

文章编号: 1004-8227(2004) 03-0282-04

汉江水华水文因素作用机理 ——基于藻类生长动力学的研究

王红萍¹, 夏 军^{2,3}, 谢 平³, 窦 明³

(1. 武汉大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430079; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程
重点实验室, 北京 100101; 3. 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)

摘 要: 在相关文献的基础上总结影响汉江水华的水文因素包括流量、流速和水面比降, 根据河流动力学理论, 讨论了它们之间的内在联系。在此基础上, 从生物生长动力学的角度, 将连续流反应器原理应用于汉江水华现象, 提出了汉江连续流生物反应器模型, 并根据 Monod 方程分析, 认为汉江中的藻类浓度与水流速度应成指数关系。由此, 建立了汉江藻类浓度与水流速度关系数学模型 $a = m \exp(k/V)$ 。利用汉江 1992 年至 2000 年实测资料, 通过回归分析进一步确定了汉江的藻类浓度与水流速度函数关系中的常数 $m = 8.9759$, $k = 0.9054$, 相关系数 $r = 0.9244$ 。最后, 对流速、流量和长江水位对汉江水华的作用机理进行了分析, 揭示了水文因素影响汉江水华的作用机理。

关键词: 连续流反应器; 水华; 汉江; 水文因素; Monod 方程

文献标识码: A

自 20 世纪 90 年代以来, 汉江已发生三次严重的水华现象, 既严重影响了以此为饮用水源的广大居民的身体健康, 又给当地带来巨大的经济损失。卢大远、陈根祥和窦明通过各自的研究都认为气候、生物和水文因素是汉江发生水华的重要影响因素^[1~3], 况琪军和谭铁强从生物角度对汉江的藻类种群特性进行了较为细致的研究^[4,5], 夏军则从模型的角度进行了研究^[6]。本文将从生物生长动力学的角度, 用生物反应器原理和 Monod 方程分析水文因素(包括流速、流量)对汉江藻类浓度的影响, 以揭示水文因素影响汉江水华的作用机理, 对富营养化河流水华的发生条件的研究、丰富生物反应器理论和 Monod 方程的应用具有重要价值, 对预测南水北调中线工程对汉江水华的影响和确定南水北调中线工

程调水方案和补偿措施有重要意义。

1 与汉江“水华”相关的水文因素

陈根祥和窦明明明确指出汉江水华与水文因素直接相关^[2,3], 在三次水华发生期间, 汉江下游流量、流速均较未发生水华的年份明显小, 且存在长江较高水位的顶托作用。现根据窦明等提供的数据^[4]作归一化处理(见表 1~表 3), 可以明确地看出流量、流速和水面比降与汉江发生水华的相关性。表 1~表 3 中, 各断面之间的关系见图 1。

根据河流动力学, 以上提到的流量、流速、长江水位之间存在着函数关系。这种关系可以表示为图 2。

表 1 仙桃断面历年 2、3 月份平均流量

Tab. 1 Average Flow in Xiantao in Feb. and Mar.

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
流量	485.1	1 177.4	850.0	718.1	643.8	1 069.8	363.1	639.7	360.6
归一化	0.69	1.68	1.21	1.02	0.92	1.53	0.52	0.91	0.51

* 表中归一化方法为: 各年平均/各年平均的多年平均值。

收稿日期: 2003-03-10; 回稿日期: 2003-07-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 KZCX2-SW-317 和国家自然科学基金项目(50279049)

作者简介: 王红萍(1969-), 女, 湖北省新洲人, 讲师, 在职博士生, 研究方向为水环境和水污染控制工程。

表 2 宗关断面历年 2、3 月份平均流速

Tab. 2 Average Flow Velocity and Algae Concentration in Zongguan in Feb and Mar

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
流速	0.213	0.583	0.410	0.319	0.396	0.479	0.130	0.414	0.168
归一化	0.62	1.69	1.18	0.92	1.14	1.38	0.38	1.20	0.48
藻类浓度 ^a (万个/L)	2 104	40.5	66.2	42.6	108	50.6	3 269	5 170	

* 表中归一化方法同表 1.

