

淮河流域周村水库夏季 CDOM 吸收光谱特征、空间分布及其来源分析*

方开凯, 黄廷林**, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘 飞, 夏 超

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘 要: 基于 2015 年 8 月采集的 24 个淮河流域以周村水源水库为代表的表层水样的有色溶解性有机物 (CDOM) 吸收系数数据, 研究了 CDOM 吸收光谱的空间分布特征, 考察了 CDOM 的吸收系数与水质参数的相关关系, 同时探讨了周村水库夏季 CDOM 的潜在来源. 结果显示: 依据 CDOM 的吸收光谱空间分布特性及采样点分布特征, 周村水库分为入库口、过渡区和主库区 3 个特征水域; CDOM 的吸收系数沿入库口到主库区依次递减, S 值呈现相反的趋势; 分析发现 $S_{240-500}$ 与 $a(355)$ 和 $a^*(355)$ 呈极显著负相关 ($R^2=0.98, 0.88$); CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与溶解性有机碳 (DOC) 浓度具有良好的线性相关, 有利于建立 DOC 遥感反演模型; 同时, CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与 $a_{ph}(440)$ 存在极显著正线性相关, 表明浮游植物的新陈代谢及其降解产物是夏季周村水库 CDOM 的潜在来源. 综上, 通过对夏季周村水库水体 CDOM 的研究, 丰富了关于水源水体 CDOM 的调查资料, 可为日后水库的管理提供技术支撑.

关键词: 有色可溶性有机物; 周村水库; 吸收系数; 光谱斜率; 遥感反演; 淮河流域

Summer absorption characteristics, spatial distribution and source analysis of CDOM in Zhoucun Reservoir in Huaihe Catchment

FANG Kaikai, HUANG Tinglin**, ZHANG Chunhua, ZHOU Shilei, ZENG Mingzheng, LIU Fei & XIA Chao
(*School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P.R. China*)

Abstract: Based on the data of the absorption coefficient of colored dissolved organic matter (CDOM) from 24 surface water samples collected from Zhoucun Reservoir in Huaihe Catchment, we analyzed the spatial distribution characteristics of CDOM absorption coefficient, investigated the correlation between CDOM absorption coefficient and environmental parameters, and explored the possible source of CDOM in the reservoir. The samples collected from the reservoir were categorized into three different groups (storage port, transition region and main reservoir area), the absorption coefficients ($a(355)$ and $a^*(355)$) had a decrease process from the storage port to main reservoir area, while the S value exhibited an increased trend. Meanwhile, significantly negative correlations of the value of $S_{240-500}$ were found with $a(355)$ and $a^*(355)$, respectively, which may have implications for the remote sensing estimation of CDOM in this study. A significantly negative correlation between $a(355)$ and dissolved organic carbon (DOC) concentration was conducive to the establishment of DOC remote sensing inversion model, and relationships between $a(355)$ and $a_{ph}(440)$ implied the potential contribution of phytoplankton metabolism and degradation products to the CDOM pool in the Zhoucun Reservoir. These results on the CDOM analysis made a significant contribution to the management of the Reservoir in the future.

Keywords: Colored dissolved organic matter; Zhoucun Reservoir; absorption coefficient; spectral slope; remote sensing inversion; Huaihe Catchment

溶解性有机质 (DOM) 广泛存在于各个水域中, 能显著影响水体生物的地球化学循环^[1] 和碳循环^[2], 而

* 国家自然科学基金项目 (51478378) 和国家科技支撑计划项目 (2012BAC04B02) 联合资助. 2016-02-15 收稿; 2016-04-05 收修改稿. 方开凯 (1991~), 男, 硕士研究生; E-mail: fangkaikai@163.com.

** 通信作者; E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn.

关于 DOM 特性的分析通常通过对溶解性有机碳(DOC)或有色可溶性有机物(CDOM)的特征解析来完成,其中 CDOM 也称黄色物质,其组成成分复杂,主要有腐殖酸、富里酸、棕黄酸和芳烃聚合物等,来源于陆源物质和浮游植物降解。CDOM 对光的衰减作用主要表现为吸收,它的光谱吸收特性与 DOC 浓度密切相关,通过对 CDOM 吸收及荧光特性的测定,有助于了解 CDOM 的来源及水生生态系统中碳循环的过程,在水环境及水生生态系统中具有重要的地位。近年来,国内外研究者对 CDOM 吸收光谱特征以及组成来源等进行了大量研究,但主要集中于富营养型湖泊^[3-4]、河口^[5]以及海洋^[6]等水域。然而目前关于我国亚热带流域 CDOM 的报道尚不多见,针对亚热带中度富营养水平的清洁饮用水源型水库水体的研究更鲜有报道。张运林等^[7]研究了云南高原湖泊 CDOM 的吸收特性,发现不同湖泊水体 CDOM 含量变化显著;苏文等^[8]对比不同纬度水域 CDOM 含量得出,处于中温带的石头门水库 CDOM 含量高于位于亚热带的潘阳湖;段洪涛等^[9]通过研究太湖沿岸不同水域的 CDOM 吸收光谱发现水体中腐殖酸和灰黄酸来源的复杂性。

