

文章编号: 0559-9350(2005)06-0727-06

南水北调中线工程不同调水方案下的汉江水华发生概率计算模型

谢平¹, 窦明², 夏军^{1,3}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 郑州大学 河南 郑州 450000; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为了评估南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响, 在汉江水华发生成因机理分析结果的基础上, 对汉江水华发生的概率进行了定性分析; 提出汉江水华发生概率的计算模型, 并对汉江水华发生的概率进行了定量计算。该模型由水体富营养化模型、河流一维水动力学模型以及随机数生成模型组成, 它不仅模拟汉江水华发生的机理, 而且可以对诱发水华的各种因子进行随机抽样组合, 从而求出各方案实施后汉江水华的发生概率。计算结果表明南水北调中线工程调水方案实施后将增加汉江水华发生的概率, 而引江济汉工程的兴建将大大减少汉江水华发生的概率。汉江自身的水污染治理是减少水华发生概率的最根本措施。丹江口水库和引江济汉工程的联合调度将减小汉江水华发生的概率。

关键词: 南水北调中线工程; 汉江; 水华; 概率; 计算模型

中图分类号: X143

文献标识码: A

自 20 世纪 90 年代以来, 汉江中下游发生过 3 次严重的水华事件, 造成的不良后果直接影响到南水北调中线工程的调水任务和沿江地市的经济发展和社会稳定。经调查发现, 除了气候、水质因素外, 3 次水华事件还有其相似的汉江中下游水文要素成因^[1]。因此, 研究中线调水后汉江流域的水文状况, 分析水文变化对水华发生概率的影响是保证中线工程调水安全的关键问题之一。本文通过对不同调水方案下汉江水华发生概率的定性分析与定量计算, 力图为中心工程的合理调度和水华防治工作提供参考依据。

1 水华发生概率定性分析

通过研究发现, 汉江水华主要是下面 3 个因素共同作用的结果^[1]: (1) 水质因素。汉江中下游地区排污量日益严重, 藻类生长所需的氮、磷等营养物质严重过量; (2) 气候因素。春季气温偏暖致使水温升高; (3) 水文因素。出现水华的年份水文情势发生变化, 受长江较高水位顶托和汉江流量减少的共同作用, 导致汉江水流速度变缓, 流速减小又使汉江水体表现出湖泊特性, 为水华的发生提供了必要的环境场所。

自 1990 年以来, 随着汉江中下游沿江地市社会经济的快速发展, 排入汉江的污水中氮、磷污染物含量很高, 经比较发现, 这些年的枯水期, 汉江水质状况都已基本达到富营养化标准, 藻类生长所需的氮、磷营养指标已远远超过其最大生长速度的需求^[1], 因此可以认为, 藻类生长的物质基础是饱和的。在水华发生期间, 汉江中下游也出现了气温偏高, 光照充足的气候条件, 然而在 90 年代 3 次水华发生之外的其它年份或月份, 其水温也相对偏高, 却并未发生水华现象, 考虑到水温受气温的影响, 年际间周期性变化比较稳定, 可认为水温等气候因子不是造成水华发生的关键因子^[1]。同时, 为了突出中线调水对

收稿日期: 2004-07-01

作者简介: 谢平(1963-), 男, 湖北松滋人, 博士, 教授, 主要从事变化环境下的水文水资源及水环境问题研究。

E-mail: pxie@whu.edu.cn

汉江水华发生概率的影响,本文在定性分析时,假定已满足水质、气候条件,因此仅比较现状和调水后的水文条件,即可预知水文变化对水华发生概率的影响。

对于调水方案的选取,主要依据长江水利委员会规划处拟定的中线调水 82 亿 m^3 、145 亿 m^3 和 145 亿 m^3 加引江济汉补偿工程 3 种方案。其中引江济汉工程是汉江中下游的补偿工程,由枝江市七星台镇的大布街挖渠引出长江水,渠首引水流量为 $500m^3/s$,经沙洋县境内的长湖上游,最后在潜江市高石碑镇入汉江,南水北调中线工程与引江济汉工程之间的位置关系如图 1 所示。因为水华都是在枯水期发生的,所以水文资料选取汉江仙桃站历年 2~ 3 月份平均流量作为评价参考,将以上 3 种方案与现状情况下汉江流域的水文资料归纳整理,见表 1。

表 1 不同调水方案下仙桃站 2~ 3 月份平均流量(单位: m^3/s)

