

Jin D C, Lü C, Shi L, *et al.* Structural characteristics of spatial water-quality networks in Erhai Lake from 2017 to 2024 [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(5): 052613. [金大程, 吕超超, 石雷, 等. 2017—2024年洱海分区水质网络结构特征 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(5): 052613.]

2017—2024年洱海分区水质网络结构特征

金大程^{1,2} 吕超超¹ 石雷^{1,2} 陈晓希⁴ 华兆晖¹ 文紫豪¹ 单航¹
印金凤^{1,2} 曹特¹ 丑庆川^{1,3}

(1. 中国科学院水生生物研究所洱海高原湖泊生态系统试验站, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院水生生物研究所水产品种创制与高效养殖全国重点实验室, 武汉 430072; 4. 大理州智慧洱海监管指挥中心, 大理 671100)

摘要: 为解析洱海水环境的时空变化特征, 本研究基于2017—2024年洱海北、中、南三区湖心及对应湖湾(沙坪湾、挖色湾、向阳湾)季度监测的19项水体理化指标, 分区域构建了整体、年度和季度尺度的水质相关性网络。结果表明: (1)洱海湖心水质网络较湖湾更松散、简单, 这一低连通、高模块化的结构可把污染等扰动局域化, 从而赋予其更高的抵抗力; 而湖湾网络复杂、连接冗余, 在外部扰动下更易发生连锁波动, 抵抗力相对较弱。(2)湖心区水质网络以TN、TP、SD和Chl.a为核心节点, 其中TP是共有的关键驱动因子, 对其调控可产生高效的杠杆效应。湖湾水质指标虽连接数多, 但关键节点少, 对扰动的缓冲更依赖随机连通路径, 稳定性相对较低。(3)湖湾区水质网络结构呈季节性演变, 由春季至冬季逐渐复杂紧密, 这可能受降雨径流与水生植物季节波动等的共同驱动。因此, 通过调控湖湾水生植物群落, 有望局部降低网络密度、提升模块化, 进而为全湖水水质网络的简化与稳态维持提供一种关键驱动途径。本研究将网络稳定性框架引入高原湖泊水质评价, 所提出的“水质网络结构特征”可为洱海分区治理提供新的预警指标(如模块度与密度), 并指明通过削减外源负荷与调控水生植被驱动网络向更优构型转变的精准治理路径。

关键词: 高原湖泊; 水质网络; 稳定性; 季节差异; 洱海

中图分类号: Q178.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2026)05-052613-17

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0361 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0361



洱海(25°36'—25°58'N, 100°05'—100°17'E)是云贵高原重要的大型淡水湖泊, 位于云南省大理白族自治州中部^[1]。受流域人口增长、农业集约化和旅游业扩张的影响, 洱海自20世纪80年代起经历了从贫营养化向富营养化的急剧转变^[2]。2017年以来, 大理州政府针对洱海流域实施了一系列治理措施: 2017年6月, 大理州政府以洱海的保护治理为目标开展了“七大行动”, 在2018年11月部署了洱海治理的“八大攻坚战”, 从环湖截污、生态搬迁、矿山整治、农业面源污染治理、河道治理、环湖生态修复、水质改善提升和过度开发建设治理方面, 对洱海流域的污染源与生态问题进行了系统性、根

源性的治理。尽管这些措施使洱海流域的点源污染得到有效控制, 但面源负荷仍需改善^[3, 4]。因此, 2023年启动了为期3年的洱海流域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目, 致力于解决区域内水土资源粗放利用、入湖清水通道受损退化、洱海湖泊水质不稳等问题。洱海流域面源污染负荷呈现显著的时空分异性: 2017—2022年, 洱海氮、磷浓度表现为夏季、秋季大于春季、冬季^[5], 季节性耕种也导致了同一区域不同时间存在污染强度差异^[6]。空间上, 洱海水体营养程度表现为北部>中部>南部^[5], 北部农村地区的氮、磷输出强度显著高于南部城镇化集中区。

收稿日期: 2025-10-28; 修订日期: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(32101319); 云南省河湖水系生态保护与资源利用重点实验室(筹)开放基金(2025YKL103)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32101319); Yunnan Key Laboratory of Ecological Protection and Resource Utilization of River-Lake Networks (2025YKL103)]

作者简介: 金大程(2002—), 男, 硕士研究生; 主要研究方向为水生植物生态学。E-mail: 1287951616@qq.com

通信作者: 丑庆川(1988—), 男, 副研究员; 主要研究方向为水生植物生态学。E-mail: chouqc@ihb.ac.cn

湖心与湖湾是湖泊的两个空间组成部分, 一般而言, 湖心水深但水生植被分布较少, 湖湾水浅但水生植被丰富^[7], 这导致多数湖泊的湖心营养状态高于湖湾, 如梁子湖^[8]、太湖^[9]等, 洱海则表现为湖心营养状态低于湖湾^[10]。由此可见, 洱海的水体环境变化具有长期性和复杂性, 对洱海水质及其影响因素进行分湖区分析具有重要意义^[11]。现有洱海水质相关研究多聚焦于少数参数(如总氮、总磷)的时空分布或特定治理技术的效果评估。例如, Liu等^[12]通过水质指数(WQI)与Sen斜率分析, 指出总氮、总磷及化学需氧量是驱动洱海藻类生物量变化的核心因子。陈小华等^[13]基于洱海流域社会经济统计数据与湖内水质历史监测数据(TN、TP、Chl.a、SD和COD_{Mn}), 指出洱海总磷浓度受流域种植业发展影响最大, 其他水质指标则主要受流域畜牧业的影响。然而, 传统方法缺乏对水质指标间相互作用的量化, 导致污染源解析与治理成效评估存在局限性。因此, 本研究旨在探究一种可体现多参数及其相互作用对水环境共同影响的方法。

相关性网络分析是一种用于研究变量之间关系的统计方法, 其通过构建复杂网络模型来揭示变量间的相互作用和关联性^[14]。在生态学领域中, 相关性网络常被用于分析群落内微生物间的相互作用^[15], 以复杂食物网网络揭示生态系统结构、动力学与稳定性的深层机制^[16], 以及探究植物多性状的相互关系等^[17]。Domínguez-García等^[18]通过构建复杂网络将生态系统稳定性归纳为3个相对独立的维度: 对脉冲扰动的早期响应、对持续压力的敏感性及距离阈值的稳定性。相关性网络中的网络参数主要分为体现网络连通性和复杂性的网络拓扑结构参数与体现网络节点中心性的网络节点属性参数^[19, 20], 相比传统水质评价方法, 网络分析运用在湖泊水质分析中可以整体体现多水质指标间的相关关系, 从系统结构层面揭示稳定性和脆弱性, 但目前水环境领域鲜有研究使用此方法。华兆晖等^[5]基于8个沿岸带网络样本对洱海水体营养状态(TLI)与多项网络参数进行了相关性分析, 发现TLI与极大团大小显著正相关, 高营养状态可能促进水质网络的紧密化。本研究基于洱海2017—2024年水质指标的季度监测数据, 从空间、年际和季节尺度分湖区构建了多参数相关性水质网络, 以此探讨洱海水环境的时空变化特征, 初步分析洱海最优水质网络结构, 并揭示影响网络结构的主要因素, 从而为洱海精准治理与风险预警提供理论依据和方法支撑。

1 研究方法

1.1 样点设置及数据获取

样点设置 本研究基于洱海水动力特性与湖底地形特征, 将洱海划分为北部(康廊-海舌一线以北)、中部(东部沿线莲花曲至海东之间, 西部海舌至龙龕)、南部(海东-龙龕一线以南)3个水域^[5, 21](图1), 将湖湾分为河口型、半封闭型和半开放型三种典型生境类型, 并据此在每个水域的湖心区和湖湾区各设置一个采样点(其中, 北部选取河口型的沙坪湾、中部选取半封闭型的挖色湾、南部选取半开放型的向阳湾作为湖湾水质研究区域)(表1)。

数据获取 本研究于2017—2024年对研究区域开展了持续的季度水环境监测, 监测指标包括物理参数: 水温(T)、水深(WD)、消光系数(EC)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、pH、电导率(COND)、总溶解性固体(TDS)、盐度(SAL)、比电导率(SPC)、氧化还原电位(ORP), 化学参数: 总氮(TN)、总溶解性氮(TDN)、总磷(TP)、总溶解性磷(TDP)、叶绿素a(Chl.a)、氨氮(NH₄-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)和正磷酸盐(PO₄-P)。

每个点位使用采水器采集3个重复水体样本

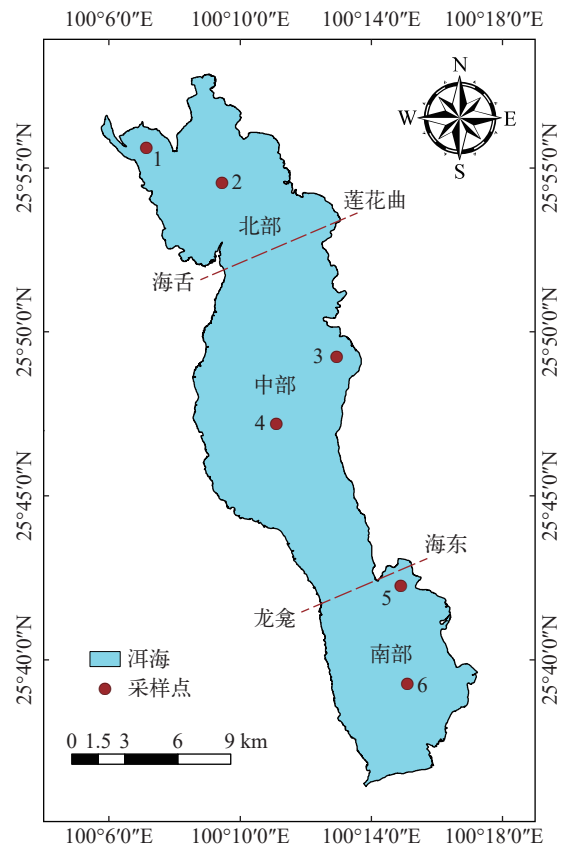


图1 本研究采样点位分布图

Fig. 1 The distribution map of sampling points in this study

表1 洱海采样点位及其经纬度

Tab. 1 Sampling points and their longitude and latitude of Erhai Lake

湖区 Lake area	采样点位 Sampling point	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)
北部Northern	北部湖湾(沙坪湾)	100.11644	25.93426
北部Northern	北部湖心	100.16270	25.90525
中部Central	中部湖湾(挖色湾)	100.22321	25.82478
中部Central	中部湖心	100.18433	25.79433
南部Southern	南部湖湾(向阳湾)	100.25017	25.70752
南部Southern	南部湖心	100.24750	25.66010

(每个500 mL), 每个样本均为上层、中层和底层水的混合样本, 采样同时使用塞氏盘和水深仪分别测定每个点位的SD和WD, 并使用辐射照度测量仪(LI-1500)测定不同水深的光照强度, 水深间隔为0.5 m, 计算得到EC^[22], 其计算公式:

$$EC = \left(\frac{1}{Z} \right) \ln \left(\frac{I_0}{I_Z} \right) \quad (1)$$

式中, EC为消光系数, Z为水深, I_0 为水面光照强度, I_Z 为水深为Z时的光照强度。使用多参数水质监测仪(YSI Pro Plus, 美国)在各样点测定T、DO、pH、COND、TDS、SPC和ORP。

