黄河下游洪水输沙效率及其调控*

倪晋仁① 刘小勇② 李天宏① 赵业安③ 金 玲①

(①北京大学环境工程系水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; ②水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011; ③黄河水利委员会水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要 针对黄河下游洪水输沙的复杂性, 根据1980~1998年实测洪水资料, 以花园口-高村河段为例, 建立了洪水输沙用水的人工神经网络模型. 在此基础上, 以提高洪水输沙用水效率为目标, 根据控制原理对洪水输沙过程调控进行了模拟与仿真. 根据洪水输沙的实际情况, 系统设计中采用了开环控制和反馈控制两种不同的控制结构. 开环控制系统中, 对不同含沙量条件下洪水平均流量对输沙用水量的控制过程做了数值模拟; 结果表明该河段流量对输沙用水量的调控作用明显受到含沙量的影响, 当含沙量小于20 kg/m^{3}时, 流量对输沙用水量减小有很好的调控作用. 反馈控制系统中, 对给定控制目标下河段入口断面含沙量和流量对输沙用水量的调节过程分别进行了仿真; 结果表明如果设定合理的控制目标, 花园口-高村河段洪水输沙过程可通过入口断面的含沙量和流量进行调控. 最后, 根据上述方法, 对黄河下游其他河段洪水输沙进行了模拟与仿真. 根据综合分析, 黄河下游花园口以下河段水流含沙量为20 kg/m^{3}时, 适宜的调控流量范围是2390~2900 m^3/s.

关键词 黄河下游 洪水 输沙用水效率 仿真 调控

输沙用水是多沙河流生态环境需水量的重要组成部分[1]. 足够的输沙用水是保持河流系统边界稳定、功能正常的前提, 是河流系统水资源可持续高效开发利用的基础. 与河流生态系统需水研究的其他方面(如保持河流中鱼类良好生存环境所需水量、河岸植被需水量等)相比, 输沙需水量尚未受到应有的重视. 常用河道需水量(IFR)计算方法, 包括基于水文学原理的以河流生物(主要是鱼类)及其栖息地生态功能良好为目标的Tennant Method[2]和以保持河流水生生物多样性以及保护河流自然生态系统功能为目标的RVA方法[3], 都基本没有考虑输沙用水. 在

2004-01-15 收稿, 2004-04-27 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043603)资助

比较综合的计算方法中(例如 IFIM[1)]), 河道输沙功能作为引起河道形态改变的因素应加以考虑, 具体采用美国陆军工程兵团的 HEC-6 模型, 该模型计算中需要大量河流实测资料. 倪晋仁等人[4,5]针对黄河多沙的特点, 研究了黄河下游河道输沙用水量并给出了统计平均意义上的河道最小输沙需水量. 另外还有一些研究对河流输沙用水进行了探讨[6,7]. 相对而言, 洪水输沙用水量的研究很少. 赵业安等人[2)]对洪水洪峰流量与输沙用水量做了初步的分析, 但是对于洪水输沙过程中, 洪水要素(如流量)与输沙用水量的关系尚需做深入的分析. 关于输沙用水的进一步研究应该注意特定时空条件下河道输沙用水量与河流生态需水量的结构关系、提高河道洪水输沙用水效率的含沙量和流量级别、水库等工程设施调控水沙过程及提高河道输沙用水效率的机理等方面问题.

在确定洪水要素与输沙用水量关系的基础上, 如何通过水利枢纽工程调控提高河道输沙能力、减小泥沙淤积同时提高输沙用水效率是河道洪水输沙用水研究的重要问题. 事实上, 以水库作为河道水沙过程的控制枢纽, 按照某种设计的方案调控水库中水沙下泄过程以满足某种特定的河流管理目标已经被付诸实践. 在明确了泄放洪水需要达到的具体目标之后, 水库泄放洪水设计中主要考虑洪水频率、漫滩速率、淹没深度、洪水历时、滩槽流速、水温与水质等[8]. 根据 King 等人[3)]报告, 1996 年美国科罗拉多河的胡佛水库因为下泄洪水流量合理, 试验取得预期结果; 相比之下, 位于南非东海岸 Kromme 河的 Mpofu 水库则因下泄过程中流量偏小而没有取得预期结果. 显然, 作为河道系统的人工控制枢纽, 水库合理的下泄流量与预期目标能否实现紧密相关. 黄河水利委员会 2002 年 7 月调水调沙试验中[4)], 采用的设计下泄流量为 2600 m^3/s. White 等人[5)]则建议对于河道冲沙而言, 调节水库下泄流量至少应该在年平均流量的 2 倍以上.

