



# 流域泥沙资源化与水沙资源优化配置研究

胡春宏

中国水利水电科学研究院

国际泥沙研究培训中心

2007年10月

# 主要内容

- 概述
- 流域水沙灾害与泥沙资源化的原理
- 流域水沙优化配置理论的研究
- 流域水沙优化配置的数学模型
- 流域水沙资源配置技术与措施的研究
- 水沙配置数学模型在黄河下游的应用

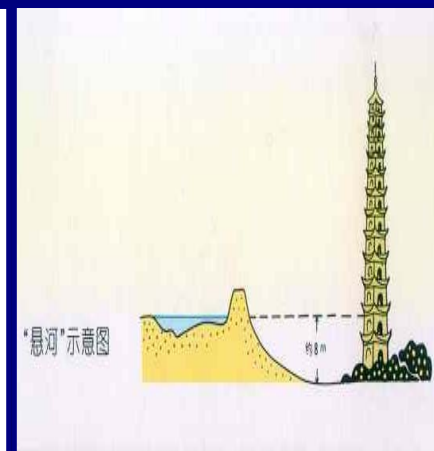
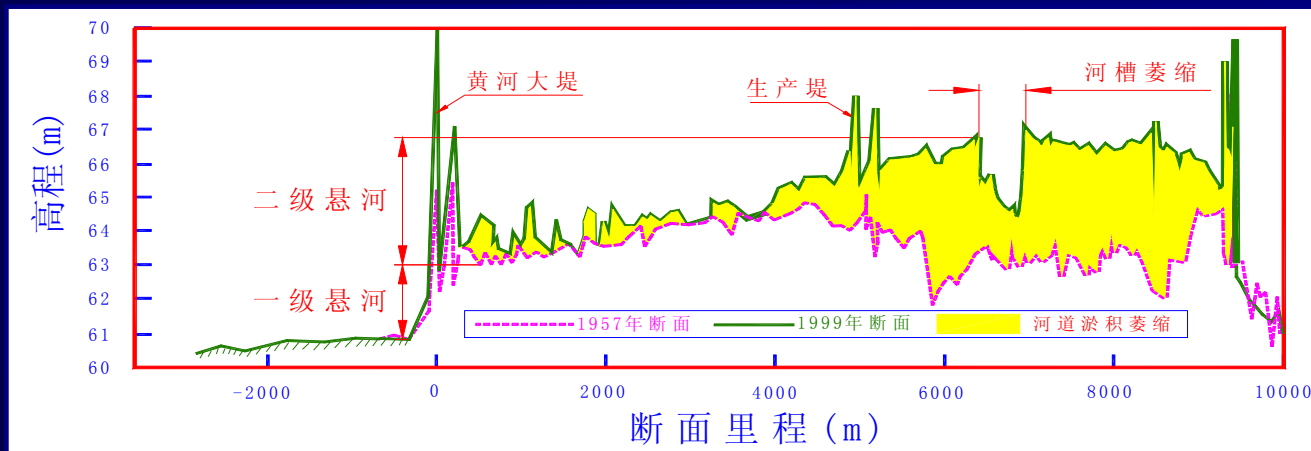
# 一、概述

- 1.1 黄河水沙分布变化
- 1.2 泥沙资源化及其优化配置研究现状
- 1.3 研究技术路线

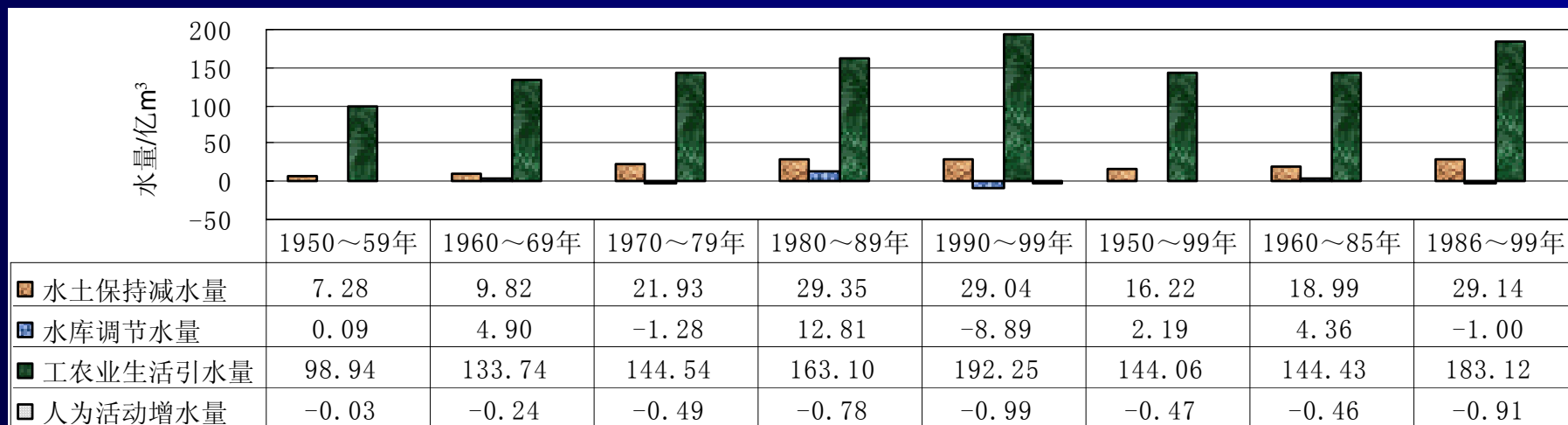
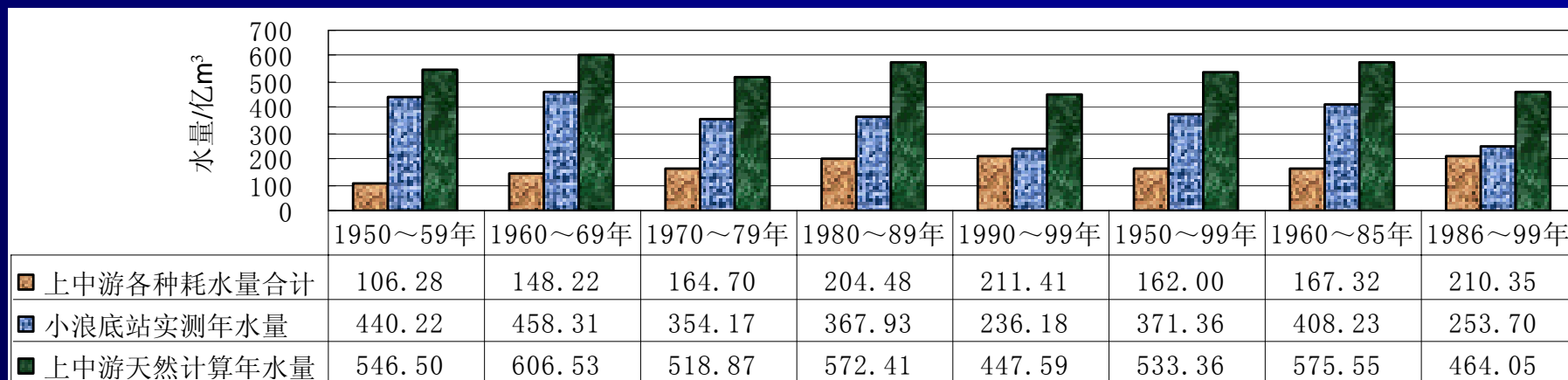
## —— 概况 ——

# 1.1 黄河水沙分布变化

- 水沙过程变异：90年代来水来沙量较50年代减少46%和53%；
- 平滩流量：7000~8000m<sup>3</sup>/s → 3000~4000m<sup>3</sup>/s ，  
2002年局部河段不足2000m<sup>3</sup>/s ；
- 淤积比例：主槽23% → 70%；
- 小流量高水位大灾害：“96.8洪水” 7800m<sup>3</sup>/s流量的水位较  
“58洪水” 22300m<sup>3</sup>/s高0.91m。

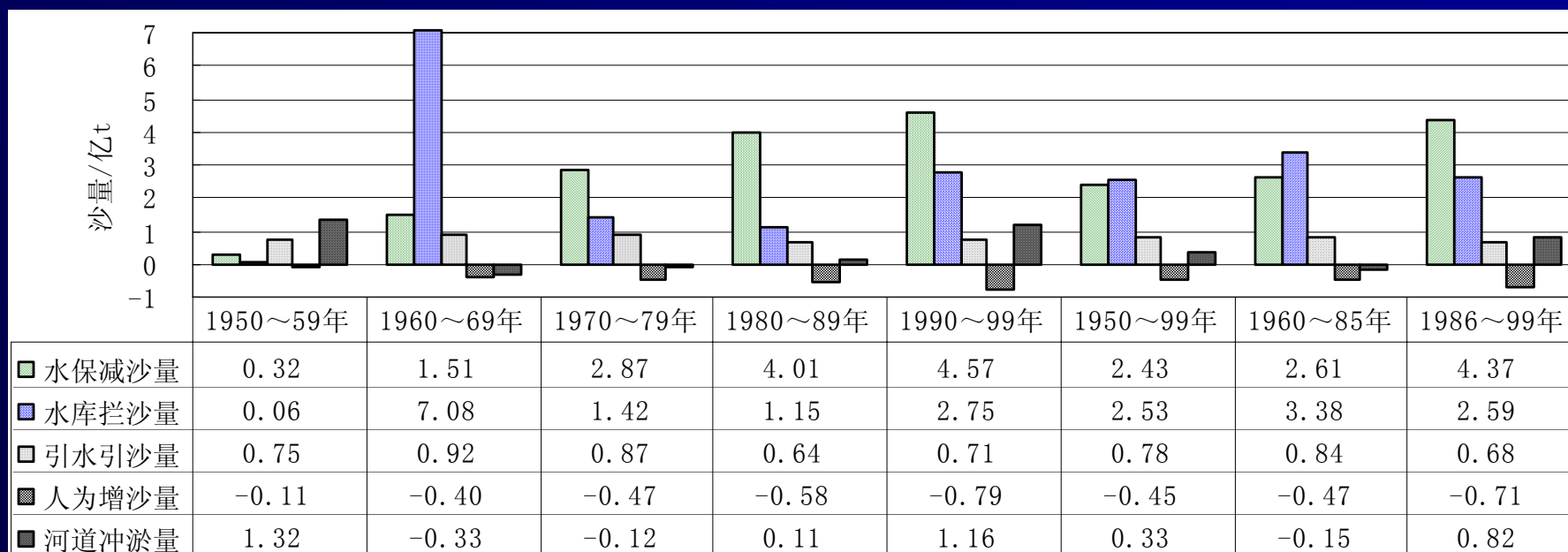
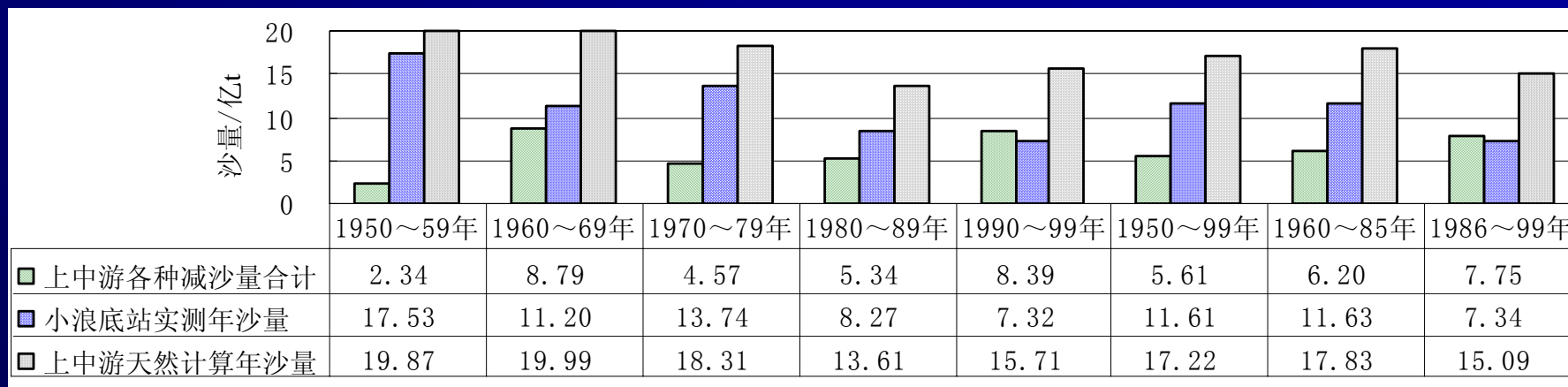


# 黄河上中游水量分布变化



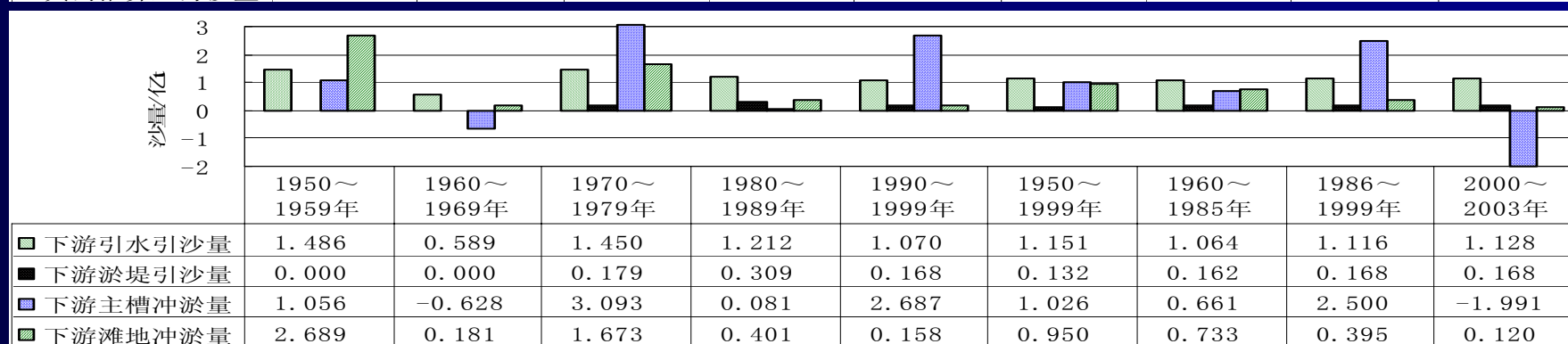
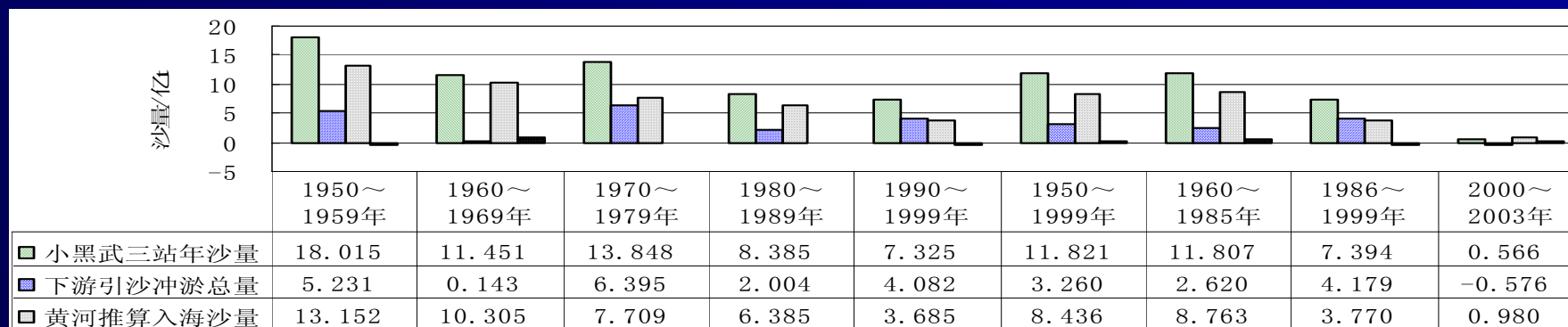
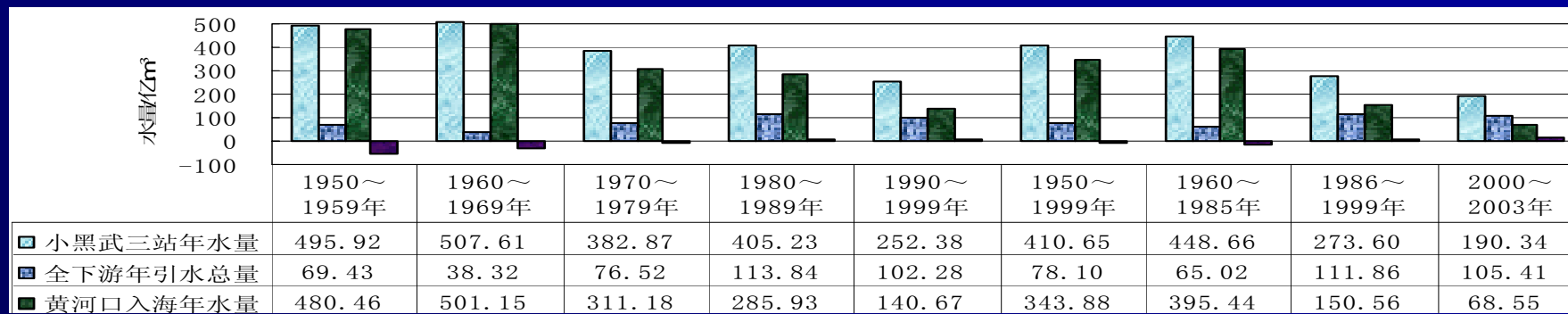


