

泥沙与河流地貌学

林承坤 著



南京大学出版社

泥沙与河流地貌学

林承坤 著

南京大学出版社

1992·南京

(苏)新登字第 011 号

内 容 简 介

本书是作者多年从事泥沙与河流地貌的教学与研究，并引用有关最新研究成果写成。它比较系统地介绍了有关泥沙与河流地貌学的主要内容和基本的研究方法。全书共八章，按内容可分两部分：第一部分采用地学原理与方法，研究了泥沙特性、侵蚀产沙、泥沙来源、沙量计算，以及泥沙冲刷、搬运与沉积过程；第二部分在泥沙以及地质与自然地理的研究基础上，阐述河流地貌形态的形成、发育与分布，以及天然河流的形成与演变规律。

本书既可作为地理、地质、水利、水运、土壤、林业等方面有关专业的教材，亦可作为这些专业的勘测、规划、设计、科研和教学人员的重要参考书。

泥沙与河流地貌学

林承坤 著

*

南京大学出版社出版

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行 江苏丹阳新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 19.75 字数 490 千

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-305-01199-1/P·64

定价：10.90元

责任编辑：新 平

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 泥沙与河流地貌学的性质与内容	1
一、泥沙与河流地貌学的学科性质	1
二、泥沙与河流地貌学的内容	2
第二节 泥沙与河流地貌学的发展概况	2
一、国外泥沙与河流地貌学的发展概况	2
二、我国泥沙与河流地貌学的发展概况	6
参考文献	15
第二章 泥沙与冲积物的基本特性	18
第一节 泥沙与冲积物的分类	18
一、泥沙与冲积物的颗粒分类	18
二、泥沙运动形式的分类	20
三、泥沙相对粗细及来源分类	20
第二节 河流泥沙与冲积物特性	21
一、河流泥沙与冲积物的颗粒特性	21
二、泥沙与冲积物的岩类与矿物组成	26
三、泥沙与冲积物的容重	32
四、推移质泥沙的磨损	34
五、泥沙颗粒的沉速	36
参考文献	39
第三章 泥沙的来源分析与数量计算	40
第一节 泥沙的来源分析与数量计算的模式	40
一、泥沙汇入百分数的计算模式	40
二、泥沙数量的计算方法	44
三、泥沙来量计算模式的验证	44
第二节 卵石与粗砾推移质的特性分析及来量计算	49
一、卵石推移质特性的分析	49
二、卵石推移质来源的分析	54
三、卵石推移质数量的计算	55
第三节 粗沙与砾石推移质的特性分析及来量计算	57
一、沙砾推移质特性的分析	57
二、沙砾推移质来源的分析	64
三、沙砾推移质数量的计算	66
第四节 细沙与粉沙的特性分析及来量计算	69
一、概述	69

二、粉细沙悬移质特性的分析	72
三、粉细沙悬移质来源的分析	75
四、粉细沙悬移质沙量与输移量的计算	77
第五节 粘性泥沙的特性分析与来量计算	78
一、粘性泥沙特性的分析	78
二、粘性泥沙来源的分析	81
三、粘性泥沙沙量与输移量的计算	82
第六节 河流动力学方法计算输沙量	83
一、推移质泥沙的起动流速与输沙量计算	83
二、悬移质泥沙的输沙率	88
三、水流的挟沙力	89
参考文献	91
第四章 侵蚀与产沙	92
第一节 河流侵蚀与产沙量的计算	92
一、侵蚀的涵义	92
二、流域产沙量的计算	92
第二节 影响侵蚀与产沙的因素	97
一、降水	97
二、径流	100
三、地貌	100
四、地面物质组成	105
五、森林与植被	108
六、人类活动	109
第三节 河流的侵蚀类型	111
一、水蚀	111
二、重力侵蚀	113
三、河岸崩塌	119
四、风力侵蚀	125
参考文献	128
第五章 沟谷地貌与泥石流	130
第一节 沟谷地貌	130
一、沟谷的水沙特性	130
二、沟谷地貌的发育	131
三、沟谷的切割密度	133
四、沉积扇	135
第二节 泥石流	142
一、泥石流及其组成与结构	142
二、泥石流的流变特性	143
三、泥石流的流态特征	147
四、泥石流形成条件的分析	148
五、泥石流的搬运与沉积	153

六、泥石流地貌	156
参考文献	158
第六章 河床的成因与分类	160
第一节 河床稳定性	160
一、水流的造床作用与造床流量	160
二、河床稳定性指标	162
第二节 河相关系	166
一、概述	166
二、河相关系式	166
第三节 河型的分类	170
一、概述	170
二、河型分类的方法	171
第四节 非冲积河床的成因	173
一、非冲积顺直河床的成因	173
二、非冲积弯曲河床的成因	174
三、深切河曲的成因	175
四、非冲积分汊河床的成因	176
第五节 半冲积河床的成因	176
一、半冲积顺直微弯河床的成因	176
二、半冲积弯曲河床的成因	177
三、半冲积分汊河床的成因	177
第六节 冲积河床的成因	178
一、冲积顺直微弯河床的成因	178
二、冲积弯曲河床的成因	179
三、冲积分汊河床的成因	186
四、冲积散乱河床的成因	191
参考文献	192
第七章 河床地貌与河漫滩	194
第一节 河床与河漫滩地貌及其分类	194
第二节 河床微地貌——沙波	194
一、沙波的成因	194
二、沙波的类型	195
三、沙波的形成、演变的试验研究	199
四、沙波移动与推移质沙量的计算	202
五、沙波的物质组成与构造	203
第三节 矾	205
一、矾的成因及其水沙特性	205
二、矾对河床演变的影响	206
第四节 节点	208
一、节点的成因及其水沙特性	208

