

# 南水北调中线工程对汉江水华影响研究

窦明<sup>1</sup>, 谢平<sup>1</sup>, 夏军<sup>1</sup>, 张万顺<sup>1</sup>, 侯丙亮<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 山东省水利厅小清河管理局, 山东 济南 250013)

**摘要:** 汉江中下游近年来出现水华的根本原因是汉江下游水体污染严重, 氮、磷等污染物浓度过高, 春季光照充足、水温升高, 汉江枯水时长江水位偏高导致汉江流速变缓。在污染负荷保持现状的前提下, 建立水动力学模型和富营养化模型, 并通过在诱发水华的各环境因子样本集中抽样组合, 计算南水北调中线工程调水前与调水后的水华发生概率。结果表明, 调水 145 亿 m<sup>3</sup> 后汉江水华发生的概率将会增加, 而引江济汉工程的兴建能有效控制水华的发生。

**关键词:** 南水北调中线工程; 水华; 富营养化; 汉江

中图分类号: X 522 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)06-714-05

南水北调中线工程是缓解我国华北地区水资源短缺、改善该地区用水状况的大型跨流域调水工程。然而, 调水改变了流域间水资源的自然分布, 水源区水文情势必将发生变化, 而且近年来汉江中下游水质状况正逐步恶化, 水体富营养化问题加剧, 20 世纪 90 年代先后发生了三次严重的水华现象。因此, 应充分认识调水对汉江水环境的影响, 采取适当的工程措施趋利避害, 在维护生态环境可持续发展的基础上, 充分发挥南水北调工程的经济效益是工程规划设计中急需解决的重要课题。

本文建立了适用于汉江流域的水动力学模型和富营养化模型, 并结合统计学枚举法从不调水(现状)、中线调水 145 亿 m<sup>3</sup> 和调水并采取引江济汉工程进行水量补偿三种方案来模拟在各种环境因子组合情况下汉江水华的发生概率, 力求定量描述调水对水华发生概率的影响。

## 1 水华发生概率计算的设计思路

研究发现, 汉江发生水华主要是在三种环境因素共同作用下的结果: 水质条件, 汉江中下游地区排污量日趋加大, 藻类生长所需的氮、磷等营养物质严重过量; 水温条件, 春季气温偏暖致使水温升高; 水文条件, 该年份水文情势发生变化, 与往年相比汉江枯水时相应长江水位偏高, 导致汉江流速变缓。针对以上几点, 选取汉江历年水文水质资料组成四个样本集合(水文条件又分为汉江流量和长江水位两个控制因子), 通过在每个样本集合抽取不同年份的条件因子输入模型计算并检验在该组合情况下是否发生水华, 从而求出在所有组合中发生水华的概率。

收稿日期: 2001-11-01; 修订日期: 2002-01-30

基金项目: 水利部重点基金项目: 南水北调中线工程对汉江中下游环境影响研究

作者简介: 窦明(1975-), 男, 山东淄博人, 武汉大学在读博士生, 主要从事水文水资源及水环境研究。

### 1.1 环境影响因子的样本集合

(1) 调水前水文边界条件 取 1956—1998 年仙桃站流量和汉口站水位历年实测水文资料。在湖北省汉江流域水源区水资源评价中的系列代表性分析表明, 该系列具有较好的代表性。

(2) 调水后水文边界条件 调水后汉江设计流量(分为无引江济汉和有引江济汉两种)采用长江水利委员会规划处调水 145 亿 m<sup>3</sup> 方案下仙桃站流量调算系列, 调算中考虑了区间来水, 中下游河道内外用水回归, 由下游至上游推算水库补偿下泄流量和流量过程; 长江对汉江的顶托通过下游水位以汉口站实测资料反映(不考虑三峡工程的影响)。系列长度与调水前保持一致。

