黄河下游河道行洪能力对河道萎缩的 响应关系^{*}

李文学

(黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

李 勇 姚文艺 苏运启 张晓华

(黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要 在阐明黄河下游河道淤积萎缩特点的基础上,通过理论推导和野外观测资料分析,探讨了河道淤积萎缩对行洪能力的影响.研究表明,河道行洪能力与河道萎缩具有非线性的响应关系;主河槽床面淤积,造成平滩流量减小,洪水起涨水位抬升;主河槽宽度缩窄,造成洪水水位涨率增大,河道排洪能力降低.

关键词 行洪能力 边界条件 淤积萎缩 泥沙 黄河下游

冲积河流是一个复杂的动态系统,其河道断面形态处于不断的冲淤调整过程中,以适应水沙条件变化及人类活动的影响。作为反馈响应,河道的冲淤调整又会反过来影响其行洪能力的大小。关于河道断面形态与水沙动力条件的函数关系,前人从不同角度已进行了大量的研究,如钱宁等人!!建立的包括有水沙因子的河相关系式; Yang等人!!从最小能耗原理出发提出的河流动态调整过程对流量过程的响应机理; 许炯心等人!!近期研究了黄河下游河道因水沙条件变化所引起的河道萎缩过程中的河床演变趋势。然而,针对黄河下游河道近年来处于萎缩过程中的行洪能力的响应关系,以及断面形态调整对行洪能力的影响作用,尚未进行过系统的研究。本文依据理论分析和野外观测资料统计的方法,就这些问题进行了探讨。认识到了黄河下游河道行洪能力与河道萎缩之间的非线性关系。

²⁰⁰⁴⁻⁰¹⁻¹⁵ 收稿, 2004-07-05 收修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(G19990436)和国家自然科学基金项目(批准号: 50239040)资助

1 黄河下游河道横断面构成及滩槽变化

自然条件下,黄河下游河道横断面一般由主槽、嫩滩(一级滩地)和滩地(二级滩地)三部分组成(图1),主槽和嫩滩合称为河槽或中水河槽.从排洪能力角度看,主槽是河道排洪输沙的主体.嫩滩是主槽在摆动过程中滩地坍塌形成的,没有明显的滩地横比降.嫩滩范围内因植被稀少,阻力较小,亦有较大的过流能力;滩地受植被、村庄、道路等阻水建筑物的影响,过流能力较嫩滩和主槽要小得多.

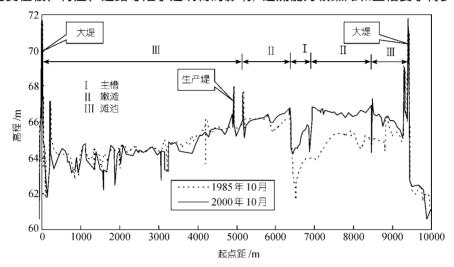


图 1 黄河下游典型断面图

20 世纪 80 年代中期以来,由于自然因素和人类活动的共同作用,下游河道边界条件发生了 3 个方面的显著变化,即河槽淤积萎缩,宽度明显缩窄;相当一部分嫩滩变成了滩地,受茂密高杆农作物的影响,河道行洪阻力明显增加;控导工程至大堤间的滩区受生产堤和众多道路、渠堤、村台等阻水建筑物的影响,局部阻力明显增大.

1.1 中水河槽和主槽边界条件的变化

20 世纪 50 年代, 黄河下游游荡性河道没有统一规划的河道整治工程, 也不存在大规模的生产堤和滩区村台. 河槽宽度一般在 3000~5000 m, 其范围基本与现有河道整治工程所控制的范围相当, 其中包括宽约 800~1500 m 的主槽和宽约 2000~4000 m 的嫩滩. 中水河槽范围内基本没有稳定可耕种的滩地, 河床阻力很小, 如主槽和嫩滩的综合曼宁糙率系数分别约为 0.01 和 0.025.

但是,随着水沙条件的变化及河道整治工程的修建,主槽摆动范围减小,部分嫩滩逐渐被淤积抬高,并逐渐变为滩地.特别是近年来进入下游的洪水较少,中水河槽宽度和其中的主槽宽度明显缩窄^[4].例如,1996年汛前,黄河下游花园

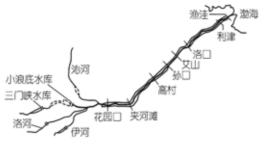


图 2 黄河下游河道示意图

口至夹河滩、夹河滩至高村两河段(图 2)的中水河槽平均宽度分别为1555和1207 m,与20世纪50年代相应河段的河槽宽度约3700和2900 m相比,河槽缩窄是明显的(见表1).1996年,两河段主槽平均宽度分别为923和727 m,大约为20世纪50年代主槽宽度的一半、20世纪80年代中期主槽宽度的