二、节点对河床演变的影响	209
第五节 深槽与浅滩	212
一、深槽与浅滩及其水沙特性与冲淤变化	212
二、深槽的成因	213
三、深槽的类型	213
四、浅滩的成因与分类	215
五、各类型浅滩的成因与演变	216
第六节 江心洲	229
一、江心洲的成因	229
二、江心洲的地貌类型	230
三、江心洲类型	231
第七节 河床纵剖面	232
一、河床纵剖面的形态	232
二、平原冲积河床纵剖面形态	233
三、山地河床的纵剖面形态	235
第八节 河漫滩地貌	239
一、河漫滩的水沙特性与沉积	239
二、河漫滩上的地貌类型	242
三、河漫滩的形成与发展	246
四、河漫滩类型	248
第九节 河流冲积物	249
一、河床冲积物	249
二、河漫滩冲积物	252
参考文献	254
第八章 冲积河床的特性与演变	257
第一节 冲积顺直微弯河床的特性与演变	257
一、顺直微弯河床的形态特征	257
二、顺直微弯河床的演变	259
第二节 冲积弯曲河床的特性与演变	260
一、弯曲河床的水沙特性	260
二、弯曲河床的形态特征	267
三、弯曲河床的演变	270
四、各类型弯曲河床的演变	275
第三节 冲积分汊河床的特性与演变	277
一、分汊河床的水沙特性	277
二、分汊河床的形态特征	278
三、各类型分汊河床的演变	280
第四节 冲积散乱河床的特性与演变	293
一、散乱河床的形态特征	293
二、散乱河床的水沙特性与冲淤变化	295
三、各类型散乱河床的演变	297
参考文献	296

第一章 绪 论

第一节 泥沙与河流地貌学的性质与内容

一、泥沙与河流地貌学的学科性质

泥沙与河流地貌学是研究水流的侵蚀作用和沉积作用所造成的河流及其各种类型地貌的形成、演变与分布规律的科学。地表径流沿着坡面上流动,形成片流,片流向低洼处汇集,形成线性水流。这些水流的侵蚀作用,一方面造成了种种类型的侵蚀地貌如沟谷、河谷等等;另一方面侵蚀作用的结果使水流含有泥沙,通过水流对泥沙的输移,侵蚀作用才能继续进行,侵蚀地貌才能得以发展。水流在搬运泥沙过程中,如果某些自然环境因素的变化,例如河流的比降或流量的变化,若比降或流量增大,水流的侵蚀作用随之增强,侵蚀地貌得以形成与发展,水流的输沙量便继续增大,这种过程称为水流的侵蚀作用;要是比降或流量减小,水流便无力继续输移所挟带的泥沙,使其沉积下来,便形成沉积地貌,例如沙洲、冲积河漫滩等等,这种过程称为水流的沉积作用。由此可见,河流及其各种类型地貌的形成与演变过程中的各个环节,均有泥沙参与,并通过泥沙的形成、运动与沉积等过程来实现的。在水流侵蚀过程中,假定水流侵蚀的泥沙没有被搬运走,就地覆盖在地面上,则侵蚀作用就难以继续进行,故水流侵蚀地貌不能形成与发展。在水流流动过程中,如果不含有泥沙,沉积地貌就不能形成。由于在自然界水流能挟带与搬运泥沙,使水流才能实现侵蚀作用与沉积作用,河流的各种类型的侵蚀地貌与沉积地貌才能形成。所以河流及其各种类型地貌的形成、演变与分布,同河流泥沙的形成、运动与沉积的关系极为密切。水流的侵蚀作用愈强,则水流的含沙量就愈大。如果水流其他要素不变,含沙量愈大的水流,输沙量与沉积量就愈大,则可形成各种规模较大,形态较为典型的侵蚀地貌与沉积地貌。例如我国黄土高原面积为 $3.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[1],多年平均产沙量达 $15.3 \times 10^8 \text{ t/a}$ ^[2],平均每平方公里的侵蚀量为 4.026 t 。其中约有50%的泥沙来自 $51\,000 \text{ km}^2$ 的丘陵沟壑区,^[2]平均每平方公里的侵蚀量达 $15\,000 \text{ t}$ 。在该区的皇甫川曾出现水流含沙量达 1570 kg/m^3 的记录,许多河流如泾河、洛河、祖厉河、朱家川、窟野河、延河等均出现过含沙量达 $1\,200 \text{ kg/m}^3$ 的记录^[1]。因水流侵蚀作用强烈,水流的含沙量与输沙量都很大,侵蚀形成的泥沙能迅速地被带走,所以地面被切割得支离破碎,沟壑纵横,地面沟壑切割密度一般为 $4-6 \text{ km/km}^2$,最大的地方可达 10 km/km^2 以上^[1],形成了我国面积最大,沟壑地貌最为典型的丘陵沟壑区。沟谷地貌形成后会促使水流侵蚀的发展与产沙量及输沙量的增大。根据黄土高原沟壑区中一些典型沟壑的测验表明,沟谷谷坡的坡度为 $10-35^\circ$,在谷坡崩塌处,坡度可超过 35° ,谷坡的侵蚀模数为 $13\,800 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。沟谷除了坡面的泥沙的汇集外,因谷坡的崩塌与滑坡,形成的泥沙也汇集在沟谷,所以侵蚀模数可增为 $21\,100 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。但是未被这些谷切割的黄土高原的原始地面——脊梁顶部,坡度均小于 10° ,侵蚀模数只有 $247 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。此外沟谷的比降较大,具有很大的输

沙能力, 实测资料表明, 水流从坡面到沟谷的流动过程中, 含沙量的峰值始终保持一个基本相等的数值, 说明了泥沙从坡面汇集到沟谷, 不但不会在沟谷里沉积, 相反因沟谷的侵蚀, 沙量还有所增加^[2]。沉积作用与沉积地貌的形成与发展也有密切的关系。从黄河三角的形成与发展可以看出沉积作用与沉积地貌的形成、发展的内在联系。在 1855 年(清咸丰五年)黄河铜瓦厢决口, 黄河改道袭夺大清河从利津入渤海, 据利津水文站多年实测资料表明, 黄河每年入海的悬移质沙量为 $11.18 \times 10^8 \text{t}$ (1950—1977 年)。在 1855—1954 年, 三角洲向海洋伸展的速率为每年 0.15 km, 三角洲的增面积为每年 12.9 km^2 ; 而在 1954—1974 年, 三角洲伸展速率为每年 0.42 km, 三角洲增长面积为 23.5 km^2 ^[13]。从这两个时期三角洲增长情况的比较中可以清楚地看出, 后期三角洲的增长大于前者, 主要原因是前期实际行水为 64 年, 所以在这时期内平均每年的入海的泥量减少。另外, 因三角洲向海伸展, 入海河床的长度也随之增长, 使河床的比降减小, 水流的流速降低, 导致沉积作用的增强。由此可见沉积作用促使三角洲地貌的形成与发展, 三角洲的形成与发展又影响了沉积作用。

