | | 汛期 | | 非汛期 | |
| | 频次 | 比例(%) | 频次 | 比例(%) | 频次 | 比例(%) | 频次 | 比例(%) | 频次 | 比例(%) | 频次 | 比例(%) |
| Q < 1000 | 54 | 14.6 | 560 | 77.1 | 14 | 3.8 | 447 | 61.4 | 167 | 45.2 | 672 | 92.3 |
| 1000 ≤ Q < 2000 | 137 | 37.1 | 165 | 22.8 | 95 | 25.7 | 246 | 33.9 | 122 | 33.1 | 54 | 7.7 |
| 2000 ≤ Q < 3000 | 88 | 23.8 | 0 | 0 | 101 | 27.4 | 31 | 4.4 | 52 | 14.1 | 0 | 0 |
| 3000 ≤ Q < 4000 | 35 | 9.6 | 0 | 0 | 64 | 17.4 | 2 | 0.3 | 14 | 3.8 | 0 | 0 |
| Q ≥ 4000 | 55 | 14.9 | 1 | 0.1 | 95 | 25.7 | 0 | 0 | 14 | 3.8 | 0 | 0 |

Table 3. The critical sediment discharge in the balance of erosion and deposition of the Huayunkou and Gaocun section
表 3. 花园口和高村断面冲淤平衡时的临界输沙量

| 水文年 | | 花园口断面 | | | 高村断面 | | |
|-----|-------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | | 汛期 | 非汛期 | 小计 | 汛期 | 非汛期 | 小计 |
| 平水年 | 径流量(10^8 m^3) | 252.65 | 157.54 | 410.19 | 238.7 | 139.1 | 377.8 |
| | 含沙量(kg/m^3) | 18.2 | 12.3 | | 17.8 | 11.8 | |
| | 输沙量(10^8 t) | 4.60 | 1.94 | 6.54 | 4.25 | 1.64 | 5.89 |
| 丰水年 | 径流量(10^8 m^3) | 321.43 | 204.28 | | 307.6 | 186.1 | |
| | 含沙量(kg/m^3) | 18.5 | 14.1 | | 19.1 | 13.3 | |
| | 输沙量(10^8 t) | 5.95 | 2.88 | 8.83 | 5.88 | 2.48 | 8.35 |
| 枯水年 | 径流量(10^8 m^3) | 151.89 | 140.41 | | 135.2 | 117.5 | |
| | 含沙量(kg/m^3) | 16.0 | 10.8 | | 14.8 | 10.4 | |
| | 输沙量(10^8 t) | 2.43 | 1.52 | 3.95 | 2.00 | 1.22 | 3.22 |
| 平均值 | 输沙量(10^8 t) | 4.32 | 2.11 | 6.44 | 4.04 | 1.78 | 5.82 |

3.22 亿 t, 平均值为 5.82 亿 t, 相比花园口断面高村断面计算结果偏小 0.62 亿 t, 偏小比例为 9.6%。这主要是因为洪水的沿程衰减和人类引水引沙有关。黄河下游(花园口至利津)河段是沿黄引水灌溉工程主要河段之一, 年均引沙达 1.2 亿吨[15]。

5. 结论与讨论

根据前人研究资料, 分析了三门峡水库和小浪底水库运行后黄河下游河道冲淤特征, 从三门峡水库历年冲淤资料来看, 下游淤积主要集中在花园口至艾山河段, 然而 1999 年小浪底水库运行后下游河道普遍发生冲刷。利用黄河下游花园口和高村水文站逐日水沙资料, 计算得到下游花园口至高村河段水沙平衡时的临界输沙量为平水年 6.54 亿 t、丰水年 8.83 亿 t 和枯水年 3.95 亿 t, 平均值为 6.44 亿 t。胡春宏等[7]根据 1974~1979 年实测水沙资料, 得到下游冲淤率为 0 的临界含沙量为 $21 \text{ kg}/\text{m}^3$; 龙毓骞等[8]根据 1950 年以来实测水沙资料研究得到黄河下游临界平衡的含沙量也接近 $21 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。依据以上研究结果, 根据花园口站多年平均(1974~2007 年)径流量 320.7 亿 m^3 , 得到下游河道冲淤平衡时的临界输沙量为 6.7 亿 t。许炯心等[1]以 1962~1985 年水沙资料为依据, 得出下游河道泥沙不淤的年全沙来沙量应小于 7.0 亿 t。袁吉栋等[6]根据 1950~2000 年黄河下游河道汛期实测径流量和输沙量资料, 分析得到汛期花园口和高村河段冲淤平衡的输沙量平均值分别为 8.24 亿 t 和 7.82 亿 t, 花园口至高村河段平均值为 8.03 亿 t, 由于没有考虑非汛期情况使得结果有偏差。因此, 本研究得出的 6.44 亿 t 作为平衡状态下黄河下游冲淤平衡时的临界输沙量具有一定的合理性。但需要指出的是, 本研究没有考虑高含沙洪水、下游不同河段的河床及边界条件的差异、洪水沿程衰减及人类引水引沙的影响, 通过高村水文站的计算, 所得结果略小于花园口站, 偏小 9.6%。对于大于 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水, 可能会形成漫滩, 或主槽冲刷滩区淤积现象[12], 在计算临界含沙量时没有考虑此流量级流量的影响, 可能对结果产生一定的偏差; 此外, 结果是在全沙条件下得出的, 对于不同粒径组泥沙, 下游的输沙能力是不同的, 尤其是粒径 $> 0.025 \text{ mm}$ 的粗泥沙是黄河下游淤积主体[1]。另外, 黄河下游水沙条件与黄土高原不同侵蚀类型区产沙量、水土保持综合治理效果及河道泥沙输移比密切相关。因此, 冲淤平衡条件下的临界输沙量有待进一步深入研究, 以得出更合理的结果。

