

# 华北平原河流纵剖面\*

陆中臣 舒晓明 曹银真

(中国科学院地理研究所)

## 提 要

本文用下凹度指标定量地描述河流纵剖面特征,华北平原诸河下凹型的纵剖面不仅与河长有关,而且也与水能有关。在综合分析影响河流纵比降因素的基础上,提出了构造运动的形变率、床砂粒径和来沙系数三要素的复式回归方程,此式体现了内外营力对河流比降的影响。

河流纵剖面问题不仅是河流地貌发育的理论问题,也是河相关系的主要内容,又是生产实践中的重要课题。本文通过对河流纵剖面的分析,研究华北平原河流纵剖面的形态及其影响因素。

## 一、河流纵剖面的形态特征

河流纵剖面指河流沿水流方向的几何形态,通常包括河谷纵剖面、水面纵剖面及河床的纵剖面,后者又包括主槽及高低滩地的纵剖面。本文的分析主要是河床的纵剖面。

1. 纵剖面的下凹度 多数河流尤其是冲积性河流的纵剖面是下凹型的(图1)。为了

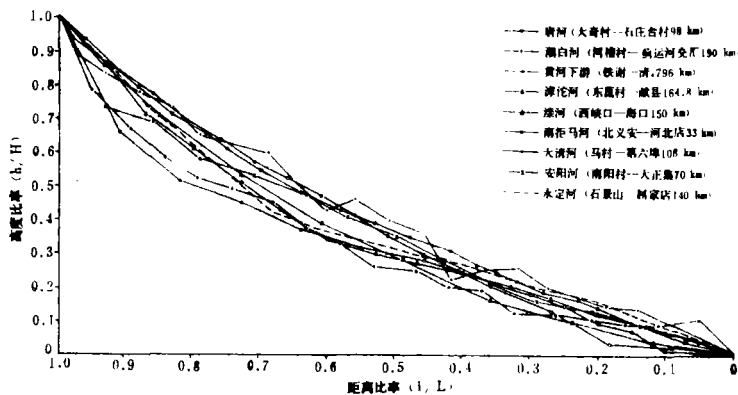


图 1 华北平原河流纵剖面

The longitudinal profiles of the rivers in the North China plain

本文1984年10月18日收到,1985年6月20日收到修改稿。

\*多元回归方程的计算机处理由贾亚非同志完成,谨此致谢。

描述这种纵剖面的形态, 用下凹度指标来表示。下凹度是指河流纵剖面向下凹陷的程度。不同的学者对下凹度的计算方法不同: 惠勒(Wheeler, D. A.) 是连结河流分水岭及出海口作一直线, 然后在纵剖面线上, 作一条平行于上述直线的切线, 这两条直线之间的垂直距离和分水岭及出海口的高差之比值, 就是这条河流纵剖面的下凹度<sup>[1]</sup>。里奥普等(Leopold, L. B, et al)对下凹度的求法是连结分水岭与出海口作一直线, 弧与弦间最大垂向距离与该垂线和弦交点高程之比, 即是这条河流纵剖面的下凹度<sup>[2]</sup>。伊凡诺夫(И. В. ИВАНОВ)确定下凹度的方法是把全河或某河段的纵剖面线绘出之后, 通过上下端点作矩形, 而纵剖面线将矩形分成上下两半, 用上下两半面积之比值, 作为这条河流或河段的下凹度<sup>[3]</sup>。用此法求得的下凹度精度比前两者高。有了下凹度就可以分析河流纵剖面下凹型的原因。

2. 华北平原河流纵剖面下凹型的原因分析 在有关河流纵剖面下凹型原因的研究中, 休尔莱(Surrell, A.) 认为<sup>[4]</sup>, 下凹型的纵剖面是沿河三种不同状况组合的结果: 河流上游段主要是水流的汇集区和地表的侵蚀区, 因此以溯源侵蚀为主。河流的下游为沉积区, 即加积占优势。中游地区是二者的过渡区, 这种结合提供了沿程纵剖面的下凹, 斯顿伯格(Sternberg, H.) 认为<sup>[4]</sup>, 河流纵剖面下凹型的形成是由于河流输送物质自上游向下游逐渐减少。为了保持一定流速以输送粗颗粒泥沙, 上游段比降陡; 下游泥沙颗粒变细, 输送细粒物质所需的流速较低, 河流下游段的比降平缓所以纵剖面形成下凹型。里奥普等(Leopold, L. B, et al)认为<sup>[2]</sup>: 当支流增加引起流域面积增加而流量增加时随着河宽和水深向下游增加, 河床质粒经一般地趋向减小, 比降通常变平, 总的说来, 纵剖面是下凹的。