从以上的论述中可以看出, 因水流泥沙的形成、运动与沉积, 使水流的侵蚀过程与沉积过程才能形成与发展。有了水流的侵蚀作用与沉积作用, 河流及其各种类型的地貌才能形成与发展。在自然界中分布着种种形态各异的河流及其地貌类型, 也是由于侵蚀作用与沉积作用的差异而造成的。河流及其各种类型的地貌形成后, 会改变水流的含沙量、泥沙的运动与沉积, 从而影响水流的侵蚀作用与沉积作用。由此可见水流泥沙与河流地貌两者作用的性质是互为条件、互为因果, 它们的相互作用便形成了水流的侵蚀与沉积及其过程。所以泥沙与河流地貌学就是研究水流的侵蚀作用与沉积作用所造成的河流及其各种类型地貌的形成、演变与分布。

二、泥沙与河流地貌学的内容

泥沙与河流地貌学的主要内容包括河流泥沙与河流地貌两个部分, 所以河流泥沙学和河流地貌学成为泥沙与河流地貌学的主要分支科学。

河流泥沙学是研究水流泥沙的形成, 运动与沉积的科学。在泥沙的形成方面, 主要研究水流的侵蚀过程、泥沙来源、流域产沙、产沙量计算、泥沙的岩矿组成与沙粒特性等。在泥沙的运动与沉积方面, 主要研究泥沙在水流作用下运动与沉积的规律, 一方面研究泥沙在水流作用下发生的运动与沉积; 另一方面研究泥沙中的运动与沉积又反过来影响水流, 研究两者的相互作用与相互制约。

河流地貌学是研究河流及其不同类型地貌的形成、演变与分布。主要研究在水流侵蚀、泥沙运动与沉积作用下各种类型的河谷、河床的形成与演变, 各种类型的河流地貌的形成、发展与分布。此外还研究河流及其不同类型地貌形成后, 对水流的侵蚀作用、泥沙运动与沉积作用的影响。研究水流泥沙与河流及其地貌的相互作用与相互制约。

第二节 泥沙与河流地貌学的发展概况

一、国外泥沙与河流地貌学的发展概况

在国外本学科中的河流地貌的研究是与水利工程建设紧密联系在一起的。特别是与水工学的发展有密切的联系。水工学开始于中世纪文艺复兴以前, 在文艺复兴时期得到辉煌的发

展。当时水工学成为地貌学中侵蚀作用学说的基础，确立了地貌学基本问题之一——河流侵蚀作用的基本概念。随着水工学研究的进一步发展，形成了作为当时河流地貌学基本理论之一的河床均衡剖面的概念。这个概念是三百多年前，意大利学者伽俐略（1564~1642）提出的。他认为均衡剖面是保证在河流作用中“力与阻力”相应的曲线^[4]。1597年顾格列尔提出了河床的五条规律，其中第五条断定水流给予河床以上凹形曲线的形态。

18世纪中叶，M. B 罗蒙诺索夫（M. B. Ломносов）首先为地貌学建立了地貌形成的内、外营力相互作用的概念。他在《论地层》^[5]的§20与§82节里都提到洪水对河床形成与演变中的作用，还生动地记载了河岸的形成与演变。

随着资本主义生产的发展、商品交换日益频繁，廉价的水运在资本主义发展的国家里被广泛采用。这样大大推动了治河工程的发展。到19世纪下半叶，在德国能运输的河流几乎都进行了整治。法国、俄国治河工程也有很大的发展。当时对河床研究的特点是与改善河流航运条件相结合，主要是分析弯道水流内部结构，研究浅滩与深槽的形态，计算航道的水深等方面。这些研究的目的是为了合理的选择适合通航的航道。所以作为河流地貌学基础之一的河床演变学得到了迅速的发展。在1860—1911年，法国河道水文工程师O. 法格（O. Fargue）在河流形态学研究的基础上为河道整治提出了“仿效河流的原则”。他在1905年所著的《河床形态与河底可动性》总结了他在河床形态方面的研究，提出河床可动性是河床过程的普遍现象，顺直河床常给航运带来困难，弯曲河床常常具有较好的水深，河床也较稳定。他研究了法国的加隆河弯形态，提出了弯道形态的定律，创立的河床形态学的原则，在河床的研究上开拓了一个新的领域。1895年B. O. 罗哈金（B. O. Лахвин）著的《河床力学过程》^[6]专著中提出河床形成与发展同地理环境的密切关系。他把河床看成一个自然综合体，河床形成与发展决定流域的气候、水文情况，地区原始的坡降与河床土质及其他因子的这样与那样的组合。此外他还指出，关于河流纵剖面阶梯状的普遍规律，并从流体动力中颗粒移动的阻力条件出发，提出一个简便近似地确定河床纵剖面的稳定性指标。

在19世纪随着农业的发展推动了河流侵蚀作用与沟谷地貌的研究。俄国学者B. B 道库恰耶夫（B. B. Докучаев）在1878年著的《俄国洲部分河谷形成方式》^[7]一文中，从侵蚀各阶段连续更替与发展的概念出发，创立了侵蚀地貌形成的学说与沟谷形成的理论，首先道库恰耶夫分析沟壑形成的主要因素是：（1）表层岩石松软或夹有沙层的冲积土；（2）河谷深度大，当地的侵蚀基准面的位置低；（3）大陆性气候，春天有洪水，夏天有暴雨；（4）缺乏森林与植被。在研究沟谷发展时，他指出沟谷发展的阶段，首先是网沟阶段，水流沿谷坡流动，剥蚀谷坡表面；其次是细沟在溯源侵蚀的影响下，由当地基面向上游深切形成沟壑，最后，他指出：“沟壑活动的结果，可能而且只可能变成沟谷，沟谷并不是什么别的，正是沟壑的第二阶段……河流是沟壑发育的第三阶段。”

与此同时河流侵蚀作用的研究也蓬勃展开。1872年瑞士学者多斯提出了河流均衡剖面的概念，多斯认为河流剖面的变化一直继续到侵蚀力量减弱，以至于与河床阻力相等的时候，多斯把这个剖面形态称为均衡状态。1875年J. W. 鲍威尔（J. W. Powell）确立了侵蚀基准面的概念。他在《美国西部科罗拉多河与其支流探险记》^[8]书中提出海平面作为河流的侵蚀基准面。除了这总的基准面外，当河流流经坚硬岩石组成地方，构成了浅滩段、石梁等等，形成了河流的暂时地方基准面。溯源侵蚀的概念是在1888年诺埃与马尔日里在一个试验的斜槽里铺了干沙，在斜坡下部的干沙被侵蚀后，该斜坡发生后退，从而得出溯源侵蚀的概念^[9]。

