

# 不同水沙条件下黄河下游二级悬河的发展过程

杨吉山<sup>1,2</sup>, 许炯心<sup>1</sup>, 廖建华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 以大量实测横断面资料为基础, 研究了 1973~1997 年不同水沙过程对黄河下游二级悬河形成过程的影响。发现花园口至高村河段二级悬河集中形成于 1985~1997 年的枯水阶段。高村以下河段二级悬河的形成可分两个阶段, 1973~1985 年大水条件下是冲刷主槽和淤积滩地的时期, 但是由于泥沙主要堆积在靠近滩唇的部位, 造成河床横比降增大; 1985~1997 年枯水条件下泥沙在主槽中大量淤积, 导致二级悬河的形势更加严重。生产堤限制了泥沙的堆积范围, 导致生产堤内滩地平均高程增长速度明显快于生产堤外滩地平均高程增长速度, 生产堤距较窄的河段生产堤内滩地平均高程增长速度较快, 显示了生产堤对二级悬河的发展有促进作用。

**关键词:** 黄河下游; 河床演变; 二级悬河; 生产堤

## 1 前言

黄河下游自小浪底水库以下至入海口全长 800 多 km, 依河床性质可分为游荡段、过渡段和弯曲段三部分。小浪底至高村为游荡段, 高村至陶城铺为过渡段, 陶城铺至利津为弯曲段, 利津以下则为黄河河口段 (图 1)。

黄河下游的根本矛盾是水少沙多, 导致泥沙在河道中大量淤积。据研究, 自战国中期人类开始在黄河下游筑堤以后, 下游河道经历了多次筑堤—形成地上河—决口改道的循环<sup>[1]</sup>, 其根本原因就在于筑堤以后, 泥沙在有限的空间内大量淤积, 造成河道不断抬高。1855 年铜瓦厢决口改道后, 经过筑堤束水黄河下游形成了现在的流路, 筑堤以后大量泥沙淤积在两岸堤防之内, 使下游河道逐渐地形成了普遍高于地面的“悬河”。现在黄

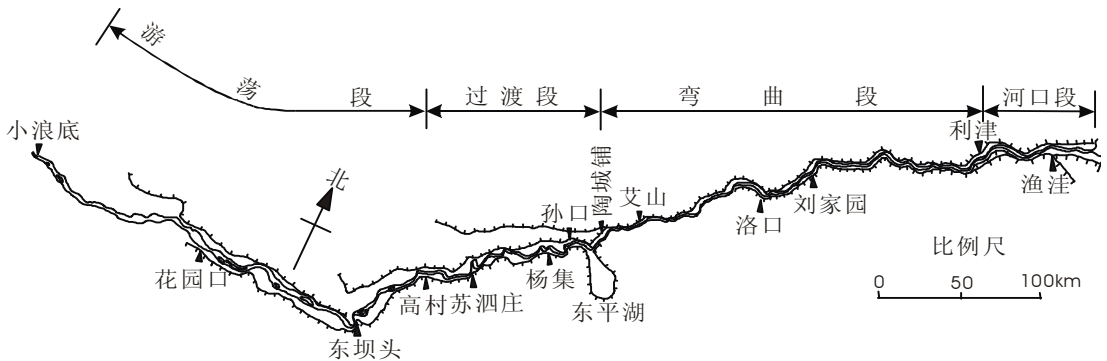


图 1 黄河下游河道平面图

Fig. 1 Planimetric map of the lower Yellow River

收稿日期: 2005-06-26; 修订日期: 2005-12-01

基金项目: 国家自然科学基金与黄河水利委员会联合资助的重点项目(50239080) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.50239080]

作者简介: 杨吉山 (1969-), 男, 河南开封人, 博士生。主要研究方向为河流地貌。E-mail: yangjs@igsrr.ac.cn

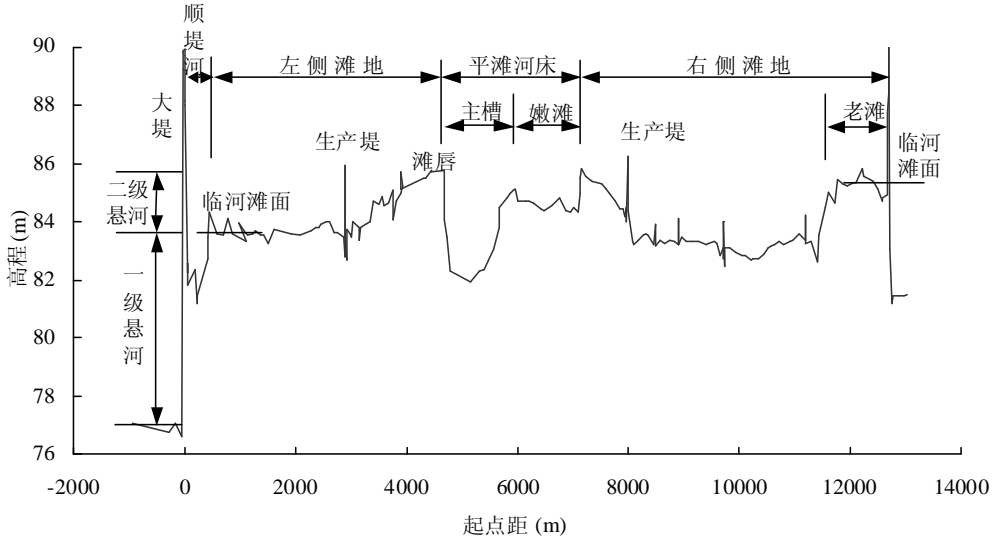


图2 黄河下游河道横断面示意图

Fig. 2 Sketch map of cross section in the lower Yellow River

河下游河床一般高出背河地面 4~6m, 最大达 10m 以上, 完全依赖两岸的人工堤防来防止河水的泛滥, 潜伏着极大的危险。20 世纪 60 年代以后, 在多种因素的影响下, 黄河下游泥沙主要淤积在主槽内及靠近主槽的滩地上, 而远离主槽的滩地上泥沙的淤积量则比较小, 逐渐在相对宽阔的两岸大堤之间又形成了突出于两侧滩地的河床, 相对于原来的“一级悬河”我们称之为“二级悬河”, 即“悬河之中的悬河”(图 2)。二级悬河现象主要发生在花园口以下的河段。