本文在已有研究的基础上, 根据多年实测洪水资料, 对黄河下游河道洪水输沙用水效率进行了深入分析, 建立了黄河下游河道洪水要素与输沙用水的神经网络模型; 在此基础上, 以河道输沙用水效率最大为控制目标, 对不同含沙量和流量条件下洪水对输沙用水的调控过程进行了数值模拟与仿真, 给出了目标条件下的控制流量与含沙量的仿真结果, 以供水库调水调沙设计与水资源调配决策时参考.

---

1) Ken D B, Berton L L, Bartholow J M, et al. Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Information and Technology Report, USGS/BRD/ITR-1998-0004

2) 赵业安. 黄河下游河道输沙用水量的初步研究. 黄河水利委员会水利科学研究院, 1990

3) King J, Tharme R, Brown C. Definition and Implementation of Instream Flows. Thematic Report, Definition and Implementation of Instream Flows, Final Report, 1999

4) 水利部黄河水利委员会. 黄河首次调水调沙试验效果初步分析. 2002

5) White W R. Flushing of Sediments from Reservoirs. In: Ujorh P, Sims G, Goodwin P, et al. Operation, Monitoring and Decommissioning of Dams. WCD Thematic Review Options Assessment IV.5, 2000

1 黄河下游河道洪水输沙用水量计算

考虑到洪水演进过程中的洪量损失，黄河下游洪水输沙用水量计算中将黄河下游控制性水文观测断面之间河段称为“大河段”，例如三门峡~花园口，“大河段”下划分许多“小河段”，例如三门峡~花园口之间可以 1 km 长作为一个“小河段”. 在“小河段”内，假定水沙条件基本保持不变，而在相邻“小河段”之间水沙呈线性变化，如果计算河段封闭，则假设具有一定的合理性. 因此每个“小河段”输沙用水量的统计平均值可看作“大河段”输沙用水量，即:

$$W_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{W_i}{M_i - D_i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{W_1}{M_1 - D_1} + \frac{W_2}{M_2 - D_2} + \cdots + \frac{W_n}{M_n - D_n}\right), \tag{1}$$

其中，W_s 为河段洪水输沙用水量，W_i 为第 i 河段水量、M_i 为第 i 河段沙量，D_i 为第 i 河段冲淤量，$i = 1, 2, \cdots, n$ 为河段数. 对于河道形态无剧烈变化的封闭型河道(忽略支流入汇与取水的影响)，姑且可以认为每两个相邻河段之间输沙变化系数相等，令 $U_i = M_i - D_i$，既有 $W_i = xW_{i-1}$，$U_i = yU_{i-1}$，则(1)式可写为:

$$W_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{W_1}{U_1} + \frac{xW_1}{yU_1} + \frac{x^2W_1}{y^2U_1} + \cdots + \frac{x^{n-1}W_1}{y^{n-1}U_1}\right) = \frac{1}{n}\frac{W_1}{U_1}\sum_{i=1}^{n}\left(1 + \frac{x}{y} + \frac{x^2}{y^2} + \cdots + \frac{x^{n-1}}{y^{n-1}}\right). \tag{2}$$

则黄河下游某一河段洪水输沙用水量可用下式计算:

$$W_s = \lambda\frac{W_1}{U_1}, \tag{3}$$

其中，λ为河段输沙用水系数，$\lambda = \left(\frac{1-k^n}{n(1-k)}\right)$，$n$ 为该河段内划分的“小河段”数，k 为“小河段”水沙变异系数，$k = \frac{x}{y}$.

2 黄河下游洪水输沙用水量的神经网络模型

黄河下游河段洪水输沙用水量主要由上游来水来沙条件决定，同时受到洪水流量过程的影响. 对于洪水输沙用水量及其影响因素之间的关系，目前尚没有完善的数学模型. 根据 Rumelhart 等人[9]的分析研究，对于有一定实测数据但尚没有完善理论指导的问题，一般可采用神经网络方法来解决. Hecht-Nielsen[10]和 White 等人[11] 则证明在给定精度下，一个三层 BP 网络可以逼近任何闭区间内的一个连续函数. 显然，可以利用 BP 网络高度非线性映射能力，研究黄河下游洪水输沙用水量及其影响因素间的复杂关系. 以下根据已有的神经网络研究成果，基于多年实测洪水资料的基础上，建立黄河下游洪水输沙用水量的 BP 网络模型.

