

物元分析法在池塘循环流水养殖模式监测点优化中的应用

孙真¹, 张国奇², 刘宇¹, 刘一萌¹, 周陆^{2,3}, 高鹏程¹, 么宗利¹, 周凯¹, 来琦芳^{1*}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090; 2. 上海市松江区水产良种场, 上海 201600; 3. 上海松江农业发展有限公司, 上海 201600)

摘要:基于2018年—2019年松江池塘循环流水养殖模式水质监测数据,采用物元分析和聚类分析相融合的评价方法对水环境质量状况进行评价。结果表明,改进后的物元分析适用于池塘循环流水养殖模式监测网络,监测点从19个减少到8个,可节省50%的成本。 F 检验和 T 检验验证结果表明,优化后的监测网络能较好地代表原始监测网络。

关键词:优化布点;物元分析;聚类分析;池塘循环流水养殖系统

中图分类号: X832 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2021)06-0056-04

Application of Matter Element Analysis in Monitoring Point Optimization of In-pond Raceway System

SUN Zhen¹, ZHANG Guo-qi², LIU Yu¹, LIU Yi-meng¹, ZHOU Lu^{2,3}, GAO Peng-cheng¹,
YAO Zong-li¹, ZHOU Kai¹, LAI Qi-fang^{1*}

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Songjiang Aquaculture Original Breed Farm, Shanghai 201600, China; 3. Shanghai Songjiang Agricultural Development Corporation, Shanghai 201600, China)

Abstract: Based on the water quality monitoring data of an in-pond raceway system in Songjiang from 2018 to 2019, the water environmental quality was evaluated by improved matter element analysis and cluster analysis. Results showed that the improved matter element analysis was suitable for the monitoring network of the system, the number of monitoring points were reduced from 19 to 8, 50% of the cost was saved. The results of T test and F test showed that the optimized monitoring network could better represent the original network.

Key words: Monitoring point optimization; Matter element analysis; Cluster analysis; In-pond raceway system

池塘循环流水养殖系统(IPRS)2007年首次在美国阿拉巴马州的鲶鱼商业化养殖中获得成功^[1]。截至2016年,我国IPRS面积约15.7 hm²,并逐渐在江、浙、沪等地推广应用^[2-3]。布设大量监测点存在点位过多、重复性大、资源浪费等问题^[4-5]。IRPS模式水体面积较小,存在流水槽、吸污装置、沉淀池、湿地、外塘等多个环节,不同工艺上下游水质可能存在较大差异。为了科学合理评估该模式,有必要对原有监测网络进行重新评估,调整和优化监测点位,使之更具科学性和代表性。

物元分析^[6-7]、动态贴近度^[8]、模糊聚类^[9]、最优分割理论^[10]、主成分分析^[11-12]可作为监测点优化布设方法,在实践中各具特色也存在缺陷。物

元分析由我国学者蔡文创立^[13],江立文等^[7]利用物元分析将瑶湖水水质监测点从14个减至9个,Wang等^[6]将河流监测网络由17个减至13个,甘宁等^[14]在物元分析基础上引入重心距离,使监测效率提高25%。然而,以上应用存在计算烦琐、缺乏统计验证、有人为误差等问题。Pandas是基于

收稿日期:2020-10-23;修订日期:2021-10-20

基金项目:上海市科技兴农重点攻关基金资助项目(沪农科创字2018第2-11号);中央级公益性科研院所基本业务费专项资金资助项目(2018Z02-03)

作者简介:孙真(1988—),女,陕西西安人,助理研究员,博士,主要从事水环境生态修复研究。

*通信作者:来琦芳 E-mail: qifanglai@163.com

Python 语言的一种开源数据处理库,可以处理亿级数据,代码操作简单,避免复杂运算^[15],目前并未有借助 Pandas 平台进行物元分析、聚类分析^[16]和独立样本 *T* 检验的研究。采用物元分析法优化水质监测网络,在满足长期追踪水质分布目标的基础上,可减少水质监测成本。今将该方法应用于优化池塘循环流水养殖模式监测网络,为淡水养殖尾水达标排放提供决策依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概 况

研究区位于上海市松江南部, N30° 91' ~ N 31° 25', E121° 13' ~ E 121° 48', 占地面积 67 hm²。池塘 1 和池塘 2 均为循环流水养殖模式,塘 1 占地 3.2 hm²、塘 2 占地 4.3 hm²,池塘有效水深均为 1.5 m,池底平坦,进排水方便。该模式由养殖池、吸污装置、沉淀池、湿地、外塘 5 部分组成,监测点背景资料参照表 1。

