

484

71.43.43
C46

高等学校水利类教材

河流动力学

陈立 明宗富 编

武汉大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

河流动力学/陈立,明宗富编. —武汉: 武汉大学出版社, 2001. 9

高等学校水利类教材

ISBN 7-307-03267-8

I. 河… II. ①陈… ②明… III. 河流—流体动力学—高等学校—
教材 IV. TV143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037757 号

责任编辑: 瞿扬清 责任校对: 张 昕 版式设计: 支 笛

出版: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

发行: 新华书店湖北发行所

印刷: 武汉市科普教育印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.75 字数: 256 千字

版次: 2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-03267-8/TV·6 定价: 17.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换。

绪 论

自古以来，人们就知道择水而居，河道两岸是人类主要繁衍生息之地。为了发展生产和改善生存环境，人类不断地与江河作斗争。在长期的斗争中，逐渐掌握了关于河流运动发展的基本规律和河道整治工程技术的系统知识，其中前者就属于河流动力学的范畴。

河流是水流与河床在地球物理诸自然因素及人类活动的影响下交互作用的产物。水流作用于河床，使河床发生变化，河道发生演变；同时河床也作用于水流，影响水流的特性。二者构成一个矛盾的统一体，相互依存，相互影响，相互制约，永远处于变化和发展的过程中。

河流有着自身的发展变化规律。人类的许多活动都围绕着河流进行，如修建跨河的桥梁、防洪的堤坝、过江的隧道、航运的码头、灌溉发电的综合水利枢纽、火电厂的取水口、城市用水及排水等等，这些活动或多或少地干涉了河流的自然进程，有些则极大地改变了河流的自然条件。如何认识河流的自身的发展变化规律并利用其为人类服务，或者引导其朝着有利于人类的方向发展，或者最大限度地降低因改变河流自然进程所带来的负面效应，这是河流动力学学科的根本所在。

我国河流众多，洪水灾害严重。如1998年长江及松花江的全流域性洪水，给国民经济、人民的生命财产安全造成了巨大损失。为了防洪而修建的堤防及护岸工程，一方面保护了两岸的安全；另一方面，限制了洪水泛滥而直接遭受水流的作用。如果工程附近的河道稳定，并且有比较稳定的成型堆积体，则堤防及护岸工程较稳定；如果河道处于冲刷状态，堤防及护岸工程的安全就会受到威胁。由于河道的冲淤变化，造成主流的位置不断迁徙，不仅给防洪带来不利，而且可能造成取水口“脱溜”、码头淤废。在河道上修建大型水利枢纽，固然具有防洪、发电、航运、灌溉等综合效益，但同时也引发了新的问题：如库区回水末端的淤积及上延，会扩大淹没、浸没面积，抬高地下水位，影响通航；在枢纽的下游，由于上游来的泥沙被拦蓄在水库里，清水下泄，下游的河床就会发生长距离的冲刷，致使堤岸坍塌；同时由于流量过程的改变，造成主流位置改变，给下游河道两岸的工程带来不利影响。

河道中的水流是一种挟带有泥沙颗粒的水流，许多情况下河床上也存在着大量的泥沙颗粒，因此在水流与河床交互作用的过程中，泥沙的运动起着纽带的作用。换句话说，水流和河床交互作用的过程与结果，要通过泥沙的运动来实现。例如，河床的淤积抬升，就是在一定的条件下通过水流中挟带的泥沙停止运动实现；河床的冲刷下降，也是在一一定的条件下通过河床上泥沙的起动，由水流挟带输移来实现。事实上，泥沙有时可能是河床的组成部分，有时又可能是水流的组成部分，当它从矛盾的一个方面转化到另一方面时，河床将发生变化，河道发生演变。泥沙运动在水流与河床交互作用中的这种纽带作用，使得泥沙运动的基本规律的研究成为河流动力学中的核心问题。

因此，在河流动力学的内容中，泥沙运动的基本规律和河道演变基本规律应该是核心。而泥沙运动的基本规律首先涉及到河道水流的运动特性，因此在编写教材时，对河道水流运动的一些内容加以简要介绍；此外为了了解水力水电工程中的泥沙问题及防治措施，本书介绍了水库、水利枢纽上下游、水电站、航道等工程泥沙问题。在章节安排上，第一章主要介绍河道水流运动特点及河流泥沙的基本知识，第二章是关于泥沙运动基本规律的内容，第三章介绍了河道演变基本规律，第四章介绍了工程泥沙问题。

本书的前言及第一、二章由陈立编写，第三、四章由明宗富编写。限于编写者的水平，书中难免有疏漏错误，敬请读者批评指正。

目 录

绪 论	1
第一章 河道水流与泥沙的一般特性	1
第一节 河道水流的一般特性	1
第二节 河道水流的运动结构	4
第三节 河流泥沙的来源及组成	10
第四节 河流泥沙的几何特性	15
第五节 泥沙的重力特性	18
第二章 河流泥沙运动	27
第一节 河流泥沙的运动形式	27
第二节 泥沙的起动	28
第三节 沙波运动与动床阻力	35
第四节 推移质泥沙输沙率	42
第五节 悬移质运动的基本概念	52
第六节 水流挟沙力	57
第七节 悬移质运动的质量平衡及含沙量沿垂线分布	63
第三章 河道演变规律	72
第一节 河床演变的基本原理	72
第二节 河床演变的分析方法	73
第三节 河相关系	78
第四节 蜿蜒型河道的演变规律	89
第五节 分汊型河道的演变规律	100
第六节 游荡型河道的演变规律	111
第四章 工程泥沙问题	118
第一节 水库泥沙的淤积及防治	118
第二节 低水头枢纽的泥沙问题	126
第三节 水利枢纽下游的泥沙问题	132
第四节 引水工程中的泥沙问题	138
第五节 港口及航道泥沙问题	148

第一章 河道水流与泥沙的一般特性

第一节 河道水流的一般特性

在水力学中，我们了解了明渠水流的一般特性，包括水的基本特性，清水的均匀流与非均匀流、恒定流与非恒定流、层流与紊流的基本概念等等。天然河道中的水流属于明渠流，在很多情况下，可以沿用水力学中明渠流的有关结果。例如描述明渠流流速沿垂线分布的对数流速分布公式、指数流速分布公式等也经常被用来描述河道水流流速沿垂线分布；又比如明渠流中著名的阻力公式——曼宁（R. Manning）公式在目前仍然为计算河道水流阻力规律最常用的公式。但与水力学中的清水明渠流相比，河道水流在基本特性、运动特征上有很大的差异，这些差异在很多情况下使直接使用水力学明渠流的成果会带来严重偏离。仍以曼宁公式为例，表达边壁粗糙程度的糙率系数 n 在河道水流中就已经扩展为边壁粗糙程度和水流泥沙相互作用结果的共同体现。学习河流动力学，要了解泥沙在水流作用下的运动规律、理解并掌握河床演变的规律，弄清楚这些差异本身及其对运动规律的影响是十分重要的。