参考文献 (References)

- [1] 许炯心, 胡春宏, 陈建国. 不同粒径组泥沙对黄河下游沉积的影响及其在黄河治理中的意义[J]. 中国科学 E 辑: 技术科

- 学, 2009, 39(2): 310-317.
 XU Jiongxin, HU Chunhong, CHEN Jianguo. Effects of different size groups of sediments on the deposition and its significance in the lower reaches of the Yellow River. *Science in China (Series E)*, 2009, 39(2): 310-317. (in Chinese)
- [2] 申冠卿, 张晓华, 李勇, 等. 1986 年来黄河下游水沙变化及河道演变分析[J]. 人民黄河, 2000, 22(9):10-16.
 SHEN Guanqing, ZHANG Xiaohua, LI Yong, et al. Variation of water and sediment and evolution of river channel in the lower reaches of the Yellow River since 1986. *Yellow River*, 2000, 22(9): 10-16. (in Chinese)
- [3] 刘晓燕, 张建中, 张原峰. 黄河健康生命的指标体系[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 451-460.
 LIU Xiaoyan, ZHANG Jianzhong, ZHANG Yuanfeng. The healthy life index system of Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 451-460. (in Chinese)
- [4] 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.
 YAN Jun, HU Chunhong. Calculation method and application of sediment discharge in the lower reaches of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2004(4): 25-32. (in Chinese)
- [5] 郭少磊, 江恩慧, 孙东坡. 黄河下游河道均衡输沙关系研究[J]. 泥沙研究, 2014(1): 47-52.
 GUO Shaolei, JIANG Enhui, SUN Dongpo. Study on balanced sediment transport in the lower reaches of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2014(1): 47-52. (in Chinese)
- [6] 袁吉栋, 邢红芳, 李彦军, 等. 黄河下游河道冲淤平衡时输沙水量变化规律研究[J]. 水力发电, 2009, 35(7): 14-16.
 YUAN Jidong, XING Hongfang, LI Yanjun, et al. Study on the change law of sediment-transport water volume in the lower Yellow River during the silt stable period. *Water Power*, 2009, 35(7): 14-16. (in Chinese)
- [7] 胡春宏, 郭庆超. 黄河下游河道泥沙数学模型及动力平衡临界阈值探讨[J]. 中国科学 E 辑, 技术科学, 2004, 34(增刊 I): 133-143.
 HU Chunhong, GUO Qingchao. Study on mathematical model of sediment and critical threshold of dynamic balance in the lower reaches of the Yellow River. *Science in China (Series E)*, 2004, 34(Suppl I): 133-143. (in Chinese)
- [8] LONG, Y. Q., LIANG, G. T., ZHANG, Y. F., et al. Range survey of deposition in the lower Yellow River. *International Journal of Sediment Research*, 2002, 17(2): 91-101.
- [9] 韩其为. 黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J]. 泥沙研究, 2004(3): 1-14.
 HAN Qiwei. Some laws of sediment transport and deposition in the lower reaches of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2004(3): 1-14. (in Chinese)
- [10] 黄河水利委员会勘测规划设计研究院. 黄河下游冲淤特性研究[R], 1999.
 The Yellow River Water Resources Commission Survey Planning and Design Institute. Study on erosion and deposition characteristics in the lower reaches of the Yellow River, 1999. (in Chinese)
- [11] 张世杰, 焦菊英. 基于下游河流健康的黄土高原土壤容许流失量[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 9-15.
 ZHANG Shijie, JIAO Juying. Soil loss tolerance in the Loess Plateau based on the health function of the lower reaches of the Yellow River. *Science of soil and water conservation*, 2011, 9(1): 9-15. (in Chinese)
- [12] 刘继祥, 安催花, 曹芹, 等. 小浪底水库拦沙初期调控流量分析论证[J]. 人民黄河, 2000, 22(8): 26-27.
 LIU Jixiang, AN Cuihua, CAO Qin, et al. Demonstration analysis of regulation and control flow in the initial stage of sediment detention in Xiaolangdi Dam reservoir, Yellow River, 2000, 22(8): 26-27. (in Chinese)
- [13] 胡一三, 张晓华. 略论二级悬河[J]. 泥沙研究, 2006(5): 1-9.
 HU Yisan, ZHANG Xiaohua. Brief discussion on the secondary perched river. *Journal of Sediment Research*, 2006(5): 1-9. (in Chinese)
- [14] 孙高虎. 水沙变异条件下黄河下游河道纵横剖面的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
 SUN GaoHu. Influence of water and sediment variation on the vertical and horizontal profiles of the lower reaches of the Yellow River. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006. (in Chinese)
- [15] 戴清, 张治昊, 胡健, 等. 黄河下游引黄灌区渠系工程技术问题及解决对策[J]. 中国水利, 2008(26): 10-12.
 DAI Qing, ZHANG Zhihao, HU Jian, et al. Technical problems with canal system in water diversion irrigation in the lower reaches of the Yellow River and countermeasures. *China Water Resources*, 2008(26): 10-12. (in Chinese).