表 1 监测点位背景资料

Table 1 Information of monitoring points in study area

监测点	模式	水流方向
1	塘 1	流水养殖槽上游
2		流水养殖槽下游/沉淀池进水口
3		沉淀池出水口/湿地进水口
4		湿地出水口/外塘进水口
5		外塘排水口
16		浮床下游
17	浮床上游	
18	外塘塘中	
19	外塘	
7	塘 2	流水养殖槽上游南侧
8		流水养殖槽下游南侧/沉淀池南侧进水口
9		沉淀池出水口/湿地进水口
10		湿地出水口/外塘进水口
11		外塘南侧排水口
12		流水养殖槽上游北侧
13	流水养殖槽下游北侧/沉淀池北侧进水口	
14	外塘北侧排水口	
15	常规	对照池塘
6		水源

塘 1 和塘 2 的放养密度分别为 1 600 尾/亩和 2 000 尾/亩,放养规格分别为 600 g ~ 700 g 和 700 g,亩产均为 >3 000 kg。常规模式的放养密度为 400 尾/亩,放养规格为 2 000 g,亩产为

1 600 kg。养殖池中固定若干流水单元池,配套草鱼养殖生产,两端设有拦鱼网,池内水体在曝气推水设备下持续流动。吸污装置设置在养殖池后方,可及时、有效地收集残饵粪便,并转送至沉淀池。沉淀池后接湿地,种植空心菜等水生植物,净化后水体经外塘回流至养殖池。外塘放养套养鱼类,如滤食性白鲢等。

1.2 分析方 法

2018 年 8 月—2019 年 11 月,试验地共布设 19 个水质采样点,见图 1(a)(b),每月采集一二次水样,并在现场和实验室进行监测指标测量。用 500 mL 聚乙烯瓶从表层以下 0.5 m 深度采集每个点位样品。样品于恒温箱中 4 ℃ 下保存,实验室分析总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、悬浮物(SS)、pH 值,监测方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。

1.3 物元分析法

1.3.1 理想点和期望点的拟定

物元分析是一种较理想的水质监测点优化布局方法,通过建立各水质监测点位的物元分析模型,计算各点位物元与 2 个标准物元之间的线性关联函数值和点位分布,从而确定优化的点位。以《淡水养殖尾水排放要求(征求意见稿)》(以下简称《排放要求》)为依据,标准中 pH 限值为 6 ~ 9,故选取 TN、TP、I_{Mn}、SS 这 4 项水质监测指标的年平均值进行物元分析。根据物元分析法原理,拟定各项水质监测指标的最优理想点、最差理想点、数学期望点。

$$\begin{aligned} \min_j &= \left\{ \begin{array}{l} \min \\ i \end{array} \begin{array}{l} \max \\ x_{ij}, j \in J; x_{ij}, j \in J' \end{array} \right\} \\ \max_j &= \left\{ \begin{array}{l} \max \\ i \end{array} \begin{array}{l} \min \\ x_{ij}, j \in J; x_{ij}, j \in J' \end{array} \right\} \\ \text{mean}_j &= \left\{ \bar{x}_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} / n \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \min_j 为第 *j* 项监测指标的最优理想点值,即各指标最小值; \max_j 为第 *j* 项监测指标的最差理想点值,即各指标最大值; mean_j 为第 *j* 项监测指标的数学期望点值,即各指标平均值。