一、河道水流的基本特性

1. 河道水流的二相流特性

水是可以视为连续介质的液体，而泥沙则是除特殊情况外，不能视为连续介质的疏散颗粒群体。因此，水力学中的明渠流是清水的流动，属于单相流（或一相流）；而天然河道的明渠流是挟带着泥沙的水流运动，本质上属于两相流。

2. 河道水流的三维性

河道水流的过水断面一般是不规则的，不规则的程度，以山区河流为最大，冲积平原中的顺直河段为最小。因此河道水流为三维流动。

河道水流的三维性与过水断面的宽深比往往互相关联，宽深比愈小，三维性愈强烈。在顺直的、滩槽比较明显的广阔滩面上，水流的宽深比较大，可能呈现出一定程度的二维性；而在深谷高峡、宽深比很小的山区河段中，水流的三维性极强。

3. 河道水流的不恒定性

水力学中一般明渠流中也有不恒定流，但与河道水流的不恒定性相比，情形要简单得多。河道水流的不恒定性主要表现在两个方面：一是来水来沙情况随时空的变化，这与水力学相同；二是由于河床经常处于演变之中，因此河道水流的边界也随时空变化。

我国绝大多数河流的水沙来量和沙质，主要受制于降水。而降水在时空分布上变化非常大。因此，不同河流的水、沙时空变化也相当大。北方地区的河流变化的相对幅度及强

度大于南方地区的河流；小集水面积的河流大于大集水面积的河流；植被较差的地区大于植被较好的地区；洪水季节大于中、枯水季节。

冲积平原河流的河床由大量的疏松沉积物即泥沙构成，这些疏松沉积物在不同条件水流的作用下，或冲刷，或继续沉积，或者基本平衡；山区河流的河床尽管由基岩组成，但在水流经年累月的侵蚀作用下，也发生着相应而缓慢的变化。

河道水流与河床相互依存，相互制约，相互促使变化发展。因此，其不恒定性也是相互联系的。一方面，来水来沙情况的不恒定性，不可避免地要引起河床时而剧烈、时而和缓的变化；另一方面，河床的冲淤变化也必然改变河道水流。例如河床的冲淤改变水流的含沙量，流速的分布、大小等。

4. 河道水流的非均匀性

涉及运动的各物理量沿流程不变的水流为均匀流。达到均匀流的条件是水流为恒定流、水流边界是与流向平行的棱柱体。河道水流的非恒定性包括了来水来沙的不恒定性和边界的不恒定性，因此河道水流为严格意义上的非均匀流。

在解决实际问题过程中，对于比较顺直的河段，如果来水来沙情况基本稳定，河床基本处于不冲不淤的相对平衡情况，过水断面及流速沿程变化不大，水面坡度、床面坡度及能坡基本平直而相互平行，就可以当做均匀流处理。

二、河道水流中的阻力

重力、惯性力与阻力为水流中最重要力。与清水水流相比，河道水流中的力要复杂得多，其所起的作用，也是很不相同的。例如清水水流的重力起着克服阻力的作用；而在河道水流中，重力来自液相的水和固相的泥沙，有克服阻力、促使运动的一面；也有抵抗运动的一面。

研究河道水流阻力损失的目的当然主要在于确定河道的泄流能力和输沙能力。对于具有一定过水断面和比降的河道，水流的流速有多大，不仅决定能通过多大流量，而且直接与泥沙运动的强度有关，因此研究水流阻力损失一直是河流动力学的基本问题。

阻力问题，本来就是普通水力学中性质复杂、影响广泛而又解决得不够妥善的一个问题。在河道水流中，这一问题更加复杂。因此，除在这里专节介绍外，在以后的相关章节里，还将讨论这一问题。

1. 明渠二维水流的阻力损失

这里我们首先回顾一下最简单情形的由明渠表面粗糙引起的二维恒定均匀流的阻力问题。

水力学中一般用阻力系数 λ 、糙率系数 n 和谢才系数 C 表示水流阻力，其中阻力系数 λ 为无量纲数，糙率系数 n 和谢才系数 C 是有量纲的经验系数。

1775 年谢才 (A. Chezy) 提出了明渠二维均匀流平均流速计算公式

$$U = C \sqrt{RJ} \quad (1-1)$$

1888 年达西-魏斯巴赫 (Darcy-Weisbach) 提出如下公式

$$J = \lambda \frac{1}{4R} \frac{U^2}{2g} \quad (1-2)$$

1890 年出现了至今仍在广泛使用的曼宁公式

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1-3)$$

式中， U 为时均流速； R 为水力半径； J 为比降； g 为重力加速度。

对比上面公式不难发现，糙率系数与谢才系数之间有如下关系

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (1-4)$$

谢才系数和阻力系数之间的关系是

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (1-5)$$

上述公式中，曼宁公式与谢才公式完全属于经验公式，甚至连系数都不得不带有量纲。但对于比较简单情形的二维均匀流来说，只要在积累较多的经验和资料的基础上，合理准确地选择糙率系数 n ，那么这两个公式可以满足要求。

2. 河道水流阻力损失

在水力学、流体力学中我们知道，水流阻力损失可以概括为两部分，即克服流层间粘滞性剪切力的阻力损失和克服紊动剪切力的阻力损失。当水流的雷诺数很大，水流已经进入阻力平方区时，可以只考虑紊动剪切力。因此一般管道或明槽水流的阻力损失与河道水流阻力损失的差异主要来源于二者紊动的差异。

