

三门峡水库淤积末端位置确定和预估 的地貌学方法^{*}

陆中臣

(中国科学院地理研究所)

摘 要

本文主要用地貌学的方法来研究三门峡水库淤积上延的问题。运用河床沉积物法和纵剖面抛物线法,确定了渭河下游淤积末端的位置在渭汭 21-22 断面附近,并作了综合性预估,实践证明,在目前水库运用方式下不会影响西安。用同样的方法还确定了北洛河的淤积末端在洛淤 17-18 断面附近,北干流的末端在黄淤 59 断面附近,这与水利部门用断面法、同流量水位和体积法所得的结论基本一致。由于洛淤 17-18 断面和北干流黄淤 59 断面附近正处于纵剖面的坡折,所以淤积末端再继续上延比较困难。

在大的河流上,兴建了重大的水利工程,除了流域加诸于的条件影响外,工程设施对河床的冲淤变化也发生影响,如水库的修建等,对上游来讲,来水、来沙条件不变,但边界条件变了,河床要进行相应的调整(如河床淤积抬高,河床细化,以及影响两岸淹没、浸没、和产生盐碱化等);对下游来讲,边界条件没有变化,来水、来沙条件变了,而河床也要作出相应的调整(如下游河床的冲刷,比降的调平,河床粗化等)。

影响水库淤积上延的因素比较复杂,一般说来,受制于坝前基准面的抬高,原河床比降大小和进库水文泥沙条件及水库运用方式等。三门峡水库淤积上延现象,除了上述的因素外,还有它特定的地理条件。三门峡库区位于黄、洛、渭三河的交汇处,潼关为天然卡口。三门峡水库建成后,潼关处河床抬高 4—5 米,对以上干支流具有局部侵蚀基准面的作用。建库之后,随着潼关河床淤积抬高和黄河回水顶托倒灌的加剧,渭河河口形成拦门沙,河床壅水抬升,渭河下游、北洛河和黄河北干流皆产生自下而上的溯源淤积上延。鉴于生产上的要求,本文以渭河下游为主,并对北洛河和北干流的淤积末端也给予了确定和预估。

水库淤积末端的简单概念

当水库壅水时、由于回水作用,改变了水流条件,回水末端发生淤积;淤积又引起回水的抬高,因而又促使上游河段的淤积。在回水和淤积的相互循环作用下,淤积末端的位置将向上游延伸,这是水库淤积的正常现象。一般在水库水位降落后,回水的抬高和淤积也就停

^{*} 本文承叶青超同志审阅,并提出修改意见,谨此致谢。

止了，并且，当上游来水来沙条件有利时，还会发生冲刷。但是当水库水位已经下降，回水脱离了壅水期在回水范围内形成的淤积体，由于在水库水位降落过程中、所产生的溯源冲刷在原淤积体上刷出深槽，而溯源冲刷未能达到之处，这个淤积体的残留部分，对上游河段起着降低水面比降的作用，河床的这种淤积抬高并向上延伸，影响所及的最远点称淤积末端。泥沙落淤引起回水末端河床和水位相应上升，（即使有的水库在库水位的直接影响已经消除的情况下，泥沙仍然继续淤积），并向上游延伸，这种现象称之为淤积翘尾巴。必须说明，这种延伸是很缓慢的，并非无限制地向上发展，因为，淤积使河床细化，所以除了比降的调整外，随着河床的细化，河床形态向窄深式发展，这样，反过来又影响挟沙力的增大，所以完全有可能在较平的比降下适应新的相对平衡。因此，淤积的厚度只能是自下而上的逐渐减小，而不是无限制的平行抬高。

淤积末端位置的确定方法

这是一个比较复杂的问题，北洛河、北干流和渭河下游淤积末端位置的确定，有关单位做过许多研究工作，特别是渭河下游淤积末端位置的确定。概括起来，他们采用了断面法、同流量水位和体积法等，在此我们提出两种确定淤积末端的方法，即河床沉积物法和抛物线法。

河床沉积物法：从河床沉积物的分析资料中，选用了粉沙—粘土含量平均百分数的变化作为确定淤积末端的指标。众所周知，多沙河流上水库“翘尾巴”的问题，实际上是前期淤积体影响纵比降变缓，排沙能力降低，当这个减小了的比降不能适应来水来沙的情况时，河床就要通过上游河段的淤积来调整比降，直至新的纵横断面和河床质跟水沙条件形成一个新的相对平衡体为止。因此淤积的过程也是河床细化和调整的过程，所以除了比降调整外，床沙组成也同样进行调整，当河床调整到相对平衡的时候，其细化程度（粉沙—粘土含量百分数）应在一定的范围内变化，而其范围的上限，就是淤积末端位置的所在。我们分析了三门峡建库后，渭河 1—28 断面、北洛河 1—17 断面和黄河 1—67 断面小于 0.05 毫米的粉沙—粘土平均含量百分数的变化，从一、二十年的资料平均情况看，渭河在渭淤 21—22 断面出现突变（距坝约 260 公里），北洛河在 16—17 断面出现突变（距坝约 215 公里），黄河北干流在 59 断面出现突变（距坝约 195 公里），突变处以上为一常数，从突变处愈向下游的粉沙—粘土含量愈大（图 1，2，3），此突变处就是淤积末端的位置。现仅以渭河下游资料用表达式表示如下： $M = 53.7 - 0.22L$