黄河下游的情况与上述诸说不同。黄河下游并没有较大支流的来汇, 流量沿程变化不大, 床沙中径从高村以下基本上没有变化, 而纵剖面仍是下凹的。作者认为 1) 其原因之一为河口

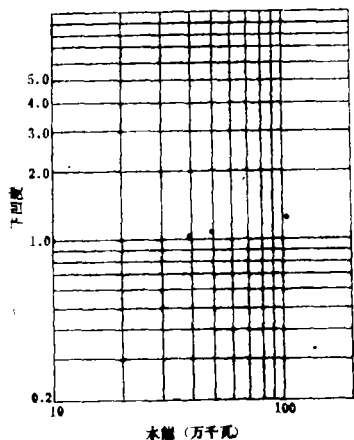


图 2 黄河下游下凹度与水能间的关系  
The relationship between the concavity of the lower channel of the Yellow River and the hydraulic energy

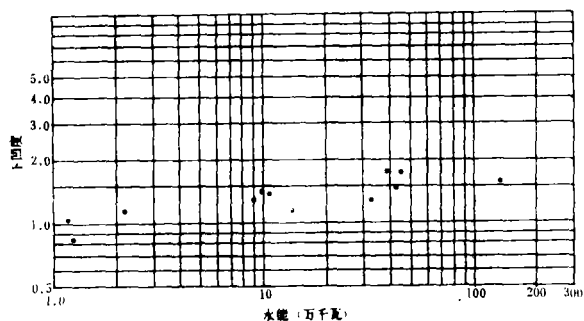


图 3 华北平原河流下凹度与水能间的关系  
The relationship between the concavity of the river longitudinal profile in North China and hydraulic energy

1) 陆中臣: 黄河下游河流地貌的几个理论问题, 1982年。

的不断延伸, 由于河长的增加, 而使河床比降减小, 纵剖面呈下凹型。所以, 纵剖面的下凹度是河长的函数。为了说明这一问题, 都以铁谢为起点, 用伊凡诺夫的方法, 将铁谢至高村、陶城埠和利津三种不同河长, 进行了下凹度计算, 其值分别为1.16, 1.41和1.50, 由此看出, 短河段的下凹度小, 长河段的下凹度大, 河段愈长下凹度愈大。另外, 纵剖面的下凹度与水流能量有关, 计算水能的公式为  $W = 9.81QH$ , 式中  $Q$ ——平均流量(立方米每秒),  $H$ ——落差(米)。因为, 从能量的观点来说, 水流的比降正是代表单位重量的水经过单位距离所能消耗的能量, 于是点绘了黄河下游各河段和华北平原诸河流纵剖面的下凹度与水

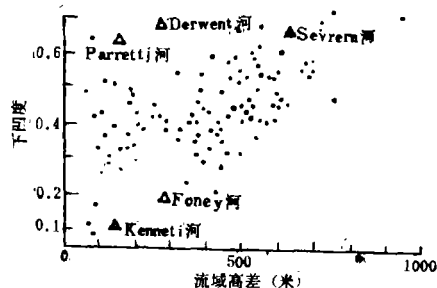


图 4 下凹度与流域高差间的关系 (据惠勒, D. A. Wheeler)

The relationship between the concavity of the river longitudinal profile and the relief of the basin

