水　利　学　报

2013年1月　SHUILI　XUEBAO　第44卷　第1期

文章编号:0559-9350(2013)01-0001-09

黄河下游复式河道滩槽分流特征研究

胡春宏，张治昊

（中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京　100048）

摘要：采用实测资料分析和理论探讨相结合的方法，研究了黄河下游复式河道滩槽分流特征及其主要影响因素。研究结果表明：1986年后，河道萎缩，相同洪水流量下，主槽分流比有所减小，滩地分流比有所增大；1999年后，小浪底水库蓄水拦沙运用，下游河道持续冲刷，主槽过流能力有所恢复，主槽分流比必然有所增大。运用回归分析方法，建立了黄河下游复式河道滩槽分流比与滩槽过水宽度比、过水深度比、过水面积比、流速比、糙率比和主槽宽深比的单因素响应关系和多因素综合关系，在此基础上提出，定量方面，可运用多因素综合关系式依据未来滩槽6项单因素大小对黄河下游复式河道滩槽分流比进行预测；定性方面，在黄河下游滩槽治理过程中，应注意维持主槽一定的平滩流量和较为窄深的断面形态；注意给滩地留出一定的行洪宽度，在必要的行洪宽度内，尽量减少人类活动对滩地的影响，保持滩地畅通的过水通道，保证滩地相应的过洪能力，减轻河道行洪压力，从而达到确保全断面行洪安全的目的。

关键词：黄河下游；复式河道；滩槽分流；滩槽治理

中图分类号：TV133　　**文献标识码：**A

黄河下游河道是典型的复式河道，行水过程中表现出中小水归槽，大水漫滩的显著特征。1986年后，由于龙羊峡和刘家峡水库的建成和运用，加之沿河工农业用水的大量增加及降雨量减少等因素的影响，黄河下游水沙过程发生变异，年际间水沙剧烈减少，年内分配以汛期减少的幅度最大，洪水频次和洪峰流量明显降低，黄河下游河道主槽及嫩滩严重淤积，平滩流量显著减少，“二级悬河”有所加剧[1]。黄河下游河道滩槽分布格局的恶化，增加了河道的防洪负担和治理难度。洪水漫滩后，堤防偎水，部分河段存在较大的顺堤行洪，甚至出现滚河的可能，使堤防发生沖决和溃决的可能性增加。主河槽过流能力的减小，使小洪水漫滩几率增加，滩地淹没加大了滩区群众的财产损失，从而形成“小流量、高水位、大灾害”的局面[2]。深入研究黄河下游复式河道滩槽分流特征对于保障黄河下游行洪安全具有重要的现实指导意义。本文在分析黄河下游复式河道滩槽分流特征的基础上，揭示了滩槽分流特征主要影响因素，依据建立的滩槽分流比的综合影响关系式，提出了滩槽综合治理建议，试图为河道滩槽治理提供技术支撑。

1　黄河下游复式河道滩槽分流特征

1.1　典型洪水过程滩槽水位流量关系　图1(a)为黄河下游“96.8”洪水涨水阶段花园口站水位流量关系图，图1(b)滩地水位流量关系的局部放大图，由图可见，花园口断面滩槽流量随水位的变化特征主要表现为：(1)全断面流量随水位升高的变化过程以漫滩为界存在明显的转折，漫滩前水位随全断面流量增大而升高的斜率要明显大于漫滩后的斜率，反映出，由于滩地开始过流，水流过水宽度变宽，过水面积增大，相同流量下，水位上升速度减小；(2)漫滩后，全断面流量随水位升高而增大的

收稿日期：2008-05-26

基金项目：国家自然科学基金创新群体基金项目(51021006)

作者简介：胡春宏(1962-)，男，浙江人，博士，教授级高级工程师，主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail：huch@iwhr.com

幅度存在一定的变化。漫滩初期，水流过水宽度较窄，滩地过流量较小，随着漫滩程度逐渐增大，水流过水宽度逐渐变宽，滩地过流量逐渐增大，全断面流量随水位升高而增大的幅度也越变越大；(3)主槽流量随水位升高呈增大的趋势，其变化过程以漫滩为界不存在明显的转折，反映出黄河下游复式河道主槽排洪输沙的主体地位，从图中变化线也可看出，漫滩后，主槽流量与全断面流量的差值不大，但随水位的升高，漫滩程度的增大，二者的差值也呈逐渐增大的趋势；(4)滩地流量随水位升高的变化的总趋势也是增大，但对于个别点，由于受主槽冲淤影响，有时随水位的升高也会出现流量减少的情况。比如漫滩初期水位94.05m时，滩地过流量168m^3/s，之后当水位升高至94.13m时，由于主槽冲刷，主槽过流量增大，滩地过流量反而减少至138m^3/s。随着水流漫滩程度的增大，滩地流量随水位升高而增大的幅度也存在一定的变化，漫滩初期，滩地流量随水位升高而增大的幅度小，随着漫滩程度逐渐增大，滩地过流能力逐渐增大，滩地流量随水位升高而增大的幅度有所增大；(5)观察图1还可看出，由于存在洪峰流量的峰前冲刷现象，“96.8”洪水花园口全断面最大流量与洪水最高水位并不对应，造成这种现象的原因是洪峰流量到来之前，主槽的剧烈冲刷使主槽的过流断面迅速增大，主槽平均流速增大，主槽过流量有所增大，部分滩地水流开始回归主槽，漫滩程度有所降低，滩地平均流速减小，滩地过流量有所减小，使得洪峰流量真正到来时，洪水水位反而有所降低，反映出洪水期黄河下游河道主槽冲刷变形剧烈会造成滩槽水位流量关系的复杂变化[3]。