周村水库位于山东省枣庄市市中区淮河流域运河水系西伽河上游,水库控制流域面积 121 km²,总库容 8404×10⁴ m³,水面面积 8.54 km²,水库建成于 1960 年,是枣庄市主要的城市供水水源地。周村水库处于中纬度亚热带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。由于 1990s 开始在库区大规模养鱼,大量的剩余饵料以及鱼类排泄物造成水库水质严重污染,因此城市供水一度中断。近年来由于网箱养殖的全面禁止以及相应保护措施的实施,水质得到改善,重新恢复供水。然而目前关于周村水库的研究主要集中于水质演变与沉积物的污染释放^[10-11],针对周村水库 CDOM 的研究却还未见报道。根据本课题组前期周村水库水质监测结果^[12]并结合综合营养指数法(TSI)得出周村水库水质目前处于中度富营养化水平(TSI(Σ)=69.87)。本次研究主要根据夏季水库 CDOM 吸收系数的空间分布特征和光学参数,探讨了 CDOM 吸收系数与 DOC、总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)等水质指标之间的相关关系,丰富了亚热带水源水体 CDOM 的调查资料,以期为日后研究水源水库 CDOM 特征提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间和采样点

于 2015 年 8 月中旬,在周村水库用 GPS 定位系统对研究区采样点精确定位,共设置 24 个采样点,涵盖了周村水库各个支流及库区全部水域(图 1)。

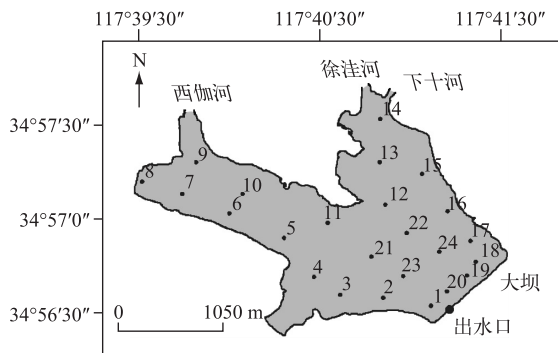


图 1 周村水库采样点位置

Fig.1 Sampling sites of Zhoucun Reservoir

1.2 样品采集与参数测定

采样过程中利用 3 L 有机玻璃采样器采集表层(0~50 cm)水样。水样采集后放入 500 ml 聚乙烯瓶中,暗处冷藏带回实验室,4 d 内完成全部指标测试。TN 和 DTN 浓度的测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[13]。DOC 和 TOC 浓度的测定使用 TOC 分析仪(ET1020A)。

CDOM 吸收系数的测定:水样用 Whatman GF/F 膜(0.22 μm)过滤,避免水体中悬浮物的影响。采用 DR6000 紫外分光光度计测定 200~800 nm 处的吸光度 OD(λ)。采用如下公式计算和校正 CDOM 的吸收系数^[14]:

$$a'(\lambda) = 2.303OD(\lambda)/r \quad (1)$$

$$a(\lambda) = a'(\lambda) - a'(700) \cdot \lambda/700 \quad (2)$$

式中, $a'(\lambda)$ 和 $a(\lambda)$ 分别为未经散射校正的波长为 λ 处的吸收系数和经过散射校正过后的波长为 λ 处的吸收系数(m^{-1}); λ 为波长(nm); r 为光程路径(m)。

由于 CDOM 成分复杂,无法确定其浓度值,一般采用波长 280^[15]、350^[16]、355^[17]或者 375 nm^[18]等处的 CDOM 吸收系数来表征 CDOM 浓度,本文分别将 $a(280)$ 、 $a(350)$ 、 $a(355)$ 以及 $a(375)$ 与 DOC 浓度进行线性拟合,相关系数(R^2)分别为 0.47、0.43、0.59 和 0.43($P < 0.01$),其中 $a(355)$ 与 DOC 浓度的 R^2 值最大,因此

本文更适合采用 355 nm 处的吸光系数表征 DOM 浓度。

吸收光谱斜率 S 值的确定:CDOM 吸收光谱从紫外到可见波长随波长的增加大致呈现指数衰减规律,一般用如下公式进行表示^[19]:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (3)$$

式中, λ_0 为参照波长(nm),一般选取 440 nm; S 为指数函数曲线光谱斜率(μm^{-1}),本文采用最小二乘法对 240~500 nm 之间波段进行非线性拟合,得到不同 S 值。

CDOM 的光谱特征是由 DOM 的组分和浓度共同决定的,通过如下公式^[16,20]将 CDOM 吸收系数标准化,可表征单位 DOC 浓度的 CDOM 对光的吸收能力:

$$a^*(\lambda) = a(\lambda) / [\text{DOC}] \quad (4)$$

式中, $a^*(\lambda)$ 和 $a(\lambda)$ 分别为波长在 λ 处的 CDOM 比吸收系数和吸收系数,单位分别为 $\text{L}/(\text{mg C} \cdot \text{m})$ 和 m^{-1} 。