表 3 仙桃—汉口断面历年 2、3 月份平均水位差

Tab. 3 Difference of Average Water Level Between Xiantao and Hankou in Feb and Mar

年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
平均水位差	8.00	10.47	9.84	8.86	10.96	9.68	5.70	10.86	7.42
归一化	0.88	1.15	1.08	0.97	1.21	1.06	0.63	1.20	0.82

* 表中归一化方法同表 1.

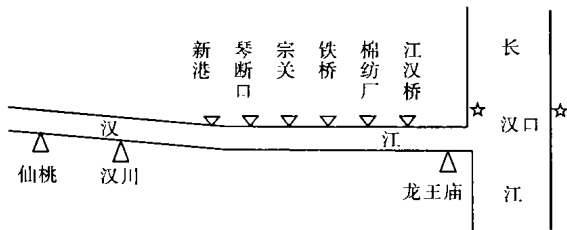


图 1 汉江水文断面分布示意图

Fig. 1 Sketch Map Showing Distribution of Cross Section in Hanjiang River

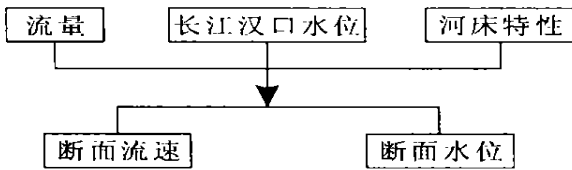


图 2 河流水文因素关系图

Fig. 2 Relation Among Hydrological Factors

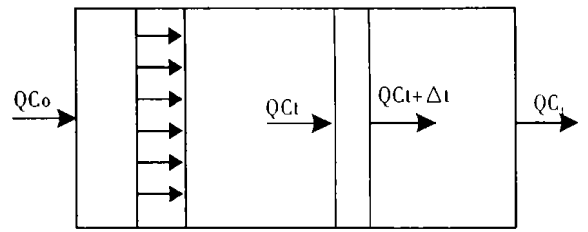


图 3 活塞流反应器

Fig. 3 Plug Flow Reactor

2.2 汉江藻类生长连续流反应器模型

“水华”发生的实质是水体中的藻类急剧增殖(汉江的优势藻类是浮游硅藻),流动的江水符合推流式连续流生物反应器流体特性,因此,为了考察汉江的藻类生长特征,建立了如图 4 所示的汉江藻类生长连续流生物反应器模型。

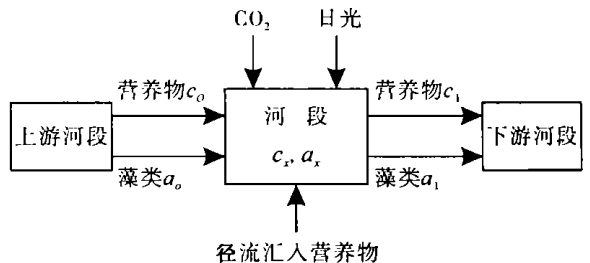


图 4 汉江藻类生长连续流生物反应器模型示意图

Fig. 4 Continuous Flow Biological Reactor Model for Algae Growth in Hanjiang River

2 汉江水华水文因素作用机理

2.1 连续流生物反应器^[7]

在反应器理论中,进料出料都是连续不断地进行的,具有稳定流特性的反应器称为连续反应器。有两种相对的理想类型——活塞流反应器和连续搅拌反应器。活塞流反应器(见图 3 所示)中,流体在流动方向无混合,只在垂直与流体流动的方向混合,又称为推流式的连续反应器;连续搅拌反应器的特征是,整个反应器中,流体完全混合。

在反应器中进行的生化反应,出流的生物浓度由进流组分特性、生化反应特性、温度、反应时间(即在反应器中的停留时间)和流体的水力学特性决定。

2.3 汉江藻类生长动力学——Monod 方程的应用

2.3.1 汉江初春藻类生长特性 在汉江水体中,初春始,藻类生长条件渐趋适宜,藻类生长速度相应加快,其此增长速度可表示为:

$$\mu = \frac{da/dt}{a} \quad (\text{即: } \frac{1}{a} da = \mu dt) \quad (1)$$

式中 μ 为藻类比生长速度, 即单位时间内的藻类的生长, 给定条件下, 某种藻的 μ 达最大值时为比生长速度 μ_{max} 。给定条件包括藻的种类和可能存在的其他生物等生物条件和营养、温度、光照等理化因子。据此, 某河段藻类浓度与河水中藻类比生长速度和河水在该河段停留的时间密切相关, 引入停留时间因素(T), 并解此微分方程得:

$$a_1 = a_0 \exp(\mu T) \quad (2)$$

式中: a_1 ——流出某河段的藻类浓度, mg/L;

a_0 ——流入某河段的藻类浓度, mg/L;