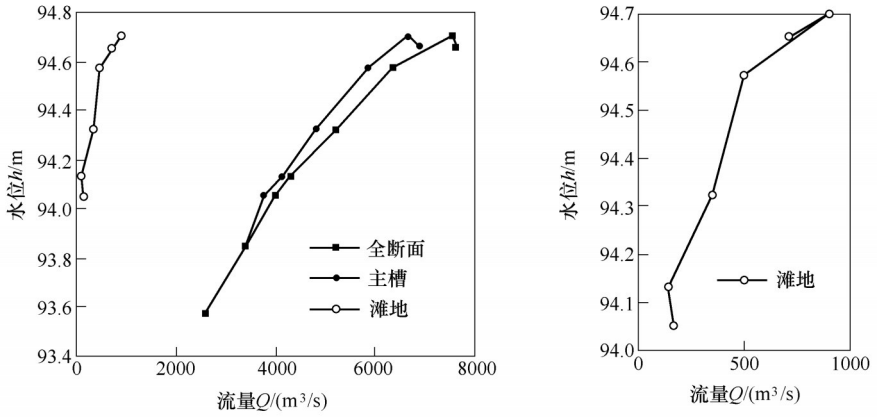

图1　黄河下游“96.8”洪水涨水阶段花园口站水位流量关系

1.2　黄河下游复式河道滩槽分流特征　依据黄河下游复式河道滩槽分流的实际情况，提出表征黄河下游复式断面滩槽分流特征的3个参数ξ_1、ξ_2、ξ，其数学表达式如下：

$$\xi_1 = \frac{Q_m}{Q} \tag{1}$$

$$\xi_2 = \frac{Q_f}{Q} \tag{2}$$

$$\xi = \frac{Q_f}{Q_m} \tag{3}$$

式中：Q_m为主槽流量；Q_f为滩地流量；Q为全断面流量；ξ_1、ξ_2和ξ分别为主槽分流比、滩地分流比和滩槽分流比。

表1是黄河下游复式河道典型断面洪水期滩槽分流特征统计，由表可见：(1)洪水期主槽过流量较大，滩地过流量相对较小。以花园口断面为例，统计的3次典型洪水过程的滩槽分流数据可见，尽管洪峰流量有所差异，主槽分流比为0.79~0.88，滩地分流比为0.12~0.21，滩槽分流比为0.13~0.16，由此可见，洪水期花园口断面滩地过流量远小于主槽过流量，反映出主槽是黄河下游复式河道排洪输沙的主要通道；(2)洪水期滩槽分流沿程变化特征为主槽分流比沿程减小，滩地分流比沿程增大，滩槽分流比沿程增大。以“58.7”洪水为例，花园口断面主槽分流比为0.86，滩地分流比为0.14，滩槽分

流比为0.16，至高村断面主槽分流比减小至0.62，滩地分流比增加至0.38，滩槽分流比增加至0.61，至孙口断面主槽分流比进一步减小为0.6，滩地分流比增加为0.4，滩槽分流比高达0.67，造成这种现象的主要原因是黄河下游复式河道上宽下窄的分布格局，使得黄河下游复式河道上游宽河段主槽的过流能力明显大于下游窄河段主槽过流能力。1986年后，黄河下游河道萎缩期，由于上宽下窄的格局没变，滩槽分流沿程变化的特征没有发生根本的变化，但由于河槽萎缩造成河道上下段主槽分流比都有所降低，而且由于上游宽河段萎缩较严重，主槽分流比降低的幅度也较大[4]；(3)滩槽分流年际变化特征为1950—1985年滩槽分流变化不明显；1986年后河道萎缩期滩槽分流发生明显变化。对比分析“58.7”洪水和“82.8”洪水洪峰流量对应的滩槽分流数据可知，1950—1985年，滩槽分流情况没有发生明显的变化，花园口至高村以上河段主槽过流比在80%左右，高村至孙口段主槽过流比在60%~70%左右。对比分析“82.8”洪水和“96.8”洪水相近流量洪水期滩槽分流数据可知， 1986年后，洪水期主槽分流比有所减少，滩地分流比有所增大，滩槽分流比有所增大，说明黄河下游复式河道滩槽分流情况与主槽的过流能力密切相关，河道萎缩，主槽过流能力大幅度减小，致使很小的洪水流量主槽就漫滩，相同流量下主槽分流比大大降低，对黄河下游复式河道防洪安全十分不利[5]。1999年后，小浪底水库运用至今，进入黄河下游的水沙过程为枯水少沙系列，漫滩洪水发生次数少，洪峰流量小，河道萎缩导致滩槽分流比增大的矛盾并不突出；同时，由于小浪底水库处于蓄水拦沙运用期，除调水调沙和洪水期，以下泄清水为主，黄河下游河道持续冲刷，有效遏制了河道淤积萎缩的局面，主槽的过洪能力有所恢复，主槽分流比有所增大，滩地分流比必然有所减小，滩槽分流比相应有所减小，黄河下游河道的防洪压力得到了一定程度上的缓解。

