

基于PCA和SOM模型的龙感湖水质时空动态研究

肖灵君 王普泽 熊满堂 叶少文 张堂林 刘家寿 李钟杰

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF WATER QUALITY IN LONGGAN LAKE BASED ON PRINCIPLE COMPONENT ANALYSIS (PCA) AND SELF-ORGANIZING MAPPING NEURAL NETWORK (SOM) MODELLING

XIAO Ling-Jun, WANG Pu-Ze, XIONG Man-Tang, YE Shao-Wen, ZHANG Tang-Lin, LIU Jia-Shou, LI Zhong-Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.109>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Ecopath模型的千岛湖生态系统结构和功能分析

ANALYSIS ON THE ECOSYSTEM STRUCTURE AND FUNCTION OF LAKE QIANDAO BASED ON ECOPATH MODEL

水生生物学报. 2021, 45(2): 308–317 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.128>

洪泽湖大型水生植物群落结构和时空格局的GIS模拟

MAPPING SPATIOTEMPORAL TRENDS IN THE ABUNDANCE AND DISTRIBUTION OF MACROPHYTES IN HONGZE LAKE

水生生物学报. 2018, 42(6): 1153–1162 <https://doi.org/10.7541/2018.141>

洞庭湖鱼类的群落结构及其时空动态

SPATIO-TEMPORAL VARIATIONS OF FISH ASSEMBLAGES IN THE DONGTING LAKE

水生生物学报. 2019, 43(S1): 42–48 <https://doi.org/10.7541/2019.165>

鲢浮游动物群落特征及水质评价

THE CHARACTERISTICS OF ZOOPLANKTON COMMUNITY AND WATER QUALITY IN THE SHIHOUDIAN LAKE

水生生物学报. 2020, 44(6): 1313–1321 <https://doi.org/10.7541/2020.152>

青海湖刚毛藻分布特征变化及成因分析

ANALYSIS ON THE DISTRIBUTION AND ORIGIN OF *CLADOPHORA* IN THE NEARSHORE WATER OF QINGHAI LAKE

水生生物学报. 2020, 44(5): 1152–1158 <https://doi.org/10.7541/2020.133>

长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策

THE YANGTZE RIVER-FLOODPLAIN ECOSYSTEM: MULTIPLE THREATS AND HOLISTIC CONSERVATION

水生生物学报. 2019, 43(S1): 157–182 <https://doi.org/10.7541/2019.178>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.109

## 基于PCA和SOM模型的龙感湖水质时空动态研究

肖灵君<sup>1,2</sup> 王普泽<sup>1,2,3</sup> 熊满堂<sup>1,2</sup> 叶少文<sup>1</sup> 张堂林<sup>1</sup> 刘家寿<sup>1</sup> 李钟杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 大连海洋大学, 大连 116023)

**摘要:** 为评估湖泊渔业模式转型阶段水环境的时空动态, 选择长江中下游典型湖泊龙感湖为研究地点, 于2017—2018年对该湖的黄梅水域和宿松水域进行周年季度水质监测, 通过主成分分析(PCA)和自组织特征映射人工神经网络(SOM)模型定量分析了水体理化参数的时空变化特征, 采用综合营养状态指数法(TLI)对水体富营养化状况进行了评价。PCA分析结果表明, 龙感湖宿松水域和黄梅水域的水质差异较小, 季节动态明显。全湖氨氮夏季平均浓度高达0.64 mg/L; 总氮夏季平均浓度为2.30 mg/L, 冬季平均浓度为1.04 mg/L; 叶绿素 $a$ 夏季平均含量达95.28  $\mu\text{g/L}$ , 秋季平均浓度为28.30  $\mu\text{g/L}$ ; pH夏季最高, 达9.27; 总磷冬季最高, 平均为0.22 mg/L; TLI指数表明龙感湖除秋季属于轻度富营养水体外, 其他3个季节均属于中度富营养状态。SOM模型结果具有可视化强的优点, 能够更清晰和直观地反映龙感湖水质的时空分布动态。围栏拆除和禁渔等管理措施有助于湖泊渔业环境修复和资源恢复, 建议对渔业模式转型后的湖泊生态系统变化进行长期跟踪监测评估。

**关键词:** 湖泊渔业模式转型; 水质时空变化; 主成分分析(PCA); 自组织特征映射人工神经网络(SOM); 湖泊生态系统

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)05-1104-08



龙感湖是长江中下游重要的淡水湿地, 具有涵养水源、调蓄洪水和维持生物多样性等重要生态功能<sup>[1]</sup>。龙感湖曾是养殖开发的优良水域, 过去20多年间实施以围栏养殖为主的渔业生产模式<sup>[2]</sup>。围栏养殖虽大幅增加了渔产量和渔民收入, 但高强度的养殖方式也造成了严重的环境问题, 如栖息地破碎、渔业资源枯竭、生物多样性降低、生态系统退化及水体富营养化加剧等<sup>[3-5]</sup>。为加强湖泊生态保护, 改善湖泊生态环境, 中央及地方政府发布了一系列的管理方案和意见, 强令禁止围栏围网养殖, 龙感湖目前已完成了围栏围网的拆除整治工作, 有必要对该湖渔业养殖模式转型阶段的水环境动态进行监测和评估。

一般而言, 水环境评价可分为单项评价和多项综合评价, 单项评价是根据国家标准和湖泊环境本

底值, 评价主要水质参数的超标程度, 计算相对容易; 综合评价则是考虑水体中主要污染物的综合作用, 确定水质的综合级别。常用的地表水水质综合评价方法有模糊评价法、灰色系统评价法、层次分析法、主成分分析、聚类方法、人工神经网络法和水质标识指数法等<sup>[6,7]</sup>。

本研究以长江中下游典型浅水养殖型湖泊龙感湖为研究地点, 于2017—2018年对该湖的2个跨省界水域(湖北省黄梅水域和安徽省宿松水域)的水质状况进行周年季度调查, 通过主成分分析(PCA)和自组织特征映射人工神经网络(SOM)模型, 定量分析主要水质参数的时空动态, 同时采用综合营养状态指数法对水体富营养化状况进行评价, 以期为我国湖泊渔业养殖模式转型的环境效应评估和湖泊生态系统长期监测提供参考。