60%. 中水河槽和主槽宽度大幅度缩窄以及由此所导致的大流速带宽度的缩窄,使平滩流量明显降低. 例如, 20世纪 90年代中期,黄河下游河道平滩流量 3000~4000 m³/s,约为 50年代平滩流量的 1/2. 至 2002年汛前,在夹河滩至高村 200多公里的河段,平滩流量仅 2000 m³/s左右.

| | 化1 英/引 | 加力性处区文化 | (+ 12. 111) | |
|---------|--------|---------|-------------------------|-------|
| 河段 | 1956年 | 1972 年 | 1982 年 | 1996年 |
| 铁谢~花园口 | 2806 | 3252 | 3000 | 1937 |
| 花园口~夹河滩 | 3742 | 3644 | 3079 | 1555 |
| 夹河滩~高村 | 2890 | 2707 | 1451 | 1207 |
| 高村~孙口 | 1095 | 714 | 796 | 695 |

表 1 黄河下游河槽宽度变化(单位: m)

1.2 滩地边界条件的变化

黄河下游在没有修建生产堤和控导工程以前,滩区与中水河槽相连,洪水期间,滩区水流和河槽内的水流基本上同步向下游输移. 滩区与主槽和嫩滩的区别主要在于滩面阻力较大, 综合曼宁糙率系数一般在 0.025~0.04 之间, 约为主槽糙率系数的 3~4 倍、嫩滩糙率系数的 1.5 倍. 另外, 由于滩槽水沙交换频繁, 每遇大漫滩洪水淤滩刷槽, 滩地的大量淤积使得滩地横比降明显变缓; 同时, 主槽的冲刷抵消了一部分非洪水期主槽的淤积, 在一个较长时期内基本表现为滩槽的同步抬升, 河道横断面形态变化不大. 但自 1958 年汛后, 黄河下游修建了大规模的生产堤, 进行了河道整治, 从而使得滩区边界条件发生了巨大的变化. 主要体现在以下 3 个方面:

()滩区水动力条件减弱,排洪能力显著降低. 受滩区茂密农作物和众多道路、渠堤等阻水建筑物的影响,滩区水动力条件明显减弱. 天然条件下,滩区水面比降与大河比降较为接近. 但现有河床边界条件下,滩区动能更主要地消耗于克服生产堤口门、拦滩道路和渠堤等局部阻水建筑物的阻力作用,对滩区流速起作用的水面比降仅相当于主槽水面比降的 1/3 左右(见图 3,分别为山东省东明县附近的 3 个滩区). 若借用主槽水面比降替代滩区水面比降进行推算,滩地综合

糙率系数高达 0.06 以上, 甚至超过 0.1, 较 20 世纪 50 年代滩地综合糙率系数偏大 2 倍以上. 按曼宁公式推算, 相应流速减小为天然条件下的 57%, 再考虑植被茂密、村庄范围增大等对滩区肤面阻力的影响, 实际滩区流速不足天然条件下的 1/2.

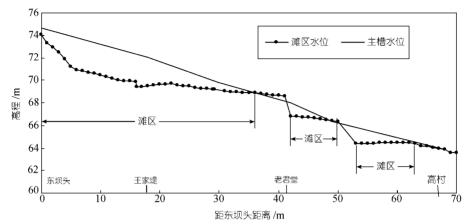


图 3 "96.8"洪水期东坝头至高村河段右岸主槽和滩地水位

- ()滩区地形相对更加低洼,滞洪作用显著增强. 由于嫩滩的大量淤积,使得下游河道滩唇高仰,堤河低洼的局面进一步加剧,受滩区出口附近滩唇持续淤积抬升的影响,在长垣、东明等较大滩区形成了深约1m以上的"水盆"地形,滩区滞洪量增大,"水盆"内漫滩水体在洪水过后也难以自行归槽. 同时,受滩区道路、渠堤等阻水建筑物的影响,滩区水体难以形成畅顺的贯通性流动,滩区滞洪能力显著增强.
- ()滩地横比降增加,防洪压力增大. 由于下游河道边界条件的显著变化,滩槽水沙交换作用减弱,老滩淤积量减小,特别是堤河低洼地带几乎为清水,淤积更少,致使滩地横比降增大、"二级悬河"(或悬河中的悬河)问题更加突出. 特别是滩地范围最大的夹河滩至高村部分河段堤河低洼地带宽度达 2 km 以上,约为主槽宽度的 3 倍,堤河高程已经接近甚至低于主槽深泓点高程(图 1). 由于平滩流量降低、主槽对水流约束能力明显减弱,加上较大的滩地横比降,大大增加了河势在较长河段内大幅度摆动、发生"横河"、"斜河"甚至"滚河"的可能性,防洪压力增大.
- 2 河道行洪能力变化对河道横断面形态调整的响应关系