# 黄河上中游沙量分布变化



—— 概况 ——

# 黄河下游水沙量分布变化

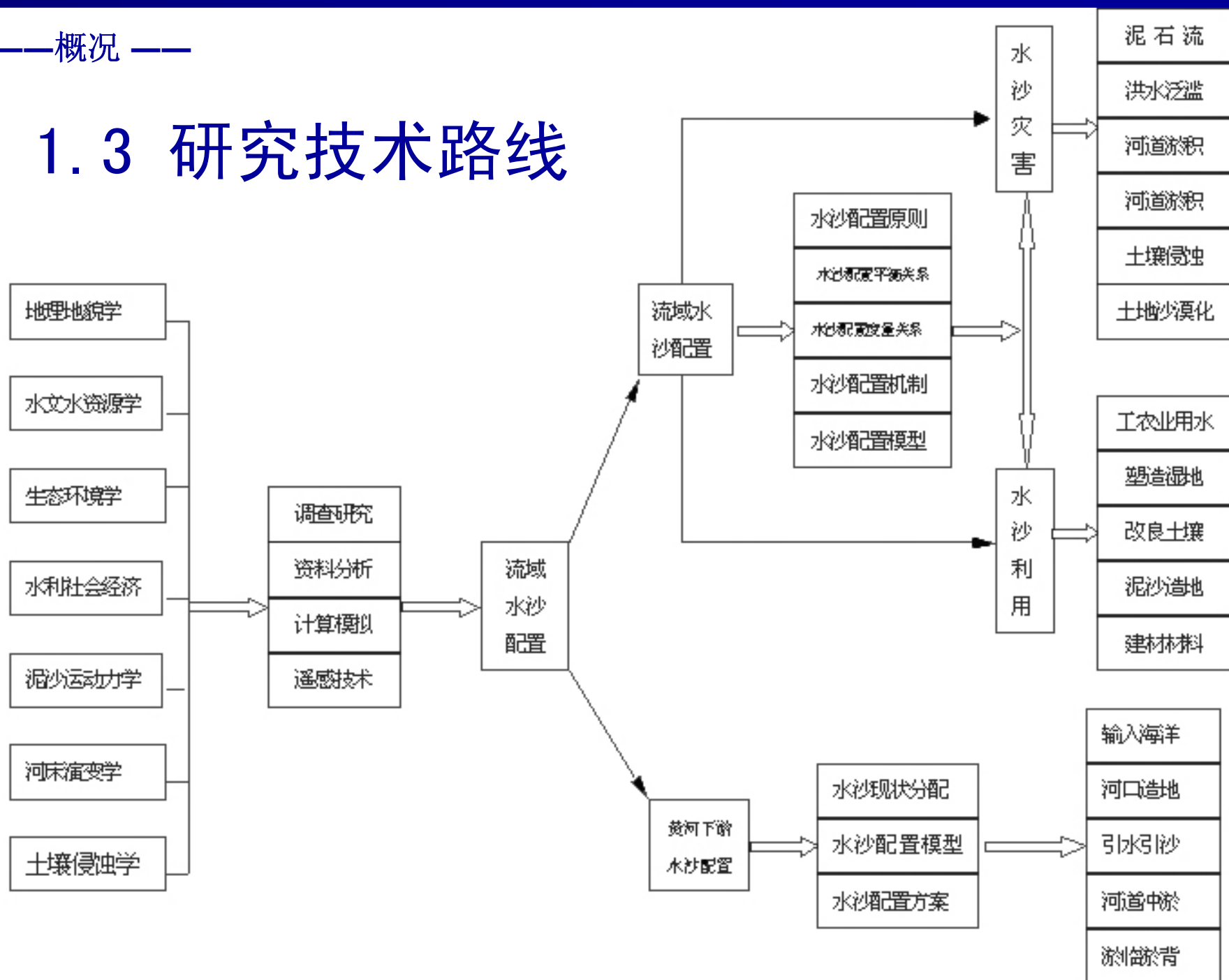


## 1.2 泥沙资源化及其优化配置研究现状

- **水沙联合配置：**目前关于水资源配置的研究成果比较多，形成了一套相对完善的配置理论和技术。实际上，在水沙运动过程中，水流和泥沙是分不开的，考虑水沙联合配置更具科学合理性。
- **国内外研究现状：**国内外就泥沙运动规律方面的研究成果较丰富，而就泥沙配置、水沙联合配置、泥沙灾害与利用的相互关系等方面的研究成果较少，更没有形成一套理论体系。
- **泥沙资源优化配置：**把泥沙作为一种资源进行系统的研究刚刚起步，在流域水沙优化配置的宏观研究则属空白。



# 1.3 研究技术路线



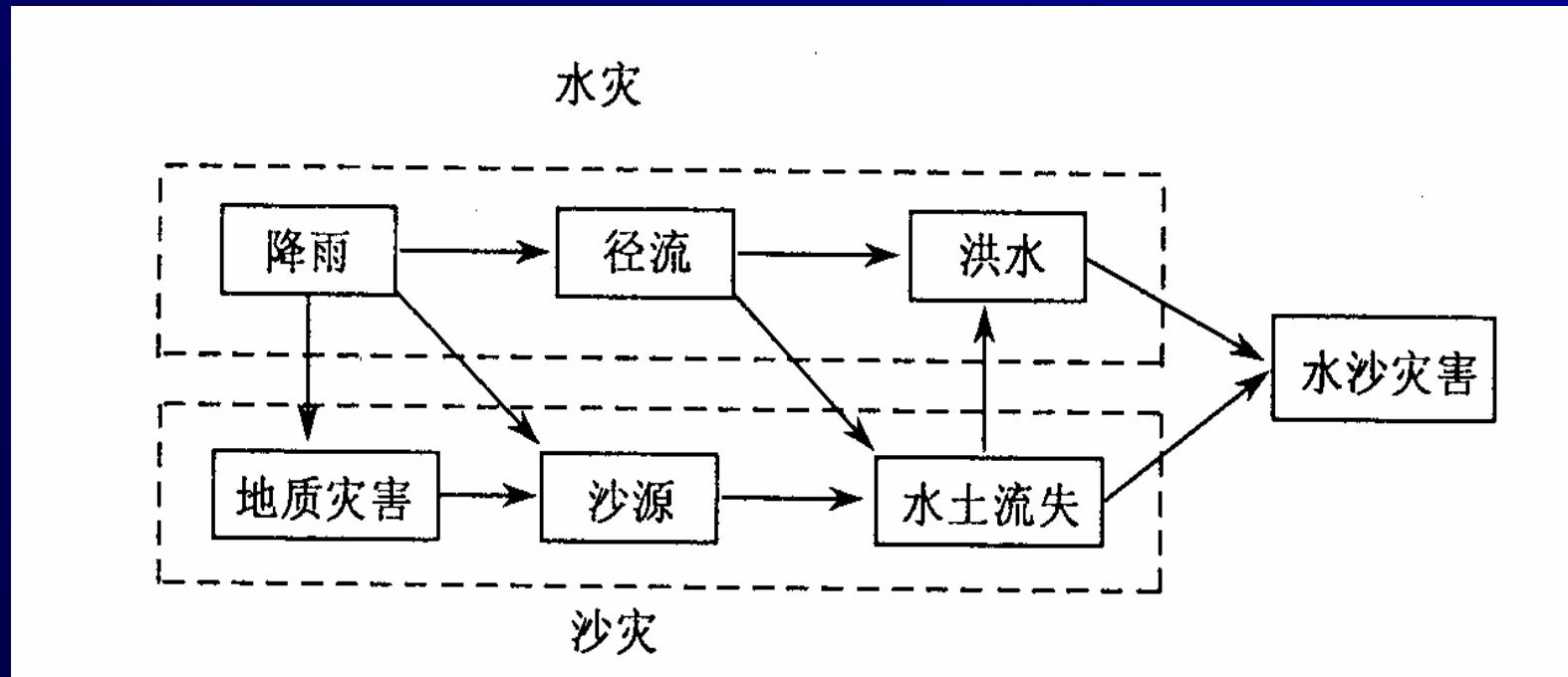
## 二、流域水沙灾害与泥沙资源化的原理

- 2.1 流域水沙灾害及其特征
- 2.2 流域泥沙的基本属性与特征
- 2.3 流域泥沙资源化的可行性
- 2.4 流域泥沙资源化的目标与途径
- 2.5 水沙灾害和水沙利用的关系

## 2.1 流域水沙灾害及其特征

### ❖ 水沙灾害的定义

➤ 水沙灾害并不是一种新的灾害现象，它是水灾和沙灾之间的一个系统，包括水灾，沙灾及两者的耦合。



## 2.1 流域水沙灾害及其特征

### ❖ 水灾害及其特征

#### 洪水灾害 + 雨涝灾害

流量小，水位高，危害重，损失大，并呈逐年加重趋势

面积大、范围广是近几年洪水灾害的另一特征

我国雨涝的地区分布特点是，东部多，西部少；沿海地区多，内陆地区少；平原地区多，高原山地少

## 2.1 流域水沙灾害及其特征

### ❖ 泥沙灾害的类型

#### 泥沙灾害内容

泥沙淤积灾害

泥沙冲刷灾害

岸滩崩塌

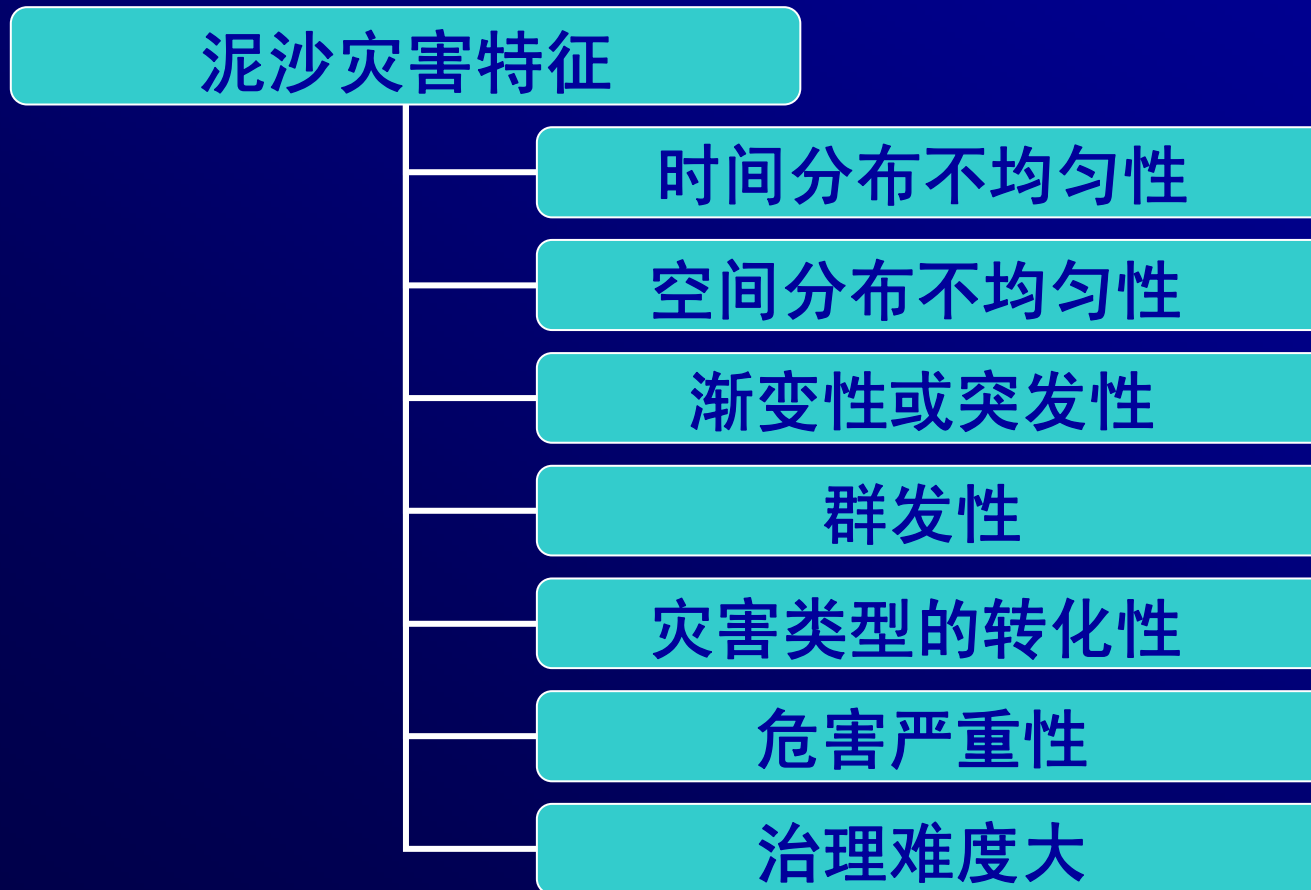
山地灾害

粗沙淤积的土地沙化

水沙污染

## 2.1 流域水沙灾害及其特征

### ❖ 泥沙灾害的特征





## 2.2 流域泥沙的基本属性与特征

### 泥沙的基本属性

性质名称	性质描述
离散性	泥沙由众多大小不同的颗粒组成，粗颗粒泥沙属于散粒体，细颗粒泥沙间虽然有一定的粘接力，但仍然是可以分离的，泥沙运动与河床冲淤都是以颗粒形式完成的，泥沙形状各式各样。
群体泥沙的力学性质	群体泥沙具有一定的承压性，一般用抗剪强度来表示。其他力学性质包括可压缩性、透水性、可塑性等
吸附性	细颗粒泥沙表面由离子圈组成，使泥沙颗粒具有一定的吸附性，可以吸附一定的有害物质或一定数量的有机质、微量元素。
可搬运性	在外力的作用下，泥沙可以从一个地方搬运到另一个地方。

## 2.2 流域泥沙的基本属性与特征

泥沙基本特征

性质名称	性质描述
水沙不可分性	在产生、输送、分配过程中，水流和泥沙密不可分，泥沙运动取决于水流条件，且泥沙资源量与水资源量具有一定的函数关系。
水沙不协调性	北方地区虽然降雨少，但水土流失严重，产沙量较多，北方河流多为多沙河流，河道淤积严重，表现为水少沙多的特征。
水沙异源	因多沙河流流经自然地理单元的地形、降雨、产沙等存在较大的差异，水沙来源地区不同，即水沙异源特点，如黄河、辽河。
水沙地域分布的不均匀性	北方河流水少沙多，平均含沙量高，如黄河和永定河；而南方河流的水多沙少，平均含沙量小，如长江和珠江。
水沙时间分布的不均匀性	流域水沙在年内和年际间的分配呈明显的不均衡，年内水沙主要发生在汛期，沙量更集中。

## 2.3 流域泥沙资源化的可行性

### ❖ 流域泥沙的资源性

#### 自然资源的基本属性

有效性

可控性

稀缺性

- **泥沙的有效性**：泥沙是有用的，可产生一定的经济效益；
  - **泥沙的可控型**：泥沙是可以调控的
  - **泥沙的稀缺性**：在一定范围内泥沙是稀缺资源，如挖沙
- 流域泥沙满足有效性、可控性、稀缺性，具有资源性