收稿日期: 2020-05-14; 修订日期: 2020-10-10

**基金项目:** 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-3-2); 国家重点研发计划(2019YFD0900603); 国家自然科学基金(51679230); 淡水生态与生物技术国家重点实验室自主研究项目(2019FBZ02)资助 [Supported by the Key Strategic Program, CAS (ZDRW-ZS-2017-3-2); the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900603); the National Natural Science Foundation of China (51679230); the State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology (2019FBZ02)]

**作者简介:** 肖灵君(1993—), 女, 硕士研究生; 主要研究方向为渔业生态学。E-mail: lingjun@ihb.ac.cn

**通信作者:** 叶少文(1979—), 男, 副研究员; 博士; 主要研究方向为渔业生态学。E-mail: yeshw@ihb.ac.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点

龙感湖(115°59'—116°18'E, 29°51'—30°05'N)位于长江下游北岸, 与南岸的鄱阳湖隔江相望, 北依大别山, 东临大官湖, 西近太白湖, 系古长江变迁与跨长江两岸古彭蠡泽解体后的残迹湖<sup>[8]</sup>。该湖属于跨省界浅水湖泊, 包括湖北省的黄梅水域和安徽省的宿松水域(以围网分隔, 图 1), 是传统的高强度围栏养殖湖泊。在农业农村部关于加快推进渔业转方式调结构的指导意见和地方政府管理部门的有力推动下, 该湖黄梅水域和宿松水域分别于2017年夏季和2018年初完成了养殖围栏的拆除工作。根据水域空间特征和围栏拆除时间情况, 在黄梅水域和宿松水域共设置15个采样点(图 1), 于2017年冬季(12月)和2018年春季(4月)、夏季(8月)、秋季(11月)对主要水质参数进行周年季度调查。

### 1.2 水样采集和分析

水样采集时在各采样点现场测量水深(WD)和透明度(SD), 通过便携式多参数水质分析仪(YSI)测定pH、水温(WT)、溶解氧(DO)和电导率(Cond); 用采水器取中上层水样, 注入1 L塑料瓶密封保存, 带回实验室检测。主要水质指标按照《湖泊生态调查观测和分析》、《水和废水监测分析方法-第四版》和《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》规定的标准方法进行分析测定, 其中总氮(TN)、亚硝酸氮( $\text{NO}_2^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)和高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、纳氏试剂分光光度法和高锰酸钾氧化滴定法, 总磷(TP)采用

过硫酸钾氧化-钼酸铵分光光度法, 叶绿素 $a$ 含量采用丙酮萃取分光光度法。

### 1.3 水域营养状态评价

采用环境保护部《地表水环境质量评价方法(试行)》(2011年)<sup>[9]</sup>规定的综合营养状态指数法 $TLI(\Sigma)$ 对龙感湖水域营养状态进行数值化分级评价, 选择的参数包括叶绿素 $a$ (Chl. $a$ )、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)和高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )。

计算各参数的营养状态指数  $TLI$ , 计算公式为:

$$TLI(\text{Chl.}a) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln \text{Chl.}a)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$$

$$TLI(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$$

$$TLI(\text{SD}) = 10 \times (5.118 - 1.941 \ln \text{SD})$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln \text{COD}_{\text{Mn}})$$

式中, 叶绿素 $a$ (Chl. $a$ )单位为 $\text{mg}/\text{m}^3$ , 透明度 SD单位为 $\text{m}$ ; 其他指标单位均为 $\text{mg}/\text{L}$ 。

计算各参数的 $TLI$ 在 $TLI(\Sigma)$ 中所占的相关权重 $W_j$ , 计算公式为:

$$W_j = r_{ij}^2 / \left( \sum_{j=1}^m r_{ij}^2 \right)$$

式中,  $m$ 为评价参数的个数;  $r_{ij}$ 为第 $j$ 种参数与基准参数Chl. $a$ 的相关系数;  $W_j$ 为第 $j$ 种参数的营养状态指数的相关权重。

中国湖泊(水库)的Chl. $a$ 与其他参数之间的相关关系 $r_{ij}$ 及 $r_{ij}^2$ 见表 1。

计算综合营养状态指数, 计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

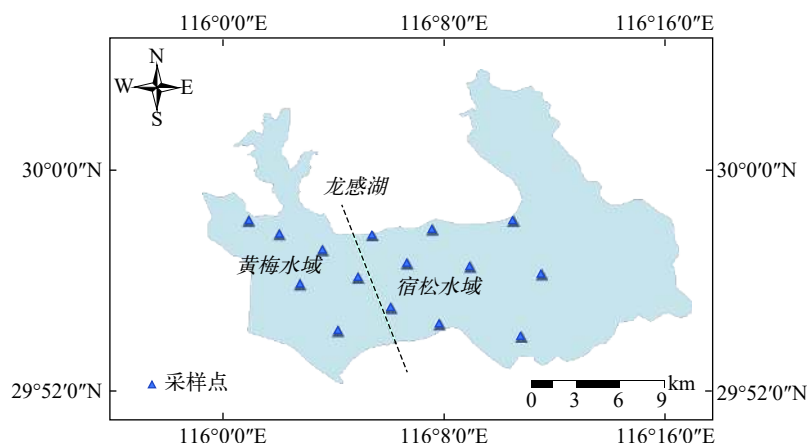


图 1 龙感湖轮廓图及采样点分布

Fig. 1 Sketch map of Longgan Lake and the distribution of sampling sites

图中虚线为区分黄梅和宿松水域的示意线

The dotted line in the map is a schematic line to distinguish Huangmei and Susong waters