表1　黄河下游复式河道典型断面洪水期滩槽分流特征统计

洪水	花园口				高村				孙口			
	Q	ξ_1	ξ_2	ξ	Q	ξ_1	ξ_2	ξ	Q	ξ_1	ξ_2	ξ
58.7	11 500	0.86	0.14	0.16	17 400	0.62	0.38	0.61	13 800	0.6	0.4	0.67
82.8	14 700	0.79	0.21	0.26	12 300	0.79	0.21	0.27	12 300	0.78	0.22	0.27
82.8	7 980	0.86	0.14	0.16	8 120	0.93	0.07	0.08	6 390	0.74	0.26	0.35
96.8	7 860	0.88	0.12	0.13	6 810	0.68	0.32	0.46	6 810	0.68	0.32	0.46

2　黄河下游复式河道滩槽分流的影响因素分析

2.1　流量对滩槽分流的影响　图2为花园口滩槽分流特征参数与全断面流量关系图，其中图2(a)点绘了花园口主槽分流比ξ_1、滩地分流比ξ_2与全断面流量Q的关系，图2(b)点绘了花园口滩槽分流比ξ与全断面流量Q的关系，利用回归分析的方法分别建立了花园口3种分流比与全断面流量Q的相关关系式：

$$\xi_1 = -0.14 \ln Q + 2.11 \tag{4}$$

$$\xi_2 = 0.14 \ln Q - 1.11 \tag{5}$$

$$\xi = 0.18 \ln Q - 1.51 \tag{6}$$

式(4)—(6)的相关系数R值分别为0.63、0.63、0.72，反映出花园口滩槽分流特征参数与全断面流量的关系并不十分密切，相比而言，花园口滩槽分流的3个特征参数中，滩槽分流比ξ与全断面流量Q的关系最密切，说明全断面流量Q的变化对滩槽分流比ξ的影响程度相对于全断面流量Q的变化对单纯的主槽分流比ξ_1与滩地分流比ξ_2的影响程度要大。花园口主槽分流比ξ_1、滩地分流比ξ_2与全断面流量Q的相关关系的密切程度相当，由式(1)—(2)的表达式可知，二者并不是相互独立的参数，而是存在以下数学关系：

$$\xi_1 + \xi_2 = 1 \tag{7}$$

所以，ξ_1、ξ_2与全断面流量Q的相关关系的相关系数R值相等。

图2(a)、(b)中关系线的变化趋势表明，花园口主槽分流比ξ_1随全断面流量Q的增大而减小，滩

地分流比ξ_2随全断面流量Q的增大而增大，滩槽分流比ξ随全断面流量Q的增大而增大。随着黄河下游洪水流量的增大，在主槽过流能力基本保持在一定范围的情况下，洪水漫滩程度会逐渐加大，滩地过流量会逐渐增大，成为黄河下游复式河道排洪输沙的一个重要的组成部分，由此可见，尽管洪水期黄河下游复式河道主槽过流量较大，滩地过流量相对较小，但随着洪水流量的增加，主槽分流比逐渐减小，滩地分流比逐渐增大的基本规律不会改变，滩地承受的排洪输沙的压力也会越来越大，所以，对于黄河下游河道而言，在重视保持主槽排洪输沙能力的同时，更不能忽视大洪水期滩地排洪输沙的基本功能[6]。

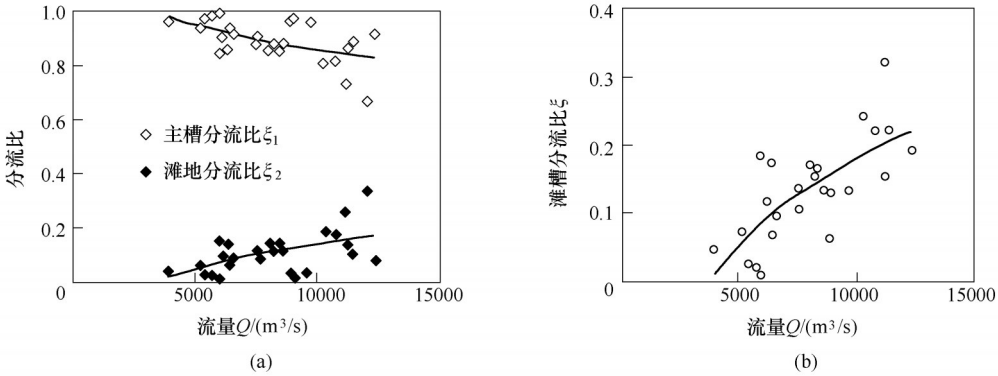

图2　花园口滩槽分流特征参数与全断面流量关系

2.2　过水宽度对滩槽分流的影响　图3(a)为花园口滩槽分流特征参数与主槽过水宽度关系图，利用回归分析的方法分别建立了花园口主槽分流比ξ_1、滩地分流比ξ_2与主槽相对过水宽度B_m/B的相关关系式：

$$\xi_1 = 0.2\frac{B_m}{B} + 0.81 \tag{8}$$

$$\xi_2 = -0.2\frac{B_m}{B} + 0.19 \tag{9}$$

式中：B_m为主槽过水宽度；B为全断面过水宽度。式(8)—(9)的相关系数R值为0.61。图3(a)中关系线的变化趋势表明，花园口主槽分流比ξ_1随主槽相对过水宽度B_m/B的增大而增大，滩地分流比ξ_2随主槽相对过水宽度B_m/B的增大而减小。洪水期黄河下游河道行洪过程中，主槽冲淤演变剧烈，尤其是游荡性河段，主槽摆动不定，而且其过水宽度随着洪水流量的增大而冲刷展宽，主槽过水宽度的增大，使主槽分流比增大，主槽过流量增大，对于全断面排洪输沙十分有利[7]。