年份	现状	82 亿 m^3	145 亿 m^3	引江济汉*	年份	现状	82 亿 m^3	145 亿 m^3	引江济汉*
1968	497	692	548	660	1984	1 201	874	562	649
1969	671	876	582	637	1985	954	874	525	623
1970	529	682	501	553	1986	808	874	499	570
1971	629	678	492	583	1987	615	496	504	539
1972	949	875	566	637	1988	964	697	583	664
1973	600	495	499	548	1989	1 265	751	729	825
1974	1 049	681	500	555	1990	1 507	874	502	688
1975	1 158	682	495	572	1991	711	484	492	558
1976	1 134	875	591	676	1992	484	405	376	596
1977	368	487	494	622	1993	1 173	452	492	606
1978	318	484	492	510	1994	849	511	492	566
1979	302	338	337	417	1995	720	571	519	621
1980	558	680	503	575	1996	643	419	441	569
1981	943	688	507	581	1997	1 073	574	492	583
1982	881	686	519	621	1998	361	319	358	582
1983	904	701	534	670					

* 注:引江济汉方案是指在中线调水 145 亿 m^3 的前提下再实施引江济汉工程。

发生水华的 3 个年份(1992 年、1998 年和 2000 年)仙桃站 2~ 3 月份平均流量都在 $500m^3/s$ 以下,同时结合以前的研究结果^[1],本文以该值作为定性判断水华发生的标准,对 4 种情景下的流量资料进行统计,主要结论为:(1) 现状情况下,汉江水华的发生次数为 6 次,其发生概率是比较高的。当然,这并不意味着发生过 6 次水华,而是反映了在这段时期内能满足水华发生水文条件的年份有 6 次。(2) 调水 82 亿 m^3 、调水 145 亿 m^3 后水华发生的次数将分别增加到 10 次和 15 次,这说明中线调水后,汉江水华的发生概率将大大增加。其中调水 145 亿 m^3 后,很多年份的汉江中下游枯水期流量在 $500m^3/s$ 以下,某些

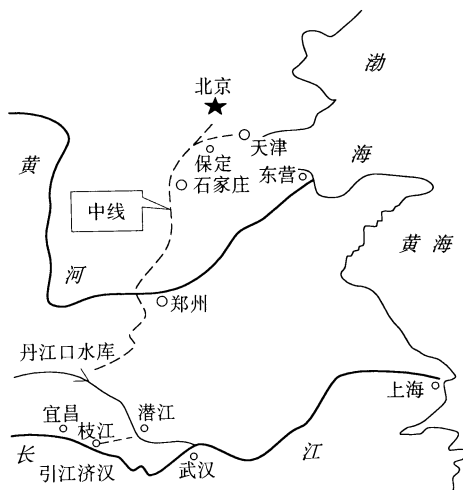


图 1 南水北调中线工程与引江济汉工程位置关系

年份可能不发生水华,但是却处于水华发生的危机边缘(如1970年、1980年、1990年等),可以认为在这种情景下,水华的发生概率是相当大的。(3)调水 $145\text{亿}\text{m}^3$ 加引江济汉补偿后水华的发生次数仅为1次,水华发生概率锐减。可见,引江济汉工程的实施为补偿汉江中下游水环境容量,对防止水华的发生可以起到关键作用。如果采取中线调水 $82\text{亿}\text{m}^3$ 再加引江济汉补偿,则为中线工程的实施加上双倍保险。

2 汉江水华发生概率计算模型

在定性分析的基础上,本文提出汉江水华发生概率计算模型,如图2所示,它主要由水体富营养化模型、河流一维水动力学模型以及随机数生成模型组成。该模型可以模拟汉江水华发生的机理,并对诱发水华的各种因子进行随机抽样组合,求出各方案实施后汉江水华的发生概率,从而为前面的定性分析提供理论依据。

