

· 争鸣与探索 ·

基于小波变换的水源水中藻类生长动态研究

卢金锁¹, 黄廷林¹, 何文杰²

(1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

2 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040)

摘要: 对利用小波变换法对天津引滦原水中日检测叶绿素 (藻类表征指标) 构成的时间序列进行了变换, 将原始序列分解为 5 个低频和较低频的周期性小波系数和 3 个高频的“噪音”小波系数, 发现 5 个周期性信息变化与季节更替、优势藻种变换及一定条件下藻类生长动态平衡等因素有关; 而高频的“噪音”细节信息除检测误差造成外, 降雨、风向及取样的深度也会对此产生重要的影响。通过该段时间水源区域内的气温、太阳曝辐照度及降雨数据分析, 验证了小波转换系数的意义及分析结果。

关键词: 小波方法; 水源水; 藻类; 动态变化; 叶绿素

中图分类号: X830.3 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2008)06-0049-05

Dynamical Research on Algae in Source Water with the Wavelet

LU Jin-suo¹, HUANG Ting-lin¹, HE Wen-jie²

(1 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2 Tianjin Water Works Group Co. Ltd., Tianjin 300040, China)

Abstract The raw time series for daily chlorophyll concentration (algae characterization item) of the Luan river in Tianjin were decomposed into components of 5 low frequency / lower frequency cycle and 3 high frequency noise by the Wavelet transform method. It was found that message of 5 cyclical variations was related to seasonal changes, predominant algae species and dynamic equilibrium of algae growth. Rainfall, wind direction and sampling depth affected the detailed message of high frequency noise with the exception of detective error of chlorophyll. The data analysis of temperature, sun radiance exposure and rainfall in the source water area verified the significance and analytical results of the Wavelet transform.

Key words Wavelet; Water sources; Algae; Dynamic change; Chlorophyll

水中的叶绿素是指水中浮游植物, 在固定水源中, 其藻种之比变化不大时, 原水藻类数量和叶绿素质量浓度呈相关性^[1], 通常叶绿素作为原水藻类质量浓度的表征指标。近年来水源藻类发生的次数有所增加, 为达到国家饮用水水质标准, 针对藻类的应急处理工艺得到广泛的研究^[2-3]。在保证供水水质的前提下, 预测原水中藻类, 不仅可降低应急处理其副产物对水质影响, 而且可保证水厂经济利益最大化。

原水中藻类质量浓度变化剧烈, 给准确预测带来困难。但藻类的自然生长及死亡有一定延续性, 因此, 原水中藻类的质量浓度的突然巨增及巨减,

必然存在许多突变的非“自然”因素, 造成原水中叶绿素质量浓度的时间序列是非线性的、强相关、高度复杂及多时间尺度变化的动力系统^[4-5]。因此, 根据历年原水水质的检测数据, 对各种影响因素进行区分, 探求藻类的自然动态变化规律, 对于准确预测及水源管理意义重大。

收稿日期: 2008-07-29 修订日期: 2008-09-25

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20050703005); 西安市科技攻关计划项目基金资助项目 (GG 06200)

作者简介: 卢金锁 (1977-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 从事水资源保护与水质微污染控制相关研究。

小波分析方法^[6]具有良好的时、频多分辨率功能,通过对时间序列的多分辨率分析,能有效识别各种频率成分和提取局部信息。现以京津的城市原水中叶绿素质量浓度日变化时间序列为例,利用小波理论方法分析原水藻类动态变化规律,将各种引起藻类变化的自然及非“自然”因素进行分解研究。

1 藻类动态变化时间序列

收集天津持续利用滦河水(1997年8月12日—2000年10月3日)期间的宜兴埠原水叶绿素

的日检测数据,组成叶绿素质量浓度变化时间序列。利用 MATLAB 的小波工具箱函数,对叶绿素质量浓度变化时间序列进行小波变换。

在分解水平为 7,基本小波为 db10 情况下,经小波变换后,原始时间序列—叶绿素质量浓度变化图(s),分解成 7 个细节系数变化图(d)及 1 个逼近系数变化图(a),将细节系数图和逼近系数图进行合并可重构原始时间序列,即:

$$s = d_1 + d_2 + \dots + d_7 + a_7 \quad (1)$$

该时间序列的小波变换结果见图 1。

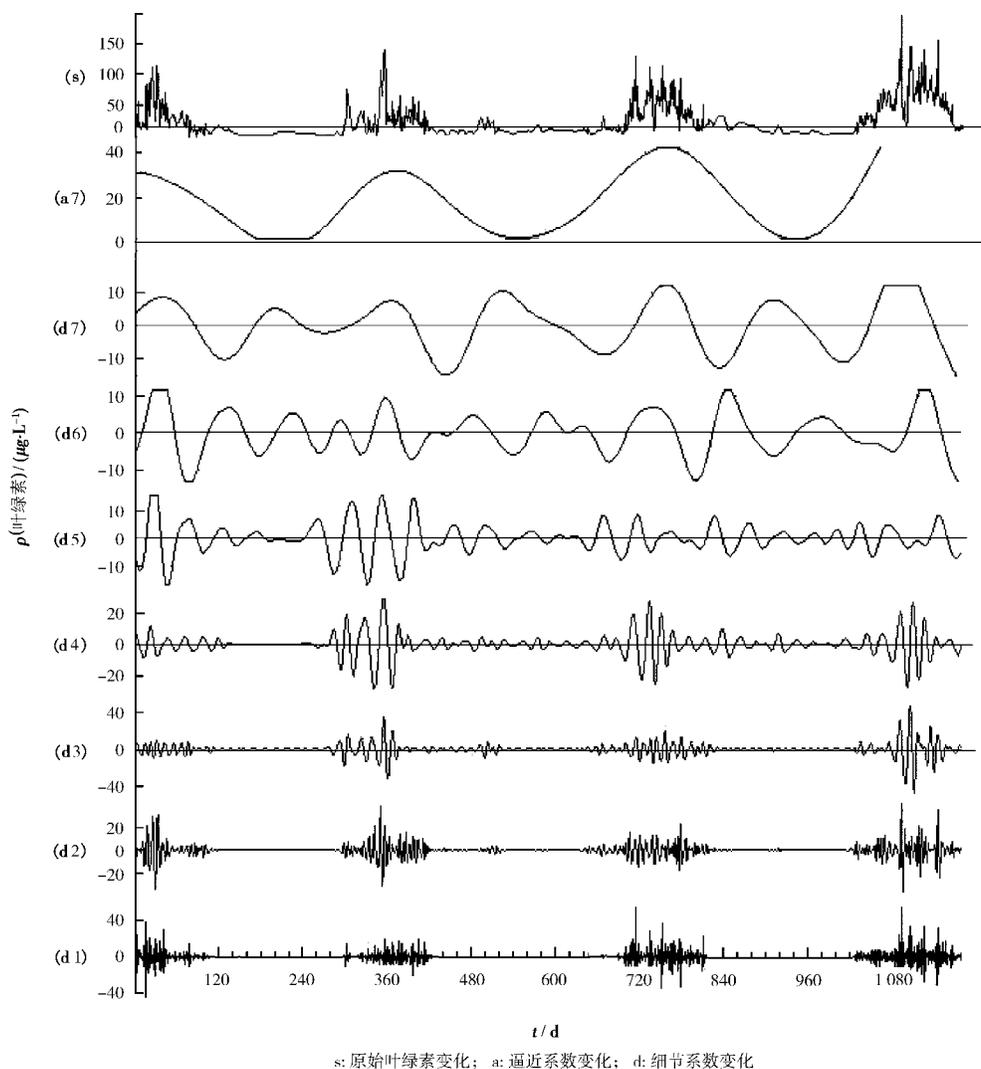


图 1 叶绿素变化时间序列的小波分解

(s)图是叶绿素质量浓度随时间的变化曲线,可看出其随时间推移变化激烈,相邻 2 d 原水的叶绿素质量浓度相差很大,各年间叶绿素的质量浓度

变化有相似之处,即存在藻类高发的季节,但各年叶绿素质量浓度达到和超过同一高度的时间不完全相同,且各年间叶绿素的最大值相差较大。

(a7)图是在取出叶绿素质量浓度变化的各种细节因素后,对原始序列的逼近。其存在明显的年周期变化,相对于(s)图来说,周期性的表现更为直接。这与一年中季节交替变化时,大多数植物生长规律基本一致,即太阳在地球北回归线、赤道及南回归线的年周期移动时,生长在地球上的大多数植物都会有以年为周期的生长规律。但是各年的峰值较原始序列有较大差别,且峰值明显存在增加的趋势,至2000年达到最大,因此,可以“预测”如果水源的管理方式不发生大的变化,藻类高发的程度将逐年增加。然而,2001年于桥水库全面取缔对库水污染极为严重的网箱养鱼,藻类高发程度相对于2000年有一定程度的降低。