图3(b)为花园口滩槽分流特征参数与滩地过水宽度关系图，利用回归分析的方法分别建立了花园口主槽分流比ξ_1、滩地分流比ξ_2与滩地相对过水宽度B_f/B的相关关系式：

$$\xi_1 = -0.3\frac{B_f}{B} + 1.08 \tag{10}$$

$$\xi_2 = 0.3\frac{B_f}{B} - 0.08 \tag{11}$$

式中：B_f为滩地过水宽度；B为全断面过水宽度。式(10)—(11)的相关系数R值为0.65。图3(b)中关系线的变化趋势表明，花园口主槽分流比ξ_1随滩地相对过水宽度B_f/B的增大而减小，滩地分流比ξ_2随滩地相对过水宽度B_f/B的增大而增大。洪水期黄河下游河道行洪过程中，随着洪水流量的增加，洪水漫滩宽度会逐渐加大，滩地过流量会逐渐增大，滩地分流比必然会逐渐增大，主槽分流比相应就会逐渐减小。

图3(c)为花园口滩槽分流比与滩槽过水宽度比图，利用回归分析的方法建立了花园口滩槽分流比ξ与滩槽过水宽度比B_f/B_m的相关关系式：

$$\xi = 0.035\mathrm{e}^{0.48\frac{B_f}{B_m}} \tag{12}$$

式(12)的相关系数R值为0.69。图3(c)中关系线的变化趋势表明，花园口滩槽分流比ξ随滩槽过水宽度比B_f/B_m的增大而增大。

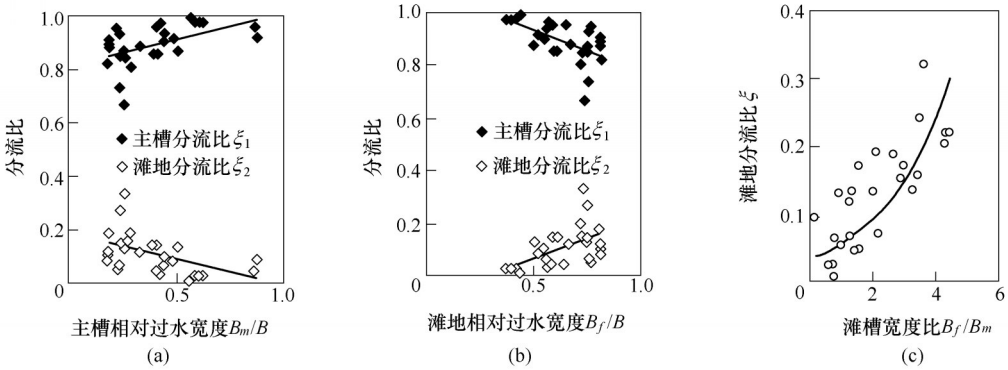

图3　花园口滩槽分流特征参数与过水宽度关系

2.3　过水深度对滩槽分流的影响　图4为花园口滩槽分流比与滩槽过水深度比关系图，利用回归分析的方法建立了花园口滩槽分流比与滩槽过水深度比的相关关系式：

$$\xi = 0.041\mathrm{e}^{4.02\frac{h_f}{h_m}} \tag{13}$$

式中：h_f为滩地平均过水深度；h_m为主槽平均过水深度。式(13)的相关系数R值为0.68。图4中关系线的变化趋势表明，花园口滩槽分流比ξ随滩槽平均过水深度比h_f/h_m的增大而增大。洪水期黄河下游复式河道行洪过程中，随着洪水流量的增加，洪水的漫滩程度会逐渐加大，滩地的平均过水深度会逐渐增大，滩地过流量会逐渐增大，滩槽分流比必然会逐渐增大。

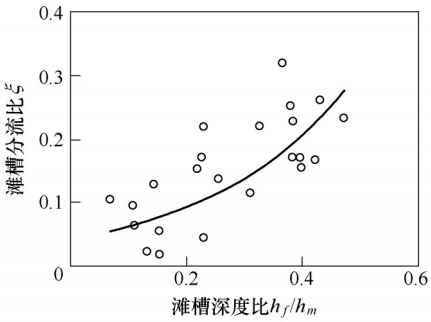

图4　花园口滩槽分流比与过水深度比关系

2.4　过水面积对滩槽分流的影响　图5为花园口滩槽分流特征参数与滩槽过水面积比关系图，其中图5(a)点绘了花园口主槽分流比、滩地分流比与滩槽过水面积比的关系，图5(b)点绘了花园口滩槽分流比与滩槽过水面积比的关系，利用回归分析的方法分别建立了花园口主槽分流比、滩地分流比、滩槽分流比与滩槽过水面积比的相关关系式：