采集到的水样置于棕色瓶中冷藏保存并带回实验室, 取400 mL水样通过0.45 μm滤膜抽滤并保留过滤后的水样与滤膜。原水样用于测定TN和TP, 过滤后的水样用于测定TDN、TDP、NH₄-N、NO₃-N和PO₄-P。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定TN和DTN、钼酸铵分光光度法测定TP和DTP^[23], 钼蓝法测定PO₄-P^[24], 紫外分光光度法测定NO₃-N、Nessler法分析NH₄-N^[25], 并使用过滤后的滤膜采用乙醇提取比色法测定Chl.a浓度^[26]。

1.2 数据分析

数据预处理 针对研究湖区的整体水质数据、湖心区与湖湾区的年际水质数据及湖心区与湖湾区的季度水质数据分别构建相关性网络, 其中每年3、6、9和12月分别代表春、夏、秋和冬季。采用Z-score方法对全部19项水质指标进行标准化处理, 以消除不同测量方法带来的偏差。对极少量缺失值(<0.5%)采用线性插值法处理。以标准化数据的Z值±3作为异常值的判定标准, 并将异常值设定为缺失值后处理。数据标准化通过R 4.3.2的“scale”包实现; 采用IBM SPSS Statistics 26处理数据缺失值。

水质网络构建 通过Spearman相关分析来量化指标间的相关性, 当Spearman相关系数 $r > 0.2$ 且 $P < 0.05$ 时, 认为2个水质指标间存在网络连接^[11]。基于分析结果建立邻接矩阵并转化成无向图, 其中

每个节点代表一项水质指标, 连接节点的边表示两项水质指标存在显著相关性。上述相关性分析通过R 4.3.2的“psych”包实现, 采用“igraph”包构建网络; 网络可视化通过Gephi 0.10.1实现。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

式中, ρ 为Spearman相关系数, d_i 为变量值的秩次差, n 为样本量。

敏感性分析 通过比较不同相关系数下的网络结构, 以评估阈值选择对网络结构的影响。在 $P < 0.05$ 的条件下, 设置 $r > 0.3$ 、 $r > 0.4$ 和 $r > 0.5$ 三个Spearman相关系数阈值, 比较不同阈值下的网络拓扑结构参数(模块度、密度和聚类系数)。网络拓扑结构参数计算通过Gephi 0.10.1实现。

水质网络特征 通过R 4.3.2中的“igraph”包得到各水质网络相关参数, 包括网络拓扑结构参数和网络节点属性参数, 各参数的定义、计算公式、意义及其对应的生态学假设如表2所示。其中, 网络拓扑结构参数代表网络的连通性和复杂性, 网络节点属性参数代表节点的中心性。一般而言, 网络结构越简单松散、拥有的高中心性节点越多, 该相关性网络结构越稳定^[19]。

网络特征对比分析 采用Cohen's d 效应量对湖心区与湖湾区整体水质网络的拓扑结构参数差异进行分析。

$$\text{Cohen's } d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{SD_p} \quad (3)$$

式中, \bar{X}_1 为湖心参数平均值, \bar{X}_2 为湖湾参数平均值, SD_p 为合并标准差。

对各水域网络拓扑结构参数的年际稳定性和季节稳定性进行分析, 并对年际水质网络和季度水质网络参数及其稳定性进行线性回归分析, 其中稳定性系数(Coefficient of Variation)计算公式为:

$$\text{稳定性系数} = \frac{\sigma}{x} \times 100\% \quad (4)$$

式中, x 为参数平均值, σ 为参数标准差。

Cohen's d 效应量计算及网络参数及其稳定性回归分析在R 4.3.2中进行。所有图件均采用Origin 2021 (版本9.8.0, Microcal)进行绘制。

2 结果

2.1 洱海湖区水质网络结构特征及差异

洱海各湖区水质网络拓扑结构特征及差异

2017—2024年洱海北部和中部湖区的网络拓扑

表 2 网络拓扑结构参数和网络节点属性参数
Tab. 2 Network-topology parameters and node-attribute parameters

网络参数 Network parameter	参数性质 Parameter nature	参数 Parameter	计算公式 Calculation formula	参数意义 Parameter meaning	定义 Definition	意义 Meaning	生态学假设 Ecological hypothesis
网络拓扑结构参数 Network-topology parameter	连通性	网络密度 Edge density	$ED = \frac{2m}{n * (n-1)}$	m 为网络图中的边数, n 为节点数	节点间的实际连接占所有可能连接的比例	网络密度越高网络越紧密	水质网络越紧密, 节点间连接越多, 单一指标波动越容易引起连锁反应, 网络越容易发生整体波动, 抵抗力越弱
	连通性	平均路径长度 Average path length	$APL = \frac{1}{n * (n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$	n 为节点数, d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径长度	节点间最短路径的平均值	平均路径长度越短网络越紧密	水质网络越复杂, 直接相关的物质越易受到外源输入干扰, 网络越容易发生整体波动, 抵抗力越弱
	连通性	最大路径长度 Max path length	$MPL = \max(d_{ij})$	d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径长度	节点间的最长简单路径(不重复经过节点或边)的边数	最大路径长度越短网络越紧密	水质网络越复杂, 直接相关的物质越易受到外源输入干扰, 网络越容易发生整体波动, 抵抗力越弱
	复杂性	模块化 Modularity	$Q = \frac{1}{2m} \sum_j \left[\frac{k_j k_j}{A_{jj}} - \frac{\delta(c_j, c_j)}{2m} \right]$	m 为网络图中的边数, A_{ij} 为邻接矩阵 A 中的元素, k_i, k_j 分别为节点 i, j 的度, $\delta(c_i, c_j) = 1$ 时, i, j 属于同一模块, $\delta(c_i, c_j) = 0$ 时, i, j 不属于同一模块	模块内节点间的连接比例与随机分布下连接的比例之差	模块化程度越高网络越复杂	水质网络越复杂, 直接相关的物质越易受到外源输入干扰, 网络越容易发生整体波动, 抵抗力越弱
网络节点属性参数 Network node attribute parameter ^[27]	复杂性	平均聚类系数 Clustering coefficient	$CC = \frac{3\tau_3}{\tau_3}$	τ_3 为三元团的数量, τ_3 为联通三元组数量	所有节点的相邻节点间的边与可能存在的最大边比值的平均值	平均聚类系数越高网络越复杂	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大
	复杂性	团数 Clique number	/	/	网络中完全连接的子图的数量	团数越高网络越复杂	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大
	中心性	度 Degree	/	/	节点与其他节点直接相连的边的数量	度越高节点越重要	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大
	中心性	加权度 Weight degree	/	/	与节点相连的所有边的权重之和	加权度越高节点越重要	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大
	中心性	接近中心性 Closeness centrality	$c_{CI}(v) = \frac{1}{\sum_{t \in V} \text{dist}(v, t)}$	$\text{dist}(v, u)$ 为节点 $u, v \in V$ 的最短距离	节点与其他节点间的平均最短路径的倒数	接近中心性越高节点越重要	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大
	中心性	中介中心性 Betweenness centrality	$c_B(v) = \sum_{s \neq t \in V} \frac{\sigma(s, t v)}{\sigma(s, t)}$	$\sigma(s, t v)$ 为 s 与 t 之间通过 v 的最短路径数量, $\sigma(s, t)$ 为 s 与 t 之间的最短路径总数	节点在所有最短路径中出现的频率	中介中心性越高节点越重要	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大
	中心性	特征向量中心性 Eigenvector centrality	$c_{EI}(v) = \alpha \sum_{(u,v)} c_{EI}(u)$	α_1 的最优值是 A 的最大特征值, 而 c_{EI} 为对应的特征向量	以邻居节点的重要性衡量节点重要性	特征向量中心性越高节点越重要	水质网络中节点中心性越高, 节点越重要, 该水质指标对水质网络的影响程度越大

1.03、1.38、1.27和1.51, 特征向量中心性的效应量分别为0.89、1.14、1.00、1.13、0.82和1.60。TDN的中介中心性表现为正的大效应(0.89), TN和TP的中介中心性和特征向量中心性均表现为正的中效应, 其中中介中心性的效应量分别为0.52和0.44, 特征向量中心性的效应量分别为0.55和0.62。Chl.a、TN、TP和TDN的接近中心性均表现为负的大效应, 分别为-0.88、-0.85、-0.80、-0.84。TDP的接近中心性也表现为负的中效应(0.62)。这表明水温与营养指标在湖心水环境中更为重要。

网络分析结果验证 采用层次聚类分析对洱海湖湾与湖心19项水质指标进行检验, 聚类得到的自然分组与网络分析中的模块结构基本一致。湖心水质指标自然分为5个主要类别, 湖湾水质指标仅分为3个类别。对应着湖心网络结构的高模块

化与湖湾水质指标间的紧密联系。TN、TP和Chl.a在各湖区聚类分析中均表现出关键地位。营养指标在湖心更具代表性, 而理化指标在湖湾的代表性高于湖心。

2.2 洱海湖区水质网络结构的年际变化

湖区水质网络结构及水质指标的年际差异

2017—2024年湖心与湖湾水质网络模块度与密度的年际变化趋势基本一致(图 5), 湖心的水质网络模块度和密度的稳定性分别为4.92和3.32, 均高于湖湾(3.45和2.23), 表明湖湾水质的时间稳定性弱于湖心水质。其中, 2017、2020、2022和2023年湖心拥有更高的模块度(0.611、0.540、0.430、0.650)和更低的网络密度(0.082、0.094、0.181、0.099)。2018、2019、2021和2024年拥有更低的模块度(0.351、0.332、0.295)和更高的网络密度(0.164、0.146、0.146、0.199)。其中, 2024年洱海水质网络的模块度骤降、密度上升。

对比2017—2024年洱海湖心与湖湾TN、TP和Chl.a三个关键水质指标浓度。洱海2017—2024年湖心平均TN、TP (0.793和0.043 mg/L)低于湖湾浓度(0.813和0.050 mg/L), Chl.a浓度(26.125 μg/L)高于湖湾(24.605 μg/L), 三种水质指标的稳定性均为湖心(5.063、3.658、1.719)高于湖湾(4.438、2.984、1.456)。水质状况及稳定性与水质网络结构特征及稳定性表现一致。