与水力学中顺直管道和棱柱体明槽水流中发生的紊动相比，河道水流的紊动在紊动尺度、紊源上要复杂得多。前者主要是粗糙边壁附近小尺度的紊动，由大、中、小尺度构成的紊动结构虽不能完全排除，但不占主导地位；而对后者，根据张瑞瑾的研究^[1]，紊源除了普通意义的粗糙边壁外，还包括河势、河相、成型淤积体、河底或河岸的大凸大凹、沙纹及沙波等，这些紊源的尺度是边壁粗糙完全不能比拟的。大尺度的紊源产生大尺度的紊动，大尺度紊动尺度大，发生的周期比较清楚，与四周水流具有一定的相对速度，一次掺混可以达到较大的距离（与河道各种特征几何尺度同数量级），在掺混过程中发生质量扩散、动量扩散及动能扩散，涡体逐渐变小，并逐渐减弱原有的周期性与力学规律性，而随机性和各向同性逐渐加大。这就是说，凡具有大尺度紊动的水流必然同时具有中、小尺度的紊动；而具有小尺度紊动的水流却可以不同时具备大、中尺度紊动。紊动就能的传递来说，一般是单向的，即由大尺度紊动传递给中尺度紊动，再传递到小尺度紊动，或直接由大尺度紊动传递到小尺度紊动，最后随小尺度紊动而转化为热能而散失。要继续维持这一具有大、中、小尺度紊动结构的持续存在的水流图形，必须经常提供一定的有效能量，通过水流的紊动能，最后转化为热能而消散。

因此对于河道水流，“糙率系数” n 的内含应该是极为复杂的。作为属于阻力平方区的时均流速 U 的表达式中代表水流阻力效果的综合因素，它当然直接与水流中的紊源和紊动结构有关，与大至河势，小至河床床沙粒径有关。

在一般管流及明槽流中，糙率系数 n 的复杂性随着研究的深入而逐步为有关的科技工作者所理解，因而出现以爱因斯坦、罗佐夫斯基等为首的提出将综合性的糙率系数 n 先进行分解，再从事叠加的补救方法^[2]。这种方法在解决某些实际问题中，如河底与河岸的不同粗糙度对河道水流的影响问题等，可以取得有关河道水流阻力损失、流速分布等方面某些粗略成果，在更合理的办法出现以前，为了应付当前的一些问题，这种粗略的办

法还未完全失去存在的价值。

第二节 河道水流的运动结构

一、河道水流的流型、主副流及流速分布

1. 河道水流的流型

在水力学中将流体运动区别为紊流和层流两大类型，在紊流中又分为光滑区、粗糙区（或阻力平方区），以及介于三者之间的两个过渡区。

河道水流普遍具有较大的雷诺数。拿一条水力半径 R 的数量级为 10^2 cm、流速 U 的数量级为 10^2 cm/s、摩阻流速 u_* 的数量级为 1.6×10 cm/s、运动粘滞性系数 ν 的数量级为 10^{-2} cm²/s 的小小河流大致估算一下，它的雷诺数 Re ($Re = \frac{UR}{\nu}$) 将达到 10^6 ，即它的雷诺数已经完全进入阻力平方区。

当然，不能进入阻力平方区的河道水流也不是完全没有，但从工程观点看问题应该得出的结论是，河道水流的雷诺数一般都比较大大，其流型一般居于阻力平方区。

2. 河道水流的主流与副流

主流（又称正流、元生流）是水流沿着河槽总方向的流动。它一般是在重力作用下产生的。在流动过程中，水流的流线基本上是相互平行的，水流的速度向量也是互相平行的，而且都平行于河槽的轴线。

在河道水流中，与主流相对应的有副流（又称次生流）。副流与主流不同，不是由河床纵比降的总趋势决定的，而是由于纵比降以外的其它因素所促成的。副流实际是在水流内部产生的一种大规模的水流旋转运动。它可以因重力作用而引起，也可在其它的力（内力或外力）作用下产生。在副流中，有的具有复归性，或者基本上与主流脱离，在一个区域内呈循环式的封闭流动；或者与主流或其它副流结合在一起，呈螺旋式的非封闭的复归性流动。具有复归性的次生流，我们称之为环流^[1]。主流一般以纵向为主，环流则不然，它因产生的原因不同，具有不同的轴向，因此输沙的方向也不限于纵向。可以说，河流中的横向输沙主要是靠有关的环流造成的，而不是靠主流或纵向水流造成的。因此，一个河段的冲淤动态，除了受主流的影响之外，还受环流的重要影响。如果只看到纵向水流的作用，而忽视环流的作用，则要对河段冲淤动态全面了解，在很多情况下是不可能的。

应该注意的是，副流与水流中的紊动漩涡是有所不同的。紊动漩涡一般尺度较小，并且常常是没有规则的。而副流一般规模都较大，而且它们的位置和影响范围都是比较固定的。

3. 河道水流的流速分布

在水力学中，我们学习了二维恒定均匀流的流速分布，包括层流及紊流两种流态。前面已经指出，几乎所有的天然河道水流都具有三维性、不恒定性、不均匀性，其流速分布显然不能直接应用水力学所掌握的流速分布公式来描述。

但是，天然河道的情况也是千差万别，有的冲积平原河流非常宽浅，水深沿河宽的变化虽然也比较大，但与其横向的几何尺度相比，这种变化就比较小了，这种情况下，河道

水流更多地表现出接近二维，尤其是水流流速分布方面。在这种情况下，可以近似使用二维均匀流的流速分布公式来描述河道水流的流速分布。实际上，在现阶段的河流动力学，还难以提出符合实际的三维流速分布公式，人们通常用经验的方法研究河道水流的流速分布。

(1) 几个常用的二维水流流速分布公式

1) 卡曼-普兰特尔 (Th. von Karman-L. Prandtl) 对数流速分布公式^[3]

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{y} \quad (1-6)$$

式中， u_{\max} 、 u 及 u_* 分别为水面处最大流速、位于相对水深 $\frac{y}{h}$ 处的时均流速及摩阻流速 ($u_* = \sqrt{ghJ}$)； h 为水深； g 为重力加速度； J 为能坡； κ 为卡曼通用常数，在清水水流中 $\kappa = 0.4$ ； l 为掺长。

2) 王志德 (译音) 对数及反三角函数流速分布公式^[4]

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left[\ln \frac{1 + \sqrt{\eta}}{1 - \sqrt{\eta}} - 2 \arctan \sqrt{\eta} - \frac{1}{\sqrt{2\alpha}} \ln \frac{\eta + \sqrt{2\alpha\eta} + \alpha}{\eta - \sqrt{2\alpha\eta} + \alpha} + \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \arctan \frac{\sqrt{2\alpha\eta}}{\alpha - \eta} \right] \quad (1-7)$$