依据曼宁公式,将河道行洪能力与相应的河床边界条件的关系表示为:

$$Q = \frac{B}{n}H^{5/3}J^{1/2},\tag{1}$$

式中, Q 为流量, B 为河宽, H 为水深, n 为曼宁系数, J 为水面比降. 考虑流量由 Q_1 增加到 Q_2 , 则水深的变化可近似为:

$$\Delta H = (Q_2^{0.6} - Q_1^{0.6})(BJ^{0.5}n^{-1})^{-0.6}.$$
 (2)

由(2)式可以看出,水位的变幅(近似于水深)与河宽、水面比降、河床阻力具有密切的非线性关系.河宽缩窄、河床阻力增大、水面比降减小都会导致相同流量多幅条件下水位变幅的增大,水位流量关系更陡.但河宽和河床阻力的变化对水位变幅的影响更加显蓍.同时,在河流开发治理过程中,河宽的变化一般更加明显.处于主导地位,对洪水水位变幅的影响也最为显著.计算表明,假如其他因素不变,河宽缩窄 1 倍,水位将增加 52%;同样,如果水面比降减小 1 倍,将导致水位增加 23%.如前述分析,现状黄河下游花园口~夹河滩、夹河滩~高村两河段主槽平均宽度约为 20 世纪 80 年代中期主槽宽度的 60%,据此可以推算,同流量的水位升幅将增大 36%.

3 黄河下游河道淤积萎缩对行洪能力的作用

黄河下游河道冲淤演变对排洪能力的作用非常明显. 主槽的淤积抬高及滩槽边界条件的变化, 进一步增加了黄河下游洪水水位的涨率和洪水水位的抬升幅度. 与 1958 年相比, 1996 年花园口水文站 3000 m³/s 流量所对应的水位抬高了 1.52 m; 而 5000 m³/s 流量所对应的水位抬高了 1.88 m. 分析表明, 3000 m³/s 流量的水位升高主要是河床淤积抬升造成的, 洪水水位涨率增大, 主要是滩槽不同部位边界条件变化的结果. 其中, 河槽萎缩、主槽宽度明显缩窄是最为主要的原因之一.

选取游荡性河段综合糙率为 0.01, 由(2)式可求得主槽流量从 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 上涨 到 $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的水位涨幅为:

$$\Delta H = 6.17 (BJ^{0.5})^{-0.6}. (3)$$

图 4 是依据黄河下游不同河段各水文站断面观测资料统计的主槽流量从 3000 m^3/s 上涨到 8000 m^3/s 的水位涨幅与 $BJ^{0.5}$ 的关系^[5],可以看出,尽管黄河下游河道情况十分复杂,特别是不同河段河型和河性差别巨大,但洪水期间水位的涨幅与 $BJ^{0.5}$ 的关系还是较为密切的,经回归分析得

$$\Delta H = 5.55 (BJ^{0.5})^{-0.65},\tag{4}$$

(3)式和(4)式的系数、指数相当接近. 由此再次证明, 主槽的萎缩对行洪能力的确有着显著的影响.

为进一步反映 1986 年以后黄河下游枯水少沙条件下主槽淤积萎缩状况及 其对河道排洪能力影响的河段平均变化情况,表 2 给出了典型洪水期水文站实 测主槽宽度及主槽水位涨幅的统计资料. 1996年与 1985年相比,多数站的主槽宽 度减小了 30%以上; 1996年与 1958年相比,其减幅在 41%~52%之间. 从各断面 主槽变化过程看,除高村站断面缩窄主要集中在 1985 年以前外,其他各断面缩窄主要集中在 1985~1996年间.与主槽缩窄相对应,1996年花园口至利津主槽同流量的水位涨幅较 1958 年增大约 24%~61%.