二级悬河是在特殊的水沙和边界条件下产生的, 是人类活动对整个河流系统多方面影响和干涉的产物。综合各家的意见<sup>[2-7]</sup>, 认为二级悬河的产生和发展主要是以下几方面原因综合作用的结果: ① 黄河水少沙多, 含沙量高的客观条件决定了下游河道容易发生淤积抬高, 这是问题的症结所在; ② 中游水土保持工程在拦减泥沙的同时也减少了下游河道的来水量, 刘家峡、龙羊峡、三门峡等干流大型水库的运用调平了进入下游的洪峰流量, 使水沙关系更不协调, 水沙过程错位, 加重了下游的淤积; ③ 控导和护滩工程限制了河床的摆动范围, 缩小了泥沙的堆积范围; ④ 生产堤的修建使中、小洪水漫滩范围仅限于生产堤内, 生产堤外的滩地很少有机会受到淤积, 加速了二级悬河的发展; ⑤ 1986 年以后由于降水减少和人类的大量引水使下游来水量显著减少, 造成了下游河道持续的淤积, 加快了二级悬河的发展等。

## 2 资料和方法

1973 年至 1997 年间, 黄河下游经历了一次来水量丰、枯的周期性变化, 以 1985 年为界, 前 12 年来水较丰, 水沙条件有利, 是下游河道平滩水位下河床(以下简称平滩河床)横断面积扩大的阶段; 后 12 年来水较枯, 大量泥沙在主槽中淤积, 是下游平滩河床横断面积萎缩的阶段。本文主要依据这 24 年的横断面测量资料, 研究了下游河床在不同水沙条件下二级悬河的发展过程, 以及生产堤等边界条件对二级悬河形成过程的影响, 以期深化对下游河床在不同水沙条件下二级悬河的形成过程和特点的认识。

量度指标采用了平滩河床滩唇高程与临河滩面平均高程的差值(唇滩高差)以及临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程的差值这两种指标,以从不同方面量度二级悬河的发育程度。首先根据横断面高程测量数据套绘下游各断面各年汛后河床的横断面曲线,然后根据套绘的横断面曲线比较和确定平滩河床滩唇、临河滩面、生产堤等的位置,并进行所需数据的计算。临河滩面高程往往有比较大的起伏变化,取一定宽度滩面高程的平均值代表临河滩面高程,即临河滩面平均高程。求临河滩面平均高程时所取滩面宽度一般为50~300m,以目识判断这个宽度的滩面平均值能代表临河滩面高程为准。黄河下游大部分河段靠近大堤的部位有顺堤河,有顺堤河的断面取临近顺堤河一定宽度的滩面的平均高程值作为临河滩面平均高程,顺堤河不明显的断面则取紧靠近大堤的一定宽度滩面的平均高程值作为临河滩面平均高程。在计算左、右侧唇滩高差时,分别用左侧平滩河床滩唇高程与左侧临河滩面平均高程相比较,右侧平滩河床滩唇高程与右侧临河滩面平均高程相比较。在对比下游各断面平滩河床滩唇高程随时间的变化时,如果左右两侧滩唇高程不相等,则取高程较低者作为该断面平滩河床滩唇的高程值。生产堤位置的确定参考了黄河下游1:5万的地形图。

### 3 唇滩高差的变化过程及原因

唇滩高差是指平滩河床滩唇高程与临河滩面平均高程的差值,是表征二级悬河的一个重要指标。唇滩高差受到滩唇高程的变化和临河滩面平均高程的变化两方面的影响。由于下游滩区内广泛分布有生产堤、道路、渠堤、居民点等阻水建筑,当滩唇部位受到漫滩淤积抬高时,除非遇到大水漫滩,一般条件下水流并不能达到临河滩面,从而导致唇滩高差不断加大,远远超过了自然状态下形成的河床横比降。临河滩面平均高程除了受到自然淤积抬高或冲刷降低外,还会受到诸如人工放淤、复堤取土等人工活动的影响,使唇滩高差在一定时期内呈现出比较复杂的变化。

#### 3.1 平滩河床滩唇高程变化

1973~1985年高村至刘家园河段滩唇升高比较明显,一般在0.5~2.2m,平均为1.25m(图3);花园口至高村及刘家园以下河段滩唇高程升高相对较小。1985~1997年花园口至高村河段滩唇升高较多,增幅界于0~1.5m,平均为0.79m;刘家园以下河段滩唇也有明显升高,高村至刘家园,特别是高村至陶城铺河段,滩唇高程有所降低的现象比较普遍,高村至刘家园滩唇平均降低了0.08m,高村至陶城铺断面滩唇平均降低了0.26m。从1973年汛后到1997年汛后整个时段看,花园口以下各断面滩唇高程都有明显的增高,总的趋势是花园口以上和近河口段抬升较小,中间部分断面滩唇高程抬升比较大,并且中间部分有平行升高的趋势(表1)。

表1 黄河下游河段平均平滩河床滩唇高程变化(单位:m)

#### 3.2 临河滩面平均高程变化

从1973~1985年、1985~1997年和1973~1997年3个时段内河床左侧临河滩面平均高程的变化可以看到(图4),对于下游的大部分断面,

Tab. 1 Average height difference of the natural levees for each reach in the lower Yellow River

时段	下古街-花园口	花园口-高村	高村-刘家园	刘家园-渔洼
1973-1985年	-0.21	0.31	1.25	0.54
1985-1997年	0.57	0.79	-0.08	0.39
1973-1997年	0.36	1.10	1.17	0.93