(d1)~(d7)图是各因素对原水中叶绿素质量浓度的检测值影响的细节图。(d7)图中叶绿素质量浓度的变化幅度为 $\pm 10 \mu\text{g/L}$,如将3个“峰”视为1个变化周期,其同样是叶绿素年变化,如粗略地视2个“峰”为1个变化周期,藻类存在以半年为周期的动态变化。尽管原水中藻类以年为周期变化,但事实上,原水中藻类是分别以蓝绿藻和硅藻各半年为优势藻种进行变化的。每年5月—11月间,随着太阳辐射的加强,温度升高,蓝绿藻开始大量生长,在7月、8月间达到每年藻类数量最大,随后随着温度的降低,蓝绿藻生长活性减低,数量逐渐减少,此后,水中较适于在低温条件生长的硅藻逐渐成为优势藻种。比较(s)图和(d7)图可发现,以蓝绿藻为优势藻种时正值原水藻类高发的季节,且两者“峰”基本保持一致,而当以硅藻为优势藻种时,原水中藻类的总量基本都保持比较低的水平。因此,(d7)细节图可很好地表征原水中蓝绿藻和硅藻质量浓度的变化规律。

(d6)图中叶绿素质量浓度的变化幅度同样为 $\pm 10 \mu\text{g/L}$,但相对于(d7)图来说,叶绿素以0为中心周期变化的频率更高,且全年变化基本一致,即在该细节下,叶绿素质量浓度从最大至最小周而复始地变化。说明尽管藻类数量随时间变化巨大,但在水体中藻类生长存在动态平衡,即在一定日照、营养水平下,藻类生长不是无限制的,达到最大后,受日照及营养等限制,部分藻类死亡,直至降低到满足条件的水平。观察(d6)图可发现,藻类的平衡周期大约120d,即叶绿素量“最大”和“最小”之间时间差约2个月,但由于受到各种因素影响,此处“最值”并不一定是绝对意义上的叶绿素数量

最大。

(d5)图、(d4)图和(d6)图非常相似:存在周期性的变化,但其周期更短,且除原始叶绿素质量浓度较高的期间外,周期性变化不明显,对于在高藻期出现的这种周期性变化现象却无法用现有理论来解释。为了做更细致的观察,将670d~830d时间段各图放大,见图2。

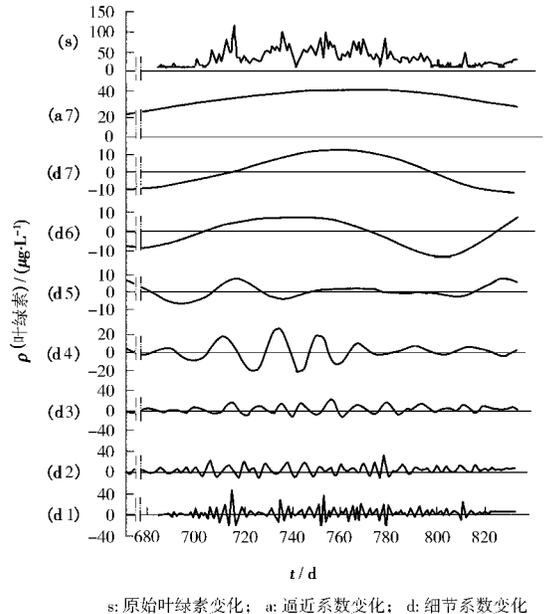


图 2 小波分解图的局部

从图2中可看出在高藻期藻类的生长存在2个周期:约40d和20d。(d3)图、(d2)图和(d1)图是叶绿素质量浓度变化中频率极高的细节成分,尽管对叶绿素绝对量贡献比较大,但其变化过于剧烈。当在叶绿素质量浓度高时,其波动幅度也相应大,因此,可能除了与测量误差有关外,更可能是由于风向等自然因素造成漂浮的藻类在原水取水口聚集或漂离造成原水中藻类的数量巨变引起的。当然由于取样的深度也可能对此产生大的影响,但由于没有当时的现场记录,无从进一步考证。因此,认为该部分细节成分主要是由非常规的“噪音”引起的,对于研究原水中藻类实际数量变化意义不大,可将其从原始信号中剔除。剔除“噪音”的叶绿素变化见图3。