分子量参数 M 值的确定:根据如下公式得到 M 值,可以估算 CDOM 分子量的大小, M 值与分子量大小呈反比, M 值越大,对应的分子量越小。CDOM 分子量的大小能反映腐殖酸与富里酸在 CDOM 中的比例,一般腐殖酸平均分子量较大,富里酸则相对较小,因此 CDOM 分子量越大,腐殖酸所占比例越高^[21]。

$$M = a_{250} / a_{365} \quad (5)$$

1.3 分析与统计

采用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析,包括方差分析、样本平均值和标准差等, $P < 0.01$ 为相关性极显著; $0.01 < P < 0.05$ 为相关性显著; $P > 0.05$ 为相关性不显著。利用 Origin 8.0 软件进行相关分析作图。使用 ArcGIS 10.1 软件作 $a(355)$ 、DOC 等指标空间分布的等值线图。

2 结果与讨论

2.1 CDOM 光谱吸收特征及空间分布

夏季周村水库各采样点的 CDOM 吸收光谱形状呈高度一致性,从紫外光谱到可见光谱呈现指数增长的趋势(图 2)。为了更好地分析周村水库不同流域 CDOM 的空间变化规律,本文根据 24 个采样点在水库分布位置的特征及 $a(355)$ 的大小将其分为 3 类,其中 8[#]、9[#]、13[#] 和 14[#] 为一类, $a(355)$ 值接近 5 m^{-1} , 位于入库区,水深只有 1~2 m,简称 A 类区;6[#]、7[#]、10[#]、12[#] 和 15[#] 为一类,其 $a(355)$ 值在 4 m^{-1} 左右,位于过渡区,水深达到 2~5 m,称为 B 类区;其余采样点归为一类, $a(355)$ 值约为 2.5 m^{-1} ,位于主库区,水深达 5~11 m,为 C 类区。

周村水库的 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 平均值为 $3.94 \pm 0.32 \text{ m}^{-1}$,变化范围为 $2.99 \sim 4.83 \text{ m}^{-1}$,远高于洱海(1.67 m^{-1})和前屯水库(1.08 m^{-1})^[7],略低于太湖($4.51 \pm 0.36 \text{ m}^{-1}$)^[22]和石头口水库($5.567 \pm 4.106 \text{ m}^{-1}$)^[23],由此可见周村水库夏季 CDOM 浓度较高。

本文利用克里金插值法^[24]绘制了周村水库 CDOM 吸收系数的等值线图。周村水库的 CDOM 吸收系数存在显著的空间分布差异(图 3a),大致规律为 A 类区>B 类区>C 类区,A 类区为周村水库的上游入库口,入库径流的输入携带了部分 CDOM,使入库口水域的 CDOM 含量相对较高,而且相对应的 DTN 和 DOC 浓度也高于其余水域(图 3b 和图 3c),最大值出现在 9[#],表明该上游水域的 CDOM 含量最高;C 类区为周村水库的主库区,最小值出现在 22[#]和 23[#],DTN 和 DOC 浓度也相对较低;B 类区 CDOM 含量介于两者之间,为过渡区。

本文用 $a^*(\lambda)$ 来表征 CDOM 对光的吸收能力,而 $a^*(\lambda)$ 随水体的不同而变化。周村水库夏季 $a^*(355)$

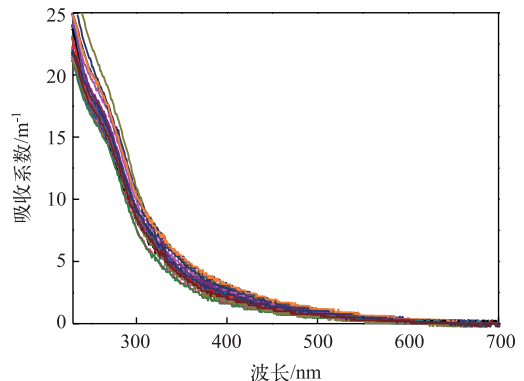


图 2 夏季周村水库 CDOM 的光谱吸收系数

Fig.2 Absorption coefficients of CDOM in summer in Zhoucun Reservoir

平均值为 $1.56 \pm 0.18 \text{ m}^{-1}$. 对比 $a^*(355)$ 与 $a(355)$ 的等值线图可以发现其空间分布相似, 因此对两者进行线性回归, 发现 $a^*(355)$ 与 $a(355)$ 存在显著的正线性相关 (图 4), 通过单因素方差分析 (ANOVA) 发现 3 类水域中 $a^*(355)$ 存在显著差异 ($P < 0.01$) (表 1), 并且 A 类区 > B 类区 > C 类区, 说明夏季周村水库各水域的 CDOM 来源存在显著差异.