2.1 BP 网络设计

BP 网络基本表达式为:

$$Y = F(WX), \tag{4}$$

其中, Y 为网络输出矢量, X 为网络输入矢量, W 为权重矢量, $F(\ )$表示非线性映射. 基于误差梯度下降法的 BP 网络权值修正表达式为:

$$W(t+1) = W(t) - \mu\Delta E_k, \tag{5}$$

其中, $\Delta E = \dfrac{\partial E}{\partial w}$ 为误差梯度, μ定义为训练速率, t 为迭代次数变量. 为避免训练过程陷入局部最小、提高网络训练速度, 可增加动量项; 即对每个加权调节量加上一项正比于前次权值改变量的值, 权值改变量的表达式为:

$$\Delta w(t+1) = \Delta w'(t+1) + \alpha\Delta w(t), \tag{6}$$

α 定义为动量系数.

人工神经网络设计包括输入输出变量确定、网络拓扑结构设计以及激活函数选择、网络参数设定等几方面. 网络输入包括次洪水过程中水量、沙量和平均流量. 为了反映次洪水过程中水沙关系的相对变化、提高网络的抗干扰能力, 输入项增加洪水平均含沙量, 网络输出为次洪水平均输沙用水量. 网络结构确定为三层, 隐层节点数分别设为 3, 5, 8 和 15 不同水平, 实际根据网络试验结果择优选取. 网络训练样本来自黄河花园口 1980~1998 年实测的 157 次洪水过程. 具体处理时将训练样本分为三组, 样本 A 是从 157 次洪水过程中随机抽取 95 次洪水作为训练样本, 并增加输入输出变量中的极值项至训练样本, 共 98 组数据; 样本 B 从 157 次洪水过程中随机抽取 131 次洪水作为训练样本, 并增加输入输出变量中的极值项至训练样本, 共 133 组数据; 样本 C 为 1980~1994 年洪水过程并增加输入输出变量的极值项至训练样本, 共 139 组数据.

2.2 结果分析

网络试验中, 建立不同训练样本、不同结构的网络 12 个. 训练过程中水量和沙量取多年洪水平均值. 根据网络验证结果, 样本 A 和样本 C 计算误差大于样本 B, 因此选取样本 B 作为网络训练样本. 用样本 B 训练隐层节点数分别为 3, 5, 8 和 15 的三层 BP 网络, 网络训练次数(训练误差为 0.02)分别为 21576, 10124, 13580 和 20757. 根据网络计算精度和训练次数, 最后确定选用隐层结点数为 5 的网络结构做进一步的分析.

确定网络训练样本和网络结构之后, 对不同网络参数进行了试验. 有关网络训练参数见表 1, 不同参数的网络验证结果的统计特征值见表 2.

表 1 网络训练参数

网络参数	网络 A	网络 B	网络 C	网络 D	网络 E
训练误差	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02
训练速率	0.2	0.2	0.1	0.05	0.02
训练次数	207	10124	20757	36404	80574

表 2 不同参数的网络验证结果的统计特征值

统计特征值	网络 A	网络 B	网络 C	网络 D	网络 E
最小值	−25.73	−11.57	−11.25	−11.27	−10.95
最大值	21.20	8.74	8.86	9.15	9.69
均值	−8.62	−0.91	−0.56	−0.52	0.10
标准差	12.49	4.68	4.72	4.77	4.87
累积均值	13.12	3.44	3.40	3.41	3.32

根据以上网络试验结果，网络 B-网络 E 的计算结果都达到了相当的精度，综合各项误差指标，选取网络 C 作为黄河下游洪水输沙用水量的计算模型. 模型训练误差及模型计算结果与实际结果的比较见图 1.

