

暴雨事件对千岛湖 CDOM 及颗粒物吸收光谱特征的影响*

石亮亮^{1,2}, 毛志华^{2**}, 刘明亮³, 张艺蔚⁴

(1: 浙江大学海洋学院, 杭州 316021)

(2: 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012)

(3: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

(4: 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 为了研究暴雨事件对千岛湖有色可溶性有机物 (CDOM) 和颗粒物吸收光谱的影响, 利用 2016 年暴雨前 (3 月 1—6 日) 和暴雨后 (4 月 6—11 日) 采集的水样, 对暴雨前、后千岛湖水体 CDOM、浮游藻类和非藻类颗粒物的吸收光谱特征进行分析, 探讨暴雨事件对其造成的影响。结果表明: 千岛湖作为典型的深水型内陆湖泊, 其 CDOM、浮游藻类颗粒物和浮游藻类颗粒物的吸收强度较太湖等浅水型湖泊弱。暴雨前, CDOM 光谱吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 值在 $0 \sim 0.6 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 其光谱拟合系数 S_{CDOM} 的均值为 $0.0158 \pm 0.00145 \text{ nm}^{-1}$ 。暴雨前浮游藻类光谱吸收在总颗粒物中占主导, $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 在 $0 \sim 0.35 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 非藻类颗粒物光谱吸收系数 $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ 在 $0 \sim 0.15 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 其光谱拟合系数 S_{NAP} 均值为 $5.62 \pm 0.57 \mu\text{m}^{-1}$; 暴雨后 CDOM 光谱吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 值在 $0 \sim 1.6 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 其光谱拟合系数 S_{CDOM} 的均值为 $0.0157 \pm 0.00101 \text{ nm}^{-1}$ 。暴雨后浮游藻类光谱吸收系数 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 在 $0 \sim 2.5 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 非藻类颗粒物光谱吸收在部分区域已占据主导地位, $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ 在 $0 \sim 0.8 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 其光谱拟合系数 S_{NAP} 均值为 $5.72 \pm 0.68 \mu\text{m}^{-1}$ 。由 CDOM 吸收特征值相对分子质量 M 值得出, 暴雨前、后千岛湖不同区域 CDOM 组成都以富里酸为主, 且暴雨前 M 值分布较均匀, 暴雨后 M 值呈现从新安江向缓冲区、东南区递增的趋势, 这说明西北部随暴雨输入的腐殖酸增加了 CDOM 的相对分子质量。暴雨对 S_{NAP} 值影响较大的区域为西北部、西南部、东北区, 对西南部影响最小。本研究为使用光学手段深入探讨暴雨事件对千岛湖水环境的影响提供重要依据。

关键词: 千岛湖; 暴雨事件; 有色可溶性有机物; 浮游藻类颗粒物; 非藻类颗粒物; 吸收光谱

Effects of rainstorm on the spectral absorption properties of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Qiandao

SHI Liangliang^{1,2}, MAO Zhihua^{2**}, LIU Mingliang³ & ZHANG Yiwei⁴

(1: Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 316021, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, P.R.China)

(3: Hangzhou Institute of Environment Science, Hangzhou 310014, P.R.China)

(4: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, P.R.China)

Abstract: To study the influence of heavy rainfall on absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and particles in Lake Qiandao, the samples were collected on March 1–6, 2016 (before the rainstorm) and April 6–11, 2016 (after the rainstorm). The spectral absorption of CDOM, phytoplankton and non-algal particles (NAP) in the lake were analyzed and the influence of rainstorm was discussed. The results showed that Lake Qiandao, as a typical deep inland lake, its spectral absorption coefficients of CDOM, phytoplankton and NAP is small, compared with shallow lakes like Lake Taihu. The CDOM spectral

* 国家自然科学基金项目 (4120617)、国家重大科技专项 (41-Y20A31-9003-15/17) 和海洋公益科学技术研究基金项目 (2010050030) 联合资助。2017-03-03 收稿; 2017-06-13 收修改稿。石亮亮 (1989 ~), 男, 博士研究生; E-mail: 405128681@qq.com。

** 通信作者; E-mail: mao@sio.org.cn。

absorption coefficients varied in the range of $0\text{--}0.6\text{ m}^{-1}$, the mean value of the spectral fitting coefficient of CDOM (S_{CDOM}) was $0.0158\pm0.00145\text{ nm}^{-1}$ before the rainstorm. The spectral absorption of phytoplankton before the rainstorm dominated the absorption of total particles, varied in the range of $0\text{--}0.35\text{ m}^{-1}$. The spectral absorption coefficients of NAP varied in the range of $0\text{--}0.15\text{ m}^{-1}$, and the mean value of spectral fitting coefficient of NAP (S_{NAP}) was $5.62\pm0.57\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ before the rainstorm; The CDOM spectral absorption coefficients varied in the range of $0\text{--}1.6\text{ m}^{-1}$ S_{CDOM} was $0.0157\pm0.00101\text{ nm}^{-1}$ after the rainstorm. The spectral absorption of phytoplankton varied in the range of $0\text{--}2.5\text{ m}^{-1}$. NAP absorption dominated the absorption of particles in some regions after the rainstorm, $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ varied in the range of $0\text{--}0.8\text{ m}^{-1}$ and S_{NAP} was $5.72\pm0.68\text{ }\mu\text{m}^{-1}$. The M value showed that CDOM composition of the different regions of the lake is mainly fulvic acid both before and after the rainstorm, the spatial distribution of M value is relative even before the rainstorm. However, the M value showed an increasing trend from the Xin'anjiang to the buffer area and southeastern area after the rainstorm, which indicates that humic acids increased the relative molecular mass of CDOM in the northwestern area. Rainstorm had the greatest impact on the northwestern, southwestern and northeastern areas regarding the value of S_{NAP} , with the smallest impact on the southwestern area. This study provides an important basis for the use of optical means to further explore the impact of heavy rainfall on aquatic environment of Lake Qiandao.

Keywords: Lake Qiandao; rainstorm; chromophoric dissolved organic matter; phytoplankton; non-algal particles; absorption spectra

千岛湖以群山绵延,森林繁茂,生物多样性丰富,湖水清澈澄明,生态环境优美而著称。然而,近年来,随着千岛湖流域内不合理开发导致的水土流失、渔业养殖以及每年随着降雨入湖的生活和工农业等各种污染物的加剧,对千岛湖的水质产生了明显的影响。暴雨等强降雨事件给千岛湖带来大量的外源性物质,改变了湖水的营养盐浓度,出现了富营养化加速迹象;改变了浮游植物数量、空间分布,使湖内的初级生产力发生改变;同时也改变了有机物浓度、无机颗粒物数量、空间分布,使水体的透明度明显下降^[1]。湖泊水环境问题越来越突出,因此,亟待加强千岛湖水环境监测和评价工作。

有关千岛湖水环境变化及污染的研究多有报道,其研究手段多为通过获取常规水质监测站点的生物化学指标,分析环境对湖泊水质状况的影响及其带来的生态效应^[2-4]。随着水色遥感的发展,使得光学遥感成为监测湖泊水质状况的重要手段。不同自然水体的光学特性主要由水中光学活性物质(OACs)(有色可溶性有机物(CDOM)、浮游植物色素和非藻类颗粒物(NAP))的固有光学特性(IOPs)所决定的。水体固有光学量被广泛应用于光的辐射传输模拟、生物光学模型的建立和水体初级生产力估算等多个研究领域^[5-8]。浮游藻类吸收光谱能在一定程度上反映藻类的色素组成、类别及数量,其与叶绿素 a 浓度之间存在线性或非线性的关系。非藻类色素吸收光谱的拟合系数 S_{NAP} 受到颗粒物的组成、粒径等因素的影响。CDOM 作为带发色团的溶解有机物,其吸收光谱能在一定程度上反映其化学组成和来源等。目前依据水体光学特性建立的水色算法主要是针对不同湖泊的区域性模型,具有较大局限性。OACs 的光谱吸收作为水体固有光学特性之一,在水色遥感中具有重要的意义^[9]。