(3) 水质边界条件 取 1992—1998 年水质指标历年实测污染负荷值。选取依据: 汉江水质监测资料在此阶段收集比较详全; 汉江水质状况在早期较好, 水污染问题主要从 20 世纪 90 年代起比较严重, 因此, 所选用的水质资料很有代表性。考虑到国务院对南水北调工程提出的“务必做到先节水后通水, 先治污后通水, 先环保后用水”的原则, 在南水北调通水前, 汉江本身的污染需先治理, 因此在污染负荷削减后, 水华的发生概率将会减小。作为学术探讨, 本文侧重在维持污染现状情况下, 水量变化对汉江水华的影响。

(4) 水温条件 水温资料与水质资料同步监测, 故取 1992—1998 年历年实测水温值。

### 1.2 水华发生概率的计算步骤

针对现状、中线调水 145 亿 m<sup>3</sup> 和调水并采用引江济汉进行补偿三种方案, 按以下步骤计算在各种情况下水华发生的概率(图 1)。

(1) 建立水动力学模型和富营养化动力学模型, 并选取 1992 年和 1998 年实测水文、水质资料对模型的参数进行率定和验证。

(2) 建立仙桃断面流量, 汉口断面水位, 各监测断面水质指标浓度和水温值 4 个样本集合, 各样本集合的元素是每一年的实测资料或设计资料。

(3) 用枚举法按顺序在各样本集合中抽取相应的元素, 生成一组模型计算所需的输入条件。

(4) 将输入的水文水质条件带入水动力学模型和富营养化模型进行模拟计算, 求出各断面的藻类总细胞密度, 并进行水华发生判别, 如果发生水华则累加水华发生的次数。

(5) 检查抽样是否结束, 如果没有结束, 则继续进行(3)、(4)步。

(6) 抽样结束后, 将发生水华的抽样次数与总抽样次数相除, 得该方案下水华发生的概率。

水华发生的概率为年际概率, 表示在随机试验的所有年份里, 水华发生的年数与总年数之比, 而不考虑水华在年内发生的次数和持续的天数, 即不论水华在一年内发生多少次或持续多少天, 在随机试验的总年数中, 均计一次, 这种近似处理方法与实际情况是比较接近的。

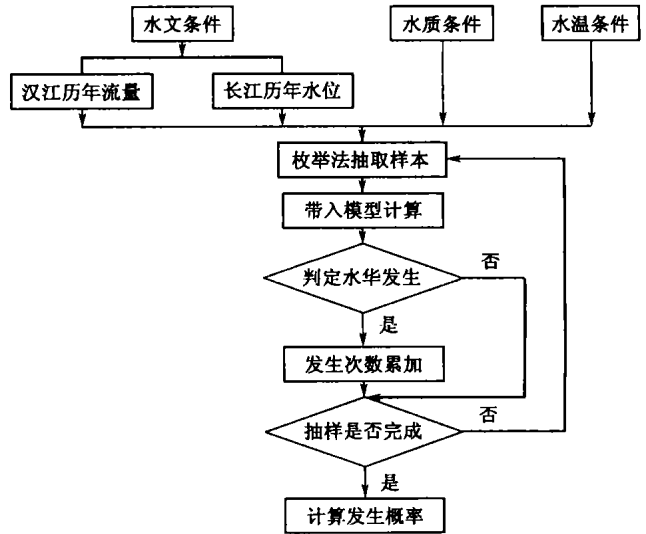


图 1 水华发生概率计算步骤

Fig. 1 Calculation steps of the probability of algalbloom occurrence

### 1.3 水华判断标准的选取

本文依据湖北省环境科学院《汉江中、下游江段藻类现状调查及水华防治对策研究》报告中的富营养化判别标准,并结合汉江历次发生水华的实际情况(汉江武汉段的藻类总细胞密度与正常年度同期相比增加了两个数量级,达 $10^7$ 个/L级),取水体中藻类的碳生物量大于 $400 \text{ mg/L}$ 为判断水华发生的标准。选取不同判断标准将会影响到水华概率的计算结果,在此主要为了定量说明南水北调中线工程对汉江水华的影响。