式中， α 为常数，其值等于 1.53； $\eta = 1 - \frac{y}{r_0}$ (明槽流 r_0 换为 h)，管中心或明槽流的水面， $\eta = 0$ 。

3) 指数流速分布公式：指数形式的流速分布公式，结构简单，出现得较早。但在卡曼-普兰特尔对数流速分布公式问世后，前者逐渐为后者所代替。1984 年，陈永宽又对指数流速分布公式作了分析^[5]，认为实测资料表明，在含沙量较高的水流中，它具有较对数公式更高的精度。指数流速分布公式的形式为

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{h} \right)^m \quad (1-8)$$

或沿垂线积分 (见第二章) 将其改写为如下形式

$$\frac{u}{U} = (1 + m) \left(\frac{y}{h} \right)^m \quad (1-9)$$

式中， U 为垂线平均流速； m 为指数，常以 $\frac{1}{n}$ 形式表示，在清水水流中约等于 $\frac{1}{6} \sim \frac{1}{7}$ ，流速分布愈均匀， m 值愈小 (n 值愈大)；在浑水水流中，含沙量愈高 (但非高含沙水流)， m 值愈大 (n 愈小)，如图 1-1 所示。由图还可看出，在临近河床部位，式 (1-8) 较式 (1-6) 更符合实际；在其余部位，两式数值甚为接近。

(2) 确定三维河道水流流速分布的经验方法

当河道水流具有较强的三维性时，没有公式可供借鉴，而流速分布是分析研究各个方面水流性质的极其重要的物理量，张瑞瑾建议按照下面的方法来解决这个问题^[1]。

在所研究的河段中进行实测，或在物理模型中进行观测，直接或间接得到所需掌握的流速分布资料。必要时，以这些资料为基础，建立具体表达河段流速沿垂线分布的方程式。这种方程式，也可以被引用到条件比较类似的其它河段，但必须经过原型或模型的实

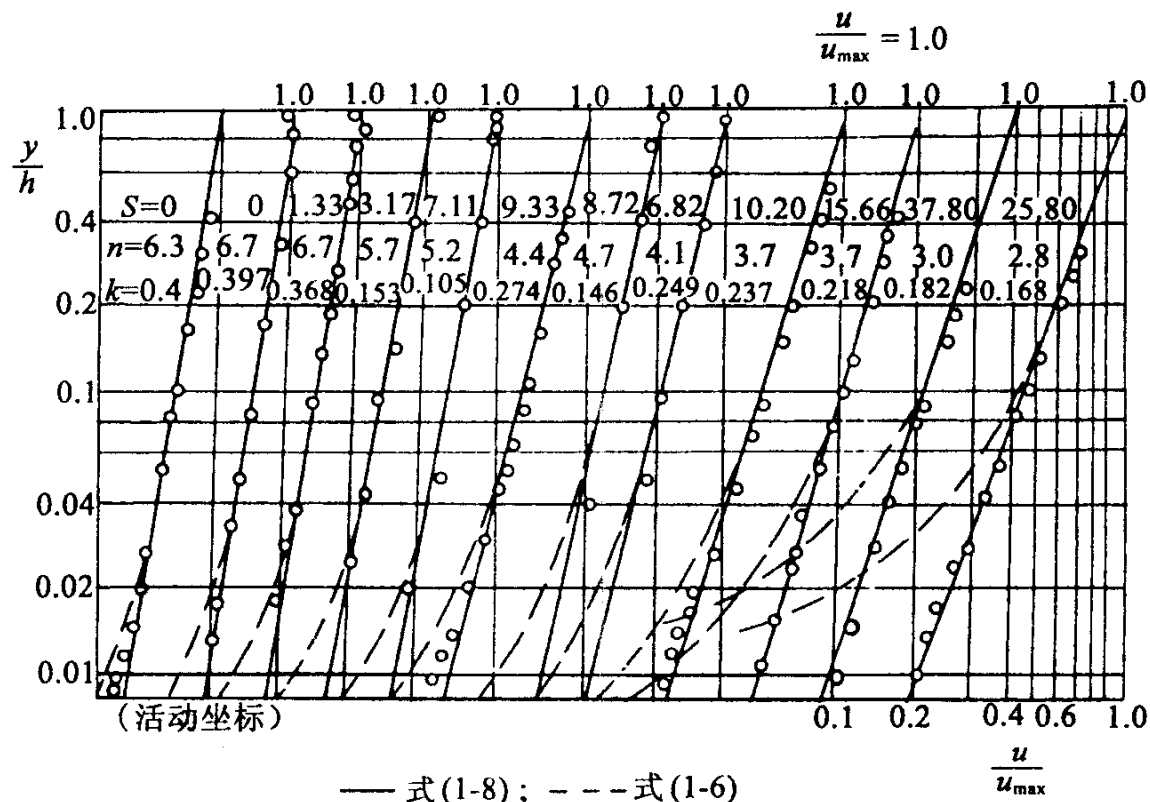


图 1-1 流速分布公式的验证

测资料的验证。

二、河道水流中环流结构

前面已经提到，河道中除了主流外，还有各种副流，其中具有螺旋性或者封闭性的副流称为环流。本节将在介绍环流类型的基础上，着重分析河道水流最重要的因离心力引起的弯道环流结构。

1. 环流的类型

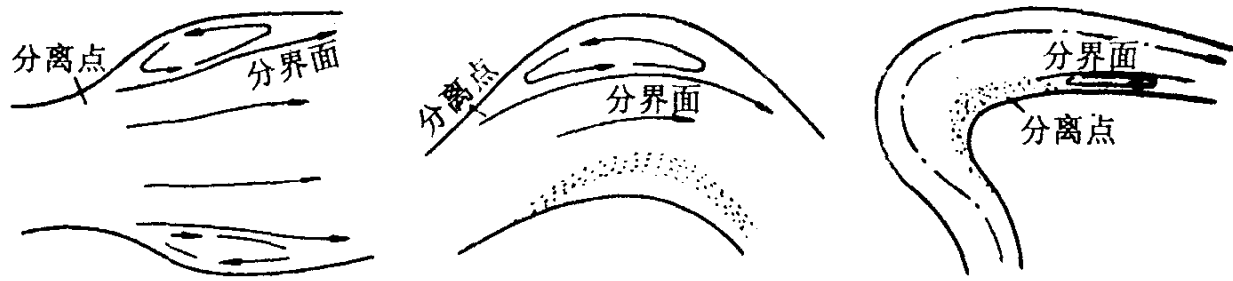
因产生原因的不同，环流可以分为因离心力产生的弯道环流、因柯里奥里(G. Coriorid)力而产生的环流^[1]、因水流与固体周界分离而产生的环流等等。

