

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221521

城市水体(宁波市姚江)透明度主要影响因素研究

耿 慧, 姜翠玲, 吴宸晖, 刘佳玥

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 城市水体对维持城市环境和发展具有至关重要的作用,为解决城市水体透明度较低的问题,采用对比求比值、Pearson相关性分析、曲线拟合计算等方法,分析了宁波市姚江太阳辐射、浊度、悬浮物浓度及颗粒物粒径对水体透明度的影响。结果表明,光照强弱及太阳高度角、方位角会影响透明度的监测,光线越强,透明度监测结果越大;透明度(SD)与浊度(TUB)、悬浮物浓度(SS)均存在极显著负相关关系,Pearson相关系数分别为-0.880、-0.570。经监测和计算,姚江的颗粒物中值粒径($d_{50\%}$)介于15.5~61.3 μm 之间,通过10 μm 孔径的过滤器进行处理,可使水体的浊度控制在9.7 NTU以内,悬浮物浓度控制在13.4 mg/L以内,此时姚江透明度可达到80 cm,是维持正常水生环境的最低要求。

关键词: 城市水体; 姚江; 透明度; 光照; 浊度; 悬浮物浓度; 颗粒物粒径

中图分类号: X832; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0059-05

1 概况

姚江是浙江省宁波市的母亲河,干流全长104.5 km,流域总面积2 940 km^2 ,集防洪、航运、灌溉、渔业、景观等功能于一体。受当地经济社会发展和人民生活起居影响,目前姚江水体浊度较高、透明度较低。水体透明度是评价水体质量和水生态状况的关键指标,直接影响水生植物的初级生产力及水体中营养盐的时空变换,在我国的城市水环境建设中被广泛重视^[1],其大小与气象状况、水面至观测者之间的距离、水体的理化性质、悬浮物含量和成分等关系密切。如SOMASUNDARAM D等^[2]评估斯里兰卡地区多个水库的透明度影响因子后,指出不同季风条件下透明度存在较大差异;余丽凡等^[3]研究上海景观水体透明度影响因子后发现,透明度与光学衰减系数呈显著负相关;张晓晶等^[4]研究乌梁素海透明度影响因子时,指出浊度是透明度主要影响因素,悬浮物是其直接影响因素;TESTA J M等^[5]分析切萨皮克湾河口区域透明度情况后,得出悬浮物与低盐度区域透明度密切相关,浮游生物量的影响在中盐和多盐区域更显著;胡思骅

等^[6]发现水体悬浮颗粒物的粒径分布对景观水体的表观指标有关键性的影响。已有对透明度影响因素的研究主要集中在湖库、海湾,而有关河流的研究偏少^[7]。为此,采用对比求比值、Pearson相关性分析、曲线拟合计算等方法,分析了城市河流——宁波市姚江透明度的变化规律及影响因素,获取透明度达标的条件。研究结果有利于推动姚江水环境建设,并为其他城市河道透明度的治理和改善提供参考。

2 研究方法

2.1 数据获取

积极响应宁波市“清水环通”和“城乡河网水系早日达到清澈见底”的目标行动计划,将试验区设置在引姚江水入海曙内河河网的引水口附近,位于宁波市江北区姚江南岸的开阔地段(29°54'39",121°32'34"E)。试验时间为2021年5月1日~7月21日,共82 d。期间每日记录天气情况,并计算太阳高度角和太阳方位角。太阳高度角越大,其辐射强度越大。太阳高度角计算公式为:

$$\sinh = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \quad (1)$$

收稿日期: 2022-07-24, **修回日期:** 2022-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171563)

作者简介: 耿慧(1998-),女,硕士研究生,研究方向为生态水利,E-mail:211301020007@hhu.edu.cn

通讯作者: 姜翠玲(1966-),女,教授、博导,研究方向为生态水利,E-mail:cljianghhu@163.com

式中, h 为太阳高度角; φ 为观测地地理纬度; δ 为太阳赤纬; ω 为时角。

太阳方位角即太阳所在的方位, 通常以目标物正北方向为零, 顺时针方向逐渐变大, 取值范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。以 φ_s 表示太阳方位角, 其计算公式为:

$$\cos \varphi_s = \frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \omega \cos \delta \sin \varphi}{\cosh} \quad (2)$$

