

潮汐型湖泊水体透明度灰关联分析*

王华¹, 逢勇^{1,2}, 陈晓峰¹, 赵伟¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏南京 210098;

2. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 受外域水体特征及潮汐作用影响, 滨江潮汐型湖泊水体透明度影响因子复杂多变。以镇江内湖为例, 基于洪、枯两季典型全日潮野外同步实测结果, 运用灰色系统理论, 定量计算了内湖水体透明度与相关环境因子的灰关联度, 分析研究了不同时间尺度下内湖透明度的主要影响因子。结果表明: 洪季, 影响内湖透明度的关键因子是悬沙浓度与高锰酸盐指数; 枯季, 来水含沙量降低, 主要影响因子为高锰酸盐指数与叶绿素 a 浓度; 洪、枯两季, 内湖水体透明度主要影响因子的排列顺序受潮汐作用影响较小; $\text{NH}_3\text{-N}$ 等间接影响因子对透明度影响不明显, 但随涨落潮仍呈现一定变化。

关键词: 潮汐; 湖泊; 水体透明度; 灰关联分析; 内湖

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 01-0108-04

水体透明度不仅是反映水体清澈与浑浊程度的一个重要参数, 也是评价水体富营养化的一个重要指标, 其与太阳辐射^[1]、光学衰减及漫射衰减系数^[2]、水体理化性质、水体组分(非生物悬浮颗粒、浮游植物、溶解性有机物)^[3]以及气象状况等诸多因子有着密切关系。近 30 多年来, 国内外很多学者对水体透明度的影响因子进行了研究^[4-7], 发现水体透明度主要受悬浮物的影响, 并与叶绿素浓度存在微弱线性相关^[6]; 也有研究将透明度的影响因子归纳为直接因素(如水体中悬浮质、可溶性有机物等)和间接因素(如温度、pH, N/P 及 Ca^{2+} , Mg^{2+} 含量等)^[7]。然而, 针对潮汐型湖泊的水体透明度与其影响因子关联度的定量研究尚不多见。本文对长江中下游地区镇江的潮汐型湖泊——内湖, 进行了野外同步监测, 并运用灰关联模型, 对不同时间尺度下内湖水体透明度的影响因子作了定量分析。

1 研究区域背景

内湖位于江苏省镇江市, 水面面积约 6.8 km^2 , 其上游通过引航道与长江相通, 下游通过焦南闸与长江汇聚(见图 1)。受长江潮汐作用, 内湖感潮特性明显, 每日出现 2 次高低潮。由于长江水沙特征年际、年内分布不均, 且受径流与潮流双

重影响, 内湖水量、水质、泥沙、透明度特征及水动力条件复杂多变: 洪季内湖与长江水量交换频繁, 有利于改善水质, 但来水含沙量较高, 降低了内湖水体透明度并引起泥沙淤积; 枯季来水含沙量减少, 但交换水量不足, 水质恶化严重, 易引起藻类暴发。作为城市主要水体, 内湖的水质改善与透明度提高尤其必要。

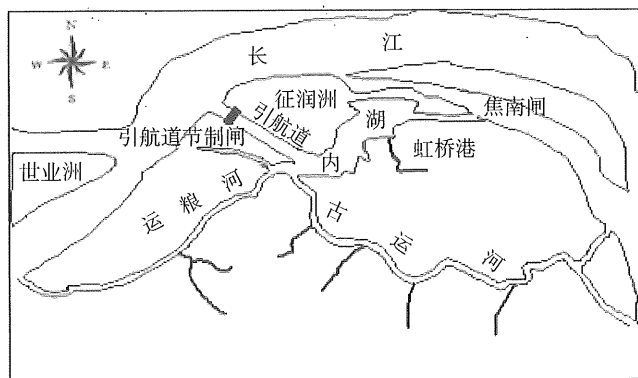


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 General view of the research area

2 监测及结果

2.1 同步监测

选择 2004 年 4 月 21 日(大潮汛)和 2004 年

* 收稿日期: 2007-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579015); 国家 863“十五”重大科技专项基金资助项目(2003AA6011002)

