

文章编号: 1672-3031 (2005) 01-0001-05

# 论维持黄河健康生命的关键技术与调控措施

胡春宏, 陈建国, 郭庆超, 陈绪坚

(中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 随着流域来水来沙过程的大幅变化及人类活动的日趋剧烈, 黄河发生了很大的变化, 主要表现为: 流域生态环境退化, 水土流失严重, 悬河加剧, 功能性断流与水患并存, 水质污染日益加剧。本文系统地分析了导致黄河健康恶化的因素, 提出基于全流域综合调控的 临界控制论, 可作为维持黄河健康生命的理论基础, 它包括黄河流域不同层次的临界指标体系和流域水沙资源优化配置的数学模型。构建黄河流域水沙调控体系是维持黄河健康生命的技术支撑, 其主要功能是增水、减沙、调节水沙过程, 按黄河现有的条件, 下游河道塑造和维持中水河槽的平滩流量约为  $400\text{Qm}^3/\text{s}$  左右。

关键词: 黄河; 河流健康生命; 临界调控理论; 水沙调控; 水沙资源配置

中图分类号: TV143

文献标识码: A

## 1 黄河健康生命的内涵

近 20 年来, 黄河发生了很大的变化<sup>[1]</sup>, 来水来沙过程大幅改变, 人类活动日益加剧, 导致上游和河源地区生态环境退化, 中游水土流失依然严重, 下游悬河加剧、功能性断流与水患并存, 河口地区生态环境恶化, 水质污染日益加剧等, 这些都表明黄河健康状况日趋恶化, 这也是黄河水利委员会提出如何恢复与维持黄河健康生命的背景<sup>[2]</sup>。

导致黄河健康恶化的因素主要有两个方面: 一是自然因素, 包括气候、地貌、沉积物、植被与全球环境变化等; 二是人为因素, 包括不合理的开发和人类活动加剧等。20 世纪 50 年代以来, 人类活动的影响更为显著。当前黄河面临的环境难题实际是经济发展、社会需求日益提高与维持黄河健康稳定、保护生态环境之间的矛盾, 关键问题是要解决黄河流域环境支持能力与社会需求之间的不平衡。图 1 给出了黄河流域社会需求与流域环境能力随年代的变化, 由图 1 可见, 古代社会的需求能力比较低, 环境支持能力相对比较高, 黄河流域的安全度

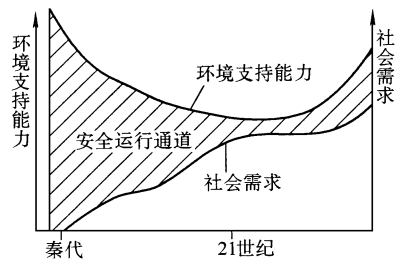


图 1 黄河流域社会需求与流域环境支持能力的关系示意

高; 随着社会经济的发展, 人类活动不断加剧, 流域环境支持能力不断降低, 到了 21 世纪两者已非常接近, 社会需求与流域环境支持能力的矛盾日益突出。维持黄河健康生命就是如何把图 1 中的社会需求曲线与流域环境支持能力曲线保持在一个合理的范围内, 这时的黄河才是健康和安全的<sup>[3]</sup>。

维持黄河健康生命的内涵包括下列三方面的内容<sup>[3]</sup>: (1) 河道的健康; (2) 流域生态环境系统的健康; (3) 流域社会经济发展与人类活动的健康。三者结合起来构成了黄河健康生命这一命题。

## 2 黄河健康生命问题的本质

黄河健康生命问题从本质上讲属于复杂性科学问题的范畴, 复杂性科学问题是当今控制论中最困

收稿日期: 2005-01-25

基金项目: 国家十五攻关项目 (2004BA610A-03); 国家自然科学基金重点项目 (50239040)