式中 L—河道距离。说明三门峡建库后，渭河的淤积末端多年来在渭淤 21—22 断面；北洛河在洛淤 17 断面而北干流在黄淤 59 断面附近。

抛物线法：北洛河，渭河下游和北干流河道长期以来，表现为微冲平衡或微淤平衡和淤积平衡的冲积性平原河流、它们的纵剖面是一条上凹形

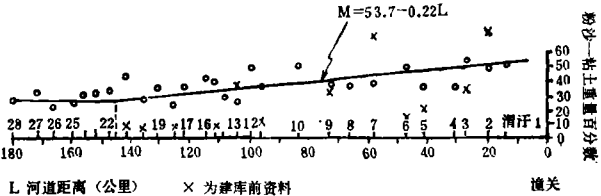


图 1 渭河河床粉砂-粘土含量 (%) 与淤积末端关系

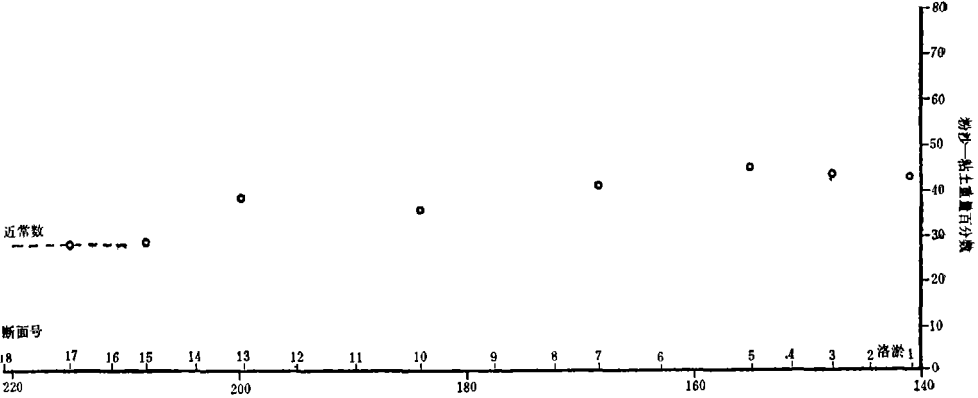


图 2 北洛河河床沉积物粉砂-粘土含量变化图

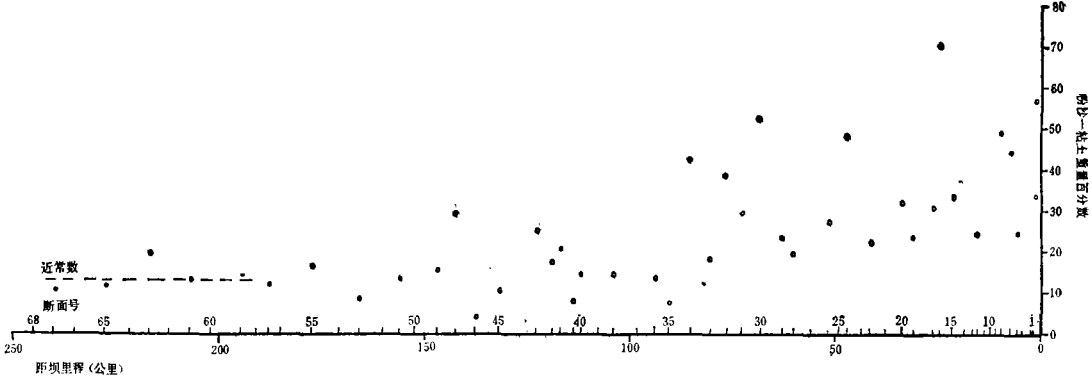


图 3 黄河北干流河床沉积物粉砂-粘土含量变化图

的曲线，这条曲线符合抛物线，因此可用抛物线方程求解，建立建库前三河下游的均衡剖面线，分别得到的三条纵剖面线亦称之为理论曲线。三门峡建库后，潼关河底高程的抬高，也就是控制以上三河的局部侵蚀基准面升高，因而影响上游诸河纵剖面的溯源淤积上延，为了分析淤积上延的最远一点(淤积末端)的变化，将建库后实测的纵剖面线分别与理论曲线套绘，这些实测的纵剖面线与理论曲线之交点，即为历年的淤积末端点。抛物线方程为：

$$h = H \left(\frac{1}{L} \right)^n$$

式中 h —为不同距离 (l) 的高程； H —为计算纵剖面最上游断面高出水平距离为 L 的断面河底高程； n 为形态指标，此值根据伊凡诺夫的方法确定^[1]，即将纵剖面线作成矩形，由剖面线上下两面积之比得出，它代表纵剖面的形态，如 n 值大于 1 时，纵剖面为凹形；小于 1 时为凸形；等于 1 时为直线形。 n 值的大小，是流域的来水来沙、边界条件和新构造运动长期综合作用的结果。鉴于三河已是平衡或准平衡的冲积性河流，因此，可以用建库前建立的抛物线方程求得的圆滑的上凹形的理论曲线为基础，然后将历年实测的淤积纵剖面线套绘，各实测线与理论线的交点，即为各年的淤积末端（如图 4、5、6）。