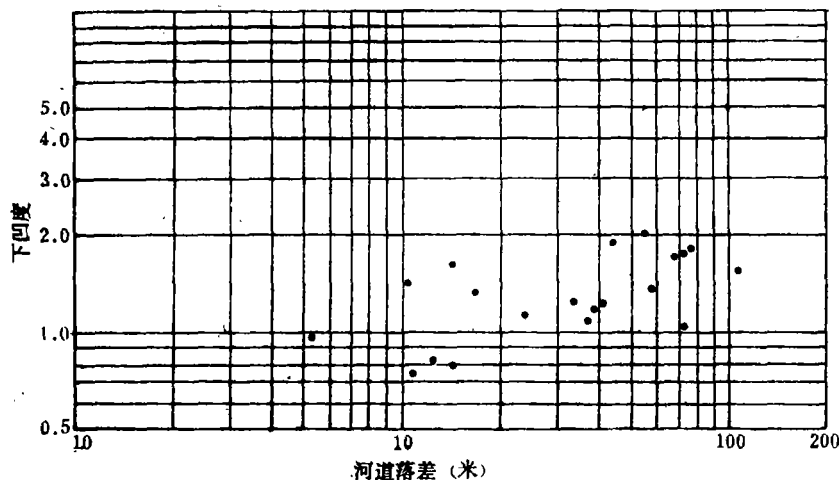


图 5 华北平原河流下凹度与河道落差间的关系

The relationship between the concavity of the river longitudinal profile in the North China plain and the total fall of channel

能的关系, 其关系式分别为: 黄河下游:  $C = 0.46W^{0.213}$ ; 华北平原河流:  $C = 0.97W^{0.116}$ 。由图 2 和图 3 的关系可以看出, 其相关性比惠勒的下凹度和流域高差间的关系图形(图 4)为好, 也比本文中图 5 的关系要好, 这则说明了水能对河流纵剖面形态的塑造所起的重要作用。

## 二、影响华北平原河流比降的因素及其定量关系

河床纵比降是一个河段的落差与水平距离之比, 纵剖面则是纵比降沿程变化方程的积

分。地貌学家和水利专家对河流沿程的比降变化及纵剖面的形状已经提出了不少公式试图表明坡降与决定河流纵剖面因素间的关系。公式的形式虽然不同,但基本上都是从河床的组成物质和流量的大小等单因素分析,总之,都只考虑了外营力因素。对于影响河床比降和纵剖面形状的另一面,即内营力因素的影响,学者们还未在定量的关系式中加以考虑,这是不全面的。因为河流地貌的形成、发展和演变,是内外营力共同作用的结果。本文一方面考虑到河流的比降及纵剖面取决于流域的来水来沙及河床的边界条件(外营力);另一方面又考虑新构造运动(内营力)——形变率的影响,采用综合因素的分析方法,最后提出影响河床比降的综合因素表达式。现将主变量分述如下:

1. 河床质粒径( $D_{50}$ ) 从输沙平衡的角度出发,河床组成愈粗,调整后形成的河床纵比降愈陡,两者具有函数关系,实际上它是影响河床比降和纵剖面形状狭义的边界条件。冲积河流具有自动调整的能力,在一定的来水来沙条件及边界条件下,河床要调整它的形态和比降,力求使其挟沙能力和上游来沙条件相适应。另一方面,组成边界的物质又对水流产生一定的阻力,阻力愈大,水流所消耗的能量也愈大。从阻力的角度考虑,也同样地会得出河床物质愈粗,河流所形成的比降愈陡的结论<sup>[5]</sup>。所以,我们采用河段中河床组成中值粒径( $D_{50}$ )作为代表粒径与河床比降点绘关系(图6),图6显示出关系较好,相关系数0.92。其定量关系为:  $J = 9.61D_{50}^{0.73}$ 。

2. 来沙系数( $\rho/Q$ ) 是指上游来水量为1秒立米时进入河段的沙量,它反映了相对水量而言的流域产沙情况。由于输沙量和流量之间不保持线性相关,故支流的比降必然会大于干流的比降。因为干流水量大,挟沙能力大,支流来不及供应干流所能挟带下泄的沙量,正

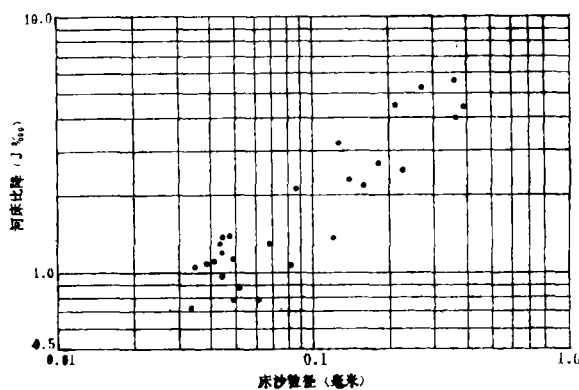


图6 河床比降与床沙粒径间的关系  
The relationship between the channel gradient and the bed material size

