

黄河干流泥沙优化配置综合评价方法

陈绪坚, 胡春宏, 陈建国

(中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 北京 100048)

摘要: 按照泥沙优化配置评价指标应满足的科学性、系统性、层次性、代表性、定量性和可比性等筛选原则, 初步构建了黄河泥沙配置评价指标体系框架, 针对黄河泥沙空间优化配置的技术子目标和经济子目标, 筛选了河道平滩流量、“二级悬河”高差、入海排沙比、水库拦沙投入、人工(机械)放淤投入和排沙入海投入等 6 个主要评价指标, 提出了各个评价指标和综合评价函数的计算方法, 并提出了黄河泥沙配置方案的综合评价方法。通过对 12 个黄河泥沙空间优化配置方案进行综合评价, 建议了较优的配置方案。方案中各种配置方式平均配置沙量比例分别为: 水库拦沙量 41.0%、河口造陆沙量 18.0%、深海输沙量 17.8%、引水引沙量 10.4%、人工(机械)放淤沙量 6.9%、主河槽冲淤沙量 3.8%、洪水淤滩沙量 2.1%。

关键词: 黄河泥沙; 优化配置; 评价指标; 评价方法; 配置方案

中图分类号: S157.2 TV212.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)05-0585-08

由于水资源和水能资源的快速开发利用, 以及自然气候条件的变化, 黄河泥沙的空间分布发生了重大变化, 产生了一系列的新问题, 主要包括: 河道输沙能力降低, 主河槽淤积萎缩, “二级悬河”加剧, 排沙入海比例日益减少等, 形成小水大灾、泥沙灾害凸现的局面^[1]。黄河诸多问题的症结在于泥沙, 给泥沙出路是解决黄河泥沙问题的基本思路, 如何利用黄河“拦、排、放、调、挖”的治理措施, 调节和改善水沙关系, 合理配置黄河泥沙的空间分布, 是黄河治理需要考虑的重要问题之一。因此, 开展黄河干流泥沙空间优化配置研究, 并通过数学模型计算了各种优化配置方案, 为了对这些优化配置方案的配置效果进行评价, 需要建立泥沙配置的综合评价方法。以往这方面的研究主要侧重于局部河段或某一措施的治理效果分析^[2-3], 虽然目前国内外对水资源配置的综合评价方法较多^[4-7], 但缺少泥沙配置的综合评价方法, 由于水资源配置和泥沙配置的目标不同, 水资源配置的评价方法不能应用于泥沙配置的综合评价。本文根据影响因素的主次程度不同, 抓住主要因素, 建立黄河泥沙配置的评价指标体系框架, 提出黄河泥沙配置方案的综合评价方法, 通过对未来可能的黄河泥沙配置方案进行评价, 初步提出建议的优化配置方案, 试图为构建黄河水沙调控体系的工程布局提供决策支持。

1 评价指标体系框架

针对黄河泥沙分布存在的问题, 可以提出各种治理措施和泥沙配置方案, 构建科学的评价指标体系是对泥沙配置方案进行评价的基础。建立的黄河泥沙配置方案评价指标体系框架如图 1 所示。

黄河泥沙配置评价指标的筛选应该遵循科学性、系统性、层次性、代表性、定量性和可比性等筛选原则, 要求评价指标可以对黄河泥沙配置状况进行客观描述。反映黄河泥沙配置效果的指标有很多, 为了突出重点, 应先抓主要矛盾, 重点选择具有代表性的关键指标, 要求评价指标能反映泥沙配置方案解决黄河泥沙空间分布存在的主要问题, 本文从技术和经济两方面初步筛选了 6 个主要评价指标, 其它指标仍需今后进一步研究。

收稿日期: 2009-11-03

基金项目: 国家自然科学基金创新群体资助项目 (50721006); 国家杰出青年基金资助项目 (50725930); 公益性行业科研专项经费资助项目 (2007SHZ1-3)

作者简介: 陈绪坚 (1967-), 男, 湖北通山人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事泥沙运动力学、河床演变和数学模型研究。E-mail: chenxj@whr.com

