

# 利用复杂网络理论研究三峡库区流域水华暴发<sup>①</sup>

胥昌纯<sup>1</sup>, 卢挺<sup>1</sup>, 陈刚才<sup>2</sup>

1. 重庆市巴南区环境监测站, 重庆 401320; 2. 重庆市环境保护局, 重庆 401147

**摘要:** 根据复杂网络(CNs)理论初步建立三峡流域的水华暴发动力学模型, 利用水华暴发的三类因素建立起水华暴发 CNs 无边连接基本模型图, 参考实际水域水华暴发因素设定各节点子节点范围, 建立各节点的边连接, 从而初步建立水华暴发的 CNs 模型. 模型中代入 2007 年春季嘉陵江、长江和 2002 年乌江“黑潮”8 月份乌江渡水库监测数据, 计算得出两个区域水华暴发 CNs 模型的平均路径长度  $L$  和聚类系数  $C$ , 发现发生水华的流域平均路径长度  $L$  越小流域水华暴发的可能性越大, 且现场监测数据与 CNs 理论结果相符. 同时, 水华暴发流域的聚类系数比未暴发流域小, 表明水华暴发前后聚类系数  $C$  是一个先增加后减少再增加的过程. 因此水华暴发周期内(暴发前期、暴发时期、消退期), 各因素间的相互作用是先增强后减弱再增强的过程.

**关键词:** 藻类; 水华; 复杂网络; 平均路径长度; 聚类系数

**中图分类号:** X52

**文献标志码:** A

水华是藻类突发性大量生长的水体污染现象, 是水域多因素耦合、多维度协同的结果. 三峡库区流域是一个具有整体性特征的非线性复杂生态环境动力学开放子系统, 近代归纳式研究方法和理论已难以描述、研究并定量揭示其内在演化规律. 复杂网络(CNs)理论由于 1998 年 Watts 揭示了 CNs 的小世界属性<sup>[1]</sup>, 1999 年 Albert 发现了 CNs 的无标度特性(SF)<sup>[2-4]</sup>等, 拓展了 CNs 的应用领域, 为表征和研究消落带水华污染提供了全新的视角、思路和手段. CNs 理论从图论和统计规律上描述和求解复杂系统的整体行为. CNs 理论将具体网络抽象为一个由点集  $V$  和边集  $E$  组成的图  $G=(V, E)$ . 按照 CNs 理论, 引起水华暴发的各种因素可以抽象为点集  $V$  的各个节点, 各因素间的相互作用可抽象为边集  $E$  的各条边. 消落带流域多因素耦合、多维度协同作用造成的水华暴发即抽象是各节点相互连接而形成的一个复杂网络.

本文是从 CNs 理论的基本属性出发, 初步建立流域中水华暴发的 CNs 模型, 通过对表征 CNs 属性的平均路径长度和聚类系数的计算, 得出水域中实际各水华暴发因素的相互作用的状态, 预测了水华暴发的可能.

## 1 CNs 理论和方法

CNs 理论是将一个具体网络抽象为一个由点集  $V$  和边集  $E$  组成的图  $G=(V, E)$ . 本文主要将复杂网络图结构的统计具有平均路径长度和聚类系数这两个基本特性应用于水华暴发的描述.

### 1.1 平均路径长度的定义和计算

平均路径长度定义<sup>[5]</sup>为任意两个节点之间距离的平均值. 任意两个节点的距离是连接这两个节点的最短路径上的边数, 即连接这两个节点所需的最小连接度. 其意义<sup>[5]</sup>为完成复杂网络中任意一次连接所需要的路径长度. 平均路径长度的计算公式为<sup>[5]</sup>:

① 收稿日期: 2010-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(20877105), 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-001)资助.

作者简介: 胥昌纯(1964-), 重庆巴南人, 重庆市巴南区环境监测站高级工程师, 主要从事环境监测和管理.

$$L = \frac{1}{1/2N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad (1)$$

式中:  $N$  为网络的节点数,  $d_{ij}$  为网络中节点  $i$  到节点  $j$  的距离.