$$\xi_1 = -0.13\frac{S_f}{S_m} + 0.97 \tag{14}$$

$$\xi_2 = 0.13\frac{S_f}{S_m} + 0.03 \tag{15}$$

$$\xi = 0.034\mathrm{e}^{1.65\frac{S_f}{S_m}} \tag{16}$$

式中：S_f为滩地过水面积；S_m为主槽过水面积。式(14)—(16)的相关系数R值分别为0.7、0.7、0.72。图5(a)中关系线的变化趋势表明，花园口主槽分流比ξ_1随滩槽过水面积比S_f/S_m的增大而减小，滩地分流比ξ_2随滩槽过水面积比S_f/S_m的增大而增大。洪水期黄河下游复式河道行洪过程中，主槽冲淤演变剧烈，其过水面积随着洪水流量的增大而冲刷增大，主槽过水面积的增大，使主槽分流比增大，滩地分流比减小。对滩地而言，随着洪水流量的增加，洪水的漫滩程度会加大，滩地过水面积增大，滩地分流比必然会增大，主槽分流比相应减小[8]。图5(b)中关系线的变化趋势表明，花园口滩槽分流比ξ随滩槽过水面积比S_f/S_m的增大而增大，由此可知，黄河下游河道行洪过程中，要想提高滩槽分流比ξ，可以增大滩地过水面积S_f，减少主槽过水面积S_m；要想降低滩槽分流比ξ，可以减少滩地过水面积S_f，增大主槽过水面积S_m。

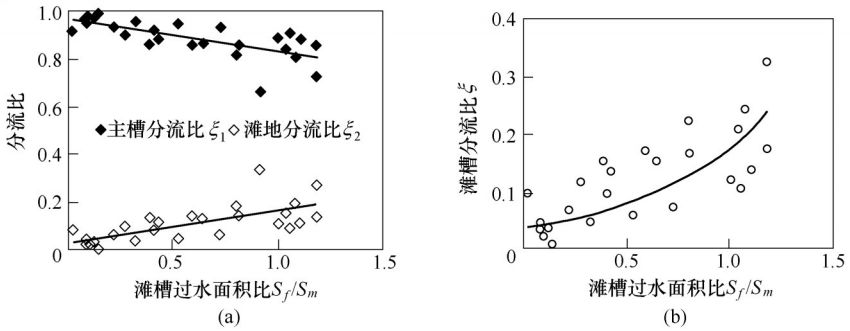

图5　花园口滩槽分流特征参数与过水面积比关系

2.5　流速对滩槽分流的影响　图6为花园口滩槽分流比与滩槽流速比关系图，利用回归分析的方法建立了花园口滩槽分流比与滩槽流速比的相关关系式：

$$\xi = 0.039\mathrm{e}^{3.51\frac{U_f}{U_m}} \tag{17}$$

式中：U_f为滩地水流平均流速；U_m为主槽水流平均流速。式(17)的相关系数R值为0.74。图6中关系线的变化趋势表明，花园口滩槽分流比ξ随滩槽的流速比U_f/U_m增大而增大。洪水期黄河下游河道行洪过程中，主槽流速越大，主槽过流量就越大，滩地过流量就相应减小，则滩槽分流比就越小；滩地流速越大，滩地过流量就越大，主槽过流量就相应增小，则滩槽分流比就越大。

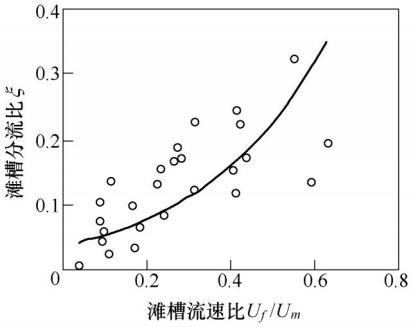

图6　花园口滩槽分流比与滩槽流速比关系

2.6　糙率对滩槽分流的影响　图7为花园口滩槽分流特征参数与滩槽糙率比关系图，其中图7(a)点绘了花园口主槽分流比、滩地分流比与滩槽糙率比的关系，图7(b)点绘了花园口滩槽分流比与滩槽糙率比的关系，利用回归分析的方法分别建立了花园口主槽分流比、滩地分流比、滩槽分流比与滩槽糙率比的相关关系式：

