

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439)	
《环境科学》征稿简则 (2479)	
信息 (2152, 2231, 2286)	

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化

李娜^{1,2}, 李勇^{1,2*}, 冯家成², 单雅洁², 钱佳宁²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要: 叶绿素 a (Chl-a) 是湖泊浮游植物生物量的重要指标, 其含量能反映水中浮游植物的丰度和变化规律. 以 1999 年 12 月 ~ 2019 年 8 月太湖水体 Chl-a 和环境因子的逐月监测数据为基础, 运用主成分分析方法探讨了 Chl-a 与环境因子的关系, 据此建立了 Chl-a 与主要环境因素之间的多元线性逐步回归模型及自回归综合移动平均模型 (ARIMA). 结果表明: ①太湖 Chl-a 浓度存在着明显的季节变化, 且总体处于上升趋势. 总磷 (TP)、高锰酸盐指数、月均气温 (MAT) 和月度降雨量 (MR) 与 Chl-a 浓度存在较好的变化同步性, 总氮 (TN) 和氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 则表现出明显的滞后性. ②主成分分析结果表明, 太湖水体藻类暴发条件不仅仅是基于 N 和 P 等限制性因素, 而是发展为 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 和高锰酸盐指数、MR 和 MAT 等多元因素的综合影响. ③两种模型经验证比较, 基于 1999 ~ 2019 年逐月资料建立的 Chl-a 浓度的 ARIMA 模型模拟效果和预测精度明显优于所建立的多元线性逐步回归模型, 特别是在考虑主要环境因素作为自变量及优化自变量取值情况下其预测效果得到进一步提升. 建立的 ARIMA(0,1,1)(0,1,1) 模型将有助于太湖藻类暴发的预报和预警, 并为及时有效地安排水资源调度及调控等水环境管理措施提供依据.

关键词: 太湖; 叶绿素 a; 环境因子; 多元线性逐步回归; ARIMA 模型

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2223-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202009210

Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu

LI Na^{1,2}, LI Yong^{1,2*}, FENG Jia-cheng², SHAN Ya-jie², QIAN Jia-ning²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As an important indicator of phytoplankton biomass in lakes, the chlorophyll-a (Chl-a) concentration reflects the abundance and variation of phytoplankton in the water. Based on the monthly monitoring data of Chl-a and environmental factors in Lake Taihu from December 1999 to August 2019, key environmental factors related to Chl-a and their relationships were found using the principal component analysis (PCA) method. A multiple linear stepwise regression model and an auto-regressive integrated moving average (ARIMA) model were developed to predict the monthly Chl-a concentrations. The results showed that the Chl-a concentrations in Lake Taihu exhibited clear seasonal change characteristics and an overall trend of a gradual increase. The changes in total phosphorus (TP), the permanganate index, monthly average temperature (MAT), and monthly rainfall (MR) matched the Chl-a concentrations relatively well, whereas the changes in total nitrogen (TN) and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) lagged significantly. The PCA results showed that the increased phytoplankton biomass and consequent algae outbreaks in Lake Taihu were not limited to the effect of a single factor such as TN or TP, but were comprehensively affected by multiple factors such as TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP, the permanganate index, MR, and MAT. Through further validation, the ARIMA model of Chl-a concentrations was proved to be significantly better than the multiple linear stepwise regression model, especially when considering the key environmental factors as independent variables and optimizing their values. The established ARIMA (0,1,1)(0,1,1) model would be helpful for forecasting algae blooms in Lake Taihu and provide useful suggestions for water environmental management, such as water resources dispatch and regulation.

Key words: Lake Taihu; chlorophyll-a; environmental factors; multiple linear stepwise regression model; ARIMA model

自 20 世纪 60 年代以来,富营养化一直是湖泊和水库等水体生态环境质量的主要威胁之一. 富营养化会加速浮游植物的繁殖,进而导致水体溶解氧下降和水体生态环境质量恶化^[1]. 水体中叶绿素 a (Chl-a) 浓度是指示湖泊富营养化程度和表征浮游植物生物量的重要指标^[2,3], 与水体中其他环境因子之间存在密切的响应关系,其变化特征对藻类暴发的预报预警具有重要指示意义.

湖泊等水体中 Chl-a 及其环境因子的相关性研究已有大量报道,其中理化因子(光照、水温、水动力、水深、风速、营养盐)、生物因子(牧食压力)和区

域因子(水体面积、土地利用)等对 Chl-a 变化具有直接或间接的重大影响^[4~8]. Wu 等^[9] 针对鄱阳湖藻类时空变化进行分析,得出水下光照强度和透明度是限制 Chl-a 浓度的主要因素; Chen 等^[4] 通过室内模拟以及太湖野外实验证明水温与磷能够改变 Chl-a 浓度; Mayora 等^[5] 对古巴巴拉那河理化因子

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2020-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407906); 国家自然科学基金项目(51879081, 51579074)

作者简介: 李娜(1996~),女,博士,主要研究方向为河湖水环境综合治理, E-mail: 1070753409@qq.com

* 通信作者, E-mail: liyonghh@hhu.edu.cn

的研究得出水位、水深以及电导率对 Chl-a 浓度变化具有很好的解释性. 然而, 因地域水文气象等环境差异, 不同水体中 Chl-a 与环境因子的相关关系不尽相似, 针对性分析湖泊水体生态环境质量演变特征并构建基于其历史发展规律的 Chl-a 预测预报模型将更具实际指导意义.

时间序列方法是通过考察序列当前值与过去值以及随机因素的关系来建立具有一定精度的预测模型^[10,11], 综合考虑了所研究对象的历史发展变化规律和当前赋予变化, 在各个领域得到了广泛的应用和发展. 其中自回归综合移动平均 (ARIMA) 模型^[12] 基于随机过程理论, 具有数据需求少, 结构简单, 建模速度快, 可以处理非平稳时间序列^[13] 的特点, 在水环境领域得到了广泛的应用. 龚邵琦等^[14] 应用时间序列分析方法模拟了太湖 Chl-a 的变化并预测出各区 2005 年 Chl-a 的浓度, 一定程度上反映了太湖各区域 Chl-a 浓度的总体变化. 尹义星等^[15] 将时间序列分析方法应用到太湖的未来特征水位的预测, 预测结果与实际情况较吻合. ARIMA 模型是一种考虑环境变量对时间序列因素的响应关系的多元时间序列回归模型, 而湖泊水体中 Chl-a 的变化不仅具有季节性特征, 同时受到水体营养盐、水文气象等环境因素变化的综合影响而具有明显的非平稳特征.