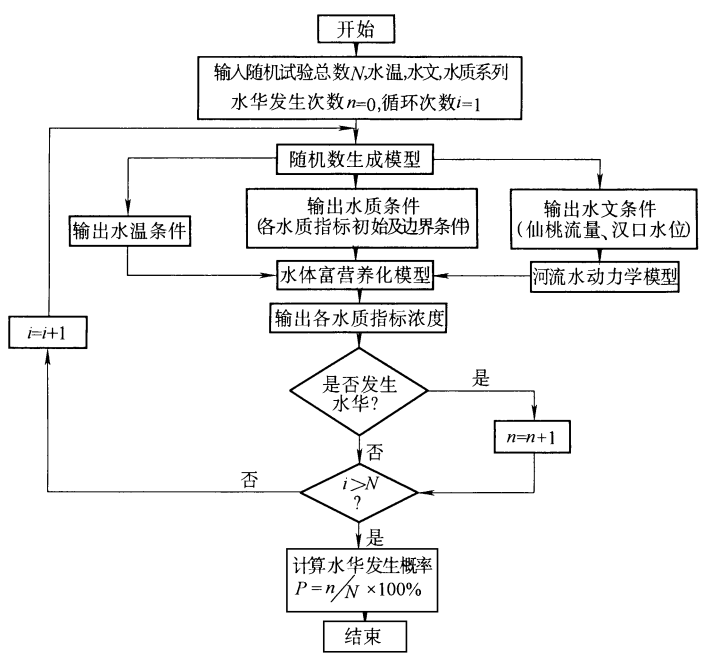


图2 汉江水华发生概率计算模型

2.1 富营养化模型简介 20世纪90年代初,美国国家环境保护局研制了WASP(Water Quality Analysis Simulation Program)综合水质生态模型^[2]。该模型可模拟水体的运动过程,水体中常规污染物、有毒污染物的迁移转化规律以及其水质成份相互间作用的水质-生态关系。它采用一种模块式拼装的单元结构,针对不同模拟对象(湖泊、水库和河流)通过单元组合可以较方便地建立一维、二维和三维水质模型,其中水质模型的部分参数和水质边界条件等都可以随时间变化,适用于流动性较强的水体(如河流)水质模拟。本文采用WASP模型中的富营养化动力学模型来模拟汉江水华发生期间藻类的生长、死亡变化过程以及各水质成份之间的相互作用机理。富营养化动力学模型设有7个水质变量,分别为:藻类(PHYT)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、有机氮(ON)、总磷(TP)。它们被划分为4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。

模型的基本方程是平移-扩散质量迁移方程,在方程里除了平移项和扩散项外还包括由生物化学作用引起的源漏项。平移项和扩散项能反映出流速和扩散作用对水体中藻类数量累积的影响,流速越慢则累积时间越长,藻类的浓度也就越高,扩散作用则反之。各水质指标的基本方程表达为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x} \left[-UAC + E_x A \frac{\partial C}{\partial x} \right] + AS \quad (1)$$

式中: A 为断面面积; C 为水质指标的断面平均浓度; U 为流速; E_x 为河流纵向扩散系数; S 为水质指标的源漏项; x 为距离; t 为时间。

藻类动力学子系统在富营养化模型中占有重要位置, 直接影响了其它几个子系统。藻类的源漏项 S_1 表达式为:

$$S_1 = (G_{p1} - D_{p1} - K_{s4}) \times PHYT \quad (2)$$

式中: G_{p1} 为藻类的生长率; D_{p1} 为藻类的衰减率; K_{s4} 为藻类的沉降率; $PHYT$ 为水体中藻类的浓度。

生长率 G_{p1} 是一个复杂函数, 该函数主要取决于水温、光照、营养物质浓度以及水流速度 4 个环境因素。即

$$G_{p1} = G_{\max} \times G(T) \times G(I) \times G(N) \times G(U) \quad (3)$$

式中: G_{\max} 为藻类的最大生长率; $G(T)$ 、 $G(I)$ 、 $G(N)$ 、 $G(U)$ 分别表示温度、光照、营养物质以及水流速度对浮游植物生长的制约函数。

各影响因子的制约函数表达如下:

$$G(T) = \frac{T}{T_{\text{opt}}} \times \exp \left[1 - \frac{T}{T_{\text{opt}}} \right] \quad (4)$$

式中: T 为水温, $^{\circ}\text{C}$; T_{opt} 为藻类生长最佳水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$G(I) = \frac{L}{L_{\text{opt}}} \times \exp \left[1 - \frac{L}{L_{\text{opt}}} \right] \quad (5)$$

式中: L 为光辐射量, lx ; L_{opt} 为藻类生长最佳光辐射量, lx 。

在富营养化模型里考虑了两个重要的营养物质: 氮和磷, 因此营养物质的制约函数 $G(N)$ 可用下式计算:

$$G(N) = \min \left[\frac{TN}{K_{mn} + TN}, \frac{TP}{K_{mp} + TP} \right] \quad (6)$$