## 2.3 流域泥沙资源化的可行性

### ❖ 流域泥沙资源化的基本条件

#### 泥沙资源化的基本条件

社会经济水平

社会环境

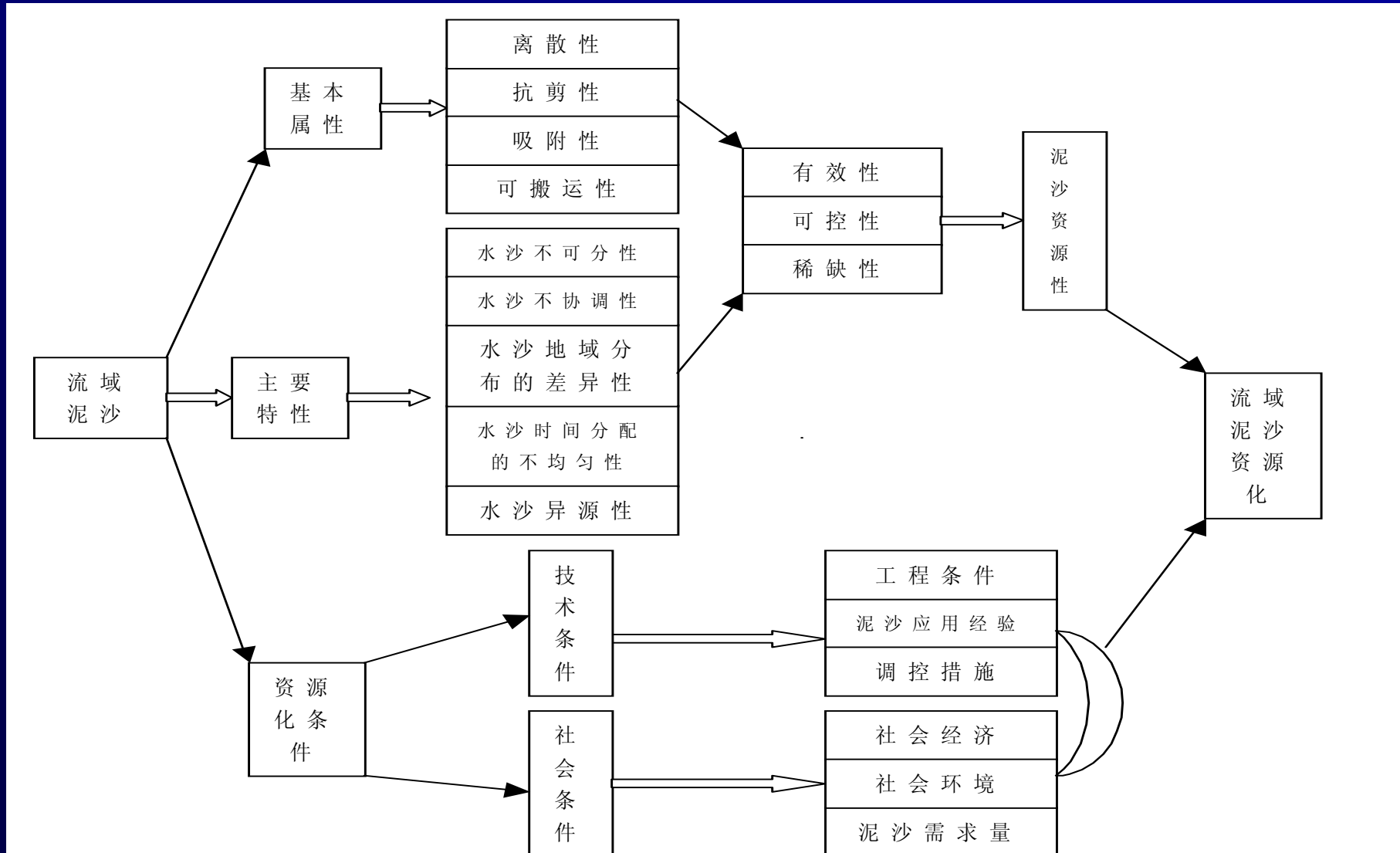
泥沙需求量增加

泥沙利用的经验

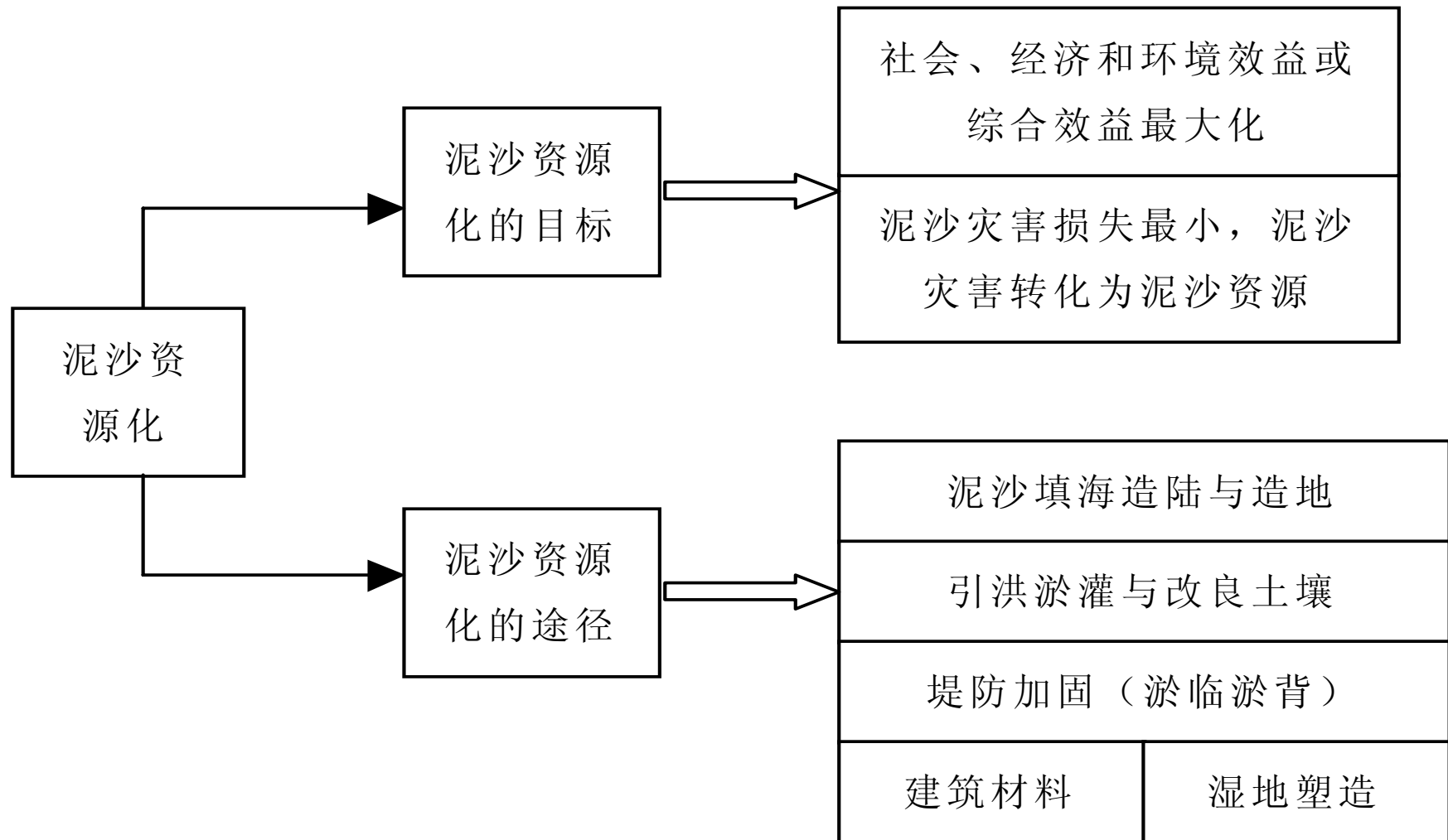
工程建设

调控技术

## ❖ 流域泥沙资源化过程

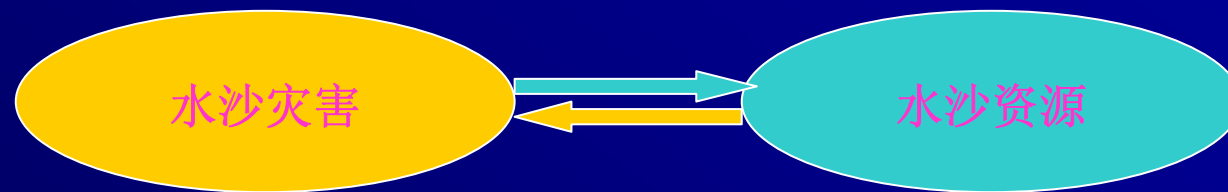


## 2.4 流域泥沙资源化的目标与途径





## 2.5 水沙灾害和水沙利用的关系



- 水沙灾害与水沙利用是水沙资源的两大属性，具有一定的相对性。
- 在一定的时空范围内表现为水沙的灾害性，而在其他时空范围内则表现为水沙的资源性，而且在一定的条件下，水沙灾害与水沙利用可以相互转化。这一点也是水沙资源优化配置的基础。
- 水利水保工程的目的主要是进行水沙资源的优化配置，使流域水沙的灾害性向水沙的资源性转化。

## 2.6 黄河下游泥沙资源化的途径

(1) 放淤固堤和淤筑相对地下河：淤背固堤，黄河下游的淤临淤滩技术，淤筑相对地下河

### (2) 河口泥沙造地

1855年以来黄河河口三角洲淤积造陆情况

时期	利津年来水量 (亿m <sup>3</sup> )	利津年来沙 量 (亿t)	净淤进面积 (km <sup>2</sup> )	每年净淤进 面积 (km <sup>2</sup> /a)	备注
1855~1954	445.1	11.48	1510.0	23.6	流路基本无人干涉 神仙沟和刁口河行 河期间 清水沟行河期间
1954~1976	271.2	6.57	548.3	24.9	
1976~1992	109.0	3.06	364.4	22.8	
1992~2001			77.3	8.6	

## 2.6 黄河下游泥沙资源化的途径

### (3) 黄河口疏浚泥沙的综合利用

- 利用泥沙淤滩；
- 利用泥沙淤背；
- 利用泥沙改地；
- 利用泥沙维护海岸；
- 利用泥沙填海造陆

### (4) 黄河泥沙建筑材料的转化

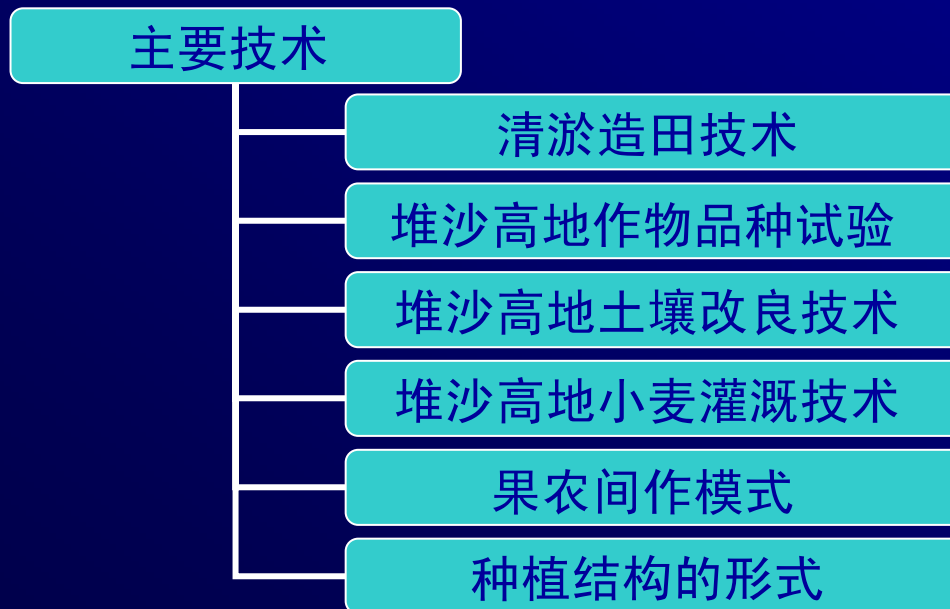
- 淤沙混凝土
- 灰沙砖
- 特细沙混凝土预制
- 废沙水泥土预制
- 淤砂熔饰面玻璃

## 2.6 黄河下游泥沙资源化的途径

### (5) 引黄灌区泥沙的利用

- 淤改和稻改；
- 浑水灌溉引沙入田；
- 与淤筑相对地下河相结合，淤背沉沙清水灌溉；
- 引黄淤筑平原水库

### (6) 利用黄河泥沙资源进行土地资源的开发



## 2.6 黄河下游泥沙资源化的途径

### (7) 调控河道滞沙分配，稳定中水河槽

❖ 为了减少粗沙进入下游河道，2004年黄委在小北干流龙门下游10多km的连伯滩开始实施放淤试验，初步实现了“淤粗排细”的目标。

### (8) 湿地塑造

❖ 根据黄河湿地规划需求，按照泥沙运动特点，河道和河口演变规律，塑造河道滩槽湿地、滞洪区湿地、河口湿地等。

## 三、流域水沙优化配置理论的研究

3.1 流域泥沙资源系统与其它系统的关系

3.2 流域泥沙资源配置的原则与任务

3.3 流域泥沙资源优化配置的原理

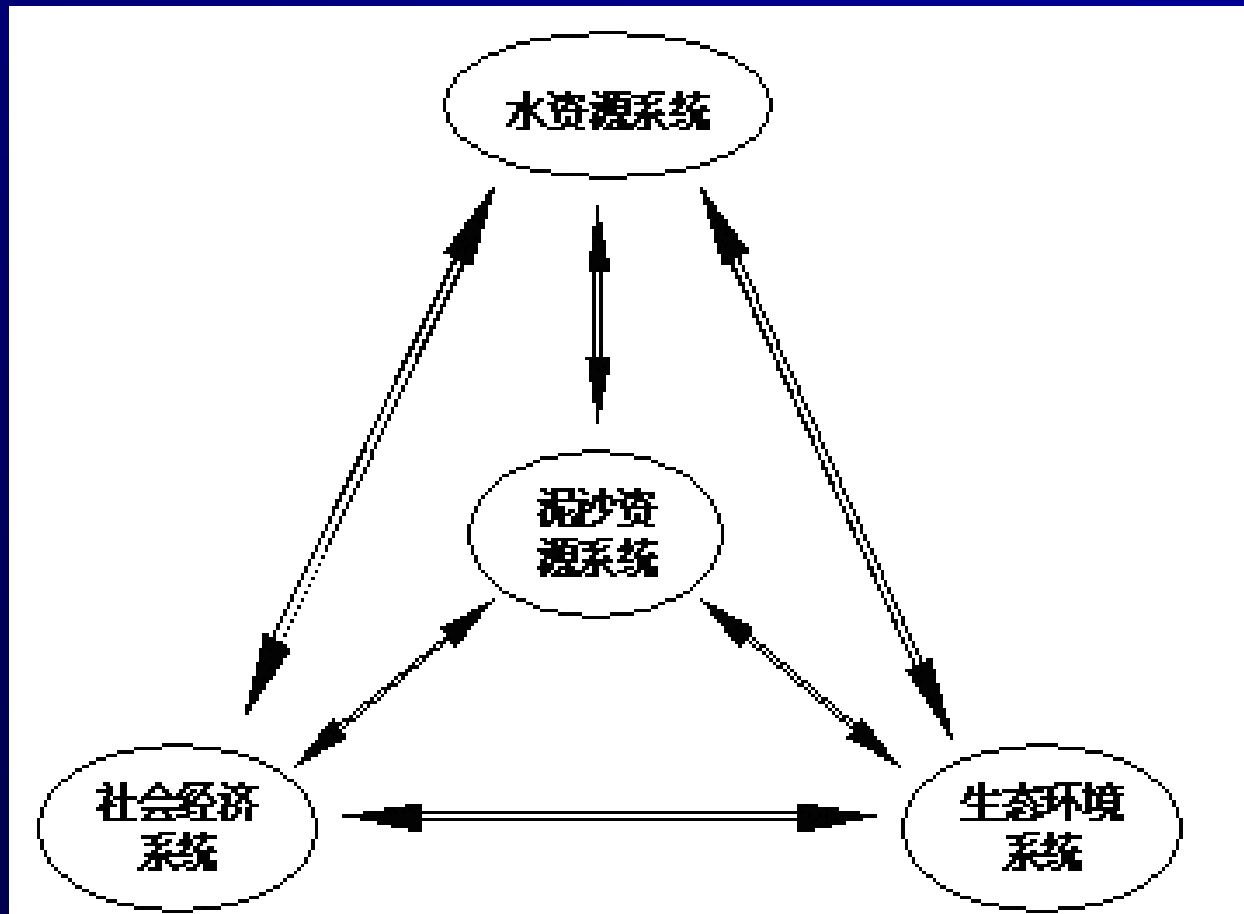
3.4 流域水沙资源联合配置的控制条件

3.5 河床演变均衡稳定原理——河流熵原理

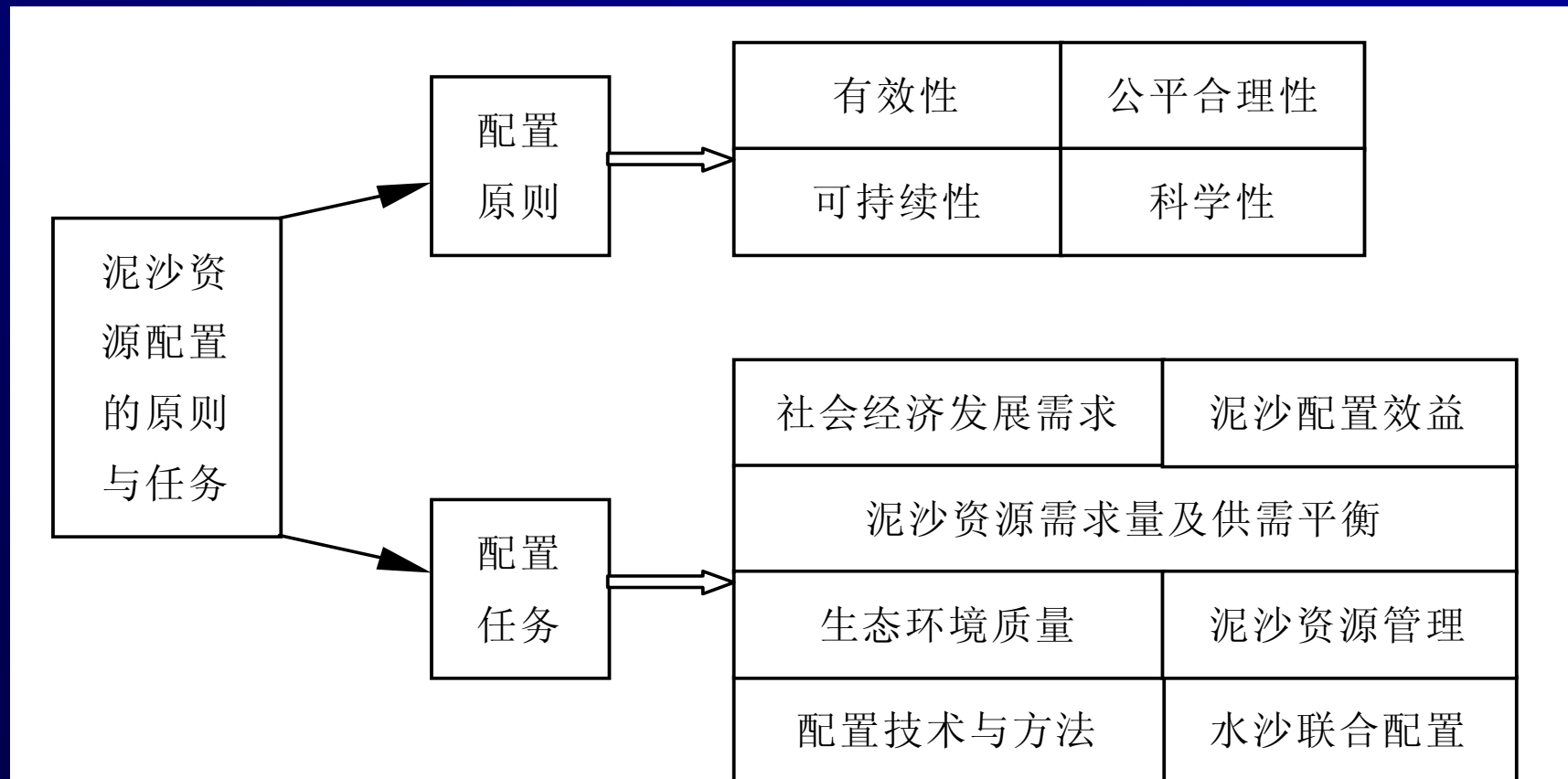
3.6 流域水沙资源优化配置理论体系



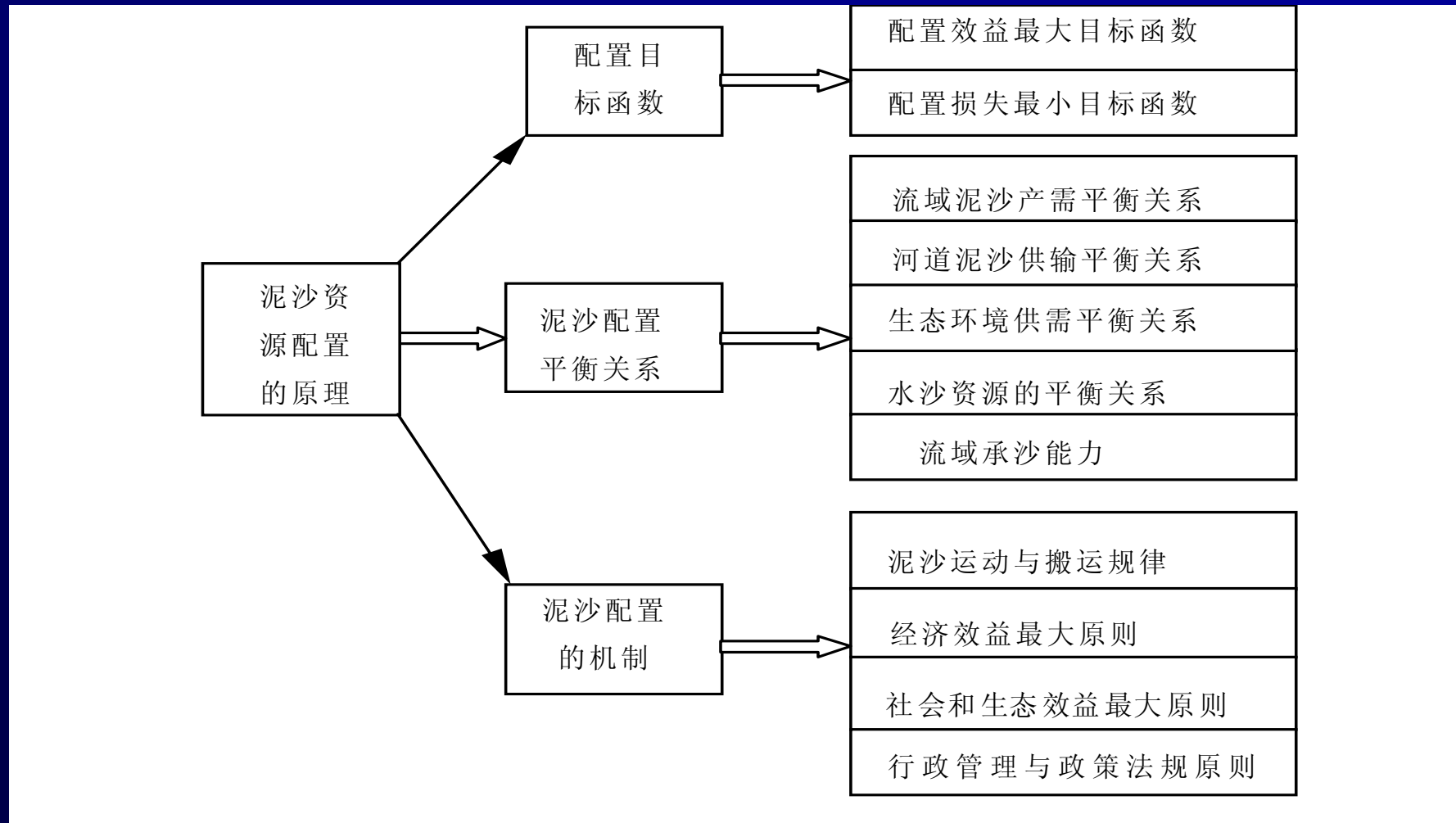
### 3.1 流域泥沙资源系统与其它系统的关系



## 3.2 流域泥沙资源配置的原则与任务



### 3.3 流域泥沙资源优化配置的原理



## 3.3 流域泥沙资源优化配置的原理

### 3.3.1 泥沙优化配置的度量函数

当泥沙表现为资源时

$$F(x) = \max \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_{ij} f(C_{ij} X_i)$$