太湖是我国第二大淡水湖泊, 近年来, 随着流域内工农业发展和人类活动强度增加, 太湖水体营养盐浓度不断上升, 造成了日益严重的富营养化问题及藻华频繁暴发现象. 本文针对太湖 Chl-a 的变化特点, 分析 20 年来太湖水体月度 Chl-a、营养盐水平和水文气象因素, 采用主成分分析法确定 Chl-a 的关联响应环境变量, 构建了基于主要环境变量的 Chl-a 多元线性逐步回归模型和动态变化的数学模拟模型 ARIMA, 并通过比较分析考虑自变量和自变量取值方法等验证讨论其预测效果, 以期有效预报预警太湖藻类暴发提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源和预处理

太湖 (30°56' ~ 31°33'N, 119°54' ~ 120°36'E) 是我国第二大淡水湖泊, 地处长三角经济发达区^[16], 平均水深 1.89 m, 水面面积 2 338 km², 具有径流面积大、水面广和水深小的特点, 自 1980 年代以来一直遭受严重的富营养化和藻华. 本研究选用的是太湖 1999 年 1 月 ~ 2019 年 8 月的 33 个站点的逐月水质数据, 主要包括高锰酸盐指数、NH₄⁺-N、TP、TN、Chl-a 浓度及月均气温和月降雨量, 水质指

标的分析测定均采用国家标准方法 (太湖健康报告). 根据湖区位置把 33 个站点分为 9 大湖区: 梅梁湖、竺山湖、贡湖、东太湖、湖心区、西部沿岸区、东部沿岸区、南部沿岸区和五里湖 (图 1). 按照加权平均的方法计算出 9 大湖区的水质指标值, 然后根据面积平均算法计算太湖各指标平均值, 每个指标共 237 个样本数据.

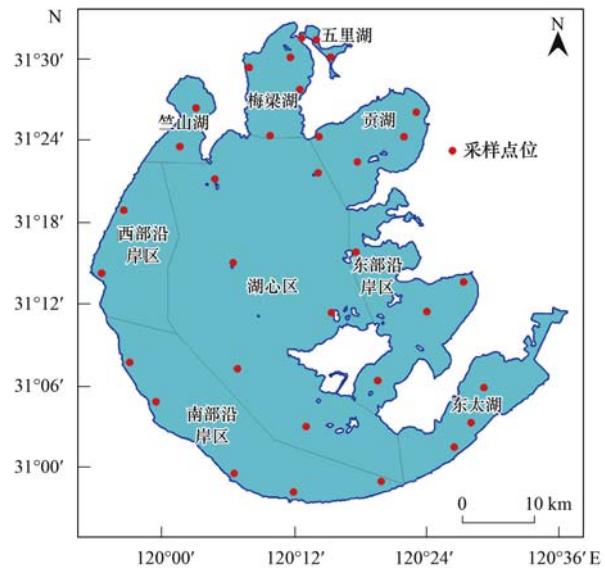


图 1 太湖逐月水质采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of monthly water quality sampling sites in Lake Taihu

1.2 多元线性逐步回归

回归分析建立了因变量和自变量之间的数学关系表达式. 当自变量的值确定时, 关系表达式可用于进行因变量预测. 回归包括线性回归、非线性回归、单变量回归和多元回归. 多元线性回归方程的一般形式为:

$$y = \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (1)$$

式中, $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_m$ 是不确定的参数, ε 是随机变量, 它表示除 x 之外的其他随机因素对 y 的总影响.

在实际应用中, 因变量 y 与自变量 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 之间的关系是未知的. 通过将方程与观测数据拟合, 可以估算结构 (选定的独立变量 x_i) 和相应的参数 (β_i). 确定回归方程后, 对回归方程进行统计检验, 例如回归方程的显著性检验, 回归系数的显著性检验和残差分析^[17].

1.3 ARIMA 模型的构建

1.3.1 数据的平稳化

ARIMA 模型中允许序列中含有趋势变动、季节变动和随机变动等综合因素的影响. 如数据为非平稳序列, 对序列进行适当的差分以实现平稳性和正常性. 由太湖 1999 年 12 月至 2019 年 6 月各月 Chl-a 时间序列图 (图 2), 可以看出 Chl-a 存在季节性周期

波动,并呈总体上升趋势;对原序列进行一阶差分和一阶季节性差分后,序列得以平稳(图3).因此,建立季节性ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)模型,其中 $d=1,D=1$,季节周期 $s=12$.

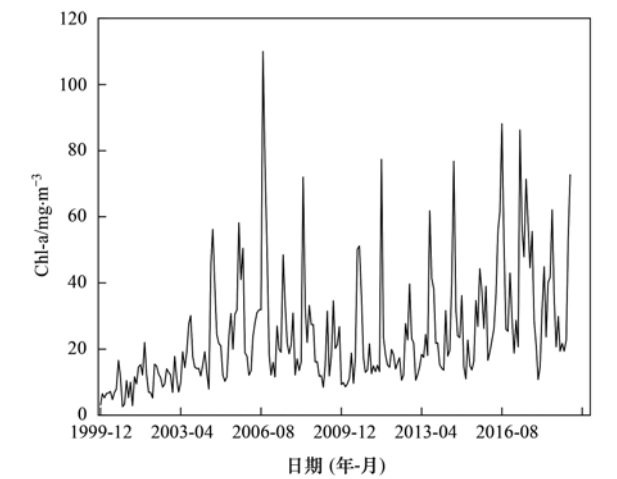


图2 太湖 Chl-a 时间序列分布

Fig. 2 Chl-a time series diagram of Lake Taihu

1.3.2 模型的识别和定阶

ARIMA(p,d,q)的一般模型形式^[18]为:

$$\nabla^d y_t - \varphi_1 \nabla^d y_{t-1} - \varphi_2 \nabla^d y_{t-2} - \cdots - \varphi_p \nabla^d y_{t-p} = c + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (2)$$

$$\text{或: } \varphi(B) \nabla^d y_t = \theta(B) \varepsilon_t \quad (3)$$

式中, y_t 是时间序列; d 是使变换后的序列平稳的差分顺序; $\nabla^d y_t$ 是 y_t 的 d 阶差(即 $d=0$ 时 $\nabla^d y_t = y_t$; $d=1$ 时 $\nabla^d y_t = y_t - y_{t-1}$; $d=2$ 时 $\nabla^d y_t = y_t - 2y_{t-1} + y_{t-2}$ 等); p (非负整数)是自回归阶数, $\{\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_p\}$ 是自回归系数; q (非负整数)是移动平均阶数, $\{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_q\}$ 是移动平均数部分的参数; $\{\varepsilon_t\}$ 是一系列相同且独立分布的正态随机变量,均值为零,共

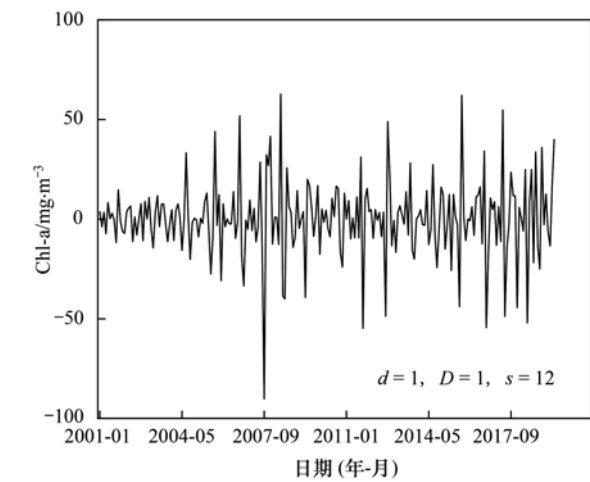


图3 太湖 Chl-a 时间序列一阶差分和一阶季节性差分序列分布

Fig. 3 Chl-a first-order difference and first-order seasonal difference sequence diagram in Lake Taihu

同方差为 σ^2 .等式的左侧是自回归部分,右侧是移动平均值.季节性ARIMA模型标记为ARIMA(p,d,q)(P,D,Q), P 、 D 和 Q 分别代表季节周期的自回归的阶、差分次数和移动平均的阶^[19].

根据差分后序列的自相关函数图和偏自相关函数图(图4)确定 p 和 q ^[20].季节性参数 P 和 Q 则通过从低阶向高阶逐步试探的方法获得.引入TN、TP、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、MAT和MR影响Chl-a浓度变动的环境因子作为自变量,增加到时间序列模型的拟合中,根据贝叶斯信息准则(bayesian information criterion, BIC),选取BIC值最小的模型^[21].本文中最小BIC(4.87)模型为拟合的最佳模型ARIMA(0,1,1)(0,1,1).

1.3.3 模型的诊断检验

平稳的 R^2 是序列中由模型解释的总变异所占

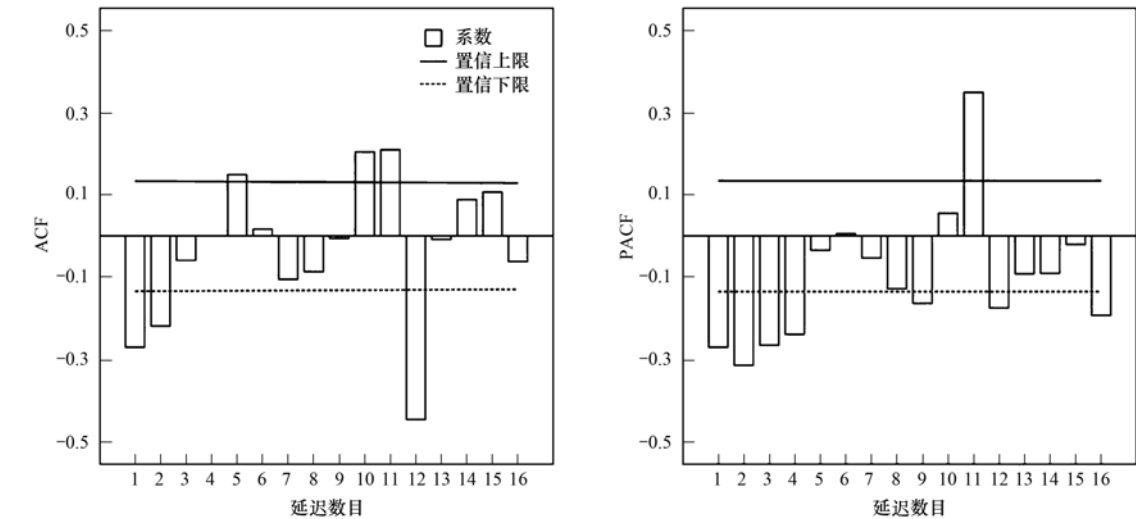


图4 太湖 Chl-a 时间序列一阶差分和一阶季节性差分序列自相关及偏相关函数

Fig. 4 Autocorrelation and partial correlation function graphs of the first-order difference and the first-order seasonal difference sequence of the Chl-a time series in Lake Taihu

比例的估计值,模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1) 的平稳 R^2 为 0.632,表示模型拟合效果较好. Sig. 值代表 Ljung-Box 统计量的显著性的值,该模型 Sig. 值大于 0.05,且 Ljung-Box 统计量为 25.498,表示模型残差

的错误是随机的. 从 Chl-a 残差自相关及偏相关中可以看出(图 5),残差序列基本不存在相关性,位于置信区间内,可以看做白噪声序列,可见所建立的模型是比较可靠的.