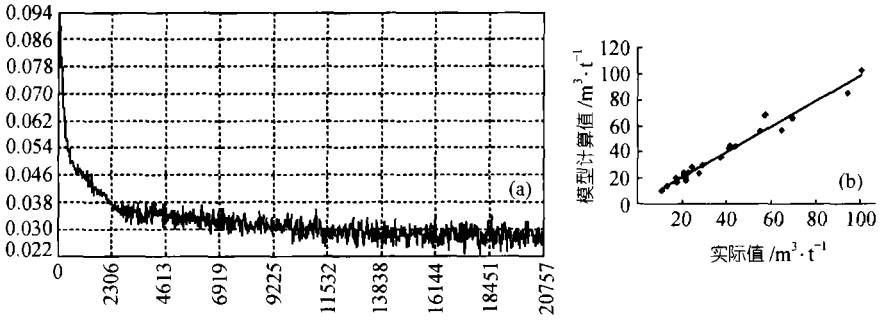

图 1 计算模型的训练误差及验证结果

(a) BP 网络模型训练误差; (b) 网络计算机与实际值比较

3 黄河下游洪水输沙的调控与仿真

近年来，一些国家地区利用河道水库作为调控枢纽，对水库泄放水沙过程进行人工调控从而满足某种特定的河流管理目标. 对于黄河下游来说，利用三门峡、小浪底等水库调节进入下游河段的水沙过程、减少泥沙淤积和提高河道输沙用水效率是河道管理的主要目标之一. 根据小浪底水库初期运用方式研究报告[1)]，小浪底水库可采用包括高蓄速冲、控蓄速冲等 4 种不同运用方式，但对于如何确定合理调控流量，特别是在不同含沙量条件下流量的调控等问题还有待于进一步的研究. 下面根据黄河下游河道洪水输沙用水的神经网络模型和自动控制的基本原理及方法，以黄河下游花园口-高村游荡性河段为例，对通过水库调控水

1) 黄河水利委员会勘测规划设计研究院. 小浪底水库初期运用方式研究报告. 1999, HSY-GH-101

沙过程的流量和含沙量进行数值模拟与仿真. 最后根据同样的方法对黄河下游的水沙调控进行了综合分析.

3.1　花园口-高村河段洪水输沙的流量调控

根据自动控制原理, 开环控制系统结构主要由给定输入、控制器、受控对象、扰动量和被控量等基本元素组成. 根据不同情况, 控制作用可直接由给定输入产生, 或者按扰动量来进行控制, 适用于控制量与被控量有比较明确对应关系的系统. 黄河下游花园口-高村河段, 可以看作控制系统, 花园口与高村断面分别为系统的输入输出断面. 如果以花园口-高村河段洪水输沙用水量作为被控量, 不同含沙量级别下花园口流量为系统给定输入, 则不同输入条件下的被控量序列可根据神经网络模型计算.

以黄河下游 1980~1998 年 157 次洪水过程实测资料为依据, 取多次洪水平均水量作为调控水量, 含沙量与流量取值范围以实测资料相应极值为限, 含沙量取值范围为 5~200 kg/m^3, 流量取值范围 500~6500 m^3/s. 在不同含沙量条件下, 流量调控结果可根据神经网络模型计算, 网络输出即为被控量. 不同含沙量条件下流量对输沙用水量的控制作用见图 2, 图中纵坐标为被控量(即输沙用水量), 横坐标为控制输入(即流量), 其中含沙量 40.67 kg/m^3 是多次实测洪水平均含沙量.