## 2 应用模型简介

### 2.1 水动力学模型

运用河流水动力学模型可以对河道单元水体的流速、流量、水位和断面面积进行定量地描述。本文采用河流一维水动力学模型,模型计算范围从仙桃至龙王庙(龙王庙断面与汉口水文站距离很近,水面比降很小,因此龙王庙的水位条件可由汉口水文站的水位耦合计算得出),取25个断面,分24段进行。

水流应满足圣维南方程组:

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\text{动量方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + U \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式中  $t$  为时间坐标;  $x$  为空间坐标;  $Z$  为水位;  $Q$  为流量;  $B$  为水面宽度;  $U$  为断面平均流速;  $A$  为过水断面面积;  $q$  为单位长度旁侧入流流量;  $R$  为水力半径;  $n$  为糙率。

### 2.2 富营养化动力学模型

富营养化动力学模型设7个水质变量,即:藻类(PHYT)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、氨氮( $\text{NH}_3$ )、硝酸盐氮( $\text{NO}_3$ )、有机氮(ON)、总磷(TP)。将其划分为四个相互作用的子系统:藻类动力学子系统、氮循环子系统、磷循环子系统和溶解氧平衡子系统,其结构如图2所示。

模型的基本方程是平移-扩散质量迁移方程,在方程里除了平移和扩散项外还包括由生物化学作用引起的源漏项。各水质指标的基本方程表达为

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ -UAC + D_L A \frac{\partial C}{\partial x} \right] + AS \quad (3)$$

式中  $C$  为水质指标的断面平均浓度;  $D_L$  为河流纵向离散系数;  $S$  为水质指标的源漏项。

藻类动力学子系统在富营养化模型中占有重要位置,直接影响了其它子系统。藻类源漏项

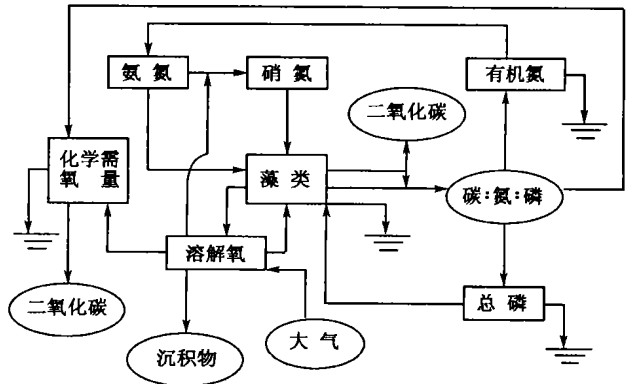


图2 汉江富营养化模型结构

Fig 2 Structure of the eutrophication model in Hanjiang River

可以由藻类生长率、衰减率和沉降率来表示, 其中生长率主要取决于水温、光照、营养物质浓度等环境条件的影响。氮和磷两种元素作为藻类生长所必需的营养物质被摄入, 同时又随着藻类的死亡和内源呼吸过程释放出。溶解氧平衡也受到双重作用: 大气复氧和藻类生长期间光合作用释放出氧是其来源; 藻类的呼吸作用、水体中含碳物质的氧化作用及硝化作用导致了其消耗。有关富营养化模型各水质变量源漏项的表达式可参考文献 [1]。

### 2.3 模型的耦合计算

根据计算需要, 模型的数值求解分为两部分: 用四点隐式差分格式进行线性离散求解水动力学模型方程组, 确定各断面的水位  $Z$ 、流量  $Q$ 、流速  $U$ 、扩散系数  $E_x$  和断面面积  $A$ ; 将求得的水动力学条件与水质初始条件、边界条件代入富营养化模型方程组, 求出各断面的水质变量浓度  $C$ 。

## 3 计算结果与分析

按上述设计思路, 分别对三种方案进行计算, 每种方案抽取  $n = (\text{汉江流量样本数}) \times (\text{长江水位样本数}) \times (\text{水质样本数}) \times (\text{水温样本数}) = 43 \times 43 \times 7 \times 7 = 90\,601$  种组合, 计算结果见表 1。

表 1 计算各种方案概率结果

Table 1 Probability result of each scheme

水华发生情况	现 状	调水 145 亿 $\text{m}^3$	
		无引江济汉	有引江济汉
水华发生次数/次	8 361	12 311	1 164
水华发生概率/%	9.2	13.6	1.3