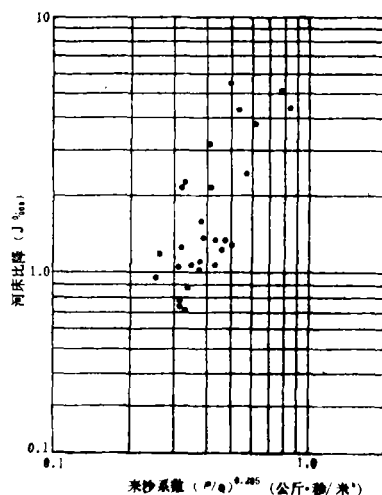


图7 河床比降与来沙系数间的关系  
The relationship between the channel gradient and the ratio of the sediment concentration to discharge

因为这个缘故,在同一流域内,流量大的河流比降才较小<sup>1)</sup>。钱宁<sup>[6]</sup>认为黄河下游的造床质泥沙来量沿程递减,即来沙系数( $\rho/Q$ )沿程变化,而比降通常沿程减小,所以比降的变化取决于来沙系数,并给出 $J \sim (\rho/Q)^{1.6}$ 的表达式。我们根据华北平原诸河的来沙系数与河床比降点绘了关系(图7),其指数关系式为: $J = 7.23 (\rho/Q)^{0.48}$

3. 地壳垂直形变率(T) 是指地壳相对升降强度,也即是广义的边界条件。华北地区属于中朝准地台,中生代燕山运动奠定了目前隆起与拗陷构造的雏形。新生代喜马拉雅运动又以强热的掀斜式断裂差异升降运动,使本区进一步形成了继承性的隆起与拗陷的基底构造的格局。大型拗陷带成了接受后来物质沉积的场所,而周围的大型隆起,特别是山西中台隆为本区的沉积提供了大量的泥沙来源。

上新世晚期以来,由于断块运动的变异和发展,拗陷盆地继续下沉,周围山体继续上升,在太行山东麓普遍形成的二至三级河流阶地便可作为见证。新生代以来,沉陷带一直处于扩张、沉陷阶段,各时期的沉积速率如表1。

表 1 冀中地区新生代以来扩张、沉陷速率(毫米每年)

The rates of expanse and subsidence since Neozoic Era in Jizhong plain (mm/a)

时 代	老第三纪 E	新第三纪 N	早更新世 Q <sub>1</sub>	中更新世 Q <sub>2</sub>	晚更新世 Q <sub>3</sub>	全新世 Q <sub>4</sub>
沉陷速率	0.11	0.081-0.118	0.153-0.380	0.314-0.371	0.188-2.46	4.2-5.8

第四纪以来,本区在整体下降的基础上,南北还有差异性升降运动,从表2可以看出,无论是南部还是北部,由老到新其沉积速率是增大的,这种加速沉积的新构造运动特征,对河流比降的塑造将有较大的影响。

表 2 冀中平原第四纪沉积速率(毫米每年)

The rates of deposition in Jizhong Plain during the Quaternary Period (mm/a)

指 标 时 代	部 位	
	北 部	南 部
早更新世 Q <sub>1</sub>	0.49	0.11
中更新世 Q <sub>2</sub>	0.20	0.27
晚更新世 Q <sub>3</sub>	0.20	0.24
全 新 世 Q <sub>4</sub>	5.0	5.83

据国家地震局测量队等单位确定<sup>2)</sup>,华北地区以每年9毫米的地壳垂直形变率为相对稳定区,华北拗陷区西侧的太行山,近期隆起山地形变率为10毫米每年以上,上升最快的可达12-13毫米每年,即相对于稳定区每年上升3-4毫米,说明山地快速上升。华北平原的形变

1) 中国科学院、水利电力部水利科学研究所:黄河下游河床演变中的若干理论问题,1961年。

2) 国家地震局地壳形变编图小组:中国地壳形变图及其说明书,1973年12月。

率一般在 9 毫米每年以下。说明其相对于稳定区在下降。虽然华北平原总体是相对下降的,但不同地貌单元的沉陷幅度也不一样,如上所述,以 9 毫米每年为相对稳定区计算,冲积扇带的平均地形变率为 8.29 毫米每年,则平均下沉速率为 0.71 毫米每年(表 3)。从垂直运动的观点看,速率高的地区相对于速率低的地区是上升的,反之,速率低的地区相对于速率高的地区