比较图3和图1中的(s)图可看出,去除“噪音”的叶绿素变化与原始叶绿素的变化规律非常一致,不仅能很好地反映原水中藻类的动态增加及

减少过程, 而且非常明确该变化是由 5 个周期性地对藻类生长影响因素的综合结果。

区的太阳曝辐照度及气温等相关数据, 考虑到任何生物的生长是一个持续作用的结果, 对原始数据进行转换:

$$D(t) = [S(t-1) + S(t-2) + S(t-3) + S(t-4) + S(t-5)] / 5 \quad (2)$$

其中 S : 原始数据; D : 新数据; $S(t-1), S(t-2) \dots S(t-5)$ 分别表示此前 1d—5d 的原始数据, 即求当前以前连续 5 d 太阳曝辐照度或气温平均值, 构成新的分析时间序列。

2.1 平均太阳曝辐照度与小波逼近系数 a_7

逼近系数与平均太阳曝辐照度关系见图 4

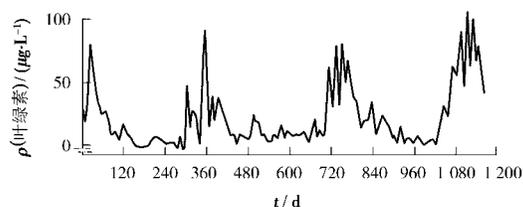


图 3 去除“噪音”的叶绿素变化时间序列

2 讨论

为了验证分析的结果, 收集了该段时间天津市

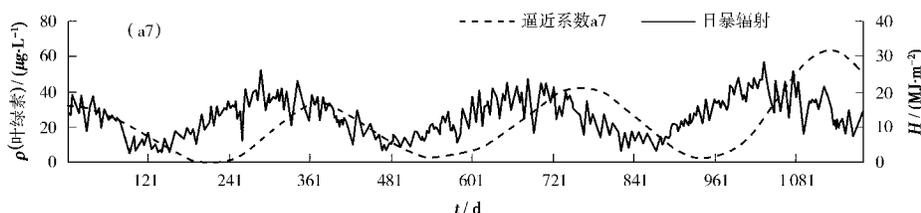


图 4 逼近系数与平均太阳曝辐照度关系

由图 4 可见, 除平均太阳曝辐照度的细小波动外, 两者的变化曲线非常相近, 具有强烈的年周期性, 而且经小波变换叶绿素时间序列的逼近系数的峰值总是滞后于平均太阳曝辐照度, 这说明藻类的生长受到太阳辐射的严重影响, 这与光合作用密切相关; 此外, 也说明当藻类的生长条件改变后, 其生长态势是缓慢变化的, 具有一定的延迟性, 即原水

中出现藻类的最大时间总是滞后于平均太阳曝辐照度, 而且从平均太阳辐射的角度来看, 其峰值变化不是很大, 但藻类峰值逐年升高, 说明藻类的年周期性变化除太阳辐射影响外, 还受到其他因素的影响, 如原水中营养条件等。

2.2 平均气温与小波细节系数 d_7

平均气温与小波细节系数 d_7 变化见图 5

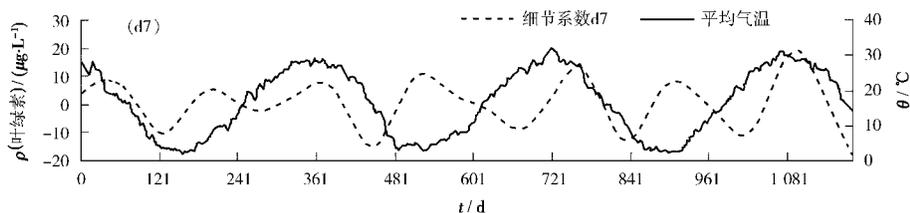


图 5 细节系数 d_7 与平均气温

细节系数 d_7 波动的频率明显高于平均气温, 而前者的变化周期几乎是后者的一半。当平均气温出现最大和最小峰值时, 将滞后或同时出现细节系数的最大峰值, 而细节系数的最小峰值出现在平均气温的上升和下降段。

从前述的分析可知, 细节系数 d_7 分别代表优势藻为蓝绿藻和硅藻的 2 个高峰期, 研究数据的时间开始为秋初气温的较高段, 原水中生长的藻类主要为蓝绿藻。因此, 细节系数的第 1 个最大峰值代表原水中优势藻为蓝绿藻时的最大值, 随着气温的