T ——河水在该河段的停留时间(即藻类生长时间)。

可见, 此时汉江某断面藻类的浓度 a_1 取决于来水中的浓度 a_0 、藻类比增长速度和河水在该河段的停留时间。

2.3.2 河水藻类浓度与流速的关系 由以上分析, 流出某河段的河水藻类浓度 a_0 与河水在该河段的停留时间 T 成指数关系, 而对于一定长度的河段, 停留时间 T 由该河段的平均流速决定:

$$T = L / v \quad (3)$$

式中: L ——河段长度; v ——该河段的平均水流速度。

如果以某个断面的平均流速 v 代替河段的平均流速,

$$T \propto \frac{1}{v} \quad (4)$$

由式(2)、式(4), 在除流速以外的其他条件不变的情况下

$$a_1 = a_0 \exp(k/v) \quad (5)$$

式中: k ——混合常数;

因此, 当用某断面河水的藻类浓度 a 代替 a_1 时, a 和 $1/v$ 之间的关系可以表达为:

$$a = m \exp(k/v) \quad (6)$$

式中: m ——与上游来水藻类浓度相关的常数。

2.3.3 参数的确定 忽略其他因素的影响, 取汉江下游 1992~2000 年宗关断面的藻类浓度和流速(见表 2)利用此指数关系进行统计分析, 得到式(7), 相关系数 $r = 0.9244$, 如图 5 所示。

$$a = 8.9759 \exp(0.9054/v) \quad (7)$$

根据合田 健先生界定赤潮的标准^[9], 结合汉江发生水华时的藻类浓度, 以藻类浓度 $a = 500$ 万个/L 作为春季水华的警戒值, 则发生水华警戒水流速度 $v = 0.225$ m/s(宗关断面)。以此预测 1992~2000 年水华发生情况均与实际相符。

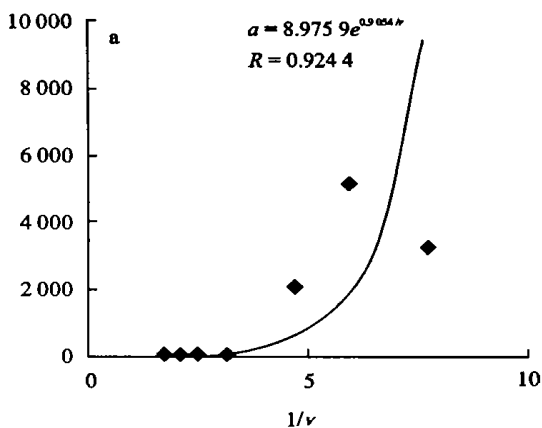


图 5 汉江宗关断面 1992~2000 年 2、3 月份藻类浓度 a 与流速 v 关系图

Fig. 5 Relation Between Algae Concentration and Flow Velocity

3 水文因素作用的讨论

3.1.1 流速 根据以上理论和统计分析, 流速是决定汉江下游春季藻类生长的关键的动力学因子, 汉江藻类浓度与流速的倒数成指数关系。

3.1.2 流量 流量既影响河水水质, 同时又是断面流速的决定因素。众所周知, 流量增大有利于河水中有有机物、氮、磷等营养物的稀释, 从而藻类的比增长速度将会减小, 有利于抑制水华的发生。另一方面, 流量增大也有利于提高水流速度。

3.1.3 长江水位 上游来水量一定的情况下, 下游水位抬高, 导致水面比降减小, 根据水力学能量方程^[10], 水流速度将减小, 因此对抑制水华的发生是不利的。