1.3.2 权重值的确定

根据《排放要求》,计算监测指标的权值 w_j 。

$$w_j = \frac{x_j / s_j}{\sum_{j=1}^4 x_j / s_j} \quad (2)$$

式中: w_j 为第 j 项监测指标的权重; x_j 为第 j 项监测指标最优理想点与最差理想点的均值; s_j 为第 j 项

监测指标等级限值的平均值。

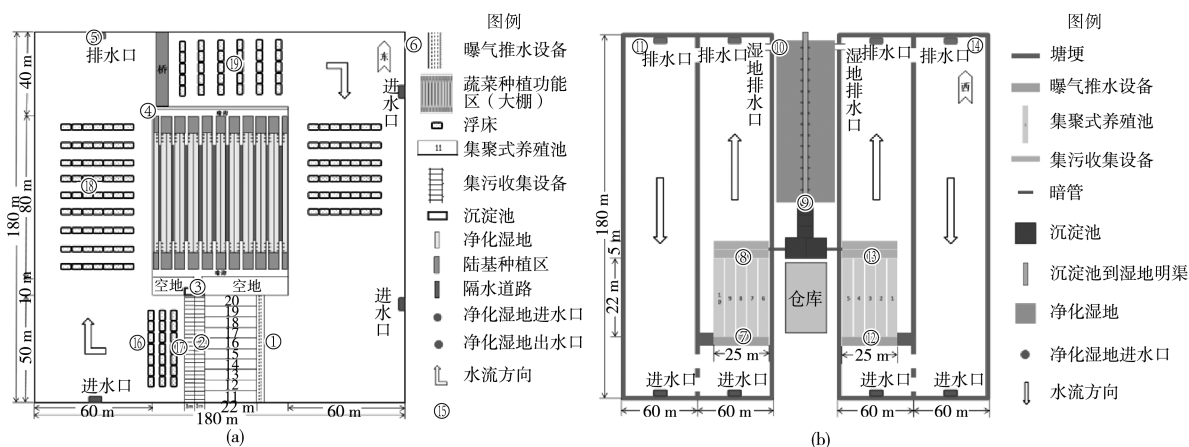


图1 优化前研究区及监测点示意

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring points and the study area before optimization

1.3.3 关联函数的计算

根据水质监测点的最优理想关联函数 $k_a(x_{ij})$ 和最差理想关联函数 $k_b(x_{ij})$, 计算水质监测点最优综合标准关联函数 $K_a(X_i)$ 和最差综合标准关联函数 $K_b(X_i)$ 。

$$k_a(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \text{mean}_j}{\text{mean}_j - \text{min}_j} \quad (3)$$

$$k_b(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \text{mean}_j}{\text{mean}_j - \text{max}_j} \quad (4)$$

$$K_a(X_i) = \sum_{j=1}^4 w_j k_a(x_{ij}) \quad (5)$$

$$K_b(X_i) = \sum_{j=1}^4 w_j k_b(x_{ij}) \quad (6)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个监测点处第 j 项监测指标的监测值。

1.4 数据处理

实验数据利用 Pandas 进行分析计算。利用 Mathpix Snipping Tool 绘制数学公式, Origin 8.0 绘制综合关联函数的散点图。利用 SPSS 19.0 基于采样点的最优、最差综合关联函数值进行聚类分析确定分类归属, 独立样本 T 检验对优化结果进行验证。

2 结果与讨论

2.1 水质特征

虽然各指标在研究期的变化范围较大, 但中位数和平均值相差较小。SS 为 46.2 mg/L ~ 149 mg/L, 均值为 (78.93 ± 25.44) mg/L, 中位数为 75.33 mg/L。I_{Mn} 为 6.92 mg/L ~ 27.2 mg/L, 均值和中位数分别

为 18.9 mg/L 和 19.0 mg/L。TP 为 0.52 mg/L ~ 6.88 mg/L, 均值和中位数分别为 4.22 mg/L 和 4.35 mg/L。TN 为 4.37 mg/L ~ 26.7 mg/L, 均值和中位数分别为 15.35 mg/L 和 17.18 mg/L。监测结果与《排放要求》相比, 主要污染物为 TN 和 TP, 部分采样点 SS 和 I_{Mn} 存在超标情况, pH 值均达标, 同时监测点 6 水源 TN 超标也较为严重。

2.2 基于物元分析的监测点优化

通过物元分析对池塘循环流水养殖模式监测点进行优化, 获得权重系数 w_j 、关联函数 $K_a(X_i)$ 和 $K_b(X_i)$ 。聚类分析避免了人为判断散点图带来的分组误差, 将监测点 2、13、1、19、18、4 并为一类, 监测点 7、11、8、14 并为一类, 监测点 12、17、16、5 并为一类, 监测点 15、3、9、10、6 分别单独作为一类。

根据综合关联函数 $K_a(X_i)$ 和 $K_b(X_i)$ 值, 以 $K_a(X_i) - K_b(X_i)$ 为坐标轴绘制监测点综合关联函数散点图。结果表明, 19 分布在第二象限, 4 分布在第四象限, 2 位于 Y 轴上, 均不符合最佳理想标准和最差理想标准, 故将其舍去。各聚集区所含的监测点性质相近, 监测数据数量级相同。可从每个区选出 1 个具有代表性的测点来代替其他测点。其余监测点位于图中第一、三象限, 被划分成 8 个聚集区。分别为 I 区 (含监测点 6); II 区 (含监测点 15); III 区 (含监测点 5、16、17、12); IV 区 (含监测点 13、1、18); V 区 (含监测点 8、14、7、11); VI 区 (含监测点 10); VII 区 (含监测点 9); VIII 区 (含监测