临河滩面平均高程的升高主要发生在1973~1985年下游来水较丰,漫滩次数较多的时段;在1985~1997年来水较枯,漫滩次数较少的时段内临河滩面平均高程升高很少。从1973~1997年的整个时段看,霍家溜以下断面由于大堤之间宽度比较狭窄,临河滩面平均高程升高比较明显;霍家溜以上河段大部分断面临河滩面平均高程没有明显的升高,只有少数几个断面升高比较明显。如花园口至高村河段临河滩面平均高程升高明显的只有

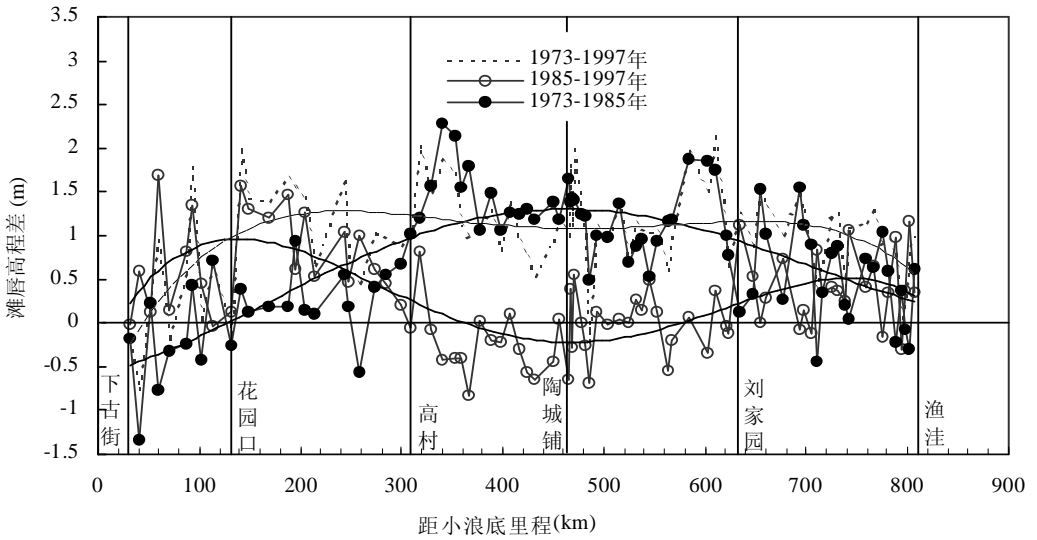


图3 黄河下游断面平滩河床滩层高程变化沿程分布

Fig. 3 Changes of the natural levee height of the cross sections along the lower Yellow River

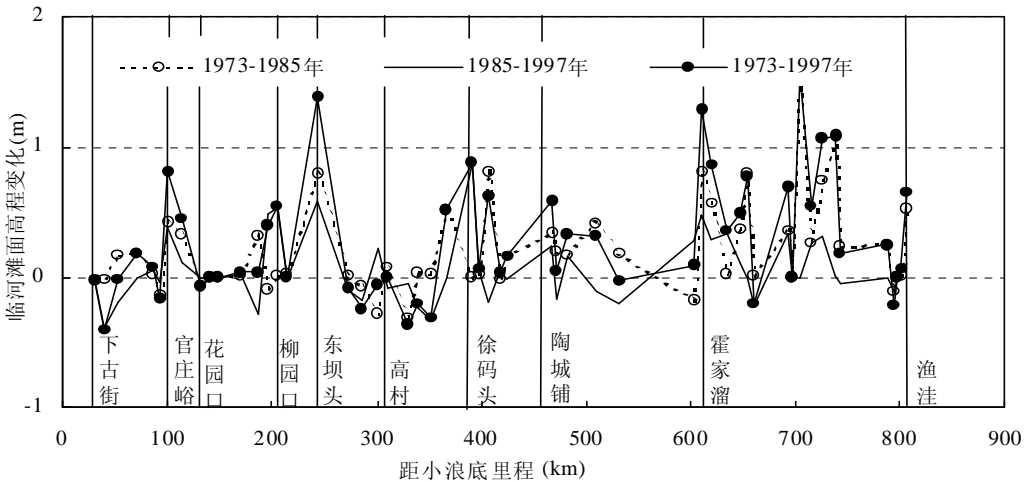


图4 黄河下游各断面临河滩面平均高程变化

Fig. 4 Changes in the average elevation of the floodplain along the lower Yellow River

柳园口、东坝头等少数几个断面，除此之外的其他断面变化很小，平均只有 0.04m；高村至陶城铺河段临河滩面平均高程的增长较游荡段多一些，平均为 0.16m (表 2)，但也主要集中于徐码头及大王庄等少数几个断面。部分断面临河滩面平均高程不但没有淤积抬高，反而因受到水流冲刷或人类取土的影响而有所降低。

### 3.3 层滩高差的变化

由下游各断面平滩河床滩层和临河滩面平均高程变化过程可知，对下游大部分断面来说，临河滩面平均高程的变化相对较小，所以层滩高差的变化主要反映了滩层高程的变化。从黄河下游实测横断面资料量取计算的 1973 年、1985 年和 1997 年三个年份汛后层滩高差的沿程分布可以看到 (图 5)，由于河道左侧滩面相对较宽，左侧层滩高差的变化较右侧明显。1973 年连续出现滩层高程大于临河滩面平均高程的断面主要分布于高村以下河段，高差大多在 0.5~2.0m；花园口至东坝头河段部分断面一侧存在有老滩，临河滩

面平均高程明显高于滩唇, 没有老滩分布的则滩唇高程显著地大于临河滩面平均高程, 其差值在  $-2.5\sim-2.0\text{m}$ 。1973 年至 1985 年唇滩高差增长最显著的河段是高村至陶城铺河段, 其次是陶城铺至利津河段; 游荡段花园口至高村唇滩高差的增长则不是很大, 左、右侧唇滩高差的平均增长值只有  $0.51\text{m}$  和  $0.06\text{m}$  (表 3)。1985 年至 1997 年唇滩高差增大最显著的是花园口至高村游荡河段, 增长接近  $0.7\text{m}$ , 高村以下除了利津至渔洼段右侧外, 唇滩高差的增长不是很明显。另外可以看到, 东坝头以上原来残存有老滩的断面, 至 1997 年大部分断面滩唇高程已经接近或高于老滩的高程, 出现了“高滩不高”的现象。