## 1.2 聚类系数的定义和计算

聚类系数定义<sup>[5]</sup>为网络中与节点连接的其他节点也可能彼此连接的特性的数值表示, 且  $0 \leq C \leq 1$ . 其意义为当  $C=0$  时, 所有节点均为孤立节点; 当  $C=1$  时, 网络中任意两个节点都直接相连<sup>[5]</sup>. 节点  $i$  的聚类系数的计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$C_i = 2E_i / (k_i(k_i - 1)) \quad (2)$$

式中:  $E_i$  是与节点  $i$  相连节点之间实际存在的边数;  $k_i$  是节点  $i$  与其他节点连接的边数. 整个网络的聚类系数  $C$  就是所有节点  $i$  的聚类系数  $C_i$  的平均值.

## 2 水华暴发模型构建

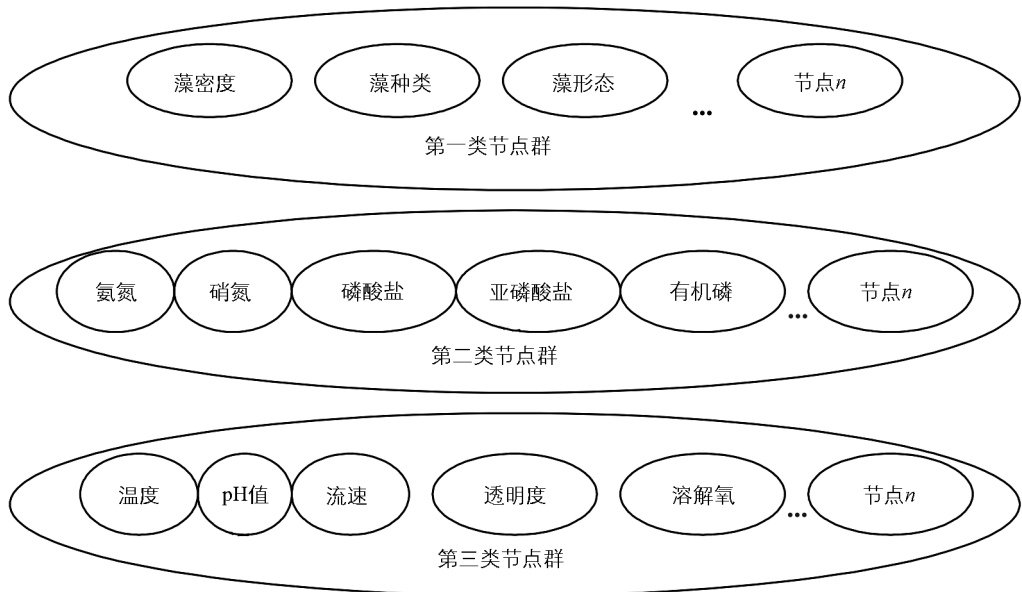
### 2.1 模型节点分类

根据水华暴发的各因素跟藻类本身有关或跟水环境有关进行分类<sup>[6]</sup>, 大致可分为三大类. 同一类比非同类因素容易产生水华暴发的相互作用. 影响因素的分类与 CNs 理论的短程连接(即同类因素作用)多, 长程连接(即非同类因素作用)少的结论互相对应.

第一类因素是藻类自身因素. 如: 藻密度、藻种类、藻形态、藻迁移等;

第二类因素是氮磷营养盐及相关因素. 如: 磷和氮营养盐浓度、氮和磷的迁移扩散等;

第三类因素是除氮磷营养盐外, 与藻类生长水环境有关的因素. 如: 温度、流速、pH 值、透明度、溶解氧等. 由此建立的水华暴发 CNs 模型如图 1 所示.



水华暴发 CNs 模型为随时间  $t$  变化节点动态增加的模型

图 1 水华暴发的 CNs 系统(各节点无边连接图)

### 2.2 模型的具体表征

#### 2.2.1 模型子节点的统计

将水华暴发各因素(网络节点)作为整体, 以衡量各因素的取值作为表征节点的子节点. 以流域中水华可能暴发的最小面积为 CNs 子节点统计的单位面积. 在流域中设定的单位面积(即采样点)越多, 单位面积越小, 模型越接近真实. 通常选择采样点所代表的流域面积作为统计子节点的单位面积.