式中,  $TLI(\Sigma)$  为综合营养状态指数;  $m$  为评价参数的个数;  $TLI(j)$  为第  $j$  种参数的营养状态指数。

湖泊营养状态分级, 采用 0—100 的一系列连续数字对湖泊(水库)营养状态进行分级(表 2)。

#### 1.4 数据分析

主成分分析法(PCA)是将原有多个变量降维处理为少数几个综合指标的一种统计分析方法, 将原来众多的具有一定相关性的变量重新组合成新的少数几个综合变量(主成分)。本研究主成分分析选取 4 个季节 15 个样点的 14 个变量, 即水深(WD)、透明度(SD)、pH、水温(WT)、溶解氧(DO)、电导率

表 1 中国湖泊(水库)部分参数与 Chl.*a* 的相关关系  $r_{ij}$  及  $r_{ij}^2$  值<sup>[9]</sup>

Tab. 1 Correlation between some parameters of lakes (reservoirs) and Chl.*a* in China  $r_{ij}$  and  $r_{ij}^2$  values

| 参数Parameter | Chl. <i>a</i> | SD     | COD <sub>Mn</sub> | TP     | TN     |
|-------------|---------------|--------|-------------------|--------|--------|
| $r_{ij}$    | 1             | -0.83  | 0.83              | 0.84   | 0.82   |
| $r_{ij}^2$  | 1             | 0.6889 | 0.6889            | 0.7056 | 0.6724 |

表 2 湖泊(水库)综合营养状态指数  $TLI(\Sigma)$  与营养状态的对应关系<sup>[9]</sup>

Tab. 2 The corresponding relationship between the comprehensive trophic level index  $TLI(\Sigma)$  and trophic level of lakes (reservoirs)

| 综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$<br>Comprehensive trophic level index $TLI(\Sigma)$ | 营养状态<br>Trophic level     |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| $TLI(\Sigma) < 30$                                                        | 贫营养Oligotrophic           |
| $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$                                             | 中营养Mesotrophic            |
| $TLI(\Sigma) > 50$                                                        | 富营养Eutrophic              |
| $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$                                                | 轻度富营养Lightly eutrophic    |
| $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$                                                | 中度富营养Moderately eutrophic |
| $TLI(\Sigma) > 70$                                                        | 重度富营养Severely eutrophic   |

(Cond)、特定电导率(SPC)、总氮(TN)、总磷(TP)、亚硝酸氮( $\text{NO}_2^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、叶绿素 $a$ (Chl.*a*)和水域地点, 共同构成一个  $60 \times 14$  的矩阵。应用统计分析软件 R 3.5.2 进行主成分分析并作图描述水质的季节差异。

自组织映射图谱(Self-organizing map, SOM)是由芬兰赫尔辛基大学 Teuvo Kohonen 教授提出的一种非监督人工神经网络(Artificial neural network, ANN), 因此也称为 Kohonen 神经网络。SOM 对非线性数据具有很强的聚类功能, 可将高维数据矩阵降为二维或一维拓扑结构, 是一种竞争式学习网络, 具有无监督自组织学习的能力。

SOM 学习算法分为两步, 即自组织训练和输出特征图<sup>[10]</sup>。在 SOM 模型的自组织训练过程中, 训练样本数据经过竞争学习, 将结果展现在一系列的神经元上。每一个神经元代表一个  $d$  维的权向量,  $d$  的维度由输入样本的维数所决定。本研究将 4 个季节 53 个采样点的多变量数据矩阵作为 SOM 的输入层, 通过自组织训练学习, 将结果呈现在由  $36(6 \times 6)$  个神经元组成的输出层上。根据各神经元的矢量值对神经元进行聚类分析后, 将环境特征划分为不同类群。SOM 模型分析采用 MATLAB 软件 SOM Toolbox。

## 2 结果

### 2.1 水质理化参数现状

如表 3 所示, 龙感湖属浅水型湖泊, 不同季节平均水深 0.83—2.52 m; 平均透明度 0.14—0.40 m, 夏季较高, 冬季较低, 且 4 个季节的整体透明度都很低, 冬季最低; 叶绿素  $a$  含量除秋季(平均 28.30  $\mu\text{g/L}$ )偏

表 3 2017—2018 年龙感湖水质参数的季节变化(平均值 $\pm$ 标准误)

Tab. 3 Seasonal variations of water quality parameter in Longgan Lake during 2017—2018 (Mean $\pm$ SE)

| 参数Parameter                               | 冬季Winter           | 春季Spring           | 夏季Summer           | 秋季Autumn           |
|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 水深WD (m)                                  | 0.83 $\pm$ 0.25    | 0.99 $\pm$ 0.20    | 2.52 $\pm$ 0.25    | 1.55 $\pm$ 0.27    |
| 透明度SD (m)                                 | 0.14 $\pm$ 0.05    | 0.34 $\pm$ 0.06    | 0.40 $\pm$ 0.12    | 0.39 $\pm$ 0.08    |
| 水温WT ( $^{\circ}\text{C}$ )               | 8.54 $\pm$ 1.08    | 24.87 $\pm$ 1.52   | 32.63 $\pm$ 0.82   | 14.98 $\pm$ 0.60   |
| 气温AT ( $^{\circ}\text{C}$ )               | 10.13 $\pm$ 1.30   | 25.19 $\pm$ 1.97   | 35.03 $\pm$ 2.47   | 17.67 $\pm$ 0.71   |
| 溶解氧DO (mg/L)                              | 10.55 $\pm$ 1.41   | 7.67 $\pm$ 1.20    | 8.83 $\pm$ 2.54    | 12.11 $\pm$ 1.93   |
| 电导率Cond ( $\mu\text{S/cm}$ )              | 161.59 $\pm$ 36.50 | 221.02 $\pm$ 48.46 | 256.93 $\pm$ 15.85 | 211.99 $\pm$ 21.60 |
| pH                                        | 8.60 $\pm$ 0.40    | 8.98 $\pm$ 0.25    | 9.27 $\pm$ 0.36    | 8.72 $\pm$ 0.12    |
| 总氮TN (mg/L)                               | 1.04 $\pm$ 0.90    | 1.14 $\pm$ 0.32    | 2.30 $\pm$ 0.64    | 0.98 $\pm$ 0.24    |
| 亚硝态氮 $\text{NO}_2^-$ -N (mg/L)            | 0.08 $\pm$ 0.10    | 0.09 $\pm$ 0.08    | 0.03 $\pm$ 0.03    | 0.06 $\pm$ 0.07    |
| 氨氮 $\text{NH}_4^+$ -N (mg/L)              | 0.19 $\pm$ 0.19    | 0.21 $\pm$ 0.14    | 0.64 $\pm$ 0.31    | 0.12 $\pm$ 0.06    |
| 总磷TP (mg/L)                               | 0.22 $\pm$ 0.14    | 0.12 $\pm$ 0.04    | 0.11 $\pm$ 0.04    | 0.11 $\pm$ 0.06    |
| 化学需氧量 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ (mg/L)     | 7.80 $\pm$ 0.82    | 5.94 $\pm$ 0.92    | 8.20 $\pm$ 0.69    | 5.32 $\pm$ 0.84    |
| 叶绿素 $a$ Chl. <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ ) | 62.00 $\pm$ 48.40  | 60.83 $\pm$ 35.32  | 95.28 $\pm$ 49.30  | 28.30 $\pm$ 12.68  |