针对表 1 计算结果, 得出以下结论:

(1) 在假定调水前后水质条件不变的情况下, 无论调水前还是调水后, 汉江发生水华的概率都达 9% 以上, 说明在 20 世纪 90 年代汉江中下游发生的几次水华现象中, 水量减少仅是诱发水华的一个因素, 而水质污染严重则是问题的关键。因此, 要最终解决汉江水华问题, 必须严格执行污染物总量控制和排污许可制度, 加强支流污染治理, 控制点源面源污染。

(2) 调水后水华发生的概率比调水前有一定增加, 其中净增加 4.4%, 相对增加 48%。预示着中线调水 145 亿  $\text{m}^3$  方案的实施将加重汉江中下游富营养化问题, 导致水华发生概率增加。鉴于目前汉江水环境污染治理面临种种困难, 难以一时解决, 因此应考虑制定新的调水方案, 在水量调配上增加丹江口水库枯水期下泄流量, 减少工程所带来的不利影响。

(3) 兴建引江济汉工程将能有效地补偿汉江脆弱的水环境容量, 极大地减少水华的发生概率, 减免南水北调中线工程对汉江中下游带来的不利影响。因此, 随着南水北调中线工程的实施, 一些环境保护配套工程应及时跟上。

1992 年、1998 年之所以会发生水华现象与这两年枯水期汉江水量偏少而长江水位偏高这一特殊的水文情势有关。在长江水位、水质、水温条件不变的情况下, 对 1992 年、1998 年汉江下游仙桃站枯水期平均流量进行调试发现, 当平均流量超过  $530 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 则可达到有效防止水华发生的目的。考虑到当时长江水位的顶托作用, 该流量在寻常年份还可适当缩小, 建议以仙桃流量  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  为警戒流量, 当低于此标准时需引起有关部门的注意。

## 4 结 语

本文建立了汉江水动力学模型和富营养化模型, 并针对导致水华发生的各种环境因素建立样本集合, 通过抽取不同年份的条件因子输入模型计算并检验在该组合情况下是否发生水华, 力求定量地描述调水对水华发生概率的影响。其主要结论为: 南水北调中线工程调水 145 亿  $\text{m}^3$  后, 汉江水华发生的概率将会增加。这一结论对将来加强流域生态规划建设和环境保护管理, 以及调水对汉江中下游流域生态经济持续发展的影响及补偿等问题有一定的参考价值。

参考文献:

- [ 1 ] 夏 军, 窦 明, 等. 汉江富营养化动态模型研究[ J ]. 重庆环境科学, 2001, 19(7): 20—23.
- [ 2 ] 叶守泽, 夏 军, 等. 水库水环境模拟预测与评价[ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [ 3 ] 雒文生, 宋星原. 水环境分析及预测[ M ]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.

### **Influence of the water transfer project from south to north (middle route) on algalbloom in Hanjiang River**

DOU Ming<sup>1</sup>, XIE Ping<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>1</sup>, ZHANG Wan-shun<sup>1</sup>, HOU Bing-liang<sup>2</sup>

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Xiaoqing River Authority, Water Resources Bureau of Shandong Province, Jinan 250013, China)

**Abstract:** The basic reasons of algalbloom occurrence in middle and lower reaches of Hanjiang River are terrible pollution of water in lower reaches, sun light and rising water temperature in spring, and the slow velocity of flow in Hanjiang River as the result of low water in Hanjiang River as well as relatively high water level in Yangtze River. A hydrodynamics model and eutrophication model are established, providing pollution load maintains the status quo. By sampling in each aggregate of environmental factor which conduces to algalbloom, the probability of algalbloom occurrence around transferring water are calculated by using the models. The result indicates that the probability will be increased after transferring 14.5 billion  $\text{m}^3$  water from Hanjiang River, but decreased after finishing of the water transfer project from Yangtze River to Hanjiang River.

**Key words:** water transfer project from south to north(middle route); algalbloom; eutrophication; Hanjiang River