由于式(2)为余弦函数, 方位角始终为正值, 需依据时角来修正。上午时角为负值, 方位角小于 180° ; 下午时角为正值, 方位角大于 180° 。

试验期间, 除去天气恶劣、设备维修等因素导致监测无法进行外, 其余时间每日上午 10:00 和下午 15:00 定时测定水体透明度(SD)、浊度(TUB)各一次, 每日上午 10:00 或下午 15:00 定时测定悬浮物浓度(SS)一次, 试验初期、中期、后期三次取样分析水中颗粒物粒径。SD 采用塞氏盘(SD20)现场测定, TUB 采用便携式手持浊度仪(SGZ-200BS)现场测定, SS 采用重量法于实验室内测定, 粒径分析借助马尔文激光粒度分析仪(MS2000)于实验室内测定。

为使所测数据产生足够梯度, 增加结果准确性, 试验在监测姚江原水的基础上, 采用 $10 \mu\text{m}$ 孔径的过滤设备对其进行处理, 并将处理后的水体排入试验池, 监测透明度。试验池(图 1)呈哑铃结构布置, 较宽处净宽 1.0 m, 较窄处净宽 0.6 m, 净长度 3.5 m, 池深 2.0 m, 池底浇筑砼垫层, 垫层以上砌筑厚砖墙, 砖墙内外侧采用防水砂浆抹面。

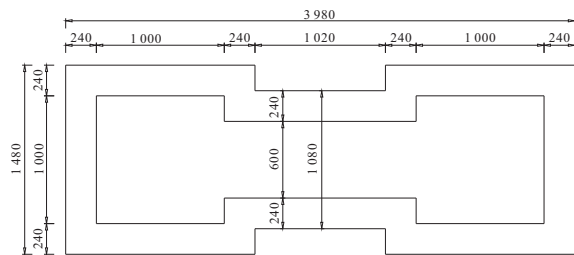


图 1 试验池平面图(单位:m)

Fig. 1 Plane of test pool

2.2 数据分析

采用 SPSS 27.0 软件分别对透明度与浊度、悬浮物浓度之间的关系进行 Pearson 相关性分析^[8]。Pearson 相关系数 r 描述了两个变量间联系的紧密程度, 用两个变量之间的协方差和标准差的商来表示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中, \bar{X} 、 \bar{Y} 为样本平均值。

r 的取值介于 -1 和 $+1$ 之间, 若 $r > 0$, 说明两个变量是正相关的, 反之, 呈负相关。 r 的绝对值越大, 相关性越强; r 越接近于 0, 相关性越弱。

3 结果与分析

3.1 光照对透明度的影响

水体透明度与太阳光照存在显著关系, 透明度深度上的光强近似等于水面光强的 20×10^{-2} ^[9], 太阳光在水中的传播随深度的增加呈指数衰减。由于试验池受太阳高度角和太阳方位角影响, 从左至右(即从南向北)光线逐渐由暗变亮, 形成遮阴、部分遮阴和非遮阴三种情况。基于不同的光照强度, 试验从池子的左、中、右三个位置分别监测透明度, 研究光照对透明度的影响。

将晴天时试验池中左、中、右位置透明度的监测结果绘制于图 2。由图 2 可看出, 随着光线由暗变亮, 透明度监测值也逐渐变大。晴天时, 右侧(非遮阴)透明度 $>$ 中间(部分遮阴)透明度 $>$ 左侧(遮阴)透明度, 其中右侧透明度均值与中间透明度均值的比值为 1.020, 中间透明度均值与左侧透明度均值的比值为 1.028, 右侧透明度均值与左侧透明度均值的比值为 1.045。

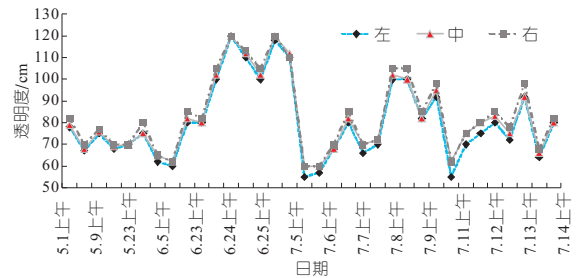


图 2 左侧、中间、右侧透明度大小对比

Fig. 2 Comparison of left, middle and right transparency

为进一步分析试验池右侧与左侧透明度的差异, 研究晴天、阴雨天光强对水体透明度实测值的影响。图 3(a)~(d) 分别绘制了 5 月 1 日~7 月 21 日期间, 晴天、阴雨天上午 10:00 和下午 15:00 太阳高度角、太阳方位角及右侧透明度与左侧透明度比值的变化趋势。为了便于对比分析, 此处太阳方位角取值为入射方向与正南方向偏差角度的绝对值。