作者简介: 胡春宏 (1962-), 男, 浙江慈溪人, 教授级高级工程师, 主要从事泥沙研究。

难、最复杂和前沿性的问题，黄河流域的复杂性科学问题具有如下特征：（1）黄河流域是自然环境与人类活动共同作用下形成的复杂环境巨系统（中上游主要是自然的，下游主要是人工的）；（2）黄河是该系统中最活跃的部分，是系统的指示计；（3）该系统具有非线性、非平衡、随机性和不确定性；（4）该系统表现为关系、状态和特性的复杂性和随机性，以及多通道、多回路、多层次、多目标的不确定性。

黄河流域复杂性科学问题是由多个系统组成，系统之间存在着相互联系与相互制约，复杂性科学问题包括自然系统、社会系统、经济系统、政策与法律系统、管理与决策系统和技术系统等，如图 2 所示。此外，最近黄河水利委员会还提出了河流伦理方面的问题。

3 维持黄河健康生命的理论与技术支持

黄河流域是在人类活动和社会系统参与下的复杂系统，其中存在着制约系统整体行为的临界阈值，这些临界阈值形成了一个控制流域系统运行的指标体系。只有沿着流域生态环境支持系统和人类社会需求之间的合理平衡基准运行，才能保证黄河的健康发展，维持黄河的健康生命。政府对该系统的生态保护、环境治理、资源配置、经济开发、社会公平、人口数量与素质以及工程建设和河道整治等进行宏观调控是达到上述目标的管理手段。我们认为，基于全流域综合调控的 临界控制论 可作为维持黄河健康生命的理论基础，构建黄河流域水沙调控体系则是维持黄河健康生命的技术支撑。

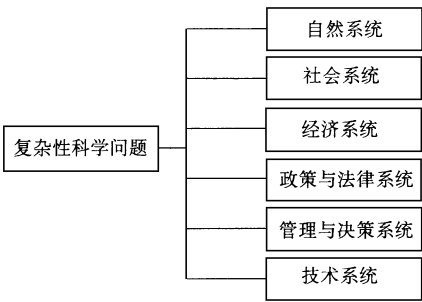


图2 黄河流域复杂环境系统的构成

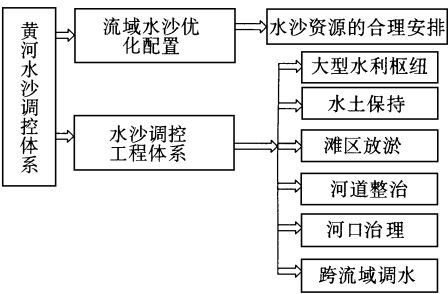


图3 黄河水沙调控体系示意

（1）维持黄河健康生命的临界阈值与指标体系。黄河流域的临界控制可分为 3 个基本层次：第 1 层次包括降水、蒸发与径流的水分平衡；工程措施与灾害防护的平衡；生物措施与水土保持的平衡；土地利用与土壤侵蚀的平衡等。第 2 层次包括集水与产沙的平衡；侵蚀与淤积的平衡；水沙与河型的平衡；水沙资源配置与河道运行的平衡等。第 3 层次包括人类活动强度与自然保育的平衡；系统支持能力与社会需求的平衡；流域环境的缓冲力与抗逆力的平衡；物质再生产与人口再生产的平衡；资源生产价值与生态价值的平衡。

黄河流域不同层次的临界阈值构成了流域临界调控的指标体系，这个体系分为上述 3 个层次，所涉及的临界阈值包括：临界产沙量与临界入黄沙量，临界基流量与临界径流量，临界平滩流量与输水输沙河槽，临界水沙过程与组成，临界水沙配置，临界排污量，临界生产和生活用水量，临界生态用水量等。这一指标体系的建立涉及到黄河流域各方面的科学技术和社会科学问题，需要在深入研究的基础上统筹考虑，建立起完善的指标体系，为维持黄河健康生命的调控措施提供科学依据。