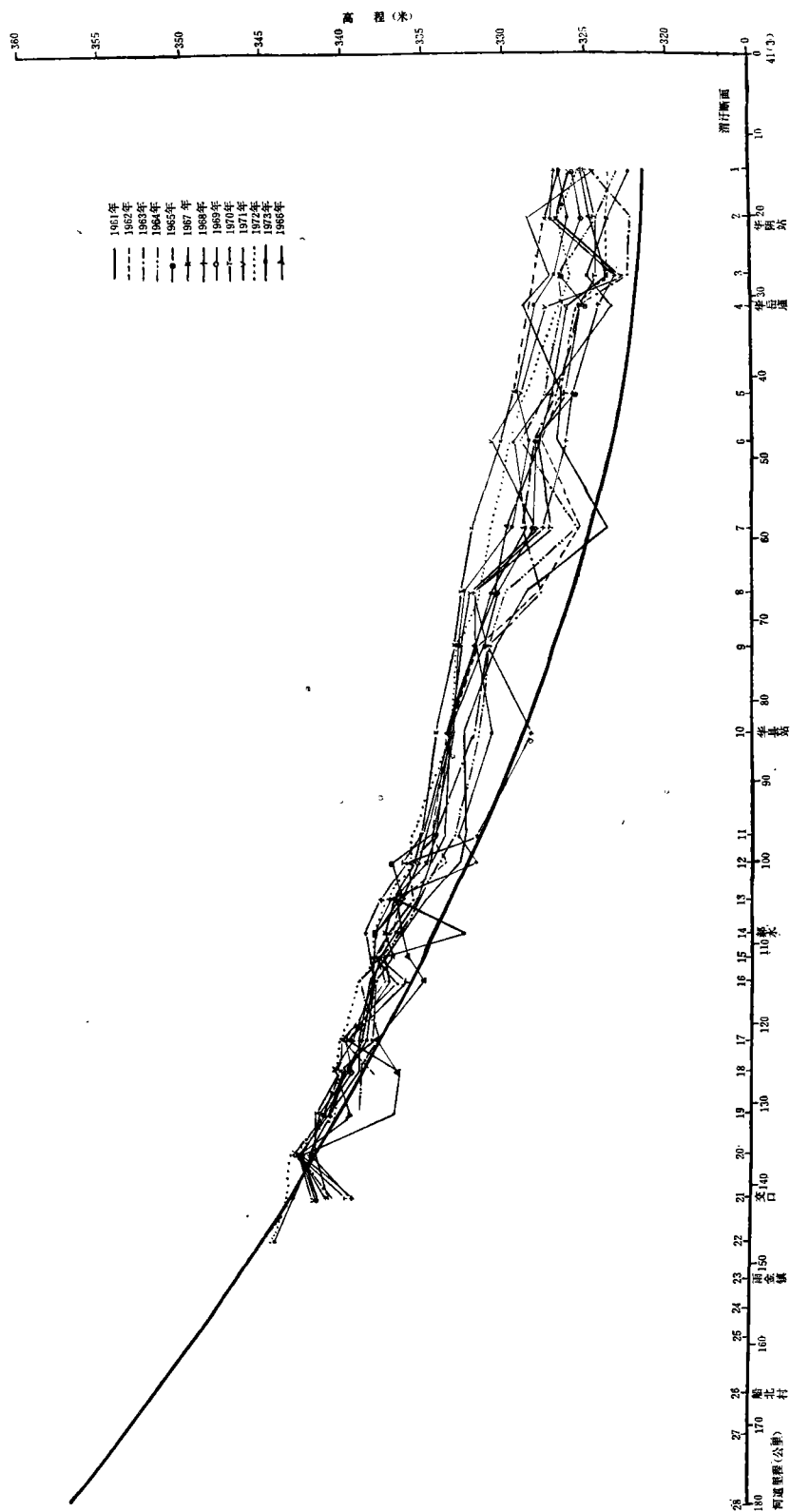


图 4 渭河下游淤积末端位置图
 (抛物线方程 $h = 35.3 \left(\frac{1}{2} \right)^{1.8}$)