表 2 黄河下游各河段临河滩面平均高程变化 (单位: m)

Tab. 2 Average changes in the elevation of the floodplain in different reaches and periods

时段	下古街-花园口	花园口-高村	高村-陶城铺	陶城铺-渔洼
1973-1985 年	0.12	0.06	0.14	0.36
1985-1997 年	0	0.09	0.02	0.09
1973-1997 年	0.12	0.15	0.16	0.45

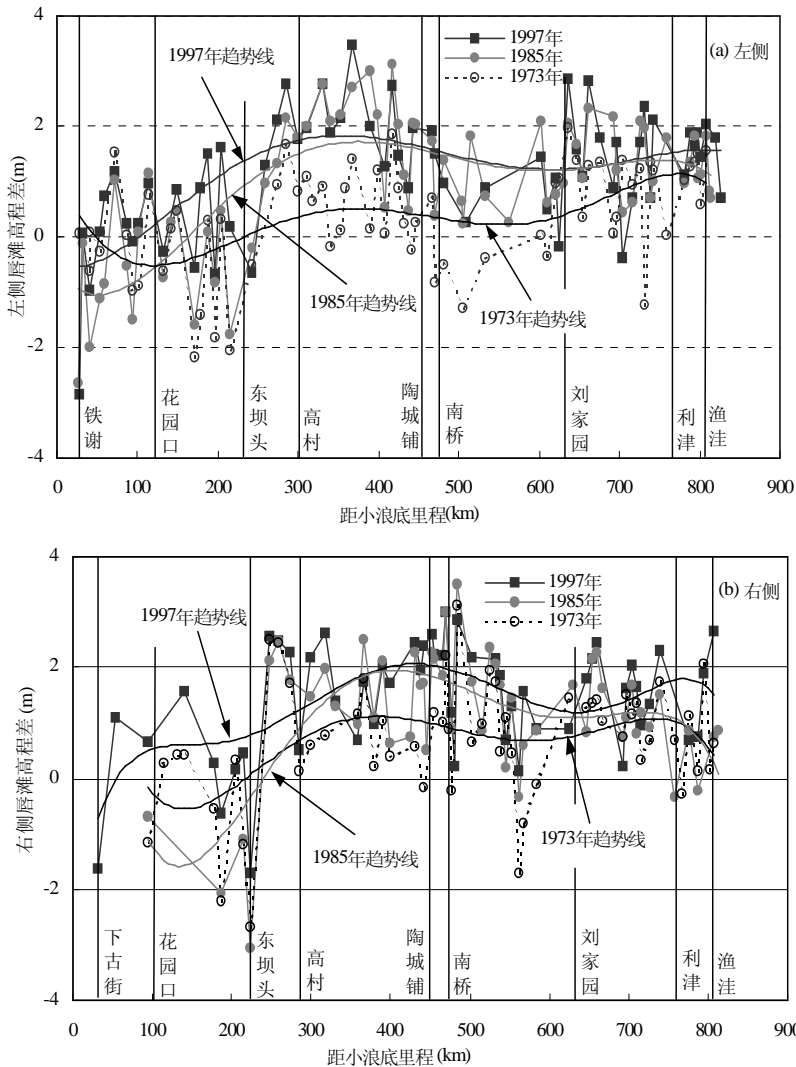


图 5 黄河下游河床唇滩高差沿程分布

Fig. 5 Height difference between the natural levee elevation and the mean level of the floodplain

near embankment along the lower Yellow River

表 3 黄河下游各河段平均唇滩高差变化 (单位: m)

Tab. 3 Average height difference between the natural levee elevation and the mean level of the floodplain near the embankment for each reach in the lower Yellow River

时间	铁谢-花园口	花园口-高村	高村-陶城铺	陶城铺-利津	利津-渔洼	
左侧	1973 年	0.01	-0.2	0.59	0.48	1.21
	1985 年	-0.65	0.31	2.02	1.23	1.36
	1997 年	0.04	0.96	2.06	1.28	1.57
	1973-1985 年	-0.66	0.51	1.43	0.75	0.15
	1985-1997 年	0.69	0.65	0.04	0.05	0.21
	1973-1997 年	0.03	1.16	1.47	0.8	0.36
右侧	1973 年	-0.44	0.17	0.8	0.9	0.82
	1985 年	-0.63	0.23	1.59	1.35	0.57
	1997 年	0.04	0.92	1.93	1.55	1.49
	1973-1985 年	-0.19	0.06	0.79	0.45	-0.25
	1985-1997 年	0.67	0.69	0.34	0.2	0.92
	1973-1997 年	0.48	0.75	1.13	0.65	0.67

以唇滩高差来量度二级悬河的发育程度, 1997 年二级悬河最严重的河段是东坝头以下至南桥(陶城铺以下约 20km) 河段, 一般在 1.5~3.0m; 其次是刘家园至利津约 130km 的河段, 多在 1.0~2.5m。从 1973~1997 年整个时段来看, 唇滩高差增长最快的是高村至陶城铺河段, 其次是花园口至高村河段, 再次是陶城铺至利津河段, 花园口以上及利津以下河段则增长较小。