暴雨事件带来径流量的急剧增加,导致湖泊内浮游植物的种类、结构组成和细胞尺寸发生改变^[10],引起水体吸收和散射较大的差异;导致悬浮物质粒径大小及其组成成分发生改变,引起后向散射和光束衰减增加;导致 CDOM 浓度和分子量大小发生改变,引起其在生物地球化学循环的改变,如光降解和生物降解。由此可见暴雨事件对湖泊的光学特性、水质状况产生显著影响,带来了一系列生态问题。目前利用光学手段来研究暴雨事件对千岛湖光学特性及水质变化的影响研究还没有开展。本研究的主要目的有以下三点:(1)获取暴雨前、后千岛湖水体中 CDOM 和颗粒物的吸收光谱,并分析其在水体中的特征及差异;(2)分析暴雨对千岛湖水体 CDOM 和颗粒物的空间分布及差异的影响,同时定量描述他们在水体中的贡献量,找到暴雨前、后占支配地位的光学活性物质;(3)通过典型事件,初探暴雨前、后外源性物质对区域光学性质的影响。本研究对千岛湖水体吸收光谱特性做了全面分析,为用光学和遥感手段对湖泊的监测提供理论支撑,同时对了解暴雨事件对千岛湖水体光学特性的影响和生态效应具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区及采样

千岛湖($29^{\circ}22'\sim29^{\circ}50'\text{N}$, $118^{\circ}34'\sim119^{\circ}15'\text{E}$),又名新安江水库,是 1959 年新安江大坝建成后形成的

人工深水水库,同时也是旅游胜地之一. 千岛湖地处浙江省与安徽省交界处,上游是位于安徽省境内的新安江水系,下游是钱塘江流域,入湖水系主要包括富强溪、武强溪和清平源(图1). 千岛湖流域面积大约为10440 km²,其中60%位于安徽省内,在正常水位情况下,湖面面积约为580 km²,其中大部分水域位于浙江淳安县内. 千岛湖库容量为180 亿 m³,平均入湖水量为94 亿 m³,经由大坝流出的水量为91 亿 m³. 千岛湖水位落差较大,平均水深37 m,最大水深可达90 m. 千岛湖水质状况良好,水体透明度较高,处于中低营养状态. 千岛湖流域内以林业用地为主,其次是农业和城镇建设用地. 千岛湖不仅是当地及杭州等重要城市的饮用水供给源,也是旅游、航运、水力发电、渔业养殖的重要场所,在当地生态环境的保持和社会功能的实现中发挥重要作用^[11].

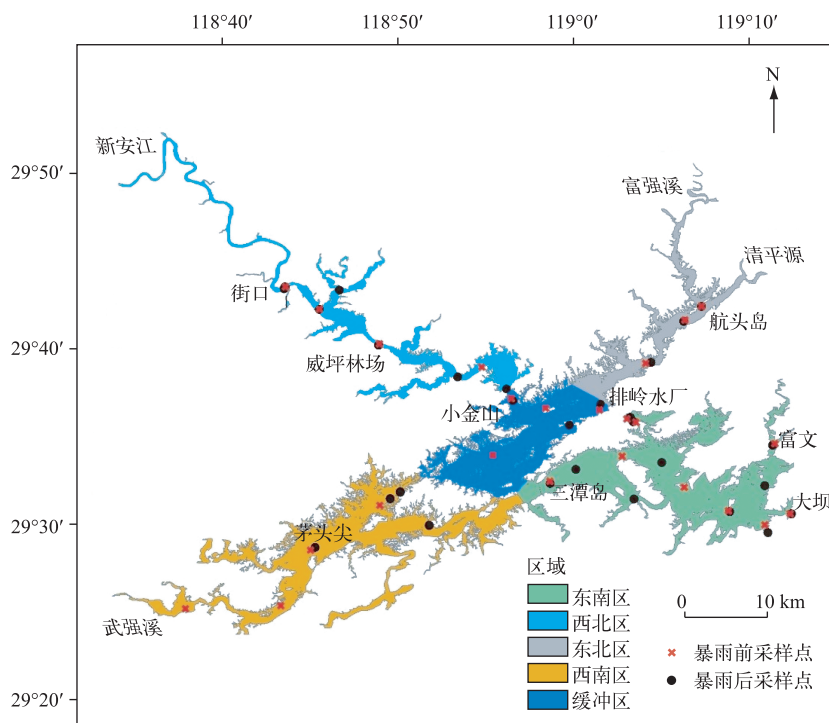


图1 千岛湖空间区域划分及采样站点分布

Fig.1 Space partition and distribution of sampling sites in Lake Qiandao

据淳安县气象资料,在千岛湖流域上游地区,安徽省和浙江省交界区域在2016年发生了暴雨,此次暴雨事件开始于3月30日持续至4月3日,4月2日和3日2天的24 h平均降雨量达到了400 mm,其中4月2日24 h降雨量超过500 mm(图2). 暴雨造成了一系列生态问题:上游汇水区大量污染物的输入,主要是有机污染和相伴的营养盐;流域内农田地表径流带入水体的农业非点源污染;水土流失带入的营养盐和大量悬浮物;沿岸城镇生活污染物的侵入等.

本研究分别于2016年3月1—6日(暴雨前)和2016年4月6—11日(暴雨后)在整个千岛湖进行了2次采样,采样期间天气良好,共获得53个有效采样点,其中9个是固定站点,采样点分布见图1. 根据千岛湖水系形态及其水动力状况将千岛湖划分为5个区域:西北区、缓冲区、东北区、西南区和东南区. 各个湖区的分布特点如下,西北区:主要的人湖径流来源,占总径流的60%;缓冲区:各径流交汇区;东北区:径流汇入区,站总径流量比例最小;西南区:入湖径流占总径流量的25%;东南区:湖库蓄水区,也是新安江水库的唯一出水口. 采样点利用高精度全球定位系统GPS(佳明eTrex30X型)现场同步定位. 考虑到千岛湖是深水型湖泊,在固定站点进行了不同深度的分层采样,水样采集后在现场同步过滤,CDOM过滤样品使用棕色瓶保存并置于无光的冰箱中,颗粒物样品与叶绿素样品保存于液氮中,以便航次结束带回实验室分析处理.

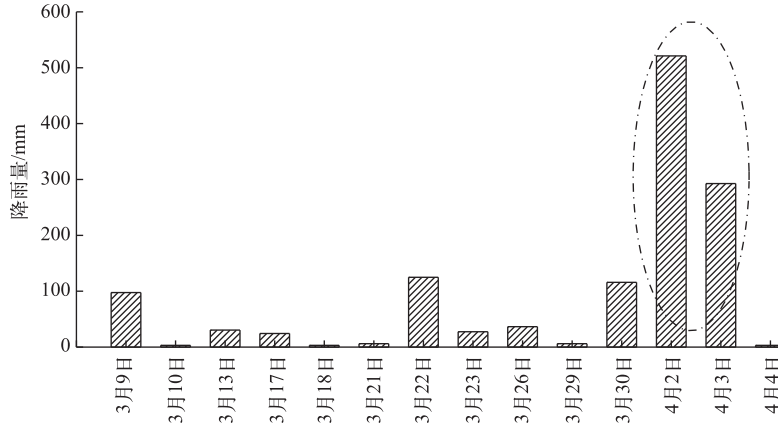


图 2 2 次采样期间 24 h 降雨量(椭圆表示特大暴雨事件降雨量)