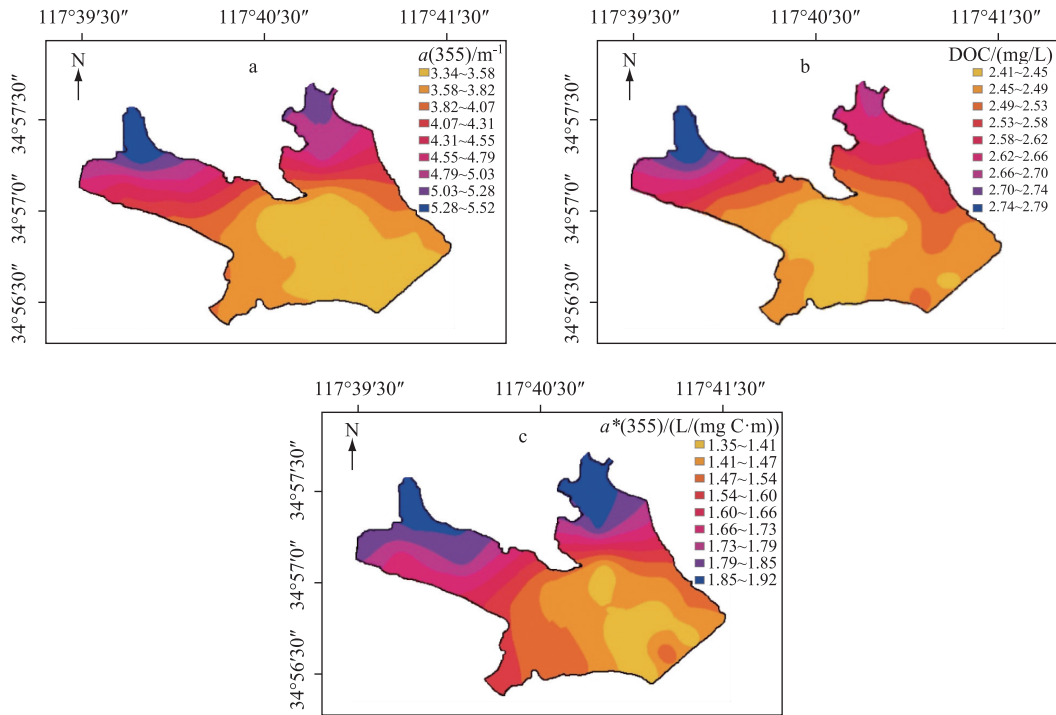


图 3 夏季周村水库 $a(355)$ 、DOC 浓度和 $a^*(355)$ 的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of $a(355)$, DOC concentration and $a^*(355)$ in summer in Zhoucun Reservoir

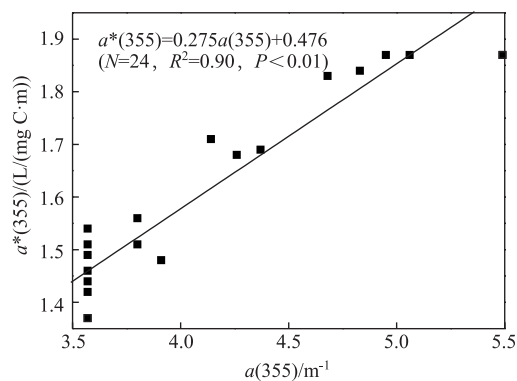


图 4 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与比吸收系数 $a^*(355)$ 的线性回归

Fig.4 Liner regression between $a(355)$ and $a^*(355)$

2.2 指数函数光谱斜率 S 值的确定

结合 Warnock^[25]、施坤等^[26]对 CDOM 吸收光谱曲线的研究发现, 在 275~295 nm 附近有一个显著的吸收肩, 为了更好地对 CDOM 吸收光谱参数化, 本文将波段分为 4 个范围: 240~500、320~500、280~320 以及

表 1 周村水库 CDOM 光学参数与水质参数
Tab.1 Optical parameters and quality parameters in Zhoucun Reservoir

| 水域 | $a^*(355)/$ ($L/(mg\ C \cdot m)$) | $a(355)/$ m^{-1} | TOC/ (mg/L) | DOC/ (mg/L) | $S_{240-500}/$ μm^{-1} | DTN/ (mg/L) | TN/ (mg/L) |
|------|--|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| A 类区 | $1.86 \pm 0.01^*$ | 5.08 ± 0.29 | 3.84 ± 0.67 | 2.73 ± 0.14 | 12.02 ± 0.38 | 0.32 ± 0.11 | 1.13 ± 0.55 |
| B 类区 | $1.68 \pm 0.13^*$ | 4.27 ± 0.29 | 2.90 ± 0.32 | 2.55 ± 0.08 | 13.18 ± 0.30 | 0.34 ± 0.12 | 0.66 ± 0.26 |
| C 类区 | $1.44 \pm 0.07^*$ | 3.53 ± 0.15 | 2.81 ± 0.43 | 2.45 ± 0.09 | 14.12 ± 0.21 | 0.24 ± 0.11 | 0.49 ± 0.17 |
| 全库 | 1.56 ± 0.18 | 3.94 ± 0.32 | 3.00 ± 0.58 | 2.52 ± 0.14 | 13.58 ± 0.84 | 0.28 ± 0.12 | 0.63 ± 0.35 |

* 表示 $P < 0.01$, 存在极显著差异.