当泥沙表现为灾害时

$$S(x) = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n T_{ij} g(K_{ij} X_i)$$

综合目标函数

配置约束条件

$$\left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{kj} f(C_{ij} X_i) - B_k \leq 0 \text{ 或 } > 0 \quad (k=1, 2, \dots, M) \right.$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{kj} f(K_{ij} X_i) - E_k \leq 0 \text{ 或 } > 0 \quad (k=1, 2, \dots, M) \right.$$

### 3.3.2 多目标水沙资源优化配置方法

❖ 流域水沙资源优化配置方法可采用多目标规划方法，包括多目标线性规划和多目标动态规划两种方法，相应的流域水沙资源优化配置数学模型包括多目标线性规划和多目标动态规划两种数学模型，优化配置数学模型一般由综合目标函数和约束条件方程两部分构成，求解模型得到一个最优或拟最优的规划方案。流域水沙资源优化配置方法采用多目标规划层次分析法。

#### 流域水沙资源配置目标层次分析

层次	层次分析内容							
总目标	水沙资源优化配置							
子目标	长期维持主河槽过流能力		泥沙致灾最小			经济可行性		
控制指标	平滩流量		灾害泥沙量			经济投入		
泥沙配置方式	水土保持	水库拦沙	引水引沙	人工（机械）放淤	河槽冲淤	洪水淤滩	河口造陆	深海输沙
综合目标函数	采用层次分析数学方法，结合专家调查构造综合目标函数							
配置约束条件	水沙条件关系和配置能力约束条件							
配置方案计算	计算各种水沙条件的泥沙优化配置方案并进行技术经济比较							

## 3.3 流域泥沙资源优化配置的原理

### 3.3.3 流域泥沙资源配置平衡关系

- ❖ 为有效达到泥沙资源配置目标，使流域泥沙资源可持续发展，需要考虑以下平衡关系：
  - 流域泥沙资源量与社会经济发展之间的供需平衡关系
  - 河道泥沙资源量与水流输运能力的平衡关系
  - 泥沙资源量与生态环境的平衡关系
  - 泥沙资源与水资源的平衡关系

## 3.3 流域泥沙资源优化配置的原理

### 3.3.4 流域泥沙资源配置机制

- ❖ 结合泥沙资源的特性，泥沙资源配置机制主要包括：
  - 按泥沙运动与搬运规律进行配置；
  - 以经济利益最大(市场经济)进行配置；
  - 以社会环境效益进行配置；
  - 以行政管理及相关政策进行配置。

## 3.4 流域水沙资源联合配置的控制条件

### 3.4.1 流域水沙资源量的控制关系

#### (1) 流域产流产沙关系

$$M_s = \frac{51.1}{C^{0.15}} i^{1.5} P^{1.2} J^{0.26} P_a^{0.48}$$

#### (2) 河道输水输沙能力关系

$$W_s = KW_w^\alpha$$

或

$$W_{sj} = k_j \frac{W_j^\alpha}{(1 - S_{Vj-1})^\beta}$$



## 3.4 流域水沙资源联合配置的控制条件

### 3.4.2 流域水沙联合配置运动输移控制方程

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA (J - J_f)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} + (1 - p) \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$S_* = K \left( \frac{U^3}{g \omega R} \right)^m$$

#### 改进水流动量方程

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{Q}{A^2} q_x + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0$$

考虑支流入汇、取引水引起的附加比降项

高低含沙量统一的挟沙能力公式

$$S_* = k_0 \left[ 1 + \left( \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0 \rho_s} \right) \frac{S}{\beta} \right]^m \frac{1}{\left( 1 - \frac{S}{\beta \rho_s} \right)^{(k+1)m}} \left( \frac{U^3}{h \omega_0} \right)^m$$

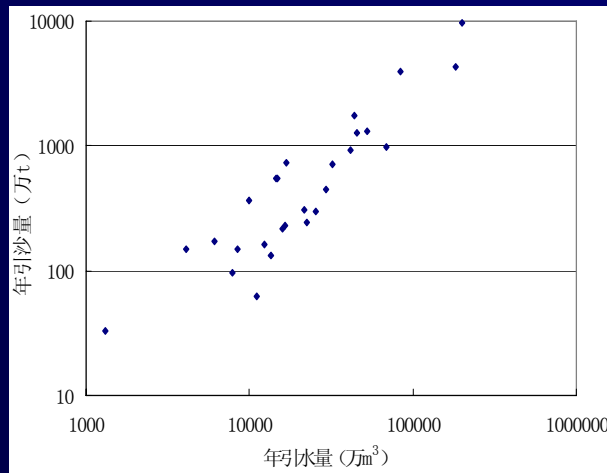
挟沙能力 $S^*$ 受来流含沙量 $S$ 影响,  $S \uparrow \rightarrow S^* \uparrow \rightarrow$ 多来多排

## 3.4 流域水沙资源联合配置的控制条件

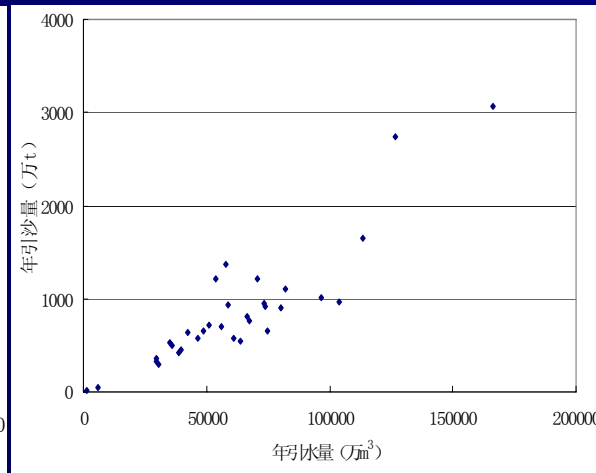
### 3.4.3 流域水沙联合配置的分配关系

#### (1) 水沙资源量的分配关系

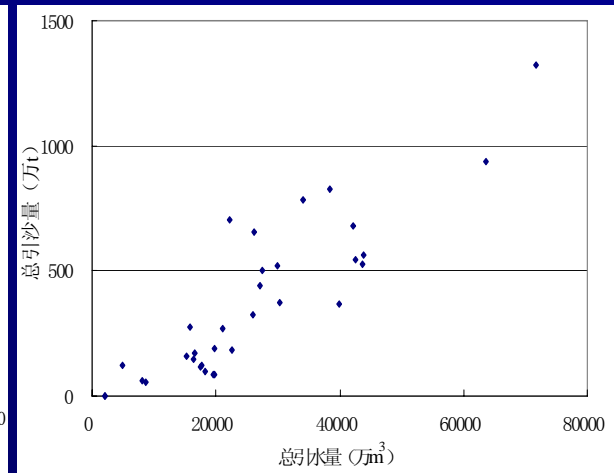
$$W_{ds} = K_d W_{dw}^\beta$$



(a) 河南省三义寨



(b) 河南省人民胜利渠



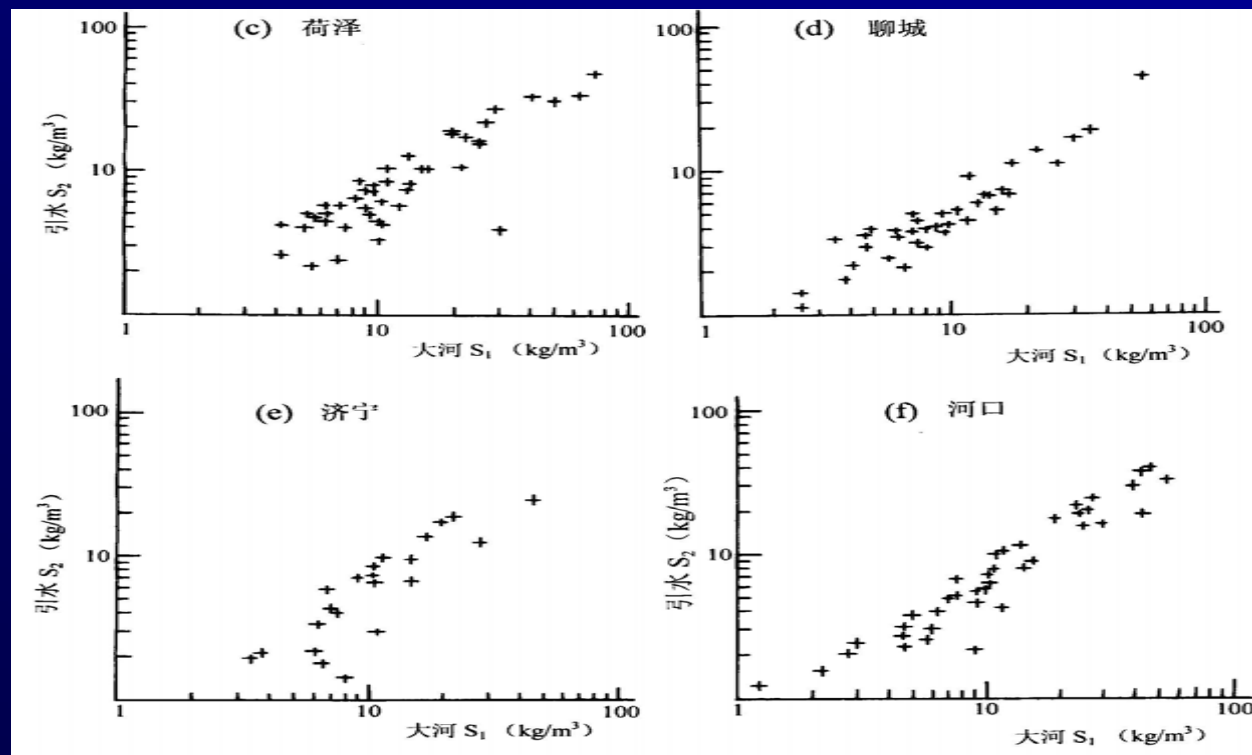
(c) 河南省黑岗口

## 3.4 流域水沙资源联合配置的控制条件

### 3.4.3 流域水沙联合配置的分配关系

#### (2) 分水分沙的特征关系

$$S = K_0 S_0^\beta$$



## 3.5 河床演变均衡稳定原理——河流熵原理

### 3.5.1 河流水力熵和统计熵

- ❖ 河流水力熵差定义是河流系统的总水力机械能损耗减去搬运推移质和悬浮悬移质泥沙作的有用功，即可用机械能损耗量。计算公式为：

$$d\psi = dE - \sum_i \mu_i dN_i$$

式中： $d\psi$ 是河流水力熵差； $dE$ 是总水力机械能损耗； $\sum_i \mu_i dN_i$ 是水流搬运推移质和悬浮悬移质泥沙作的有用功。

- ❖ 河流统计熵定义是系统的可用机械能耗散在体系中如何分配的函数，是河流水力熵在微观上的统计解释。计算公式为：

$$\psi = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

式中： $p_i$ 是河流水力熵在体系中自由（不受边界和人为控制）耗散分配的函数，且满足 $\sum p_i = 1$ 。

## 3.5 河床演变均衡稳定原理——河流熵原理

### 3.5.2 明渠流水力熵和统计熵

#### (1) 明渠流水力熵原理

- ❖ **明渠流最小可用能耗率原理**：在一定水流和明渠边界条件下，明渠流通过水深、流速分布和能坡的精确调整，使水流的可用机械能损耗率为最小，最小值的大小取决于水流和明渠边界条件，用下式表达。

$$P = \gamma Q U J_e = \text{最小值}$$

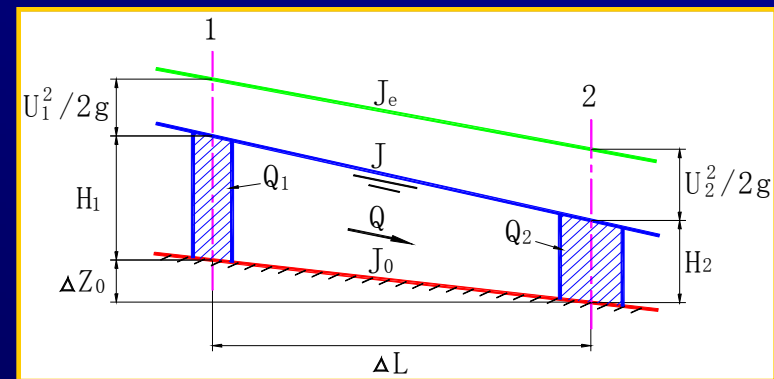
#### (2) 明渠流统计熵原理

- ❖ 非均匀流的流速公式：

$$U = C \sqrt{R J_e}$$

对于均匀流  $J_e = J$ ，可推出著名的谢才公式：

$$U = C \sqrt{R J}$$



明渠流水力熵差计算示意图

## 3.5 河床演变均衡稳定原理——河流熵原理

### 3.5.3 河流最小可用能耗率原理

- ❖ **河流最小可用能耗率原理**：在一定来水来沙条件下，河流总是在一定约束条件下努力调整所有可以调整的变量，使挟沙水流的可用机械能损耗率减小，且当河道稳定时为最小，最小值的大小取决于来水来沙和河床边界条件，用下式表达：

$$P = \gamma_m Q U J_e - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} Q S \omega - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_b B_d U_g (\text{tg } \phi - J_0) = \text{最小值}$$

- ❖ 利用  $\gamma_m = \gamma + \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} S$  和  $J_e \approx J$  可将上式转换为：

$$P = \gamma Q U J + \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} Q S (U J - \omega) - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_b B_d U_g (\text{tg } \phi - J_0) = \text{最小值}$$