### 3.4 唇滩高差的变化与来水来沙的关系

从 1973~1997 年韦城、苏泗庄和前左三个断面每年汛后平滩河床滩唇相对于 1973 年滩唇高程的变化中可以看到(图 6), 随着下游河床的淤积抬高, 至 1997 年三个断面的平滩河床滩唇高程较 1973 年都有明显的升高, 但滩唇升高明显的年份并不相同。韦城断面平滩河床滩唇的高程最不稳定, 每年都有变化, 这与游荡段河床的快速冲淤与摆动有关; 苏泗庄和前左断面平滩河床的滩唇高程比较稳定, 在某一高程上能够维持较长的时间。1969~1974 年下游连续 6 年来水偏少, 其中 1974 年最少, 只有 283.9 亿  $m^3$ , 加上三门峡水库滞洪排沙运用的影响, 这一时段下游河床严重淤积萎缩, 1975 年下游来水量较丰, 花园口站年径流量达到 549.4 亿  $m^3$ , 并且发生了 7580  $m^3/s$  的洪峰流量, 在前期河床严重萎缩的条件下, 下游各站水位普遍比较高, 平滩河床滩唇高程明显升高。1990 年以后,

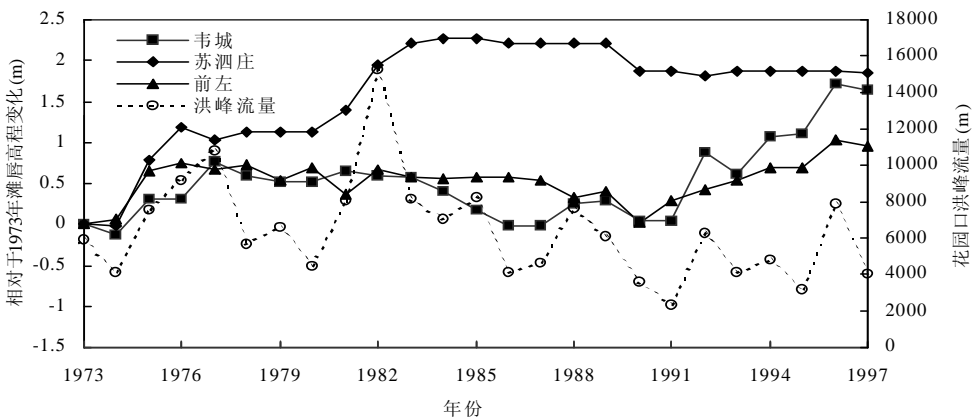


图 6 典型断面平滩河床滩唇高程随时间的变化及与洪峰流量的关系

Fig. 6 Temporal variation of the natural levee elevation of the representative cross sections in the lower Yellow River and relationships with the maximum discharge at Huayuankou station

在下游河床萎缩非常严重的条件下, 1996年8月下游发生了花园口站洪峰流量 $7860\text{ m}^3/\text{s}$ , 最大含沙量 $126\text{ kg}/\text{m}^3$ 的洪水, 造成下游高水位行洪<sup>⑦</sup>, 下游大部分断面平滩河床滩唇高程又一次显著升高。但苏泗庄断面在“96.8”洪水作用下只明显地扩大了平滩河床面积, 而滩唇高程并没有升高, 这种现象对于高村以下断面比较普遍。

游荡段河床滩唇的升高和高含沙水流的发生有密切关系, 1977年、1988年、1992年和1994年下游高含沙水流发生的年份都是韦城断面滩唇明显升高的年份。在1985~1997年下游来水量减少条件下, 下游发生高含沙水流的次数增多, 而游荡段河床摆动侵蚀的能力减弱, 高含沙水流在河床嫩滩部位造成大量泥沙淤积, 使平滩河床滩唇高程累计性地不断升高。苏泗庄断面滩唇高程升高主要集中在1975年、1976年和1981~1983年, 都是下游来水量较大并且发生了洪峰流量大于 $7500\text{ m}^3/\text{s}$ 的年份; 1985~1997年在来水量小的条件下滩唇高程一直没有升高, 并且由于受到流水冲刷1990年滩唇高程反而有所降低。前左断面滩唇的升高主要发生在1975年和1991~1997年。下游近河口的河段由于河床宽度较小, 在河床萎缩过程中, 宽度的调整余地不大, 主要表现为泥沙在主槽底部的淤积, 随着河底淤高和主槽深度的减小, 在同流量条件下水位逐年升高, 导致滩唇也逐年有所淤高。刘家园以下接近河口的河段在枯水条件下, 平滩河床滩唇高程有所升高(表明发生了漫滩)的年份明显多于距河口较远的弯曲段及过渡段, 这种现象的发生应该与下游河道不断延长, 基准面逐渐抬高所导致的溯源淤积与壅水作用有一定的关系。

总结以上讨论, 花园口至高村游荡段平滩河床滩唇高程升高集中发生在1985~1997年河床萎缩的枯水条件下, 主要受到高含沙水流的影响; 高村—刘家园段河床滩唇升高主要发生在1973~1985年水沙条件比较有利的时期, 主要受到漫滩水流的控制。

黄河下游河床横比降的不断加大, 二级悬河的发展是平滩河床滩唇高程不断增大, 而临近大堤部位的滩地高程没有相应淤高, 使唇滩高差不断加大造成的。如前面的讨论, 1960年以来, 随着对下游河道治理、水资源利用及来水过程控制强度的增大, 下游河床位置更加固定, 来水量减少, 洪峰受到水库的调节, 下游发生洪水漫滩的次数和强度都明显降低, 加上滩地上各种阻水建筑的影响, 使泥沙淤积的范围很少能达到临近大堤的部位, 滩唇与临河滩面的差异性抬升是下游二级悬河快速发展的主要原因。