式中: TP 、 TN 分别为水体的总磷和总氮浓度, mg/L ; K_{mn} 、 K_{mp} 分别为藻类摄取氮和磷的米氏常数, mg/L 。

通过对汉江水华发生期间藻类和水流速度监测资料的对比分析, 本文给出水流速度对浮游植物生长的制约函数 $G(U)$ 表达式为

$$G(U) = \alpha \times \exp(\beta U) \quad (7)$$

式中: α 、 β 分别为流速对藻类生长的影响常数, 其中 $\beta < 0$ 。

藻类死亡率主要考虑了两方面作用: 藻类的呼吸作用和浮游动物的捕食作用, 即:

$$D_{p1} = K_{1D} + K_{1R} \theta_{1R}^{(T-20)} \quad (8)$$

式中: K_{1D} 为由于浮游动物的捕食造成藻类的死亡率, $1/\text{d}$; K_{1R} 为藻类的呼吸率, $1/\text{d}$; θ_{1R} 为呼吸率的温度系数, 无量纲。

藻类的沉降率表达为

$$K_{s4} = \frac{V_{s4}}{D} \quad (9)$$

式中: K_{s4} 为藻类有效沉降率, $1/\text{d}$; V_{s4} 为藻类净沉降速度, m/d 。有关富营养化模型其它水质变量源漏项的表达式曾在其它文章中有过叙述, 本文不再详细说明, 可见参考文献[2]。

2.2 水华发生概率计算流程 在本文研究中, 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。换句话说, 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, 均只计算一次, 这种近似处理方法与实际情况比较接近。

考虑到未来可能发生的各种情况, 南水北调中线工程对汉江中下游水华影响的模拟分析按如下资料系列进行组合: ①引、调水规模: 丹江口水库现状条件下、中线调水 82 亿 m^3 和中线调水 145 亿 m^3 ; ②

调水前水文边界条件:取 1968~ 2000 年仙桃站实测流量变化过程和 1956~ 2000 年汉口站实测水位变化过程;③调水后设计流量(分无引江济汉和有引江济汉):直接采用长江水利委员会规划处中线调水 82 亿 m^3 和 145 亿 m^3 方案下仙桃站 1956~ 1998 年的多年调节计算系列,调算中考虑了区间来水,中下游河道内外用水回归,自下游至上游推算水库补偿下泄流量和流量过程;④水质边界浓度:取 1992~ 1998 年各水质指标的实测污染负荷值;⑤水温资料:取 1992~ 1998 年实测水温变化过程。

针对以上资料,建立水质、气候、水文样本集合,其中水文集合又分为汉江流量和长江水位两个控制因子,而汉江流量则包括现状情况下、调水 82 亿 m^3 、调水 145 亿 m^3 和调水 145 亿 m^3 加引江济汉补偿 4 种方案。采用混洗线性同余数法^[9]生成 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机数 $N = 50000$,通过随机数对上述样本集合进行随机组合,并以此作为河流一维水动力学模型和富营养化动力学模型^[2]的输入,然后计算各断面水质变化过程,并根据水华判别标准计算南水北调中线工程调水前后汉江水华发生的概率。

到目前为止尚未有确切定义水华发生的藻类总细胞密度数量标准,本文依据相关参考文献中的富营养化判别标准^[3-5],并结合汉江历次发生水华的实际情况,仅取藻类总细胞密度 1×10^7 个/L 作为判断水华发生的标准。

2.3 计算结果分析 在水华概率的计算中,汉江水质、气候条件和长江水文条件都是在现状情况下,只有汉江水文条件因调水方案不同而出现几种情景,这主要因为本文研究主要集中在中线调水对汉江中下游水华发生概率的影响上,至于其它的情景分析可在今后的研究中继续展开。通过计算,得出的主要结论为:(1)在现状的水文条件下,汉江水华的发生概率为 9.2%。该值似乎比定性分析中现状情况下 31 年发生 6 次的概率小,这主要是因为在水华发生的水文成因中,不仅受汉江枯水期流量偏小的影响,还要受长江水位偏高顶托作用的影响,因此当在定量计算中综合考虑这两个因子时,水华概率要小于定性分析的结果。(2)中线调水 82 亿 m^3 和 145 亿 m^3 后,汉江水华发生的概率分别为 10.2% 和 13.6%,调水后比调水前水华发生的概率都有所增加,其概率增加的趋势与定性分析相同。这预示着中线调水 82 亿 m^3 和 145 亿 m^3 方案的实施,将对汉江中下游的水华发生概率和水环境容量有较大的影响。(3)中线调水 145 亿 m^3 加引江济汉工程兴建后,汉江水华发生的概率减少到 1.3%,这也与前面定性分析的结果相吻合。由此可见,引江济汉工程的兴建对于有效地补偿汉江脆弱的水环境容量,缓解南水北调中线工程对汉江中下游带来的不利影响有重要的现实意义。(4)在假定调水前后水质条件不变的前提下,无论调水前还是调水后,汉江发生水华的概率都达 9% 以上,这说明在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产生的关键。因此,要想最终解决汉江水华问题,必须从污染治理角度入手,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。