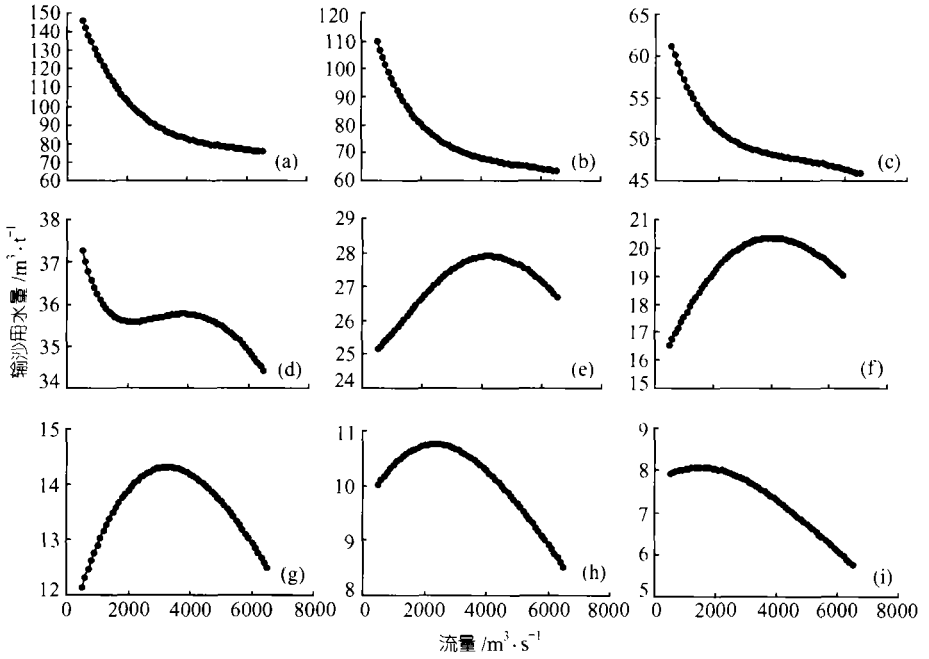

图 2　流量对输沙用水量调控模拟结果

含沙量(kg/m^3): (a) 5; (b) 10; (c) 20; (d) 30; (e) 40.67; (f) 60; (g) 100; (h) 150; (i) 200

从模拟结果可以看出，不同含沙量条件下流量与输沙用水量具有不同的响应关系. 花园口-高村河段流量对输沙用水量的调控作用明显受到含沙量的影响. 含沙量小于 20 kg/m^3 时，随调控流量的增加，输沙用水量减小；含沙量在 30 kg/m^3 时，流量在一定范围内变化时输沙用水量基本保持不变；含沙量在 40~150 kg/m^3 时，输沙用水量随流量增大而增大，而后开始减小；含沙量大于 200 kg/m^3 时，输沙用水量随流量增加而减小. 对于花园口-高村宽浅散乱河段的水沙调控而言，含沙量大于 30 kg/m^3 时，因为河道输沙能力调整，提高流量并不能减小河道输沙用水量，而比较适宜的调控含沙量应该小于 20 kg/m^3.

3.2 花园口-高村河段洪水输沙的反馈仿真

开环控制结构简单、易于实现，但在系统调控过程中控制作用直接由给定输入产生，被控量对控制作用没有影响，信息呈单向流动、系统抗干扰能力差、控制精度低，适合于控制量与被控量有比较确定关系的系统. 对于河流管理而言，经常关注在确定的目标下(即给定被控量)如何调整输入，使得系统的输出在允许误差范围内达到目标输出. 这样就必须利用负反馈控制，使得系统输入根据系统输出与设定值的偏差进行调整，最终使得被控量与设定值趋于一致，同时能消除内外扰动量对被控量的影响. 负反馈控制系统结构见图 3.

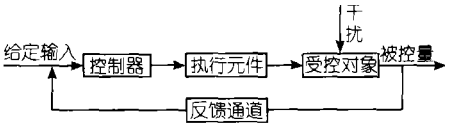

图 3 反馈控制系统

根据负反馈控制原理，设定黄河下游洪水输沙用水量为 30 m^3/t，在给定泄放水量和平均流量的条件下，按照神经网络模型对含沙量进行调控仿真，结果见图 4(a). 设定黄河下游洪水输沙用水量 50 m^3/t，在给定水量和含沙量条件下，平均流量调控仿真过程见图 4(b).

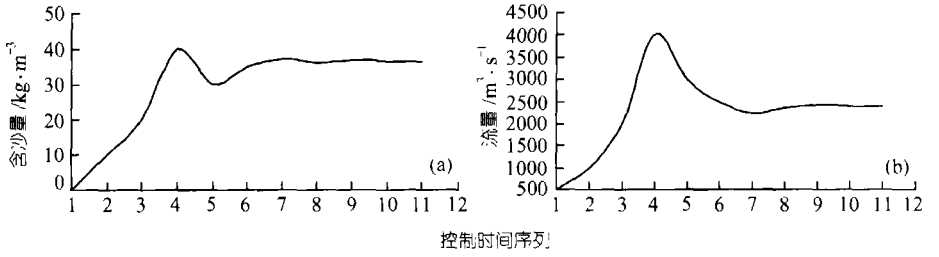

图 4 水沙调控的负反馈仿真结果

(a) 含沙量调控仿真过程; (b) 流量调控仿真过程

图 4(a)纵坐标为调控含沙量，横坐标为含沙量调控时间序列，模拟计算中，水量取多年洪水平均值，流量设定为 3000 m^3/s，给定初始含沙量为 5 kg/m^3，系统经过 10 次反馈计算，输出误差满足要求(<0.05)，系统收敛. 图 4(b)纵坐标为调

控流量, 横坐标为流量调控时间序列, 输入项中水量取多年洪水平均值, 含沙量设定为 20 kg/m^3, 初始流量为 500 m^3/s, 系统经 11 次反馈计算, 输出误差满足要求(<0.05), 系统收敛. 由此可知, 对于黄河下游河段洪水输沙而言, 如果设定合理的调控目标, 则系统完全可以实现对目标的调控.