作者简介: 王华(1983 生), 男, 博士生; E-mail: wanghua543543@163.com

8 月 18 日（大潮汛）枯、洪两季全日潮（25 h）进行了透明度、水流、水质及泥沙同步监测，2 次监测点位布置相同，分别在内湖水域布设 7 条测验垂线，具体点位见图 2。监测过程中，各垂线流速、流量、水位及泥沙逐时监测，水质、透明度采样时间间隔为 3 h。

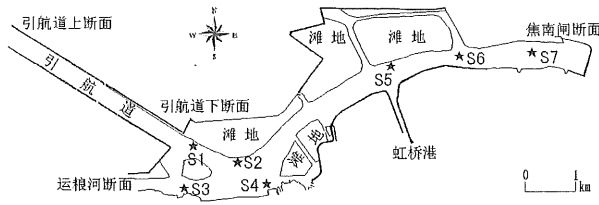


图 2 内湖水文水质监测点位布置图

Fig. 2 Monitoring points and sections in Inner Lake

(1) 流速流向监测：各垂线定点流速、流向测验运用 SL25-1 流速流向仪，根据实测水深与水文规范要求分别采用三点法（即 0.2H、0.6H、0.8H 层）或二点法（即 0.2H、0.8H）。

(2) 泥沙监测：采用悬移质横式采样器，采用三点法或二点法采集水样。在涨憩、落憩时采集 2 份水样（其中 1 份用于悬沙颗粒分析）。

(3) 水质监测：采用悬移质横式采样器对各垂线位置水面以下 0.5 H 采集，之后按照规范要求分批及时送回实验室待测。水体主要污染指标与透明度严格按照《水和废水监测分析方法》与《湖泊富营养化调查规范》（第二版）进行测定，其中 TN、NH₃-N 用 Skalar 湿化学流动分析仪测定。

2.2 监测结果

表 1 和 2 分别给出了洪、枯两季涨急、落急时刻，7 个点位的实测数据。基于前人对透明度影响因素的研究成果^[1,7]，结合内湖的实际特征，本文选取 6 项因子进行分析。结果表明：内湖水体透明度、水质及悬沙浓度受潮汐作用明显，枯季内湖水体透明度普遍优于洪季；受长江来水影响，洪季水体悬沙浓度高于枯季；枯季，内湖水水质恶化严重，TN、TP 等指标普遍超过地表水环境 V 类水质标准（GB3838-2002）。

表 1 内湖洪季（2004 年 8 月 18 日）监测结果

Tab. 1 Monitoring data during the whole tidal cycle in flood season in Neihu

时间 点位	涨急							落急						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
SD/cm	15.0	10.0	20.0	23.0	22.0	20.0	29.0	22.0	20.0	23.0	24.0	18.0	21.0	22.0
SS/(mg·L ⁻¹)	82.0	44.0	65.0	53.0	73.0	58.0	53.0	84.0	40.0	58.0	54.0	70.0	62.0	41.0
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.20	0.05	0.05	0.05	0.45	0.05	0.05	0.06	0.05
TN/(mg·L ⁻¹)	1.24	0.50	1.51	0.62	1.29	1.57	1.42	0.78	1.17	1.83	1.76	0.96	1.82	1.45
TP/(mg·L ⁻¹)	0.06	0.10	0.52	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.72	0.09	0.06	0.06	0.05
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	2.10	2.10	3.90	2.50	2.00	2.20	2.00	2.30	1.70	2.20	2.30	2.10	2.10	1.90
Chl-a/(mg·m ⁻³)	0.50	2.20	0.50	1.90	0.50	0.50	1.90	2.20	0.50	0.50	1.50	0.80	0.80	0.40

表 2 内湖枯季（2004 年 4 月 21 日）监测结果

Tab. 2 Monitoring data during the whole tidal cycle in dry season in Neihu

时间 点位	涨急							落急						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
SD/cm	18.9	21.8	23.2	29.3	52.6	27.1	32.8	22.9	53.8	46.1	46.2	33.4	50.2	44.0
SS/(mg·L ⁻¹)	80.0	55.0	48.0	30.0	17.0	35.0	32.0	50.0	17.0	16.0	18.0	37.0	18.0	23.0
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	0.07	0.05	0.26	0.80	0.15	0.47	0.21	0.04	0.05	0.44	0.90	0.14	0.58	0.20
TN/(mg·L ⁻¹)	2.30	2.64	3.91	4.52	3.80	3.63	3.78	2.45	2.74	3.37	3.18	2.44	2.76	2.34
TP/(mg·L ⁻¹)	0.33	0.23	0.76	0.39	0.79	0.68	0.51	0.48	0.39	2.22	1.69	0.73	0.51	0.35
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	3.21	4.18	3.81	11.34	4.26	6.16	3.58	4.48	3.60	29.78	11.55	2.29	4.33	2.95
Chl-a/(mg·m ⁻³)	1.74	1.18	4.19	2.44	2.13	3.20	1.08	0.93	1.78	13.43	3.01	0.85	1.70	0.47