总之,到了19世纪末,河流侵蚀作用学说已经建立,它包括三个基本概念,即均衡剖面、侵蚀基准面与溯源侵蚀。这三个基本概念构成近代河流地貌学的基本理论。19世纪晚期美国地理学家W. M. 戴维斯(W. M. Davis)著的《地理循环》论文^[10],创立了侵蚀循环学说。把侵蚀作用的三个基本概念用于河流地貌的研究。在分析河谷地貌发育时,考虑了“构造,营力与时间”三个主要因素,采用“解释性描述”的方法,建立了河谷地貌发育模式,即幼年期、壮年期与老年期三个阶段。在研究侵蚀与河谷地貌发育时,他认为“河流侵蚀必须以基准面作为根据,当河流发展到壮年期时,河流侵蚀与堆积达到平衡”。他对于平衡概念作了明确的阐明,认为“平衡情况的发育是由于河流进行工作的能力与河流应工作的数量达到相等。”同时将水流平衡的研究作为他探索河谷地貌的发展与坡面发育的中心问题。他指出“平衡状态扩展到河流系统的各部分,使大陆过程被彻底的组织起来,故用壮年期一词称呼河流组织系统的主要组织工作完成的时期是恰当的”。“河流组织的生长与平衡的发育齐驱并进,在河流已达到平衡状态的每一段,它的最低点常符合于、依赖于一般的与局部的控制基面,在平衡河段任何一点上河流作用是巧妙地与一切其他点上的河流作用相联系……任何直线上一点受动就会被带到干流,然后被带到各个支流”。河流达到平衡以后“河谷侧蚀以平衡河流的倾斜河道为标准,整个河流的蚀低以平衡的水系的平衡线条为标准。”最后,导致“准平原”的形成。从戴维斯上述论点中可以看出,他运用了19世纪侵蚀作用学说的新成就研究河谷地貌,为河谷地貌建立了一系列重要概念,在促使河流地貌理论形成与发展上作出重要的贡献。

国外泥沙与河流地貌学的研究在19世纪晚期才开始。当时研究工作的特点是地质学家主要采用大量野外调查的方法开展泥沙与河流地貌的研究。1872年,英国著名的地质学家C·莱伊尔(C. Lyells),在他所著的《地质学原理》^[11]一书中,以现实主义的方法论述了水流泥沙的侵蚀、搬运与沉积作用。并用这些原理,研究河谷与河床的成因与演变。从上述的观点与方法对曲流的成因与演变作了研究。他认为“在冲积平原上,河流曲折所形成的弯曲的大小,随着河流的水量而比例扩大”。同时还认为“河弯的长度决定了许多因素,特别是冲积土的性质与胶结程度”。在弯曲河道的演变方面,他指出“如果河流弯曲的曲线非常大,河流可以切穿分隔相邻的两个弯曲的地峡,而恢复它的下行直线”,直至今日,这些推论还是有科学价值的。自文艺复兴时期以来,研究河流地貌的学者,把注意力主要集中在对侵蚀作用的研究上,而对水流的堆积作用研究得很少,但莱伊尔不仅研究河流的侵蚀作用,而且还注意到对河流堆积作用的研究,因而为河流地貌的研究开拓了新的领域。莱伊尔原在《地质学原理》第十八章河流建设作用中,首先提出“我已经说过水流作用与河流侵蚀力量。如果对水体的磨蚀和搬运力量形成正确的概念,我们必须考察这些营力的建设作用。换句话说,必须考察它们在冲积平原或海湖盆的某地方遗留下来的物质的巨大总量”。1877年美国地质学家G. K. 吉尔伯特(G. K. Gilbert)也用水流泥沙的侵蚀、搬运与沉积作用的原理,研究河谷与河床的成因与演变。他著的《亨利山的地质报告》^[12]与《邦纳维尔湖》^[13]等著作,采用物理与化学的原理以及大量野外调查与室内试验,对水流泥沙的侵蚀、搬运与沉积作用作了系统的研究,认为河谷与河床形成与演变的实质是水流泥沙的侵蚀、搬运与沉积的结果。为此他第一次采用水槽试验研究了水流泥沙的运动与沉积。由此可见莱伊尔与吉尔伯特研究的共同特点是把泥沙与河流地貌两者紧密地结合起来。所以莱伊尔与吉尔伯特成为近代泥沙与河流地貌学的奠基人。