表 3 华北平原不同地貌部位的平均形变率和沉积率(毫米每年)  
The mean rates of crustal deformation and deposition in various  
geomorphic units in the North China plain (mm/a)

项 目	地貌单元	冲积扇	白洋淀	冲积平原	文安洼	河北平原
平均地形变率		8.29	6.16	6.29	7.28	7.15
平均沉积率		0.71	2.84	2.71	1.72	1.85

是下降的。这就说明近期的新构造运动仍具有掀升性特征,这种构造运动的特性和流经其上的河流流向又基本一致,正因为如此,所以它也决定着华北平原河流比降塑造的趋向;即在相对上升地段的河流比降增大,下沉地区的比降减小,见图 8 和表 4。可见,新构造运动也是决定河流向平衡方向自动调整的因素。不过目前华北平原上的河流绝大多数皆未达到平衡。

以上只是从总的趋势描述二者间的关系,如果形变率资料精度较高,能把每一条河流逐一搞清的说,物理概念就会更清楚。

综上所述,华北平原河流比降应与上述诸因素存在着如下的函数关系:

$$J = f(D_{50}, \rho/Q, T)。$$

就统计意上来说,这种函数关系可认为具有指数形式,其关系式中的指数和系数,通过计算机进行复式回归计算。得出河流比降与各主变量间的相关关系如下:

$$J = 7.50 T^{0.194} D_{50}^{0.570} (\rho/Q)^{0.169}$$

河流比降与这些因素的综合相关系数为 0.95,将华北平原 27 条河流(或河段)的比降值和相应各变量值的数据列入表 4。将各河流(或河段)比降的实测值与公式计算值间的对比关系点在图上(图略),可以看出,点子都较好的分布在 45° 线的两侧。

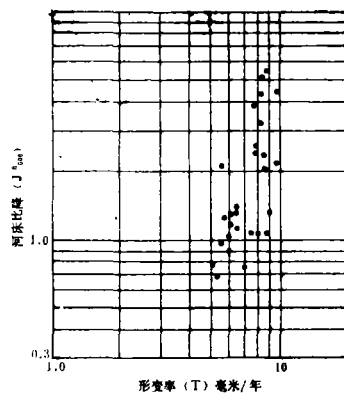


图 8 河床比降与形变率间的关系  
The relationship between the channel  
gradient and the rates of the crustal  
variability

表 4 华北平原河流比降及其影响因素

The river gradients and affecting factors in the North China plain

编号	河流或河段名称	河床比降	形变率	床沙粒径	来沙系数
		J (‰)	T (毫米)	D <sub>50</sub> (毫米)	$(\rho/Q)^{0.295}$ (公斤·秒每六次方米)
1	黄河 (铁谢-高村)	2.13	5.5	0.0870	0.3213
2	黄河 (高村-陶城埠)	1.28	6.0	0.0688	0.3222
3	黄河 (陶城埠-河口)	1.05	8.0	0.0834	0.3174
4	漳沱河	4.38	8.3	0.3850	0.5262
5	漳河	3.82	7.7	0.2500	0.6187
6	安阳河	2.83	9.0	0.1280	0.4271
7	卫河 (临清以上)	1.10	6.5	0.0490	0.3781
8	卫运河 (临清-德州)	1.03	6.0	0.0350	0.3796
9	漳卫新河 (德州以下)	1.30	9.0	0.0450	0.4984
10	永定河	4.40	9.9	0.2200	0.8417
11	滦河	2.62	8.0	0.1800	0.3799
12	潮白河	2.26	8.0	0.1200	0.3235
13	滏阳新河	0.96	5.5	0.0450	0.2600
14	子牙新河	0.78	5.0	0.0610	0.3186
15	唐河	5.15	9.0	0.2700	0.7835
16	永定新河	1.18	6.0	0.0450	0.2699
17	白沟河	2.15	9.0	0.1600	0.4080
18	大清河	0.87	6.0	0.0520	0.3400
19	南拒马河	5.41	9.5	0.4500	0.4882
20	徒骇河 (禹城以上)	1.37	6.5	0.0470	0.3987
21	徒骇河下段	1.06	7.5	0.0410	0.3636
22	马颊河 (德州以上)	1.34	6.5	0.0450	0.4401
23	马颊河下段	1.07	9.0	0.0400	0.4343
24	南运河	0.77	5.2	0.0343	0.3344
25	子牙河	0.77	7.0	0.0500	0.3186
26	黄、清、漳古道	1.25	5.8	0.1032	0.3213
27	滞龙河	2.41	8.0	0.2200	0.4761