水流处于弯道段时，由于离心力的作用，水流表面的平衡状态被打破。表层水流的流速大于底部水流的流速，因而表层水流所受到的离心力远大于底部水流受到的离心力，表面水流将因为离心力的作用而流向凹岸，由于水流的连续性原理，底部水流虽然也受到离心力的作用，但受到的离心力小于表层水流，所以只能从凹岸流向凸岸。这样从水流的横断面上看，就形成了表层水流从凸岸流向凹岸、底部水流从凹岸流向凸岸的“旋流”，即环流。弯道环流是河道水流中最常见、最重要的因离心惯性力而产生的环流^[6]。

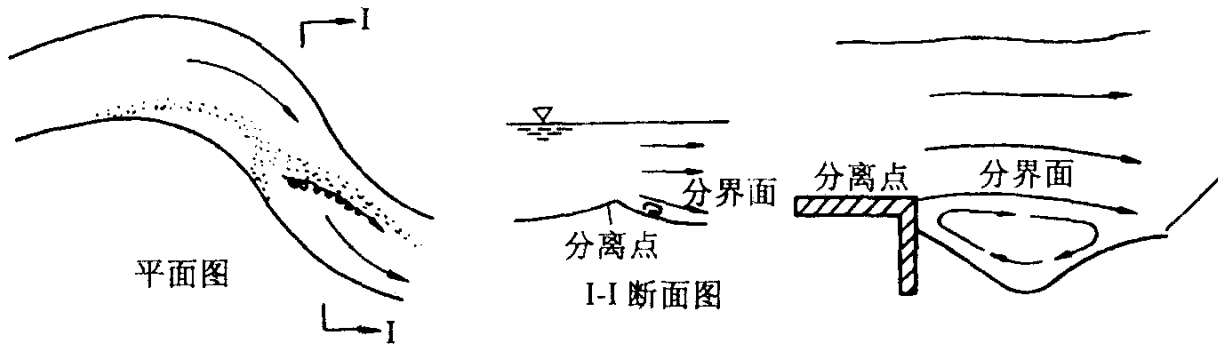
因水流与固体周界发生分离而产生环流的情况是多式多样的。例如在河槽的一侧或两侧突然放宽处，不可避免地要发生水流分离现象，原来贴近固体周界的水流，在分离点以下，脱离固体周界，形成无所依附的流带。流带的一侧为正流，另一侧为封闭式环流；图 1-2 给出了部分因边界分离引起的环流^[1]。

2. 弯道环流结构

水流在弯道内作曲线运动的时候，必然产生指向凹岸的离心力，水流为了平衡这个力，通过调整，使得凹岸的水面升高，凸岸方向的水面降低，从而形成横比降。图 1-3 便



(a)突然扩宽产生的竖轴环流 (b)因撇弯形成的竖轴环流 (c)过急弯道下游竖轴环流



(d)滩脊下游的斜轴环流

(e)突然加深产生的横轴环流

图 1-2 水流与固体周界分离产生的环流

表示这种情况。在图 1-3 中取长、宽各一个单位的水柱来观察。这个水柱沿横向 (Oz 轴的方向) 的受力情况如图 1-4。图中 P_1 及 P_2 为两侧的水压力, T 为底部的摩擦力, F 为离心力。在这里, 作了一个很重要的假设, 即假设所考虑的环流是二维恒定的, 在水柱的上游和下游铅直面中都没有内摩阻力。这样, 我们便可以为这个水柱写出横向动力平衡方程式

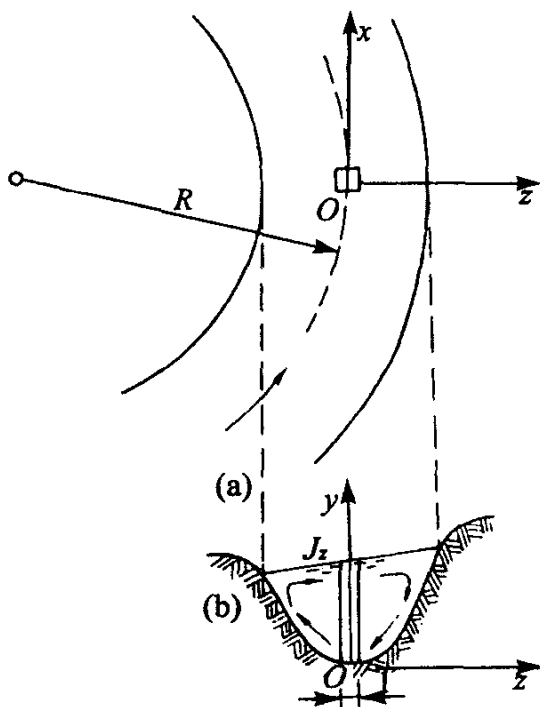


图 1-3 弯道环流
(a) 平面 (b) 横剖面

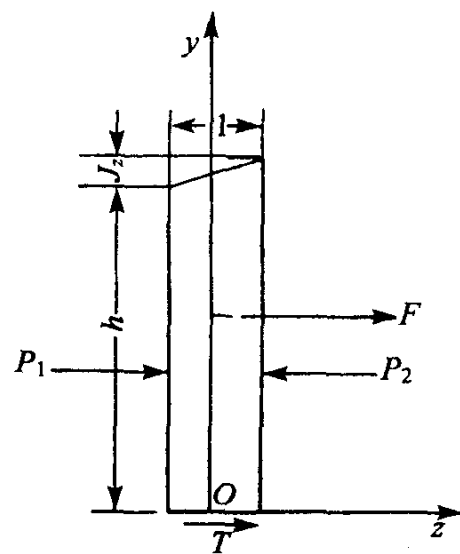


图 1-4 弯道中水柱受力情况

$$F + T + P_1 - P_2 = 0 \quad (1-10)$$

因

$$F = \frac{1}{2}(2h + J_z)\rho\alpha_0 \frac{U^2}{R}$$

$$P_1 = \frac{1}{2}\gamma h^2$$

$$P_2 = \frac{1}{2}\gamma(h + J_z)^2$$

并考虑到水柱的底面很小，摩阻力 T 可以忽略不计，故得

$$\frac{1}{2}(2h + J_z)\rho\alpha_0 \frac{U^2}{R} + \frac{1}{2}\gamma h^2 - \frac{1}{2}\gamma(h + J_z)^2 = 0$$