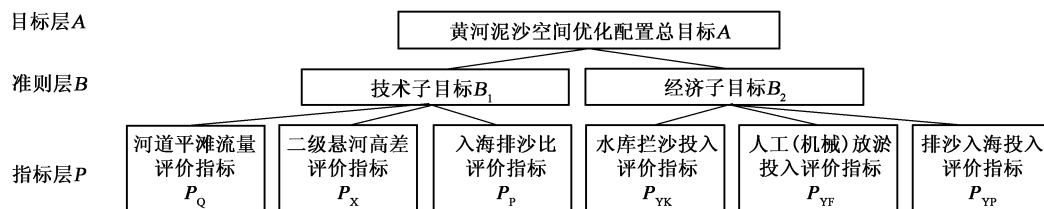


图 1 黄河泥沙配置方案评价指标体系框架

Fig 1 Evaluation parameter system for sediment allocation in the Yellow River

1.1 技术评价指标

技术子目标筛选了河道平滩流量、二级悬河高差和入海排沙比等 3 个主要评价指标。

(1) 河道平滩流量评价指标 黄河河道主河槽淤积泥沙量比例偏大、淤积萎缩、过流能力下降是黄河泥沙空间不合理分布导致的严重后果之一，河道平滩流量是某一断面或河段的水位与滩唇平齐时的流量，是反映河道主河槽过流能力的重要指标，因此，河道平滩流量可以作为主河槽排洪过流能力的主要评价指标。河道平滩流量评价指标采用相对平滩流量满足率，相对平滩流量满足率是在一定时段内某一河段单元的河道平滩流量与长期维持主河槽过流能力的河道平滩流量标准的百分比。河道平滩流量评价指标越大，配置方案维持河道主河槽的效果越好，河道平滩流量评价指标计算公式为

$$P_Q = \frac{Q_i}{Q_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中 P_Q 为河道平滩流量评价指标，%； Q_i 为在一定时段内某一河段单元的河道平滩流量， m^3/s ； Q_p 为长期维持主河槽过流能力的河道平滩流量标准， m^3/s 。黄河下游长期维持主河槽过流能力的河道平滩流量标准可采用约 $4000 m^3/s^{[9]}$ 。

(2) “二级悬河”高差评价指标 黄河滩区淤积泥沙量比例偏小，“二级悬河”加剧，导致“小水大灾”，“二级悬河”高差可以作为入黄泥沙致灾最小（或黄河出险几率最小）的主要评价指标。“二级悬河”高差评价指标采用相对“二级悬河”治理率。“二级悬河”治理主要通过滩区人工放淤措施淤积抬高滩区和堤河，逐渐消除“二级悬河”^[10]。相对“二级悬河”治理率是在一定时段内某一河段单元的滩区人工放淤泥沙淤积厚度与该河段现状“二级悬河”平均高差的百分比。“二级悬河”高差评价指标越大，配置方案治理“二级悬河”的效果越好。“二级悬河”高差评价指标计算公式为

$$P_X = \frac{H_{Fi}}{H_{Xi}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 P_X 为“二级悬河”高差评价指标，%； H_{Fi} 为在一定时段内某一河段单元的滩区人工放淤泥沙淤积厚度，m； H_{Xi} 为该河段现状“二级悬河”平均高差，m。

(3) 入海排沙比评价指标 黄河入海排沙比越大，反映河道输沙入海能力越强，入海排沙比可以作为河道输沙能力的主要评价指标。入海排沙比评价指标采用相对入海排沙比，相对入海排沙比是在一定时段内的入海排沙比与长期的入海排沙比标准的百分比。入海排沙比评价指标越大，配置方案排沙入海的效果越好，入海排沙比评价指标计算公式为

$$P_P = \frac{B_P}{B_{Pcp}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 P_P 为入海排沙比评价指标，%； B_P 为在一定时段内的入海排沙比； B_{Pcp} 为长期的入海排沙比标准，考虑水库拦沙和工农业引水等影响，可采用 1950~2005 年多年平均黄河入海沙量约占进入黄河干流沙量的 55% 作为长期入海排沙比标准^[1]。

1.2 经济评价指标

经济子目标筛选了水库拦沙投入、人工(机械)放淤投入和排沙入海投入等 3 个主要评价指标。

(1) 水库拦沙投入评价指标 水库拦沙投入评价指标采用相对水库拦沙经济投入, 其计算过程是先计算配置方案的水库拦沙经济投入比, 水库拦沙经济投入比是某一配置方案的水库拦沙经济投入量与该配置方案经济投入总量的比值; 再计算水库拦沙量比, 水库拦沙量比是该配置方案水库拦沙量与进入黄河干流沙量的比值; 最后计算该配置方案的水库拦沙量比与水库拦沙经济投入比的百分比。水库拦沙投入评价指标越大, 配置方案的水库拦沙经济投入效果越好, 水库拦沙投入评价指标计算公式为

$$P_{YK} = \frac{B_{SK}}{B_{YK}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 P_{YK} 为水库拦沙投入评价指标, %; B_{SK} 为水库拦沙量比; B_{YK} 为水库拦沙经济投入比。