渭河、北洛河和黄河北干流建库前河底最深点的抛物线方程为：

渭河 $h = 35.3 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.8}$

北洛河 $h = 33.6 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.79}$

北干流 $h = 92.4 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.38}$

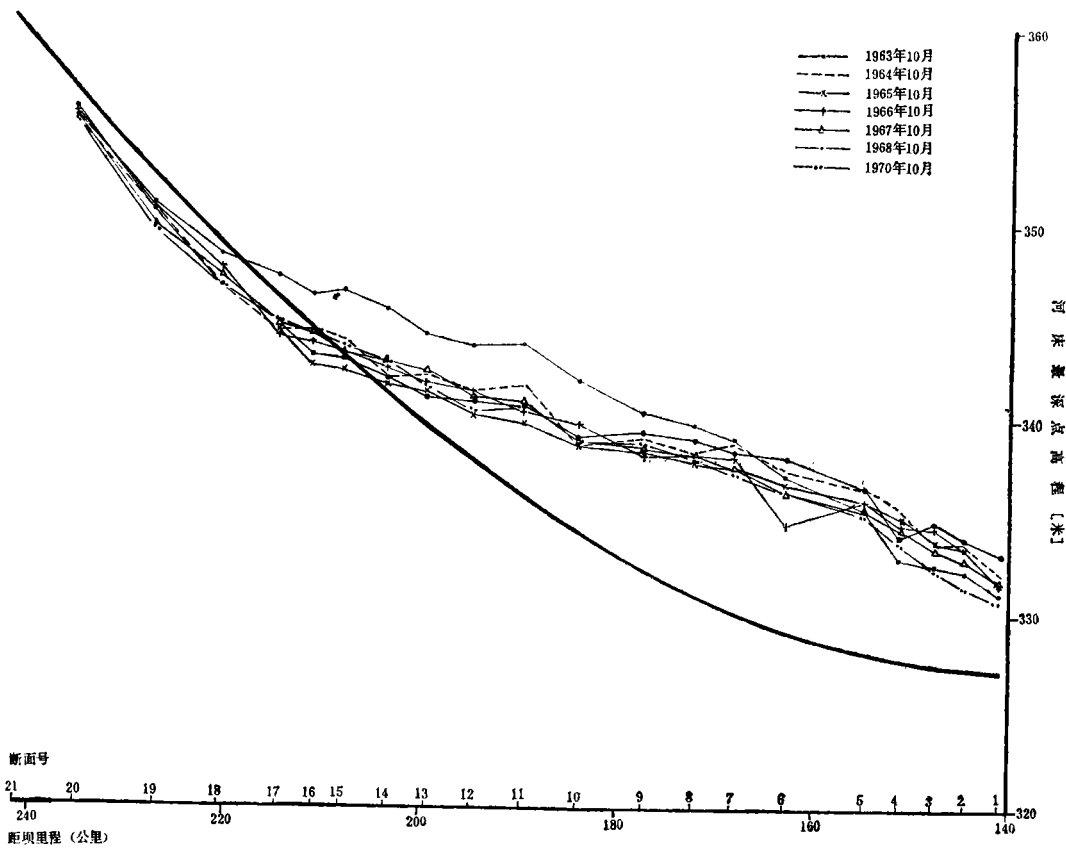


图 5 北洛河淤积末端位置图

(抛物线方程 $h = 33.6 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.79}$)

由此可得到历年的淤积末端的位置（表 1）。

以上的纵剖面线，是用河床断面最深点高程和河床泓线的距离编制的。虽然断面最深点的高程有偶然性，但代表绝对高程，对断面的冲淤十分敏感，因此，它反映河槽断面冲淤变化。不过为了更全面的分析淤积末端的位置，我们以同样的方法，仅以渭河为例，用平均河底高程和河谷中心线距离的资料，编制成纵剖面，然而得到不同地貌部位的抛物线方程，求