20世纪中期以来,随着水利、水运、水土流失治理与自然环境整治工程的大规模开展,推动了泥沙与河流地貌学向纵深方向发展。这时期泥沙与河流地貌学研究的特点是泥沙与河

流地貌更加紧密地相结合。1933年W. W. 鲁贝(W. W. Rubey)著的《多沙河流平衡条件》论文^[14], 继承与发展了吉尔伯特的学术思想, 进一步揭示了水流泥沙与河流地貌发育的关系。1945年R. E. 霍顿(R. E. Horton)著的《河流及其流域侵蚀发育》论文^[15], 他摆脱了戴维斯创建的“解释性描述”的研究方法。采用数学、物理学、水文学的方法, 定量分析了流域水系的形成与发育过程, 提出了流域内各级河道数量、河道长度、河道比降、河道级别之间的数量关系。后来A. N. 斯特罗(A. N. Strahler)^{[16][17][18]}, S. A. 舒姆(S. A. Schumm)^[19]进一步发展了霍顿的理论。斯特罗还创立了地貌发育阶段的高程分析法, 定量确定戴维斯所提出的地貌发育阶段。舒姆除了继续研究地貌形态规律外, 还定量阐明流域的地势比、比降、河网密度等形态要素与流域侵蚀量的关系。这时期泥沙与河床演变的研究也得到迅速地发展, 其特点是除了泥沙与河床演变均向着纵深方向发展外, 两者的研究还相互渗透与紧密结合, 使泥沙与河流演变的研究成为本学科中研究较为深入, 较为广泛的领域。1954年K. И. 罗辛斯基(K. И. Россинский)等在《河床形成的规律性》论文^[20], 认为“河床是河流水流与其边界的沉积物相互作用的产物, 在相互作用的过程中, 形成与这个过程的规律相适应的河床形态”。他还认为“泥沙平衡受到破坏乃是河床变形的直接原因。在某一河段上, 当来沙量大于输沙量时, 或来沙量小于输沙量时, 泥沙平衡就受到破坏, 前者河床沉积升高, 后者河床受到冲刷”。罗辛斯基等还在《河床》^[21]论文中对河床的成因与分类, 泥沙的运动规律作了详细的论述, 他们认识到河床演变的实质是河床边界在水流作用下的变化, 表现在河床边界组成物质的冲刷、搬运与沉积过程。所以罗辛斯基等在泥沙与河床演变的研究取得较大的突破。与此同时美国学者L. B. 里奥普(L. B. Leopold)在1953年著的《水力几何形态及其在地文学上的意义》论文^[22]与1964年著的《河流地貌过程》专著^[23], 采用了水文学、水力学、泥沙运动的原理与方法研究河流及其地貌形态, 取得突破性的进展。此外在河床的成因与分类、河谷与河床演变方向的研究也作了深入的研究。20世纪40年代以来, 在河流泥沙方面的研究进展较为迅速, 其中又以泥沙运动的研究发展的更为迅速。1941年, 英国学者R. A. 拜格诺(R. A. Bagnold)著的《风沙和荒漠沙丘物理学》专著^[24]阐明了在风力的作用下, 泥沙的运动与沉积的规律, 并用泥沙运动的原理阐明风成地貌的发育过程。虽然拜格诺是研究风沙作用与风成地貌发育过程, 但为泥沙与地貌发育过程的研究开创了良好的范例。后来某些学者把拜格诺建立的泥沙运动原理研究河流推移质泥沙运动, 研究结果表明也具有较好的精度^[25]。此后泥沙运动的研究蓬勃地开展, 发表了大量的泥沙运动方面研究的著作。其中代表性的著作有1948年E. 梅叶-彼德(Meyer-Peter)的《推移质推移公式》^[25] 1955年M. A. 维利康诺夫(M. A. Великанов)的《河流动力学》^[27], 1948年И. И. 列维(И. И. Левй)的《河流水流动力学》^[28], 1973年M. S. 雅林(M. S. Yalin)的《输沙力学》^[29]等, 都根据大量的实验资料, 研究悬移质与推移质的运动规律。随着泥沙运动规律的揭示, 推动了泥沙与河流地貌学定量研究的深入开展。1977年舒姆著的《河流系统》^[30]专著, 把河流作为一个完整的系统, 研究泥沙的产沙、输移与沉积, 并用泥沙形成、输移与沉积原理, 定量研究河流地貌, 提出了地貌的临界条件。此外舒姆还研究了河床组成物质与河床形态的关系, 并提出用河床组成物质的差异判别河床形态的指标。舒姆的研究促进了泥沙与河流地貌的结合。1975年由美国土木工程师学会水力学会泥沙委员会组织编写的《泥沙工程》专著^[31], 内容包括泥沙来源与产沙、泥沙性质、泥沙运动力学、泥沙测验技术与泥沙控制方法等方面, 虽然该专著中泥沙运动力学方面的内容占了全书的一半, 而且缺少推移质泥沙运动的内容, 但仍然是泥沙方面内容较为广泛的

著作。所以泥沙学各领域研究的开展,推动泥沙与河流地貌学的研究向纵深方向发展。

本世纪50年代以来,许多国家先后开展泥沙数学模型的研究,随着电子计算机与计算技术的发展,使数学模型的研究有较大进展,其中又以泥沙运动数学模型的研究发展得最为迅速。1986年在美国杰克逊召开的第三次河流泥沙国际学术讨论会上发表的泥沙数学模型方面的论文约占论文总数的1/4^[32],其中又以泥沙运动方面的论文为最多,内容涉及泥沙运动的各个方面,除研究悬移质泥沙的数学模型外,还有粘性泥沙^[33],推移质泥沙方面的论文^[34]。泥沙的数学模型除较多的一维模型外,还有二维^[35]、三维模型^{[35][36]},反映了国外泥沙数学模型研究的进展。它对于泥沙河流地貌学的定量研究起极大的推动。采用物理模型研究泥沙与河流地貌在19世纪末由吉尔伯特^{[12][13]}和诺埃等^[9]创立。1898年A. П. 巴甫洛夫(A. П. Павлов)制作了由不同的透水性岩层构成的河谷模型,模拟人工降雨形成的地下水作用下谷坡的变形。1945年J. 弗里德金(J. Friedkin)首次做了弯曲河床成因与演变的模型试验,在试验中还观察到凹岸的冲刷,泥沙运动与沉积现象,从中总结出弯曲河床冲淤变化与河床演变的规律。1950年维利康诺夫创建了自然模型试验,他只提供试验的起始条件,研究实验小河的形成与演变过程^[37]。而后罗辛斯基与H. И. 马卡维也夫(H. И. Макавеев)等根据牛顿力学的相似论赋予自然模型一定的比尺^{[38][39]},使自然模型成为定性研究河流地貌发育过程与河床演变的重要的物理模型。马卡维也夫等人对河流纵剖面发育、侵蚀基准面与河流地貌发育,构造运动过程和侵蚀——堆积过程的相互关系等都作了系统的试验^[38]。此外,1944年B. 埃利森(B. Ellison)^[39],1950年Д. Л. 阿尔曼德(Д. Л. Арманл)先后进行了坡面侵蚀的试验。50年代以来,物理模型得到很大的发展,根据牛顿力学相似原理建造的比尺模型,因具有相似性比较严格与精度较高等优点,水利工程师常用这种模型河流中水流结构、流速平面分布、水面形态以及泥沙运动的研究。但是因天然河流较为复杂,而比尺模型只能抓住主要因素进行模拟,尤其是河流边界的组成与构造十分复杂,模拟边界条件相似是难以实现,使比尺模型常常造成水流结构失真、泥沙运动也难正确地模拟。1968年R. L. 胡克(R. L. Hooke)提出比拟模型^[40],这种模型只要求有粗略的比尺关系复演某些河流地貌,试验出现的河流地貌演变过程应与原型相同,从而可以用比拟模型的试验结果直接外延到原型,可提供有关过程的各种信息,揭示原型的演变趋势。物理模型与数学模型在研究泥沙与河流地貌可相互印证,不仅可促使数学模型与物理模型研究水平共同提高,而且可促使泥沙与河流地貌学研究的发展。