3 灰关联模型建立

灰色系统理论针对信息不完全系统即“灰色

系统”，提出了一种研究少数据、贫信息不确定问题的新方法^[8-10]，具有建模所需信息少，建模精度较高等特点^[11]。由于内湖水动力条件、悬沙浓

度及水质浓度等因子在潮流与径流双重作用下复杂多变,且受气象条件、太阳辐射等不确定因素影响,内湖透明度变化规律具有典型“灰性”,故文中采用灰色系统理论对透明度与相关环境因子的关联度进行研究。

3.1 灰关联分析原理

灰关联空间是距离空间与点集拓扑空间的结合,是有参考系有测度的整体比较^[8]。灰关联分析模型不是函数模型,而是序关系模型,其基本思路是在不完全信息中,对所分析研究的各因素通过一定的数据处理,在随机素序列间,找出它们的关联性,发现主要矛盾,找到主要特性和主要影响因素^[12]。

3.2 透明度与影响因子的关联体系

内湖水体透明度受诸多因子综合影响,其与各因子之间均存在一定的相互关联。定义内湖透明度为 Y , 相应的 m 个影响因子记为 X_i , 则 X_i 与 Y 的关联体系可表示为^[13]

$$Y = f\{X_1, X_2 \cdots X_m; \theta(\oplus), T, S\}$$

式中, f 是集合 $\{X_1, X_2 \cdots X_m\}$ 相对于 Y 的关联测度函数; $\theta(\oplus)$ 称灰量, 表示该关联体系中不确定信息或不完整的缺省部分, 如各项影响因子的时空差异性与不连续性等; $S = (x, y, z)$ 为空间坐标量, 可表示内湖不同空间点位; T 为时间坐标量。

3.3 灰关联模型

定义 X 为灰关联因子集, $\Delta_{oi}(k)$ 为 X 上第 k 点 x_i 对于 x_0 的差异信息, Δ_{GR} 为灰关联差异信息空间, Γ 为灰关联映射集, 则可称为 (X, Γ) 灰关联空间因子态, (Δ_{GR}, Γ) 为灰关联空间差异信息态。令

$\Delta_{GR} = \{\Delta, \xi, \Delta_{oi}(\max), \Delta_{oi}(\min)\}$, $\Delta = \{\Delta_{oi}(k) \mid i \in I, k \in K = (1, 2, \dots, n)\}$, 或 $\Delta = \{\Delta_{oi} \mid i \in I\}$, $\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$, 且 Γ 满足灰关联规范性、偶对对称性、整体性、接近性 4 个公理,

则 (Δ_{GR}, Γ) 下灰关联系数^[14-15]:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k + \xi \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)}{\Delta_{oi}(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)},$$

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|, \xi \in [0, 1];$$

$$\text{灰关联度 } \gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k))$$

4 透明度灰关联分析

基于野外实测数据,运用灰关联模型,计算洪、枯两季潮汐过程涨急、落急时刻内湖水体透明度与相关环境因子的灰关联度见表 3。结果表明:

(1) 洪季,内湖悬沙浓度与高锰酸盐指数是影响水体透明度的主要因子,其主要原因是来水含沙量较高,增加了内湖水体浊度,且水体中可溶性有机物对光线吸收较强;

(2) 枯季,来水含沙量降低,但水质恶化严重,藻类暴发,内湖透明度的主要影响因子为高锰酸盐指数与叶绿素 a 浓度;

(3) 洪枯两季, TN、NH₃-N 等间接因子与透明度的灰关联度均相对较小,说明其对水体透明度的直接影响作用不明显,但随着涨落潮作用,其作用效果仍呈现一定变化;