(2) 人工(机械)放淤投入评价指标 人工(机械)放淤投入评价指标采用相对人工(机械)放淤经济投入, 其计算过程是先计算配置方案的人工(机械)放淤经济投入比, 人工(机械)放淤经济投入比是某一配置方案的人工(机械)放淤经济投入量与该配置方案经济投入总量的比值; 再计算人工(机械)放淤沙量比, 人工(机械)放淤沙量比是该配置方案人工(机械)放淤沙量与进入黄河干流沙量的比值; 最后计算该配置方案的人工(机械)放淤沙量比与人工(机械)放淤经济投入比的百分比。人工(机械)放淤投入评价指标越大, 配置方案的人工(机械)放淤经济投入效果越好, 人工(机械)放淤投入评价指标计算公式为

$$P_{YF} = \frac{B_{SF}}{B_{YF}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 P_{YF} 为人工(机械)放淤投入评价指标, %; B_{SF} 为人工(机械)放淤沙量比; B_{YF} 为人工(机械)放淤经济投入比。

(3) 排沙入海投入评价指标 排沙入海投入评价指标采用相对排沙入海经济投入, 其计算过程是先计算配置方案的排沙入海经济投入比, 排沙入海经济投入比是某一配置方案的排沙入海经济投入量与该配置方案经济投入总量的比值; 再计算排沙入海沙量比, 排沙入海沙量比是该配置方案排沙入海沙量与进入黄河干流沙量的比值; 最后计算该配置方案的排沙入海沙量比与排沙入海经济投入比的百分比。排沙入海投入评价指标越大, 配置方案的排沙入海经济投入效果越好, 排沙入海投入评价指标计算公式为

$$P_{YP} = \frac{B_{SP}}{B_{YP}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 P_{YP} 为排沙入海投入评价指标, %; B_{SP} 为排沙入海沙量比; B_{YP} 为排沙入海经济投入比。

2 综合评价函数

一个完整的泥沙配置评价指标体系, 不仅包括合理的评价指标, 还要确定各个评价指标的重要程度——权重, 构造综合评价函数 (P_A), 可采用定性分析与定量计算相结合的层次分析法来确定各个评价指标的权重^[11]。通过黄河泥沙优化配置方案评价的层次分析, 建立并发放黄河泥沙配置方案评价重要性排序专家调查表, 对黄河泥沙配置的评价准则和评价指标的重要性排序进行专家调查统计。统计学认为, 对于统计样本大于 30 的大样本, 采用大数定律和中心极限定理估计参数的精度和信度较高, 本次调查对象都是对黄河治理较熟悉的 32 位专家, 其中教授级专家 25 人, 高级工程师 7 人。采用层次分析数学方法, 通过各配置层次判断矩阵计算, 最终计算各评价指标对黄河泥沙配置总目标评价的权重系数, 构造综合评价函数。

2.1 泥沙配置方案评价层次重要性排序专家调查

对于黄河泥沙空间优化配置的总目标, 专家调查的排序综合意见认为, 技术子目标(长期维持主河槽过流能力、入黄泥沙致灾最小)比经济子目标(经济可行)更为重要。对于黄河目前的来水来沙条件和治理现状, 黄河泥沙空间优化配置首要目标是长期维持主河槽过流能力、入黄泥沙致灾最小的技术子目标, 在此基础上尽可能达到配置经济可行的经济子目标。

对于技术子目标, 专家调查的排序综合意见认为, 河道平滩流量评价指标最重要, 长期维持主河槽过流

能力、入黄泥沙致灾最小最重要的评价指标是河道平滩流量,体现河道排洪能力;其次为入海排沙比评价指标,体现河道输沙入海能力;“二级悬河”高差评价指标第三重要,只要维持较大的河道平滩流量和入海排沙比,就可以缓解“二级悬河”的危害。