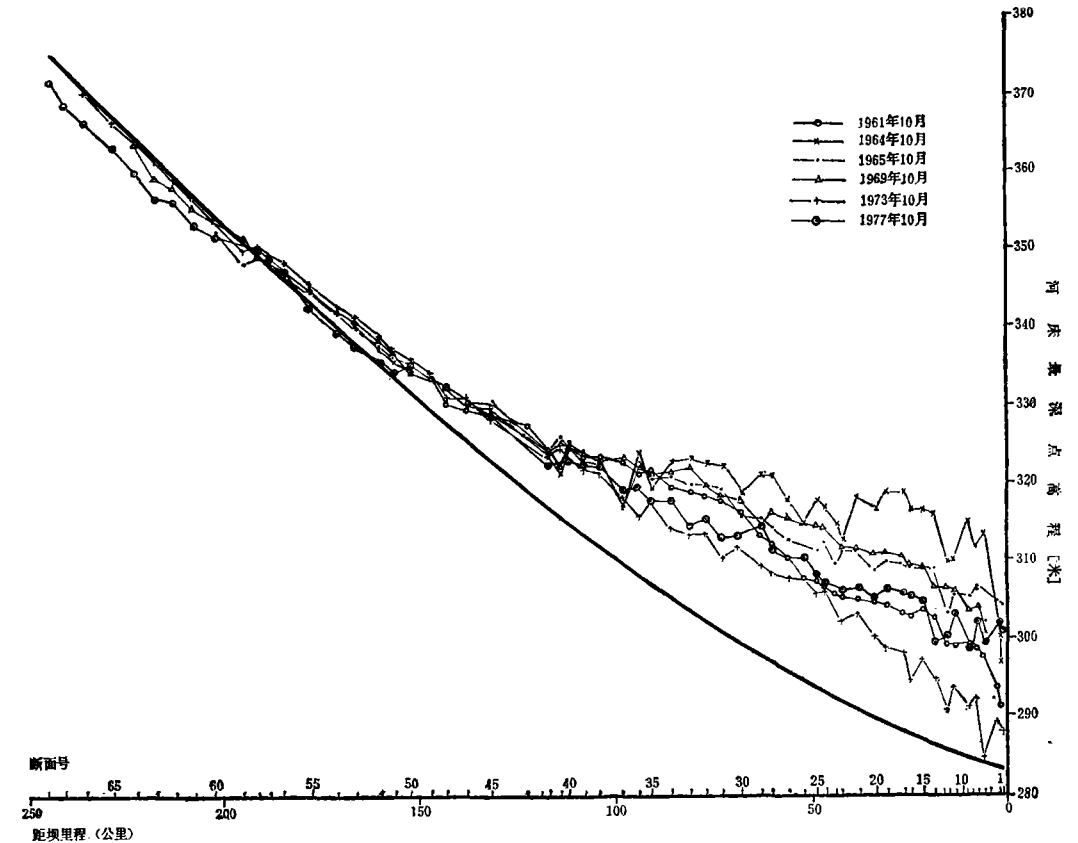


图 6 黄河北干流淤积末端位置图
(抛物线方程 $h = 92.4 \left(-\frac{1}{2}\right)^{1.35}$)

表 1 抛物线法确定河床淤积末端的位置

河名	年份									
	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
渭 河	18	17~18	20~21	18	20~21	17	20	20	21	20~21
北 洛 河	13~14	15	17~18	56	14	15	15	15	15	15~16
北 干 流					57	58	58	58~59	59	55

河名	年份								最远距坝里程 (公 里)
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	
渭 河	20~21	21~22	21	17~18	18	17~18	15	19~20	260
北 洛 河	14	15	13~14	14	15	15	14	13~14	215
北 干 流		59	58	59	55~56	58	52	55	195

出渭河下游不同地貌单元的理论纵剖面线，如：

高滩：
$$h = 36.2 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.23}$$

低滩：
$$h = 35.1 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.44}$$

高低滩平均：
$$h = 35.7 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.34}$$

河床：
$$h = 35.9 \left(\frac{1}{L} \right)^{1.41}$$

并确定了历年的淤积末端位置（表 2，图 7）。

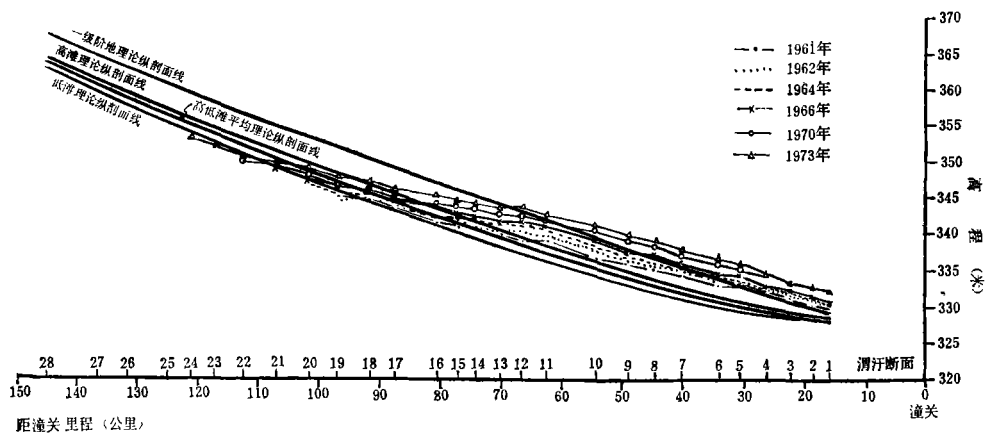


图 7 渭河下游各地貌单元淤积末端位置图

表 2 渭河下游不同地貌部位淤积末端的位置

淤积末端 部位	年 月	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
高滩		12	13	14	14~15	16~17	17	17	16~17	16~17	17	17	17	18~19
低滩	18~19		18	19	19	19	20	20	20~21	20~21	21	21	21	21~22
高低滩平均		14	16	18	18	18	18~19	18~19	19	19	19	19	20	20~21
河床	17~18		18	17~18	17	17~18	17	18	17~18	20	20	20	20~21	19

从表 1 和表 2 比较可以看出：河底最深点的末端远于平均河底末端约一个断面。由表 2 和图 7 看出，河床的淤积末端远于高滩的末端约二个断面；低于低滩的末端约一个断面，而与高低滩的均值末端接近。总之，渭河下游河床淤积末端的最远点在 21~22 断面附近。这与大多数参与渭河研究单位的结论大体一致。

抛物线法是直接用测量资料所构成的纵剖面几何形态,即直接写出河床高程与距离的函数关系。这种公式的特点是没有把纵剖面形态与影响其形态的因素联系起来,而只是用简单的数学形式表示纵剖面的形态。但基于上述三条河流已是微淤或微冲和淤积性平衡的河道,即其纵剖面已具成熟期河流的均衡纵剖面,特别是对同一河段不同时期的比较,用抛物线方程来描述是可行的。