水质网络节点属性参数的年际差异 对比湖湾与湖心的节点度分布(图 6a和6b)及各节点参数的差异(图 6c—6f)发现, 湖湾水质网络中WD的

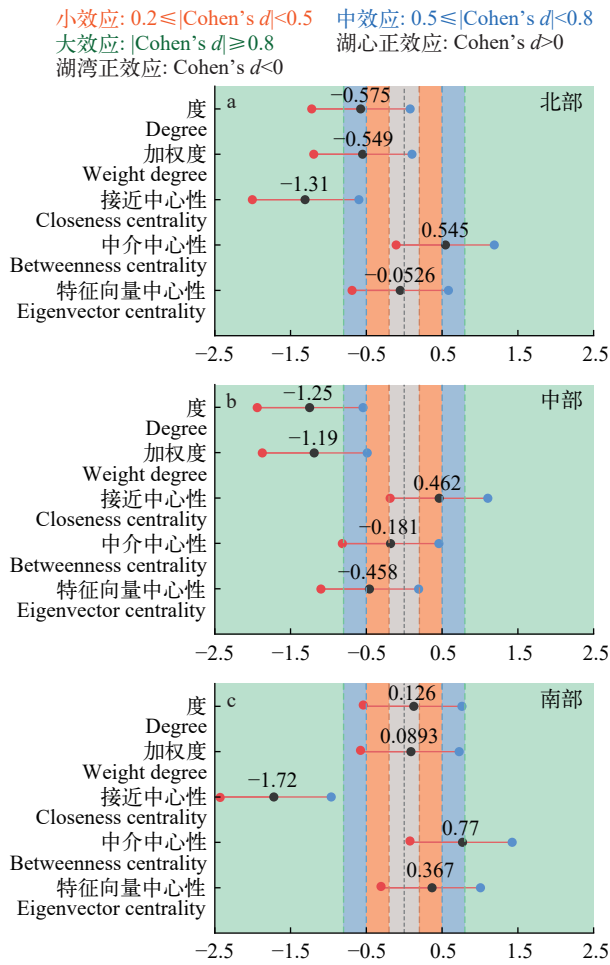


图 3 不同水域湖心与湖湾网络参数Cohen's d效应量对比

Fig. 3 Comparison of Cohen's d effect size for network parameters of the lake center and lake bay in different water bodies

a. 北部湖区; b. 中部湖区; c. 南部湖区

a. Northern lake district; b. Central lake district; c. Southern lake district

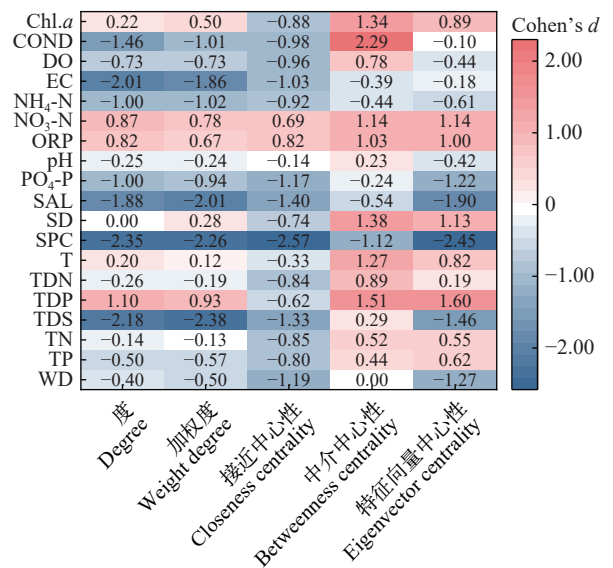


图 4 洱海湖心与湖湾各水质指标网络参数差异

Fig. 4 The differences in network parameters of various water quality indicators at the center and the bays of Erhai Lake

连接数(2.000)多于湖心水质网络(0.250)。湖心在2017年拥有最少的节点连接数(1.474), 在2024年达到最大值(3.579)。相比之下, 湖湾在2021年拥有最少的节点连接数(1.789), 在2024年达到最大值(4.211)。同时湖湾在2017和2024年也分别拥有较少(2)与较多(2.632)的节点连接。

湖心WD、EC、TDS、SAL和SPC等理化指标的节点度均低于湖湾(湖心: 0.250、1.750、3.125、2.625和1.500, 湖湾: 2.000、3.000、3.750、3.125和

3.125)。其中, 湖心2017—2023年TDS、SAL、SPC的节点度较为稳定(稳定性系数分别为3.764、1.107和0.802), 于2024年显著升高至7、8和6。湖湾2017—2023年TDS、SAL、SPC以及WD的节点度较为稳定(稳定性系数分别为1.909、1.656、2.336和0.971), 于2024年显著升高至6、6、6和5。湖心TN、TDN、TP、TDP、NO₃-N、PO₄-P和Chl.*a*等营养指标的节点度均高于湖湾(湖心: 2.375、2.5、2.75、2.125、2.5、2.125和3.875, 湖湾: 1.5、2.25、

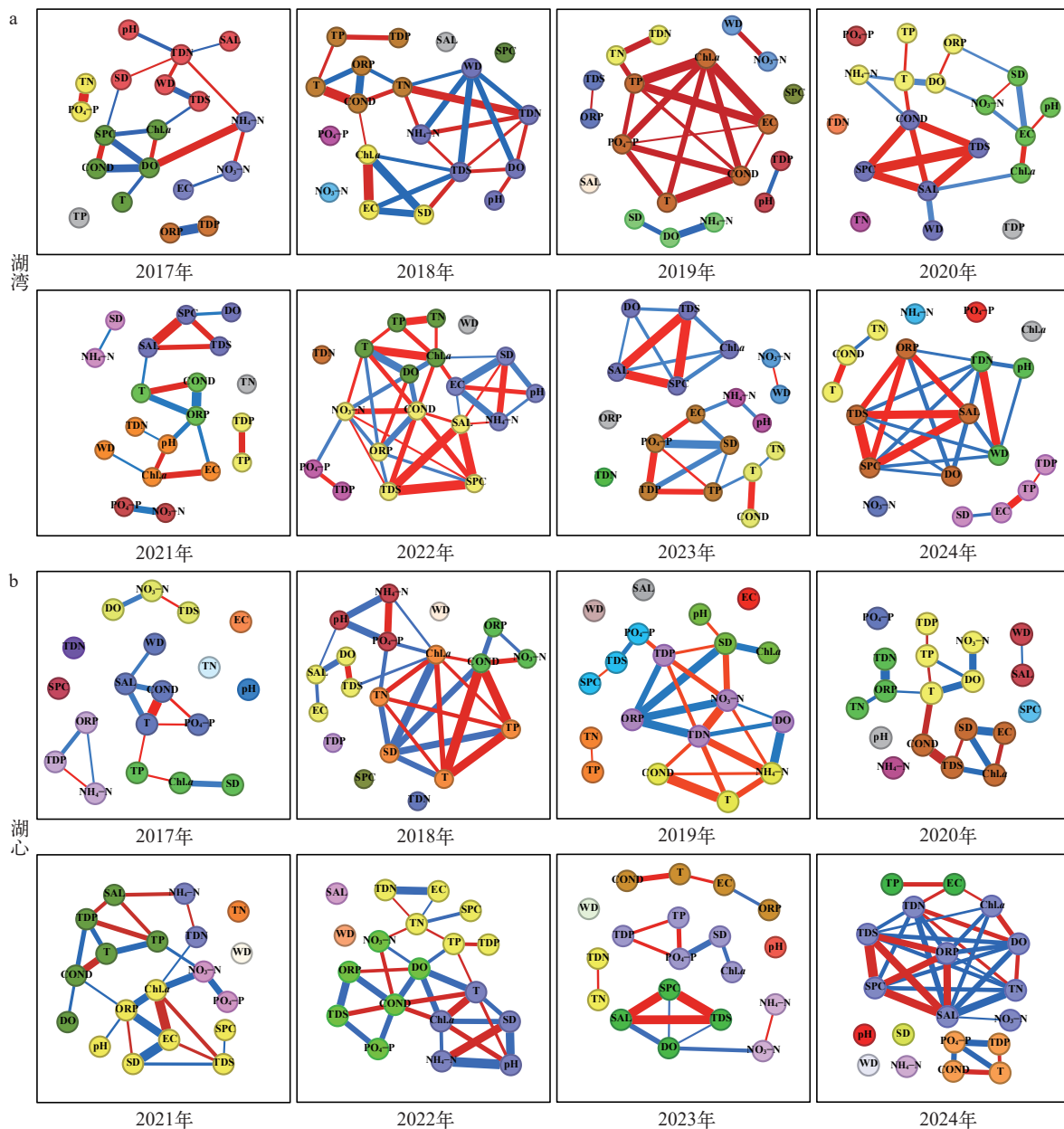


图5 洱海各水域2017-2024年年际水质网络及参数

Fig. 5 Annual water quality networks and parameters in different zones of Erhai Lake from 2017 to 2024

相同颜色节点组成模块, a. 湖湾年际水质网络图; b. 湖心年际水质网络图

Modules are formed by nodes of the same color; a. Interannual water quality network diagram of the lake bay; b. Interannual water quality network diagram of the lake center

2.25、1.125、1.875、1.625和3.375)。其中,湖心2017—2023年TN、TDN和Chl.a的节点度较为稳定(稳定性系数分别为0.847、0.771、1.381),于2024