在单位面积内, 由监测所得流域数据计算子节点个数. 在时刻  $t$ , 不同单位面积的相同监测数据值只计

算为一个子节点个数;不同单位面积里不同监测数据值分别计算各自的子节点数目。

### 2.2.2 子节点的连接和节点度的计算

不同节点内的子节点彼此连接产生边,一条连接边即是为一度。子节点连接实质是各节点内不同单位子节点的多次迭代连接,节点的连接度为节点的子节点个数。

### 2.2.3 子节点范围和最小单位变化

节点中子节点范围是藻类或水环境的合理取值,对不在范围内的子节点取值因不满足藻类生长条件故不具有水华暴发的可能,应舍去不包含在模型的子节点数内。子节点的最小单位变化是能引起水华暴发可能性改变的各因素的最小取值变化。水体监测中由于监测仪器和监测方法的误差得到的取值是经过处理的有效数,故子节点最小单位变化选择为监测数据的最小变化。

对藻形态节点,藻类会因水流影响产生迁移和聚集的运动,水华暴发的一个重要原因是大量藻类互相聚集并且上浮<sup>[7-8]</sup>。故藻形态节点范围设为:聚集并上浮、聚集未上浮、上浮未聚集、未上浮未聚集。监测时如果没有出现藻类的聚集并上浮,默认为未上浮未聚集状态。

对氮和磷节点,以 TN 和 TP 为节点,一般认为当氮磷比小于 10 是为氮限制,大于 10 时为磷限制<sup>[9,11]</sup>。故当水体中氮磷比值小于 10 时,以氮为节点;当氮磷比值大于 10 时,以磷为节点;当氮磷比值等于 10,同时以氮和磷为节点。

表 1 水华暴发 CNs 模型节点内子节点取值范围

| 水华暴发影响因素 | 合理取值范围                   | 影响因素作用描述                | 参考文献            |
|----------|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| 温度       | 10~45 °C                 | 藻类生长必需条件                | [12, 13]        |
| 流速       | 0~0.20 m·s <sup>-1</sup> | 部分藻类在某流速段可以成为优势藻        | [14, 15]        |
| pH 值     | 7~9.5                    | 水华暴发和 pH 值有较好的相关性       | [13, 16]        |
| 透明度      | >0                       | 光照影响藻类生长,而光照进入水体受 SD 影响 | [17]            |
| 溶解氧      | >0                       | 为藻类新城代谢作用供氧             | [18]            |
| TN 和 TP  | >0                       | 藻类生长动力的营养盐              | [9, 18, 19, 20] |
| 藻密度      | >0                       | 单位水体内藻类生长数量的反映,水华暴发条件之一 | [18]            |
| 藻种类      | >0                       | 水华暴发条件之一                | [10, 14]        |
| 藻形态      | 4 个状态范围内                 | 水华暴发条件之一                | [7, 8]          |

### 2.2.4 节点边连接确定和模型图

对藻密度节点,由于藻类的生长受到氮磷营养盐、温度、pH 值、流速、透明度、溶解氧的影响<sup>[14-15,17-18]</sup>,故藻类密度节点和这些节点有边连接。此外由于不同的藻类其生长密度也不同,因此藻密度节点还和藻种类节点有边连接。对藻种类节点,藻种类的生长要求将藻种类与所有节点有边连接,同时不同藻种类在水体种都会有是否聚集和上浮的状态,故也与藻形态节点发生连接。对藻形态节点,藻类的聚集和上浮与水体流速关系密切<sup>[8,14-15]</sup>,因此藻形态节点和流速节点有边连接。

对 TN 和 TP 节点,水体中的氮磷由于存在形态不同而显示不同酸碱性<sup>[21]</sup>,故与 pH 值节点有边连接。水体透明度主要受有机质影响<sup>[22]</sup>,TN 和 TP 也与透明度节点有边连接。水体流速也会对氮磷浓度产生影响,故彼此也有边连接。

对第三类水环境节点,溶解氧由于受温度的影响<sup>[18]</sup>,故温度节点与溶解氧节点有连接。另外流速也会对水体 pH 值和溶解氧产生影响,因此流速节点分别与 pH 值节点和溶解氧节点有连接。

将各节点按顺序编号,判断各监测值是否在各子节点范围内,根据最小单位变化统计子节点个数计算各节点的连接度。根据各类节点的边连接关系,建立了水华暴发的 CNs 基本模型图(图 2)。

## 3 模型计算和结果

以 2002 年乌江“黑潮”发生时期,乌江渡水库 8 月份监测数据<sup>[23]</sup>和 2007 年春季长江、嘉陵江的监测数据<sup>[14]</sup>,分别代入图 2 模型求解。模型节点度和结果见表 2、表 3。

表 2 水华 CNs 模型各节点节点度

| 水域地点                  | 节点度 |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------------------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
|                       | ①   | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ |
| 2007 年春季长江、嘉陵江采样点     | 8   | 8 | 1 | 8 | 5 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| 2002 年乌江“黑潮”8 月份乌江渡水库 | 7   | 6 | 3 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 |