（2）维持黄河健康生命的调控措施。维持黄河健康生命在具体实施过程中，需要建设黄河水沙调控体系，该体系的目的是增水、减沙和调节水沙过程，它由两方面的内容组成，如图 3 所示。由图可见，第 1 个方面是建立黄河流域水沙资源优化配置模型<sup>[4]</sup>。以往对水资源配置模型研究的较多，对水沙资源联合配置模型研究的较少。目前，下游来水来沙量大幅减小，进入下游的水沙过程十分不协调，同时下游水沙资源分布也不合理，沿黄引水量逐年递增，黄河出现功能性断流，入海水量明显递减，河口生态环境恶化；河槽滩地冲淤分布不合理，主槽淤积萎缩，二级悬河加剧，入海沙量明显减少，河口出现退蚀的现象。这种水沙沿程分布的不合理，是导致黄河健康出现问题的重要原因之

一。因此，我们首先应利用实测资料从理论上分析合理和优化的水沙过程及其配置，建立流域水沙资源优化配置模型，科学分析与配置水沙的分布，明确水沙的去向，把水沙量合理地配置到流域的河道内、河道外、水库内、滩区、筑堤、造地、入海等。第2个方面是构建黄河水沙调控的工程体系，其中包括现有的工程和非工程措施，如干支流大型水利枢纽的联合调控运用，多沙粗沙区的治理、河道综合整治工程，滩区综合治理（生产堤、放淤等）、塑造与维持下游中水河槽、河口生态治理、水沙资源利用与配置和跨流域调水工程等，这些措施综合构成了黄河水沙调控工程体系。在这方面黄河水利委员会已有相当的基础，经过多年的治理及近年 调水调沙 的实践，已初步建立起该工程体系，下一步需要进行进一步的整合和完善，并深入论证修建古贤等大型水利枢纽的必要性及各项具体措施在该体系中的作用等。

4 黄河水沙资源优化配置数学模型的理论框架

随着黄河上中游大型水利枢纽的陆续建成，已初步形成以大型骨干工程为核心的全河水沙调控体系。以下为黄河下游水沙资源优化配置模型的初步研究成果<sup>[4]</sup>。流域水沙资源优化配置的理论及模型主要包括：研究水沙配置原则、配置平衡关系、多目标度量函数及约束条件等，建立区域水沙资源优化配置的理论，采用多目标规划方法，建立黄河下游多目标水沙优化配置数学模型。该配置模型的主要框架一是目标函数，二是约束条件。

(1) 黄河下游水沙资源多目标优化配置层次分析。表1给出了黄河下游水沙资源多目标优化配置层次关系表，由表1可见：水沙资源优化配置模型的总目标层为水沙资源多目标优化配置；子目标层分为生态效益目标、社会效益目标 and 经济效益目标等3个子目标。

表1 黄河下游水沙资源多目标优化配置层次关系

总目标层		水沙资源多目标优化配置							
子目标层 (3个子目标)		生态效益目标			社会效益目标			经济效益目标	
效益指标层 (9个指标)	改善生态环境	促进河流健康	减轻环境污染	防洪减灾减淤	加强河道治理	增强治黄信心	创造经济收入	节省人力物力	节省水资源
配置措施层 (八项措施)	水库拦沙	水库放淤	引水引沙	机淤固堤	主槽冲淤	滩地淤沙	滨海沉沙	远海输沙	
配置目的	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	治人工机淤固堤造相对地下河	塑造中水河槽整治游荡河段	治理二级悬河综合治理滩区	改造湿地环境河口沉积造陆	海洋动力输沙限制河口延伸	

效益指标层分为改善生态环境、促进河流健康、减轻环境污染、防洪减灾减淤、加强河道治理、增强治黄信心、创造经济收入、节省人力物力、节省水资源等9个指标。

配置措施层分为水库拦沙、水库放淤、引水引沙、机淤固堤、主槽冲淤、滩地淤沙、滨海沉沙、远海输沙等八项措施。

(2) 黄河下游水沙资源多目标优化配置综合目标函数。结合配置措施重要性排序评价的专家调查和层次分析的数学方法，确定各配置变量的权重系数，并构造综合目标函数。通过八项措施优化配置黄河下游水沙资源，在黄河下游7个河段内共包括了24个泥沙资源配置变量。