(4) 内湖透明度主要影响因子的排列顺序,在洪季或枯季某一时间尺度下基本不受潮汐作用影响。

表 3 内湖环境因子与水体透明度的灰关联度及排列顺序

Tab. 3 Results and orders of grey associated degree between the environmental factors and water transparency

分析时刻	影响因子	SS	COD _{Mn}	Chl-a	TN	TP	NH ₃ -N
洪季	灰关联度	0.905	0.892	0.773	0.862	0.794	0.843
涨急	排序	1	2	6	3	5	4
洪季	灰关联度	0.982	0.948	0.905	0.866	0.887	0.896
落急	排序	1	2	3	6	5	4
枯季	灰关联度	0.843	0.944	0.922	0.886	0.728	0.894
涨急	排序	5	1	2	4	6	3
枯季	灰关联度	0.883	0.932	0.900	0.867	0.690	0.882
落急	排序	3	1	2	5	6	4

综合以上分析,本文得到如下结论:

(1) 洪、枯两季影响内湖水体透明度的主导因子存在明显差异性;洪季,悬沙浓度与高锰酸盐

指数是影响透明度的关键因子;枯季,主要影响因子为高锰酸盐指数与叶绿素 a 浓度;

(2) 不同水季及不同潮汐阶段,内湖水体透

明度变化明显,但在同一时间尺度下,其主要影响因子的排列顺序基本不受潮汐作用影响。

参考文献:

- [1] 李一平. 太湖水体透明度影响因子实验及模型研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] SMITH R C, PREZELIN B B, BIDIGARE R R, et al. Bio-optical modeling of photosynthetic production in coastal waters [J]. *Limnol & Oceanogr*, 1989, 34(8): 1524 - 1544.
- [3] KIRK J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 2 - 13.
- [4] HALL D O, RAO K K. Photosynthesis [J]. *Studies in Biology*, 1977, 37: 1 - 37.
- [5] JONASZ M, PRANDKE H. Comparison of measured and computed light scattering in the Baltic [J]. *Tellus*, 1986, 38B: 144 - 157.
- [6] 张运林. 大型浅水湖泊水体生物——光学特性及其生态环境意义 [D]. 南京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [7] 杨顶田. 浅水湖泊水下光照对藻类生长及初级生产力的影响 [D]. 南京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [8] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 1 - 40.
- [9] DENG J L. Introduction to grey system theory [J]. *The Journal of Grey System*, 1989, 1(1): 1 - 24.
- [10] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(2): 267 - 270.
- [11] LU G B, ZHANG L, LIU Z B. Grey associated analysis of the underground water quality effected by the Leaching water of dumping area or hillock of coal mine [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2003, 9(2): 70 - 731.
- [12] 陈南祥, 杨莉, 邵玉冰. 灰色系统理论在区域干旱程度评价中的应用 [J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 26 - 29.
- [13] LIU S F, LIN Y. An introduction to grey systems theory [M]. Grove City: II GSS Academic Publisher, 1998: 1 - 23.
- [14] 李慧伶, 王修贵, 崔远来, 等. 灌区运行状况综合评价的方法研究 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 543 - 548.
- [15] 苏变萍, 曹艳平. 基于灰色系统理论的多元线性回归分析 [J]. *数学的实践与认识*, 2006, 36(8): 219 - 222.

Grey Relational Analysis on Water Transparency for Tide-influenced Lakes

WANG Hua¹, PANG Yong^{1,2}, CHEN Xiao-feng¹, ZHAO Wei¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

(2. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Under the impact of tide and runoff, the influencing factors on water transparency of waterfront tide-influenced lakes always change with a high frequency. The Inner Lake in Zhenjiang City was taken as an research area. Based on the field investigated data during two typical tidal cycles in flood season and dry season, the grey relational degrees between water transparency and certain environmental factors were quantificationally calculated with the grey system theory, and the key influencing factors in different periods were investigated. It was found that in flood season the concentration of suspended solids and COD_{Mn} were the key factors influencing water transparency; during and the dry season, COD_{Mn} and chl-a were the dominant factors due to the decreased suspended solids concentration. The sequences of key influencing factors in both flood season and dry season rarely changed with the tide-induced impact. Some indirect impact factors of transparency, e. g. NH_3-N , were not obvious but changeable to the tidal process to some extent.

Key words: tide; lake; water transparency; grey relational analysis; Inner Lake