自 1990 年以来,汉江中下游水质污染状况比较严重,本文的计算仅为水质条件保持在现状情况下,这与今后汉江流域污染治理工作的大力展开存在一定的分歧。然而,定量计算的结果反映出当前汉江中下游水环境中存在的隐患问题,为中线调水的顺利实施和水华发生的防治提供了参考依据。

3 建议

在对汉江水华问题进行定性分析和定量计算的基础上,本文提出如下建议:(1)南水北调中线工程的实施将对汉江中下游的水文状况带来较大的影响,从而出现一系列的生态环境问题。要想使中线工程保质保量的完成,相应的水量补偿工程和水资源保护配套工程必须及时跟上,这样才能在保证水源地生态环境可持续发展的基础上发挥工程最大的经济效益。(2)汉江流域污染综合防治工作是南水北调中线工程供水安全的前提保障。必须高度重视对水源区的生态环境保护,通过采取加大污染治理力度,减少进入丹江口库区及中下游沿江地市的污染负荷等措施,为工程的实施提供一个良好的运行环境。(3)将丹江口水库和引江济汉工程联合调度与汉江水华预警紧密结合起来,通过对丹江口水库下泄流量和引江济汉工程来水量的优化调度,增加枯水期中下游河道流量和流速,从而避免在汉江中下游再次出现易于发生水华的环境场所。(4)考虑到长远的汉江水环境保护,需要继续加强水污染控制与依法管理

工作。同时,要与流域规划和治理部门密切配合,尽早积极开展和参与汉江流域水量水质统一管理的研究工作,真正做到汉江污染源的有效控制。只有做到这一点,才能从根本上解决汉江中下游的水华问题。

致谢:本研究得到了水利部南水北调规划设计管理局、湖北省南水北调中线工程办公室、湖北省环境保护局的资助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献:

- [1] 谢平,夏军,等.南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(1)——汉江水华的关键因子分析[J].自然资源学报,2004,19(4):418-423.
- [2] Robert B Ambrose, Tim A Wool, James L Martin, John P Connolly, Robert W Schanz. WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model theory, user' s Manual, and programmer' s Guide[R]. Environmental Research Laboratory, U. S. E. P. A. 1991.
- [3] 杨红,任志远.中国湖泊的富营养化评价研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2000,28(4):104-107.
- [4] 吴琪.以浮游植物评价太湖春季水质污染及富营养化[J].环境导报,2000,2:32-35.
- [5] 姚维志.以浮游植物评价金堂水库富营养化[J].重庆环境科学,1996,18(1):55-57.
- [6] 徐士良.FORTRAN 常用算法程序集[M].北京:清华大学出版社,1995.

Water bloom occurrence probability calculation model in Hanjiang River under different water transfer schemes of the middle route of South to North Water Transfer Project

XIE Ping¹, DOU Ming², XIA Jun^{1,3}

(1. Wuhan University, Wuhan 430072; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The model for calculating the occurrence probability of water bloom in Hanjiang River was put forward and the probability was calculated quantitatively. The model consists of a water body eutrophication model, a 1-D river hydrodynamic model and a random generation model. It not only simulates the generation mechanism of water bloom, but also randomly assembles all sorts of factors inducing water bloom. The calculation results indicate that the probability of water bloom occurrence will increase if $82 \times 10^8 \text{ m}^3$ or $145 \times 10^8 \text{ m}^3$ water was transferred from Hanjiang River. But the probability will remarkably decrease if the diversion project for transferring the water from Yangtze River to Hanjiang River is established. The water pollution control of Hanjiang is the most important measure for reducing the occurrence probability of water bloom. The joint regulation of Danjiangkou reservoir and water transfer project from Yangtze River to Hanjiang River will reduce the occurrence probability of water bloom in Hanjiang River.

Key words: water bloom; occurrence probability; Hanjiang River; South to North Water Transfer Project; calculation model

(责任编辑:王成丽)