低外, 其他季节均很高, 夏季最高, 平均达95.28  $\mu\text{g/L}$ 。

溶解氧秋季最高, 平均为12.11  $\text{mg/L}$ ; 化学需氧量(COD)夏季达最高(8.20  $\text{mg/L}$ )。pH(8.60—9.27)和电导率(161.59—256.93  $\mu\text{S/cm}$ )的变化特征一致, 水体酸碱度四季均偏碱性, 夏季最高, 冬季最低。

总氮含量夏季最高, 平均为2.30  $\text{mg/L}$ , 比其他季节高出一倍以上, 其他季节的差异不明显。4个季节氨氮(0.12—0.64  $\text{mg/L}$ )的变化趋势与总氮的变化趋势一致, 总磷(0.11—0.22  $\text{mg/L}$ )和亚硝态氮(0.03—0.09  $\text{mg/L}$ )的季节变化不明显。

2.2 水域综合营养状态

龙感湖的水域综合营养状态指数范围为50.32—71.97, 属典型的富营养型湖泊。综合营养状态指数(图2)显示秋季黄梅水域和宿松水域具有显著性差异( $P<0.05$ ), 而其他季节这两个水域之间差异不显著; 但同一水域秋季与其他季节之间具有显著性差异, 秋季综合营养状态指数值最低, 属轻度富营养水体, 其他季节均属于中度富营养水体。由表4可知, 黄梅水域采样点多为中度富营养状态, 宿松水域采样点中有较多轻度富营养的情况。

2.3 基于PCA的水质动态特征

主成分分析结果显示, PCA第一、二轴分别解释了环境变量的39.91%和17.78%变异。水温、气温、水深、总氮、氨氮、电导率、pH与PCA第一轴呈显著正相关; COD、叶绿素 $a$ 、总磷与PCA第二轴呈显著正相关, 而透明度与之呈显著负相关(图3)。从PCA作图可见, 龙感湖宿松水域与黄梅水域的环境差异并不大, 而季节差异较为明显。龙感湖夏季水温、水深、总氮、氨氮、电导率和pH较高, 而溶解氧含量很低; 冬季总磷和溶解氧含量较高, 而透明度、电导率、水深和水温等值较低; 秋季亚硝态氮和溶解氧含量较高, COD和叶绿素 $a$ 含量较低。

2.4 基于SOM的水质动态特征

根据模型训练后的SOM输出层神经元的等级

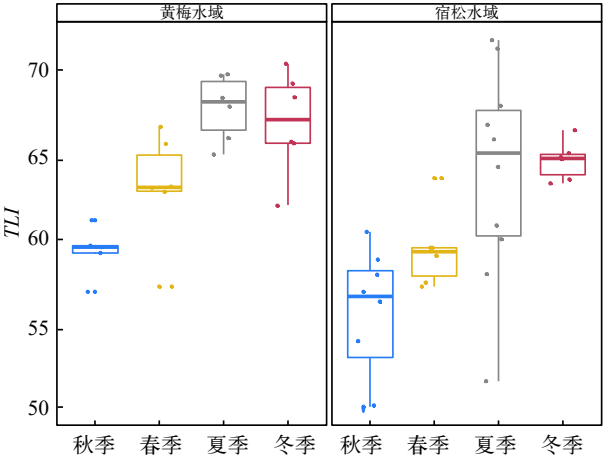


图2 龙感湖黄梅水域和宿松水域综合营养状态指数(TLI)的季节动态特征

Fig. 2 Seasonal dynamics of comprehensive trophic level index (TLI) for Huangmei and Susong areas of Longgan Lake

图中每个点代表一次采样, 矩形框包含了50%的TLI数据, 框内水平线表示数据的中位数

Each point in the figure represents a sample. The rectangular box contains 50% of the TLI data. Horizontal lines in the box represent the median of the data

距离, 将输出层划分为两大类(I 和 II), I 再细分为 I a和 I b两小类, II 再细分为 II a和 II b(图4)。从采样点在输出层神经元上的分布情形(图4), 季节变化方面, I a主要代表的是春秋两个季节, I b主要代表的是冬季, II a和 II b均代表了夏季; 空间变化方面, 宿松和黄梅两个区域的环境差别不显著, 不能很好的划分开来。

如图5所示, I a的透明度和电导率略高, 氨氮和COD较低; II a的透明度和电导率较高, 总磷较低; I b的总磷和COD含量略高, 其他理化指标值均偏低; II b电导率、pH、总氮、氨氮和COD的数值均较高。由此可清晰直观地显示, 龙感湖的透明度夏季较高, 同时氨氮、pH、电导率、总氮和COD的含量均很高; 冬季总磷和COD含量很高; 而春秋季节的透明度和电导率略高, 各营养盐含量均偏低。