$$\xi_1 = 0.055\frac{n_f}{n_m} + 0.74 \tag{18}$$

$$\xi_2 = -0.055\frac{n_f}{n_m} + 0.26 \tag{19}$$

$$\xi = 0.58\mathrm{e}^{-0.69\frac{n_f}{n_m}} \tag{20}$$

式中：n_f为滩地平均糙率；n_m为主槽平均糙率。式(18)—(20)的相关系数R值分别为0.68、0.68、0.7。图7(a)中关系线的变化趋势表明，花园口主槽分流比ξ_1随滩槽糙率比n_f/n_m的增大而增大，滩地分流比ξ_2随滩槽糙率比n_f/n_m的增大而减小；图7(b)中关系线的变化趋势表明，花园口滩槽分流比ξ随滩槽糙率比n_f/n_m的增大而减小。黄河下游河道主槽阻力主要由沙粒阻力和沙波阻力组成，沙粒阻力主要是河床上的泥沙颗粒对水流产生的表面阻力，其大小和黄河下游河道主槽床沙组成有关，沙波阻力是主槽河底起伏变化所产生的形状阻力，其大小随着河床床面形态的调整变化而变化。黄河下游河道滩地地貌复杂，其中，靠近主槽的嫩滩上水几率大，糙率较小，广大的二滩上水几率小，植被种类多，密度大，糙率相对较大，受人类活动的影响，整个滩面上，分布着生产堤、道路、村台等阻水建筑物，进一步增大了滩地局部阻力，所以相对主槽阻力而言，黄河下游河道滩地阻力较大，而且其变化范围较大。洪水期黄河下游河道行洪过程中，随着漫滩程度的加大，水流漫入滩地受人类活动影响较大的区域，植被复杂，阻水建筑物增多，滩地糙率变大，滩地水流流速降低，水流不畅，滩地过流能力受到影响，导致主槽行洪压力增大，洪水位升高，会直接影响到黄河下游河道的行洪安全[9]。

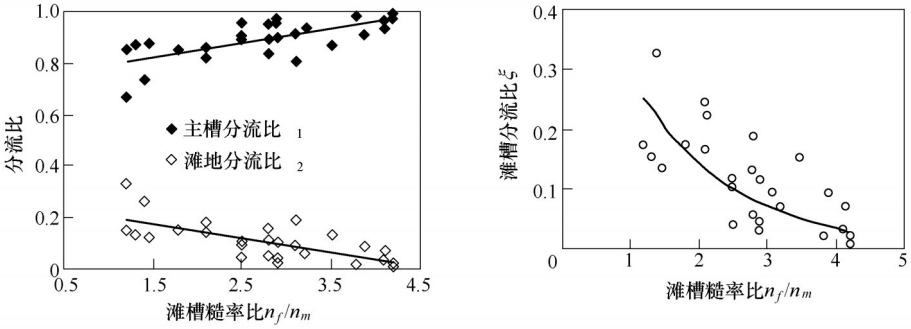

图7　花园口滩槽分流特征参数与滩槽糙率比关系

2.7　主槽断面形态对滩槽分流的影响　图8为花园口滩槽分流比与主槽宽深比关系图，利用回归分析的方法建立了花园口滩槽分流比与主槽宽深比的相关关系式：

$$\xi = 0.12\ln\left(\frac{\sqrt{B_m}}{h_m}\right) - 0.18 \tag{21}$$

式(21)的相关系数R值为0.81，表明花园口断面滩槽分流比与主槽宽深比的关系比较密切。图8中关系线的变化趋势表明，花园口滩槽分流比ξ随主槽宽深比的增大而增大。洪水期黄河下游河道行洪过程中，相同的主槽过水面积，主槽断面形态越窄深，即主槽宽深比越小，主槽流速就越大，主槽过流量就越大，则滩地过流量就越小，滩槽分流比相应就会越小；反之，主槽断面形态越宽浅，即主槽宽深比越大，主槽流速越小，主槽过流量就会越小，则滩地过流量就越大，滩槽分流比相应就会越大。

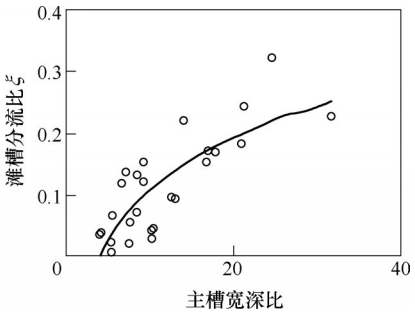

图8　花园口滩槽分流特征与主槽宽深比关系

3　黄河下游复式河道滩槽分流比的综合影响关系式

由前文的分析可知，影响黄河下游河道滩槽分流的主要因素有滩槽过水宽度、平均水深、过水面积、流速、糙率和主槽断面形态。选择花园口断面滩槽分流比ξ为自变量，选择滩槽过水宽度比B_f/B_m、滩槽过水深度比$h_f/(h_m-h_f)$、滩槽过水面积比S_f/S_m、滩槽流速比U_f/U_m、滩槽糙率比n_f/n_m、主槽宽深比为因变量，在此需要说明的是，其他因变量的表达式都与前文单因素分析时的表达式一致，只有滩槽过水深度比的表达式由h_f/h_m变成$h_f/(h_m-h_f)$，目的是为了突出滩槽高差(h_m-h_f)对黄河下游滩槽分流特征的影响，运用多元回归分析的方法，建立黄河下游复式河道滩槽分流比多因素综合影响关系式如下：

$$\xi = 0.25\left(\frac{B_f}{B_m}\right)^{0.39}\left(\frac{h_f}{h_m-h_f}\right)^{0.3}\left(\frac{S_f}{S_m}\right)^{0.68}\left(\frac{u_f}{u_m}\right)^{0.59}\left(\frac{n_f}{n_m}\right)^{-0.44}\left(\frac{\sqrt{B_m}}{h_m}\right)^{0.33} \tag{22}$$