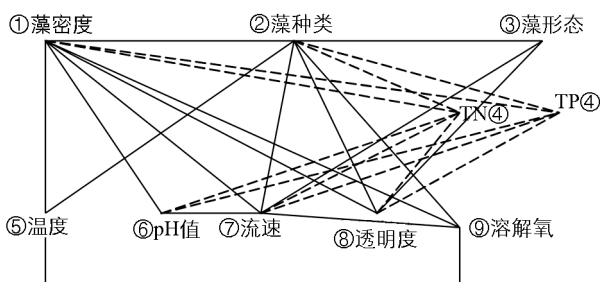
表 3 计算值与实际流域水华状态的对应关系

| 水域地点                  | $N$ | $\sum d_{ij}$ | $C$  | $L$  | 水华发生情况  |
|-----------------------|-----|---------------|------|------|---------|
| 2007 年春季长江、嘉陵江采样点     | 39  | 470           | 0.19 | 0.60 | 未发生水华   |
| 2002 年乌江“黑潮”8 月份乌江渡水库 | 57  | 762           | 0.09 | 0.46 | 大规模水华暴发 |

## 4 结果讨论

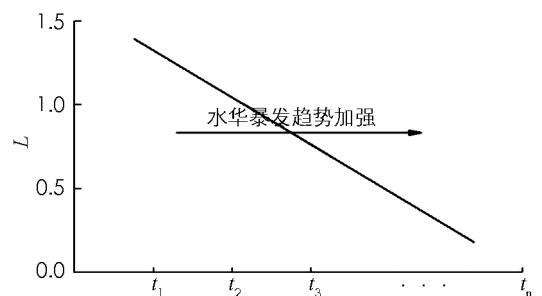
1) 从计算结果表 3 可知, 2007 年春季长江、嘉陵江水域的平均路径长度  $L$  和聚类系数  $C$  均大于 2002 年 8 月份乌江渡水库水域的  $L$  和  $C$ . 表明前者所形成的复杂网络完成任意一种连接状态的平均路径长度比后者大. 而在模型中水华暴发即抽象为各节点的互相连接的某种状态. 因此实际结果和 CNs 理论同时表明了平均路径长度大小是流域中水华暴发趋势的反映. 同时, 聚类系数是描述节点间相互连接的程度, 而计算结果表明, 水华暴发前各因素相互作用的程度比水华暴发时期各因素相互作用强. 这可能是由于水华暴发时刻藻类和水体环境已达到一个临界状态, 各因素均接近顶点状态, 因此各因素间相互作用都较水华暴发前期降低.

2) 在监测流域中, 单位时刻  $t$  各采样点(单位面积)的水华暴发因素处于某一种互相作用的状态, 而各因素相互耦合作用暴发水华也是一种相互作用状态, CNs 理论的平均路径长度是描述网络中各因素达到任意一种状态所需路径. 因此如图 3 所示, 在设定了采样点数, 通过对流域所有采样点的各单位时刻  $t$  的节点因素取值监测代入模型进行计算而得到各  $L$  值, 对各  $L$  值大小变化趋势判断即有理由预测流域水华暴发的可能性.



图中虚线为当第二类节点中为氮限制或磷限制时  
只有一个节点与第一、三类节点发生边连接

图 2 基于 CNs 理论水华暴发简化模型

图 3 平均路径与水华暴发趋势的关系( $L$  无量纲)

3) 在采样水域, 聚类系数表示与任意一个水华暴发因素发生作用的其他因素间的相互作用的强度. 因为当聚类系数为 0 时, 各节点都是孤立的, 即是各水华暴发因素都没有相互作用; 而当其为 1 时, 任意两个节点都直接有边联系, 即是任意两个水华暴发因素都能发生作用. 因此聚类系数越大表明水华暴发的可能性也越大. 而水华暴发时期各因素由于达到临界状态, 其相互作用会减弱, 而在水华消退时期各因素间相互作用又会加强. 因此某一水域在水华的暴发前期、暴发时期和消退期, 随时间  $t$  聚类系数表现为先增大后减小再增大. 水华暴发各因素间相互作用在水华暴发周期是先增强后减弱再增强的过程.