由图 3 可看出, 晴天时, 上午 10:00 的太阳高度角均值为 61.8° , 太阳方位角均值为 99.7° (即与正南方向偏差 80.3°), 试验池中右侧透明度与左侧透明度比值的均值为 1.052; 下午 15:00 的太阳高度角均值为 48.9° , 太阳方位角均值为

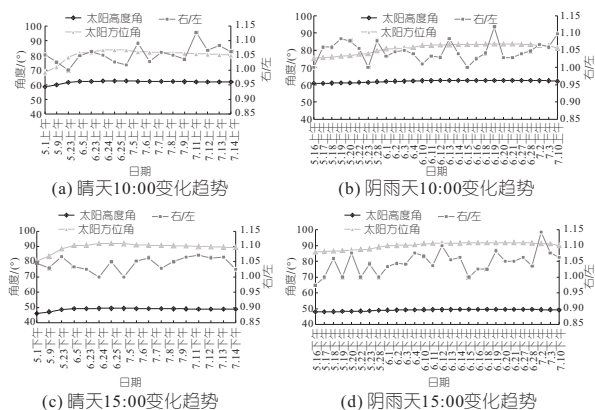


图 3 太阳高度角、方位角及右侧透明度与左侧透明度比值变化趋势

Fig. 3 Trends in solar elevation angle, azimuth angle and ratio of right to left transparency

269.4°(即与正南方向偏差 89.4°), 试验池中右侧透明度与左侧透明度比值的均值为 1.043。阴雨天时,上午 10:00 的太阳高度角均值为 62.0°, 太阳方位角均值为 98.9°(即与正南方向偏差 81.1°), 试验池中右侧透明度与左侧透明度比值的均值为 1.042; 下午 15:00 的太阳高度角均值为 49.1°, 太阳方位角均值为 270.1°(即与正南方向偏差 90.1°), 试验池中右侧透明度与左侧透明度比值的均值为 1.040。

由此可见,晴天时右侧透明度与左侧透明度的比值大于阴雨天,这是因为晴天时光照强度大,导致遮阴处与非遮阴处的光线差别较大,从而二者透明度差别较大。同时比较发现,上午 10:00 的太阳高度角大于下午 15:00 的太阳高度角,所以上午 10:00 时非遮阴处的光强更大,右侧透明度与左侧透明度的比值更大,这与两侧透明度比值的计算结果一致。

3.2 浊度、悬浮物对透明度的影响

3.2.1 浊度对透明度的影响

浊度反映了水中泥沙、有机物、无机物、微生物等物质对光线透过的阻碍程度,能很好地指示水环境变化,同时能较为客观地表征水中的物质对水生生态系统的影响^[10]。

在试验过程中分别采集了 280 份水体浊度和透明度的有效数据,采用 Pearson 相关性分析法探求二者间的关系(表 1)。监测时段内,姚江浊度的变化范围为 2.0~40.8 NTU,均值为 15.1 NTU;透明度的变化范围为 27~169 cm,均值为 71 cm。由表 1 可知,透明度与浊度存在极显著负相关关系,相关系数为 -0.880($P < 0.01$)。