表4 龙感湖不同采样点富营养化状态分级统计

Tab. 4 Classification statistics of eutrophication status at different sampling points of Longgan Lake

| 综合营养指数<br>TLI ( $\Sigma$ ) | 富营养化程度<br>Eutrophication degree | 处于该营养状态下的样点数(个)<br>Number of sample points in this state |            | 占总样点数的百分比<br>Percentage of total sample points (%) |            |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------|------------|
|                            |                                 | 黄梅水域Huangmei                                             | 宿松水域Susong | 黄梅水域Huangmei                                       | 宿松水域Susong |
| (0, 30)                    | 贫营养Oligotrophic                 | 0                                                        | 0          | 0                                                  | 0          |
| [30, 50]                   | 中营养Mesotrophic                  | 0                                                        | 0          | 0                                                  | 0          |
| (50, 60]                   | 轻度富营养Lightly eutrophic          | 5                                                        | 14         | 9.43                                               | 26.42      |
| (60, 70]                   | 中度富营养Moderately eutrophic       | 17                                                       | 14         | 32.08                                              | 26.42      |
| (70, 100]                  | 重度富营养Severely eutrophic         | 1                                                        | 2          | 1.89                                               | 3.77       |

### 3 讨论

#### 3.1 龙感湖养殖水域环境状况

本研究表明龙感湖水环境具有时空动态特征。水体透明度冬季最低,与吴奇丽<sup>[11]</sup>在龙感湖的研究结果一致,透明度主要受水中悬浮物的影响,悬浮物多为泥沙和浮游植物及腐败的有机质等<sup>[12]</sup>。夏季水位较高,泥沙悬浮受风力作用而减弱,透明度趋于定值;冬天气位降低,湖水较浅,风力作用搅动水体泥沙,增加水中悬浮物,从而降低了透明

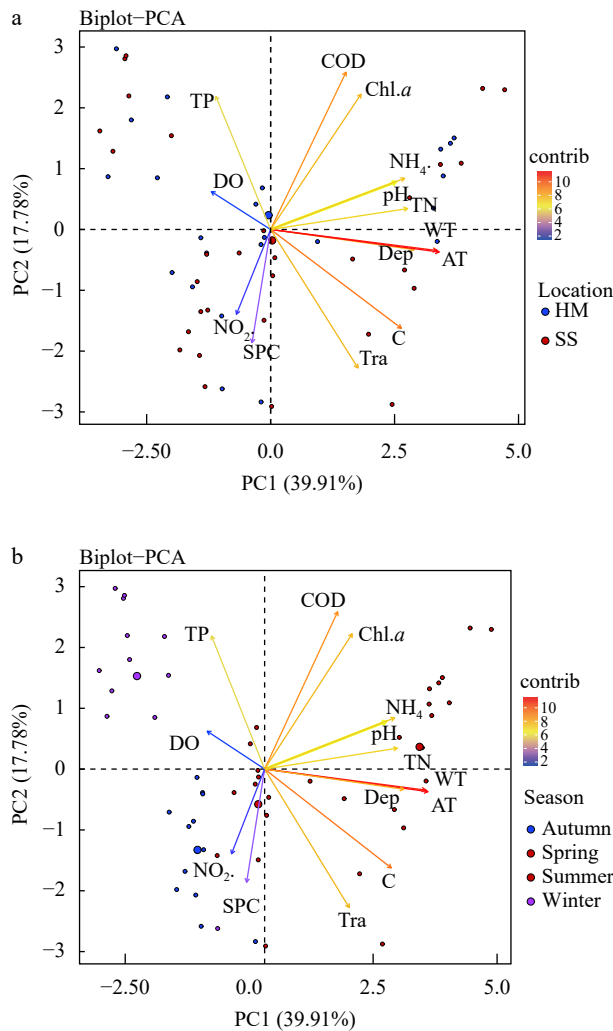


图3 龙感湖水水质参数的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) on water quality parameters in Longgan Lake

a. 季节动态; b. 水域差异; 图中点和椭圆不同颜色代表相应季节或水域; HM. 黄梅水域; SS. 宿松水域; 水质参数符号含义见表3

a. indicating seasonal dynamics; b. indicating spatial differences. Different colors of dots and ellipses in the graph represent corresponding seasons or waters. HM. Huangmei water area; SS. Susong water area. See Tab 3 for the meaning of codes of water quality parameters

度。另外,冬季为龙感湖的捕鱼季节,船只的频繁活动和“赶拦刺张”联合渔法的作业方式也会造成水体浑浊、透明度降低<sup>[13]</sup>。

龙感湖是越冬水鸟的栖息地,水生植物的腐败碎屑和水鸟的排泄物均会对水体营养盐产生一定的影响;且冬季是集中捕捞的高峰时期,人为的干扰搅动起水底营养物,可能是冬季总磷和COD等营养盐含量较高的主要原因。曾凯等<sup>[14]</sup>2015—2018年对华阳河湖群水质的监测表明,龙感湖TN、TP和COD浓度最大值出现在水位变动期,原因在于湖泊水动力条件引起底泥污染物释放,导致湖区污染物浓度增加,这与本研究TP和COD的变化特征较一致。