Fig.2 24-hours rainfall during the two sampling periods (the dashed circle represents the rainstorm event)

1.2 实验室分析与测定

根据前人的研究^[12-14], 水体中的光谱吸收系数是 4 个部分的总和, 可以认为是简单的线性叠加关系:

$$a_{\text{total}}(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{\text{ph}}(\lambda) + a_{\text{NAP}}(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda) \quad (1)$$

式中, $a_{\text{total}}(\lambda)$ 为水体的总吸收, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收光谱, $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 为浮游藻类颗粒物吸收光谱, $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ 为非藻类颗粒物的吸收光谱, $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 为 CDOM 的吸收光谱。

1.2.1 CDOM 光谱吸收系数测定 CDOM 首先使用 47 mm 直径、0.7 μm 孔径的 Whatman 玻璃纤维膜过滤, 然后再用 47 mm 直径、0.22 μm 孔径的聚碳酸酯膜进行第 2 次过滤。需要注意的是, CDOM 水样在冰箱中保存不宜超过 1 周, 以免水样变质, 过滤之前 CDOM 水样必须被充分解冻。将 CDOM 滤液置于 Perkin Elmer (PE) Lambda-35 分光光度计的比色皿 (10 cm) 上, 设置光谱范围为 250~800 nm, 同时用纯水作为参考, 每次扫描可以获得样品的光谱吸光度 $\text{OD}_{\text{CDOM}}(\lambda)$, 结合获取的纯水吸光度 $\text{OD}_{\text{Milli-Q}}(\lambda)$, 根据公式 (2) 可以计算出样品的光谱吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$, 即:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = \frac{2.303}{l} [(\text{OD}_{\text{CDOM}}(\lambda) - \text{OD}_{\text{Milli-Q}}(\lambda)) - \text{OD}_{\text{null}}] \quad (2)$$

式中, l 是光程长度, 即比色皿的长度, OD_{null} 是在某个特定的波长残余吸光度, 本研究选择 700 nm 处的吸光度, 对 CDOM 的吸收光谱作校正。表征 CDOM 相对分子质量大小的 M 值和组成成分的 $E3/E4$ 值分别按公式 (3) 和 (4) 进行计算:

$$M = a_{\text{CDOM}}(250)/a_{\text{CDOM}}(365) \quad (3)$$

$$E3/E4 = a_{\text{CDOM}}(300)/a_{\text{CDOM}}(400) \quad (4)$$

1.2.2 颗粒物光谱吸收系数测定 颗粒物的测量使用 QFT 方法^[15], 用直径 25 mm 的 Whatman GF/F 膜过滤水样, 过滤时真空泵采用较小的压力, 以保证水样中的颗粒物均匀的附着在膜表面。将需要测量的样品置于 Perkin Elmer (PE) Lambda-950 分光光度计中, 波长扫描范围设置为 300~800 nm。对扫描得到的吸光度数据进行残余波段吸光度校正, 即减去 700 nm 处的吸光度, 接着采用 Tassan 等^[16]提出的方法进行放大因子校正, 公式如下:

$$\text{OD}_s(\lambda) = 0.423 \text{OD}_f(\lambda) + 0.479 \text{OD}_f(\lambda)^2, \text{OD}_s(\lambda) \leq 0.4 \quad (5)$$

式中, $\text{OD}_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜颗粒物吸光度, $\text{OD}_f(\lambda)$ 是在仪器上扫描测得的滤膜颗粒物吸光度, 接着采用公式 (6), 计算得到总颗粒物的光谱吸收系数 ($a_p(\lambda)$, m^{-1}), 即:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \left(\frac{S}{V} \right) \cdot \text{OD}_s(\lambda) \quad (6)$$

式中, S 为滤膜上颗粒物附着的有效面积 (m^2), V 为过滤的水样体积 (ml)。

接着萃取出滤膜上的色素,使用甲醇浸泡颗粒物滤膜并过滤,这样滤膜上仅存不能被漂白的非色素颗粒物,按上述总颗粒物的测量方法测得非色素颗粒物的吸收系数 $a_{\text{NAP}}(\lambda)$. 根据总颗粒物的吸收系数 $a_{\text{p}}(\lambda)$ 是浮游植物吸收系数 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 和非色素颗粒物吸收系数 $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ 的和,可以得到 $a_{\text{ph}}(\lambda)$,公式为:

$$a_{\text{ph}}(\lambda) = a_{\text{p}}(\lambda) - a_{\text{NAP}}(\lambda)$$

(7)

1.2.3 叶绿素 a 浓度的测定 将保存于液氮中的 Whatman GF/F 叶绿素样品膜取出,加入 90%的丙酮进行色素萃取,把离心管放入超声机对藻类细胞进行超声粉碎,放入离心机,3000~4000 转/min 的转速下离心 10 min,保证色素萃取的完全性,取少量上清液,加入 10%的盐酸酸化,放入 Turner 荧光仪,采用荧光法测得叶绿素 a 浓度^[17].

1.3 数据分析与统计

本研究使用 OriginPro 2017 软件进行数据统计分析与作图.

2 结果与讨论

2.1 CDOM 的吸收光谱特征分析

根据千岛湖采样点测得的 CDOM 光谱吸收曲线(图 3,图 4),发现 CDOM 吸收光谱曲线随波长增加呈现指数递减,且其吸收主要集中在紫外和蓝光波段. 暴雨后千岛湖 CDOM 吸收显著增强,其光谱吸收系数从暴雨前的 $0\sim0.6\text{ m}^{-1}$ 增强到暴雨后的 $0\sim1.6\text{ m}^{-1}$,其中西北区变化最为明显. 空间上暴雨前千岛湖各区域 CDOM 平均光谱吸收系数呈现:西北区>东南区>西南区>缓冲区、东北区,而暴雨后变为:西北区>缓冲区>东南区>东北区>西南区的趋势(图 3F 和图 4F). 根据以上分析并结合 $a_{\text{CDOM}}(440)$ (表 1)可知,暴雨引起的外源有机物的输入不仅引起了 CDOM 吸收强度改变,其在空间分布上也出现明显差异. 与太湖相比^[18],千岛湖水体中 CDOM 浓度明显偏低,这主要是太湖这样典型的富营养化湖泊中累积了大量溶解性物质,加之高强度的工农业生产向该湖泊注入了高浓度的溶解性物质. 这从另一面说明 CDOM 吸收大小与水体营养化状况相关,一般营养化水平高的湖泊,CDOM 吸收系数也比较大,反之,中低营养的湖泊,CDOM 的吸收系数比较小.

表 1 千岛湖暴雨前、后不同水域 CDOM 在 440 nm 处的光谱吸收系数
Tab.1 Spectral absorption coefficient of CDOM at 440 nm in different regions of Lake Qiandao before and after rainstorm

时期	参数	$a_{\text{CDOM}}(440)/\text{m}^{-1}$				
		西北区	缓冲区	东北区	西南区	东南区
暴雨前	平均值	0.257	0.189	0.191	0.212	0.212
	标准差	0.060	0.027	0.004	0.050	0.043
	最小值	0.217	0.143	0.186	0.162	0.164
	最大值	0.377	0.224	0.199	0.268	0.320
暴雨后	平均值	0.559	0.268	0.209	0.206	0.242
	标准差	0.168	0.057	0.033	0.030	0.091
	最小值	0.326	0.200	0.170	0.164	0.162
	最大值	0.755	0.341	0.269	0.228	0.503