#### 4 临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程差值的变化

临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程的差值也是度量下游二级悬河的一个指标, 与唇滩高差相比, 这一指标更多地考虑了平滩河床的冲淤变化对二级悬河发展状况的影响。以各断面临河滩面平均高程减去平滩河床平均河底高程, 如果值为负, 说明平均河底高程已经高于临河滩面高程, 二级悬河现象已经相当严重。从1973年、1985年和1997年汛后下游各断面临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程差的沿程分布可以看到(图7), 1973年东坝头至孙口部分断面平滩河床平均河底高程已经开始接近临河滩面高程, 二级悬河已经出现。1985年与1973年相比, 陶城铺以下河段由于主槽受到冲刷, 临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程的差值有明显增大; 陶城铺以上, 尤其是游荡段变化相对较小(表4)。1985年至1997年由于主槽普遍淤积抬高, 河床严重萎缩, 下游各断面临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程的差值都明显减小; 从平均值来看, 高村至利津, 特别是陶城铺至利津是二者差值升高最多的河段。至1997年, 东坝头至陶城铺河段各断面平滩河床平均河底高程接近或高于临河滩面平均高程, 是二级悬河最严重的河段, 这与以唇滩高差来量度下游二级悬河发展结果是一致的。

对多数断面来说, 临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程差值的变化主要反映了平滩河床平均河底高程的变化。1973~1985年丰水时期平滩河床面积扩大, 平均河底高

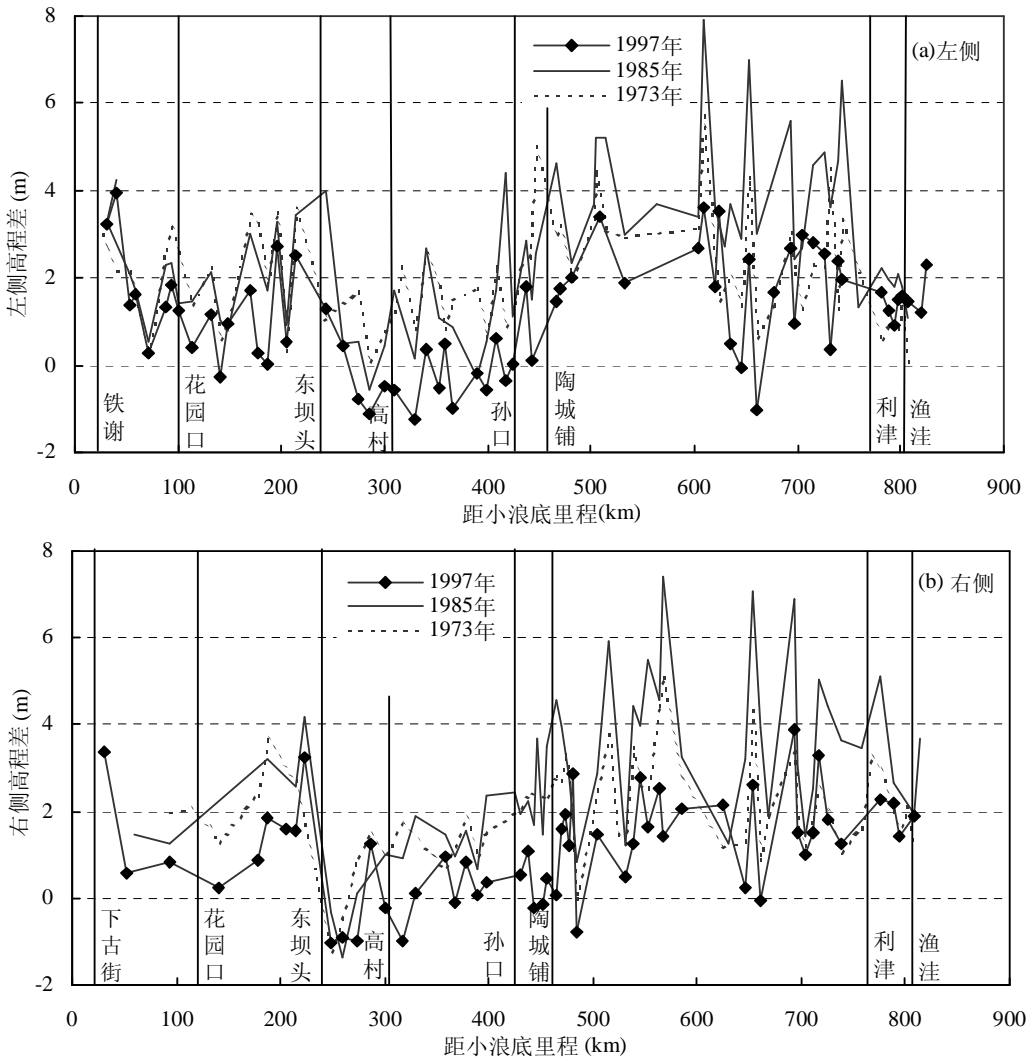


图 7 临河滩面平均高程和平滩河床平均河底高程差沿程分布

Fig. 7 Height difference between the average level of the floodplain near embankment and average elevation of the bed at bankfull water-level along the lower Yellow River

程降低，输送水沙的能力增加，从这方面看对缓和二级悬河的趋势是有利的；而 1985~1997 年小水条件下，泥沙在河槽中严重淤积，河床严重萎缩，河床横比降加大，极易形成小流量高水位，发生横河、斜河、滚河等重大险情，危及大堤的安全，因此在枯水小槽和平滩河床平均河底高程升高的条件下二级悬河的危险性显得特别突出。

### 5 生产堤对二级悬河的影响

黄河下游从 1958 年开始修建的生产堤主要分布在陶城铺以上的宽河段。生产堤修建以后阻挡了滩槽水沙的正常交换，一般洪水漫滩范围仅限于生产堤范围以内，即使是大洪水也只能从口门进水，大大减少了滩地的进水量和泥沙在滩地上的淤积量，虽然在一定程度上保护了农业生产，却加重了河床唇高滩低的现象。自 1973 年起，国家多次号召



表 4 各河段临河滩面平均高程与平滩河床平均河底高程差平均值变化 (单位: m)

Tab. 4 Mean height difference between the average level of the floodplain near the embankment and the average elevation of the bed at bankfull water-level for each reach in the lower Yellow River