因 J_z 系较小的数值，上式中 $\frac{J_z^2}{2}$ 可以忽略不计，同时可取 $2h + J_z \approx 2h$ ，故上式可改写为

$$h\rho\alpha_0 \frac{U^2}{R} - \gamma h J_z = 0$$

或

$$J_z = a_0 \frac{U^2}{gR} \quad (1-11)$$

由于 $\frac{a_0 U^2}{R}$ 为离心力加速度， g 为重力加速度，故 J_z 为离心力加速度和重力加速度二者的比值。式中的流速分布系数 a_0 ，可根据流速分布公式求得。如果采用卡曼-普兰特尔的对数流速分布公式（式（1-6））并将其改写为

$$u_x = U \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{C\kappa} (1 + \ln \xi) \right] \quad (1-12)$$

则得
$$a_0 = \frac{1}{U^2} \int_0^1 u_x^2 d\xi = \int_0^1 \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{C\kappa} (1 + \ln \xi) \right]^2 d\xi = 1 + \frac{g}{C^2 \kappa^2} \quad (1-13)$$

因此

$$J_z = \left[1 + \frac{g}{C^2 \kappa^2} \right] \frac{U^2}{gR} \quad (1-14)$$

式中， $\xi = \frac{y}{h}$ ； C 为谢才系数；其余符号意义同前。

沿 Oz 轴的不同水柱，铅直线上的纵向平均流速 U ，曲率半径 R 均不同，因而横向比降 J_z 也不同。事实上，在弯道上横剖面中的水面线是一条曲线，而不是一条直线。

图 1-4 中的水压力 P_1 和 P_2 以及离心力 F 都不是沿垂线均匀分布的。上层流体所受的合力向右，下层流体所受的合力向左，因而分别发生向右和向左的流动（图 1-5）。如果结合图 1-4 来看，也就是表层的水流向凹岸，底层的水流向凸岸，在横断面上的投影将形成一个封闭的环流。实际上横向水流与纵向水流结合在一起，将构成弯道中的螺旋流。表层水流一般并非由低处流向高处。

如果在弯道水流中取一个微小的六面体 $\delta x \delta y \delta z$ 来观察，它的横向受力情况（即沿 Oz 轴的受力情况）如图 1-6 所示，可以写出动力平衡方程式如下

$$\left[p_z - \left(p_z + \frac{\partial p_z}{\partial z} \delta z \right) \right] \delta x \delta y - \left[\tau_z - \left(\tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial y} \delta y \right) \right] \delta x \delta z + \rho \delta x \delta y \delta z \frac{U^2}{R} = 0$$

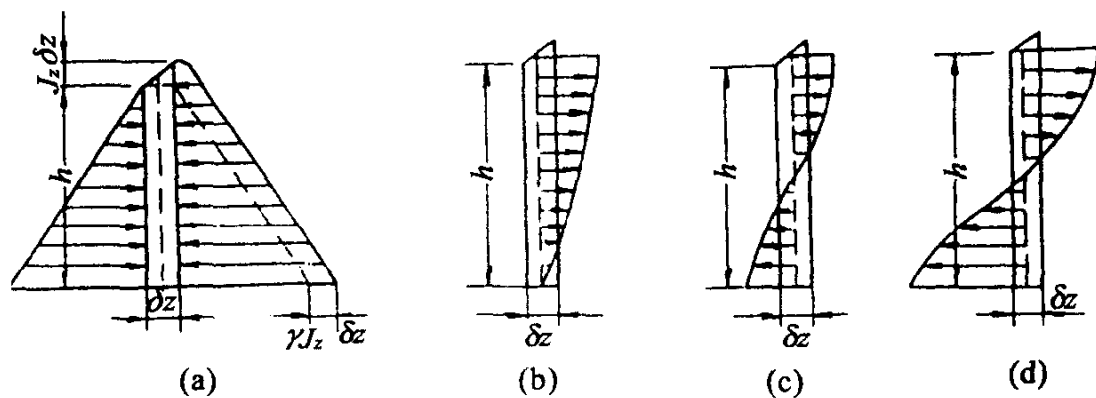


图 1-5 作用于水柱的力的分布和流速分布
(a) 水压力分布; (b) 离心力分布; (c) 合力分布; (d) 流速分布

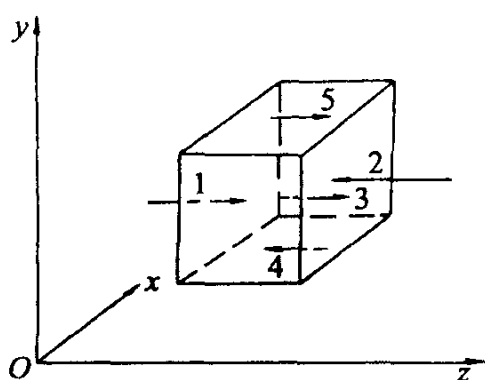


图 1-6 作用于微小六面体上的
横向力

- 1— $p_x \delta x \delta y$;
- 2— $\left(p_x + \frac{\partial p_x}{\partial z} \delta z\right) \delta x \delta y$;
- 3— $\rho \delta x \delta y \delta z \frac{u_x^2}{R}$;
- 4— $\tau_z \delta x \delta z$;
- 5— $\left(\tau_z + \frac{\partial \tau_z}{\partial y} \delta y\right) \delta x \delta z$

或

$$-\frac{\partial p_x}{\partial z} + \frac{\partial \tau_z}{\partial y} + \rho \frac{u_x^2}{R} = 0 \quad (1-15)$$

方程式 (1-15) 为二维弯道环流的运动方程式。

因

$$p_x = \gamma(h - y)$$

故

$$\frac{\partial p_x}{\partial z} = \gamma \frac{\partial h}{\partial z} = \gamma J_z$$

因此得

$$\frac{\partial \tau_z}{\partial y} = \gamma J_z - \rho \frac{u_x^2}{R}$$

将方程式 (1-12) 代入上式, 经过一系列推导, 最后可得横向流速的方程式为

$$u_x = \frac{hU}{\kappa^2 R} \left[-2 \left(\int_0^\xi \frac{\ln \xi}{1 - \xi} d\xi + 1 \right) - \frac{\sqrt{g}}{C\kappa} \left(\int_0^\xi \frac{\ln^2 \xi}{1 - \xi} d\xi - 2 \right) \right] \quad (1-16)$$