240~280 nm, 分别拟合了周村水库 CDOM 吸收光谱斜率 S 值(图 5). 24 个采样点 4 个波段的 S 值 $S_{240-500}$ 、 $S_{320-500}$ 、 $S_{280-320}$ 和 $S_{240-280}$ 分别为 13.57 ± 0.84 、 11.43 ± 1.31 、 18.08 ± 1.38 和 $9.23 \pm 0.52 \mu m^{-1}$. 从均值来看, $S_{280-320}$ 是 $S_{320-500}$ 的 1.58 倍, 表明短波波段 S 值要高于长波段. $S_{240-500}$ 值空间分布与 CDOM 吸收系数 $a(355)$ (图 3a) 呈现相反的趋势(图 6), 说明不同类型水域 $S_{240-500}$ 值的空间分布存在显著差异. 并且, C 类区 > B 类区 > A 类区, 最大值出现在 22#, 最小值在 9# 采样点, 与 $a(355)$ 呈现相反的趋势. S 值的区域性差异说明研究区域 CDOM 组成及来源存在差异^[27]. 根据 Helms 等^[28] 提出的指标 S_R ($S_{275-295}/S_{350-400}$) 对 CDOM 分子影响因子进行影响程度划分, 认为 $S_R < 1$ 为非陆源, $S_R > 1$ 为陆源. 该水库 $S_{275-295}$ 和 $S_{350-400}$ 分别为 18.27 ± 1.28 和 $11.64 \pm 1.40 \mu m^{-1}$, 因此 S_R 均值为 1.58, 变化范围为 1.42~1.69, 大于 1, 呈陆源特征. 此外, Carder 等^[29] 研究认为 CDOM 物质构成中腐殖酸和富里酸的相对比例会影响 S 值大小, 腐殖酸比例越高、富里酸比例越低, 则 CDOM 分子量越大, S 值越小. A 类区为周村水库的上游入库口, 其水体携带了部分有机成分, 腐殖酸比例偏大 (M 值为 5.63 ± 0.42), 从而导致 S 值偏低, 而主库区向城市管网正常供水导致水体所含的腐殖酸较少 (M 值为 4.80 ± 0.44), 从而得到较高的 S 值.

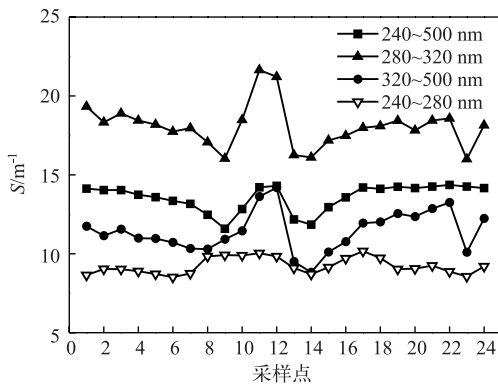


图 5 周村水库不同拟合波段的 S 值
Fig.5 S values derived from different fitting bands ranged in Zhoucun Reservoir

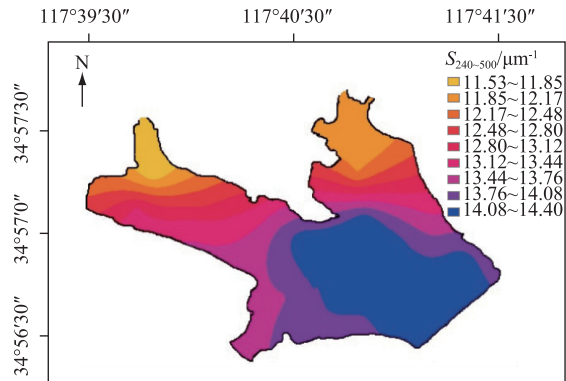


图 6 周村水库 $S_{240-500}$ 值的空间分布
Fig.6 Spatial distribution of $S_{240-500}$ value in Zhoucun Reservoir

张运林等^[22] 研究梅梁湾及太湖发现 CDOM 吸收系数与 S 值存在显著负相关 ($r = 0.51$); 王林等^[30] 研究黄海北部 CDOM 吸收系数同样得出此结论 ($r = 0.64 \sim 0.87$); Hancke 等^[31] 在研究巴伦支海时得到 CDOM 吸收系数与 S 值的反比例函数 [$S = 7.4 + 1.1/a(375)$]. 本文对不同波段得到的 S 值进行拟合, 得到 $a(355)$ 、 $a^*(355)$ 与不同波段的 S 值的回归方程, 斜率变化范围为 $-0.740 \sim 0.160$, 截距的变化范围为 $1.27 \sim 13.99$, CDOM 吸收系数 $a(355)$ 和比吸收系数 $a^*(355)$ 与 $S_{240-280}$ 均无相关性 ($r = 0, P > 0.05$), 与其他波段的 S 值呈现不同程度的相关性(表 2).

对比线性回归决定系数, $S_{240-500}$ 与 CDOM 吸收系数和比吸收系数的线性回归决定系数分别达到 0.98 和 0.88, 说明两者关系稳定, 对于今后应用 $S_{240-500}$ 代替 $a(355)$ 、 $a^*(355)$ 估算周村水库 CDOM 浓度有着重要意义. 如冯龙庆等^[32] 利用 455 nm 的遥感反射率为自变量, 以 $a(355)$ 为因变量建立了估测模型.