点3)。左上角水质相对较好,越往右下角,水质相对越差。点位优化分析除满足以上条件外,还应考虑点位分布是否涵盖所有水质处理环节,在保证各功能区均有监测点的前提下,优先考虑监测中数据量更全的点。

使用物元分析后,监测点数量从19个减少到8个,即选择监测点6、15、5、1、8、10、9、3。优化后监测网更加有效,同时节省50%监测成本。因此,对于采用池塘循环流水养殖模式的池塘,在选择监测网络时须考虑不同工艺的影响,应在流水槽-吸污、沉淀池、湿地、排水口这几个关键环节设置监测点。

2.3 水质监测优化结果验证

F 检验和 T 检验比较了优化前后监测网络的差异性。分别对SS、 I_{Mn} 、TP、TN进行显著性水平为0.05的检验,结果见表2。

表2 水质监测点的 F 检验与 T 检验

Table 2 F and T test results of water quality monitoring points

指标	F 检验(方差检验)			T 检验(均值检验)		
	F	Sig.	结果	T	Sig.(双侧)	结果
SS	0.063	0.801	方差	0.106	0.916	无显
I_{Mn}	1.740	0.188	相等	0.912	0.362	著差
TP	0.506	0.477		1.246	0.213	异
TN	1.836	0.176		-0.741	0.459	

由表2可知,方差齐性且 $P > 0.05$,未优化的监测网络与优化的监测网络的 I_{Mn} 、TP、TN均无显著性差异。优化后的物元分析法可正确代表原始监测网络,比初始监测网络高效且经济。

3 结语

上述研究提供了池塘循环流水养殖模式监测网络的数据,各监测点TN、TP超标严重,水源TN超标,部分监测点SS、 I_{Mn} 超标,TN污染与水源超标密切相关,高密度养殖方式引入了大量TP。通过物元分析和聚类分析,监测区域的数量从19个减少到8个,节省了50%监控成本,且优化前后水质数据无显著性差异。

Pandas快速有效地实现复杂计算,物元分析和聚类分析在池塘循环流水养殖中的应用可高效经济地代表原始监控网络。上述研究结果有助于

制定有效的管理策略,为科学合理地评价池塘循环流水养殖模式的水质提供有效手段。

[参考文献]

- [1] BROWN T W, CHAPPELL J A, BOYD C E. A commercial-scale, in-pond raceway system for Ictalurid catfish production [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(3): 72-79.
- [2] 李倩,郭建林,王雨辰,等. 池塘内循环流水养殖下太湖鲂(翘嘴鲂(♀)×三角鲂(♂))肠道微生物群落变化的研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(2): 364-370.
- [3] 刘梅,宓国强,郭建林,等. 池塘内循环流水养殖模式对黄颡鱼生长性能、形体指标、血清生化指标及肌肉营养成分的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(4): 1704-1717.
- [4] TELCI I T, NAM K, GUAN J B, et al. Optimal water quality monitoring network design for river systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 2987-2998.
- [5] 肖中新. 安徽省辖淮河流域省控地表水环境 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [6] WANG H, LIU Z, SUN L N, et al. Optimal design of river monitoring network in Taizihe River by matter element analysis [J]. *PLoS One*, 2015, 10: 1371.
- [7] 江立文,陈杨,林曦,等. 瑶湖湖泊水质监测点的优化布设研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(9): 197-200.
- [8] 崔海波,殷永泉,崔兆杰,等. 动态贴近度法再徒骇河干流水质监测点优化中的应用[J]. *环境监控与预警*, 2015, 7(3): 17-21.
- [9] 梁伟臻,叶浸润,杨静. 模糊聚类分析法优化城市河涌水质监测点[J]. *环境监测管理和技术*, 2002, 14(3): 6-7.
- [10] 潘映默,王菲凤,张江山. 基于最优分割理论的酸雨监控点位的分类研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(8): 66-70.
- [11] OUYANG Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis [J]. *Water Research*, 2009, 39: 2621-2635.
- [12] 陈昭明,王伟,赵迎,等. 改进主成分分析与多元回归融合的汉丰湖水水质评估及预测[J]. *环境监测管理和技术*, 2020, 32(4): 15-19.
- [13] 蔡文. 物元分析[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1987: 85-97.
- [14] 甘宁,殷实,王辉,等. 物元分析法的改进及其在辽河干流水质监测断面优化中的应用[J]. *环境监测管理和技术*, 2017, 29(3): 8-12.
- [15] MCKINNEY W. Python for data analysis: Data wrangling with pandas, numpy, and ipython [M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2012.
- [16] SHRESTHA S, KAZAMA F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(4): 464-475.

本栏目编辑 吴珊