如令

$$F_1(\xi) = -2 \left(\int_0^\xi \frac{\ln \xi}{1 - \xi} d\xi + 1 \right)$$

$$F_2(\xi) = \int_0^\xi \frac{\ln^2 \xi}{1 - \xi} d\xi - 2$$

则得

$$u_x = \frac{hU}{\kappa^2 R} \left[F_1(\xi) - \frac{\sqrt{g}}{C\kappa} F_2(\xi) \right] \quad (1-17)$$

上式中, 函数 $F_1(\xi)$ 及 $F_2(\xi)$ 的数值可由图 1-7 中查出。

方程式 (1-16) 及式 (1-17) 是罗佐夫斯基 (И. Л. Розовский) 提出的^[7]。从方程式 (1-16) 可以看出, 横向流速与单宽流量 ($q = hU$) 成

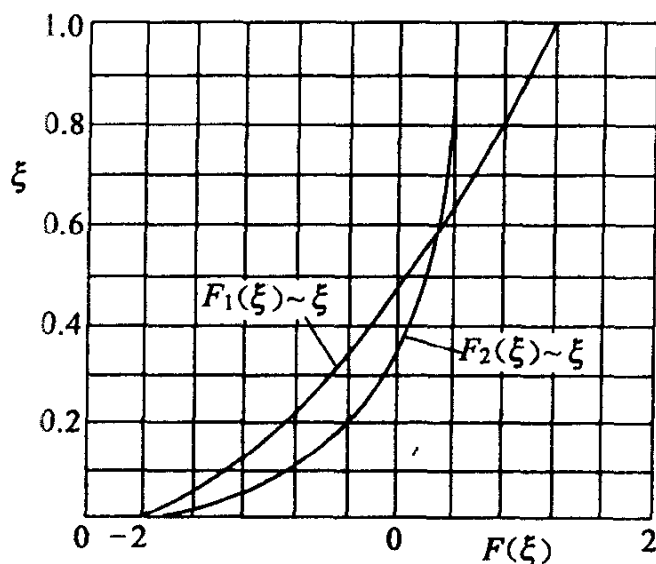


图 1-7 $F_1(\xi)$ 、 $F_2(\xi)$ 的计算曲线

成正比，与曲率半径 R 成反比。如果取 $\kappa = 0.4$ ， $C = 75$ ， $R = 5\,000\text{ m}$ ， $U = 1.5\text{ m/s}$ ， $h = 12\text{ m}$ ，则接近河底的横向流速 $(u_x)_{\xi=0}$ 约为 0.03 m/s 。由于接近河底的纵向流速一般是比较小的，故横向流速的这个数值在横向输沙方面的作用不可忽视。

第三节 河流泥沙的来源及组成

河流中的泥沙，包括组成河床及随水流运动的泥沙，其基本特性（包括泥沙的来源、矿物成分、几何特性、重力特性以及物理化学特性）的不同，将直接影响着河流泥沙的冲刷、输移和沉积过程，由此改变河流的演变发展结果。水轮机叶片的磨损会因为泥沙矿物成分的不同、硬度的不同而不同；粗细泥沙对黄河下游河道淤积抬升所起的作用不同，因此对黄河中游水土流失严重的黄土高原的治理应该首先抓住粗泥沙来源区，等等。因此，在研究河流泥沙运动规律之前，有必要先了解泥沙的基本特性。

一、河流泥沙来源

泥沙来源于岩石风化，因此，河流泥沙的最根本来源是岩石的风化。

河流中运动着的泥沙，其来源主要包括流域地表的冲蚀和河床的冲刷，风沙运动给河流带来的泥沙首先在规模上不如前二者；其次，从广义的角度也可以归入流域地表的冲蚀；再者，风沙运动带来的泥沙绝大部分属于冲泻质，对河流的冲淤影响较小。

流域地表的侵蚀与气候、土壤、地形地貌及人类活动等因素有关。在我国，流域的水量大部分是由降雨汇集而来，土壤侵蚀本身存在着较密切的水沙关系。土壤结构松散，植物覆被较差，水土流失就比较严重。例如黄河中游的黄土地区，7~8月份降雨最多，且多为暴雨，其它条件也较差，所以地表侵蚀最为严重；而在我国南部省份，虽然也有暴雨，但土壤结构密实，植被覆被较好，所以其输沙量模数多在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以下。地形对流域的侵蚀，也起着重要的作用。坡度大则地面径流下渗量小，汇流速度大，侵蚀作用也随之增大，侵蚀量也随坡长的增大而增加。

从流域地表侵蚀下来的泥沙，经过河流的搬运作用，大部分汇流入海，但也有不少沉积在低洼湖泊地带。我国几条大河的河口地区和洞庭湖、鄱阳湖等大湖泊，都属于这样的堆积区。

从流域地表冲蚀下来的泥沙数量，通常是用每平方公里地面每年冲蚀若干吨泥沙来衡量，称为侵蚀模数，也称输沙量模数。图 1-8 为我国输沙量模数分布情况^[1]。

从宏观分布看，我国北方土壤侵蚀的严重程度甚于南方，其中最严重的地区是黄河中游的黄土高原，永定河和西辽河流域，其输沙量模数 $M > 1\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，而陕北的皇甫川、窟野河、无定河、延河流域，输沙量模数达 $10\,000 \sim 20\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，相当于地面每年普遍冲刷 $6 \sim 12\text{ mm}$ 的厚度。

泥沙随水流汇集到河流之中，加上河床上泥沙被水流冲刷起来，使得河道水流中含有一定数量的泥沙，常以每单位体积河水中的泥沙重量表示河流的含沙量。一般来说，我国北方，特别是黄河中游的一些干支流，年平均含沙量有些高达 $300\text{ kg}/\text{m}^3$ 以上；而在南方一些省份，年平均含沙量不足 $1\text{ kg}/\text{m}^3$ 。这样的分布状况，是与我国各地区的水土流失程度紧密相关的。表 1-1 及表 1-2 是我国及国外一些主要河流水沙特征值的统计资料。