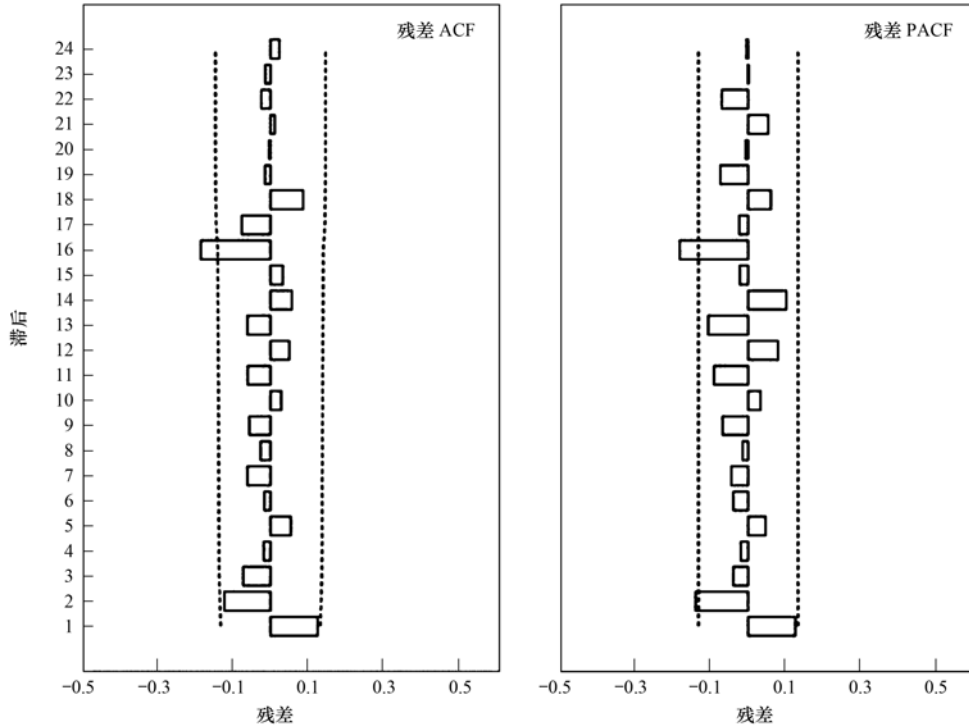


图 5 Chl-a 残差序列自相关及偏相关置信区间分布

Fig. 5 Chl-a residual sequence autocorrelation and partial correlation

1.3.4 模型的拟合及预测

根据所建的 ARIMA 模型对 1999 年 12 月 ~ 2019 年 6 月 Chl-a 数据进行拟合,并采用 2019 年 7 ~ 8 月 Chl-a 浓度进行验证. 自变量的取值采用自变量时间序列预测方法确定.

1.4 模型评估标准

采用均方根误差 (RMSE)、纳什效率系数 (NSE) 和决定系数 (R^2) 这 3 个指标对模型拟合的效果进行评价^[22].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 / n} \quad (4)$$

$$\text{NSE} = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 / \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^{\text{ave}})^2 \right] \quad (5)$$

$$R^2 = \text{SSR} / \text{SSTO} = 1 - (\text{SSE} / \text{SSTO}) \quad (6)$$

式中, x_i 、 x'_i 和 x_i^{ave} 分别表示观测值、预测值和观测值的平均值, n 为数据长度, SSR (回归平方和) 是指模型解释的变异, SSTO (总平方和) 是指模型的总变异, SSE (残差平方和) 是指 y 的估计值与 y 的实际值的离差平方和. RMSE 值为 0 表示观测值与预测值完全吻合; NSE 参数决定了剩余方差 (噪声) 相对于测量数据 (信息) 中方差的相对重要性, 取值范围为负无穷至 1. NSE 接近 1 表示模拟效果好, 模型可

信度高, 接近 0 表示模拟结果接近观测值的平均水平, 即总体结果可信, 但过程模拟误差大; R^2 取值为 0 ~ 1, 越大表示模型拟合效果越好. 调整 R^2 同时考虑了样本量 (n) 和回归中自变量的个数 (k) 的影响, 平稳 R^2 是序列稳定后的 R^2 .

1.5 数据处理与结果分析

所有数据用 Excel 2010 处理, Origin 8.5 作图, 由 SPSS 21.0 进行主成分分析和建立多元线性逐步回归方程, 应用 ARIMA(p, d, q)(P, D, Q) 模型对太湖 Chl-a 浓度进行模拟.

2 结果与分析

2.1 太湖 Chl-a 及环境因子分布特征

1999 年 12 月 ~ 2019 年 8 月的月度 Chl-a 均值及其分布特征如图 6, 太湖水体中 Chl-a 浓度水平分布于 $2.61 \sim 110.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ [$(25.33 \pm 17.64) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值 $\pm$ 方差, 下同], 总体上处于上升趋势. 从 2001 年平均水平 $16.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 逐渐上升至 2018 年平均水平 $31.33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中在 2006 年和 2017 年分别出现一次年度高峰值 $36.93 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $45.54 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 太湖水体 Chl-a 浓度随时间变化较为明显, 具有季节性分布特性, 从各个月份来看, 冬

季的 2 月平均水平最低 [$(13.67 \pm 4.80) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$], 夏季的 8 月平均水平最高 [$(44.8 \pm 22.48) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$]. 近年的 2016 ~ 2018 年的各月 Chl-a 水平都要高于 2000 ~ 2002 年的相应月份.