3.3　黄河下游水沙调控

根据上面分析, 流量对输沙用水量的调控受到含沙量的制约, 只有在给定含沙量水平下, 讨论流量调控更加具有实际意义. 黄河下游各个河段河道形态差异很大, 每个河段水流输沙效率具有不同的变化规律; 对黄河下游水沙调控而言, 要在单个河段模拟仿真的基础上进行综合分析, 确定合理的调控方案. 在调控过程中, 必须考虑两点: (1) 水沙人工调控要尽可能提高输沙效率; (2) 要保证调控方案能够实现, 即反馈仿真过程中系统收敛.

黄河下游不同河段河道对水沙响应不同, 输沙用水量随流量的变化规律不同; 因此将花园口-高村河段分析方法应用于三门峡-花园口、高村-艾山、艾山-利津河段, 即先建立洪水输沙的神经网络模型, 再对洪水输沙进行模拟与仿真, 确定合理调控流量. 含沙量为 20 kg/m^3 时, 黄河下游三门峡-花园口、高村-艾山、艾山-利津河段流量对输沙用水量调控模拟结果见图 5. 从图 5 中可以看出, 高村-艾山、艾山-利津河段, 当流量增大到一定程度时, 输沙用水量开始增加, 输沙效率降低, 说明流量对输沙用水量的调控有一个上限. 在调控过程中应该有一个最小流量保证泥沙不发生淤积, 该流量称为调控下限流量. 根据模拟结果, 黄河下游不同河段适宜的调控流量范围见表 3. 表 3 中三门峡-花园口河段因为受到河道形态和支流入汇的影响, 保证水流泥沙不发生淤积需要很高的流量, 该河段可利用三门峡水库单独调节. 对于花园口以下的河段, 可利用小浪底水库作为调控枢纽, 适宜的调控流量范围是 2390~2900 m^3/s. 根据仿真结果, 在以上流量范围内调控时, 系统收敛. 2002 年黄河下游利用小浪底进行调水调沙试验时[12], 设定含沙量为 20 kg/m^3, 流量为 2600 m^3/s, 也证实了模拟结果是可行的.

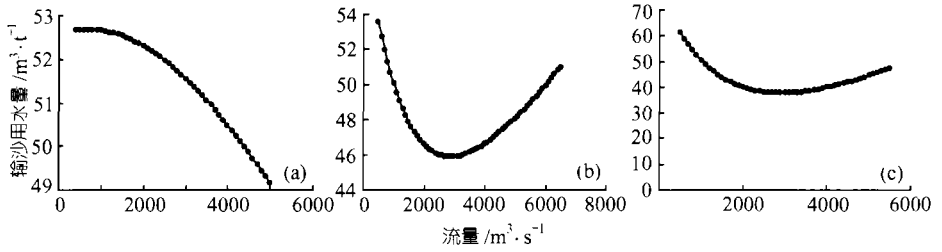

图 5　黄河下游洪水输沙模拟结果

(a) 三门峡-花园口河段; (b) 高村-艾山河段; (c) 艾山-利津河段

表 3 黄河下游不同河段洪水输沙的流量调控范围

河 段	三门峡-花园口	花园口-高村	高村-艾山	艾山-利津
调控流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	>4375	>2390	1062~2900	1031~2900

4 讨论

4.1 流量与输沙用水量关系

从神经网络模型模拟结果可以看出，含沙量较低(小于 20 kg/m^3)时，输沙用水量随流量的增加而下降，说明水流输沙能力提高；当含沙量较高时，不同河段输沙用水量随流量变化规律不同，分析其原因，主要是由于含沙量较高时泥沙淤积导致河道形态调整引起的. 另一方面，由于黄河下游水沙变化的复杂性与河道形态对水沙响应的不确定性，使得流量对输沙用水量的调控出现某种随机性. 根据实测资料，黄河下游不同河段不同含沙量条件下洪水输沙用水量的变化与流量间的关系见图 6. 可以看出，不同河段不同含沙量条件下流量与输沙用水量关系不是很明显. 另外，从三门峡-花园口实测资料中找出含沙量比较相近的洪水过程资料，其输沙用水量和流量之间的相关性不明显，具体见表 4. 显然，对于单次洪水而言，其演进过程受到更多因素的影响，例如河道前期条件、泥沙颗粒组成等等，从而使得流量与输沙用水量之间表现出更大的随机性.