对于经济子目标,专家调查的排序综合意见认为,水库拦沙投入评价指标最重要,水库是黄河防洪拦沙和调控水沙过程的最重要措施,水库拦沙投入是反映黄河泥沙配置的主要经济投入;其次为排沙入海投入评价指标,排沙入海可以有效减轻黄河的泥沙灾害,排沙入海的经济投入较低,排沙入海投入评价指标第二重要;人工(机械)放淤投入评价指标第三重要,人工(机械)放淤的经济投入较高,机淤固堤投入是目前黄河综合治理的重要投入,滩区人工放淤投入是治理“二级悬河”的重要投入,但“二级悬河”难以完全消除。

2.2 构造各评价层次的两两比较判断矩阵

结合专家调查统计结果,对同一层次的各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,由 9 标度法构造两两比较判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 建议用 1~9 及其倒数做为标度来确定 a_{ij} 的值^[11], 1~9 比例标度的含义为配置措施或变量 X_i 比 X_j 重要的程度,如表 1 所示。

表 1 黄河泥沙配置评价指标的层次分析重要性程度 9 标度法取值

Table 1 Analytical hierarchy consequence value of evaluation parameters for sediment allocation in Yellow River

X_i/X_j	同等重要	稍重要	重要	很重要	极重要				
a_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9

2.3 根据判断矩阵最大特征值对应的特征向量确定排序权重系数向量

设构造两两比较评价矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 计算排序权重系数向量过程^[11]:

(1) 计算矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 及相应的归一化(标准化)特征向量 W , 可采用 MATLAB 矩阵计算通用软件计算;

(2) 计算判断矩阵一致性指标 CI 以及相应的平均随机一致性指标 RI ;

(3) 计算一致性比率 CR ;

(4) 判断矩阵一致性, 当 $\lambda_{\max} = n$, $CR = 0$ 判断矩阵 A 为完全一致性矩阵, 一致性可接受; 当 $CR < 0.1$ 认为判断矩阵 A 的一致性可接受; 否则, 若 $CR \geq 0.1$ 应考虑修正判断矩阵 A 。

2.4 计算各层元素对总目标评价的合成权重

采用上述层次分析数学方法, 通过各评价层次判断矩阵计算, 最终计算各评价指标对总目标评价的权重系数, 构造黄河泥沙空间优化配置方案的综合评价函数式为

$$P_A = 0.3598P_Q + 0.1089P_X + 0.1980P_P + 0.1798P_{YK} + 0.0545P_{YF} + 0.0990P_{YP} \quad (7)$$

3 综合评价方法

确定了黄河泥沙空间优化配置的综合评价函数后, 尚需黄河泥沙优化配置综合评价方法。由于黄河泥沙空间配置效果评价是一个动态的相对概念, 其综合评价等级指标本身具有模糊特性, 采用模糊数学的模糊评价法具有明显的优势^[12], 配合多指标的评价指标体系进行评价, 可以对黄河泥沙空间优化配置效果得出一个比较全面的评价结论。因此, 对黄河泥沙空间优化配置效果进行评价时, 用模糊评价法对评价指标进行定量化处理, 通过计算配置方案的综合评价函数值, 评价黄河泥沙空间优化配置方案的综合评价等级。

根据模糊评价法, 可将评价指标分为 5 级: 评价指标值小于 60% 为不合理, 评价指标值在 60% ~ 75% 之间为较不合理, 评价指标值在 75% ~ 90% 之间为中等, 评价指标值在 90% ~ 100% 之间为较合理, 评价指标值大于或等于 100% 为合理。综合评价方法是先比较综合评价函数值大小, 如果综合评价函数值相同, 则依照评价指标权重系数从大到小的次序, 依次比较河道平滩流量、入海排沙比等评价指标大小。

4 配置方案评价

4.1 基本配置方案

在充分利用河道输沙能力的条件下, 分析未来不同时期黄河泥沙配置的不同侧重点, 提出了黄河泥沙的 4 个配置模式及其相应的基本方案。

(1) 基本方案 1 是以小浪底水库调控和河道输沙为重点的配置模式, 具体要求为: ① 结合小浪底水库调控运用和河道综合治理, 塑造与维持下游稳定的中水河槽; ② 通过小浪底水库调控运用, 充分利用河道输水输沙能力, 有计划地进行河口造陆, 维持黄河口流路稳定; ③ 结合引水利用泥沙, 通过机淤固堤等建设标准化堤防; ④ 方案配置时间为 2008~2050 年。