CDOM 特定波长处的吸收系数比值可以在一定程度上指示溶解性有机物的组成、分子量大小和团聚化程度^[19]. 为了进一步研究暴雨对 CDOM 相对分子量大小和主要成分的影响,对各区域的 M 值和 $E3/E4$ 值进行分析. M 值能较好地表征 CDOM 相对分子量大小,其值越小其相对分子量越大; $E3/E4$ 值小于 3.5, CDOM 组成以腐殖酸为主,大于 3.5 时主要是富里酸. 千岛湖暴雨前、后不同区域 $E3/E4$ 值均大于 3.5,因此其组成以富里酸为主,暴雨后西北区和缓冲区的 $E3/E4$ 值变化较大. 暴雨后 M 值除西南区外均小于暴雨前,说明暴雨后千岛湖 CDOM 相对分子量大小呈增大趋势(图 5). 在空间上暴雨前各区域 M 值分布较均匀,而暴雨后 M 值分布差异变大,且呈现从西北区向东南区递增的变化趋势,这也说明受新安江输入的直接影

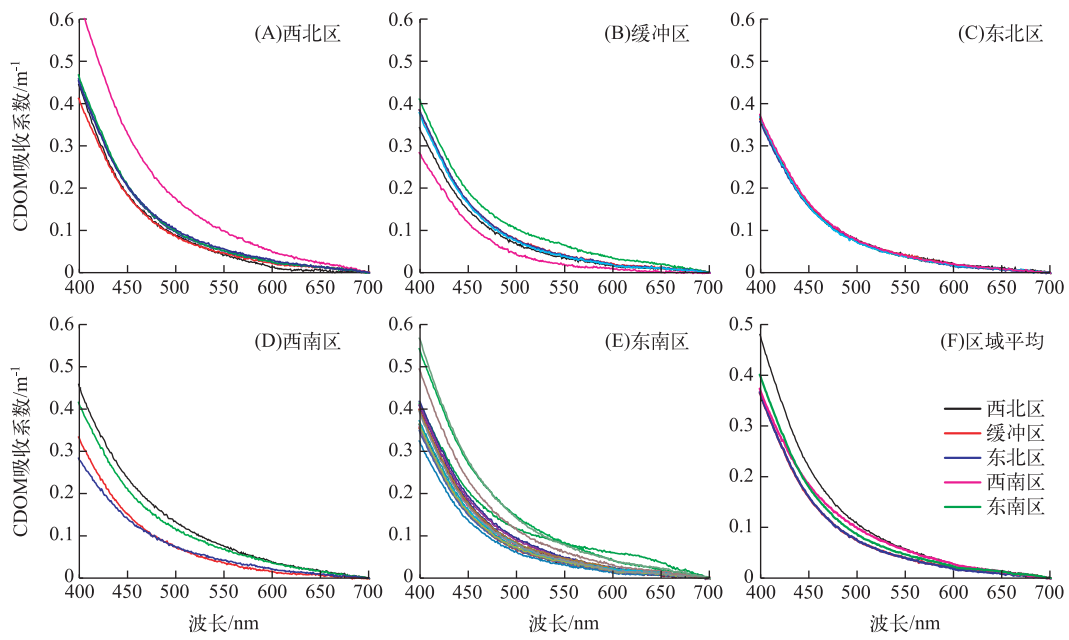


图 3 千岛湖暴雨前各个区域 CDOM 光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数
Fig.3 Spectral absorption of CDOM in different regions of Lake Qiandao before rainstorm

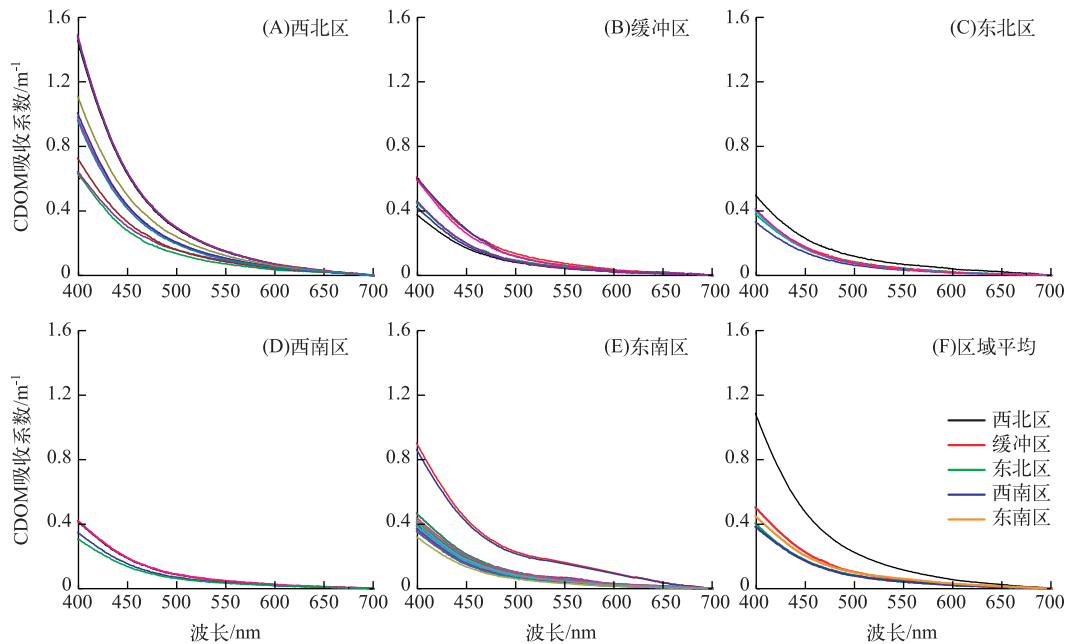


图 4 千岛湖暴雨后各个区域 CDOM 光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数
Fig.4 Spectral absorption of CDOM in different regions of Lake Qiandao after rainstorm

响,西北区的陆源 CDOM 腐殖酸相对含量较高,且其分子质量较大.

Bricaud 等^[20]研究发现,指数模型可以很好地模拟 CDOM 吸收光谱,如下式:

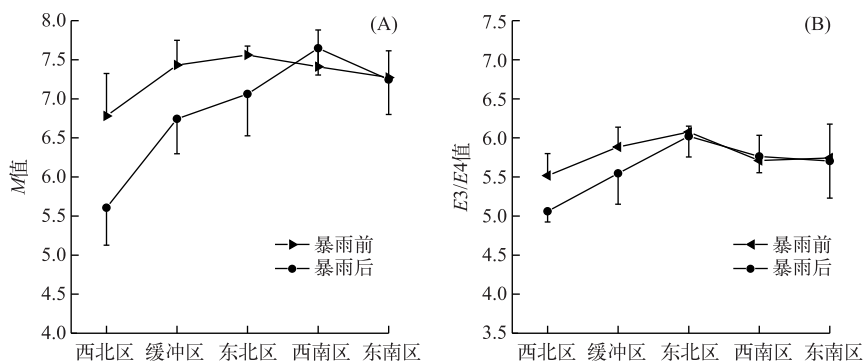


图5 暴雨前、后千岛湖不同区域的CDOM吸收特征值: M 值(A)和 $E3/E4$ 值(B)
Fig.5 Characteristics of spectral absorption coefficients of CDOM in different regions of Lake Qiandao before and after rainstorm: M value(A) and $E3/E4$ value(B)

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_0) e^{(-S_{\text{CDOM}}(\lambda - \lambda_0))} \quad (8)$$

式中, λ_0 为参考波长, S_{CDOM} 为拟合系数, 通过特征波段处 $a_{\text{CDOM}}(\lambda_0)$ 来模拟 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 的关键是确定指数模型的斜率 S_{CDOM} . 一般而言, S_{CDOM} 随水体的不同在一定范围内变化, 在开阔大洋中范围通常为 $0.0141 \sim 0.0193 \text{ nm}^{-1}$, 在内陆水体中范围为 $0.0128 \sim 0.0197 \text{ nm}^{-1}$ [21-23]. 本研究采用 440 nm 作为参考波长, 模拟得到暴雨前、后 S_{CDOM} 直方图及其高斯拟合曲线, 如图6所示.