年显著升高至6、7和5。湖湾各营养指标的节点度稳定性均低于湖心。

对比洱海2017—2024年湖心与湖湾水质网络

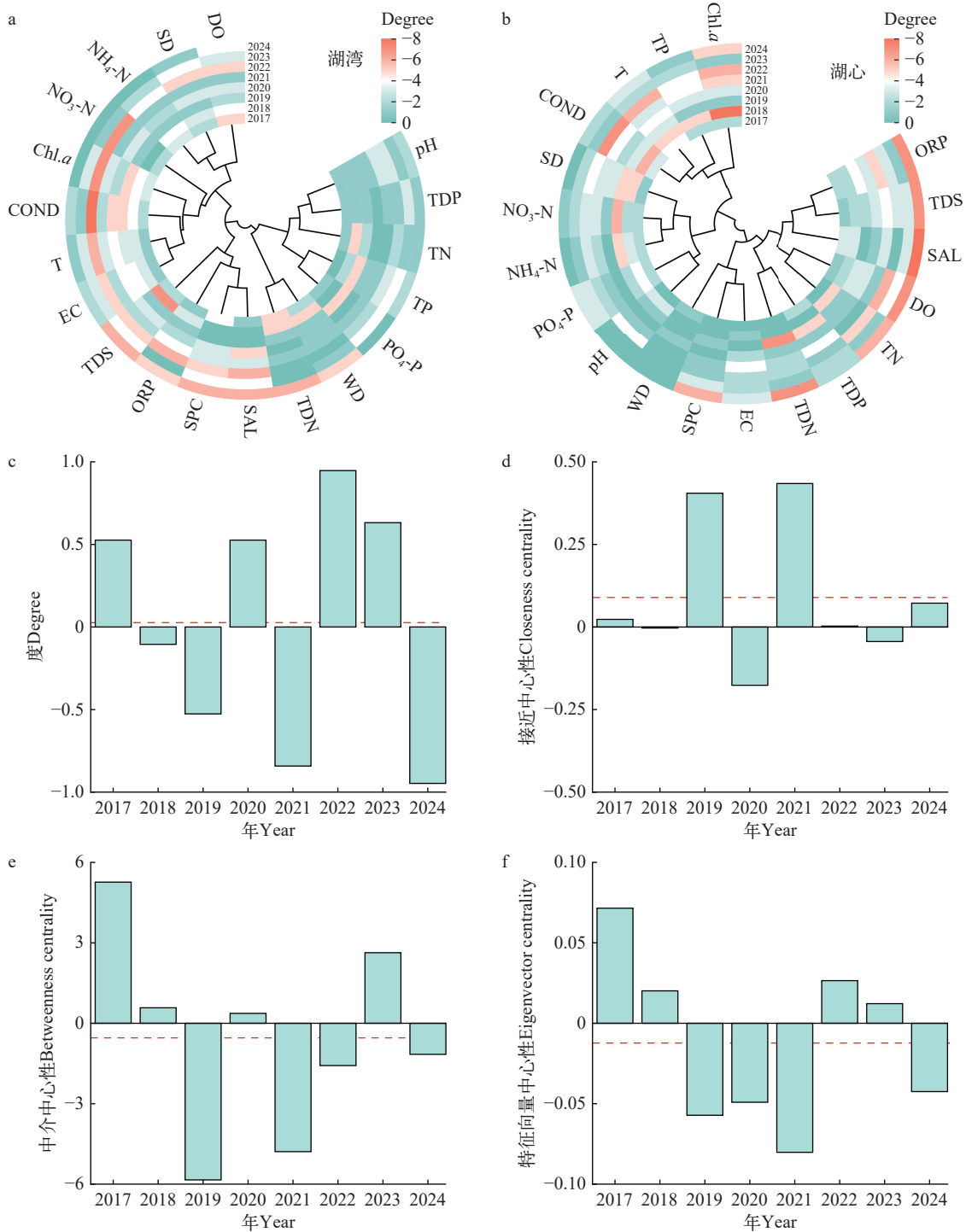


图6 洱海各水域年际水质网络节点度分布及节点属性参数差异

Fig. 6 Annual water quality network node degrees distribution and node attribute parameter differences in different zones of Erhai Lake 均为湖湾减湖心的差值,红色虚线为湖湾与湖心差异平均值; a. 湖湾节点度分布; b. 湖心节点度分布; c. 湖湾与湖心节点度差值; d. 湖湾与湖心接近中心性差值; e. 湖湾与湖心中介中心性差值; f. 湖湾与湖心特征向量中心性差值

All are the differences between the lake bays and centers, red dotted line represents the average difference between the lake bays and centers; a. Degree distribution of nodes in the lake bay; b. Degree distribution of nodes in the lake center; c. Degree difference; d. Closeness centrality difference; e. Betweenness centrality difference; f. Eigenvector centrality difference

节点参数的差异, 尽管湖心节点的接近中心性低于湖湾(湖心: 0.157, 湖湾: 0.246), 但湖心的节点度低于湖湾(湖心: 2.500, 湖湾: 2.526), 且中介中心性和特征向量中心性均高于湖湾(湖心: 6.243和0.330, 湖湾: 5.678和0.318), 表明相比湖心, 湖湾各水质指标之间的联系更紧密。

年际水质网络节点属性参数及其稳定性相关分析 分别对洱海湖湾与湖心年际水质网络节点属性参数及其稳定性进行线性回归分析(图 7)。在湖心水质网络中, 节点度、中介中心性和特征向量中心性均与其稳定性显著正相关($P < 0.05$)。其中节点度、接近中心性和特征向量中心性与其稳定性呈极显著正相关($P < 0.01$)。接近中心性与其稳定性极显著负相关($P < 0.01$)。在湖湾水质网络中, 节点度、中介中心性和特征向量中心性与其稳定性显著正相关($P < 0.05$), 其中中介中心性和特征向量中心性与其稳定性呈极显著正相关($P < 0.01$), 而接近中心性与其稳定性关系不显著。以上结果表明关键节点在水质网络中拥有更高的年际稳定性, 在网络中的地位不易随时间变化而改变。

2.3 洱海湖区水质网络结构的季节变化

湖区水质网络结构及水质指标的季节差异 湖

心与湖湾季节水质网络的模块度与网络密度波动趋势相同(图 8), 但湖心的水质网络模块度和密度的稳定性分别为6.50和3.46, 均高于湖湾(分别为5.89和3.02)。洱海湖区季节水质网络中, 湖湾与湖心的模块度均为春季>夏季>秋季>冬季。湖心网络密度为春季<夏季<秋季<冬季, 而湖湾网络密度为夏季<春季<秋季<冬季。这表明湖心与湖湾均在春季、夏季拥有更松散的水质网络。洱海湖湾TN和Chl.a浓度在夏季(夏季TN为0.693 mg/L、Chl.a为16.229 $\mu\text{g/L}$)与秋季(秋季TN为0.869 mg/L、Chl.a为34.054 $\mu\text{g/L}$)低于湖心(夏季TN为0.720 mg/L、Chl.a为17.426 $\mu\text{g/L}$; 秋季TN为0.885 mg/L、Chl.a为37.832 $\mu\text{g/L}$), 在春季(春季TN为0.794 mg/L、Chl.a为10.498 $\mu\text{g/L}$)与冬季(冬季TN为0.924 mg/L、Chl.a为40.436 $\mu\text{g/L}$)高于湖心(春季TN为0.704 mg/L、Chl.a为9.107 $\mu\text{g/L}$; 冬季TN为0.869 mg/L、Chl.a为34.054 $\mu\text{g/L}$)。洱海各水域TP浓度随季节变化均呈单调递增趋势, 且湖湾浓度(分别为春季: 0.035 mg/L、夏季: 0.044 mg/L、秋季: 0.051 mg/L和冬季: 0.064 mg/L)均高于湖心(分别为春季: 0.033 mg/L、夏季: 0.039 mg/L、秋季: 0.048 mg/L和冬季: 0.051 mg/L)。TN、TP和Chl.a浓度的稳定性均表现为湖心

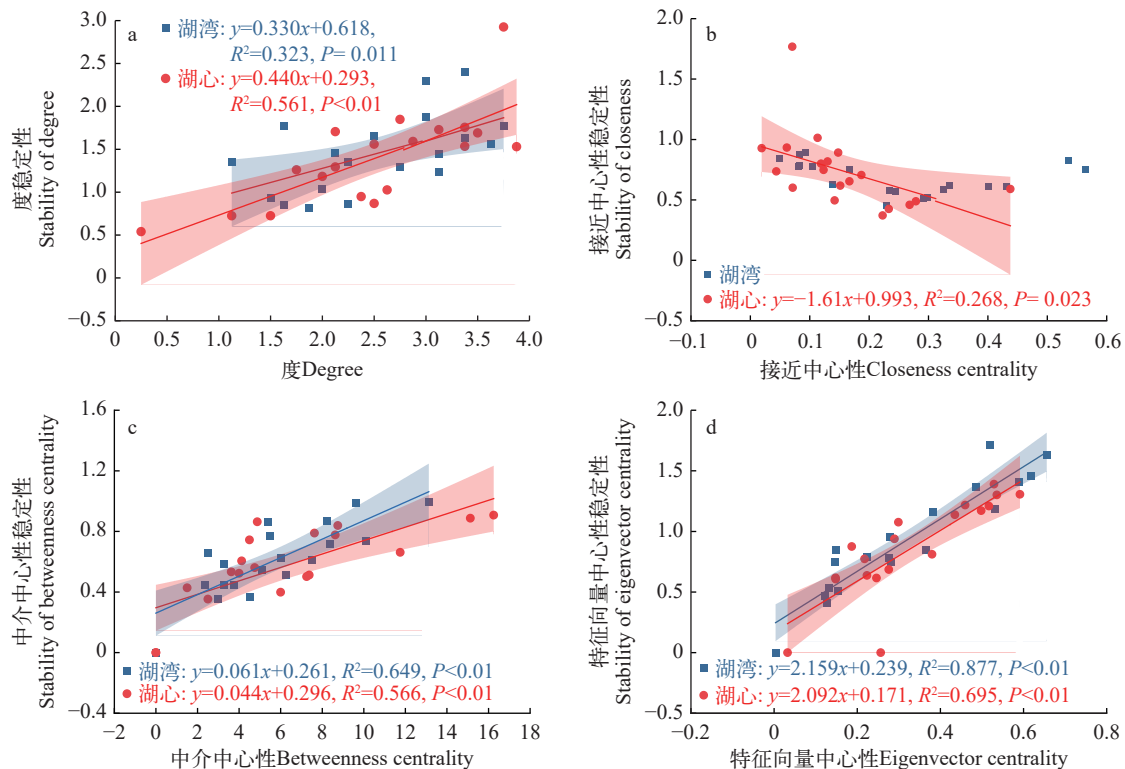


图 7 洱海各水域年际水质网络节点属性参数与其稳定性关系

Fig. 7 Annual water quality network node attribute parameters in different zones of Erhai Lake and their stability relationship

a. 度; b. 接近中心性; c. 中介中心性; d. 特征向量中心性

a. Degree; b. Closeness centrality; c. Between Centrality; d. Eigenvector centrality

余网络参数差异与整体差异一致。

季节性水质网络节点属性参数及其稳定性相关分析 分别对洱海湖湾与湖心季节性水质网络节点属性参数及其稳定性进行线性回归分析(图 10)。

结果表明,在湖湾水质网络中,中介中心性和特征向量中心性与其稳定性呈显著正相关($P < 0.05$),其中中介中心性和特征向量中心性与其稳定性呈极显著正相关($P < 0.01$),接近中心性与其稳定性显著