(2) 基本方案 2 是以小浪底水库调控和下游滩区(人工)放淤为重点的配置模式, 基本方案 2 与基本方案 1 主要差别是增加了下游滩区(人工)放淤, 方案配置时间为 2008~2050 年。

(3) 基本方案 3 是以古贤水库调控和下游滩区(人工)放淤为重点的配置模式, 基本方案 3 与基本方案 2 主要差别是 2020 年增加了古贤水库运用, 方案配置时间为 2008~2050 年, 其中 2008~2020 年期间以小浪底水库调控和下游滩区(人工)放淤为主; 2020~2050 年期间以古贤水库调控和下游滩区(人工)放淤为主, 并考虑古贤水库与小浪底水库的联合运用。

(4) 基本方案 4 是以古贤水库调控和小北干流与下游滩区(人工)放淤为重点的配置模式, 基本方案 4 与基本方案 3 的主要差别是 2030 年增加了小北干流滩区(人工)放淤, 方案配置时间为 2008~2050 年, 其中 2008~2020 年期间以小浪底水库调控和下游滩区(人工)放淤为主; 2020~2030 年期间以古贤水库调控和下游滩区(人工)放淤为主; 2030~2050 年期间以古贤水库调控和小北干流与下游滩区(人工)放淤为主, 并考虑古贤水库与小浪底水库的联合运用。

4.2 水沙系列

来水来沙条件考虑了水利水保减沙 4 亿 t、6 亿 t、8 亿 t 3 种情况(相当于规划的现状、2020、2050 年水平), 相应的入黄泥沙分别为 12 亿 t、10 亿 t、8 亿 t 左右。采用的来水来沙条件包括丰、平、枯 3 种水沙系列, 即水沙系列 1、水沙系列 2 和水沙系列 3。水沙系列长度为 2008 年 7 月~2050 年 6 月共 42 年, 3 种水沙系列进入黄河干流的年平均水量分别为 436.99 亿 m^3/a 、422.39 亿 m^3/a 和 407.82 亿 m^3/a , 年平均沙量分别为 13.45 亿 t/a、11.32 亿 t/a 和 9.74 亿 t/a。相应黄河 4 站(龙门、华县、河津、状头)的年平均水量分别为 302.00 亿 m^3/a 、287.40 亿 m^3/a 和 272.83 亿 m^3/a , 年平均沙量分别为 12.24 亿 t/a、10.10 亿 t/a 和 8.53 亿 t/a。

4.3 方案评价结果

针对上述 4 个基本配置方案和 3 种水沙系列, 通过数学模型计算了 12 个黄河泥沙空间优化配置方案, 采用前述泥沙配置方案的综合评价方法, 对这 12 个优化配置方案进行综合评价的结果如表 2 所示, 由表可知, 3 个水沙系列比较, 水沙系列 1 的入黄泥沙较多, 配置方案的综合评价函数值相对较小, 水沙系列 3 的入黄泥沙较少, 配置方案的综合评价函数值较大, 水沙系列 2 为平沙系列, 配置方案的综合评价函数值中等。因此, 可以针对水沙系列 2 的优化配置方案比较基本方案 1 至方案 4。

对于水沙系列 2, 基本方案 1 的综合评价函数值为 86%, 综合评价等级为中等, 基本方案 1 不能合理解决黄河泥沙分布的问题。基本方案 2~基本方案 4 的综合评价函数值都为 108%, 综合评价等级都为合理, 按照综合评价方法, 如果综合评价函数值相同, 则依次比较河道平滩流量、入海排沙比等评价指标大小, 基本方案 2 的平滩流量评价指标为 106%, 入海排沙比评价指标为 74%; 基本方案 3 的平滩流量评价指标为 115%, 入海排沙比评价指标为 61%; 基本方案 4 的平滩流量评价指标为 116%, 入海排沙比评价指标为 60%, 基本方案 4 的平滩流量评价指标比基本方案 3 只增大 1%, 而基本方案 4 的入海排沙比评价指标比基本方案 3 减小 1%, 基本方案 4 比基本方案 3 改善不明显, 由于古贤水库初期运用排沙较少, 基本方案 4 小