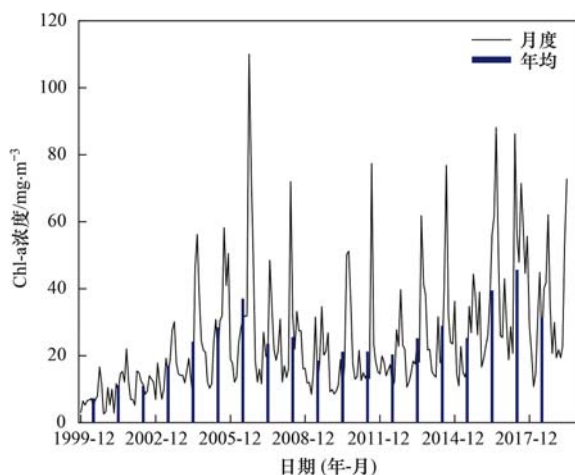


图 6 近 20 年来太湖水体 Chl-a 月度浓度分布及年均值

Fig. 6 Monthly Chl-a concentration distributions and annual average values in Lake Taihu in the past 20 years

太湖水体中 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 2006 年峰值以后, 总体上呈不断下降的趋势, 而 TP 和高锰酸盐指数呈上下波动变化 (图 7). TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的月度平均质量浓度最大值分别出现在 4 月 [$(3.12 \pm 0.58) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 和 3 月 [$(0.57 \pm 0.35) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 最小值则分别出现在 10 月 [$(1.39 \pm 0.29) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 和 8 月 [$(0.17 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$]. TP 和高锰酸盐指数的月度平均质量浓度最大值都出现在 8 月 [分别为 $(0.092 \pm 0.024) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(5.16 \pm 0.83) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 其次是 9 月 [分别为 $(0.085 \pm 0.021) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(5.11 \pm 1.02) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 最小值则都出现在 7 月 [分别为 $(0.062 \pm 0.019) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(4.32 \pm 0.80) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$]. 近 20 年来太湖地区月均气温分布

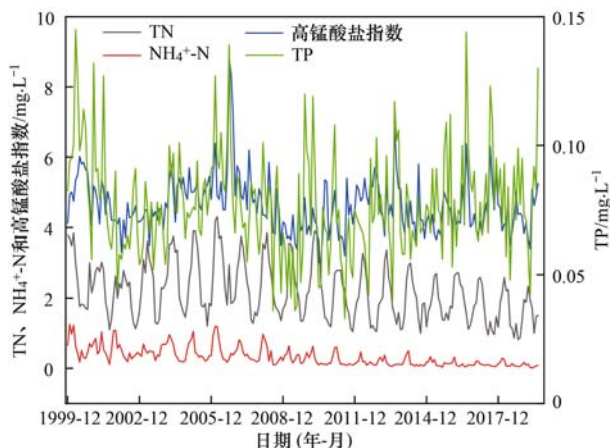


图 7 近 20 年来太湖水体月度营养盐质量浓度分布

Fig. 7 Distribution of monthly nutrient salt concentrations in Lake Taihu in the past 20 years

于 $0.55 \sim 32.3^\circ\text{C}$, 月均最高气温发生在 7 或 8 月, 月均最低气温发生在 1、2 或 12 月, 降雨量则与气温分布呈现相似的规律 (图 8).

总体上, TP、高锰酸盐指数、MAT 和 MR 与 Chl-a 浓度变化规律存在较好地同步性, TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 则表现出明显的滞后性.

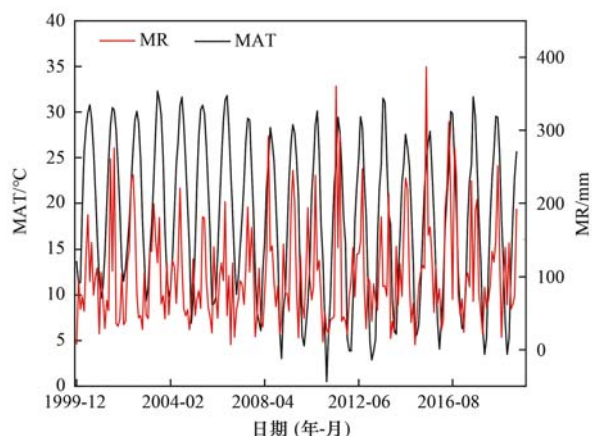


图 8 近 20 年来太湖地区月均气温及月降水量分布

Fig. 8 Distribution of monthly average temperature and monthly rainfall in Lake Taihu in the past 20 years

2.2 Chl-a 浓度与环境因子的关系分析

基于 1999 ~ 2019 年水文气象要素、水环境水生态指标等进行主成分分析 (表 1 和表 2) 发现, 成分中前 3 个成分特征值均大于 1, 且累计贡献率为 78.75%, 故可以提取前 3 个因子作为对 Chl-a 变化的 79.00% 的解释. 其中第一主成分为 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 第二主成分为 TP 和高锰酸盐指数, 第三主成分为 MAT 和 MR, 说明太湖水体 Chl-a 的变化开始受到营养盐和气象条件等因素的综合影响, 而不仅仅是基于 N 和 P 等限制性因素.

2.3 太湖 Chl-a 浓度的预测模型比较

经过太湖水质分析和环境因子主成分分析, 得出影响 Chl-a 浓度的主成分主要包括 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 和高锰酸盐指数、MAT 和 MR. 以此构建因变量 Y 为太湖 Chl-a 浓度, 自变量为环境因子的多元线性逐步回归方程: $Y(\text{Chl-a}) = 11.071 \text{ 高锰酸盐指数} - 31.224 \text{ NH}_4^+ - \text{N} + 0.307 \text{ MAT} - 22.442$. 根据该回归方程及各自变量的预测值可对相应时刻 Chl-a 的浓度进行预测. 同时, 构建了基于 1999 年 12 月至 2019 年 6 月为训练集的模型 $\text{ARIMA}(1, 1, 1)(0, 1, 1)$. 其次, 构建考虑引入 TN、TP、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、MAT 和 MR 环境因子作为自变量的模型 $\text{ARIMA}(0, 1, 1)(0, 1, 1)$. 根据所建的 3 种 Chl-a 浓度预测模型对历史数据进行拟合评估 (图 9), 模型 $Y(\text{Chl-a})$ 决定系数 (调整 R^2) = 0.488, 均方根误差 (RMSE) = 12.78, 纳什系数 (NSE) = 0.546, 其拟合

值总是稍高或稍低于实测值[图 9(a)];模型 ARIMA(1,1,1)(0,1,1)平稳的 $R^2 = 0.531$, RMSE = 13.30, NSE = 0.412, 其预测趋势与实测趋势大体一致,但 Chl-a 浓度的极值点拟合效果较差[图 9(b)];模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1)平稳的 $R^2 =$

0.632, RMSE = 10.89, NSE = 0.611, 其预测趋势与实测趋势基本一致,且大部分的峰值和谷值都拟合较好[图 9(c)]. 经综合比较,模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1)拟合效果较好,能很好地描述该太湖 Chl-a 浓度的动态变化.