(3) 黄河下游水沙资源优化配置的约束条件。黄河下游水沙资源优化配置需要考虑9个方面的约束条件：水库拦沙能力约束、水库放淤容量约束、引水引沙能力约束、机淤固堤能力约束、恢复中水河槽泥沙冲淤调整容量约束、滩地淤沙容量约束、维持河口三角洲稳定约束、维持河流健康的水资源约束和泥沙资源总量约束。

5 黄河水沙调控体系中有关问题的探讨

(1) 调节水沙过程是黄河水沙调控体系的关键任务之一。黄河来水来沙量的减小和水沙量年内分配的变化所引起的来沙系数的增加是导致黄河下游河道萎缩的主要原因，而汛期洪峰流量的减小，则加重了主河槽的淤积。黄河水沙调控体系的主要功能是增水减沙和调水调沙，而调节水沙过程是调水调沙的主要任务，要解决黄河下游河道目前遇到的主河槽萎缩和防洪等问题，塑造和维持一定规模的输水输沙河槽，调节水沙过程是关键的措施之一，只有调节出适当的水沙过程或洪水过程，才能塑造出相应的中水河槽，而只有大型水利枢纽工程的联合调度运用才能实现水沙过程的调节。

(2) 大型水利枢纽联合调控的作用。表 2 所示为不同水沙系列小浪底和古贤水库联合调度运用对黄河下游河道减淤的作用<sup>[1]</sup>。由表可见，仅小浪底水库单独运用，下游河道减淤量为 58.5~71 亿 t，不淤年限为 21~27 年；而小浪底和古贤两库联合调度运用，下游河道减淤量增加到 118.8~144.6 亿 t，不淤年限可达 43~58 年，因此，应充分发挥大型水利枢纽联合调控对下游河道减淤的作用，恢复黄河下游河道的中水河槽，维持黄河的健康生命。

表 2 大型水利枢纽联合调控对黄河下游河道的减淤作用计算

计算条件		冲淤量 亿 t	减淤量 亿 t	冲刷年限	不淤年限/年	
					过程线法	冲淤量法
3393 系 列 80 年	无小浪底无古贤	225.1				
	无古贤有小浪底	160.7	64.4	17~20	36	23
	有古贤有小浪底	92.5~103.8	121.3~132.6	17~20	54	43~47
5081 系 列 80 年	无小浪底无古贤	199.2				
	无古贤有小浪底	132.2	67.0	17~20	37	27
	有古贤有小浪底	54.6~63.2	136.0~144.6	17~20	63~66	55~58
8768 系 列 80 年	无小浪底无古贤	219.9				
	无古贤有小浪底	161.4	58.5	17~20	45	21
	有古贤有小浪底	93.5~101.1	118.8~126.4	17~20	62~65	43~46
5075 系列	无小浪底-50 年	170.2				
	有小浪底-50 年	99.2	71.0	14	28	21