二、我国泥沙与河流地貌学的发展概况

(一) 我国古代几处著名的水利工程

我国是世界上发展最早的文明古国之一,5000多年来各族劳动人民为征服自然,进行不屈不挠的斗争,在治理河流、更治水害、开发水利等方面均取得巨大成就,不仅开发了水利资源,而且还较大地改善了环境。在实践中积累了丰富的经验,而且还善于利用这些经验,在复杂的泥沙与河流地貌的条件下,成功地兴建了水利工程,并使这些工程在一、二千年来历久不废,在防洪、灌溉、航运、环境等方面发挥巨大的作用^[41]。反映出古代我国在泥沙与河流地貌的研究上取得辉煌成就。下面仅举岷江都江堰工程、长江三角洲塘浦圩田工程为实例,作简要地介绍。

1. 都江堰工程

都江堰工程位于四川省灌县，在岷江出山口、成都冲积扇平原顶点的分水灌溉工程。据《史记·河渠书》的记载“……于蜀，蜀守冰凿离碓，辟沫水之害。穿二江成都中。此渠皆可行舟，有余则用溉浸，百姓飡其利。至于所过，往往引其水，益用溉。田畴之渠以万亿计，然莫足数也。”^[42]又据《华阳国志》记载：“周天后秦孝文王以李冰为蜀守……冰乃壅江作堦，穿郫江、检江、别支流双过郡下，以行舟船，岷山多樟、柏、大竹，颓随水流，坐致材木，功省用饶，又溉灌三郡、开稻田。于是蜀沃野千里，号称陆海。旱则引水浸润，雨则杜塞水门。故记曰：水旱从人，不知饥馑，时无荒年，天下谓之天府也”^[43]。从这些记载中可以看出，都江堰工程不仅具有防洪、灌溉、航运、漂木等效益，而且兴建了都江堰后，岷江的径流得到控制，减轻了水旱灾害，改善了成都平原的自然环境，使其成为经济繁荣、环境优美的“天府”。

都江堰工程已有 2200 年的历史，至今仍有巨大的效益。岷江的推移质泥沙问题又十分突出，在都江堰渠首附近，卵石推移质最大粒径为 800 mm，个别可达 1 m，卵石的粒配如此之宽，在我国其他较大的河流中是少见的。以中水年代表卵石推移质多年平均输沙量，其数量达 $1.5 \times 10^6 \text{t/a}$ ，是长江葛洲坝多年平均输沙量的 2.1 倍^[42]，丰水年竟达 $2.0 \times 10^6 \text{t/a}$ 。每年汛期 5—10 月卵石推移质输沙量几乎占全年输沙量的 100%^[41]。在有如此复杂推移质的河流上兴建的都江堰工程，为什么能做到 2200 年来历久不废呢？主要原因是都江堰在规划设计，建设与管理中，充分考虑到泥沙与河流地貌及自然地理的特点。都江堰工程由鱼咀分流分沙工程、宝瓶口引水分洪工程与飞沙堰排沙工程等组成，这三项工程相互结合在一起，巧妙处理了都江堰引水与排沙的矛盾。鱼嘴工程是李冰设计的都江堰第一次分流分沙工程，据《蜀堰碑》记载“江南北皆东行，北旧无江，……中为都江堰”，“盐井关限其西北，水西关据其西

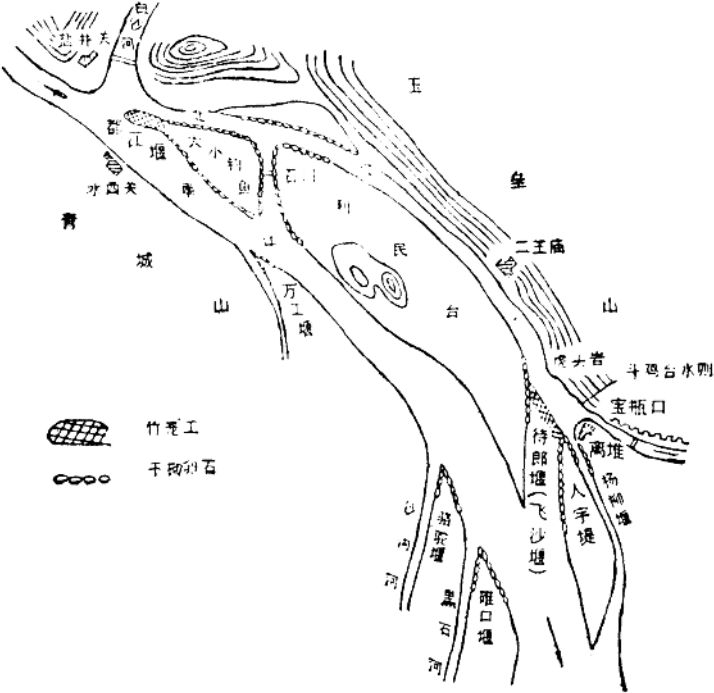


图 1-1 元代都江堰渠首工程示意图
(引自文献 1—40)