时间	铁谢-花园口	花园口-高村	高村-陶城铺	陶城铺-利津	利津-渔洼	
左侧	1973 年	2.21	1.33	1.87	2.66	0.80
	1985 年	2.16	1.64	1.64	4.10	1.81
	1997 年	1.70	0.56	-0.03	1.92	1.40
	1973-1985 年	-0.05	0.31	-0.23	1.44	1.01
	1985-1997 年	-0.46	-1.08	-1.67	-2.18	-0.41
	1973-1997 年	-0.51	-0.77	-1.90	-0.74	0.60
右侧	1973 年	2.04	1.32	1.76	2.39	1.93
	1985 年	1.37	1.35	2.10	3.78	3.25
	1997 年	1.59	0.68	0.23	1.66	1.95
	1973-1985 年	-0.67	0.03	0.34	1.39	1.32
	1985-1997 年	0.22	-0.67	-1.87	-2.12	-1.30
	1973-1997 年	-0.45	-0.64	-1.53	-0.73	0.02

破除生产堤, 但是因为关系到群众的切身利益, 破除工作一直难以彻底执行。据黄河水利委员会资料, 1993 年全下游有生产堤 527km, 虽然当年及以后时间有相当部分的破除, 但存在着破除不彻底等问题, 阻水现象仍然很严重, 同时也有复堵和新修的现象<sup>[8]</sup>。

黄河下游有的地方有多道生产堤, 随着河床的收缩、扩张和摆动, 生产堤的位置也会有所变化。为了研究生产堤宽度对二级悬河的影响, 取 1973 年和 1985 年汛后在同一位置共同存在的、最靠近河床的生产堤作为生产堤的位置 (有几个断面在 1985 年有生产堤, 但到 1997 年在这个地方的生产堤已经被破除, 但考虑到破除时间在 1993 年以后, 时间比较短, 在该时段内很少发生漫滩洪水的条件下, 生产堤的破除对泥沙在滩地上的淤积分布影响不太大, 为了增加断面资料数量, 仍然把该处取为 1997 年生产堤所在的位置)。如果河床两侧都有生产堤则取两生产堤间的宽度, 如果仅一侧有生产堤则另一侧取大堤或高滩的位置。生产堤内滩地指左右两侧平滩河床滩唇至生产堤之间的滩地, 生产堤外滩地指左右两侧生产堤至大堤之间的滩地。

从 1973~1997 年花园口至陶城铺河段生产堤内、外滩地平均高程相对于 1973 年高程差的沿程变化及生产堤宽度的沿程变化可见 (图 8), 各断面生产堤内滩地平均高程的增长值都比生产堤外滩地平均高程的增长值大, 按所涉及到的 20 个断面资料平均, 生产堤内滩地平均高程增长 0.91 m, 生产堤外滩地平均高程增长 0.23 m。对比 1973~1997 年各断面生产堤内滩地平均高程的增长值和生产堤的宽度, 可见生产堤宽度较窄的断面生产堤内滩地高程的增长值较大, 相反, 生产堤较宽的河段其高程增长值较小, 峰谷基本上对应, 说明生产堤窄的河段泥沙堆积的空间更小, 对生产堤内滩地高程的增长有一定的影响, 这也说明了生产堤对下游二级悬河的发展有促进作用。

对整个花园口至陶城铺河段, 生产堤外滩地平均高程增长主要发生在 1973~1985 年下游来水较大的时期 (表 5), 在 1973~1985 年下游来水较小的时期没有明显增长。对于生产堤内滩地, 花园口至高村游荡段在 1985~1997 年小水时期平均高程增长较多, 高村至陶城铺过渡段在 1973~1985 年大水时期平均高程增长较多, 而在后一个枯水时段增长量很小。生产堤内滩地平均高程变化与平滩河床滩唇高程在两个时段内变化情况基本一致。

## 6 总结

1973~1997 年黄河下游经历了一次水沙的周期性变化, 1973~1985 年来水较丰, 而 1985~1997 年在气候变化和人类活动共同作用下来水较枯。在这两种不同的水沙条件下,

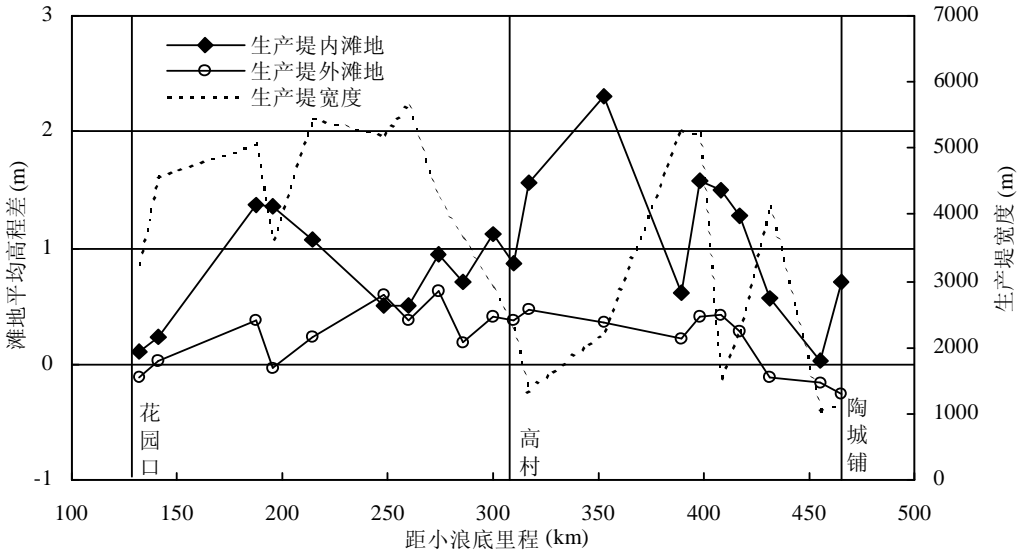


图 8 生产堤间宽度和生产堤内、外滩地平均高程变化沿程分布

Fig. 8 Width between farming levees and average rise of the river bed level inside and outside the farming levees along the lower Yellow River