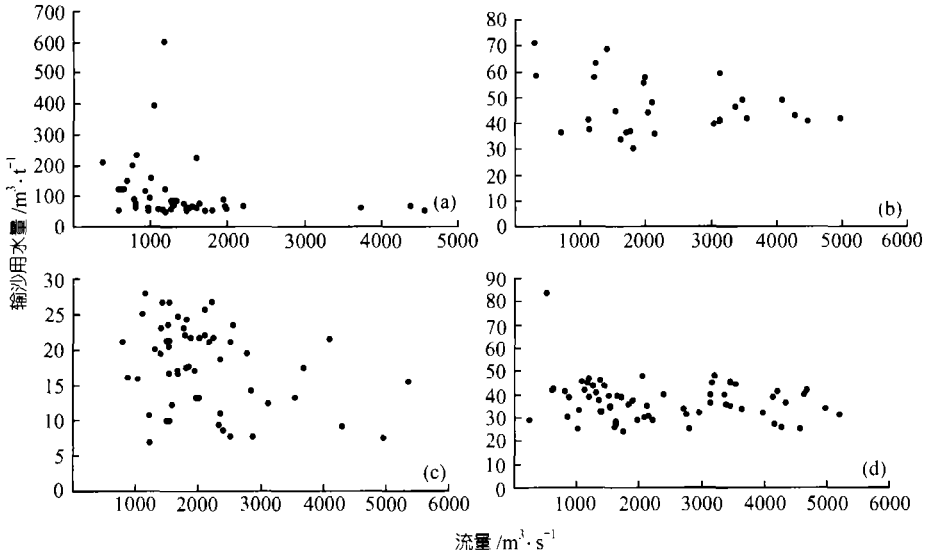

图 6 黄河下游流量与输沙用水量关系

(a) 三门峡-花园口(S<20 kg/m^3); (b) 三门峡-花园口(20 kg/m^3<S<30 kg/m^3); (c) 花园口-高村(S<40 kg/m^3); (d) 艾山-利津(20 kg/m^3<S<40 kg/m^3)

表 4　黄河下游不同流量下输沙用水量

洪水历时	含沙量 /kg·m^{-3}	水量 /m^3($\times10^8$)	沙量 /t($\times10^8$)	流量 /m^3·s^{-1}	冲淤量 /t($\times10^8$)	输沙用水量 /m^3·t^{-1}
1980-10-03~21	18	29.8	0.538	1816	–0.1687	51
1982-09-26~10-06	18	18.7	0.336	1969	0.0348	63
1983-10-04~12	18	35.5	0.639	4567	–0.1826	51
1988-09-22~10-04	18	12.5	0.225	1112	0.0029	57

4.2　黄河下游水沙调控效率分析

根据前面计算分析, 含沙量为 20 kg/m^3 时, 三门峡-花园口河段调控流量大于 4375 m^3/s 才能保证泥沙不发生淤积. 对于实际的工程调控, 实现完全调控有一定的困难. 根据计算结果, 三门峡-花园口河段当流量从 2000 m^3/s 增加到 4000 m^3/s 时, 输沙用水量减少 1.82 m^3/t. 这说明如果以泥沙不发生淤积为控制目标并且通过提高调控流量来实现, 显然并不是合理的选择. 如果以每增加单位流量引起的输沙用水量的变化量作为调控效率指标, 则可反映出流量对输沙用水量调控能力的大小. 含沙量 20 kg/m^3 时, 黄河下游各个河段在不同的范围内, 流量每增加 100 m^3/s 时, 输沙用水量变化量见表 5. 其中不同河段流量取值上下限根据实测资料中流量极值确定, 流量分级中, 包括各个河段调控流量上限和调控流量下限. 从表 5 中看出, 不同河段流量范围内调控效率显著不同. 在流量调控上下限之间, 艾山-利津河段对流量调控最为敏感, 最适宜通过流量调控来提高输沙用水效率; 三门峡-高村河段调控效率最低. 如果不考虑泥沙淤积, 对于黄河下游来说, 则小流量时调控效率最高.