淤积末端发展趋势的预估方法

在预估淤积末端发展趋势之前,首先要知道建库前河道的冲淤特性;只有了解了不同河段的冲淤特性,才能知道那段因受水库影响而加剧了淤积,那段仍保持着建库前的冲淤特性,没有受到或不可能受到水库的影响,从而可以较精确的预估淤积末端发展趋势。经研究渭河下游不同河段具有不同的冲淤特性;如咸阳—道口段(渭淤 37~30 断面)为准平衡段;道口—交口段(渭淤 30—21~20 断面)为微冲性河段;交口—陈家村段(渭淤 21—1 断面)为微淤性河段。北洛河和北干流为微冲和微淤或淤积性河流。只有对不同河流和不同河段冲淤特性清楚之后,才能较为有把握的预估淤积末端的发展趋势。下面着重对渭河下游末端发展趋势给以预估:

(1) 从冲淤规律预估末端的发展趋势。为了从最坏的方面估计渭河下游的情况,选用最深点的高程来估计淤积末端的发展趋势。根据我们采用的方法,淤积上延速度应与建库前河床纵剖面形态指标(n)有关,也就是说,在同一河段上, n 值大,末端的上延速度小,反之则大。关于淤积末端上延速度,统计了七次大洪水间末端平均上延速度与 n 值的关系,并建立了略估末端上延速度的表达式:

$$V = \frac{42}{n^{5.32}}$$

式中 V ——为时段淤积末端上延速度的平均值(公里/年); n ——各时段形态指标年平均值。

建库后的实测纵剖面,假使用至渭淤 26 断面的平均形态值 $n=1.7$,代入上式,则每年平均上延速度为 2.5 公里,而从渭淤 21—26 断面的河道以 26 公里计,那么约需 10 年的时间才能达到 26 断面;如用至渭淤 28 断面的形态值 $n=1.8$,则每年平均上延 1.85 公里,而从渭淤 21—28 断面的河道 40 公里计,则需 21 年的时间达到。

众所周知,河槽淤积末端的变化,一方面取决于下游局部侵蚀基面的变化,另一方面又与上游来水来沙条件有关。事实上,从淤积末端变化情况看,并非是一直向上延伸的,而是有进有退的,十多年来较为明显的倒退有三次,如 1966 年倒退达 15.6 公里,1964 年 11.4 公里,1970 年 3.2 公里,平均一次大洪水倒退 10 公里,从 1961 年到 1970 年内出现过三次大洪水,因此末端的倒退速度大于末端上延的速度,看来淤积末端超过 21—22 断面是困难的。

(2) 根据纵剖面的转折预估淤积末端的发展趋势。冲淤相对平衡的河道纵剖面,一般形成比降连续变化的上凹形曲线。若有局部侵蚀基准面、岩坎、地质构造、岩性和大支流汇入

等影响，则纵剖面常出现上凹形转折。如渭河下游河流纵剖面在基底断裂的影响下，使得渭河阶地、滩地和河床的纵剖面都出现阶梯状的坡折。其中，雨金—三王断裂的差异活动影响最为显著，而且正是在淤积末端 22 断面附近，各级纵剖面皆有显著的坡折¹⁾（图 8），坡折以西，一级阶地时期古渭河冲积层比较薄，厚约 10—20 米，阶地属内叠型的侵蚀—堆积阶地，平均比降 4.7—5‰；断裂以东，古渭河冲积层厚达 40 米以上，属于上叠型的堆积阶地，平均比降 2.9—3.9‰。现代河床雨金以西为砂砾质河床；零口以东为淤积的砂质河床。