式(22)的复相关系数R=0.89，F值为11.75，远大于F的临界值2.47，显著性分析概率P小于0.00001，反映出式(22)中自变量与所选6个因变量的综合相关关系比较密切。图9中计算值与实测值的比较反映出式(22)回归效果良好。由式(22)中各项的指数正负可知，黄河下游河道滩槽分流比ξ随滩槽过水宽度比B_f/B_m、滩槽过水深度比$h_f/(h_m-h_f)$、滩槽过水面积比S_f/S_m、滩槽流速比U_f/U_m、主槽宽深比的增大而增大，随滩槽糙率比n_f/n_m的增大而减小，这与前文单因素分析的结果是一致的，从侧面反映出该综合关系式的正确性。比较式(22)中各项的指数大小可知，滩槽过水面积比S_f/S_m、滩槽流速比U_f/U_m这两项的指数在0.6左右，滩槽过水宽度比B_f/B_m、滩槽过水深度比$h_f/(h_m-h_f)$、滩槽糙率比n_f/n_m、主槽宽

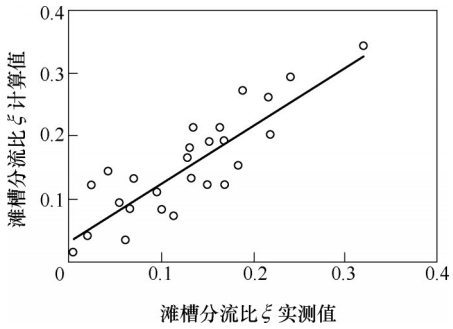

图9　花园口滩槽分流比实测值与计算值比较

深比这4项的指数在0.4左右，表明黄河下游河道滩槽分流比ξ与滩槽过水面积比S_f/S_m、滩槽流速比U_f/U_m这两项的相关关系要比滩槽分流比ξ与滩槽过水宽度比B_f/B_m、滩槽过水深度比$h_f/(h_m-h_f)$、滩槽糙率比n_f/n_m、主槽宽深比这4项的相关关系密切，分析其原因，河道流量的大小主要取决于河道过水面积和河道水流流速，而河道过水宽度、水深、糙率等是隐含在过水面积和水流流速的影响因素，所以它们与流量的相关关系要偏弱，式(22)中各项的指数大小从侧面反映出该综合关系式的合理性。综合上述分析，式(22)关系正确，结构合理，回归效果良好，同时式(22)的复相关系数明显高于滩槽分流比ξ与单个因素的相关关系，表明运用式(22)可根据未来滩槽6项单因素的大小对黄河下游河道花园口断面滩槽分流比进行估算，不仅全面，而且可信度高。

式(22)的建立不仅具有在定量上对花园口断面滩槽分流比进行预测的实际应用价值，而且从定性上对黄河下游复式河道滩槽治理具有重要的实际指导价值。本次研究中所统计的花园口洪水流量为3960~17200m^3/s，花园口断面主槽分流比ξ_1为0.73~0.98，表明主槽是黄河下游排洪输沙的主要通道。要想提高主槽过洪能力，使相同洪水流量下，增大主槽承担的过流量，降低滩槽分流比ξ，减轻滩地过洪压力，依据式(22)得出对于主槽可采用的主要措施有增大主槽宽度B_m、增大滩槽高差(h_m-h_f)、增大主槽过水面积S_m、提高主槽水流流速U_m、降低主槽糙率n_m、减小主槽宽深比。要想使洪水期黄河下游河道主槽达到上述这样的效果，最基本的要求就是在河道治理过程中，注意维持河道主槽一定的过流能力，也就是保证河道主槽具有一定规模的平滩流量，在保证河道主槽平滩流量大于一定数值的同时，还应保持河道主槽具有一个较为窄深的断面形态，也就是控制河道主槽宽深比在一个较小的数值范围内。1986—1999年，黄河下游水沙过程变异，主槽萎缩严重，过流能力大量损失，对黄河下游行洪及其不利，在今后的河道治理过程中，应尽量避免类似情况的发生和发展，做到防患于未然。要想保持黄河下游河道主槽一定的过洪能力，可采取工程治理措施和非工程治理措施相结合的方法。非工程治理措施主要是采用水沙调控的方法，通过科学调度河道上的水利枢纽工程调控出进入黄河下游良好的水沙过程，以维持河道主槽相应的过流能力和良好的断面形态；工程治理措施主要是指通过挖河疏浚等工程干预手段，按照行洪的基本要求，在非汛期的河道中直接挖出行洪所需的主槽断面尺寸[10]。前文的研究表明，随着黄河下游洪水流量的增加，主槽分流比逐渐减小，滩地分流比逐渐增大的基本规律不会改变，滩地承受的行洪压力也会越来越大，所以，保证黄河下游河道滩地具有一定的行洪能力也应引起高度重视。依据式(22)得出提高滩地行洪能力可采用的主要措施有增大滩地宽度B_f、增大滩地过水深度比h_f、增大滩地过水面积S_f、提高滩地水流流速比U_f、降低滩地糙率n_f。要想使洪水期黄河下游河道滩地达到上述这样的效果，要求我们在开展黄河下游滩地治理过程中，注意给滩地预留出一定的行洪宽度，在必要的滩地行洪宽度内，尽量减少人类活动对行洪滩地的影响，比如减少行洪滩地内的农作物种植和各种阻水建筑物的建设，这样才能有效降低滩地行洪阻力，保持滩地畅通的过水通道，保证滩地相应的过洪能力，减轻主槽行洪压力，从而达到确保全断面行洪安全的目的。