表 2 各波段 S 值与 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 和比吸收系数 $a^*(355)$ 的线性回归结果

Tab.2 Linear regressions between spectral slope (S) value and $a(355)$, $a^*(355)$

| 参数 | S 值拟合波段/nm | 回归方程 | R^2 | P |
|----------------|------------|---------------------------------------|-------|-------|
| $a(355)$ 与 S | 240~500 | $a(355) = -0.740S_{240-500} + 13.99$ | 0.98 | <0.01 |
| | 320~500 | $a(355) = -0.324S_{320-500} + 7.65$ | 0.43 | <0.01 |
| | 280~320 | $a(355) = -0.275S_{280-320} + 8.92$ | 0.33 | <0.01 |
| | 240~280 | $a(355) = 0.160S_{240-280} + 2.46$ | 0.00 | 0.54 |
| $a^*(355)$ 与 S | 240~500 | $a^*(355) = -0.204S_{240-500} + 4.33$ | 0.88 | <0.01 |
| | 320~500 | $a^*(355) = -0.091S_{320-500} + 2.61$ | 0.40 | <0.01 |
| | 280~320 | $a^*(355) = -0.071S_{280-320} + 2.85$ | 0.33 | <0.01 |
| | 240~280 | $a^*(355) = 0.032S_{240-280} + 1.27$ | 0.00 | 0.67 |

2.3 CDOM 来源及与各水质参数之间的关系

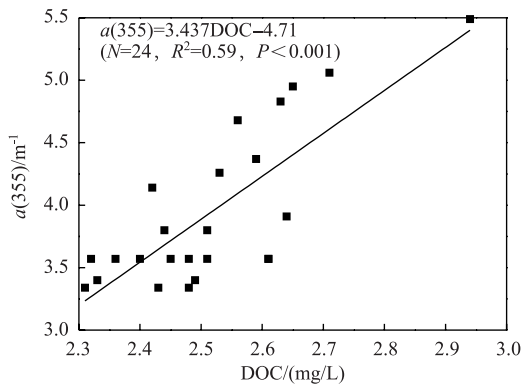


图 7 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与 DOC 浓度的线性回归

Fig.7 Linear regression between CDOM absorption coefficient and DOC concentration

Blough 等^[33] 对沿海环境中 DOM 的研究表明: CDOM 代表了 DOM 中能强烈吸收紫外辐射的光敏成分, 其吸收系数与 DOC 浓度呈显著正相关. 冯龙庆等^[32] 研究发现太湖 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度的相关值为 0.69; Vantrepotte 等^[34] 在法属圭亚那的研究发现其相关值为 0.78; Spencer 等^[35] 研究美国 30 条河流同样得出 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度存在显著正相关 ($r=0.0034\sim0.453$) 的结论. 对于周村水库而言, CDOM 吸收系数与 DOC、TOC、TN、DTN 浓度和 $a_{ph}(440)$ 均呈极显著线性正相关 (表 3). 其中 DOC 浓度与 CDOM 吸收系数的相关值为 0.59, 该结果与陈欣等^[36] 研究同处于亚热带的长江口得到的决定系数 ($r=0.59$) 一致. 本次研究获得的 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与 DOC 浓度的关系为 (图 7): $a(355) = 3.437 \text{ DOC} - 4.71 (R^2 = 0.59)$.

表 3 $a(355)$ 与水质参数的相关系数

Tab.3 Correlation coefficients between $a(355)$ and the water quality parameters

| 水域 | DOC | | TOC | | DTN | | TN | | $a_{ph}(440)$ | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|---------------|-------|
| | r | P | r | P | r | P | r | P | r | P |
| A 类区 | 0.01 | 0.310 | -0.35 | 0.685 | -0.40 | 0.744 | 0.71 | 0.101 | -0.11 | 0.487 |
| B 类区 | -0.33 | 0.903 | 0.47 | 0.124 | -0.15 | 0.543 | 0.42 | 0.142 | -0.04 | 0.420 |
| C 类区 | 0.98 | 0.008 | 0.12 | 0.111 | 0.06 | 0.195 | 0.07 | 0.169 | 0.31 | 0.019 |
| 全库 | 0.59 | <0.01 | 0.37 | <0.01 | 0.32 | <0.01 | 0.75 | <0.01 | 0.78 | <0.01 |

因此本文认为通过遥感探测夏季周村水库 CDOM 浓度反演 DOC 浓度也具有可行性. 但是 Rochelle-Newalle 等^[37] 认为 DOC 来源不同会影响 CDOM 的光谱特征, 通常认为由河流携带的陆源 DOC 含有更多的类腐殖酸 DOC, 而浮游植物新陈代谢及降解产生的 DOC 含更多的类氨基酸 DOC. 张运林等^[22] 对太湖夏、冬两季的 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度的相关性进行分析得出, 相比于冬季 ($r=0.74\sim0.80$), 夏季 CDOM 吸收

系数与 DOC 浓度相关性较弱($r=0.32\sim 0.42$),因此该反演关系的应用必须建立在 CDOM 在 DOC 中所占的比例恒定而且针对特定的区域和季节基础上. 本文以后通过增加与 CDOM 相关水质指标的研究(例如叶绿素等),同时对周村水库水体 DOC 的构成以及光谱特征时空变化特征进行研究,以探讨水库全部水域的 CDOM 和 DOC 浓度之间的相关关系,来丰富亚热带水源水库不同季节不同区域的相关特性资料,为以后研究打下基础,这样才能获得适合研究区域的稳定的 DOC 遥感反演模型.