南”。据《蜀堰碑》文义绘出元代都江堰渠首工程示意图(图 1-1) 获悉^[41]，李冰设计的鱼嘴，位于岷江刚出口口的弯道分汊河床江心洲的洲头。在未建鱼咀时，该江心洲是靠着北岸的边滩，由人工开出来北江(即内江)后，江心洲遂形成。北江开挖成弯曲河床，使岷江水流进入北江时向左偏转呈弯曲水流，而进入南江(即外江)的水流保持顺直(图 1-1)。在江心洲头垒砌分流鱼嘴，鱼嘴同外江大致保持着 45° 的交角，当水位涨落时，随着鱼嘴受淹没的程度的不同，交角也随之变化，所以兴建鱼嘴主要起调节分流与稳定河势的作用。在都江堰治水“三字经”中指出“分四六、平潦旱”就是指鱼嘴这种作用。汛期岷江水流取直，外江进口正对上游河道，水面坡降增大，使外江分流量增加 60%，输沙量也随之显著增大，这时岷江的推移质泥沙，大部分可从外江排走；枯水期与中水期，流量较小，水流走弯，水流绕过鱼嘴时主流正对内江，使内江分流比增加至 60%，这时期虽然推移质来沙量较少，在弯道环流作用下，底流能把大部分推移质排到外江。在历史上鱼嘴的位置虽向下游移动，但是基本位保持着建造时那样的河势。经实测资料表明^[40]，当岷江流量超过 $1300\text{ m}^3/\text{s}$ 时，岷江水流基本上顺直流向外江，水面比降大，推移质输移带宽也大，能将近 80% 的推移质排向外江；当流量小于 $1300\text{ m}^3/\text{s}$ 时，水流走弯，内江的分流比增加至 53%—60%，在弯道环流作用下，只有 30% 的推移质进入内江，70% 推移质排向外江。宝瓶口是李冰“凿离碛，辟沫水之害”的都江堰引水分洪工程，飞沙堰则是都江堰的排沙工程。李冰在兴建这两项工程时，根据河流地貌的特点，把引水分洪的人工渠首布置在弯道凹岸的顶点，在该弯道凸岸下脚低洼处，用当地的大卵石与坚韧的白甲竹“研竹为笼，以石实中”造成卵石竹笼，用这种竹笼垒在凸岸洼地两侧，筑成排沙溢洪道——飞沙堰。利用弯道水流与泥沙运动的原理，当携带推移质泥沙的水流进入弯道后，在弯道环流的作用下，表流与底流分离，表流清水在凹岸流入引水渠道，底流携带大量泥沙流向凸岸，通过飞沙堰排到外江(图 1-1)。实测资料表明^[41]，飞沙堰有惊人的排沙能力，1966 年岷江洪峰流量 $4792\text{ m}^3/\text{sec}$ 时，冲跑了由江二王庙顺堤的数块混凝土块，越过飞沙堰顶，停留在下游坡上。最大的长约 2 m，宽约 1 m，厚 0.5 m，重量为 2.8 t，还有几块 1~2 t。实测资料还表明，飞沙堰排沙能力随流量的增大而增加，当岷江流量为 $1600\text{ m}^3/\text{sec}$ 时，排出的卵石推移质占 70% 左右。由此可见由于李冰在兴建都江堰的各项工程中，均充分地考虑到当地泥沙与河流地貌的特点，巧妙地利用了有利的河床地貌条件，采用兴建鱼嘴与开挖人工渠道的方法，改造不利的河床地貌条件，正确处理了引水与排沙的矛盾，这就是都江堰工程历久不衰的重要原因。此外，在都江堰兴建与长期运用过程中，根据泥沙与河流地貌特点，提出了都江堰防沙、治河与治水的格言。“深淘滩、低作堰”是都江堰防沙的格言，传说是李冰留下的治堰准则。据曹学全《蜀中名胜记》引《水经注》记载“李冰作大堰…立碑六字曰：深淘滩、浅包隄。隄者，于江作棚，棚有左右口，谓之湍棚江^[41]”。由此可见六字诀在距今 1400 多年前的北魏时期，已作为都江堰的防沙治堰的准则。“深淘滩(滩)”是指每年在风栖窝河床(图 1-1) 清淤时，必须淘到一定的深度，相传李冰曾在风栖窝下埋石马作为淘滩深度的标记。经历代淘滩经验表明，若淘滩的深度不够，内江河床太高，会影响来年春灌时宝瓶口进水量的减少。浅包隄即低作堰，指飞沙堰顶高程不宜筑得太高，一般只需高出内江河床 2 m，若筑得太高，会影响飞沙堰的排沙与排洪的效果。“遇湾截角，逢正抽心”，“乘势利导，因时制宜”，是在清代总结了前人都江堰治河的经验，提出的治河格言^[41]。由于灌县地处岷江山前冲积扇的顶点，岷江推移质的数量大、粒配粗，河床经常受推移质的沉积而产生变形，因此前人根据不同类型的河床地貌提出河床整治的要领与方法。“遇弯

截角”指若遇到弯曲河床凸岸边滩沉积时,应将其切去,否则水流会受到凸岸边滩的挑流作用,冲刷在凹岸兴建的护岸工程。“逢正抽心”指若顺直河床中间有江心洲滩沉积时,应把它挖去,使水流居中,减轻两岸的护岸工程受水流的冲刷,同时还可使水流集中冲刷河床断面,扩大过水断面。“乘势利导,因时制宜”指的是要掌握河势及其变化,不失时期地加以利用与疏导,充分利用有利的河势,对不利的河势,加以疏导与整治。清同治十三年(1874)灌县知县胡圻,总结历代都江堰引水防沙的经验,编成治水三字经^[41]“六字传,千古鉴。挖河心,堆堤岸。分四六、平潦旱。水画符,铁桩见。笼编密,石装健。砌鱼嘴,安羊圈。立湃缺,留漏罐。遵旧制,复古堰。”从以上对都江堰工程的介绍中可以清楚地看出,早在2200多年前,李冰已能掌握泥沙与河流地貌的原理,根据泥沙与河流地貌的相互关系,布置都江堰的鱼嘴,引水渠道与飞沙堰工程,并把这三项工程结合为一体,使灌区引入挟沙较少的水,而将岷江挟带的大量粒配粗,数量大的推移质,由飞沙堰与排洪河道宣泄去外江。2200多年来,历代人们均遵照以上的防沙准则与治河、治水的格言。对都江堰工程进行治理与科学管理,并不断加以充实与完善。这就是都江堰工程一直运行了2200多年,历久不废的基本原因。历史经验表明,早在2200多年前,我国泥沙与河流地貌的研究已经达到很高的水平。

2. 塘浦圩田工程

塘浦圩田是古代长江江南三角洲的农田水利工程。据郑亶记载“循古人遗迹,或五里、七里而为一纵浦,又七里或十里而为一横塘。因塘浦之土以为堤岸,使塘浦阔深则水通流,而不能为田之害也,堤岸高厚则田自固,而水可拥而必趋于江也”^[45]。“纵浦以通于江,又为横塘以分其势,使水行于外,田成于内”^[45]。江南三角洲的天然水系是以太湖为中心呈放射状,修建了塘浦后,不仅极大地增加了本区的河网密度,而且还把放射状水系改造成河流与塘浦纵横交错的棋盘状水系。在塘浦之间辟为“圩田”,据范仲淹记载:“江南旧有圩田,每一圩方数十里、如大城,中有河渠,外有门闸,旱则开闸引江水之利,涝则闭闸拒江水之害,旱涝不及,为农美利”^[46]。从以上记载中可以看出,塘浦圩田主要由塘浦、圩、闸等三种工程组成,正如元代任仁发所指出:“尝谓修围、浚河、置闸,三者如鼎足,缺一不可。三者俱备,则水旱可无”^[47]。“浚河港必深阔,筑围岸必高厚,置闸窦必多广,设遇水旱,就三者而乘除,自然不能为害”。