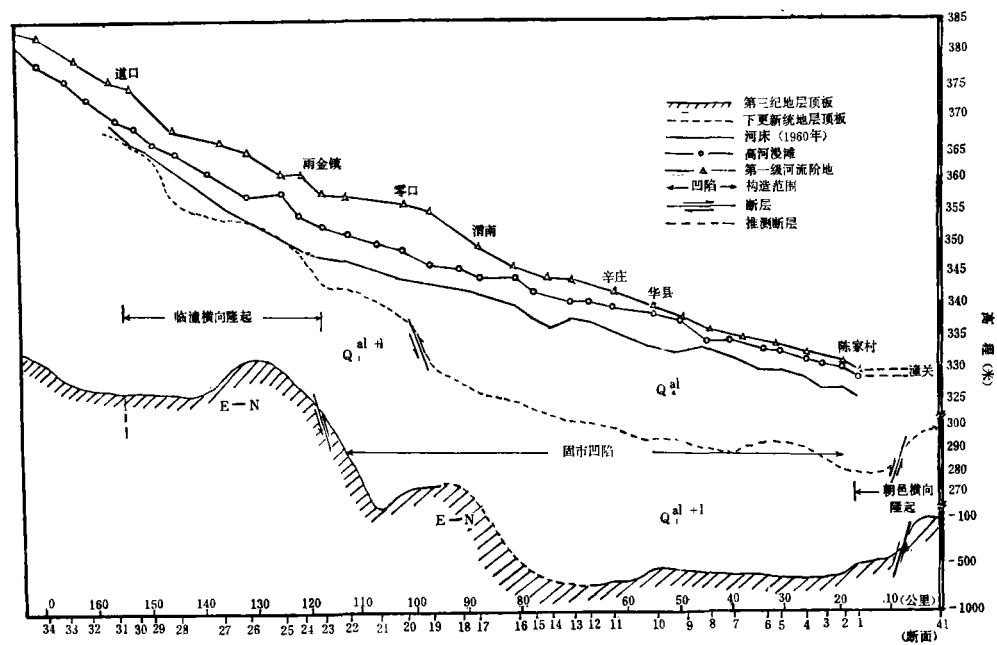


图 8 渭河下游河流纵剖面与第三纪、第四纪下更新统地层顶板构造关系示意图

表 3 纵剖面上凹转折和淤积末端关系*

坝 名	河 名	转折段位置	上段比降 J _上 (‰)	下段比降 J _下 (‰)	$E_f = J_{上}/J_{下}$	淤积末端 位 置	注
三门峡	渭 河	渭淤22~23*距坝277公里	4.55	2.27	2.0	渭淤22~23	比降为建库前的
三门峡	北洛河	洛淤17*, 距坝215公里	5.25	2.28	2.3	洛淤17	
灃惠渠首	灃 河	距坝8.5公里	110	23	4.8	距坝8.5公里	
汾河三坝	汾 河	距坝16公里	11	4	2.70	距坝16公里	
灃惠渠首	结 河	距坝16公里	20	12	1.67	距坝17公里	

* 清华大学水利系治河泥沙科研组：渭河下游纵剖面及淤积末端发展趋势初步研究，1974 年。

1) 中国科学院地理研究所地貌室：三门峡建库后渭河下游河道的变化，1978 年 6 月。

以上则说明渭河下游发育以来，在其塑造的不同地貌单元上，22 断面附近皆出现了继承性的坡折。而黄河北干流在 59 断面以上有托门陡坡；北洛河在洛淤 17 断面处为转折段（图 5、6）。正是这些坡折，反映了不同的冲淤特性，即上冲下淤，若坡折点下游河床小幅度的抬升后，则淤积末端的上延难以超过此坡折。从不同河流纵剖面上凹转折和淤积末端关系来看，也可说明此问题（表 3）。

由表 3 看出，三门峡和其它低水头枢纽一样，淤积末端都发展很远，但都终止于纵剖面转折河段的附近，因此，预计渭河下游淤积末端也不会超过转折段雨金附近很远。北洛河和北干流也不会超过洛淤 17 断面和黄淤 59 断面以上很远。

（3）从均衡河段的调整予估淤积末端的发展趋势。用平衡比降的关系，略估此河段达到平衡时，淤积上延的情况，从而确定淤积末端上延的位置。由于前期淤积体的影响，河床比降作自动调整，当河床达到相对平衡时，河床比降历年变化应稳定在一定范围内，目前渭淤 10—21 断面

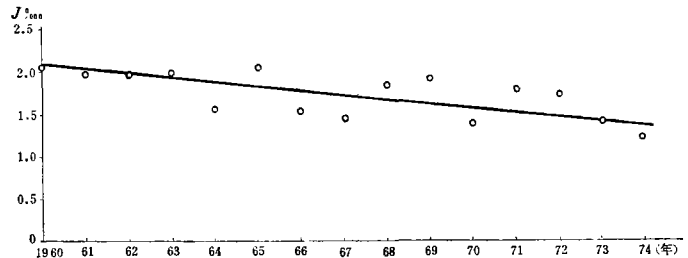


图 9 渭河下游（10—21 断面）河床最深点比降历年变化

河段的比降历年来略有下降之势（图 9），说明比降还没有达到平衡，正在作自动调整，为了估计由于比降调整引起淤积末端的变化，我们用相邻两级阶地的比降之比值，作为相对平衡比降关系，即 $\lambda_1 = 0.96$ ，因为河床形成现阶地地面的过程中，是侧蚀和堆积作用的动力平衡，它代表河床是相对稳定的阶段，因此用这个关系，通过简单计算可以确定此河段滩地和河床淤积末端的位置。

（1）低滩淤积末端位置变化趋势的予估：根据平衡比降关系 $\frac{J}{J_0} = 0.96$ ，建库后渭淤 10—21 断面河段低滩非平衡比降 $J = 1.84\text{‰}$ ，所以得平衡比降 $J_0 = 1.92\text{‰}$ ，淤积末端至渭淤 22 断面河段的距离为 56.5 公里。