表 5　黄河下游不同河段流量调控效率

河　段	流量范围 /kg·m^{-3}	减小量 /m^3·t^{-1}	流量范围 /kg·m^{-3}	减小量 /m^3·t^{-1}	流量范围 /kg·m^{-3}	减小量 /m^3·t^{-1}
三　花	400~4375	0.0670	4375~5000	0.1376		
花　高	500~2390	0.5936	2390~6500	0.1012		
高　艾	500~1062	0.6352	1062~2900	0.2247	2900~6500	–0.1425
艾　利	500~1031	2.1540	1031~2900	0.6640	2900~5500	–0.3738

对于黄河下游洪水输沙的工程调控, 河道前期形态是一个很重要的影响因素. 由于非汛期小流量情况下泥沙淤积河槽, 使得汛期前期洪水演进规律变化很大, 因此在水沙调控时根据实际情况选择合适的调控时间. 另外, 在整个水沙调控过程中, 目标不仅仅是河道输沙用水, 还包括其他河流管理方面的目标. 例如对河道形态的塑造、对河口湿地生态的影响等等, 因此对不同目标进行综合考虑的基础上, 根据河道、来水来沙和调控水库的具体状况, 选取最优水沙调控方案.

5 结论

黄河下游泥沙问题是黄河治理的首要问题. 如何提高河道水流输沙能力、减少河道泥沙淤积、提高河道输沙用水效率, 对防洪和黄河水资源合理利用具有重要意义. 围绕这些目标已经展开了一些利用河道水利枢纽工程、对进入下游河段的水沙过程进行调控的研究. 本文在已有研究的基础上, 基于多年实测洪水资料, 建立了黄河下游洪水输沙用水量的神经网络模型, 确定了洪水要素和输沙用水量的关系. 在此基础上, 根据控制原理, 以花园口-高村河段为例, 在给定含沙量条件下对流量与输沙用水量的关系进行了模拟. 结果表明该河段流量对输沙用水量的调控作用明显受到含沙量的影响, 当含沙量小于 20 kg/m^3 时, 随流量增大输沙用水量减小; 而当含沙量在 30~200 kg/m^3, 由于河道输沙能力自适应调整, 随流量的增加输沙用水量表现出非单调变化的特性. 文中还就实现给定输沙用水量目标的含沙量和流量进行了反馈仿真、结果表明如果设定合理的控制目标、花园口-高村河段洪水输沙过程完全可以通过入口断面的含沙量和流量进行调控. 通过对黄河下游不同河段洪水输沙用水的模拟仿真, 发现花园口以下河段, 含沙量为 20 kg/m^3 时, 最佳调控流量范围是 2390~2900 m^3/s. 这些研究结果对黄河管理目标的制定和水库调控方案的设计都具有参考意义.

参 考 文 献

1 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水量. 水利学报, 2002, (9): 14~19

2 Tennant, D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1976,1(4): 6~10

3 Richter B D, Baumgartner J V, Wigington R, et al. How much water does a river need. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231~249

4 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究.水利学报, 2002, (10): 1~7

5 刘小勇, 李天宏, 赵业安, 等. 黄河下游河道输沙用水量研究. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(3): 253~262

6 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报, 2000, 55(4): 495~500

7 岳德军, 候素珍, 赵业安, 等. 黄河下游输沙水量研究. 人民黄河, 1996, (8): 32~33

8 Acreman M C, Farquharson F A K, McCartney M P, et al. Managed Flood Releases from Reservoirs: issues and Guidance. Report to DFID and the World Commission on Dams. Wallingford: Centre for Ecology and Hydrology, 2000

9 Rumelhart D E, Durbin R, Golden R, et al. Backpropagation: the basic theory. In: Rumelhart D E, Yves C, eds. Backpropagation: Theory, Architecture, and Applications. NJ: Lawrece Erlbaum, 1995. 1~34

10 Hecht-Nielsen R. Theory of Backpropagation neural networks. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 1989, (1): 593~605

11 White H. Connectionist nonparametric regression-multilayer feed forward networks can learn arbitrary mappings. Neural Networks, 1990, (3): 535~549

12 李国英. 黄河调水调沙. 人民黄河, 2002, 24(11): 1~5