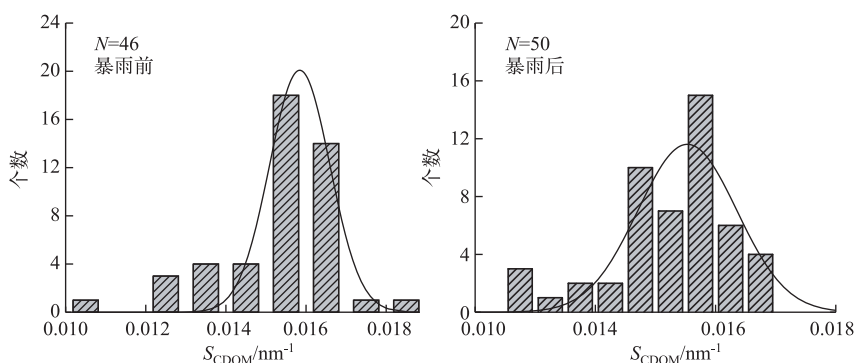


图6 千岛湖暴雨前、后CDOM光谱吸收曲线 S_{CDOM} 值频数分布及高斯拟合曲线

Fig.6 The value of S_{CDOM} and its frequency distribution with Gaussian Fitting Curve of Lake Qiandao before and after rainstorm

对 S_{CDOM} 进行分析, 得到暴雨前 CDOM 吸收光谱的平均 S_{CDOM} 值为 $0.0153 \pm 0.00145 \text{ nm}^{-1}$, 暴雨后 CDOM 吸收光谱的平均 S_{CDOM} 值为 $0.0152 \pm 0.00101 \text{ nm}^{-1}$. 为了分析暴雨对 S_{CDOM} 造成的空间差异, 对 S_{CDOM} 进行了空间插值拟合(图7). 暴雨前 S_{CDOM} 高值区域主要分布于径流输入的西北区以及东南区(大坝附近), 暴雨后东北区的 S_{CDOM} 值较大. 结合图6、7可知, 整个湖区 S_{CDOM} 平均值改变并不显著, 这说明 S_{CDOM} 值具有一定的稳定性, 但暴雨事件显著改变了其空间分布, 变化最显著的区域位于千岛湖西北区(街口附近)和西南区(茅头尖附近). 这说明在新安江、武强溪水系有机物输入的影响下, S_{CDOM} 值变化最为显著.

2.2 颗粒物吸收光谱特征分析

2.2.1 总颗粒物吸收光谱 千岛湖暴雨前、后不同区域采样点的总颗粒物光谱吸收如图8、图9所示, 从光谱形状来看, 总颗粒物吸收光谱在 440 和 675 nm 附近有明显的吸收峰, 440 nm 处吸收峰是浮游藻类颗粒物叶绿素吸收和非藻类颗粒物吸收共同作用引起的, 而 675 nm 处主要是叶绿素 a 的吸收峰, 该吸收峰的高低与

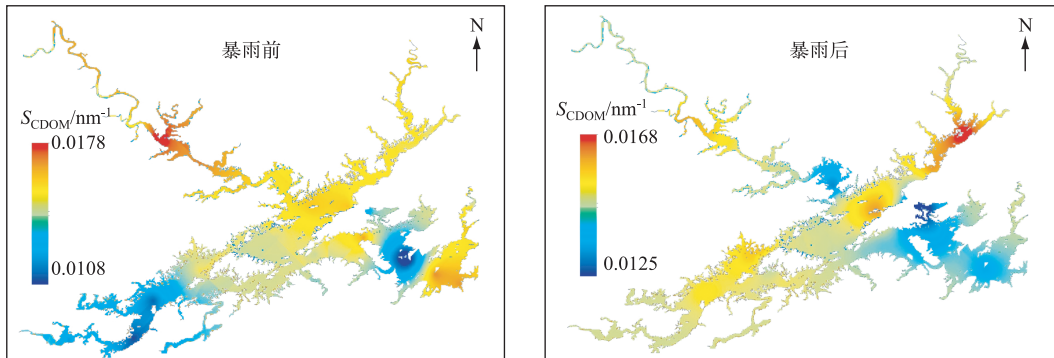
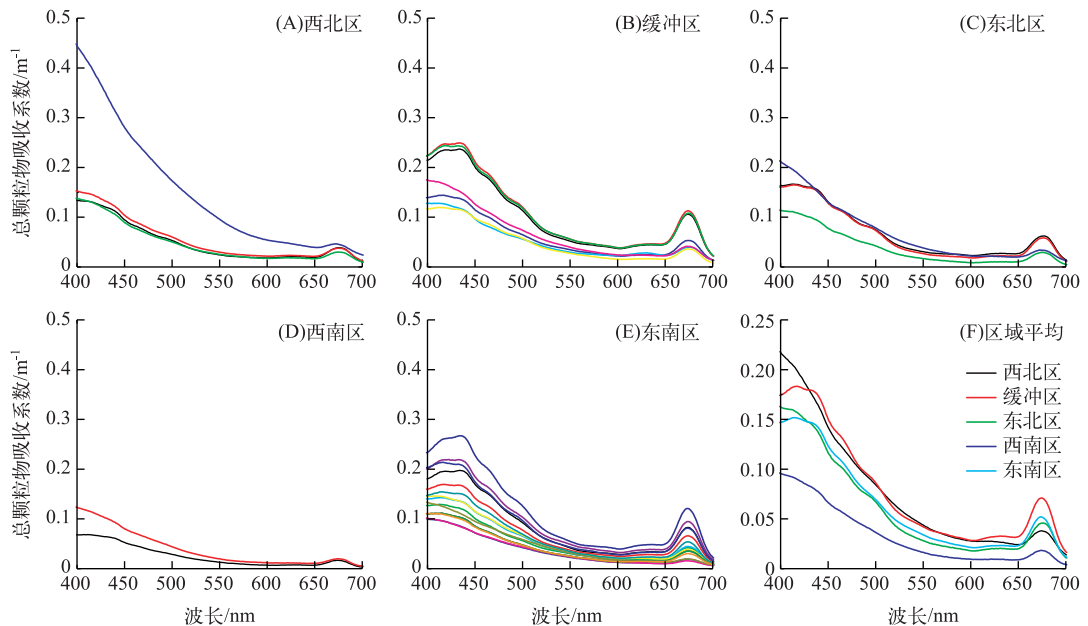
图7 千岛湖暴雨前、后 S_{CDOM} 值的空间分布Fig.7 The spatial distribution of S_{CDOM} values for Lake Qiandao before and after rainstorm

图8 千岛湖暴雨前各区域总颗粒物光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数

Fig.8 Spectral absorption of total particles and its average value in different regions of Lake Qiandao before rainstorm

浮游藻类颗粒物吸收作用的强弱直接相关。

暴雨前千岛湖总颗粒物光谱吸收系数在 $0 \sim 0.5 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化,各区域平均光谱吸收除西南区差异较小(图8F)。分析暴雨前特定波长处总颗粒物吸收系数,其中西北区 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 变化范围分别为 $0.106 \sim 0.313$ 、 $0.030 \sim 0.046 \text{ m}^{-1}$,缓冲区分别为 $0.111 \sim 0.243$ 、 $0.036 \sim 0.112 \text{ m}^{-1}$,西南区分别为 $0.061 \sim 0.093$ 、 $0.017 \sim 0.020 \text{ m}^{-1}$ (表2)。暴雨后总颗粒物光谱吸收系数在 $0 \sim 3.0 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化,各区域平均光谱吸收较暴雨前明显变大,且西北区的变化最大(图9F)。暴雨后西北区 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 变化范围分别为 $0.632 \sim 2.008$ 、 $0.082 \sim 0.962 \text{ m}^{-1}$,缓冲区分别为 $0.077 \sim 0.444$ 、 $0.025 \sim 0.215 \text{ m}^{-1}$,西南区分别为 $0.071 \sim 0.120$ 、 $0.008 \sim 0.042 \text{ m}^{-1}$ (表2)。暴雨前、后总颗粒物吸收在西北区的变化最为显著,其次是缓冲区和东北区。