夏季雨水较为集中,强降雨导致湖面水位上涨,湖泊水流增大,促进了水体的交换,湖泊周边农业废水进入湖泊,增加了水中外源营养物质的输入,

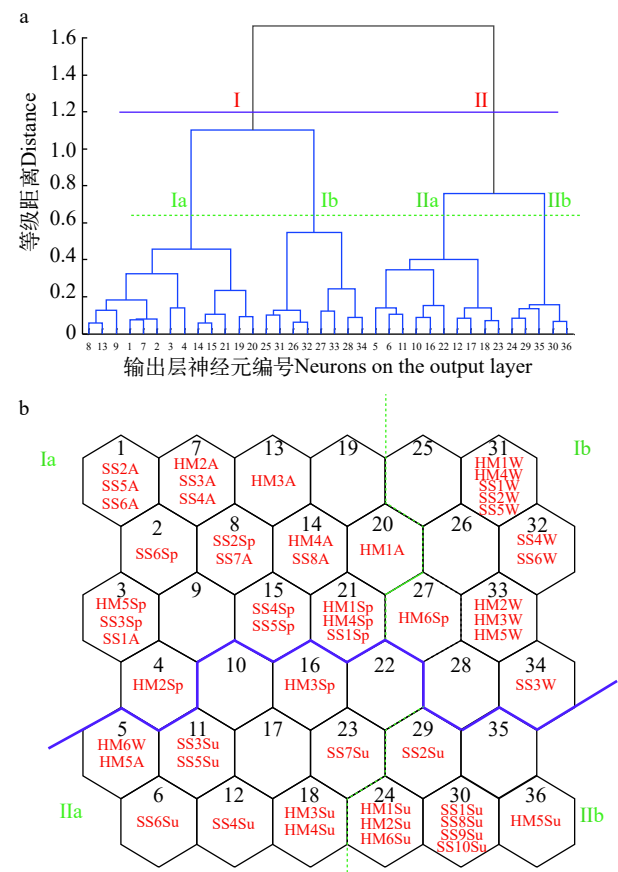


图4 龙感湖水水质时空动态SOM模型

Fig. 4 The SOM modelling of spatio-temporal dynamics of water quality in Longgan Lake

a. 输出层神经元的等级分类; b. 各样点在输出层模式图上的分布; Sp. 春季; Su. 夏季; A. 秋季; W. 冬季; HM. 黄梅水域; SS. 宿松水域

a. Hierarchical classification of the neurons on the output layer. b. Distribution of all the sampling sites on the patterned map; Sp. Spring; Su. Summer; A. Autumn; W. Winter; HM. Huangmei water area; SS. Susong water area

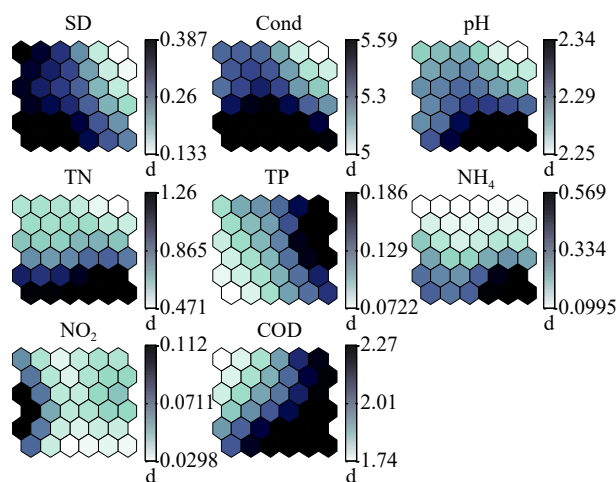


图5 主要水质参数在SOM神经元上的贡献值分布

Fig. 5 Distribution of contribution values of major water quality parameters on the SOM neurons

各神经元颜色的深浅表示水质参数值的高低, 水质参数符号含义见表3

The darkness of each neuron represents the value of water quality parameter. See Tab. 3 for the meaning of codes of water quality parameters

使得龙感湖夏季TN、氨氮和COD的含量最高, 太湖<sup>[15]</sup>和鄱阳湖<sup>[16]</sup>等受夏季径流注入影响的湖泊也表现出相似的水质变化规律。水体营养盐的增加, 易造成藻类迅速生长繁殖并导致暴发水华, 故本研究龙感湖夏季叶绿素 $a$ 含量也显著高于其他季节; 吴奇雨等<sup>[17]</sup>研究结果也显示龙感湖叶绿素 $a$ 浓度春季低, 夏秋季高, 且与水体营养盐和越冬水鸟的排泄物都有一定的相关性。

### 3.2 湖泊综合营养状态评价

综合营养状态指数评价结果表明, 龙感湖冬季水体富营养化状态最严重, 可能是由于2017年末(本文冬季采样时间)该湖刚完成围栏拆除和冬季大捕捞, 频繁的湖上作业和对底质的人为扰动, 使得沉积在湖泊底泥中的营养盐在搅动和扩散生物活动等作用下释放和溶解到水中, 湖泊营养负荷因而增大。另一方面, 龙感湖夏季富营养化程度仅次于冬季, 本研究采样期间发现夏秋两季黄梅水域有大量风眼莲[*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms]分布, 在围网养殖导致水体营养盐充足的条件下, 该物种入侵并大量繁殖, 覆盖大片水域, 严重时使得局部水域密不透光, 水质严重恶化。

目前龙感湖水环境面临的主要问题包括: 农业面源污染严重、工业点源污染、畜禽养殖污染、生活污水处理率低、湖泊淤积严重湖容缩小, 及传统渔业粗放发展和20余年围网养殖造成的湖泊内源营养盐负荷严重等方面<sup>[18]</sup>。这些问题对龙感湖

生态系统造成了严重影响, 即使如今龙感湖已实现围网全部拆除, 地方政府也加强了污染治理力度和环境保护举措, 湖泊生态环境修复形势依然严峻, 水质改善仍需一定时间。

### 3.3 水质时空动态分析模型方法

湖泊环境中存在大量非线性、非平稳和不确定因素, 传统的水质评价方法对于水环境中存在的非线性过程很难准确描述。人工神经网络(Artificial Neural Networks)是一种由大量处理单元组成的非线性自适应的动力学系统, 具有学习、联想、容错和抗干扰等功能, 相比线性统计方法, 更能抓住系统的主要特征, 反映系统变量之间关系。应用人工神经网络进行水质评价<sup>[19]</sup>, 首先围绕“学习样本”进行自适应和自组织训练, 使得网络具有对学习样本的记忆联想能力, 然后将实测数据输入网络系统, 由已掌握知识信息的网络对它们进行评价。该过程类似人脑的学习过程, 因此可模拟人脑解决某些具有模糊性和不确定性的问题。