透明度与浊度回归拟合见图 4。由图 4 可看出,作为衡量水质的重要指标,透明度会影响水下

表 1 透明度与浊度 Pearson 相关性分析结果

Tab. 1 Pearson correlation analysis results of transparency and turbidity

项目	样本量	相关系数	显著性	平均数	标准偏差
浊度/NTU	280	-0.880	0.000	15.1	7.1
透明度/cm				71	27

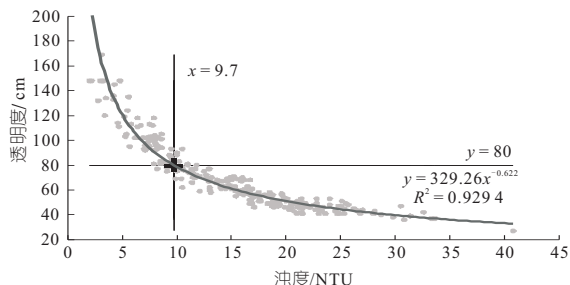


图 4 透明度与浊度回归拟合

Fig. 4 Regression fitting of transparency and turbidity

光强,从而对沉水植物的生长产生影响。姚江属平原河道,监测河段水深 2.5 m 左右。根据任久长等^[11,12]的研究结果,当水深为 2.5 m 时,恢复稀疏沉水植物种群、呈现良好的景观效果并维持健康的水生环境所需达到的水体透明度应大于 80 cm,根据图 4 和拟合公式,应将水体浊度控制在 9.7 NTU 以内。然而试验监测结果显示,自然状态下姚江的浊度多高于 9.7 NTU,故需采取相应净化措施,降低浊度,提高透明度。

3.2.2 悬浮物对透明度的影响

当颗粒物粒径小于 1 μm 时,浊度监测精度较高,反之,当粒径大于 1 μm 时,浊度监测精度较低^[13]。为提高监测准确性,在浊度监测基础上进行悬浮物监测。

继续运用 Pearson 相关性分析法探求透明度与悬浮物浓度间的相关关系,研究共采集了 135 份有效水样测定悬浮物浓度和透明度(表 2),其中悬浮物浓度的变化范围为 4.0~50.0 mg/L,均值为 19.1 mg/L;透明度的变化范围为 27~169 cm,均值为 72 cm。由表 2 可知,透明度与悬浮物浓度存在极显著负相关关系,相关系数为 -0.570 ($P < 0.01$)。

表 2 透明度与悬浮物浓度 Pearson 相关性分析结果

Tab. 2 Pearson correlation analysis results of transparency and suspended solids concentration

项目	样本量	相关系数	显著性	平均数	标准偏差
悬浮物浓度	135	-0.570	0.000	19.1	9.2
透明度/cm				72	28

注:悬浮物浓度单位为 mg/L。

透明度与悬浮物浓度回归拟合见图 5。根据图 5 和拟合公式,计算得到当姚江透明度大于 80 cm 时,其水体悬浮物浓度应小于 13.4 mg/L。

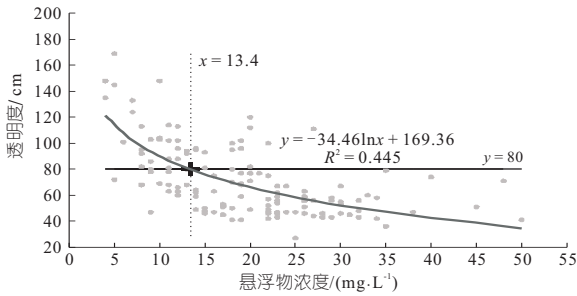


图 5 透明度与悬浮物浓度回归拟合

Fig. 5 Regression fitting of transparency and suspended solids concentration

大量研究表明^[14,15],悬浮颗粒物是导致水体透明度偏低的最主要原因,其中关于颗粒物粒径分布对水体透明度的影响机制尚缺乏研究。为进一步分析颗粒大小对水体透明度的影响,在试验初期(水样 1)、中期(水样 2)、后期(水样 3)三次采样分析水中悬浮颗粒物的粒径,分析结果见表 3。由表 3 可看出,水样 1 中颗粒物的平均粒径为 34.52 μm,中值粒径($d_{50\%}$)为 15.53 μm;水样 2 中颗粒物的平均粒径为 38.04 μm,中值粒径($d_{50\%}$)为 25.70 μm;水样 3 中颗粒物的平均粒径为 401.20 μm,中值粒径($d_{50\%}$)为 61.34 μm。

表 3 姚江悬浮物粒径分析结果

Tab. 3 Analysis results of particle size of suspended solids in Yaojiang River

样品 编号	平均 粒径	粒径				
		$d_{10\%}$	$d_{20\%}$	$d_{50\%}$	$d_{80\%}$	$d_{100\%}$
1	34.52	4.82	7.02	15.53	65.27	211.75
2	38.04	8.75	13.12	25.70	50.52	440.14
3	401.20	5.47	11.42	61.34	962.26	2 000.00