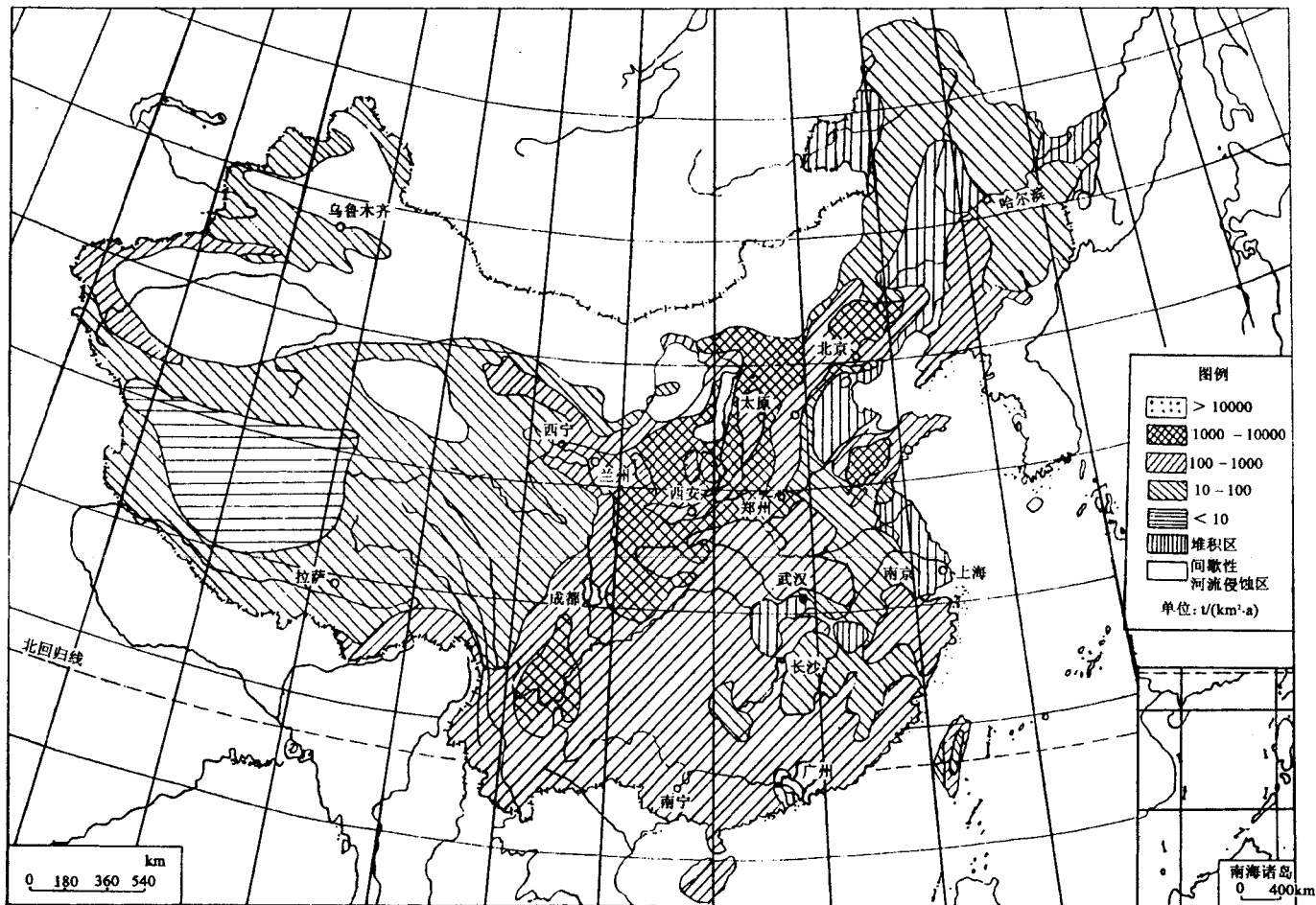


图 1-8 输沙量模数分布图

表 1-1 全国主要河流多年平均水沙特征值统计表

河 流	测 站	集水面积 (km ²)	水 量		沙 量		
			流 量 (m ³ /s)	径 流 量 (10 ⁸ m ³)	含 沙 量 (kg/m ³)	输 沙 量 (10 ⁴ t)	输沙量模数 (t/(km ² ·a))
松花江	哈尔滨	390 526	1 190	376	0.161	680	17.4
辽 河	铁 岭	120 764	(165) 92.1	(52.1) 29.1	(6.84) 4.52	(4 070) 1 310	(336)
永定河	官 厅	42 500	(43.1) 40.8	(13.6) 12.9	(60.9) 5.03	(8 070) 647	(1 900)
黄 河	陕 县	687 869	1 350	426	36.90	157 000	2 290
黄 河	三门峡	688 421	1 280	404	33.10	134 000	
黄 河	花园口	730 036	1 470	464	27.80	129 000	1 770
黄 河	利 津	751 869	1 370	431	25.60	110 000	1 470
无定河	白家川	29 662	44.7	14	128	18 200	6 090
渭 河	华 县	106 498	272	85.8	49.30	42 300	3 970
淮 河	蚌 埠	121 330	788	249	0.450	1 260	104
长 江	宜 昌	1 005 501	14 300	4 510	1.180	51 400	512
长 江	汉 口	1 488 036	23 400	7 392	0.610	43 000	289
长 江	大 通	1 705 383	28 900	9 110	0.530	46 800	274
金沙江	屏 山	485 099	4 600	1 451	1.670	24 000	495
岷 江	高 场	135 378	28 900	896	0.560	4 950	366
嘉陵江	北 碚	156 142	4 600	666	2.340	15 700	1 010
湘 江	湘 潭	81 638	2 840	644	0.180	1 140	139
汉 江	黄家港	95 217	2 110	(388) 329	(2.44) 0.037	(10 100) 121	(1 060)
赣 江	外 洲	80 948	2 040	660	0.170	1 110	137
闽 江	竹 歧	54 500	1 750	553	0.140	740	136
西 江	梧 州	329 705	6 990	2 200	0.350	7 240	219
北 江	石 角	38 363	1 320	418	0.132	533	143
东 江	博 罗	25 325	731	231	0.121	280	110
红水河	迁 江	128 165	2 180	687	0.670	4 630	361
澜沧江	允景洪	137 948	1 810	570	1.280	7 360	528
雅鲁藏布江	奴 下	189 843	1 920	605	0.300	1 820	95.8
伊犁河	雅马渡	49 186	373	118	0.590	699	142
叶尔羌河	卡 群	50 248	205	64.6	4.460	2 870	572

注：本表资料引自原水利电力部水文局 1982 年 9 月刊布的《全国主要河流水文特征统计》，统计于 1979 年，() 内数字为兴建水库前的值。