## 参考文献:

- [1] WATTS D J. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [2] ALBERT R. Statistical mechanics of complex networks [J]. Rev Mod Phys, 2002, 74(1): 47-97.
- [3] BARABKSI A L. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [4] ALBERT R. Attack and error tolerance in complex networks [J]. Nature, 2001, 406: 387-482.

- [5] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 9-11.
- [6] 卢挺. 利用复杂网络理论研究三峡库区流域水华暴发行为 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 32-56.
- [7] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 592-593.
- [8] 刘信安, 张密芳. 三峡库区优势藻类聚集参数和水华状态函数 [J]. 环境科学报, 2008, 28(9): 1916-1917.
- [9] 张晟, 李崇明, 魏世强, 等. 三峡库区富营养化评价方法探讨 [J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 26(3): 340-343.
- [10] 王明书, 周亚宁. 20 余年来缙云山黛湖鼓藻类植物的演变与水质的关系 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2007, 32(1): 43-45.
- [11] 李小平. 美国湖泊富营养化的研究和治理 [J]. 自然杂志, 2002, 24(2): 63.
- [12] 杨顶田, 陈伟民, 江晶, 等. 藻类爆发对太湖梅梁湾水体中 NPK 含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 970.
- [13] 孙惠群, 朱琳, 高文宝. 淡水湖泊中微囊藻水华的成因分析 [J]. 生物学通报, 2005, 40(8): 23-24.
- [14] 刘信安, 张密芳. 重庆主城区三峡水域优势藻类的演替及其增殖行为研究 [J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1838-1842.
- [15] 焦世珺, 钟成华, 邓春光. 浅谈流速对三峡库区藻类生长的影响 [J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23(2): 48-49.
- [16] 王海云, 程胜高, 黄磊. 三峡水库“藻类水华”成因条件研究 [J]. 人民长江, 2007, 38(2): 17.
- [17] 高月香, 张永春. 气象因子对藻类暴发的影响 [J]. 水环境与工程技术, 2006(2): 10-11.
- [18] 曹永中, 崔灵周, 姚炜民. 温州市近岸海域具齿原藻密度预测模型研究 [J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 180-181.
- [19] 刘信安, 封丽. 三峡库区水华优势藻类生长动力学的普适性研究 [J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2145.
- [20] 况琪军, 周广杰, 胡征宇. 三峡库区藻类种群结构与密度变化及其与氮磷浓度的相关性分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(2): 233-234.
- [21] 林以安, 苏纪兰, 扈传显, 等. 珠江口夏季水体中的氮和磷 [J]. 海洋学报, 2004, 26(5): 66-67.
- [22] 方涛, 付长营, 敖鸿毅, 等. 三峡水库蓄水前后香溪河氮磷污染状况研究 [J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 26-29.
- [23] 重庆市环境保护局. 重庆市环境科学研究院 [R]. 乌江流域“黑潮”问题调查研究专题报告, 2002, 12: 16-23.

## Study of Algae Bloom in the Three-Gorges Reservoir Region Based on Complex Networks Model Theory

XU Chang-chun<sup>1</sup>, LU Ting<sup>1</sup>, CHEN Gang-cai<sup>2</sup>

1. Banan Environmental Monitoring Central Station, Chongqing 401320, China;

2. Chongqing Environmental Protection Bureau 401147, China

**Abstract:** Use the Complex Networks(CNs) theory to establish the dynamics model of the algal bloom in the three-gorges valley basically. This model firstly classifies the inducement of the algal bloom to three kinds and establish the no-connection inducements relation figure. And then to set the range of the inducement in the figure. Finally to consult the known literature to establish the border connection of the inducement in order to describe the algal bloom with the CNs model. In the end to use the actual inspect data in the Jialingjiang river and the Yangtze River in the pring of 2007 and the Wujiangdu reserivior in the August of 2002 to calculate the average path length and the clustering coefficient of the CNs model of the algal bloom and it is found that the L in the area of water bloom is smaller. It explains that the smaller the L is, the easier is the possibility of the algal bloom, which fits in with the local results in this water area. Meanwhile, the coefficient of algae bloom in this water area is smaller than that of non-water bloom in this area. It demonstrates that at the period of algae bloom the coefficient of water bloom increases at first and then decreases and finally increases. Therefore, at the period of algae bloom(previous time of algae bloom, time of algae bloom, fadeaway time of algae bloom), the mutual effection of algae bloom factor strengthens at first and is weakened then and strengthens finally.

**Key words:** algae; algal bloom; complex networks; average path length; clustering coefficient