下游不同河段二级悬河发展过程的特点有所不同。对高村以下河段, 1973~1985年大水条件对下游河床有冲刷主槽和淤积滩地的作用, 使平滩面积扩大, 平均河底高程降低, 对二级悬河的发展有舒缓作用, 但在水流漫滩的过程中, 在控护工程、生产堤等的作用下, 泥沙主要淤积在靠近滩唇附近的滩地上, 造成河床横比降加大; 在接下来的 1985~1997 年小水条件下, 漫滩洪水发生机会减少, 泥沙主要淤积在主槽内, 导致河床萎缩, 对水沙的输送能力下降, 在前期造成的河床横比降加大的条件下, 加重了二级悬河的危险形势。高村以上的游荡段河床是受来水来沙影响最直接的河段, 大水条件下河床受到冲刷, 加上河床有所游荡, 滩唇的升高不多; 1985~1997 年小水和高含水流多次发生, 大量泥沙在主槽以及嫩滩部位淤积, 该时段内二级悬河发展很快。

黄河下游河床既是水沙的通道, 也是泥沙大量沉积的场所。在自然状态下, 通过大水漫滩和主流的摆动使泥沙相对均匀地分布于大堤之内, 而在人类控制了主流的位置和削减了洪峰流量之后, 即使在水量较丰沛的条件下, 漫滩水流所挟带的泥沙也主要集中于滩唇附近的滩地上, 加以滩地上各种阻水建筑的影响, 使大堤附近的滩地泥沙淤积量很少, 当滩唇逐渐被淤高后, 河床的横比降加大, 逐渐形成了二级悬河的形势。

生产堤对漫滩洪水所携带的泥沙的堆积范围有限制作用。在 1973~1985 年和 1985~1997 年两个时段内, 生产堤内滩地都是泥沙堆积的主要区域, 生产堤外滩地泥沙淤积量很少。生产堤间距宽度较窄的河段由于泥沙堆积的空间更加狭窄, 滩地高程升高速度更快, 所以生产堤对二级悬河的发展有一定的促进作用。

表 5 各河段生产堤内、外滩地平均高程变化 (单位: m)

Tab. 5 Changes of the average floodplain level inside and outside the farming levees along the lower Yellow River

时段		花园口-高村	高村-陶城铺	花园口-陶城铺
生产堤内滩地	1973-1985 年	0.22	1.00	0.61
	1985-1997 年	0.57	0.12	0.35
	1973-1997 年	0.80	1.12	0.91
生产堤外滩地	1973-1985 年	0.20	0.21	0.21
	1985-1997 年	0.08	-0.03	0.03
	1973-1997 年	0.28	0.18	0.23

## 参考文献 (References)

- [1] Ye Q. Tendency of the Suspended River and Its Environmental Effect in the Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1997. [叶青超. 黄河下游地上河发展趋势与环境后效. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.]
- [2] Zhao Yong. Situation and control measures of the suspended channel of the Puyang reach in the Lower Yellow River. Yellow River, 2002, (12): 14-15. [赵勇. 黄河濮阳河段二级悬河状况及治理措施. 人民黄河, 2002, (12): 14-15.]
- [3] Du Yuhai, Bi Dongsheng, Chen Haifeng. The harm and control measures of the secondary suspended channel of the reach in Shandong province in the lower Yellow River. Yellow River, 2004, (1): 6-8. [杜玉海, 毕东升, 陈海峰. 黄河山东段二级悬河的危害及防治措施. 人民黄河, 2004, (1): 6-8.]
- [4] Zhang Ren. Control measures of the secondary suspended channel in the lower Yellow River. In: Yellow River Conservancy Commission (ed.), Formation Cause and Control Measures of the Secondary Suspended Channel in the Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003. 164-170. [张仁. 关于二级悬河治理对策的几点认识. 见: 黄河水利委员会编, 黄河下游二级悬河成因及治理对策. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 164-170.]
- [5] Zhang Hongwu. Formation cause and harm of the secondary suspended channel of the Yellow River and its control measures. In: Yellow River Conservancy Commission (ed.), Formation Cause and Control Measures of the Secondary Suspended Channel in the Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003. 171-178. [张红武. 黄河下游二级悬河成因、危害及治理对策. 见: 黄河水利委员会编. 黄河下游二级悬河成因及治理对策. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 171-178.]
- [6] Zeng Qinghua. Discussion of solutions to the problem of secondary suspended river in the lower Yellow River. Journal of Sediment Research, 2004, (2): 1-4. [曾庆华. 黄河下游二级悬河治理途径的探讨. 泥沙研究, 2004, (2): 1-4.]
- [7] Qi Pu. Cause of the phenomenon of "small flood leading to big loss" and countermeasures in the lower Yellow River. Yellow River, 2002, (7): 12-13. [齐璞. 黄河下游小水大灾的成因分析及对策. 人民黄河, 2002, (7): 12-13.]
- [8] Yellow River Conservancy Commission (ed). Formation Cause and Control Measures of the Secondary Suspended Channel in the Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003. 61. [黄河水利委员会编. 黄河下游二级悬河成因及治理对策. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 61.]

## The Process of Secondary Suspended Channel in the Lower Yellow River under Different Conditions of Runoff and Sediment Load

YANG Jishan<sup>1,2</sup>, XU Jiongxin<sup>1</sup>, LIAO Jianhua<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on data of cross-section measurements obtained during the period 1973-1997, the development of the secondary suspended channel in the lower Yellow River has been studied. It has been found that the period 1973-1985 was the main period in which the secondary suspended channel was formed in the reach above Gaocun station; but in the reach below, the process can be divided into two periods of time. In the period 1973-1985 with high water discharges, large quantities of sediment deposited on the floodplain near the natural levee, resulting in a larger lateral slope of the flood-plain. In the period 1985-1997 with low water discharges, large quantities of sediment deposited within the main channel, and as a result, the channel shrank and the situation of the secondary suspended channel became even more serious.

**Key words:** the Yellow River; channel processes; secondary suspended channel; farming levee