北干流滩区人工放淤在 2050 年前未充分发挥作用, 对黄河泥沙空间分布状况的改善相对较小。因此, 在 2020 年古贤水库投入运用的条件下, 建议 2050 年前采用基本方案 3 进行黄河泥沙空间优化配置, 若在 2020 年古贤水库尚未投入运用的条件下, 建议 2050 年前采用基本方案 2 进行黄河泥沙空间优化配置。基本方案 3 和基本方案 2 综合比较, 由于基本方案 3 的平滩流量评价指标比基本方案 2 增大 9%, 基本方案 3 优于基本方案 2。

表 2 2008~ 2050 年 12 个黄河泥沙优化配置方案的综合评价结果统计

Table 2 Evaluation results of twelve optimal allocation schemes of sediment in the Yellow River from 2008 to 2050

基本方案	来水来沙系列	河道平滩流量评价 $P_Q / \%$	二级悬河高差评价 $P_X / \%$	入海排沙比评价 $P_P / \%$	水库拦沙投入评价 $P_{YK} / \%$	人工(机械)放淤投入评价 $P_{YF} / \%$	排沙入海投入评价 $P_{YP} / \%$	综合评价函数 $P_A / \%$	综合评价等级
1	1	99	0	78	90	9	138	82	中等
2	1	104	100	76	123	13	190	105	合理
3	1	109	79	64	132	13	200	105	合理
4	1	110	77	62	134	16	202	105	合理
1	2	103	0	76	105	9	151	86	中等
2	2	106	82	74	140	13	202	108	合理
3	2	115	65	61	143	14	209	108	合理
4	2	116	64	60	145	16	211	108	合理
1	3	109	0	75	111	10	162	91	较合理
2	3	112	71	73	143	14	213	110	合理
3	3	119	55	60	152	15	218	110	合理
4	3	120	55	59	153	16	220	111	合理

2008~ 2050 年基本方案 3 的各种配置方式年平均配置沙量比例如表 3 所示, 由表 3 可知, 3 个水沙系列的配置沙量比例差别不大, 基本方案 3(水沙系列 2)各种配置方式的顺序和平均配置沙量比例为: ① 水库拦沙量 41.0%、② 河口造陆沙量 18.0%、③ 深海输沙量 17.8%、④ 引水引沙量 10.4%、⑤ 人工(机械)放淤沙量 6.9%、⑥ 主河槽冲淤沙量 3.8%、⑦ 洪水淤滩沙量 2.1%, 其中, 小浪底出库沙量占入黄沙量的 49.5%, 进入河口的沙量占小浪底出库沙量的 74.5%。

表 3 2008~ 2050 年基本方案 3 黄河泥沙的各种配置方式年平均配置沙量比例统计

%

Table 3 Average sediment allocation proportions of third basic scheme in the Yellow River from 2008 to 2050

水沙系列	入黄沙量	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
1	100	40.5	9.6	6.4	4.2	2.8	19.2	17.3
2	100	41.0	10.4	6.9	3.8	2.1	18.0	17.8
3	100	41.1	11.4	7.5	3.1	2.3	17.8	16.9

5 结 论

对黄河泥沙优化配置的评价指标体系框架和泥沙配置方案的综合评价方法等进行了初步的研究, 得到如下主要成果和认识:

(1) 初步构建了黄河泥沙配置评价指标体系框架, 提出了各个评价指标和综合评价函数的计算方法, 构造了黄河干流泥沙优化配置的综合评价函数, 并提出了黄河泥沙配置方案的综合评价方法。

(2) 通过对 12 个黄河泥沙优化配置方案进行综合评价, 建议了较优的配置方案, 其各种配置方式平均沙量比例分别为: 水库拦沙量 41.0%、河口造陆沙量 18.0%、深海输沙量 17.8%、引水引沙量 10.4%、人工(机械)放淤沙量 6.9%、主河槽冲淤沙量 3.8%、洪水淤滩沙量 2.1%。