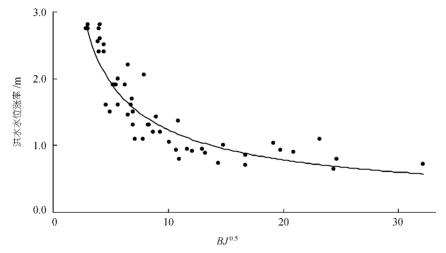


图 4 黄河下游各站水位涨率与 BJ 0.5 的关系

| 主槽宽度/m | | | 1996 主槽宽度减小/% | | 1996 年主槽水位升幅增大/% | | | |
|--------|------|------|---------------|------|------------------|-----------|----------|----------|
| | 1958 | 1982 | 1985 | 1996 | 与 1958 年比 | 与 1985 年比 | 较 1958 年 | 较 1985 年 |
| 花园口 | 1260 | 1200 | 1000 | 600 | 52 | 40 | 61 | 53 |
| 夹河滩 | 1300 | 1000 | 1200 | 700 | 46 | 42 | 61 | 44 |
| 高村 | 1100 | 800 | 600 | 600 | 45 | 0 | 43 | -10 |
| 利津 | 560 | 480 | 500 | 330 | 41 | 34 | 24 | 10 |

表 2 典型洪水测流断面主槽宽度变化及其对洪水位升幅的影响

冲积性河道河床边界条件显著改变引起河道行洪能力明显变化的实例在国内外其他大江大河中并不鲜见. 例如,美国密西西比河自 19 世纪 30 年代开始大规模的河道整治后,主槽宽度大幅度缩窄,像圣路易斯附近河段整治后的主槽宽度仅 600 m左右,约为整治前主槽宽度的 1/2^[6]. 河道缩窄后同流量的枯水水位降低,而中常洪水和大洪水水位却明显抬升,并且洪峰越大,抬升幅度越大. 1993年圣路易斯水文站发生洪峰为 30281 m³/s的大水,相应水位较 20 世纪 30 年代以前同流量级洪水水位升高了约 3.3 m(图 5),其中,相同流量 8000~30000 m³/s的水位升高幅度达 9 m,约为 1942 年以前涨幅 5.5 m的 1.6 倍,基本反比于主槽缩窄幅度的 0.6 次方.

4 结语

黄河下游控导工程的修建对于防洪保安全起到了至关重要的作用,但是大量的控导工程、特别是大规模的生产堤的修建、改变了下游河道的边界条件、使

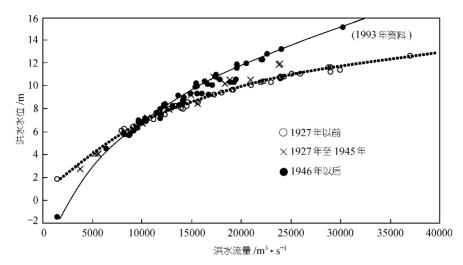


图 5 密西西比河整治后圣路易斯水文站洪水水位变化

得滩槽水沙交换的频次减少、强度减弱,泥沙的淤积范围缩小,部位改变.作为一种长期的累积效应,使得滩区水动力条件减弱,排洪能力显著降低;滩区地形相对更加低洼,滞洪作用显著增强;滩地横比降增加,防洪压力增大.

20 世纪 80 年代中期以来, 黄河长期枯水. 下游河道长期在中小流量作用下, 淤积萎缩. 主槽萎缩一方面表现为河床的淤积抬高, 另一方面表现为主槽宽度的大幅度缩窄, 两者共同作用致使河槽的过水面积减小, 行洪能力降低. 主槽河底高程的淤积抬高造成洪水起涨水位抬升, 主槽宽度的缩窄造成洪水水位张率增大. 而且洪水量级较大时与量级较小时相比. 同流量水位的抬升幅度更大.

鉴于以上分析结果,黄河下游在未来的治理中要更加全面的考虑水沙条件及河道边界条件的变化;处理好河道行洪与滩区(居住人口约 181 万)安全建设的关系;运用小浪底水库调水调沙,改善进入下游的水沙条件,并逐步恢复河道特别是中水河槽的过流能力.

参 考 文 献

- 1 钱 宁, 张 仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987. 70~96
- Yang C T, Song C C S. Dynamic Adjustment of Alluvial Rivers, Adjustments of the Fluvial System. In: Rhodes D D, Williams G P, eds. Kendall & Hunt Publishing, Dubuque Iowa, 1979. 56~67
- 3 许炯心, 孙 季. 黄河下游游荡河道萎缩过程中的河床演变趋势. 泥沙研究, 2003, (1): 10~17
- 4 李 勇, 翟家瑞. 黄河下游河床边界条件的变化. 人民黄河, 2000, (11): 1~2
- 5 李 勇,候素珍,罗怀新,等. 黄河下游主槽宽度变化对洪水水位涨率的影响. 人民黄河, 2000, (11): 7~8
- 6 Stevens M A, Schumm S A, Simons D B. Man-induced Changes of Middle Mississippi River, Journal of Waterways, Harbors, and Coastal Engineering. ASCE, 1975, 101(2): 119~133