(3) 黄河下游塑造中水河槽可能的规模。黄河下游中水河槽的塑造和维持是与来水来沙条件和小浪底水库的运用方式密切相关的，根据研究成果<sup>[5]</sup>，目前可行的塑造和维持黄河下游中水河槽的措施为：在小浪底水库的运用初期采取拦沙运用，并配合每年汛期的调水调沙，首先塑造出一定平滩流量的中水河槽；然后小浪底水库转入泥沙多年调节、相机排沙运用，并在每年汛期继续进行调水调沙和拦粗排细运用，维持已塑造出的中水河槽。塑造中水河槽的规模与来水来沙量及水沙过程是相对应的，研究结果表明<sup>[5]</sup>，不同来水来沙条件下塑造和维持中水河槽可能的平滩流量为：若小浪底水库年平均来水量在 200~250 亿 m<sup>3</sup>、年平均来沙量在 3~5 亿 t 之间，下游可以在 5~8 年左右塑造出平滩流量为 3 500~4 000 m<sup>3</sup>/s 的中水河槽，然后通过调节水库适当的出库排沙比可以在拦沙库容淤满前维持；若小浪底水库年平均来水量在 250~350 亿 m<sup>3</sup>、年平均来沙量在 5~7 亿 t 之间，下游可以在 5~8 年左右塑造出平滩流量为 4 000~5 000 m<sup>3</sup>/s 的中水河槽，然后通过调节水库适当的出库排沙比可以在拦沙库容淤满前维持；若小浪底水库年平均来水量在 350~450 亿 m<sup>3</sup>、年平均来沙量在 7~9 亿 t 之间，下游可以在 5~8 年左右塑造出平滩流量为 5 000~6 000 m<sup>3</sup>/s 的中水河槽，然后通过调节水库适当的出库排沙比可以在拦沙库容淤满前维持；若遇特殊水沙系列（丰水枯沙或枯水丰沙），下游河道塑造和维持的中水河槽的平滩流量可能会有所增大和减小；按目前实际的来水来沙情况，黄河下游塑造和维持约 4 000 m<sup>3</sup>/s 左右平滩流量的中水河槽是适当的。

## 6 结语

恢复与维持黄河健康生命是今后黄河治理的方向与目标, 建立黄河水沙调控体系则是维持黄河健康生命的技术支撑, 对此问题进行的初步研究我们得到了如下认识: (1) 维持黄河健康生命的内涵包括河道的健康、流域生态环境系统的健康、流域社会经济发展与人类活动的健康。(2) 基于全流域综合调控的临界控制论可作为维持黄河健康生命的理论基础, 黄河流域不同层次的临界阈值构成了流域临界调控的指标体系。(3) 黄河水沙调控体系应包括流域水沙优化配置和水沙调控工程体系, 该调控体系的关键是调节水沙过程, 对水沙资源进行优化配置, 在水沙调控体系中大型水利枢纽的联合调度十分重要。按黄河现有来水来沙条件, 下游河道可能塑造和维持中水河槽的平滩流量约为  $4\,000\text{m}^3/\text{s}$  左右。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 胡春宏, 等. 黄河水沙过程变异及河道的复杂响应 [ R ]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [ 2 ] 李国英. Keeping the Yellow River Healthy [ A ]. 第九次河流泥沙国际学术讨论会论文集 [ C ]. 2004.
- [ 3 ] 胡春宏. 论维持黄河健康生命的关键技术与调控措施 [ R ]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [ 4 ] 胡春宏, 陈绪坚. 黄河下游水沙资源优化配置模型及其应用 [ R ]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
- [ 5 ] 胡春宏, 陈建国, 郭庆超. 塑造黄河下游中水河槽措施研究 [ R ]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.

## Key technology and regulation measures on maintaining a healthy life of the Yellow River

HU Chun-hong, CHEN Jian-guo, GUO Qing-chao, CHEN Xu-jian  
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** With significant variations of incoming water and sediment and continuous increase of human activities in the Yellow River basin, the river regime has greatly changed in past decades, such as deterioration of basin eco-environment, severe water and soil loss, worsening of river bottom rising, co-existence of functional dry-out and flood disasters, as well as serious water pollution. The paper systematically analyzed the factors causing deterioration of the Yellow River health. A theory of threshold regulation was worked out based on the comprehensive measures of the whole river basin, which could be adopted as fundamentals of maintaining the healthy life of the river. The theory includes a series of critical indexes at different levels and mathematical models of optimal allocation of water and sediment resources of the basin. Construction of water-sediment regulation system for the Yellow River basin would be a technical support to maintain a healthy life of the river. The main objectives would focus on increasing water, reducing sediment, and regulating water flow and sediment transportation. It is necessary to create and maintain a main channel with a bank-full discharge capacity of about  $4\,000\text{m}^3/\text{s}$  under the current condition of the Yellow River.

**Key words:** Yellow River; healthy life of rivers; threshold regulation theory; water and sediment regulation; water and sediment deployment

(责任编辑: 李福田)