千岛湖总颗粒物吸收光谱存在2种类型,第1种类型如图10A,浮游藻类颗粒物的吸收明显高于非藻类颗粒物,此类型中浮游藻类颗粒物吸收占主导,总颗粒物吸收光谱双峰明显;第2种类型如图10B,除近红外

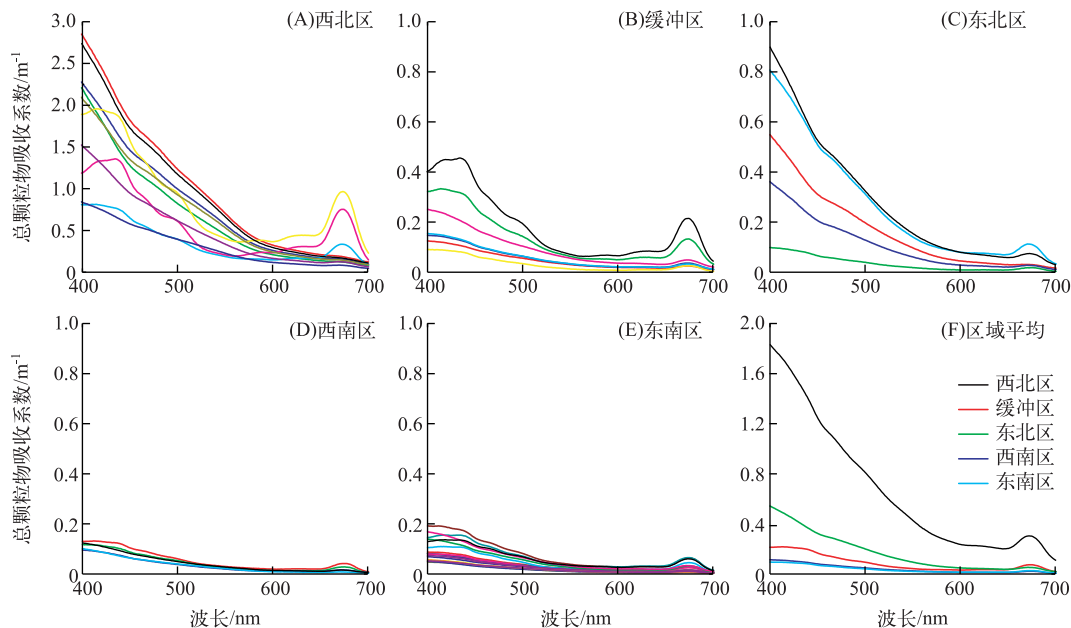


图9 千岛湖暴雨后各区域总颗粒物光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数

Fig.9 Spectral absorption of total particles and its average value in different regions of Lake Qiandao after rainstorm

波段非藻类颗粒物吸收强度高于浮游藻类颗粒物,非藻类颗粒物吸收占主导,总颗粒物 440 nm 处吸收峰不明显. 由此看出,总颗粒物吸收光谱形状主要取决于浮游植物和非藻类颗粒物吸收作用的相对强弱.

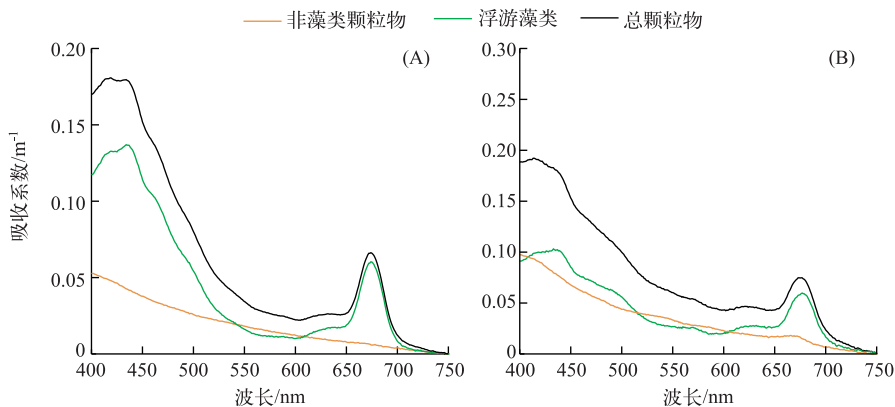


图10 千岛湖2种典型的总颗粒物吸收光谱模式
(含对应的浮游藻类及非藻类颗粒物吸收光谱)

Fig.10 Two typical total absorption spectra of particles in Lake Qiandao
(involving its corresponding absorption spectra of phytoplankton and non-algal particles)

2.2.2 浮游藻类吸收光谱 千岛湖不同区域浮游藻类颗粒物光谱吸收系数从暴雨前的 $0 \sim 0.35 \text{ m}^{-1}$ 变化为暴雨后的 $0 \sim 2.5 \text{ m}^{-1}$ (图11和图12). 浮游藻类颗粒物吸收光谱受藻类色素影响,在 440 和 675 nm 附近都有明显的吸收峰. 部分浮游藻类吸收光谱在 440 nm 处的峰消失,可能的原因是:1) 水样高度浑浊,浮游藻类色素含量低. 2) CDOM 高浓度水样中,过滤膜表面会吸附少量溶解有机物,或者胶质型有机物被漂白后残存于过滤膜上,测量时会造成 440 nm 之前的光谱吸收系数偏大,导致吸收峰模糊甚至消失. 暴雨前各区域浮游藻

表 2 暴雨前、后千岛湖各区域特征波长处总颗粒物、浮游植物、非藻类颗粒物吸收系数统计结果
Tab.2 Statistics of absorption by total particles, phytoplankton and NAP at specific wavelength
in different regions of Lake Qiandao before and after rainstorm