非平衡河段的高差 $\Delta H_1 = 56500 \times 1.84 = 10.40$ 米，
平衡河段高差 $\Delta H_2 = 56500 \times 1.92 = 10.85$ 米，
二者相差 $\Delta h = 10.85 - 10.40 = 0.45$ 米。
所以达到平衡比降时淤积延伸距离为：

$$l = \frac{0.45}{1.92} \cong 2.34 \text{ 公里，}$$

故比降调整平衡时的总距离为：
 $L = 56.5 + 2.34 = 58.84$ 公里，
即淤积末端在 22 断面以上不远。

(2) 建库后此段河床的非平衡比降为 $J = 1.95\text{‰}$, 距离为 49.7 公里。根据 $\frac{J}{J_0} = 0.96$ 计:

$$\text{即 } J_0 = \frac{1.95}{0.96} = 2.03\text{‰},$$

$$\Delta H_1 = 1.95 \times 49.7 = 9.7 \text{ 米},$$

$$\Delta H_2 = 2.03 \times 49.7 = 10.10 \text{ 米},$$

$$\Delta h = 10.10 - 9.7 = 0.4 \text{ 米},$$

$$\therefore l = \frac{0.40}{2.03} \times 1.97 \text{ 公里},$$

$$L = 49.7 + 1.97 = 51.67 \text{ 公里}.$$

故淤积末端的位置在 21—22 断面附近。

从以上平均高程简单的平衡计算看, 不管是滩地, 还是河槽, 淤积调整向上延伸的距离都不远, 而平衡后的淤积末端的位置在 21 或 22 断面附近。滩地末端比河槽末端约远于一个断面, 这是因为河槽淤积后, 平滩流量减小, 漫滩机会增加, 引起滩地的淤积, 从而使滩地淤积末端上延。河槽淤积末端的位置常因来水、来沙条件的变化和水库运用方式的不同而上下移动。滩地淤积末端的位置, 一般比较稳定。

综上所述, 淤积末端发展趋势预估方法的思路是: 首先考虑来水来沙的条件, 特别是有利和不利的来水来沙条件的比较。其次是考虑边界条件, 三门峡水库具有特定的地理条件, 潼关天然卡口成为黄、洛、渭三河的局部侵蚀基准面。三河的原始比降不同, 河床沉积物中粉沙——粘土含量百分数也不一样, 因此床沙组成亦不同; 同时, 由于地质构造, 岩石和地形等因素的影响, 各河的纵剖面上皆有坡折, 由于坡折的存在, 则限制了末端更进一步的上延, 由于坡折的远近不一, 因此, 各河末端发展延伸的距离不同。第三, 在来水来沙和边界条件的基础上, 分析建库后均衡河段的调整, 当河段调整达到相对平衡时, 则末端的上延也就终止了。所以在预估末端发展趋势的时候, 应当把三者结合起来分析。

由于三门峡水库的影响, 使渭河下游河床淤积抬高, 引起地下水位上升, 两岸农田遭到浸没、淹没和盐碱化等。由于水库的影响, 渭河下游河床淤积末端叠加上延(翘尾巴)能否影响到西安, 这是人们所注意的又一重要问题, 根据本文分析确定: 淤积末端多年来在渭淤 21—22 断面附近变化, 如遇到有利和不利条件, 末端位置还会后退或上延, 即使上延, 也不会很远, 因此, 我们认为不会影响西安。

参 考 文 献

- [1] И.В. Иванов: метод количественной характеристики формы продольного профиля реки.

(Известия всесоюзного географического общества Том 83, вып. 6, 1951.)

GEOMORPHOLOGICAL APPROACH TO THE DETERMINATION AND PREDICTION OF THE POSITION OF SEDIMENTATION END OF SAN-MEN-XIA RESERVOIR

Lu Zhong chen

(Institute of Geography, Academia Sinica)

Abstract

Variables affecting the upstream extension of sedimentation in the reservoir are rather complicated. Generally, it is controlled by the rising of the base level immediately above the dam, the gradient of the original channel, the variation of the discharge and the sediment coming into the reservoir and the operation of the reservoir, in addition to the above variables, the upstream extension of sedimentation in San-Men-Xia Reservoir is due to its particular geographic conditions. San-Men-Xia Reservoir is situated at the confluence of the Yellow River, Luo He River and wei River, with Tong-Guan as its natural narrow gap. After the construction of San-Men-Xia Reservoir, the river bed at Tong-Guan has been raised by 4-5M, which acts as a local base level for the main river and the tributaries above it. As the river bed is raised due to the sedimentation and the backwater of the Yellow River is increased, a sand bar is formed at the mouth of Wei-He River, causing the backwater in the channel to rise and the backward sedimentation from the lower part to the upper part to take place in the lower Wei-He River, Bei-Lao-He River and the Northern Trunk of the Yellow River.

This paper primarily deals with the upstream extension of sedimentation in San-Men-Xia Reservoir by using geomorphological approach. Using the river sediment method and parabolic longitudinal profile method, it has been determined that the sedimentation end in the lower wei-He River is located near the Wei Yu 21-22 cross-sections, and a comprehensive prediction has been made. It has been proved that the backward sedimentation will not involve Xi-An in the present operating mode of the reservoir. It has been determined in the same way that the sedimentation end in the Bei Lai He River is near Luo Yu 17-18 cross-sections and the sedimentation end in the Northern Trunk of the Yellow River is near Huang Yu 59 cross-section. This conclusion coincides with that drawn by water conservancy organizations using the cross-section method, method of water table under the same discharges and volume method, since the wei Yu 21-22 cross-sections, Luo Yu 17-18 cross-section and Huang Yu 59 cross-section in the Northern trunk are situated at the break of their longitudinal profile respectively, further upstream extension of the sedimentation end will be difficult.