人工神经网络在不受非线性及其分类潜力影响的情况下, 从已知数据中学习的能力使其具有优于其他传统统计分析方法的能力<sup>[20]</sup>, 本研究所采用的SOM神经网络模型可分析多维数据, 并将结果呈现为有助于理解的可视化信息<sup>[19]</sup>。本研究PCA和SOM的主要结果基本吻合, 但SOM模型具有强大的非线性聚类能力, 能够更加清晰地反映龙感湖水水质变量的时空分布特征, 且SOM输出层模式图具有很强的可视性, 能够更直观地反映出各个不同的水质参数在不同研究区域的变化情况。

### 3.4 湖泊渔业环境修复措施建议

龙感湖在经历了连续多年的高强度围网养殖、人工投饵和投肥后, 大量氮磷等营养物质随颗粒物沉积到底泥中, 再通过静态或动态内源释放模式进入水体中; 同时, 围网会造成生态阻隔和生境破碎化, 严重阻碍水体自然交换, 影响湖泊的自净能力<sup>[18]</sup>。鱼类是决定湖泊生态系统结构和功能的重要组成部分<sup>[21]</sup>, 一般通过上行和下行作用影响湖泊生物群落和水体营养状态<sup>[22]</sup>。龙感湖鱼类群落组成以鲤科鱼类为主, 优势种为鲫(*Carassius auratus* Linnaeus)、鲤(*Cyprinus carpio* Linnaeus)、短颌鲚(*Coilia brachygnathus* Kreyenberg et Pappenheim)、似鳊(*Pseudobrama simoni* Bleeker)和鲮(*Hemiculter leucisculus* Basilewsky)等, 以小型鱼类、浮游生物食性鱼类和杂食性鱼类偏多; 而鳊(*Siniperca chuatsi* Basilewsky)和翘嘴鲈(*Culter alburnus* Basilewsky)等食鱼性鱼类偏少, 且易被捕捞。

因缺乏大型食鱼性鱼类的捕食压力, 小型浮游

动物食性鱼类(如蟹)数量不断增长,并通过摄食浮游动物,降低了浮游动物对浮游植物的滤食压力,易造成浮游植物生物量上升,进而影响湖泊水质;另一方面,鲤和鲫等底层杂食性鱼类的活动会加大对底层沉积物的扰动,使得底泥中的营养盐释放,造成浮游植物过度生长,同时也不利于沉水植物保护。湖区禁渔和围网拆除等措施对恢复渔业资源、保护水生生物具有重要意义,可减少捕捞和养殖生产等人为活动对水体营养盐释放和湖区水生植物的影响,使得沉水植被得到一定的恢复,提高湖泊的水体自净能力。

建议在渔业模式转型后,一方面通过水体自身进行生态系统修复,另一方面通过合理的增殖放流进行鱼类群落调控,即投放一定规格和比例的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix* Valenciennes)和鳙(*Hypophthalmichthys nobilis* Richardson)等滤食性鱼类,及鳊和翘嘴鲌等食鱼性鱼类。总体上,通过鲢鳙控藻并移除水体中的氮磷等营养物质;通过扩大食鱼性鱼类种群规模,提高对小型饵料鱼类资源的控制作用,通过食物网的下行效应改善水质,提高饵料生物的转化效率。同时必须持续进行动态监测,加强对渔业模式转型后的湖泊生态系统结构与功能等方面的长期跟踪调查和评估。

## 参考文献:

- [1] Ba Y D. Study on the Ecological Environment Status and Protection Measures of Huayang Lakeside Zone [C]. Hohai University, Guizhou Water Conservancy Society. 2017 (the fifth) China Water Ecology Conference Proceedings. 2017: 93-98. [巴亚东. 华阳河湖群生态环境现状及保护措施研究 [C]. 河海大学、贵州省水利学会. 2017(第五届)中国水生态大会论文集. 2017: 93-98.]
- [2] Xie H, Jiang Z G, Xia Z J, *et al.* The impacts of enclosure aquaculture on fish community in the Huayanghe Lake [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(9): 1399-1407. [谢涵, 蒋忠冠, 夏治俊, 等. 围网养殖对华阳河湖鱼类群落结构的影响 [J]. 水产学报, 2018, **42**(9): 1399-1407.]
- [3] Wu Q L, Chen K N, Hu Y H, *et al.* Impacts of pen crab farming on environment in East Taihu Lake [J]. *Agricultural Environmental Protection*, 2001, **20**(6): 432-434, 442. [吴庆龙, 陈开宁, 胡耀辉, 等. 东太湖河蟹网围养殖的环境效应 [J]. 农业环境保护, 2001, **20**(6): 432-434, 442.]
- [4] Ban X, Yu C, Wei K, *et al.* Analysis of influence of enclosure aquaculture on water quality of Honghu Lake [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **33**(9): 125-129. [班璇, 余成, 魏珂, 等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析 [J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(9): 125-129.]
- [5] Xia Z J, Jiang Z G, Xie H, *et al.* Functional groups of fish community in the Huayang Lake group and their response to enclosure culture [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(2): 438-445. [夏治俊, 蒋忠冠, 谢涵, 等. 华阳湖群鱼类功能群及其对围网养殖的响应 [J]. 生态学杂志, 2018, **37**(2): 438-445.]
- [6] Wu Y L. A Review of comprehensive evaluation and prediction of water quality [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(2): 23-26. [吴岳玲. 水质综合评价及预测研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(2): 23-26.]
- [7] Liu S Y, Liu J W, Zhao T T, *et al.* A review of water environment quality assessment [J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2017(6): 41-43. [刘思莹, 刘俊文, 赵婷婷, 等. 水环境质量评价的研究进展 [J]. 江西化工, 2017(6): 41-43.]
- [8] Zhang T L, Li Z J, Guo Q S. Investigations on fishes and fishery of four lakes along the middle and lower basins of the Changjiang River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(2): 167-177. [张堂林, 李钟杰, 郭青松. 长江中下游四个湖泊鱼类与渔业研究 [J]. 水生生物学报, 2008, **32**(2): 167-177.]
- [9] Ministry of Environmental Protection. Surface Water Environmental Quality Assessment Method [S]. 2011: 10-11. [环境保护部. 地表水环境质量评价办法 [S]. 2011: 10-11.]
- [10] Lek S, Guégan J F. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction [J]. *Ecological Modelling*, 1999, **120**(2-3): 65-73.
- [11] Wu Q L. Effect of water level fluctuation on phytoplankton community structure of Huayang Lake Group[D]. Hefei: Anhui University, 2018: 26-34. [吴奇丽. 水位波动对华阳河湖群浮游植物群落结构的影响[D]. 合肥: 安徽大学, 2018: 26-34.]
- [12] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu Lake [J]. *Transaction of Oceanology & Limnology*, 2003(2): 30-36. [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体透明度的分析、变化及相关分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2003(2): 30-36.]
- [13] Yang J, Liu Z W, Zhong P, *et al.* Short-term response of phytoplankton community structure to fish removal in Huizhou West Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, **37**(7): 3193-3195. [杨皎, 刘正文, 钟萍, 等. 广东惠州湖泊浮游植物群落对鱼类去除的响应 [J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(7): 3193-3195.]
- [14] Zeng K, Wang J S, Zhang Y C, *et al.* Analysis on the influence of water level change of Huayang Lake group on water quality [J/OL]. *Journal of the Yangtze River Academy of Sciences*: 1-7 [2020-04-30 Online first]. [曾凯, 王家生, 章运超, 等. 华阳河湖群水位变化对水质的影响分析 [J/OL]. 长江科学院院报: 1-7 [2020-04-30 网络首发].]
- [15] Zhu G W. Analysis of eutrophication status and causes in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(1): 21-26. [朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析 [J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 21-26.]