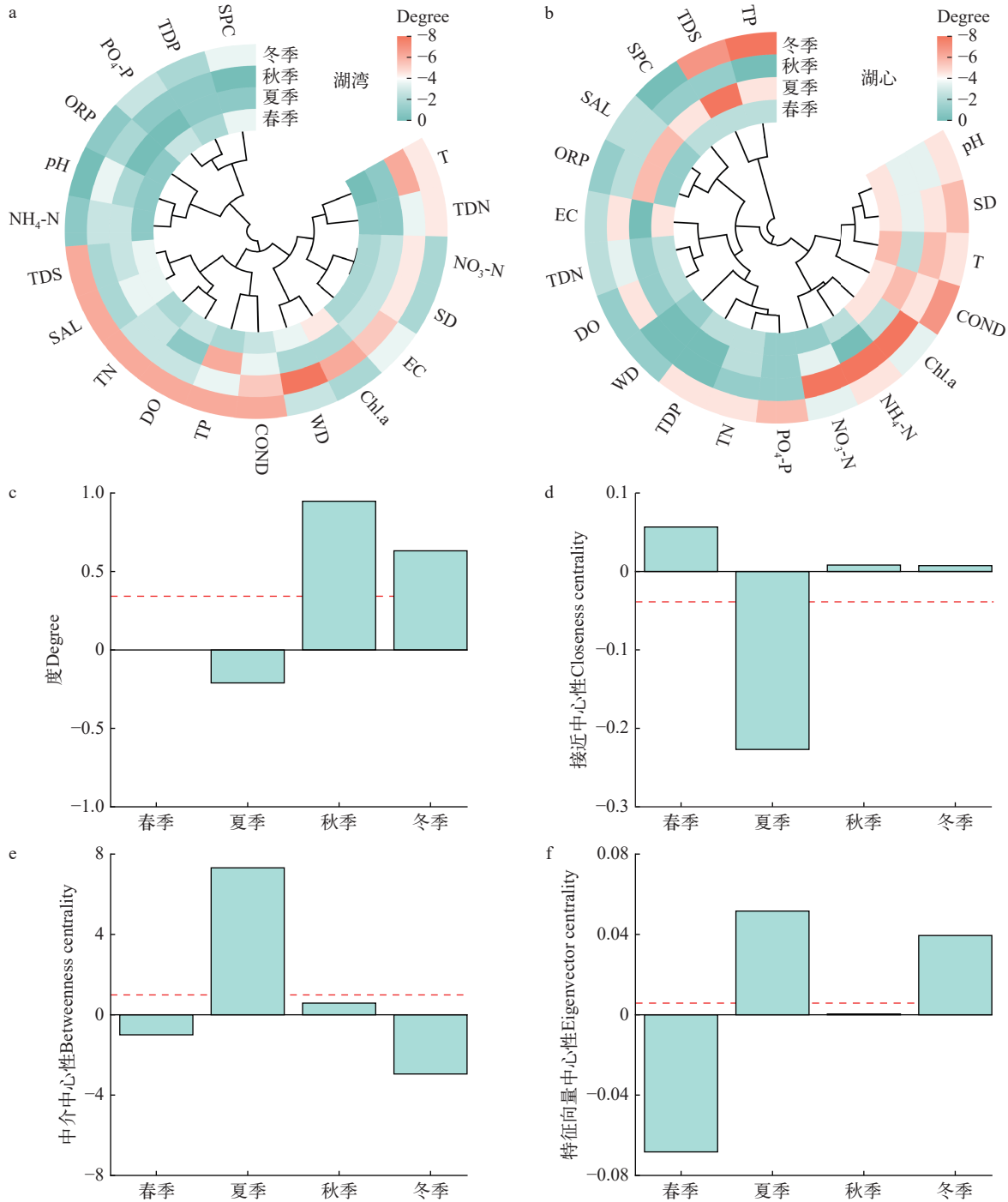


图9 洱海各湖区季节网络节点度分布及节点属性参数差异

Fig. 9 Quarterly water quality network node degrees distribution and node attribute parameter differences of Erhai Lake

均为湖湾减湖心的差值,红色虚线为湖湾与湖心差异平均值; a. 湖湾节点度分布; b. 湖心节点度分布; c. 节点度差值; d. 接近中心性差值; e. 中介中心性差值; f. 特征向量中心性差值

All are the differences between the lake bays and the lake centers, the red dotted line represents the average difference between the bays and the center of the lake; a. Degree distribution of nodes in the lake bay; b. Degree distribution of nodes in the lake center; c. Degree difference; d. Closeness centrality difference between nodes; e. Betweenness centrality difference; f. Eigenvector centrality difference

负相关($P<0.05$), 而节点度与其稳定性关系不显著。在湖心水质网络中, 节点度、中介中心性和特征向量中心性与其稳定性呈显著正相关($P<0.05$), 其中节点度和特征向量中心性与其稳定性呈极显著正相关($P<0.01$), 而接近中心性与其稳定性关系不显著。这表明关键节点在水质网络中拥有更高的季节稳定性, 在网络中的地位不易随季节变化而改变。

2.4 洱海各湖区水质指标和网络参数相关性分析

分别对洱海湖心与湖湾部分水质指标(TN、TP、Chl.a、T、SD、WD、SD、EC和SAL)和部分网络参数(平均度、模块度、密度、聚类系数和平均路径长度)进行Spearman相关分析(图 11)。结果显示, 湖心水质网络中TP和EC与网络模块度极显著负相关($P<0.01$), 与平均度和网络密度极显著正相关($P<0.01$)。SD与聚类系数极显著负相关($P<0.01$), 与平均路径长度极显著正相关($P<0.01$)。湖湾水质网络中仅有SD与模块度极显著正相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 洱海各湖区网络结构特征及稳定性机制

网络拓扑结构参数可用于体现网络的连通性

与复杂性, 密度与路径长度体现了网络中水质指标间的直接相关性, 模块度、平均聚类系数及团数揭示了指标间形成高度内部联系的子群体的能力。本研究结果显示, 2017—2024年洱海湖区整体富营养化程度为北部>南部>中部、湖湾>湖心。洱海北部湖心、中部湖心及南部向阳湾的水质网络结构特征为模块度高、密度低、团数少。拥有此网络结构的湖区, 水质指标间直接相关较少, 分化形成多个独立的功能模块。模块内水质指标紧密互动, 模块间连接稀疏, 网络更松散。此结构特征与传统基于浓度评价的结论相互印证, 同时层次聚类分析的结构也证实了该方法的可靠性。但网络分析进一步从“系统结构”层面揭示了其内在在稳定性机制: 高模块度对应扰动局域化, 低密度对应是生态系统具备强大“抵抗力”的结构基础。通过敏感性分析对不同相关系数水平下的网络结构进行了对比, 结果表明 r 值的增大会导致网络结构更为松散, 但不影响各湖区间的网络结构差异。即湖心网络更松散的结论在不同阈值下保持一致, 验证了结论的稳健性。未来研究可进一步探索不同阈值在水质网络结构对比中的应用, 以更精确地揭示水质指标间的驱动关系。

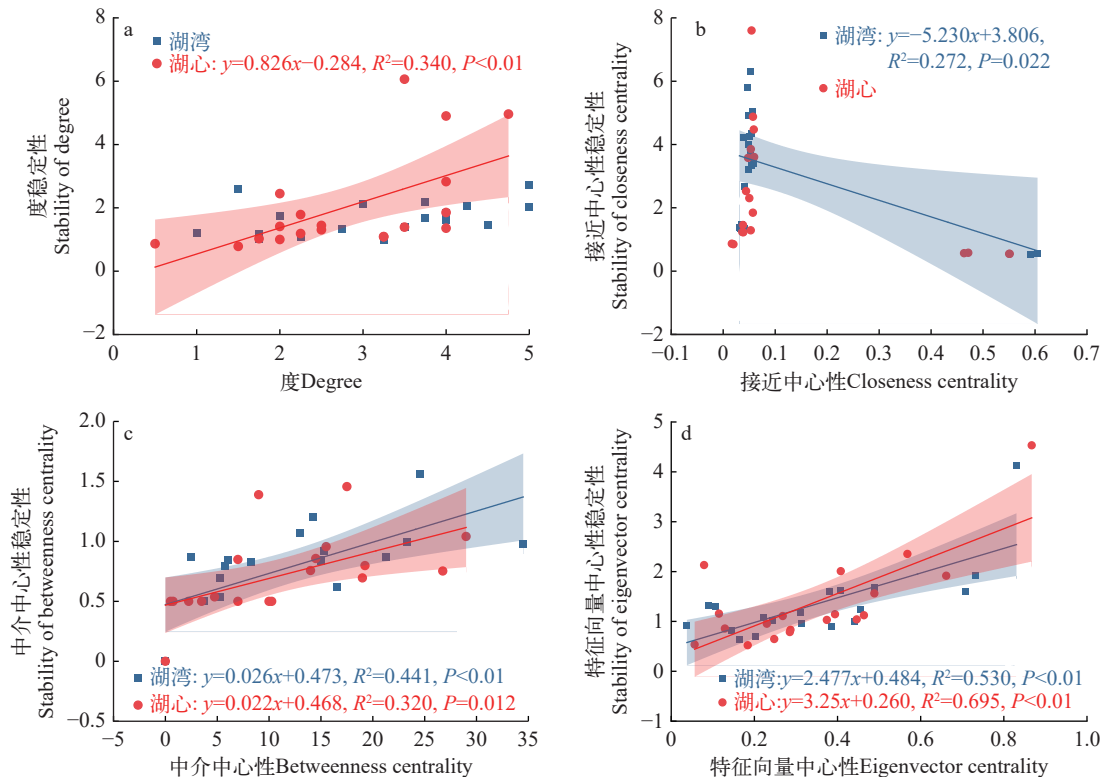


图 10 洱海2017—2024年湖心与湖湾季节水质网络节点参数与其稳定性关系

Fig. 10 Quarterly water quality network node attribute parameters of the center and the bay of Erhai Lake and their stability relationship

a. 度; b. 接近中心性; c. 中介中心性; d. 特征向量中心性

a. Degree; b. Closeness centrality; c. Between Centrality; d. Eigenvector centrality

3.2 自然与人为因素对网络结构的驱动作用

洱海北部有弥苴河、罗时江、永安江三条主要入湖河流,其流域面积和进水量均较大,同时人口与耕地集中分布^[28],导致北部湖湾入湖河流污染负荷显著高于中部和南部湖区(北部TN负荷:639.125 t、TP负荷:25.581 t;中部TN负荷:79.019 t、TP负荷:6.033 t;南部TN负荷:120.502 t、TP负荷:9.874 t)^[5]。因此洱海北部湖区较其他湖区更频繁地发生大规模水华,水质网络结构更易发生整体波动^[29]。洱海中部湖湾冠层型水生植物生物量丰富,占总生物量的74%以上,高于北部与南部湖湾。金鱼藻等冠层型植物会阻碍湖心与湖湾间的水体交换,导致污染物滞留于湖湾,导致湖湾水质变差、生态系统稳定性降低^[30]。南部湖心由于风浪较大等原因,存在水体扰动频繁、沉积物再悬浮等问题^[31]。而南部湖湾(向阳湾)岸线边界复杂,底质多为大块砾石,湖流流速较低,各水质指标间的连接可能被阻断,形成多个小型功能模块^[32]。同时向阳湾冠层型水生植物少,湖区间水体交换充分,从而降低了湖湾的营养盐负荷^[31]。因此,向阳湾网络结构比湖心松散且水质状况较好,是受“地形-底质-植被”三重因素调控的典型例外。基于湖区间的差异,在洱海北部湖区通过升级生态缓冲区等方法降低入湖污染脉冲对网络结构的冲击。在中部湖区实施差异化收割,优化水生植物群落结构。严格保护南部湖区现有的砾石底质和稀疏冠层植被生境,并以向阳湾网络结构(高模块度、低密度)作为其他湖区管理恢复基准线。

洱海湖湾相比湖心拥有更短的路径长度与更

高的平均聚类系数,表明其网络结构更复杂紧密,而洱海Chl.a浓度有明显的临近效应,即离岸越近Chl.a浓度越高^[33]。可以推测拥有复杂紧密网络结构的水体(如湖湾)水华暴发的风险更高,因为水质指标紧密连接的水体更易发生整体变化,更易形成适宜藻类生长的环境^[10]。洱海湖心水质网络结构的年际稳定性与季节稳定性均高于湖湾网络,湖心区域的物质循环过程较为平稳,不会因为外界扰动或环境变化而出现剧烈波动,有利于维持湖泊生态系统的正常代谢^[34]。May的奠基性工作指出,生态系统稳定性随着食物网的复杂程度降低,复杂网络的扰动传递性强,不满足定性稳定条件(种内作用非正、至少一种内稳定作用、种间作用无关联、无物种闭环反馈和矩阵非奇异)^[35]。亦有研究发现水体的低营养水平可通过提升网络模块性、调节多样性与复杂性的相互作用,增强了浮游细菌网络的稳定性^[36]。本研究在洱海湖心区观察到的松散网络结构,印证了“模块化增强稳定性”的理论预测,即模块化通过将扰动限制在局部模块内,阻断了扰动的全局化,从而提升了生态系统的抵抗力和恢复力。拥有复杂网络结构的湖区调节服务较弱(尤其是应对污染的缓冲能力),干扰更易扩散,进而可能导致水质波动性大,影响饮用水安全和旅游体验等。综上,模块度高、密度低的简单、松散网络是洱海更优的水质网络结构,该网络结构所在湖区(洱海北部、中部湖心及南部湖湾)表现出更优的水质状况与稳定性。这一发现超越了传统单一指标比较,明确了“最优网络结构”可作为洱海生态系统健康评估的新标准。