降低, 逐渐偏离蓝绿藻的最适宜的生长温度, 藻类数量开始降低, 直至蓝绿藻降至最低, 出现第 1 个波谷。随着温度的上升, 适宜较低温度生长的硅藻 (蓝绿藻类也有生长) 逐渐开始生长, 温度上升一段时间后, 达到一定程度, 由于满足蓝绿藻的适宜生长条件, 蓝绿藻与硅藻争夺原水的营养物, 导致硅藻死亡, 藻类数量降低。随着温度的继续上升, 硅藻死亡的数量与蓝绿藻基本相当时, 达到第 2 个波谷, 但由于蓝藻类的存在及生长, 藻类数量最低的幅度要低于第 1 个波谷。此后, 蓝绿藻开始大量繁殖, 藻类数量增加直至温度降低, 达到第 2 个波峰, 如此周年循环下去。

然而在时间段 (361 d—601 d) 的波谷, 却有特

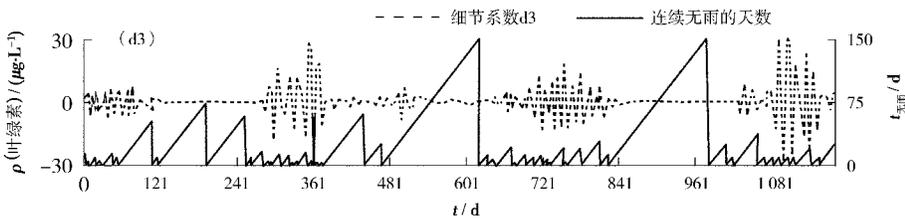


图 6 细节系数 d_3 与连续无雨天数

由图 6 可见, 当连续无雨的天数少时, 高频的细节变换系数不仅频率高, 而且变化幅度也大, 当连续无雨天数较多时, 高频系数变化幅度较低或很低, 说明降雨及降雨时的其他气象因素对高频的细节因素影响较大。但降雨后, 对原水中藻类产生直接影响的因果关系, 图中变化不明显。

3 结论

天津引滦原水对叶绿素日检测结果构成时间序列, 利用小波方法对该时间序列进行了变换, 并对变换结果进行多角度的分析。

(1) 当小波分解水平为 7 时, 原始时间序列可分解为 3 个高频的“噪音”细节信息和 5 个低频和较低频的藻类周期性变化的信息;

(2) 其中 5 个周期性变化信息与季节更替、优势藻种变换及一定条件下藻类生长动态平衡等因素有关;

(3) 高频的“噪音”细节信息除检测误差外, 降雨、风向及取样的深度也会对此产生重要的影响,

别之处: 细节系数的这个波谷出现在出现平均温度最低之前, 而这个波峰与平均气温最低相邻很近; 对于此可能单纯依靠平均温度的变化无法解释, 需结合其他变化因素进一步研究其独特的原因。

2.3 连续无雨的天数与高频细节系数

为分析天气因素对原水中藻类和小波变换高频细节系数的关系, 收集了天津市该段时间日降雨量数据, 但由于水源涉及范围较大, 市区降雨资料只能部分反映水源范围的天气状况。为了降低绝对降雨量不同造成的影响, 将原始日降雨量数据进行转换, 即统计两次降雨之间连续无雨的天数, 并将其结果与高频细节系数 d_3 绘制图 6。

但由于水源涉及范围较大, 需进一步研究验证;

(4) 去除“噪音”的叶绿素质量浓度变化的时间序列能很好地逼近原始序列, 对于进一步分层次预测叶绿素质量浓度变化有指导意义。

【参考文献】

- [1] 吕洪刚, 张锡辉, 郑振华, 等. 原水藻与叶绿素 a 定量关系的研究 [J]. 中国给水排水, 2005, 31(2): 26-30
- [2] 梁文艳, 曲久辉. 饮用水处理中藻类去除方法的研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 502-506.
- [3] 梁恒, 李圭白, 李星, 等. 不同水处理工艺流程对除藻效果的影响 [J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 5-8
- [4] LEE HW, J. YAN H, DIECKMAN M, et al. Neural network modeling of coastal algal blooms [J]. Ecological Modelling, 2003, 159: 179-201
- [5] 卢金锁, 黄廷林, 韩宏大, 等. 基于决策树技术及在线监测的水质预测 [J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(2): 38-41.
- [6] GRINSTED A, MOORE JC, JEVREJEVA S. Application of the cross-wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. Non-linear Processes in Geophysics, 2004, 11: 561-566.