- ❖ 河流最小可用能耗率原理及其表达式全面地反映了河道输水输沙和河床演变的能耗特性，统一表达了明渠流和冲积河流均衡稳定的机理。

## 3.5 河床演变均衡稳定原理——河流熵原理

### 3.5.4 河流统计熵原理的应用

- ❖ 从河流最小可用能耗率原理出发，根据最大统计熵原理的等概率定理和能量均配定理，可以推导得到多种广义的河相关系。

- (1) 河宽与水深河相关系

$$\frac{B^{9/13}}{h} = C$$

- (2) 含沙量与流速、河床坡降及河道弯曲系数河相关系

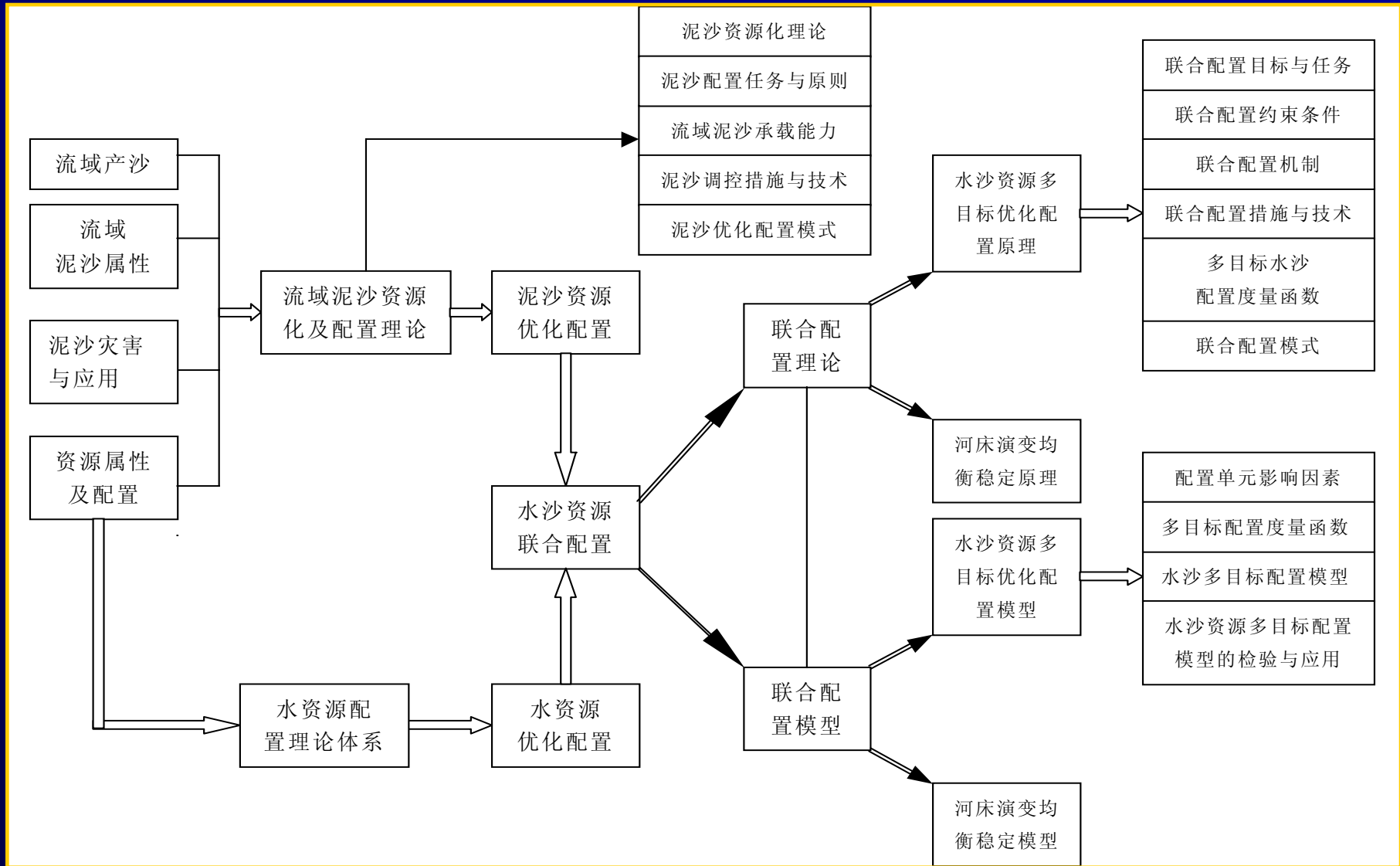
$$S = k_1 U^3 + C_0$$

$$S = k_2 J^{3/2} + C_0$$

$$S = k_3 \eta^{-3/2} + C_0$$

- ❖ 这些河相关系只能反映河床演变的某两个变量之间的关系，河流最小可用能耗率原理的公式反映了河床演变是多个变量之间的综合关系。

# 3.6 流域水沙资源优化配置理论体系





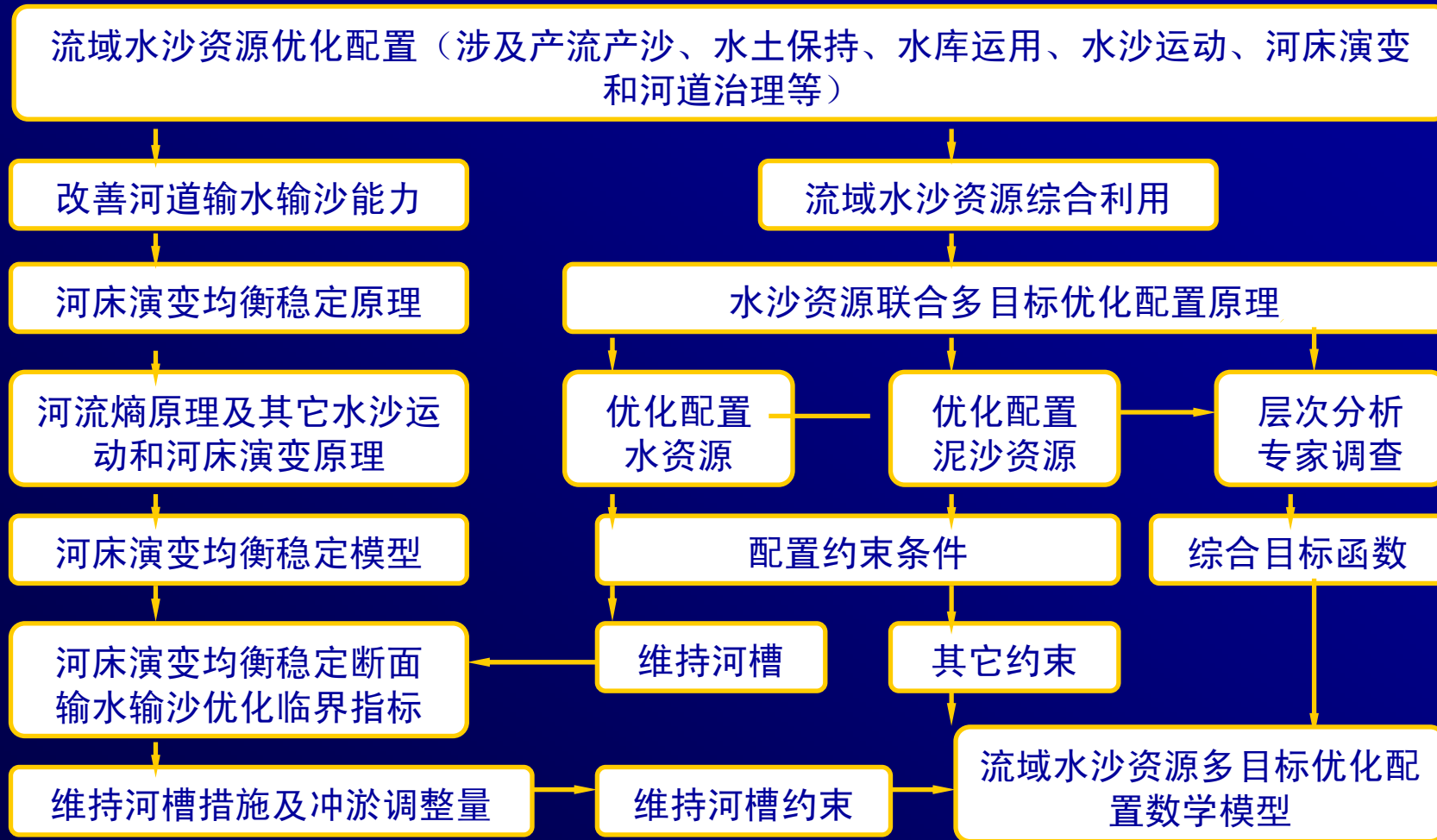
# 四、流域水沙优化配置的数学模型

4.1 流域水沙资源优化配置数学模型的构成

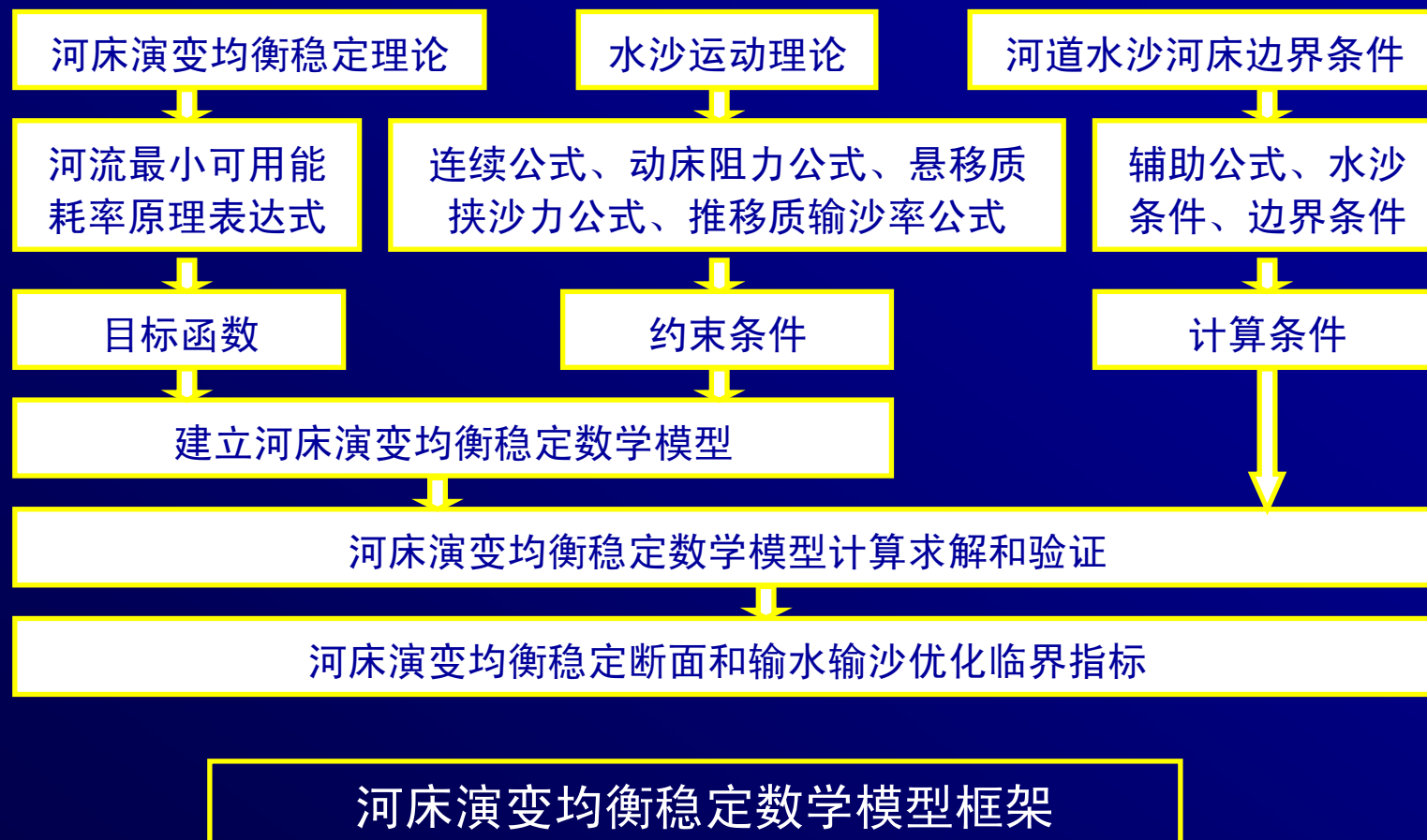
4.2 河床演变均衡稳定数学模型

4.3 流域水沙资源多目标优化配置模型

## 4.1 流域水沙资源优化配置数学模型的构成



## 4.2 河床演变均衡稳定数学模型



## 4.2 河床演变均衡稳定数学模型

### 4.2.1 数学模型的基本方程

目标函数:

$$P = \gamma_m Q U J_e - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} Q S \omega - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_b B_d U_g (tg \phi - J_0) = \text{最小值}$$

约束条件:

(1) 水流连续公式

$$Q = B_b h_{cp} U$$

(2) 动床阻力公式

$$U = k \sqrt{g h_{cp} J} \left( \frac{h_{cp}}{d_{b50}} \right)^{\frac{1}{4+1g \left( \frac{h_{cp}}{d_{b50}} \right)}}$$

(3) 悬移质挟沙力公式

$$S_{b*} = \frac{\left( 0.606 + \frac{S}{\beta \gamma_s} \right)^{0.92}}{\left( 1 - \frac{S}{\beta \gamma_s} \right)^{7.36}} K \gamma_s \left( \frac{U^3}{g h_{cp} \omega_{bcp}} \right)^{0.92}$$

(4) 推移质输沙率公式

$$g_b = K_1 \gamma_s \left( \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{(Uh)^{\frac{16}{13}} J^{\frac{18}{13}}}{g^{\frac{3}{26}} d_{gcp}^{\frac{9}{26}}}$$

## 4.2 河床演变均衡稳定数学模型

### 4.2.2 计算条件（辅助公式）

冲泄质和床沙质的分界粒径

$$\omega_c \leq UJ$$

悬移质和推移质的分界粒径

$$U_s = \frac{15.1}{z} \left( \frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \omega$$

泥沙起动流速公式

$$U_c = \left( \frac{h}{d} \right)^{0.14} \left[ 17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 0.000000605 \frac{10 + h}{d^{0.72}} \right]^{1/2}$$

悬移质清水沉速公式

$$\omega = \sqrt{\left( 13.95 \frac{v}{d} \right)^2 + 1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gd} - 13.95 \frac{v}{d}$$

悬移质浑水沉速公式

$$\omega_m = \left( 1 - \frac{S}{\gamma_s} \right)^7 \omega$$

推移质平均运动速度公式

$$U_g = \left( U - \frac{U_c}{1.2} \right) \left( \frac{d}{h} \right)^{1/4}$$

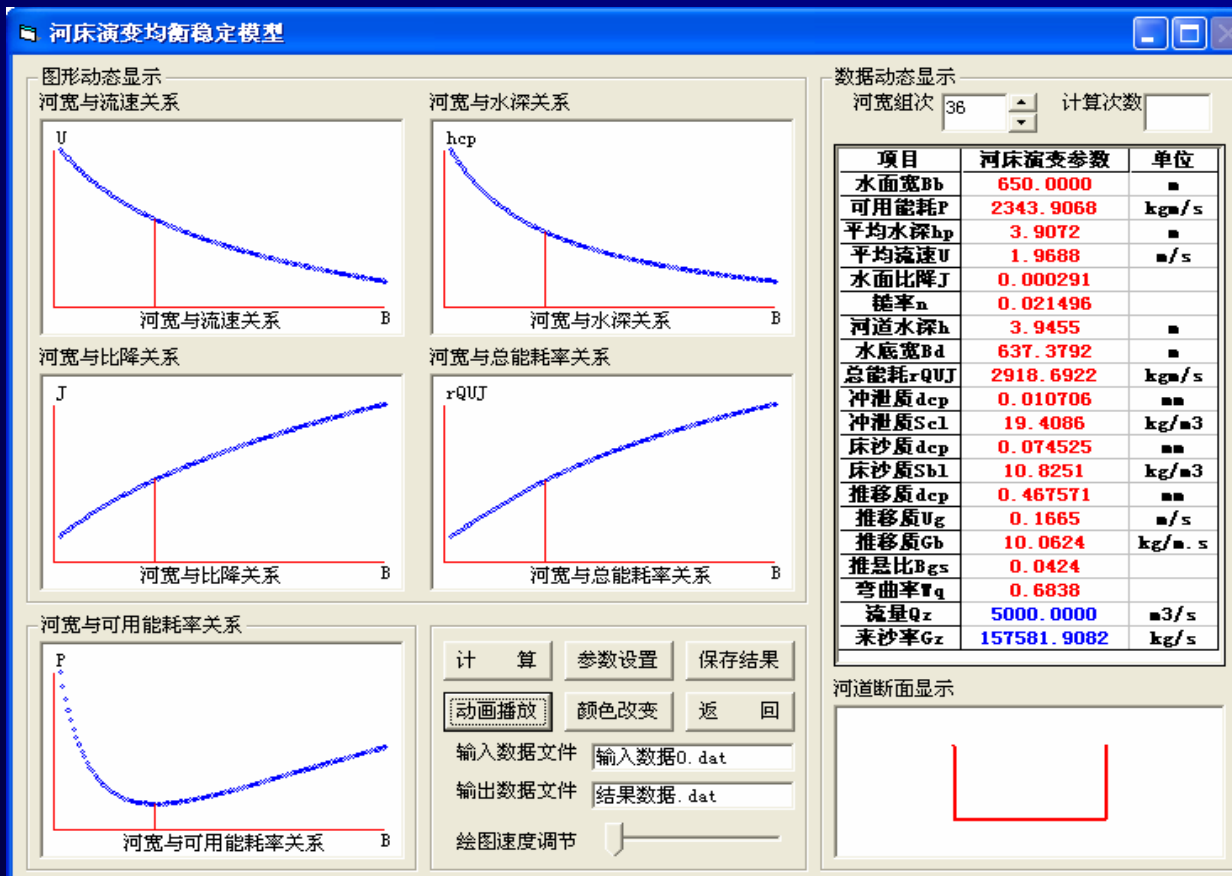
泥沙的水下休止角

$$\phi = 35.3 d^{0.04}$$

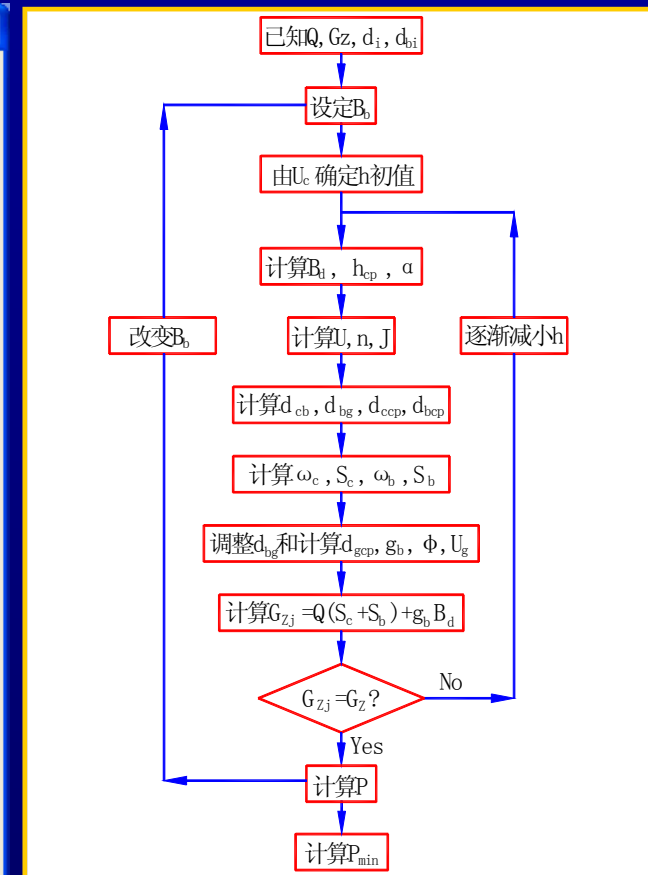


# 4.2 河床演变均衡稳定数学模型

## 4.2.3 数学模型求解



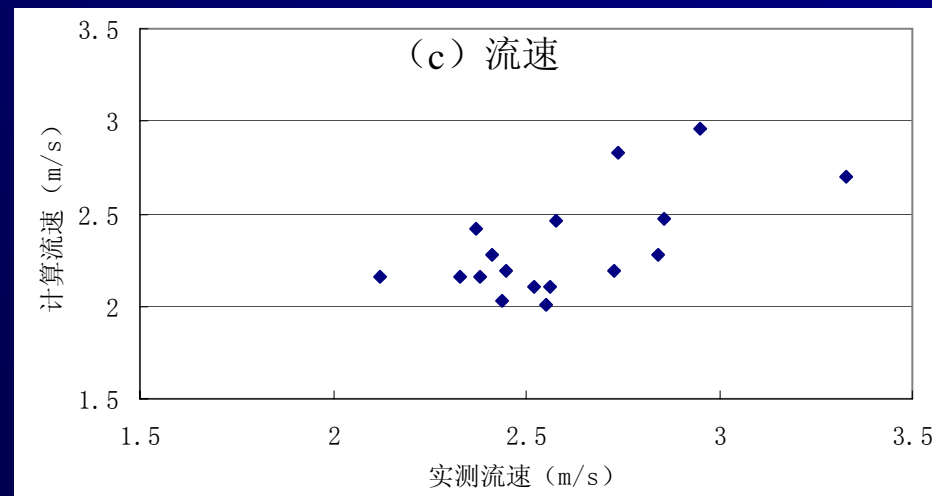
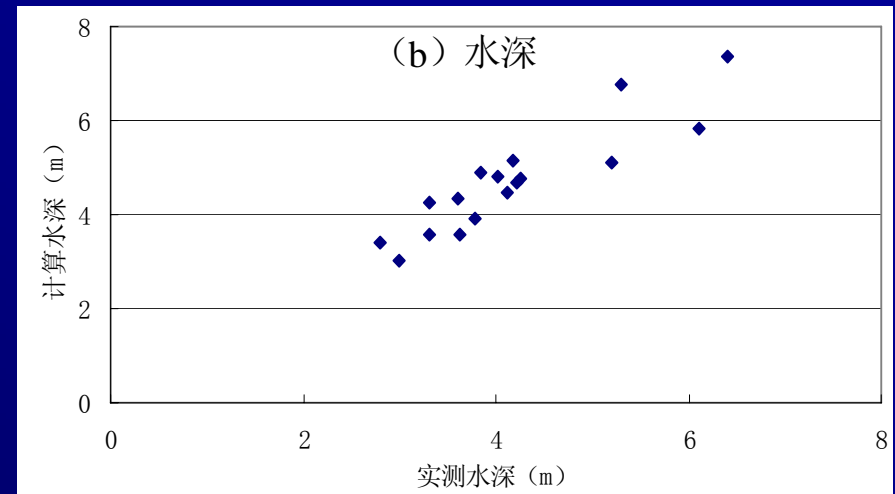
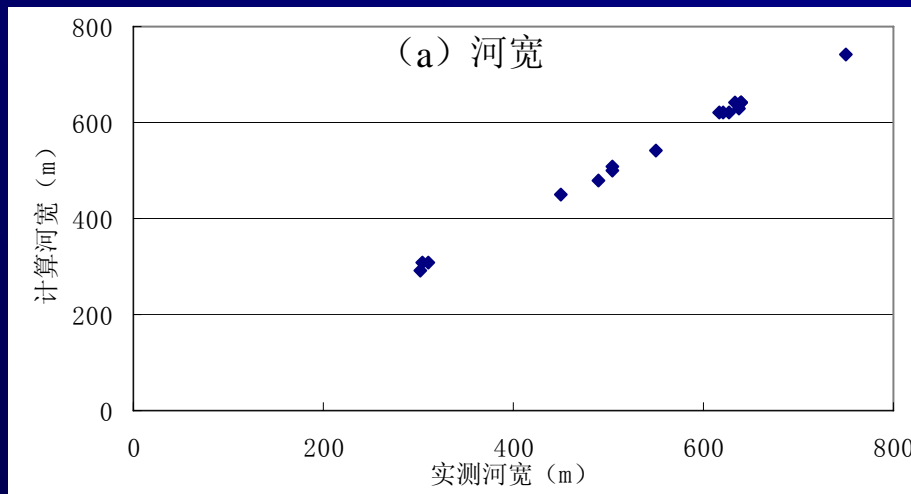
河床演变均衡稳定数模计算结果动态显示