4　主要结论

(1)黄河下游“96.8”洪水上涨阶段，花园口全断面流量变化以漫滩为界存在明显的转折，主槽流量变化不存在明显的转折。漫滩后，全断面、滩地流量随水位升高而增大的幅度存在一定的变化；漫滩初期，全断面、滩地流量随水位升高而增大的幅度小，随着漫滩程度增大，全断面、滩地流量随水位升高而增大的幅度也越来越大。全断面最大流量与洪水最高水位并不对应，原因是洪峰流量到来前，主槽剧烈冲刷，部分滩地水流开始回归主槽，漫滩程度降低，滩地过流量减小，使得洪峰流量到来时，洪水水位反而有所降低。

(2)1986年后，黄河下游河道洪水期主槽分流比有所减少，滩地分流比有所增大，说明黄河下游河道滩槽分流特征与主槽过流能力密切相关，河道萎缩，主槽过流能力大幅度减小，致使很小的洪水流量主槽就漫滩，相同流量下主槽分流比大大降低；滩槽分流沿程变化特征没有发生根本的变化，但由于上游宽河段萎缩严重，主槽分流比降低的幅度较大。1999年后，小浪底水库蓄水拦沙运

用，下游河道持续冲刷，有效遏制了河道淤积萎缩的局面，主槽的过洪能力有所恢复，主槽分流比有所增大，滩地分流比相应有所减小。

(3)黄河下游河道滩槽分流比随滩槽过水宽度比、过水深度比、过水面积比、流速比和主槽宽深比的增大而增大，随滩槽糙率比的增大而减小。提高主槽过洪能力，可增大主槽宽度、增大滩槽高差、增大主槽过水面积、提高主槽流速、降低主槽糙率、减小主槽宽深比。提高滩地行洪能力可增大滩地宽度、增大滩地过水深度、增大滩地过水面积、提高滩地流速、降低滩地糙率。在黄河下游河道治理过程中，注意维持河道主槽一定的过流能力和较为窄深的断面形态；注意给滩地预留出一定的行洪宽度，在必要的滩地行洪宽度内，尽量减少人类活动对行洪滩地的影响，保持滩地畅通的过水通道，保证滩地相应的过洪能力，减轻主槽行洪压力，从而达到确保全断面行洪安全的目的。

参 考 文 献：

[1] 胡春宏，陈建国，郭庆超，等．黄河水沙调控与下游河道中水河槽塑造[M]．北京：科学出版社，2007．

[2] 姚文艺，苏运启，李勇．黄河下游排洪输沙基本功能的影响因素及判别指标[J]．泥沙研究，2009(2)：1-9．

[3] 潘贤娣，李勇，张晓华，等．三门峡水库修建后黄河下游河床演变[M]．郑州：黄河水利出版社，2006．

[4] 胡春宏，陈绪坚．流域水沙资源优化配置理论与模型及其在黄河下游的应用[J]．水利学报，2006，37(12)：1460-1469．

[5] 惠遇甲，李义天，胡春宏，等．高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律的研究[M]．武汉：武汉水利电力大学出版社，2000．

[6] 刘晓燕，张原锋，等．黄河下游主槽断面恢复目标及相应水沙条件研究[J]．科学通报，2006，51(增刊)：176-182．

[7] 胡春宏，陈绪坚，陈建国．黄河水沙空间分布及其变化过程研究[J]．水利学报，2008，39(5)：518-527．

[8] 苏运启，申冠卿，韩巧兰，等．黄河下游河道排洪能力分析方法及其工程实践[M]．郑州：黄河水利出版社，2006．

[9] 胡春宏，陈建国，等．水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究[J]．水利学报，2006，37(11)：1283-1289．

[10] 李文学，李勇，等．黄河下游河道行洪能力对河道萎缩的响应关系[J]．中国科学E辑，2004，34(增刊)：126-132．

Research on separated discharge characteristics of floodplain and main channel of the Lower Yellow River compound channel

HU Chun-hong, ZHANG Zhi-hao

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Using the methods of field data analyses and theoretical study, the separated discharge and its influencing factors is researched in the Lower Yellow River. The results show that since 1986, the channel atrophied and the separated discharge ratio of main channel have decreased, and the separated discharge ratio of floodplain increased. After 1999, due to the sluice exercise of Xiaolangdi reservoir, the Lower Yellow River scours, the passing discharge capability of main channel resume in a certain extent and the separated discharge ratio of main channel are increased, and meanwhile, the separated discharge ratio of floodplain decreased. Via establishing the relationship of the separated discharge ratio and the width, depth, area, velocity, roughness and configuration of floodplain and main channel, advices are brought forward. During the harnessing of the Lower Yellow River, a certain extent passing discharge capability and narrow deep configuration of main channel should be maintained; a certain extent passing discharge width of floodplain should be set aside, the influencing of human should be reduced in floodplain, keeping the straightway of passing discharge of floodplain, guaranteeing the passing discharge capability of floodplain, lightening the press of main channel and insuring the safety of control flood.

Key words: Lower Yellow River; compound channel; separated discharge; harnessing of floodplain and main channel

（责任编辑：李福田）