(3) 黄河泥沙优化配置是一个复杂的系统工程, 本文重点研究黄河泥沙配置方案的综合评价方法, 试图为构建黄河水沙调控体系的工程布局提供决策支持, 对配置方案还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 胡春宏, 陈绪坚, 陈建国. 黄河水沙空间分布及其变化过程研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(5): 518-527. (HU Chun-hong CHEN Xu-jian CHEN Jian-guo. Spatial distribution and its variation process of sedimentation in the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2008, 39(5): 518-527. (in Chinese))
- [2] 胡春宏, 陈绪坚. 流域水沙资源优化配置理论与模型及其在黄河下游的应用 [J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1460-1469. (HU Chun-hong CHEN Xu-jian. Optimal deployment theory and mathematical model of water and sediment resources in basin and their applications in the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2006, 37(12): 1460-1469. (in Chinese))
- [3] 李义天, 邓金运, 孙昭华, 等. 河流泥沙灾害及其防治 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 266-283. (LI Yitian, DENG Jinyun, SUN Zhaohua, et al. Disaster of sediment in river and its prevention [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 266-283. (in Chinese))
- [4] 王浩, 王建华, 秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向 [J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 123-128. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 123-128. (in Chinese))
- [5] 刘恒, 耿雷华, 陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立 [J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 265-270. (LIU Heng, GENG Leihua, CHEN Xiaoyan. Indicators for evaluating sustainable utilization of regional water resources [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 265-270. (in Chinese))
- [6] BAGEL M S, DAS G A, NAYAK D K. A model for optimal allocation of water to competing demands [J]. Water Resources Management, 2005, 19(6): 693-712.
- [7] GHOSH S, MUJUMDAR P P. Risk minimization in water quality control problems of a river system [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(3): 458-470.
- [8] 胡春宏, 张治昊. 黄河口尾间河道平滩流量与水沙过程响应关系 [J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 209-214. (HU Chun-hong, ZHANG Zhihao. Response relationship between the bank-full discharge in tail channel and the process of flow-sediment in the Yellow River estuary [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 209-214. (in Chinese))
- [9] 陈绪坚, 韩其为, 方春明. 黄河下游造床流量的变化及其对河槽的影响 [J]. 水利学报, 2007, 38(1): 15-22. (CHEN Xu-jian, HAN Qiwei, FANG Chunming. Variation of dominant discharge in the Lower Yellow River and its influence on river channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 15-22. (in Chinese))
- [10] 高季章, 胡春宏, 陈绪坚. 论黄河下游河道的改造与“二级悬河”的治理 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 8-18. (GAO Jizhang, HU Chun-hong, CHEN Xu-jian. Preliminary study on alteration of watercourse and improvement of the 'secondary perched river' in the lower Yellow River [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(1): 8-18. (in Chinese))
- [11] 吴祈宗. 运筹学与最优化方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 215-249. (WU Qizong. Operational research and optimization method [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003: 215-249. (in Chinese))
- [12] 李士勇. 工程模糊数学及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 121-150. (LI Shiyong. Engineering fuzzy mathematics with application [M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 2004: 121-150. (in Chinese))

Method for comprehensive evaluation of sediment optimal allocations in the mainstream of Yellow River*

CHEN Xu-jian, HU Chun-hong, CHEN Jian-guo

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract A framework is basically established for the evaluation of sediment optimal allocation in the mainstream of Yellow River. The framework is built on the systemic, hierarchical, representative, quantitative and comparable principles, and includes six evaluation parameters aiming at both technologic and economic sub-objectives in the spatial optimization of sediment allocations. The procedure of calculating the six evaluation parameters is proposed. The synthetic evaluation function is presented. As the result, a method for comprehensive evaluation of sediment optimal allocations in the mainstream of Yellow River is determined. The method is used to evaluate 12 existing schemes of sediment optimal allocations in the Yellow River, and a preferable scheme is identified. The scheme suggests the optimal compositions of sediment allocations, which are 41.0% held in reservoirs, 18.0% for land formation in estuaries, 17.8% discharged into deep seas, 10.4% consumed by irrigation, 6.9% for siltation to beaches, 3.8% for silting of mainstream, and 2.1% for silting floodplains.

Key words sediment in the Yellow River; optimal allocation; evaluation parameters; evaluation method; allocation schemes

欢迎订阅《水科学进展》

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊，主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中的科学技术的最新成果、重要进展、当代水平和发展趋势，报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法，交流新的科研成果、技术经验和科技动态。她涉及与水有关的所有学科，包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。本刊为全国中文核心期刊，同时被 E 和 CA 等国际权威文献检索系统收录，2003、2004、2005 年连续获“百种中国杰出学术期刊”称号。

《水科学进展》为双月刊，大 16 开本，每期 136 个版面，逢单月 30 日出版，每期定价 30.00 元，全年定价 180.00 元。国际标准连续出版物号：ISSN 1001-6791，国内统一连续出版物号：CN 32-1309/P，国内发行代号：28-146。欢迎广大读者向当地邮局(所)办理订阅手续。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (No. 50721006) and the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (No. 50725930).