注: $d_{a\%}$ 为粒度累积分布(0~100%)中 $a\%$ 所对应的直径, a 取值 0~100。

将水样 1、2、3 中悬浮物粒径大小(d)与不超过当前粒径的悬浮物占比($y\%$)进行拟合,得到曲线分别为 $y\% = 0.036 8d - 0.068 7 (R^2 = 0.998)$ 、 $y\% = 0.023 6d - 0.108 4 (R^2 = 0.999)$ 、 $y\% = 0.167 7 \ln d - 0.194 6 (R^2 = 0.997)$ 。利用拟合曲线,计算得到水样 1、2、3 中超过 10 μm 的悬浮物占比分别为 70%、87%、81%。由此可见,三份水样中绝大部分颗粒物粒径均超过 10 μm。试验采用 10 μm 孔径的过滤器对姚江原水进行过滤处理,去除大部分悬浮物质,提升水体透明度。处理前后水体的悬浮物浓度、浊度、透明度见表 4。

由表 4 可看出,采用 10 μm 孔径过滤器过滤后,水样 1 中的悬浮物浓度降为 7 mg/L,浊度降为 7.0 NTU,透明度升为 76 cm;水样 2 中的悬浮物浓度降为 7 mg/L,浊度降为 4.2 NTU,透明度升为 133 cm;水样 3 中的悬浮物浓度降为 12

表 4 过滤前后水体 SS 浓度、浊度、透明度测定结果
Tab. 4 Measurement results of SS concentration, turbidity and transparency in water before and after filtration

样品 编号	原水 SS 浓度	滤后 SS 浓度	原水浊 度/NTU	滤后浊 度/NTU	原水透明 度/cm	滤后透 明度/cm
1	16	7	14.0	7.0	62	76
2	20	7	20.0	4.2	54	133
3	19	12	19.8	6.4	56	111

注:原水 SS 浓度、滤后 SS 浓度单位均为 mg/L。

mg/L,浊度降为 6.4 NTU,透明度升为 111 cm。因此,通过过滤处理,姚江水体透明度基本可达标。

4 结论

a. 光照强度会影响水体透明度的监测。同一时间测定同一水体透明度,非遮阴处测定结果大于遮阴处,二者比值约为 1.048,其中晴天时的比值大于阴雨天;上午 10:00 非遮阴处与遮阴处透明度的比值较下午 15:00 更大,这与太阳高度角的大小有关。

b. Pearson 相关性分析结果表明,透明度与浊度、悬浮物浓度之间均存在极显著负相关关系,相关系数分别为 -0.880、-0.570。为使姚江维持健康的水生环境,其透明度需达到 80 cm 以上,对应的浊度应控制在 9.7 NTU 以内,悬浮物浓度应控制在 13.4 mg/L 以内。

c. 悬浮颗粒物粒径的大小影响透明度改善的方式和结果。试验过程中采用 10 μm 孔径的过滤器可去除姚江中大部分悬浮颗粒物,使得水体透明度基本达标,但水生态的保护与修复是一项长期而艰巨的任务,未来需从深度和广度上进一步研究。

参考文献:

- [1] HORPPILA J, KAITARANTA J, NURMINEN L. Application of a littoral Baltic sea resuspension model in a eutrophic lake-factors behind differences in the model performance[J]. International journal of sediment research, 2015, 30(2):100-106.
- [2] SOMASUNDARAM D, ZHANG F, EDIRIWEERA S, et al. Patterns, trends and drivers of water transparency in Sri Lanka using landsat 8 observations and Google Earth engine[J]. Remote sensing, 2021, 13(11):2193.
- [3] 余丽凡, 施渺筱, 达良俊, 等. 上海公园绿地景观水体透明度影响因子研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(4):112-119.
- [4] 张晓晶, 李畅游, 贾克力, 等. 乌梁素海水体透明度分布及影响因子相关分析[J]. 湖泊科学, 2009, 21(6):879-884.
- [5] TESTA J M, LYUBCHICH V, ZHANG Q. Patterns and trends in Secchi Disk depth over three decades in the Chesapeake Bay estuarine complex