### 三、结 论

1. 华北平原河流纵剖面的下凹度是水流能量和河长的函数。其建立的相关图形令人满意。

2. 现有的经验公式是以河床组成和河流流量表述河床比降的调整, 只能反映外营力的作用。处于相对下沉区的华北平原, 同时又受到具差异掀升特性的新构造运动影响, 因而使得平原不同部位的形变率不同, 从而影响河流纵剖面形态和河床比降的调整, 这是内营力的作用。从点绘在双对数纸上的河流比降与形变率的关系看出, 比降随着形变率而变化, 即形变率大的地段(相对上开), 比降大, 形变率小的地段(相对下降), 比降就小。这则说明华北平原河流纵剖面的形状和河床比降, 不仅受来水来沙和边界条件的影响, 同时也受新构造运动强度的影响。

3. 在分析了内外营力对华北平原河流纵剖面形态和河床比降影响的基础上, 建立了形变率、床沙粒径和来沙系数等因素与河床比降的指数函数关系式为:

$$J = 7.5T^{0.194}O_{50}^{0.570}(\rho/Q)^{0.169}.$$

其综合相关系数为0.95。

### 参 考 文 献

- (1) D.A. Wheeler, The overall shape of the longitudinal Profiles of Streams in Geographical Approaches to Fluvial processes, ed by A.E. Pitty, Geoabstracts Norwich, 1979.
- (2) L.B. Leopold, M.G. Wolman, and J.P. Miller, Fluvial processes in Geomorphology, 1964.
- (3) И.В. Иванов, Метод качественной характеристики формы профиля реки, известия всесоюзного географического общества, том, 83, Вып. 6 1955.
- (4) Marie Morisawa, Stream, Their dynamics and morphology, 1968.
- (5) 钱宁: 河床演变学, 科学出版社(待出版), 1986年。
- (6) 钱宁、周文浩: 黄河下游河床演变, 科学出版社, 1965年。



# LONGITUDINAL PROFILES OF THE STREAMS ON THE NORTH CHINA PLAIN

Lu Zhengchen Shu Xiaoming Cao Yinzen

(Institute of Geography, Academia Sinica)

## Abstract

It is generally outlined by the forerunners, that the down-concave longitudinal profile of the streams means that the greater the rate of increase of discharge downstreams, the faster the sediment concentration decreases, and the smaller the sediment constitution, the greater the concavity of the longitudinal profile is.

In this paper, the features of the stream of longitudinal profile have been quantitatively described by means of the index of concavity, the concave longitudinal profiles of the streams on the North China plain are not only the function of the river length, but also the function of hydraulic energy.

At present, the adjustment of the channel gradient is only shown by the experimental formulas based on bed material and discharge, which can only reflect the action of exogenic force due to relative subsidence of the North China plain, and different movements inheriting from the original structure, especially the features of the tilting neotectonic movement, the rate of crustal deformation, which is different in various geomorphic units, can influence the form of the longitudinal profile of the stream and the adjustment of channel gradient, which is the action of the endogene force. As the factors affecting the adjustment of the channel gradient are analysed, the affections of both endogene and exogenic forces must be considered, because the formation, the development evolution of fluvial landforms result in the comprehensive action of the endogene and exogenic forces.

According to the analysis of the influence of endogene and exogenic forces on the forms of the longitudinal profile and channel gradient of the streams in the North China plain, an exponential multi-correlation equation among channel gradient ( $J$ ) and rate of the crustal deformation ( $T$ ), the bed material size ( $D_{50}$ ) and the ratio of the sediment concentration ( $\rho$ ) to discharge ( $Q$ ) has been set up, as follows:

$$J = 7.5 T^{0.194} D_{50}^{0.750} \left( \frac{\rho}{Q} \right)^{0.169}$$

with correlation coefficient  $r = 0.95$  in cog. unit.