通过分区域比较,主库区(C类区)的浮游植物吸收系数 $a_{ph}(440)$ 与 CDOM 吸收系数的相关值 r 为 0.31,显著大于入库口(A类区)和过渡区(B类区),说明主库区的 CDOM 不仅来自于陆源输入,水体浮游植物的新陈代谢和降解对其也具有重要的贡献,殷燕等^[16]研究表明夏季位于亚热带的新安江水库入库口(A类区)的 TN 浓度与 CDOM 吸收系数的相关性较大,而与 $a_{ph}(440)$ 呈负相关,表明该区域的 CDOM 主要来自上游陆源输入,本实验结论与其相似. 由此可见,研究区域 CDOM 光学属性对于 CDOM 来源分析有着重要的指示意义.

3 结论

1) 夏季周村水库 CDOM 的空间分布可划分为 3 类,其 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 呈现出 A 类区(入库口)> B 类区(过渡区)> C 类区(主库区)的规律. CDOM 比吸收系数 $a^*(355)$ 和 $a(355)$ 之间呈极显著正相关.

2) $S_{240-500}$ 与 CDOM 吸收系数的空间分布都存在显著差异. $S_{240-500}$ 与 $a^*(355)$ 和 $a(355)$ 之间的显著负相关对于日后在周村水库遥感反演 CDOM 浓度具有重要意义.

3) CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与 DOC 浓度呈现协同一致的变化趋势,但是鉴于 DOC 物质构成的复杂性以及 CDOM 的季节性变化特征,不同季节下两者之间相关关系的研究成为后续实验的重要内容.

4) 夏季周村水库 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与浮游植物吸收系数 $a_{ph}(440)$ 间存在极显著正线性相关,表明浮游植物的新陈代谢及其降解为夏季水库 CDOM 的潜在来源.

5) 在未来的工作中将增加与 CDOM 相关水质指标的研究,并且对水样进行三维荧光扫描,结合平行因子分析的方法对夏季周村水库 CDOM 的空间分布特征及来源作进一步分析.

4 参考文献

- [1] Coble PG. Marine optical biogeochemistry: The chemistry of ocean color. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(2): 402-418.
- [2] Niu Cheng, Zhang Yunlin, Zhu Guangwei *et al.* Comparison of optical properties of DOM and CDOM in Lake Tianmuhu Catchment. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9): 998-1007. [牛城, 张运林, 朱广伟等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比. 环境科学研究, **27**(9): 998-1007.]
- [3] Jiang G, Ma R, Duan H *et al.* Remote determination of chromophoric dissolved organic matter in lakes, China. *International Journal of Digital Earth*, 2014, **7**(11): 897-915.
- [4] Zhou Y, Zhang Y, Shi K *et al.* Dynamics of chromophoric dissolved organic matter influenced by hydrological conditions in a large, shallow, and eutrophic lake in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**: 12992-13003.
- [5] Fichot CG, Benner R. The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter (S275-295) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(5): 1453-1466.
- [6] Li G, Liu J, Ma Y *et al.* Distribution and spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter in a coastal bay in northern China. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(8): 1585-1595.
- [7] Zhang Yunling, Zhang Enlou, Liu Mingliang. Spectral absorption properties of chromophoric dissolved organic matter and particulate matter in Yunnan Plateau lakes. *J Lake Sci*, 2009, **21**(2): 255-263. DOI:10.18307/2009.0215. [张运林, 张恩楼, 刘明亮. 云南高原湖泊有色可溶性有机物和颗粒物光谱吸收特性. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 255-263.]
- [8] Su Wen, Jiang Guangjia, Kong Fanxiang *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter in inland waters. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(1): 114-121. [苏文, 姜广甲, 孔繁翔等. 内陆水体有色溶解有机物的变化特征. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(1): 114-121.]
- [9] Duan Hongtao, Ma Ronghua, Kong Weijuan *et al.* Optical properties of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(2): 242-247. DOI:10.18307/2009.0213. [段洪涛, 马荣华, 孔维娟等. 太湖沿岸水体