试算迭代过程图

## 4.2 河床演变均衡稳定数学模型

### 4.2.4 数学模型验证



## 4.3 流域水沙资源多目标优化配置模型

### 4.3.1 水沙资源优化配置方法

#### 水沙资源配置目标层次分析

层次	层次分析内容		
总目标	水沙资源优化配置		
子目标	长期维持主河槽过流能力	泥沙致灾最小	经济可行性
控制指标	平滩流量	灾害泥沙量	经济投入

泥沙配置方式	水土保持	水库拦沙	引水引沙	人工（机械）放淤	河槽冲淤	洪水淤滩	河口造陆	深海输沙
综合目标函数	采用层次分析数学方法，结合专家调查构造综合目标函数							
配置约束条件	水沙条件关系和配置能力约束条件							
数学模型求解	采用改进线性规划数学方法求最优解 采用excel数据表格试算求拟最优解							
配置方案计算	计算各种水沙条件的泥沙优化配置方案并进行技术经济比较							



## 4.3 流域水沙资源多目标优化配置模型

### 4.3.2 水沙资源优化配置数学模型基本方程

❖ 考虑河道输水输沙关系和引水引沙关系，泥沙多目标优化配置线性规划数学模型方程由综合目标函数和配置约束条件构成。

➤ 综合目标函数：

$$F(W_{Sj}) = \sum_{j=1}^n \beta_j W_{Sj} = \max$$

➤ 配置约束条件：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot W_{Sj} \leq b_i & (\text{或 } \geq b_i, = b_i, i = 1, 2, \dots, m) \end{cases}$$

➤ 式中： $F(x)$ 为综合目标函数； $\beta_j$ 为综合目标函数的权重系数； $W_{Sj}$ 为泥沙配置变量； $n$ 泥沙配置变量个数； $b_i$ 为各约束条件的水沙约束量； $a_{ij}$ 为各约束条件的水沙系数； $m$ 为配置约束条件个数。

## 4.3 流域水沙资源多目标优化配置模型

### 4.3.2 水沙资源优化配置数学模型基本方程

#### (1) 综合目标函数

❖ 发放层次分析重要性排序专家调查表，利用层次分析数学方法，构造综合目标函数，具体步骤如下：

- 建立黄河泥沙多目标优化配置层次分析表；
- 由9标度法构造各层次的两两比较判断矩阵；
- 计算判断矩阵最大特征值对应的标准化特征向量；
- 计算各层元素对总目标的合成综合权重系数；
- 可采用MATLAB矩阵计算通用软件计算。

$$F(W_{Sj}) = \sum_{j=1}^n \beta_j W_{Sj}$$

## 4.3 流域水沙资源多目标优化配置模型

### 4.3.2 水沙资源优化配置数学模型基本方程

#### (2) 配置约束条件

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot W_{sj} \leq b_i & (\text{或 } \geq b_i, = b_i, i=1,2,\dots,m) \end{cases}$$

- 水土保持能力约束
- 水库拦沙能力约束
- 河道输水输沙能力约束
- 引水引沙能力约束 、 机淤固堤能力约束
- 维持河槽稳定约束 、 滩区淤沙能力约束
- 维持河口稳定约束
- 维持河流健康的水资源约束
- 泥沙资源总量约束

## 4.3 流域水沙资源多目标优化配置模型

### 4.3.3 水沙资源优化配置数学模型求解

#### (1) 线性规划标准形式

综合目标函数

$$\text{Max}(z) = \sum_{l=1}^n a_{0l} x_l$$

配置约束条件

$$\sum_{l=1}^n a_{il} x_l + y_i = b_i \quad i = 1, \dots, m_1$$

$$\sum_{l=1}^n a_{jl} x_l - y_j = b_j \quad j = m_1 + 1, \dots, m_1 + m_2$$

$$\sum_{l=1}^n a_{kl} x_l = b_k \quad k = m_1 + m_2 + 1, \dots, m$$

#### (2) 采用线性规划单纯形法和excel数据表格试算法求解



# 五、流域水沙资源配置技术与措施的研究

5.1 水力配置技术

5.2 机械挖泥配置技术

5.3 工程配置技术

5.4 生态配置技术

cnsphoto

## 5.1 水力配置技术

### 5.1.1 水力配置技术的机理

❖ 水力配置就是利用水流自身的能量进行泥沙配置的技术，又称为调水调沙技术。对于黄河下游河道

$$Q_s = KQ^\alpha S^\beta$$

❖ 下游河道不淤积的水沙关系

$$S = 0.0308 QP^{1.5514}$$

## 5.1 水力配置技术

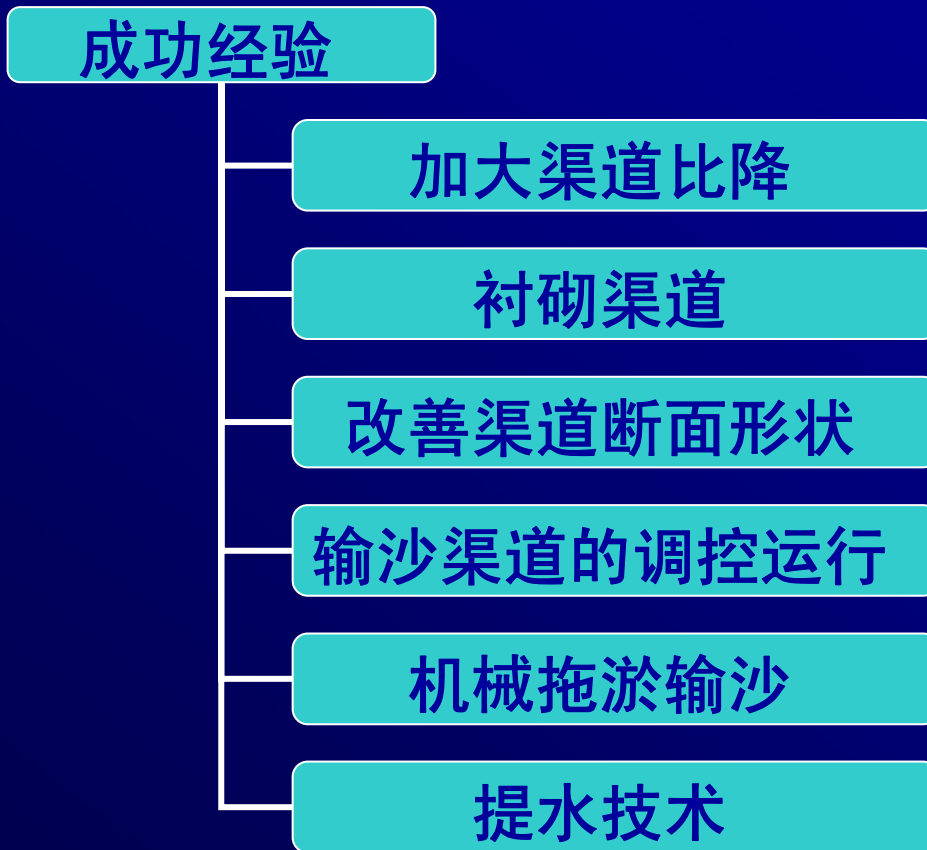
### 5.1.2 水库调水调沙技术



❖随着流域各类水利工程建设的发展，按照河道冲淤规律、水库泥沙淤积特点和流域水文预报，利用水库、水利工程枢纽等单独或梯级联合运用，对水沙进行优化调度，充分利用和控制水沙资源，使下游河道朝着有利的河床演变方向发展，水库泥沙淤积形态合理，获得可持续发展的最大经济社会效益，这就是河道调水调沙技术。截止2007年，黄河下游先后进行了六次调水调沙试验，取得了较好的效果。

## 5.1 水力配置技术

### 5.1.3 引黄灌区调水调沙技术





## 5.1 水力配置技术

### 5.1.4 水库水力清淤

**(1) 引水冲滩机理：**土体沿纵向和横向坍塌称为重力侵蚀，具有一定能量的水流把原来的土体或坍塌在沟床上的土体冲起并携带到下游称为水力冲刷，主要包括水流直接冲刷沟床和水流冲击沟床，水流冲机构床比水流冲刷沟床的效果还要明显。水力冲刷遵循河床演变的一般输沙原理。水力冲刷和重力侵蚀是共同作用，相互影响的。首先，水力冲刷的淘刷和冲刷作用，为纵断面和横断面的重力侵蚀创造了条件。重力侵蚀使土体滑塌到冲沟里，为水力侵蚀和输沙提供了可能性。

**(2) 引水冲滩的适用条件：**引水冲滩的适用条件主要包括以下几个方面：中小型水库、尤其是小型水库；要有放空水库或低水位运用的机会，使滩面暴露；要有较低的排沙低洞；要有一定的清水基流；下游最好有浑水淤灌的条件，使出库浑水和泥沙及时充分地利用。红旗水库采用引水冲滩清淤技术的实践表明，每冲 $1.0\text{m}^3$ 泥沙需水 $10.0\text{ m}^3$ ，所需费用 $0.037$ 元；在 $125$ 天内清除库内滩面淤积 $25.6 \times 10^4\text{m}^3$ ，占总淤积量的 $15\%$ ，恢复了部分库容；水库下游引浑淤灌新增耕地 $200$ 余亩，经济效益和社会效益显著

## 5.2 机械挖泥配置技术

### 5.2.1 机械挖泥疏浚

#### (1) 基本情况:

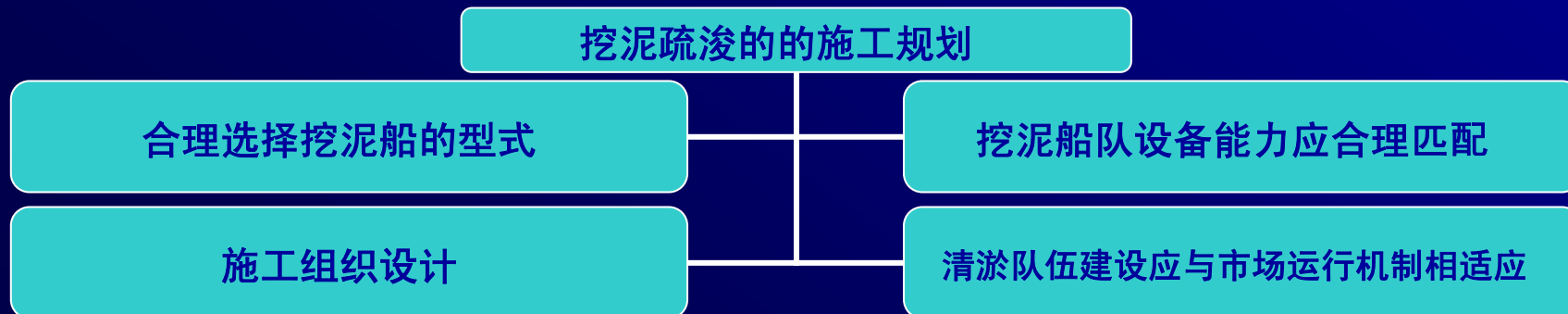
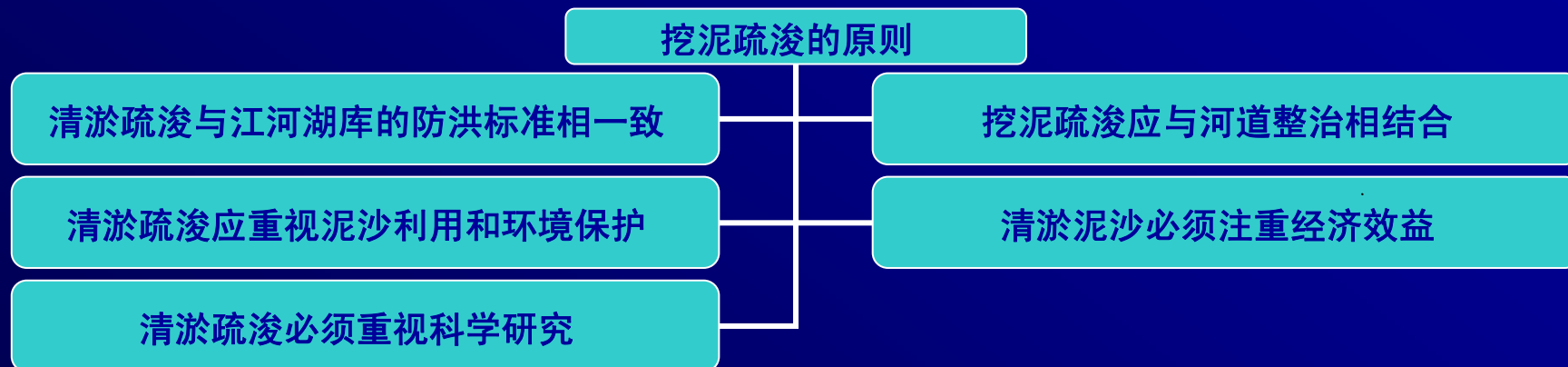
- 挖泥疏浚包括机械挖泥、机械疏浚、爆破等形式;
- 施工方式包括挖、推、拖、冲和爆等五种



## 5.2 机械挖泥配置技术

### 5.2.1 机械挖泥疏浚

#### (2) 机械挖泥疏浚的技术



## 5.2 机械挖泥配置技术

### 5.2.1 机械挖泥疏浚



#### (3) 环保挖泥疏浚措施

❖**我国实施环保疏浚工程的必要性：**污染泥沙可能会成为新的污染源，世界上多采用环保疏浚的方法清除污染底泥

❖**环保疏浚工程应达到以下四个效果：**①使悬浮状态的污染物最少。②彻底清除污染物。③使抽走的水量最小，即疏挖的污染底泥要有较高的浓度。④疏挖量最小，以免伤及原生土。

❖**环保疏浚主要设备：**第一类为利用传统的疏浚设备进行改造，即在传统挖泥船的基础上进行改造是目前环保疏浚业普遍采用的措施；第二类为专用环保疏浚设备。如日本研制了专用于污染底泥疏挖的螺旋式挖泥装置和密闭旋转斗轮挖泥船。

## 5.2 机械挖泥配置技术

### 5.2.2 淤临淤背

#### (1) 基本情况



长江、黄河与淮河流域清淤固堤工程量统计

流域	清淤固堤工程名称	清淤固堤土方量(万m <sup>3</sup> )
长江	湖北 荆江大堤等堤防加固工程	4450
	湖南 洞庭湖堤垸堤防工程等	8000
	江西 鄱阳湖堤防固堤工程	103
	安徽 长江同马大堤、无为大堤加固工程	3000
黄河	河南 黄河河南段大堤淤临淤背工程	10000
	山东 黄河山东段大堤淤临淤背工程	30000
淮河	淮北大堤、洪泽湖大堤固堤工程	935
合计		56488

## 5.2 机械挖泥配置技术

### 5.2.2 淤临淤背

#### (2) 淤临淤背的工程规划



#### 淤临淤背的工程规划

##### 淤临淤背位置的选择

临黄串沟与洼地

背河取土坑塘和洼地

低于防洪安全标准堤段

##### 取沙场选择

淤临淤背河段的规划布置

机械设备选用

选择合理的淤临淤背时期



## 5.2 机械挖泥配置技术

### 5.2.2 淤临淤背

#### (3) 淤背固堤的技术



❖ 黄河下游河道机械淤背固堤的主要生产环节：造浆、泥沙输送和泥沙沉放。

❖ 设计内容与原则：

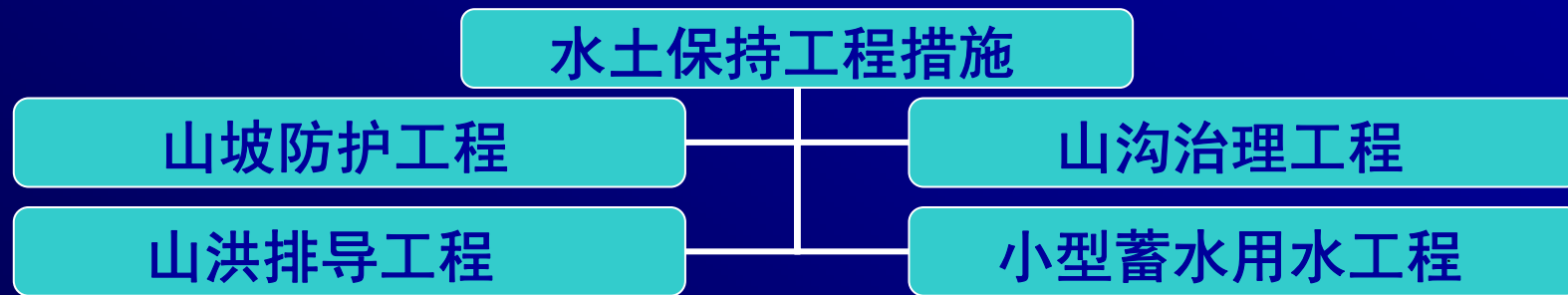
- ①对黄河历史上背河堤脚以外经常出现管涌等险情的范围应尽量进行覆盖，以避免类似险情再次发生；
- ②淤背应充分考虑现有堤防的实际情况，高度应高于背河堤坡在大洪水时的出险（渗水、滑坡、漏洞等）范围；
- ③淤背体的坡度应符合稳定要求（包括渗流、地震等）；
- ④淤背固堤应充分考虑黄河今后的冲淤变化，结合黄河泥沙的处理，符合下游远期治理目标。