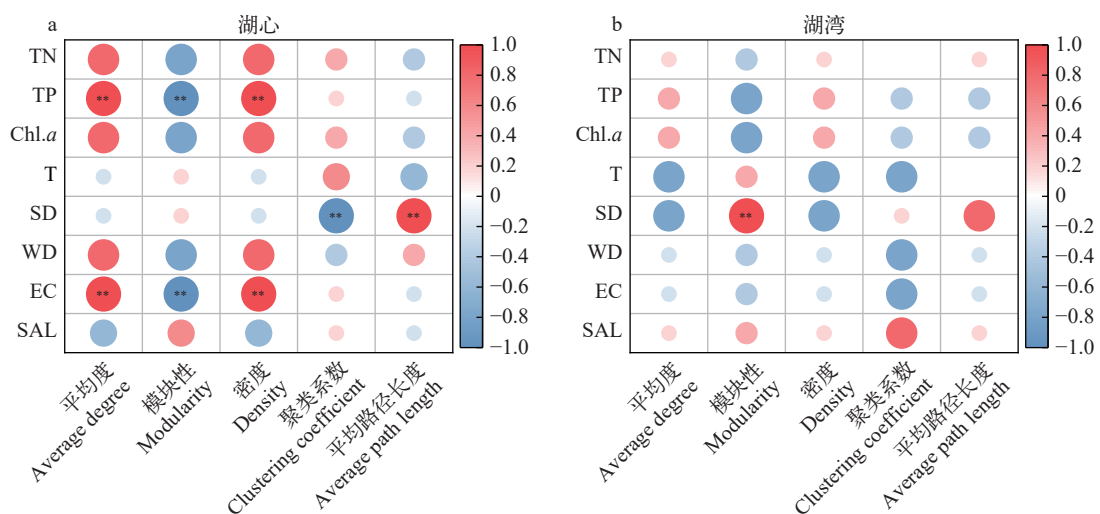


图 11 洱海湖心与湖湾水质指标和网络参数相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis of water quality indicators and network parameters in the lake center and bays of Erhai Lake

a. 湖心Lake center; b. 湖湾Lake bay; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

3.3 关键节点识别与多时空尺度动态特征

网络节点属性参数可用于体现节点的重要性, 节点越重要, 相应水质指标对水环境的影响程度越大^[37]。本研究结果显示, TP是洱海湖心水体共有的关键驱动因子, 其对湖心水质网络有着显著影响, TP浓度的升高会导致网络结构的复杂紧密化。这不仅证实了TP是湖心的核心污染物, 更因其在网络中的高中心性, 表明对洱海TP的管控能产生高效的“杠杆效应”。TP在水体中存在溶解态、颗粒态等多种形态, 并在水-沉积物、水-生物等多界面间迁移转化。这些过程将TP与SD、Chl.a、pH等多个水质指标紧密耦合, 使其自然成为网络连接枢纽。同时P作为关键的生物元素, 其可利用性直接影响藻类、水生植物等初级生产者的生长, 进而通过食物网传递, 间接关联DO、T等理化指标。这为精准治理提供了新的靶点, 在控制TP外源输入的同时, 调控内源的磷储存。整体上, 湖心受人类干扰较少, TDS、SAL、SPC节点度较湖湾更稳定。网络节点属性参数及其稳定性相关关系表明, 关键节点越多, 网络中节点间连接强度越高, 网络结构稳定性越高^[19]。因此可将湖心区TP浓度及其网络中的中心性变化, 作为评估全湖控磷措施长期效果的核心指标。同时利用网络分析中与TP强关联的指标的空间分布, 通过生态库塘提质改造、生态廊道修复及农田尾水循环利用等方法, 溯源并尽可能拦截外源TP输入。在网络复杂区域通过底泥清淤、底质改良剂等方法阻断TP从沉积物向水体的网络连接路径, 精准调控TP的内源释放。另外, 通过恢复水生植物来作为一道生态屏障, 缓冲外源污染负荷的同时改善其网络结构, 使其更松散, 更稳定。

在年际水质网络中, 湖湾水质指标间拥有更多的连接数, 但湖心拥有更多关键指标。洱海TN、TP与Chl.a浓度整体均表现为湖心低于湖湾, 同时其稳定性系数与浓度表现一致。湖湾连接数多但关键节点少, 反映了其受多样化外源扰动的特征, 水环境状态更具随机性; 而湖心关键节点清晰, 表明其生态过程由“营养盐-藻类”这一内源主导机制所支配。近年来大理州极端气候事件频率升高, 相关研究发现高温干旱会加快洱海内源污染释放, 而低温和极端降雨会加重外源污染负荷^[38]。作为国内旅游热点城市, 近年来大理旅游人数持续升高, 激增的旅游人口导致洱海环境压力陡增^[39]。此外, 2021年以来洱海每年均有不同程度的突发性甲藻爆发^[40]。这些因素均对洱海水生态系统稳定性有较大影响。2024年6月洱海流域部分工程进入主要施工期, 打破了原有水质指标间建立的稳态关系,

导致连接重组。同年部分湖区爆发大规模水华且水生植物生物量降低, 这可能导致了洱海水质网络模块度骤降、密度上升等异常变化。施工期结束后的持续监测发现, 洱海水环境状况开始逐步恢复与提升。季节水质网络中, 洱海各湖区水质网络均呈现季节性演变: 由春季至冬季水质网络结构逐渐紧密复杂。其中湖心在春季、冬季拥有更多关键节点, 湖湾在夏季、秋季拥有更多的关键节点和指标连接, 这与营养盐浓度的季节变化表现相同。2017—2024年, 洱海流域平均降雨量表现为夏季>秋季>春季>冬季, 汛期降水量占全年降水量的77%以上, 入湖水量占全年入湖水量的60%以上^[41]。雨水径流易携带污染物入湖, 导致洱海非汛期水质状况优于汛期, 而湖湾水质受降雨影响较湖心更为显著^[5, 42], 进而造成了汛期湖湾水质网络结构的紧密复杂。营养盐浓度高的湖区水质网络拥有更多关键节点, 而外源扰动会显著增强水体物理参数与其他水质指标间的关联强度和数量^[43]。洱海春季与夏季的水质网络结构相对简单松散, WD、SD和EC在湖湾水质网络中重要性高于湖心水质网络, 且湖湾WD在秋季拥有最高的节点度。同时湖湾水质网络中SD的升高会导致网络向松散结构转变, 这可能与水生植物的生长状况相关: 高透明度对水生植物生长有积极作用^[44]。水生植物的不同生长期造成其对水质的影响差异: 生长期大量吸收氮、磷等营养盐, 降低了其浓度及相互作用概率^[45]; 衰亡期植物残体分解释放有机物质和营养盐, 分解产物与水体其他物质相互作用^[46]。因此, 季节变化导致的降雨径流与水生植物差异会造成湖区水质网络结构波动。沉水植物形成的生态系统能稳定底泥、减少营养盐的内源释放, 使湖区水质网络结构向简单松散方向发展^[47]。但需在秋冬季对水生植物进行适度收割, 将其吸收的营养盐移出水体, 避免其衰亡分解后的重新释放。

本研究首次将相关性网络分析系统应用于高原湖泊水质评价, 但方法本身存在一定局限性。水质指标间的相关性不能等同于因果性, 仅能揭示变量间的共变模式而不能直接确定驱动方向。例如, TP与Chl.a的强相关可能源于TP驱动藻类生长, 也可能是藻类残体分解释放TP, 或二者共同受第三因素(如T等)驱动。本研究构建的基于年际或季节水质数据的静态网络也难以捕捉短期、非线性或有时滞性的生态过程, 后续研究中可尝试将动态网络分析方法引入水质评价, 通过连续的时间序列网络捕捉网络拓扑结构动态。

综上所述, 模块度高、密度低的松散网络是洱

海水水质优良与稳定的结构表征, 该结构将扰动局域化, 不易发生整体波动, 是水生态修复时更优的发展方向。湖心区全年维持该构型, 因而具备更高的年际与季节稳定性。由于TP在湖水水质网络中的极高重要性, 可将其作为全湖控磷效果的核心评价指标。将水质网络结构作为生态系统稳定性的新型评估与预警指标。当监测到某湖区网络密度异常升高、模块度下降时, 即使关键营养盐浓度未超标, 也应视为系统稳定性受损的早期信号, 从而进行主动干预。外源扰动会驱动水质网络结构变化。应重点通过降低入湖河流污染负荷、恢复湖湾沉水植被, 并优化收割策略。利用其“简化网络”的生态功能, 主动提升湖湾的稳定性, 驱动全湖水水质网络向更优构型转变, 为高原湖泊从“浓度管理”迈向“结构管理”提供新路径。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Deng Y Z, Chen G K, Huang Y, *et al.* Spatiotemporal evolution of trade-off and synergy relationship between water conservation and soil retention functions in Erhai Lake basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026: 1-13. [邓钰妆, 陈国坤, 黄燕, 等. 洱海流域水源涵养与土壤保持功能时空演变及权衡协同关系 [J]. 水土保持学报, 2026: 1-13.]
- [2] Chen K, Duan L Z, Liu Q, *et al.* Spatiotemporal changes in water quality parameters and the eutrophication in Lake Erhai of southwest China [J]. *Water*, 2022, **14**(21): 3398.
- [3] Chen K, Zhang S. Research on treatment of non-point source agricultural pollution by terminal interception in Erhai Irrigated Area [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2024(1): 27-29. [陈凯, 张坤. 洱海灌区农业面源污染末端拦截治理研究 [J]. 水科学与工程学报, 2024(1): 27-29.]
- [4] Chu Z S, Gao S J, Pang Y, *et al.* Characteristics, problems and ecological protection and restoration measures of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland elements in Lake Erhai Basin [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(5): 507-514. [储昭升, 高思佳, 庞燕, 等. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施 [J]. 环境工程技术学报, 2019, **9**(5): 507-514.]
- [5] Hua Z H, Li R, Yang Z, *et al.* The spatiotemporal variation and potential causes for the nutrient status of water in Lake Erhai from 2017 to 2022 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(6): 1639-1650. [华兆晖, 李锐, 杨智, 等. 2017—2022年洱海水体营养状态的时空变化趋势及其成因分析 [J]. 湖泊科学, 2024, **36**(6): 1639-1649.]
- [6] Lai M D, Cao G Z, Wang R M, *et al.* The effect of nitrogen fertilizer infiltration on nitrogen transport in shallow groundwater in the west Erhai [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, **46**(11): 135-143. [赖美丹, 曹广祝, 王仁敏, 等. 洱海西侧氮肥下渗对地下水氮素迁移的影响 [J]. 环境科学与技术, 2023, **46**(11): 135-143.]
- [7] Xu Y, Zhu K H, Guo Y L, *et al.* The role of upper trophic level predators in maintaining the pelagic and littoral habitat energy coupling in shallow lakes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(3): 403-409. [徐瑛, 祝孔豪, 郭钰伦, 等. 高营养级捕食者在浅水湖泊沿岸带与敞水区能量耦合的维持作用 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(3): 403-409.]
- [8] Wang L G, Han Y Q, Yu H H, *et al.* Submerged vegetation and water quality degeneration from serious flooding in Liangzi Lake, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019(10): 1504.
- [9] Xie H M, Li Q S, Liu S L, *et al.* Investigation on the status quo of aquatic plant biodiversity in the riverways and littoral zones of the Lake Taihu rim [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(3): 735-744. [谢洪民, 李启升, 刘帅领, 等. 环太湖地区河道和湖泊沿岸带水生植物多样性现状调查 [J]. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 735-744.]
- [10] Hua Z H. Study on the spatiotemporal variation and multi-parameter network characteristics of water quality in Erhai Lake [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2024: 38. [华兆晖. 洱海2017-2022年水质时空变化及多参数网络特征研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2024: 38.]
- [11] Zhang Z W. Complexity, hardness and chronicity of treatment of the nine plateau lakes in Yunnan [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, **31**(1): 19-20. [张召文. 云南九大高原湖泊治理的复杂性、艰巨性和长期性 [J]. 环境科学导刊, 2012, **31**(1): 19-20.]
- [12] Liu X F, Wu Y, Ni Z K, *et al.* Spatiotemporal variation of water quality and algal biomass in Erhai Lake and its environmental management implications [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, **10**(4): 566-578.
- [13] Chen X H, Qian X Y, Li X P, *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988-2013 and analyses of its socio-economic drivers [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(1): 70-78. [陈小华, 钱晓雍, 李小平, 等. 洱海富营养化时间演变特征(1988-2013年)及社会经济驱动分析 [J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 70-78.]
- [14] He N, Li D Y, Gan W Y, *et al.* Mining vital nodes in complex networks [J]. *Computer Science*, 2007, **34**(12): 1-5. [赫南, 李德毅, 淦文燕, 等. 复杂网络中重要性节点发掘综述 [J]. 计算机科学, 2007, **34**(12): 1-5.]
- [15] Layeghifard M, Hwang D M, Guttman D S. Disentangling interactions in the microbiome: A network perspective [J]. *Trends in Microbiology*, 2017, **25**(3): 217-228.
- [16] Vinagre C, Gastón C L. Short food chains, highly diverse and complex food web networks in coastal lagoons [J]. *Food Webs*, 2024(38): e00341.
- [17] Li Y, He N P, Liu C C. Plant functional trait networks:

- development of conceptual framework and advances in applications [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(18): 7944-7961. [李颖, 何念鹏, 刘聪聪. 植物功能性状网络: 概念体系发展与应用进展 [J]. 生态学报, 2024, **44**(18): 7944-7961.]
- [18] Dominguez-García V, Dakos V, Kéfi S. Unveiling dimensions of stability in complex ecological networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(51): 25714-25720.
- [19] Li Y, Liu C C, Sack L, *et al.* Leaf trait network architecture shifts with species-richness and climate across forests at continental scale [J]. *Ecology Letters*, 2022, **25**(6): 1442-1457.
- [20] Medeiros C D, Trueba S, Henry C, *et al.* Simplification of woody plant trait networks among communities along a climatic aridity gradient [J]. *Journal of Ecology*, 2025, **113**(4): 896-912.
- [21] Ma W, Zhou Y, Su J G, *et al.* Study on the hydrodynamic characteristics and transpiration and diffusion of pollutants in Erhai Lake [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, **19**(3): 281-289. [马巍, 周云, 苏建广, 等. 洱海水动力特性与入湖污染物迁移扩散规律研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, **19**(3): 281-289.]
- [22] Krause-Jensen D, Sand-Jensen K. Light attenuation and photosynthesis of aquatic plant communities. [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(3): 396-407.
- [23] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [24] Golterman H L, Clymo R S. Methods for chemical analysis of fresh waters [J]. *Journal of Ecology*, 1969, **10**(4): 46316-46317.
- [25] Eaton A D, Cluskeri L S, Rice E W, *et al.* Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition [M]. Washington DC: American Public Health Association, 2005:127.
- [26] Berthold M, Karsten U, Weber M, *et al.* Phytoplankton can bypass nutrient reductions in eutrophic coastal water bodies [J]. *Ambio*, 2018, **47**(1): 146-158.
- [27] Freeman L C. A set of measures of centrality based on betweenness [J]. *Sociometry*, 1977, **40**(1): 35-41.
- [28] 羊华. 洱海入湖河流磷负荷与营养化关系浅析 [C]. 云南省水利学会2018年度学术交流会议论文集. 昆明, 2018: 180-184.
- [29] Wang X M, Deng Y, Tuo Y C, *et al.* Study on the temporal and spatial distribution of chlorophyll a in Erhai Lake based on multispectral data from environmental satellites [J]. *Ecological Informatics*, 2021(61): 101201.
- [30] Shan H, Chou Q C, Lü C C, *et al.* How do the growth forms of macrophytes affect the homogeneity of nearshore and open water areas [J]? *Science of the Total Environment*, 2024(908): 168165.
- [31] Lloret J, Carreño A, Carić H, *et al.* Environmental and human health impacts of cruise tourism: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021(173): 112979.
- [32] Tian Y Q, Chen X, Lü C C, *et al.* Diversity and distribution status of aquatic plants in the lakeshore zone of Lake Erhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(3): 941-949. [田玉清, 陈欣, 吕超超, 等. 洱海湖滨带水生植物多样性及分布现状 [J]. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 941-949.]
- [33] Bai X H, Cao T, Ni L Y, *et al.* Seasonal variation of water column optical parameters in Lake Erhai, China [J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(2): 10-16. [摆晓虎, 曹特, 倪乐意, 等. 洱海水体光学特性的季节变化及其影响因素分析 [J]. 水生态学杂志, 2016, **37**(2): 10-16.]
- [34] Chen X H, Qian X Y, Li X P, *et al.* The vertical distributions and temporal evolution characteristics and of nutrient concentration in the sediment core at the center of Lake Erhai [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(10): 1693-1698. [陈小华, 钱晓雍, 李小平, 等. 洱海湖区沉积柱芯营养盐垂向分布及时间演化特征 [J]. 生态环境学报, 2016, **25**(10): 1693-1698.]
- [35] May R M. Qualitative stability in model ecosystems [J]. *Ecology*, 1973, **54**(3): 638-641.
- [36] Shen Z, Xie G J, Yu B B, *et al.* Eutrophication diminishes bacterioplankton functional dissimilarity and network complexity while enhancing stability: Implications for the management of eutrophic lakes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024(352): 120119.
- [37] Strogatz S H. Exploring complex networks [J]. *Nature*, 2001, **410**(6825): 268-276.
- [38] Gong F L. Effects of extreme climatic events on interal loadings and external loadings of Laker Erhai [D]. Kunming: Yunnan University, 2023: 48. [龚发露. 极端气候事件对洱海内源释放和外源负荷的影响 [D]. 昆明: 云南大学, 2023: 48.]
- [39] Yang S K, Dou J S, Lü X J, *et al.* Analysis of tourism and ship pollution in the Erhai Lake Basin [J]. *Environmental Science Survey*, 2021, **40**(1): 38-40. [杨四坤, 窦嘉顺, 吕兴菊, 等. 洱海流域旅游及船舶污染分析 [J]. 环境科学导刊, 2021, **40**(1): 38-40.]
- [40] Li Z K, Yang P P, Zhu J, *et al.* Analysis of changes in algal structure and causes of pyrophyta blooms in Erhai Lake From 2020 to 2024 [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2025, **50**(6): 141-151. [李泽坤, 杨萍萍, 朱江, 等. 2020—2024年洱海藻类结构变化及甲藻水华成因分析 [J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2025, **50**(6): 141-151.]
- [41] Huang M Y. Water quality characteristics and pollution load estimation of main rivers around Erhai Lake [J]. *Yangtze River*, 2022, **53**(1): 61-66. [黄明雨. 环洱海主要入湖河流水质特征及入湖污染负荷估算 [J]. 人民长江, 2022, **53**(1): 61-66.]
- [42] Nie J F, Tang C, Wang J S, *et al.* The characteristics analysis of pollutants from main rivers entering the lake in the northern Erhai Lake under precipitation events [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2024, **46**(3): 311-319. [聂菊芬, 唐诚, 王俊松, 等. 降雨事件下洱海北部主要入

- 湖河流污染物特征分析 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46(3): 311-319.]
- [43] He W Z, Yin C J, Yuan J, *et al.* Ecological corridor construction on the distribution and diversity of fish communities in different types of bays in Erhai Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(12): 1965-1975. [何万朝, 尹成杰, 袁静, 等. 生态廊道建设对洱海不同类型湖湾鱼类群落分布及多样性的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, 47(12): 1965-1975.]
- [44] Su H J, Chen J, Wu Y, *et al.* Morphological traits of submerged macrophytes reveal specific positive feedbacks to water clarity in freshwater ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(684): 578-586.
- [45] Jiang Y S, Chen H, Ma Z M, *et al.* Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(4): 1351-1358. [姜义帅, 陈灏, 马作敏, 等. 利用沉水植物生长期收割进行富营养化水体生态管理的实地研究 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1351-1358.]
- [46] Xiong H F. Study on the release of carbon, nitrogen and phosphorus from the decomposition of aquatic plants [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019(384): 012093.
- [47] Liu M, Chen K N. Purification effect of submerged macrophyte system with different plants combinations and C/N ratios [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2706-2714. [刘淼, 陈开宁. 植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2706-2714.]