3.1.4 小结 综上所述, 水文因素的作用可归结到图 6。

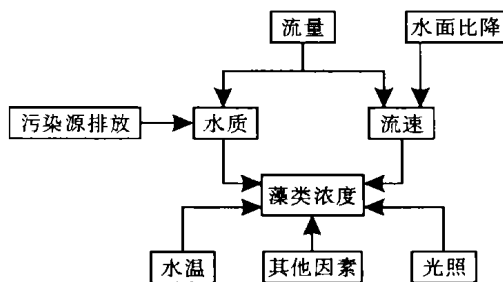


图 6 藻类浓度相关因素框图

Fig. 6 Factors Relative to Algae Concentration in Hanjiang River

4 结语

(1) 以上基于藻类生长动力学的研究, 应用连续

流生物反应器原理和 Monod 方程, 得到了反映汉江藻类浓度与水流速度的指数关系的数学模型 $a = m \exp(k/V)$, 该模型从理论上解决了流速对汉江藻类生长的作用, 对河流具有广泛适用性, 所涉及的参数 k 值具有明确的物理意义, 由水文、光照、和营养物等条件决定, 为模型的进一步研究打下了基础。

(2) 以上还具体探讨了水文因素对河流藻类浓度的影响, 得到了汉江在目前水质条件下, 宗关断面藻类浓度与流速的函数关系为 $a = 8.9759 \exp(0.9054/V)$, 并提出了在该断面发生水华的警戒流速为 0.225m/s , 这为更准确地预测南水北调中线工程对汉江水环境的影响、南水北调中线工程调水方案和补偿工程的确定提供了更充分的理论依据, 对富营养化河流水华的发生条件的研究也有重要意义。

(3) 上述数学模型中流速是唯一的水文参数, 而流速是直接测得的, 这对提高模型的准确性和实用性非常有利。

(4) 该研究为丰富连续流生物反应器理论和 Monod 方程的应用提供了实例。

参考文献:

- [1] 卢大远, 刘培刚. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2): 28~31.
- [2] 陈根祥, 胡高平, 张德兵. 汉江发生“水华”的水文因素[J]. 长江职工大学学报, 2002, 19(1): 57~58.
- [3] 龚明, 谢平, 夏军, 等. 汉江水华问题研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 557~561.
- [4] 况琪军, 谭渝云, 万登榜, 等. 汉江中下游江段藻类现状调查及“水华”成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(1): 65~70.
- [5] 谭铁强, 黄渤, 徐立, 等. 汉江枯水期藻类生长调查[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(2): 136~137.
- [6] 夏军. 汉江富营养化动态模型研究[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(1), 20~23.
- [7] 许保玖. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991. 39~58.
- [8] 高庭耀, 等. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [9] 合田健著. 水环境指标[M]. 全浩等译. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 252.
- [10] Graf WH, Altinakar M S 著. 河川水力学[M]. 赵文谦, 万兆惠译. 成都: 成都科技大学出版社, 1997.

MECHANISMS FOR HYDROLOGICAL FACTORS CAUSING ALGAL BLOOMS IN HANJING RIVER ——BASED ON KINETICS OF ALGAE GROWTH

WANG Hong-ping¹, XIA Jun^{2,3}, XIE Ping³, DOU Ming³

(1. School of Resources and Environment Science, Wuhan University. Wuhan 430079, China;

2. Institute of Geographical Science & Natural Resources, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wuhan University. Wuhan 430072, China)

Abstract: Mechanisms for hydrological factors causing algal bloom in Hanjiang River are studied. First, the hydrological factors relative to algal bloom in Hanjiang River and their relation are generalized. Then the river continuous reactor model for algae growth is created and moreover mathematics model describing relation between concentration of algal and flow velocity is built up according to continuous reactor principle and Monod Function —— $a = m \exp(k/V)$. Parameters in this model are determined by measuring data in Hanjiang River — $m = 8.9759$, $k = 0.9054$, the relative coefficient $r = 0.9244$. In the end, the influence of flow velocity, flux and water level of the Changjiang River is discussed. In addition, the model is extensively adaptive to eutrophic rivers and it can be studied progressively because the parameters have clear physical significance.

Key words: continuous reactor; algal bloom; Hanjiang River; hydrological factors; Monod Function