时期	湖域	统计参数	$a_p(\lambda)/m^{-1}$		$a_{ph}(\lambda)/m^{-1}$		$a_{NAP}(\lambda)/m^{-1}$	
			440 nm	675 nm	440 nm	675 nm	440 nm	675 nm
暴雨前	西北区	平均值	0.163	0.038	0.117	0.040	0.062	0.014
		标准差	0.100	0.006	0.077	0.004	0.024	0.003
		最小值	0.106	0.030	0.071	0.034	0.050	0.012
		最大值	0.313	0.046	0.231	0.043	0.098	0.019
	缓冲区	平均值	0.173	0.071	0.139	0.074	0.050	0.013
		标准差	0.061	0.036	0.059	0.035	0.004	0.001
		最小值	0.111	0.036	0.079	0.040	0.045	0.012
		最大值	0.243	0.112	0.208	0.115	0.056	0.014
	东北区	平均值	0.136	0.046	0.090	0.045	0.062	0.016
		标准差	0.030	0.017	0.027	0.017	0.008	0.001
		最小值	0.092	0.029	0.051	0.030	0.057	0.015
		最大值	0.153	0.062	0.110	0.062	0.073	0.018
	西南区	平均值	0.077	0.018	0.048	0.023	0.045	0.011
		标准差	0.023	0.002	0.015	0.002	0.007	0
		最小值	0.061	0.017	0.037	0.022	0.040	0.011
		最大值	0.093	0.020	0.059	0.024	0.050	0.011
	东南区	平均值	0.141	0.052	0.117	0.060	0.048	0.012
		标准差	0.055	0.031	0.054	0.031	0.003	0.001
		最小值	0.081	0.016	0.047	0.019	0.043	0.011
		最大值	0.262	0.120	0.228	0.123	0.054	0.013
暴雨后	西北区	平均值	1.402	0.302	1.083	0.272	0.358	0.068
		标准差	0.474	0.304	0.376	0.306	0.141	0.021
		最小值	0.632	0.082	0.476	0.083	0.146	0.034
		最大值	2.008	0.962	1.567	0.927	0.531	0.092
	缓冲区	平均值	0.196	0.074	0.164	0.092	0.070	0.020
		标准差	0.134	0.073	0.118	0.067	0.020	0.007
		最小值	0.077	0.025	0.040	0.041	0.050	0.014
		最大值	0.444	0.215	0.389	0.225	0.099	0.029
	东北区	平均值	0.367	0.052	0.260	0.062	0.145	0.028
		标准差	0.223	0.039	0.178	0.035	0.045	0.006
		最小值	0.077	0.018	0.028	0.037	0.087	0.019
		最大值	0.595	0.111	0.436	0.117	0.197	0.034
	西南区	平均值	0.092	0.022	0.069	0.043	0.062	0.017
		标准差	0.020	0.013	0.022	0.013	0.014	0.005
		最小值	0.071	0.008	0.052	0.031	0.050	0.012
		最大值	0.120	0.042	0.101	0.065	0.086	0.026
	东南区	平均值	0.081	0.027	0.063	0.035	0.037	0.010
		标准差	0.043	0.020	0.038	0.019	0.009	0.002
		最小值	0.036	0.006	0.022	0.016	0.029	0.007
		最大值	0.169	0.065	0.140	0.073	0.054	0.013

类颗粒物平均光谱吸收系数小于暴雨后,暴雨后各区域平均光谱吸收差异较暴雨前大.暴雨前 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 平均值分别为 0.114 ± 0.056 、 $0.057\pm0.030\ m^{-1}$,其中缓冲区的 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 平均值最大,是其他

区域 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 平均值的 1~3 倍 (表 2). 暴雨后 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 平均值分别为 0.341 ± 0.452 、 $0.110 \pm 0.169 \text{ m}^{-1}$, 其中西北区的 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 的平均值最大 (表 2). 暴雨后浮游藻类颗粒物光谱吸收系数比暴雨前显著提高, 其中西北区的增幅最大, 这是因为西北区是千岛湖径流汇入区, 暴雨给西北区带来的外源输入中含有浮游藻类颗粒物.

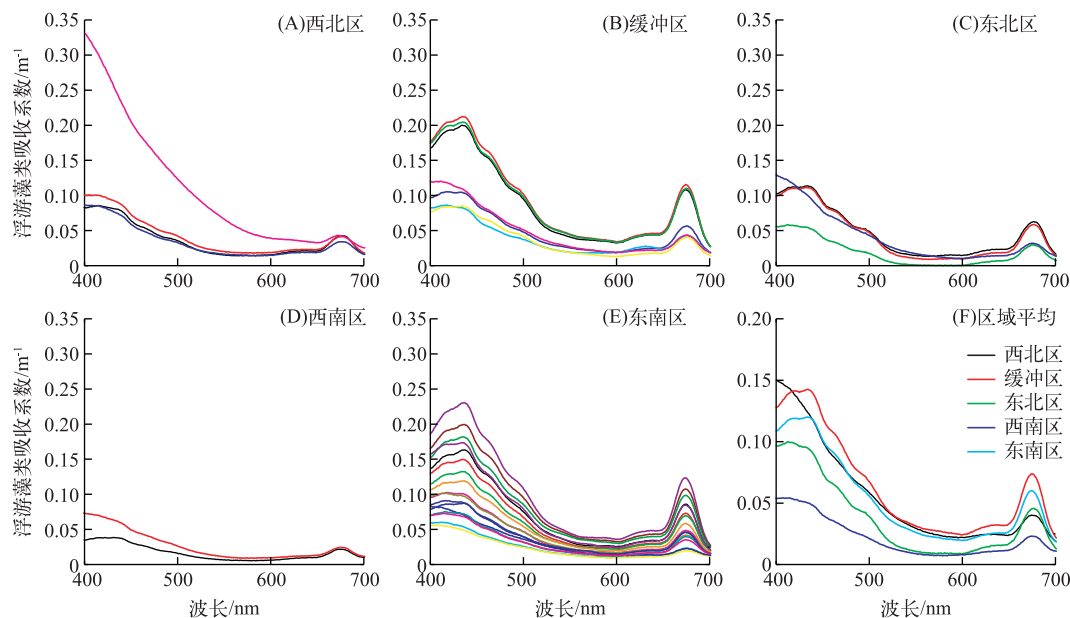


图 11 千岛湖暴雨前各区域浮游藻类颗粒物光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数

Fig.11 Spectral absorption of phytoplankton and its average value in different regions of Lake Qiandao before rainstorm

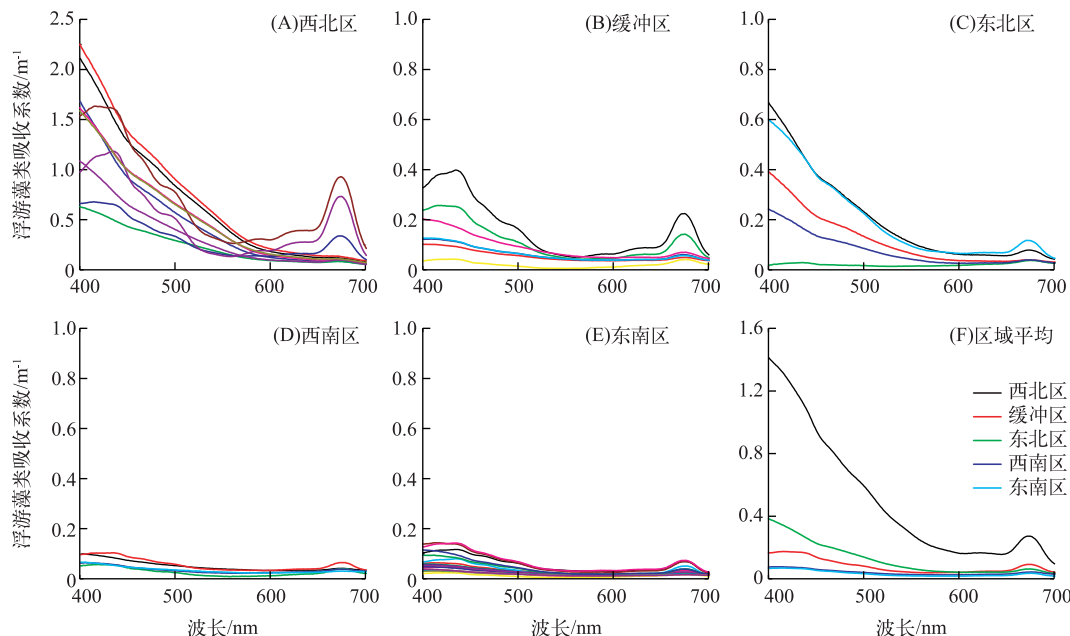


图 12 千岛湖暴雨后各区域浮游藻类颗粒物光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数

Fig.12 Spectral absorption of phytoplankton and its average value in different regions of Lake Qiandao after rainstorm

为了分析浮游藻类吸收系数与藻类色素浓度的关系,对其特征波段 440、675 nm 处吸收系数与叶绿素 a 浓度(除去西北区上游部分站点)进行相关性分析,结果表明暴雨前、后 $a_{ph}(675)$ 与其对应的浮游藻类色素浓度均存在极显著的正相关关系(图 13A、图 13C);暴雨前 $a_{ph}(440)$ 与对应浮游藻类色素浓度相关性较好(图 13B),而暴雨后其相关性较差(图 13D). 这与许多文献记载的浮游藻类吸收系数与浮游藻类色素浓度在 675 nm 处的相关性比 440 nm 处相关性好的结果一致^[8,19]. 导致这种结果的原因是,440 nm 处浮游藻类吸收系数不仅受叶绿素 a 影响,而且还受到其他色素的影响. 国内外很多学者在河口、沿岸和湖泊水体中发现, $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与浮游藻类色素浓度存在线性或非线性关系. Stedmon、Keith 等^[24-25]在沿岸水体发现浮游藻类吸收系数与其色素浓度很好的线性、非线性关系;曹文熙等^[26-28]在珠江口流域研究表明浮游藻类吸收系数与其色素浓度呈现线性、幂函数关系;Zhang 等^[29]对太湖水体研究也发现浮游藻类吸收系数与其色素浓度具有很好的线性关系,且 R^2 达到 0.75.