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF SPATIAL WATER-QUALITY NETWORKS IN ERHAI LAKE FROM 2017 TO 2024

JIN Da-Cheng^{1,2}, LÜ Chao-Chao¹, SHI Lei^{1,2}, CHEN Xiao-Xi⁴, HUA Zhao-Hui¹, WEN Zi-Hao¹, SHAN Hang¹, YIN Jin-Feng^{1,2}, CAO Te¹ and CHOU Qing-Chuan^{1,3}

(1. Erhai Plateau Lake Ecosystem Research Station, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 4. Dali Prefecture Smart Erhai Lake Supervision and Command Center, Dali 671100, China)

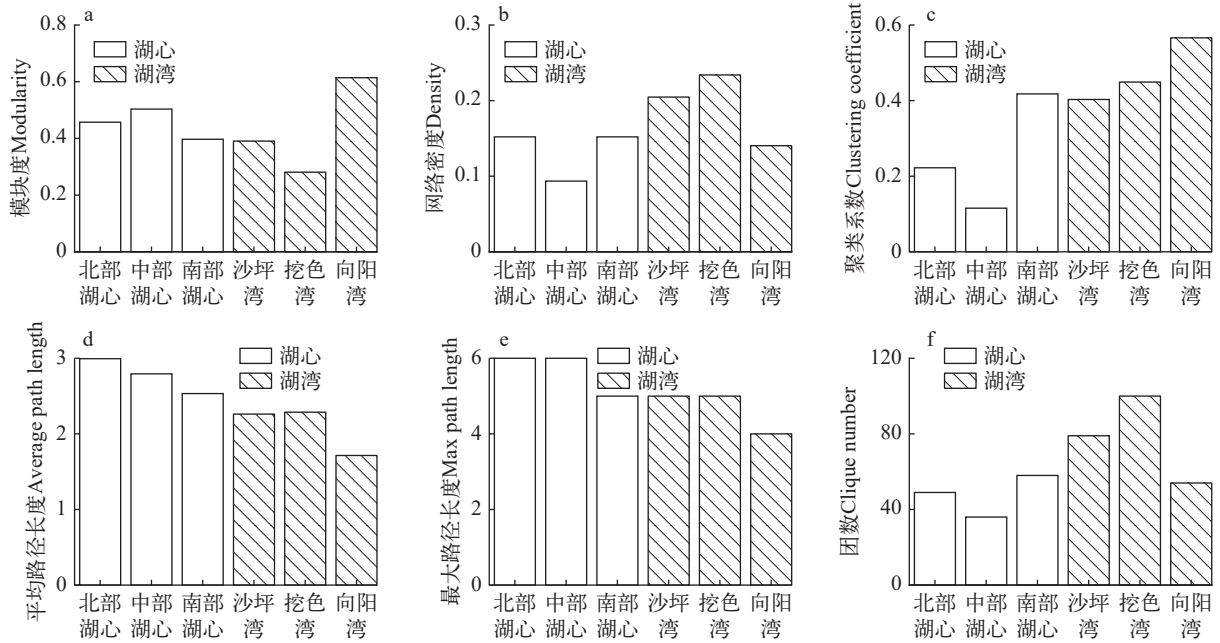
Abstract: Influenced by natural geographical conditions and intensity of human activities, the water environment of different areas in Erhai Lake exhibits significant differentiation. To analyze the spatiotemporal variation characteristics of the water environment in Erhai Lake, this study constructed water quality correlation networks at overall, annual, and quarterly scales for three lake regions (the north, middle, and south) based on 19 water physicochemical indicators monitored quarterly at the lake center and corresponding bays (Shaping Bay, Wase Bay, and Xiangyang Bay) from 2017 to 2024. The results indicate that: (1) The water quality network at the center of Erhai Lake is sparser and structurally simpler than that in the lake bays. This low connectivity and high modularity structure can localize disturbances such as pollution, thereby endowing higher resistance. In contrast, the bay networks are more complex and densely connected, making them more prone to chain fluctuations under external disturbances and having relatively weaker resistance; (2) The core nodes quality in the center lake network water are TN, TP, SD, and Chl.*a*, with TP serving as a common key driver. Its regulation can produce an efficient lever effect. Although water quality indicators in the bays have more connections, they possess fewer key nodes and rely more on random connected paths for buffering disturbances, thus having relatively lower stability; (3) The network structure of water quality in the bays undergoes seasonal evolution, gradually becoming more complex and compact from spring to winter, which may be jointly driven by seasonal fluctuations in rainfall runoff and aquatic plants. Therefore, by regulating the aquatic plant communities in the bays, the local network density can be reduced and modularity enhanced, thereby providing a key pathway toward simplifying and stabilizing the overall lake water quality network. This study is the first to incorporate the network stability framework into water quality assessment of plateau lakes. The proposed “water quality network structure characteristics” offer novel early-warning indicators (such as modularity and density) for zonal management of Erhai Lake and indicate the precise governance approach of reducing external loads and regulating aquatic vegetation to drive the network towards a more favorable configuration.

Key words: Plateau lakes; Water quality network; Stability; Seasonal differences; Erhai Lake

附录 S1 各湖区不同相关系数的水质网络结构差异

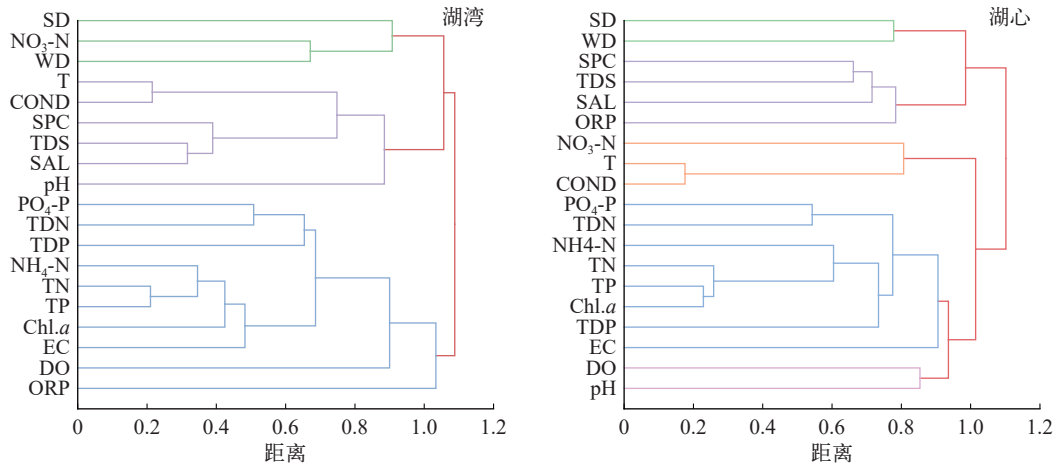
Appendix S1 The differences in the water quality network structure with different correlation coefficients in each lake area

湖区	模块度			密度			聚类系数		
	$r>0.3$	$r>0.4$	$r>0.5$	$r>0.3$	$r>0.4$	$r>0.5$	$r>0.3$	$r>0.4$	$r>0.5$
北部湖心	0.442	0.581	0.704	0.152	0.111	0.041	0.137	0.167	0
中部湖心	0.500	0.691	0.624	0.094	0.053	0.029	0.074	0	0
南部湖心	0.346	0.509	0.547	0.152	0.094	0.053	0.382	0.333	0.389
沙坪湾	0.401	0.548	0.674	0.205	0.117	0.047	0.429	0.620	0.583
挖色湾	0.281	0.391	0.452	0.234	0.146	0.088	0.474	0.400	0.433
向阳湾	0.614	0.655	0.624	0.140	0.123	0.047	0.643	0.679	0



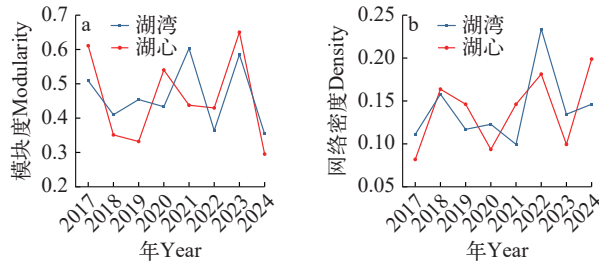
附图 1 洱海各水域2017—2024年整体水质网络参数对比

Appendix Fig. 1 Comparative study on water quality networks in different zones of Erhai Lake over eight years



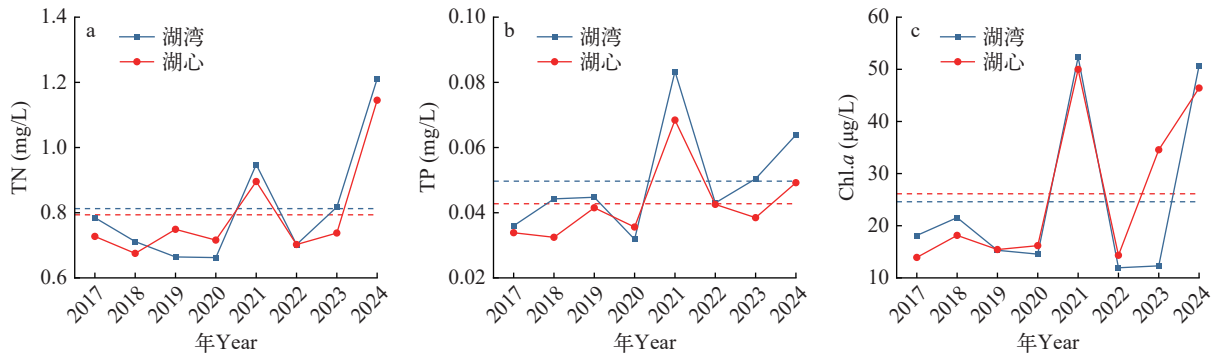
附图 2 洱海湖心与湖湾水质指标层次聚类图

Appendix Fig. 2 Hierarchical clustering analysis of water quality indices in the central and bay areas of Erhai Lake



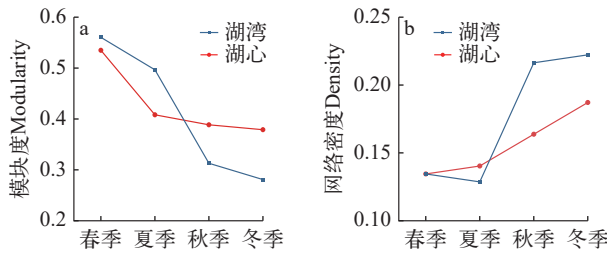
附图3 洱海各湖区2017—2024年年际水质网络模块度(a)和网络密度(b)

Appendix Fig. 3 Interannual water quality networks modularity (a) and network density (b) in different zones of Erhai Lake from 2017 to 2024



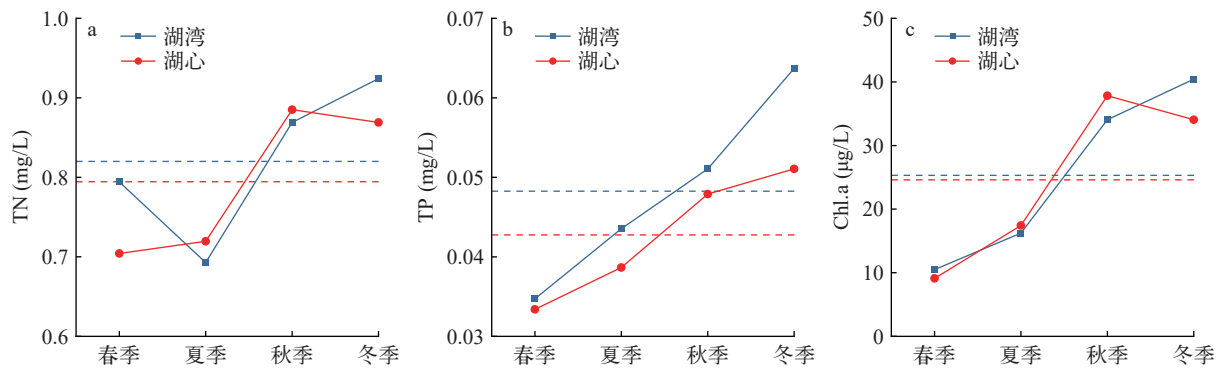
附图4 洱海各湖区TN、TP、Chl.a浓度年际变化

Appendix Fig. 4 Interannual variations of TN, TP, and Chl.a concentrations in different zones of Erhai Lake



附图5 洱海各湖区2017—2024年季节水质网络模块度(a)和网络密度(b)

Appendix Fig. 5 Quarterly water quality networks modularity (a) and network density (b) in different zones of Erhai Lake from 2017 to 2024



附图6 洱海各湖区TN、TP、Chl.a浓度季节变化

Appendix Fig. 6 Quarterly variations of TN, TP, and Chl.a concentrations in different zones of Erhai Lake