❖ 淤背尺度：淤背固堤宽度统一按100m，临黄堤防的淤背高度统一确定为与设防水位相平；黄河下游堤防的背水坡为1:3。



## 5.3 工程配置技术

### 5.3.1 流域水土保持工程



❖我国先后实施了“长治”工程（水土流失面积1.56万 $\text{km}^2$ ，占土地总面积的54%，共治理水土流失面积1.31万 $\text{km}^2$ ）、黄河中游水土保持（完成治理面积1500 $\text{km}^2$ ）、永定河流域上游水土保持（山西、河北、北京三省市共治理水土流失面积11090.24 $\text{km}^2$ ，保存面积约1万 $\text{km}^2$ ，占水土流失总面积的40%以上）等。



## 5.3 工程配置技术

### 5.3.2 淤地坝技术



❖据调查统计，经过50多年的建设，黄土高原地区现有淤地坝11万余座，淤成坝地450多万亩，可拦蓄泥沙210亿 $m^3$ 。主要分布在陕西（36816座）、山西（37820座）、甘肃（6630座）、内蒙（17819座）、宁夏（4936座）、青海（3877座）、河南（4147座）等七省（区），其中陕、晋、蒙三省区共有淤地坝9万余座，占总数的82.5%。

## 5.3 工程配置技术

### 5.3.3 水库拦沙技术

- ❖ 水库的淤积形态，水库的拦沙率，水库调控，排沙与库容恢复等

### 5.3.4 引水用沙技术

- ❖ **取水防沙技术**：主要包括取水口位置选择、布置形式、工程拦沙措施（拦沙闸、导流工程、拦沙潜堰、叠梁、橡胶坝等）

- ❖ **灌区沉沙技术**

- ❖ **引黄灌区用沙技术**：主要形式包括放淤改土、洪水淤灌、建筑材料的转化、农用土与宅基土等。

- ❖ **渠首综合治理技术**：淤改、稻改、建材转化等，渠首沙化地的治理，经济林的开发和营造防护林带相结合，因地制宜，开展多种经营。



## 5.3 工程配置技术

### 5.3.5 跨流域调水工程



洲名	现有调水工程数量	年调水量(亿 m <sup>3</sup> /a)	输水干线总长度(km)	调水灌溉面积(万km <sup>2</sup> )	有调水工程的国家
亚洲	165	3413.7	17603.7	4495.9	13
欧洲	55	397.3	4433.5	362.1	10
非洲	23	201.1	8943	340.5	8
大洋洲	1	23.6	500	16	1
北美洲	93	1870	7267	323.5	3
南美洲	8	66	359	21.7	4
合计	345	5971.7	39106.2	5559.7	39

### 南水北调工程

## 5.4 生态配置技术

### 5.4.1 流域泥沙生态配置技术

❖**水土保持林**：针对各种水土流失的现状、形成及程度等土壤侵蚀状况和影响因素因地制宜、因害设防所营造的各种类型的人工林工程；

❖**防护林带体系**：根据当地的气候、土壤结构和树木特点等发展与地方相适应的水土保持林道路，防护林带体系建设因地制宜。



## 5.4 生态配置技术

### 5.4.1 流域泥沙生态配置技术



#### ❖ 山区、丘陵区水土保持林体系

❖ **营造防风固沙和农田防护林：** 防风固沙林带主要是截阻流沙或防止表土被风蚀和雨蚀；农田防护林带的主要作用是防止强风吹蚀或飞砂，降低风速，削弱风力，改变温度、湿度，调节田间小气候。

❖ **植被恢复技术：** 植被对位配置技术 + 退耕还林还草



## 5.4 生态配置技术

### 5.4.2 河道生态技术

- ❖河道生态植被的作用：采用绿色植物护坡或工程措施对堤岸进行护坡，实际上是通过改善堤防坡面表层的物质结构来提高坡面的抗蚀性，保护坡面表层土壤的稳定，减少或防止土壤损失。
- ❖河道堤岸种植防护林：复合混交防浪林带
- ❖河道堤岸草皮护坡技术：植物护坡+土工网(三维网)植被护岸坡





# 六、水沙优化配置数学模型 在黄河下游的应用

- 6.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算
- 6.2 水沙资源多目标优化配置层次分析
- 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型
- 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

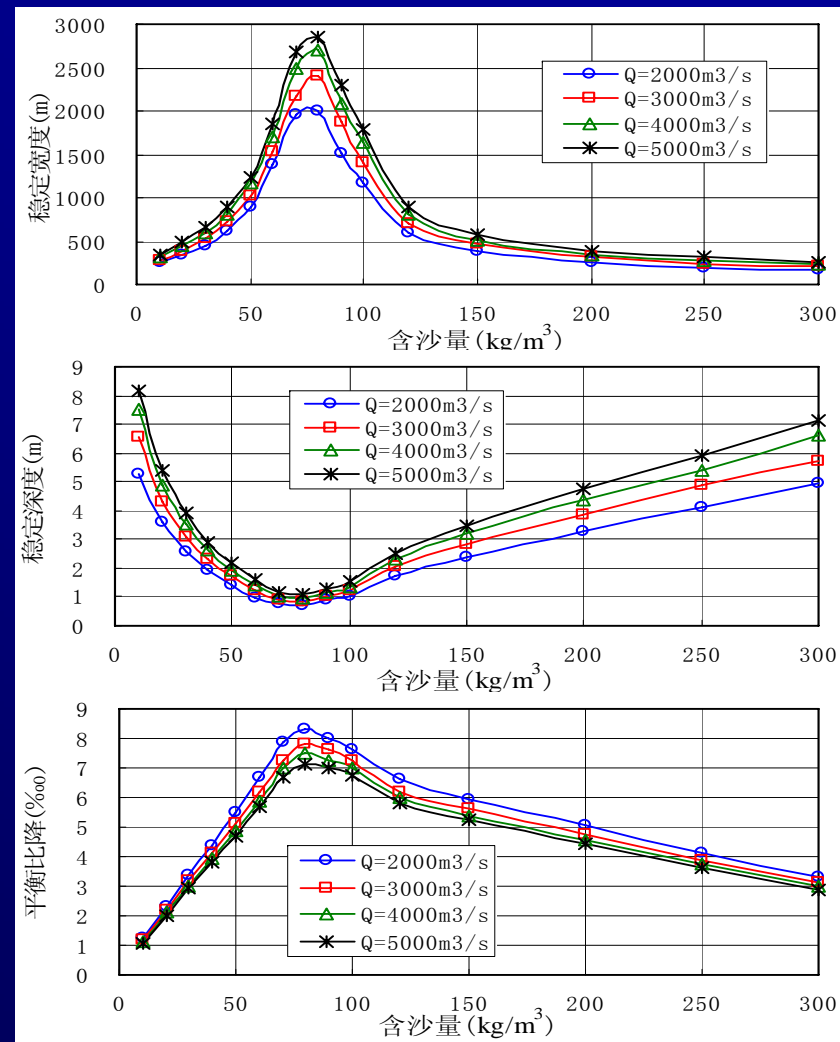
## 6.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算

- ❖ 根据黄河下游各河段的多年平均悬移质和河床质泥沙级配资料，应用河床演变均衡稳定数学模型计算了黄河下游各河段河槽的均衡稳定断面和输水输沙优化的临界指标，提出恢复和维持稳定中水河槽的措施，计算恢复稳定中水河槽的冲淤调整量，为黄河下游水沙资源多目标优化配置数学模型提供维持稳定主河槽的配置约束条件。



## 6.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算

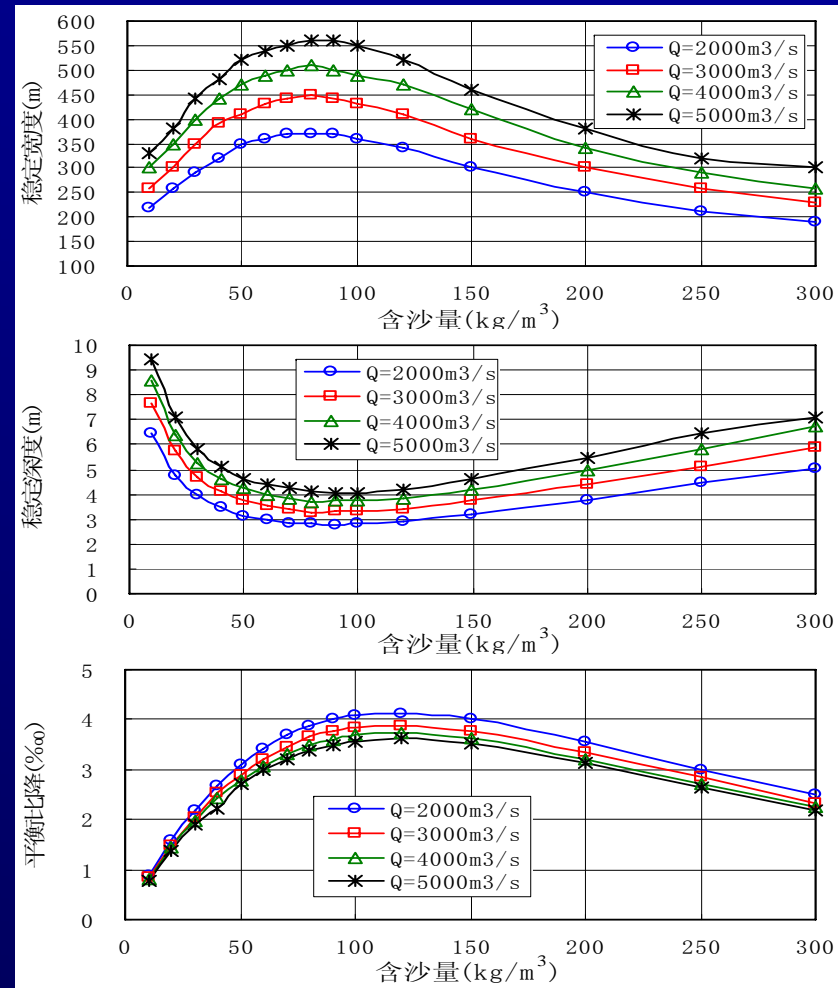
- 黄河下游游荡性河段的宽浅主要是由 $60 \sim 100 \text{kg/m}^3$ 的来水含沙量所引起，来水含沙量小于 $50 \text{kg/m}^3$ 或大于 $120 \text{kg/m}^3$ 对花园口河段维持稳定河槽是有利的，花园口河段恒定流的平衡输沙能力约 $20 \text{kg/m}^3$ 。高含沙水流平衡比降大于 $3\text{‰}$ ，黄河下游高含沙水流更应采用非恒定流输送。



小浪底至夹河滩河段均衡稳定计算成果图

## 6.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算

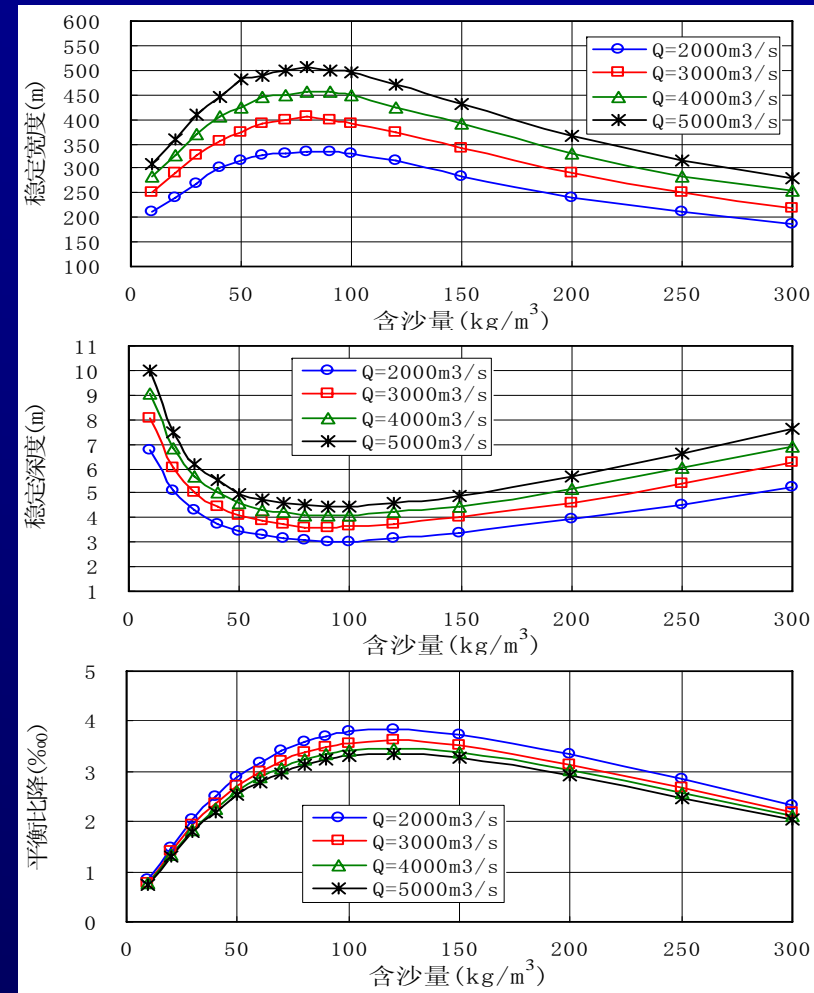
❖ 由于黄河下游河道泥沙沿程沉积分选，孙口至洛口河段的悬移质和河床质较细，各级流量维持的稳定河槽总体上较窄深，说明上段宽浅游荡河段的滞沙作用使泥沙沿程沉积分选变细，对下段窄深弯曲性河段的形成起了重要作用，通过小浪底水库拦粗排细运用，同样可以将水库下游宽浅游荡河段塑造为窄深弯曲性河段。



孙口至洛口河段均衡稳定计算成果图

## 6.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算

❖ 维持河槽的断面大小取决于造床流量，其断面形态与来水含沙量有关，对维持黄河下游河槽不利的来水含沙量范围因来沙级配而异，综合而言，来水含沙量 $60\sim 100\text{kg}/\text{m}^3$ 对维持稳定的河槽是不利的，含沙量小于 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 或大于 $120\text{kg}/\text{m}^3$ 是有利的，黄河下游恒定流的平衡输沙能力约 $15\sim 20\text{kg}/\text{m}^3$ ，非恒定流对维持河槽尤为重要。



洛口至河口河段均衡稳定计算成果图

## 6.1 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算

- ❖ 提出改善小浪底水库运用的主要措施：①强化非恒定流调水调沙，充分利用小浪底水库人造洪峰涨水迅速、洪峰频次多、洪峰流量递增的脉冲型非恒定流过程；②调控不利来水含沙量，拦蓄含沙量在 $60\sim 100\text{kg}/\text{m}^3$ 之间的中等含沙水流，通过水库滞洪拦粗排细，将出库水流含沙量调整为 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 以下较低含沙的非恒定水流下泄。
- ❖ 根据模型计算结果，按流量 $4000\text{m}^3/\text{s}$ 的输水输沙能力恢复和维持稳定中水河槽。利用泥沙资源将上段宽浅游荡河槽塑造为较窄深稳定河槽，夹河滩以上河段可容纳泥沙约3.25亿t，使泥沙沿程分选细化，有利于冲刷下段萎缩河槽，恢复夹河滩以下河槽要求冲刷泥沙约4.45亿t。

## 6.2 水沙资源多目标优化配置层次分析

层次	层次分析内容								
总目标	水沙资源优化配置								
子目标	长期维持主河槽过流能力			泥沙致灾最小		经济可行性			
控制指标	平滩流量			灾害泥沙量		经济投入			
配置方式层D	水库调节水量 $W_1$		放淤机淤水量 $W_2$		工农业引水量 $W_3$		汛期输沙水量 $W_4$		非汛期生态水量 $W_5$
	水库拦沙 $X_1$	放淤利用 $X_2$	引水引沙 $X_3$	机淤固堤 $X_4$	河槽冲淤 $X_5$	滩区淤沙 $X_6$	河口造陆 $X_7$	深海输沙 $X_8$	
配置目的 配置方案层E	拦粗沙排细沙减轻下游淤积	造地建材利用减轻水库淤积	肥田改土治碱淤堤建材利用	人工机淤固堤造相对地下河	控制河槽萎缩整治游荡河段	治理二级悬河综合治理滩区	改造湿地环境河口沉积造陆	海洋动力输沙减缓河口延伸	
小浪底水库	X11	X21							
小浪底至花园口		X22	X23	X24	X25	X26			
花园口至高村		X32	X33	X34	X35	X36			
高村至艾山		X42	X43	X44	X45	X46			
艾山至利津		X52	X53	X54	X55	X56			
利津至渔洼		X62	X63	X64	X65	X66			
河口入海							X77	X78	

## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.1 综合目标函数

❖ 综合目标函数表达式：

$$F(x) = 0.2306X_1 + 0.0709X_2 + 0.0477X_3 + 0.1059X_4 - 0.0327X_5 + 0.1572X_6 + 0.0236X_7 + 0.3313X_8$$

黄河下游水沙资源优化配置层次分析重要性排序评价专家调查表

层次	重要性排序							
子目标	维持主河槽过流能力			入黄泥沙致灾最小			经济可行性	
子目标排序	①			②			③	
配置方式	水库拦沙	放淤利用	引水引沙	机淤固堤	河槽冲淤	滩区淤沙	河口造陆	深海输沙
维持河槽过流能力排序	②	⑤	⑥	④	⑦	③	⑧	①
泥沙致灾最小排序	⑤	③	⑥	①	⑧	④	⑦	②
节省经济投入排序	③	④	②	⑤	⑦	①	⑧	⑥

## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.2 配置约束条件

#### (1) 小浪底水库拦沙能力：

❖小浪底水库拦沙库容72.5亿m<sup>3</sup>（约101.5亿t），通过多年调节平衡，尽可能延长拦沙库容的使用寿命不少于33年（拦沙初期13年+拦沙后期20年），多年平均拦沙量3.076亿t，如果按水库运用初期13年淤满主要拦沙库容61.5亿m<sup>3</sup>（约86.1亿t），年平均拦沙量6.623亿t，则有：

$$X_1 = X_{11} \leq 3.076 \sim 6.623 \text{ 亿t}$$

#### (2) 水库放淤利用能力约束：

❖目前可以不考虑小浪底水库淤沙的放淤利用，则有：

$$X_2 = X_{21} = 0 \text{ 亿t}$$

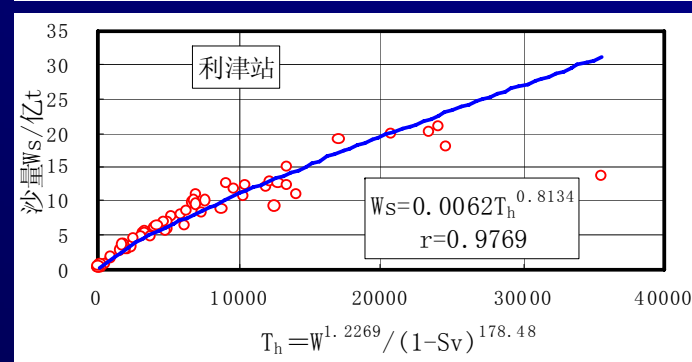
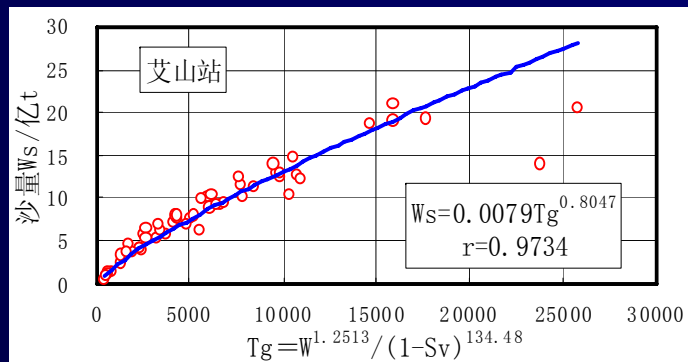
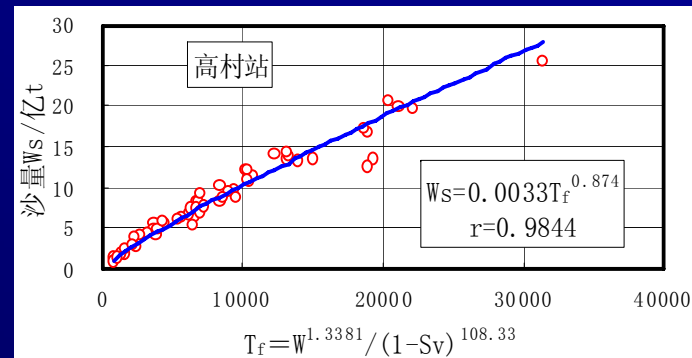
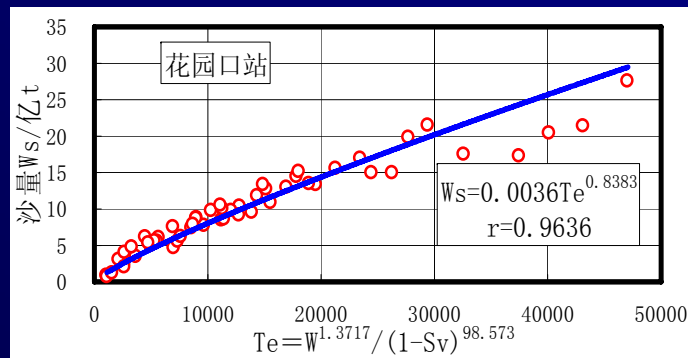


## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.2 配置约束条件

#### (3) 河道输水输沙能力约束

$$W_{Sj} = k_j \frac{W_j^\alpha}{(1 - S_{Vj-1})^\beta}$$





## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.2 配置约束条件

#### (4) 引水引沙约束条件

❖ 小浪底水库运用初期平均黄河下游低引水引沙能力约束条件:

$$X_3 = X_{23} + X_{33} + X_{43} + X_{53} + X_{63} \leq 0.659 \sim 0.796 \text{ 亿t}$$

$$314.35X_{23} + 143.64X_{33} + 181.32X_{43} + 188.31X_{53} + 188.31X_{63} \leq 120 \sim 145 \text{ 亿m}^3$$

❖ 当小浪底水库正常排沙后，引水引沙能力约束条件:

$$X_3 = X_{23} + X_{33} + X_{43} + X_{53} + X_{63} \leq 0.659 \sim 1.563 \text{ 亿t}$$

$$50.550X_{23} + 71.629X_{33} + 107.026X_{43} + 127.843X_{53} + 127.843X_{63} \leq 120 \sim 160 \text{ 亿m}^3$$

#### (5) 机淤固堤能力约束条件

❖ 按恢复80年代的机淤固堤水平，确定机淤固堤能力约束条件:

$$X_4 = X_{24} + X_{34} + X_{44} + X_{54} + X_{64} \leq 0.309 \text{ 亿t}$$

## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.2 配置约束条件

#### (6) 维持河槽要求约束:

- ❖ 黄河下游恢复稳定中水河槽的年平均冲淤调整量要求约束条件:

$$X_5 = X_{25} + X_{35} + X_{45} + X_{55} + X_{65} \geq -0.15 \text{ 亿t}$$

#### (7) 滩区淤沙能力约束:

- ❖ 治理“二级悬河”的平均滩区淤沙能力约束条件:

$$X_6 = Y_{26} + Y_{36} + Y_{46} + Y_{56} + Y_{66} \leq 1.680 \text{ 亿}$$

- ❖ “二级悬河”治理完成后，可利用综合治理后的滩地滞洪区继续滞洪纳沙20年，枯水年不考虑淤滩，平水年淤滩1.542亿t，丰水年利用高含沙水流多淤滩，可得相应的平均滩区淤沙能力约束条件:

$$X_6 = X_{26} + X_{36} + X_{46} + X_{56} + X_{66} \leq 1.542 \text{ 亿t}$$

## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.2 配置约束条件

#### (9) 维持河口稳定约束:

❖ 清水沟以外的海域有约420亿m<sup>3</sup> (570亿t) 的容沙体积, 如果规划清水沟流路长期使用年限应大于100年, 则清水沟流路口外泥沙年沉积量应小于2.85亿t, 则有:

$$X_7 = X_{77} \leq 2.85 \text{ 亿t}$$

#### (9) 输入深海的能力:

❖ 清水沟流路河口海洋动力侵蚀的深海输沙年沙量基本为常量2.19亿t:

$$X_8 = X_{78} = 2.19 \text{ 亿t}$$

## 6.3 黄河下游水沙资源优化配置模型

### 6.3.2 配置约束条件

#### (10) 水沙资源总量约束:

- ❖ 放淤利用、引水引沙、机淤固堤耗水量和汛期输沙入海水量及非汛期河口生态水量加水库调节水量之和等于进入黄河下游的水资源总量。可以得到枯、平、丰水年维持河流健康的水资源总量约束方程:

$$2X_2+184.535X_3+2X_4+125.313(X_7+X_8-0.00798W_5)+W_5=G_W+W_1$$

$$2X_2+99.890X_3+2X_4+36.012(X_7+X_8-0.00798W_5)+W_5=G_W$$

$$2X_2+99.890X_3+2X_4+26.596(X_7+X_8-0.00798W_5)+W_5=G_W-W_1$$

- ❖ 从泥沙资源总量配置角度,可以得到泥沙资源总量约束方程:

$$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6+X_7+X_8=G_S$$

## 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

### 6.4.1 以恢复中水河槽为重点的模式

- ❖ 通过中上游水库拦蓄丰水年富余水量向枯水年补水，合理分配下游工农业生活引水量、汛期输沙水量和非汛期河口生态水量，保证下游不断流；
- ❖ 小浪底水库合理拦沙，以拦粗排细运用为主，尽可能延长拦沙库容的寿命；强化小浪底水库调水调沙运用，结合河道整治和疏浚，整治游荡性河段，恢复和维持下游稳定的中水河槽，改善河道输水输沙能力；
- ❖ 改善灌区引水引沙的综合利用，结合引水沉沙和机淤固堤建设标准化大堤；结合滩区综合治理，尽可能在平、丰水年有计划地淤滩刷槽，治理“二级悬河”；利用泥沙资源合理造陆，充分利用海洋动力输沙深海，维持河口稳定。

## 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

### 6.4.2 计算水沙条件

❖ 为了便于将水沙资源优化配置模型计算结果和历史实测水沙资源分布对比，计算水沙条件为：

- 未来枯水年代表水沙量可以采用2000～2002年小黑武三站实测年平均水量178.88亿 $m^3$ ，年平均沙量3.556亿t（包括小浪底水库年平均淤积3.201亿t）；
- 未来平水年代表水沙量可以采用1986～1999年小黑武三站实测年平均水量273.60亿 $m^3$ ，年平均沙量8.168亿t；
- 未来丰水年代表水沙量可以采用1960～1985年小黑武三站实测年平均水量448.66亿 $m^3$ ，年平均沙量12.163亿t。

## 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

### 6.4.3 模型计算成果

❖对于枯水年，2000~2002年实测年平均水沙资源分配主要是工农业引水量119.88亿 $m^3$ ，汛期输沙水量（19.92亿 $m^3$ ）和非汛期生态水量（25.75亿 $m^3$ ）不足，小浪底水库拦沙3.201亿t，主要下泄清水冲刷下游河槽（冲刷0.723亿t），主要冲刷高村以上河段，滩区基本不淤，河口退蚀（侵蚀1.925亿t）。枯水年水沙资源优化配置方案主要是通过上中游水库联合调控向下游补水约25亿 $m^3$ ，保障下游工农业引水量约120亿 $m^3$ ，基本保证汛期输沙水量43.26亿 $m^3$ 和非汛期生态水量40亿 $m^3$ ，汛期强化小浪底水库调水调沙，适当加大水库排沙比，改善下游河槽冲淤分布，河口退蚀略有减缓（侵蚀1.526亿t）。

表 10-8 计算方案与历史实测水沙分布比较表（枯水年）

配置方式	配置变量	单位	枯水年 ( $G_w=178.88$ 亿 $m^3$ , $G_s=3.556$ 亿 t)	
			2000~02年	优化配置
水库调节水量	$W_1$	亿 $m^3$	0.00	-25.00
放淤机淤水量	$W_2$	亿 $m^3$	0.34	0.62
工农业引水量	$W_3$	亿 $m^3$	119.88	120.00
汛期输沙水量	$W_4$	亿 $m^3$	19.92	43.26
非汛期生态水量	$W_5$	亿 $m^3$	25.75	40.00
水库拦沙	$X_1$	亿 t	3.201	2.074
放淤利用	$X_2$	亿 t	0.000	0.000
引水引沙	$X_3$	亿 t	0.650	0.659
机淤固堤	$X_4$	亿 t	0.168	0.309
维持河槽	$X_5$	亿 t	-0.728	-0.150
滩区淤沙	$X_6$	亿 t	0.000	0.000
河口造陆	$X_7$	亿 t	-1.925	-1.526
深海输沙	$X_8$	亿 t	2.190	2.190
综合目标函数			0.401	0.759



## 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

### 6.4.3 模型计算成果

❖对于平水年，1986~1999年实测年平均水沙资源分配主要是工农业引水量111.51亿 $m^3$ 、汛期水量92.50亿 $m^3$ 和非汛期水量58.06亿 $m^3$ ，由于引水含沙量较大，下游引水引沙1.116亿t，河槽淤积2.5亿t，河槽严重萎缩，滩区仅淤积0.395亿t，“二级悬河”迅速发展。平水年水沙资源优化配置方案主要满足下游工农业需求引水量145亿 $m^3$ ，保障汛期输沙水量（77.98亿 $m^3$ ）和非汛期生态水量（50亿 $m^3$ ），小浪底水库合理拦沙约3.8亿t，下游按目前低引水含沙量引沙约0.8亿t，汛期强化小浪底水库调水调沙运用，恢复下游稳定中水河槽，争取实现利用泥沙资源将上段游荡河槽塑造为较窄深稳定的河槽容纳泥沙约0.406亿t，夹河滩以下萎缩河槽冲刷泥沙约0.556亿t，河槽冲淤合计冲刷泥沙量0.15亿t，汛期有计划淤滩0.84亿t，控制“二级悬河”发展，河口稳定略有延伸（淤积0.374亿t）。

表 10-8 计算方案与历史实测水沙分布比较表（平水年）

配置方式	配置变量	单位	平水年( $G_w=273.60$ 亿 $m^3$ , $G_s=8.168$ 亿 t)	
			1986~99年	优化配置
水库调节水量	$W_1$	亿 $m^3$	0.00	0.00
放淤机淤水量	$W_2$	亿 $m^3$	0.34	0.62
工农业引水量	$W_3$	亿 $m^3$	111.51	145.00
汛期输沙水量	$W_4$	亿 $m^3$	92.50	77.98
非汛期生态水量	$W_5$	亿 $m^3$	58.06	50.00
水库拦沙	$X_1$	亿 t	0.000	3.808
放淤利用	$X_2$	亿 t	0.000	0.000
引水引沙	$X_3$	亿 t	1.116	0.796
机淤固堤	$X_4$	亿 t	0.168	0.309
维持河槽	$X_5$	亿 t	2.500	-0.150
滩区淤沙	$X_6$	亿 t	0.395	0.840
河口造陆	$X_7$	亿 t	1.876	0.374
深海输沙	$X_8$	亿 t	2.190	2.190
综合目标函数			0.819	1.108



## 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

### 6.4.3 模型计算成果

❖对于丰水年，1960~1985年实测年平均水沙资源分配主要是工农业引水量约65亿 $m^3$ ，汛期输沙水量（约240亿 $m^3$ ）和非汛期生态水量（约155亿 $m^3$ ）富余，下游洪水灾害严重，由于引水含沙量大，下游引水引沙1.064亿t，河槽淤积0.661亿t，滩区淤积0.733亿t，滩槽基本平行抬升，河口淤积延伸严重（淤积7.69亿t）。丰水年水沙资源优化配置方案主要汛期上中游水库联合拦蓄富余水量121.74亿 $m^3$ ，控制下游洪水灾害，满足下游工农业需求引水量145亿 $m^3$ 、汛期输沙水量121.3亿 $m^3$ 和非汛期生态水量60亿 $m^3$ ，合理利用水资源，小浪底水库合理拦沙约4.488亿t，下游按目前低引水含沙量引沙约0.8亿t，汛期强化小浪底水库调水调沙运用，恢复下游稳定中水河槽，河槽冲淤合计冲刷泥沙量0.15亿t，汛期充分利用高含沙水流有计划淤滩1.68亿t，治理“二级悬河”，控制河口延伸（淤积2.85亿t）。

计算方案与历史实测水沙分布比较表（丰水年）

配置方式	配置变量	单位	丰水年 ( $G_w=448.66$ 亿 $m^3$ , $G_s=12.163$ 亿 t)	
			1960~85年	优化配置
水库调节水量	$W_1$	亿 $m^3$	0.00	121.74
放淤机淤水量	$W_2$	亿 $m^3$	0.32	0.62
工农业引水量	$W_3$	亿 $m^3$	64.98	145.00
汛期输沙水量	$W_4$	亿 $m^3$	240.39	121.30
非汛期生态水量	$W_5$	亿 $m^3$	155.05	60.00
水库拦沙	$X_1$	亿 t	0.000	4.488
放淤利用	$X_2$	亿 t	0.000	0.000
引水引沙	$X_3$	亿 t	1.064	0.796
机淤固堤	$X_4$	亿 t	0.162	0.309
维持河槽	$X_5$	亿 t	0.661	-0.150
滩区淤沙	$X_6$	亿 t	0.733	1.680
河口造陆	$X_7$	亿 t	7.690	2.850
深海输沙	$X_8$	亿 t	2.190	2.190
综合目标函数			0.901	1.387

## 6.4 黄河下游水沙资源优化配置方案计算

### 6.4.4 配置效果评价

❖与实测资料比较，水沙资源优化配置方案的综合目标函数明显增大，黄河下游泥沙资源分布明显改善，配置方案是基本合理的。以下按平水年水沙资源优化配置方案估算下游泥沙资源分布的平均累计情况，分析水沙资源优化配置的综合效果。

- 小浪底水库总拦沙库容可拦沙101.5亿t，目前已拦沙约20亿t，还有拦沙约81.5亿t的拦沙库容，8年合计拦沙约30.5亿t，还有拦沙约51亿t的拦沙库容；
- 考虑利用引水引沙的50%约0.4亿t渠首泥沙加固黄河大堤，加上机淤固堤0.309亿t，共计0.7亿t，8年合计加固黄河大堤约5.6亿t；维持稳定河槽冲淤合计冲刷1.2亿t，其中夹河滩以上宽浅游荡河槽塑造为较窄深稳定河槽容纳泥沙约3.25亿t，恢复夹河滩以下萎缩河槽冲刷泥沙约4.45亿t，中水河槽基本恢复；
- 滩区合计淤沙约6.7亿t，“二级悬河”有所改善；入海沙量合计20.5亿t，其中河口造陆用沙3亿t，海洋动力深海输沙17.5亿t，保持河口基本稳定。

# 七、总结



采用现场调研、实测资料分析、系统分析理论、数学模型、模糊数学等多种手段和理论，系统研究了流域水沙优化配置与泥沙资源化的理论、水沙资源调控技术、水沙优化配置对黄河下游河道冲淤及泥沙资源化的影响等。主要成果如下：

❖ **(1) 分析了流域泥沙的输移特性与灾害性。**通过总结流域产沙特点、产沙过程及其影响因素，分析了流域泥沙输移过程及输沙量，指出流域泥沙在产生、输移、分配过程中，流域泥沙伴随着灾害性与资源性，泥沙灾害性和资源性是流域泥沙的重要属性，两者在一定条件下可以相互转化，同时论述了流域泥沙灾害及其特点。

# 七、总结



❖ (2) 提出了流域泥沙资源化的原理及实现途径。以自然资源的概念和属性为基础，通过对流域泥沙基本属性与主要特征的研究，指出流域泥沙具有自然资源的有效性、可控性和稀缺性等属性，表明流域泥沙具有资源性，当流域泥沙在满足一定技术和社会条件下，是可以资源化的；提出了流域泥沙资源化的目标与途径。

❖ (3) 建立了流域水沙资源优化配置的理论体系。探讨了流域泥沙资源系统与社会经济、生态环境和水资源系统的相互关系，提出了泥沙资源配置原则、任务、原理、机制和泥沙承载能力（或称区域承沙能力）的概念，给出了流域泥沙资源优化配置的基本方程组；建立了河床演变均衡稳原理——河流熵，以及以改善河道输水输沙能力和维持河道稳定为基础的流域水沙资源联合多目标优化配置理论。



# 七、总结



- ❖ (4) 提出了流域水沙资源配置的调控技术。在分析流域产流产沙特点、水土流失治理、河道输水输沙规律与河道防洪整治的基础上，系统分析了流域水沙配置的调控技术，包括水力调水调沙技术、工程措施、生物技术与机械措施。
- ❖ (5) 建立了流域水沙资源优化配置数学模型。以流域水沙资源优化配置理论为基础，通过层次数学分析和专家调查统计两种方法构造综合目标函数，确定配置约束条件，初步建立了流域水沙资源优化配置数学模型，包括河床演变均衡稳定模型和水沙资源多目标优化配置模型两个子模型。
- ❖ (6) 提出了黄河下游水沙资源优化配置模式。建立了黄河下游水沙资源多目标优化配置线性规划数学模型，计算了黄河下游水沙资源优化配置的初步方案，并对配置效果进行了评价。

# 谢谢!

[www.chinaphotocenter.com](http://www.chinaphotocenter.com)