江南三角洲的塘浦圩田形成于唐代,据唐代李瀚记载“画为封疆属于海,浚其畎浚达于川,求遂人治野之法,修稻人稼穡之政。”^[45]由此可见在唐代修建塘浦圩田,对塘浦平面布局格式,圩田的规模等均有一定的要求,经五代与北宋长期的修建,在江南三角洲形成了“五里、七里而为一纵浦,又七里或十里而为一横塘”^[45]，“畎距于沟、沟达于川……浩浩其流,乃与湖连,上则有涂,中则有船,旱则溉之,水则池焉、日雨日霁,以沟为天”^[48]的塘浦圩田工程。五代吴越钱氏不仅继承了唐代的塘浦圩田工程,而且加强管理,据《十国春秋·武肃王世家》载:“置都水营吏,以主水事,募卒为部,号曰撩浅军。命于太湖旁置撩清卒四部,凡七、八千人常为农事,治河筑堤。……居民旱则运水种田,涝则引水出田”。北宋时期一方面塘浦圩田经历了数百年的实践,证明了它对江南三角洲经济的发展,起巨大的作用。这时太湖流域被称为“国之仓庾”,因此更促使对塘浦圩田工程的修建与管理;另一方面,随着经济与人口的增长,造成了对河湖滩地大规模的围垦,使河流塘浦与湖泊的泄洪与蓄洪能力减弱。鉴于上述情况,当时一方面遵循唐与五代时期,按照江南三角洲地貌的特点修建塘浦圩田工程的经验,继续修建塘浦圩田;另一方面针对当时因围垦而造成河湖泄洪与蓄洪能力的减弱,所以修建塘浦圩田工程重点放在疏浚塘浦河流上,以增加其泄洪排涝能力。北宋景祐年间范

仲淹任苏州知州，他对江南三角洲塘浦圩田修建的思想是“天造泽国、众流所聚，或淫雨不能无灾，而江海之涯，地势颇高，沟洫虽多，不决不下，如无所壅，良可减害，若其浚深，江潮乃来，愆亢之时，万户馥溉，此所以旱潦皆为利矣”^[50]。根据这一思想，他择要而疏，並督“浚白茆、福山、黄泗、许浦、奚浦、三丈浦及茜溪、下张，七丫，疏导诸邑之水，使东南入松江，东北入扬子江与海”^{[45][46]}。北宋政和六年(公元1116年)至宣和元年(公元1119年)，赵霖主持治理太湖，就引申范仲淹《答手诏条陈十事》中提出的治理之计，“大抵三说，一曰开治港浦，二曰置闸启闭，三曰筑圩裹田，三者缺一不可”^[51]。总之经唐至北宋三、四个世纪的努力，在江南三角洲上建成了治河与农田巧妙结合的塘浦圩田工程。

江南三角洲的塘浦圩田工程具有下列特点：

第一开挖塘浦同修筑堤岸紧密地相结合 在开挖塘浦、沟洫时所得到的土，用以修筑堤岸，这样塘浦、沟洫建成时堤岸也随之修成。由于把筑堤岸与开挖塘浦紧密地结合，还可解决塘浦圩田工程建设中的许多矛盾，其一解决了在低平三角洲平原上泄洪排涝与灌溉的矛盾，其二解决了筑堤土源的困难，北宋沈括论述了嘉祐年间(公元1056~1063年)兴建六十里的苏昆长堤采用“漉水中淤泥实籬篠中”的方法。既解决了土源的困难，又建造或浚深了塘浦与天然河流。由此可见塘浦圩田的设计是十分巧妙的。

第二根据地貌特点建设各种类型的圩田 “凡所谓高田者，一切设堰蓄水，以灌溉之；又浚其沟洫，使水周流於其间，以浸润之，立堰门以防其壅，则高田不涸，而水田(指低田)亦减流注之势；然后取今之凡谓水田者……循古遗迹，或五里七里，而为一纵浦，又七里或十里，而为一横塘，因塘浦之土以为堤岸，使塘浦阔深，堤岸高厚，则水不能为害，而可使趋於江也”^[50]。实行了沿江高田和太湖、阳澄等低田的高低分治。

第三在塘浦圩田工程中修建了一系列相配套的农田水利工程 除了在“一河一浦，皆有堰闸”用以控制江洪海潮外，还在河流之间，修建塘、泾(沟)、塍(田间的土埂)、埭(土坝)等工程“故以塘行水、以泾均水、以塍禦水、以埭储水，遇淫潦可泄以去，逢旱岁可引以灌，故吴人遂其生焉”^[50]。

第四把塘浦圩田工程的建设同维修管理紧密地结合 从上述塘浦圩田工程的建设过程中可以看出，该工程规模宏大，历经了唐至北宋三、四个世纪才建成。江南三角洲北接长江河口，南濒杭州湾，江流与潮流的动力作用均较强，使河流、塘浦、沟洫会受到江潮流泥沙的沉积，若不进行疏浚，久而久之都会被泥沙淤塞，导致塘浦工程毁坏。在塘浦圩田工程建设的早期，唐代颁布了我国最早的水利法典——《水部式》並在唐朝中央尚书省的工部下，设有水部郎中和员外郎，“掌天下川渚陂池之政令，以导达沟洫，堰决河渠，凡舟楫灌溉之利，咸总而举之。”^[52]五代至北宋，一方面继续进行塘浦工程建设；另一方面加强对工程的管理，对受泥沙淤积的河道、塘浦进行了疏浚。塘浦圩田工程建成后，因其具有巨大的经济效益，所以南宋以后各朝代都重视对该工程的维修。这时期江南三角洲的河滩与湖泊的围垦以空前的规模进行，造成了河道、塘浦的严重淤塞，导致塘浦圩田工程的毁坏。因此这时期对该工程的维修均以疏浚为主。元初因太湖流域河道、塘浦的淤积，泄洪、排水日益困难，于元代至元二十八年至三十一年(公元1291—1293年)，连年疏浚导水入海的河道，大德中亦连年修浚，最大几次是大德八年(公元1304年)由著名水利专家任仁发负责，浚吴淞江三十八里，用工165万，大德十年(公元1306年)浚吴淞江等处漕河，为淀山湖入吴淞江水道，长三十七里许，用工245万余^[52]。明代与清代、维修塘浦圩田的“开浚、筑圩、置闸”三类工程中，