表 1 1999 ~ 2019 年太湖月均水文气象和水环境指标主成分分析总方差

Table 1 Principal component analysis total variance of monthly average hydrometeorological and water environmental indicators of Lake Taihu from 1999 to 2019

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	2.387	34.095	34.095	2.387	34.095	34.095
2	1.702	24.310	58.405	1.702	24.310	58.405
3	1.425	20.351	78.755	1.425	20.351	78.755
4	0.579	8.265	87.020			
5	0.561	8.019	95.040			
6	0.347	4.960	100.000			

表 2 1999 ~ 2019 年太湖月均水文气象、水环境指标主成分分析得分系数

Table 2 Principal component analysis score coefficients of monthly hydrometeorological and water environmental indicators of Lake Taihu from 1999 to 2019

项目	主成分		
	1	2	3
MR	-0.224	0.346	0.738
MAT	-0.337	0.474	0.613
TN	0.958	0.007	0.275
TP	0.165	0.800	-0.320
NH ₄ ⁺ -N	0.749	0.106	-0.239
高锰酸盐指数	0.058	0.840	-0.299

采用 2019 年 7 ~ 8 月的 Chl-a 浓度对所构建的模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1)、ARIMA(1,1,1)(0,1,1)和 Y(Chl-a)进行比较验证(表 3). 模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1)预测值对 7 月和 8 月实测值的相对误差分别为 21.10% 和 8.62%,模型 ARIMA(1,1,1)(0,1,1)预测值的相对误差分别为 27.38% 和 14.40%,Y(Chl-a)预测的相对误差分别为 60.41% 和 33.83%. 模型 ARIMA(1,1,1)(0,1,1)预测的相对误差低于模型 Y(Chl-a),但两者的预测精度均低于模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1),说明引入自变量的时间序列模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1)对太湖 Chl-a 含量预测具有较高精度,能比较准确地反映太

表 3 3 种模型对 2019 年 7 ~ 8 月太湖水体

Chl-a 浓度的验证/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 3 Validation of the three models for Chl-a concentration predictions in Lake Taihu from July to August 2019/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

模型	7 月	相对误差/%	8 月	相对误差/%
实测值	80.90	—	69.10	—
ARIMA(0,1,1)(0,1,1)	63.83	21.10	75.06	8.62
ARIMA(1,1,1)(0,1,1)	58.75	27.38	79.05	14.40
Y(Chl-a)	32.03	60.41	45.72	33.83

湖 Chl-a 浓度短期的变化.

2.4 ARIMA 模型自变量优化

在 ARIMA 模型预测应用中,数据的预处理以及数据的输入对模型的成功建立至关重要^[23],其中自变量的取值方法是一项重要的步骤. 对比 3 种自变量取值方法(最近一期、最近三期平均值以及时间序列预测值)的预测值(表 4),结果表明代入时间序列预测自变量的值,ARIMA 模型预测值的相对误差最小,比采用最近一期和最近三期平均值的相对误差分别减少了 10.27% ~ 14.34% 和 1.96% ~ 5.71%.

表 4 自变量不同取值方法下 2019 年 7 ~ 8 月太湖水体

Chl-a 浓度预测值/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 4 Chl-a concentration predictions in Lake Taihu from July to August 2019 under different methods of independent variables/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

自变量取值方法	7 月	相对误差/%	8 月	相对误差/%
最近一期数据	55.52	31.37	53.23	22.96
最近三期平均值	62.24	23.06	79.00	14.33
时间序列预测	63.83	21.10	75.06	8.62

总的来说,ARIMA 模型较多元线性逐步回归模型具有更好的预测性能,对 Chl-a 的月平均浓度预测具有足够的精度,ARIMA 模型输入主要环境因素作为自变量及采用时间序列预测自变量值,可以提高它在预测中的适用性.

3 讨论

湖泊水体中 Chl-a 的发展演变往往是区域内社会经济、水文气象和土地利用等多种因素综合作用的结果. 特别是随着环境因素的逐渐改变和浮游植物的适应性变化,决定浮游植物生长繁殖的环境因素逐渐由一元走向多元,由单一效应发展为叠加效