- CDOM 吸收光谱特性. 湖泊科学, 2009, 21(2): 242-247.]
- [10] Cao Zhanhui, Huang Tinglin, Qiu Xiaopeng *et al.* Simulation of potential release of sediment pollutants at Zhoucun Reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(9): 41-44. [曹占辉, 黄廷林, 邱晓鹏等. 周村水库沉积物污染物释放潜力模拟. 环境科学与技术, 2013, 36(9): 41-44.]
- [11] Huang Tinglin, Liu Fei, Shi Jianchao. Distribution characteristic and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 166-172. [黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价. 环境科学, 2016, 37(1): 166-172.]
- [12] Zeng Mingzheng, Huang Tinglin, Qiu Xiaopeng *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in north of China. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1337-1344. [曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性. 环境科学, 2016, 37(4): 1337-1344.]
- [13] Editorial Committee of water and wastewater, State Environmental Protection Administration of China. Analysis in water and wastewater. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [14] Zhang Y, Yin Y, Feng L *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *Water Research*, 2011, 45(16): 5110-5122.
- [15] Zhao Qiaohua, Qin Boqiang. Mechanisms and characteristics of spatial distribution of coloured dissolved organic matter in Taihu Lake between summer and winter. *China Environmental Science*, 2008, 31(5): 1183-1191. [赵巧华, 秦伯强. 太湖有色溶解有机质光谱吸收空间的分异特征. 中国环境科学, 2008, 31(5): 1183-1191.]
- [16] Yin Yan, Wu Zhixu, Zhang Yunlin *et al.* Absorption characteristics and sources analysis of CDOM in Xin'anjiang Reservoir in summer. *China Environmental Science*, 2014, 34(12): 3207-3214. [殷燕, 吴志旭, 张运林等. 新安江水库夏季 CDOM 吸收光谱特征及来源分析. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3207-3214.]
- [17] Hoge FE, Vodacek A, Blough NV. Inherent optical properties of the ocean; Retrieval of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from fluorescence measurements. *Limnology and Oceanography*, 1993, 38(7): 1394-1402.
- [18] Ou HS, Wei CH, Deng Y *et al.* Principal component analysis to assess the composition and fate of impurities in a large river-embedded reservoir; Qingcaosha Reservoir. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, 15(8): 1613-1621.
- [19] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(1): 43-53.
- [20] Kowalczyk P, Zablocka M, Sagan S *et al.* Fluorescence measured in situ as a proxy of CDOM absorption and DOC concentration in the Baltic Sea. *Oceanologia*, 2010, 52(3): 431-471.
- [21] Zhang Y, Yin Y, Liu X *et al.* Spatial-seasonal dynamics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu, a large eutrophic, shallow lake in China. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(5): 510-519.
- [22] Zhang Yunlin, Qin Boqiang. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang bay and in Taihu lake in summer and winter. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 415-423. [张运林, 秦伯强. 梅梁湾, 大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析. 水科学进展, 2007, 18(3): 415-423.]
- [23] Jiang Guangjia, Liu Dianwei, Song Kaishan *et al.* Optical properties of CDOM in Shitoukoumen Reservoir, Changchun. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 26(5): 640-646. [姜广甲, 刘殿伟, 宋开山等. 长春市石头口门水库 CDOM 的光学特性. 中国科学院研究生院学报, 2009, 26(5): 640-646.]
- [24] Tang Guoan ed. ArcGIS geographic information system spatial analysis experiment course. Beijing: Science Press, 2006. [汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [25] Warnock RE, Gieskes WW, Van Laar S. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea. *Journal of Sea Research*, 1999, 42(3): 169-178.
- [26] Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.* Similarities and differences in absorption characteristics and composition of CDOM between Taihu Lake and Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2011, 31(5): 1183-1191. [施坤, 李云梅, 王桥等. 太湖, 巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同. 环境科学, 2011, 31(5): 1183-1191.]
- [27] Del Castillo CE, Coble PG, Morell JM *et al.* Analysis of the optical properties of the Orinoco River plume by absorption

- and fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 1999, **66**(1): 35-51.
- [28] Helms JR, Stubbins A, Ritchie JD *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [29] Carder KL, Steward RG, Harvey GR *et al.* Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(1): 68-81.
- [30] Wang Lin, Zhao Dongzhi, Yang Jianhong *et al.* Near ultraviolet absorption spectral properties of chromophoric dissolved organic matter in the north area of Yellow Sea. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(12): 3379-3383. [王林, 赵冬至, 杨建洪等. 黄海北部 CDOM 近紫外区吸收光谱特性研究. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(12): 3379-3383.]
- [31] Hancke K, Hovland EK, Volent Z *et al.* Optical properties of CDOM across the Polar Front in the Barents Sea: Origin, distribution and significance. *Journal of Marine Systems*, 2014, **130**: 219-227.
- [32] Feng Longqing, Shi Zhiqiang, Pan Jianjun *et al.* Characteristics of spectral absorption, fluorescence and remote sensing algorithms of chromophoric dissolved organic matter in winter, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 348-356. DOI:10.18307/2011.0306. [冯龙庆, 时志强, 潘剑君等. 太湖冬季有色可溶性有机物吸收荧光特性及遥感算法. *湖泊科学*, 2011, **23**(3): 348-356.]
- [33] Blough NV, Vecchio RD. Chromophoric DOM in the coastal environment. *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*, 2002: 509-546.
- [34] Vantrepotte V, Danhiez FP, Loisel H *et al.* CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: Implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation. *Optics Express*, 2015, **23**(1): 33-54.
- [35] Spencer RGM, Butler KD, Aiken GR. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(G03001).
- [36] Chen Xin, Zhang Xiaoyu, Lei Hui. Optical absorption properties of CDOM and tracing implication of DOC in the Changjiang Estuary. *Marine Environmental Science*, 2012, **31**(5): 625-630. [陈欣, 张霄宇, 雷惠. 长江口 CDOM 的光谱吸收特征以及 DOC 物源示踪意义. *海洋环境科学*, 2012, **31**(5): 625-630.]
- [37] Rochelle-Newall EJ, Fisher TR. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.