- [16] Hu C H, Zhou W B, Wang M L, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus nutrient changes and assessment of potential eutrophication in Poyang Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(5): 723-728. [胡春华, 周文斌, 王毛兰, 等. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价 [J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 723-728.]
- [17] Wu Q L, Zhang K, Chen H, *et al.* Seasonal and spatial variation of chlorophyll-a concentration in the Huayanghe Lake Group [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **40**(2): 66-72. [吴奇丽, 张坤, 陈欢, 等. 华阳河湖群叶绿素a浓度的季节动态和空间分布 [J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(2): 66-72.]
- [18] Hong Y, Luo Y, Wang Z. Analysis on the Current Situation of Water Quality of Longgan Lake and Huangda Lake during Low-water Period in Susong County of Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(35): 75-79, 136. [洪源, 罗勇, 王钟. 安徽省宿松县龙感湖和黄大湖枯水期水质现状分析 [J]. 安徽农业科学, 2018, **46**(35): 75-79, 136.]
- [19] Lee B H, Scholz M, Application of the self-organizing map (SOM) to assess the heavy metal removal performance in experimental constructed wetlands[J]. *Water Research*, 2006, **40**(18): 3367-3374.
- [20] Simsek H. Mathematical modeling of wastewater-derived biodegradable dissolved organic nitrogen [J]. *Environmental Technology*, 2016, **37**(22): 1-45.
- [21] Zhang G H, Cao W X, Chen Y Y. Effects of fish stocking on lake ecosystems in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997, **21**(3): 271-280. [张国华, 曹文宣, 陈宜瑜. 湖泊放养渔业对我国湖泊生态系统的影响 [J]. 水生生物学报, 1997, **21**(3): 271-280.]
- [22] Liu E S. Review on the interrelationship between fishes and water environment [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, **31**(3): 391-399. [刘恩生. 鱼类与水环境间相互关系的研究回顾和设想 [J]. 水产学报, 2007, **31**(3): 391-399.]

## SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF WATER QUALITY IN LONGGAN LAKE BASED ON PRINCIPLE COMPONENT ANALYSIS (PCA) AND SELF-ORGANIZING MAPPING NEURAL NETWORK (SOM) MODELLING

XIAO Ling-Jun<sup>1,2</sup>, WANG Pu-Ze<sup>1,2,3</sup>, XIONG Man-Tang<sup>1,2</sup>, YE Shao-Wen<sup>1</sup>, ZHANG Tang-Lin<sup>1</sup>,  
LIU Jia-Shou<sup>1</sup> and LI Zhong-Jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In order to evaluate the spatiotemporal dynamics of water quality during the transformation stage of lake fishery model, we selected Longgan Lake, a typical lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River, as our research site. From 2017 to 2018, seasonal water quality monitoring were conducted on the Huangmei waters and Susong waters of the lake. Principle component analysis (PCA) and self-organizing mapping neural network (SOM) modelling were used to analyze the spatiotemporal changes of physical and chemical parameters of water body. The eutrophication status of water body was evaluated by the method of comprehensive trophic level index (TLI). PCA results indicated that the water quality of Susong and Huangmei waters in Longgan Lake had little difference, while the seasonal dynamic was obvious. The average concentration of ammonia nitrogen in the whole lake was the highest (0.64 mg/L) in summer. The average concentrations of total nitrogen in summer and in winter were 2.30 mg/L and 1.04 mg/L respectively. The average concentrations of chlorophyll a in summer and autumn were 95.28 µg/L and 28.30 µg/L respectively. The pH value was the highest (9.27) in summer, while the average concentration of total phosphorus was highest in winter with the value of 0.22 mg/L. The TLI index showed that Longgan Lake had a mild eutrophic level in autumn and a moderate eutrophic state in the other three seasons. The results of SOM model clearly and intuitively reflected the temporal and spatial distribution of water quality in Longgan Lake. Management measures such as eliminating purse seine and prohibiting fishing can help restore lake fishery environment and fishery resources. It is suggested that a long-term follow-up investigation and assessment should be carried out on the lake ecosystem after the transformation of fishery model.

**Key words:** Transformation of lake fishery model; Spatiotemporal change of water quality; Principal component analysis (PCA); Self-organizing feature mapping network (SOM); Lake ecosystem