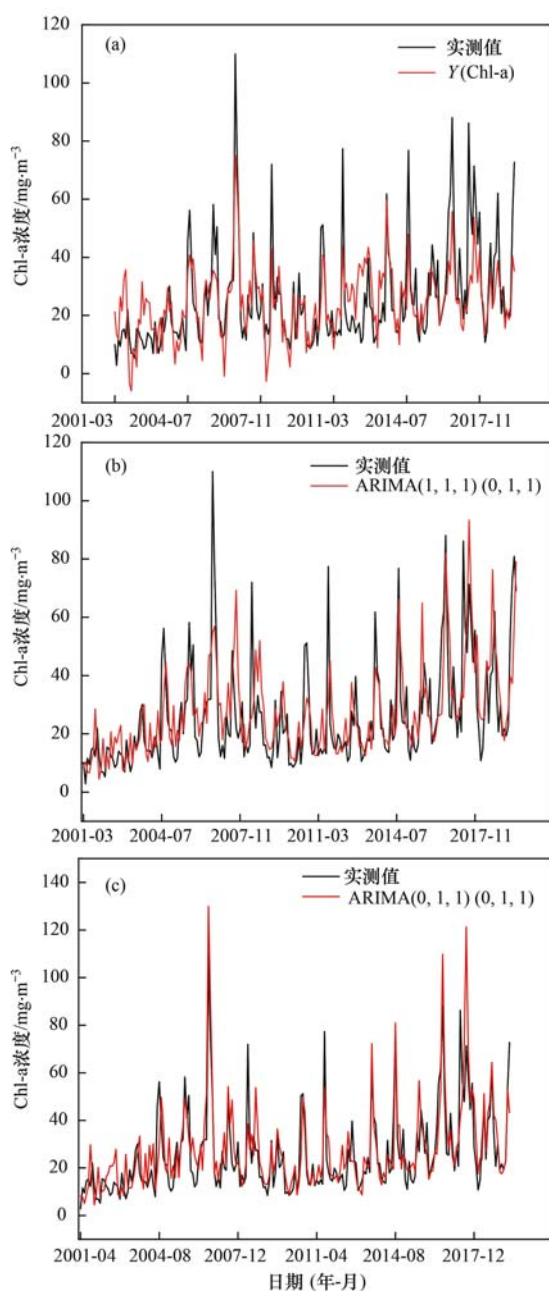


图9 太湖水体中 Chl-a 浓度各模型拟合效果

Fig. 9 Fitting effects of the measured and analog values of Chl-a in Lake Taihu

应. 线性回归方程能较好地总结归纳出基于历史资料的最佳拟合效果^[24,25],特别是考虑多元环境因素的综合效应后,其拟合效果有了较大提升.然而,湖泊水体中 Chl-a 是随时间变化而变化,具有明确时间先后顺序的时间序列,它的发展一方面遵循季节性生命周期规律另一方面也逐渐适应了区域环境的发展.线性回归方程往往注重历史资料的平均效应,对于某些变量来说,影响其发展变化的因素太多,或者是主要影响变量的数据难以收集,以致于难以建立回归模型来发现其变化发展规律.

ARIMA 模型对含有季节因素的时间序列具有较好地适用性,该模型在预测过程中不仅考虑了研

究过程的依赖性,还考虑了随机波动的干扰^[26].本文中 ARIMA 模型能较好地预测出太湖 Chl-a 浓度变化的趋势,且考虑自变量影响的 ARIMA 模型对极值点拟合效果也比较吻合.计算模型评估标准得出,ARIMA 模型的 R^2 较多元线性逐步回归模型提高了 11.88% 和 29.51%,其中引入自变量的 ARIMA 模型 R^2 提高到 0.632,且 RMSE 降低 14.79%,NSE 提高了 11.9%,最终 ARIMA 模型较多元线性逐步回归模型预测性能提高了 19.43% ~ 39.31%. Melesse 等^[27]应用 ARIMA 模型预测美国密西西比河和密苏里河的泥沙产量,在模拟的大多数统计性能指标上,ARIMA 都比多元回归分析方法更好;Chen 等^[13]计算了 ARIMA 和多元线性逐步回归模型预测数据与观测数据之间的绝对误差(AEP)、均方根误差(RMSE)和一致性指数(IoA),ARIMA 模型的 AEP、RMSE 均比多元线性回归模型低,而 IoA 比多元线性回归模型高.这也证明了 ARIMA 模型模拟值与历史数据的拟合效果和预测精度较多元线性逐步回归模型更好.

Chl-a 浓度不仅是具有时间效应的数据序列,其含量也与多种环境因子有关.经过主成分分析得出影响 Chl-a 的环境因子主要有 TN 和 NH_4^+-N 、TP 和高锰酸盐指数、水文气象因素,这与前人研究结果一致^[28,29].将这些变量引入模型中,较不加自变量的模型,二者的信息均可靠且有效,但增加自变量模型的平稳 R^2 (0.632) 要高于不加自变量的模型 (0.546),并且 RMSE 降低了 18.14%,NSE 提高了 48.30%,故拟合程度较之更好. Faruk 等^[19]使用 ARIMA 模型进行水质(例如 DO)时间序列预测,模型能够显示一年中高低水质值的周期,但无法准确预测水质值每月变化幅度.而王盼盼等^[30]将影响 Chl-a 浓度的环境因子变量引入 ARIMA 模型中,较不加自变量的 ARIMA 模型,Chl-a 浓度观测值和模拟值的拟合程度和预测效果较之更好.这表明在实际应用中将自变量作为模型的外部因素增加到时间序列分析中,模型的拟合精度及预测精度得到进一步提高.这进一步说明,太湖水体 Chl-a 的变化已经开始依赖于多维综合因素的变化,而不仅仅是单个因素所能决定的.

4 结论

(1) 太湖 Chl-a 浓度存在着明显的季节变化,它的变化开始依赖于多维因素变化的综合效应.其中 TP、高锰酸盐指数、MAT 和 MR 与 Chl-a 含量变化规律存在较好的同步性,TN 和 NH_4^+-N 则表现出明显的滞后性.

(2) 基于近 20 年来月度资料建立的 Chl-a 时间序列模型 ARIMA(1,1,1)(0,1,1) 较多元线性逐步回归模型对太湖 Chl-a 浓度短期变化有较好的预测性能,将重要环境因子作为变量输入且采用时间序列方法赋值自变量后所得模型 ARIMA(0,1,1)(0,1,1) 的预测精度进一步提高。

(3) ARIMA 模型对太湖藻华的短期预测预警有较大的应用潜力,在之后的时间序列分析中可以考虑按太湖富营养化程度进行分区建模,合理设定环境变量及其取值,进一步完善和验证 ARIMA 模型在太湖水生态环境管理中的应用。

参考文献:

- [1] Carvalho L, Poikane S, Solheim A L, *et al.* Strength and uncertainty of phytoplankton metrics for assessing eutrophication impacts in lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2013, **704**(1): 127-140.
- [2] Oliver S K, Collins S M, Soranno P A, *et al.* Unexpected stasis in a changing world: lake nutrient and chlorophyll trends since 1990[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(12): 5455-5467.
- [3] Wang F, Wang X, Chen B, *et al.* Chlorophyll a simulation in a lake ecosystem using a model with wavelet analysis and artificial neural network[J]. *Environmental Management*, 2013, **51**(5): 1044-1054.
- [4] Chen M J, Li J, Dai X, *et al.* Effect of phosphorus and temperature on chlorophyll a contents and cell sizes of *Scenedesmus obliquus* and *Microcystis aeruginosa*[J]. *Limnology*, 2011, **12**(2): 187-192.
- [5] Mayora G, Devercelli M, Giri F. Spatial variability of chlorophyll-a and abiotic variables in a river-floodplain system during different hydrological phases[J]. *Hydrobiologia*, 2013, **717**(1): 51-63.
- [6] de Oliveira Marcionilio S M L, Machado K B, Carneiro F M, *et al.* Environmental factors affecting chlorophyll-a concentration in tropical floodplain lakes, Central Brazil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(11), doi: 10.1007/s10661-016-5622-7.
- [7] 吴召仕, 张路, 刘宝贵, 等. 鄱阳湖丰水期水体中叶绿素 a 含量空间分布及其与环境因子的关系[J]. *湿地科学*, 2014, **12**(3): 286-292.
Wu Z S, Zhang L, Liu B G, *et al.* Spatial distribution of chlorophyll a in Poyang Lake during wet season and its relationship with environmental factors[J]. *Wetland Science*, 2014, **12**(3): 286-292.
- [8] Staehr P A, Baastrop-Spohr L, Sand-Jensen K, *et al.* Lake metabolism scales with lake morphometry and catchment conditions[J]. *Aquatic Sciences*, 2012, **74**(1): 155-169.
- [9] Wu Z S, Cai Y J, Liu X, *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: the largest freshwater lake in China[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(3): 476-483.
- [10] 黄毅. SARIMA 模型在月平均温度时间序列中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
Huang Y. The SARIMA model in the monthly average temperature time series applications[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [11] Liu H, Tian H Q, Li Y F. Comparison of two new ARIMA-ANN and ARIMA-Kalman hybrid methods for wind speed prediction[J]. *Applied Energy*, 2012, **98**: 415-424.
- [12] Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis; forecasting and control[M]. San Francisco, CA: Holden-Day, 1976.
- [13] Chen Q W, Guan T S, Liu Y, *et al.* Online forecasting chlorophyll a concentrations by an auto-regressive integrated moving average model: Feasibilities and potentials[J]. *Harmful Algae*, 2015, **43**: 58-65.
- [14] 龚绍琦, 黄家柱, 李云梅, 等. 应用时间序列分析法对太湖叶绿素-a 含量的动态研究[J]. *海洋与湖沼*, 2008, **39**(6): 591-598.
Gong S Q, Huang J Z, Li Y M, *et al.* The time series of chlorophyll-a content in Taihu Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, **39**(6): 591-598.
- [15] 尹义星, 许有鹏, 张小娜, 等. 基于时间序列分解方法的太湖未来特征水位预测[J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(4): 172-175.
Yin Y X, Xu Y P, Zhang X N, *et al.* Forecasting characteristic water levels of Taihu Lake based on time series decomposing method[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(4): 172-175.
- [16] 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 等. 太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5438-5447.
Lü J P, Zhang Z F, Liu Y, *et al.* Distribution characteristics and source identification of organophosphate esters in key waters areas of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5438-5447.
- [17] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001, 248.
He X Q, Liu W Q. Applied regression analysis[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2001. 248.
- [18] Tiao G C. Time series: ARIMA methods[A]. In: Smelser N J, Baltes P B (Eds.). *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*[M]. Chicago: University of Chicago, 2001. 363-407.
- [19] Faruk D Ö. A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series prediction[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, **23**(4): 586-594.
- [20] Mishra A K, Desai V R. Drought forecasting using stochastic models[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2005, **19**(5): 326-339.
- [21] Fraley C, Raftery A E. How many clusters? Which clustering method? Answers via model-based cluster analysis[J]. *The Computer Journal*, 1998, **41**(8): 578-588.
- [22] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, **10**(3): 282-290.
- [23] Wilson H, Recknagel F. Towards a generic artificial neural network model for dynamic predictions of algal abundance in freshwater lakes[J]. *Ecological Modelling*, 2001, **146**(1-3): 69-84.
- [24] 朱广伟, 施坤, 李未, 等. 太湖蓝藻水华的年度情势预测方法探讨[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1421-1431.
Zhu G W, Shi K, Li W, *et al.* Seasonal forecast method of cyanobacterial bloom intensity in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1421-1431.
- [25] 郭子扬, 李畅游, 史小红, 等. 寒旱区呼伦湖水体叶绿素 a 含量的时空分布特征及其影响因子分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(7): 1434-1442.
Guo Z Y, Li C Y, Shi X H, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll a content and its

- influencing factor analysis in Hulun Lake of cold and dry Areas [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(7): 1434-1442.
- [26] 史代敏, 谢小燕. 应用时间序列分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. 293.
- [27] Melesse A M, Ahmad S, McClain M E, *et al.* Suspended sediment load prediction of river systems: an artificial neural network approach [J]. Agricultural Water Management, 2011, **98**(5): 855-866.
- [28] 张智渊, 牛远, 余辉, 等. 基于 GAM 模型的太湖叶绿素 a 含量与环境因子相关性分析[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(5): 886-892.
- Zhang Z Y, Niu Y, Yu H, *et al.* Relationship of chlorophyll-a content and environmental factors in Lake Taihu based on GAM model[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(5): 886-892.
- [29] 王玉珏, 刘哲, 张永, 等. 2010-2011 年胶州湾叶绿素 *a* 与环境因子的时空变化特征[J]. 海洋学报, 2015, **37**(4): 103-116.
- Wang Y J, Liu Z, Zhang Y, *et al.* Temporal and spatial variations of chlorophyll *a* and environmental factors in Jiaozhou Bay in 2010-2011 [J]. Haiyang Xuebao, 2015, **37**(4): 103-116.
- [30] 王盼盼. 基于决策树和相关权重的水质评价与时序预测研究[D]. 保定: 河北大学, 2018.
- Wang P P. Research on water quality assessment and time series prediction based on decision tree and related weights ——Take Taihu as an example[D]. Baoding: Hebei University, 2018.

《环境科学》连续 9 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)