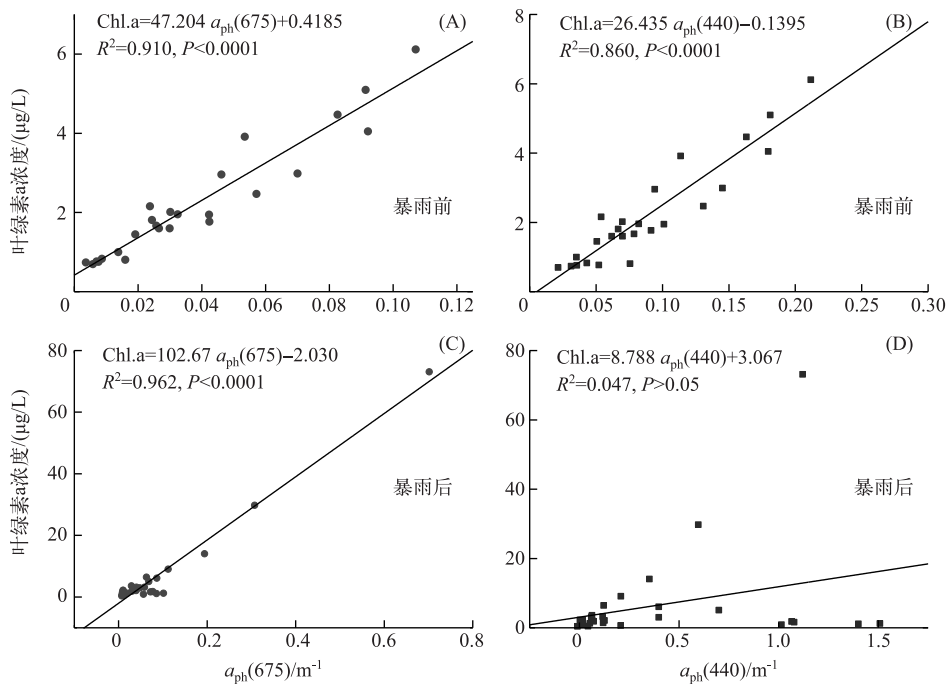


图 13 千岛湖暴雨前、后 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与浮游藻类叶绿素 a 浓度之间的相关关系

Fig.13 Linear correlation between phytoplankton absorption $a_{ph}(440)$, $a_{ph}(675)$ and phytoplankton pigment concentration in Lake Qiandao before and after rainstorm

2.2.3 非藻类颗粒物吸收光谱 千岛湖暴雨前、后非藻类颗粒物的吸收强度变化明显,暴雨前非藻类颗粒物光谱吸收系数在 $0 \sim 0.15 \text{ m}^{-1}$ 范围内,且其各区域平均光谱吸收差异较小(图 14F);暴雨后非藻类颗粒物光谱吸收系数在 $0 \sim 0.8 \text{ m}^{-1}$ 范围内,且其各区域平均光谱吸收差异明显增大(图 15F). 研究表明非藻类颗粒物的吸收系数随着波长的增加呈现指数衰减的规律^[30-31],可表示为:

$$a_{NAP}(\lambda) = a_{NAP}(440) e^{(-S_{NAP}(\lambda - 440))} \quad (9)$$

式中, S_{NAP} 为非藻类颗粒物光谱拟合系数, $a_{NAP}(440)$ 为 440 nm 处的吸收系数. 本文用最小二乘法对 400~700 nm 的非藻类颗粒物光谱吸收系数进行拟合,得到光谱斜率 S_{NAP} . 整体上,暴雨前千岛湖 S_{NAP} 均值为 $5.62 \pm 0.57 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$,暴雨后千岛湖 S_{NAP} 均值为 $5.72 \pm 0.68 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$. 暴雨前、后 S_{NAP} 值存在明显的空间分布差异,这表明暴雨对非藻类颗粒物组成及粒径差生了影响(图 16). 其中,受暴雨影响较大的区域为西北区、西南区和东北区,这符合它们都是千岛湖径流汇入区的特征. 本研究获取的 S_{NAP} 值低于张运林等^[32]太湖报道的 S_{NAP} 值,也低于殷燕等^[33]夏季千岛湖的 S_{NAP} 值. 有研究指出 S_{NAP} 值越低,其水体中有机颗粒物含量比例越高^[34],这

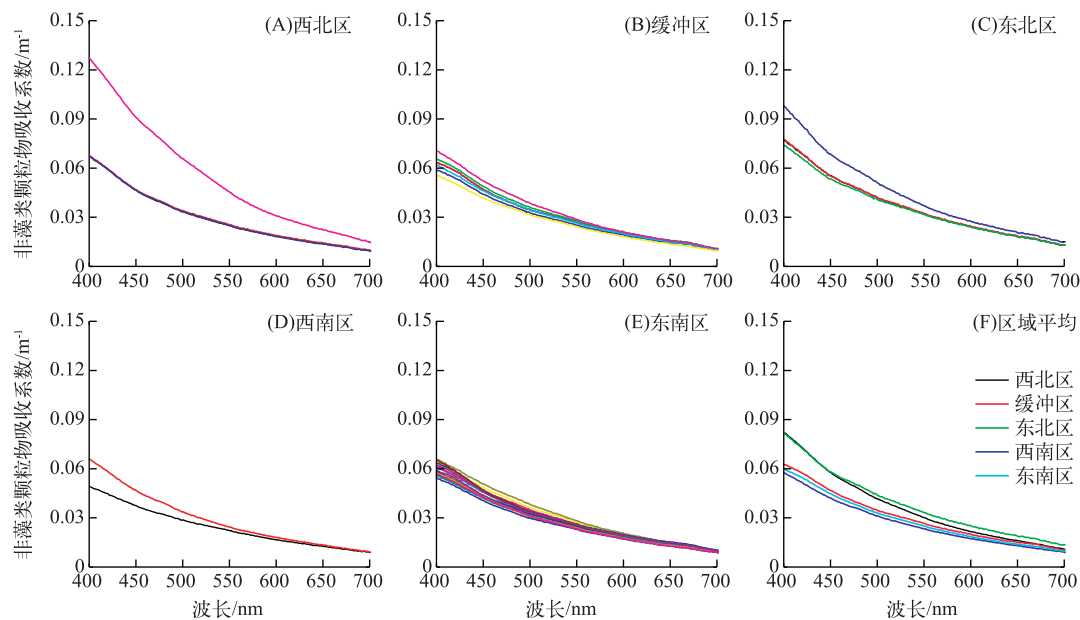


图 14 千岛湖暴雨前各区域非藻类颗粒物光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数

Fig.14 Spectral absorption of NAP and its average value in different regions of Lake Qiandao before rainstorm

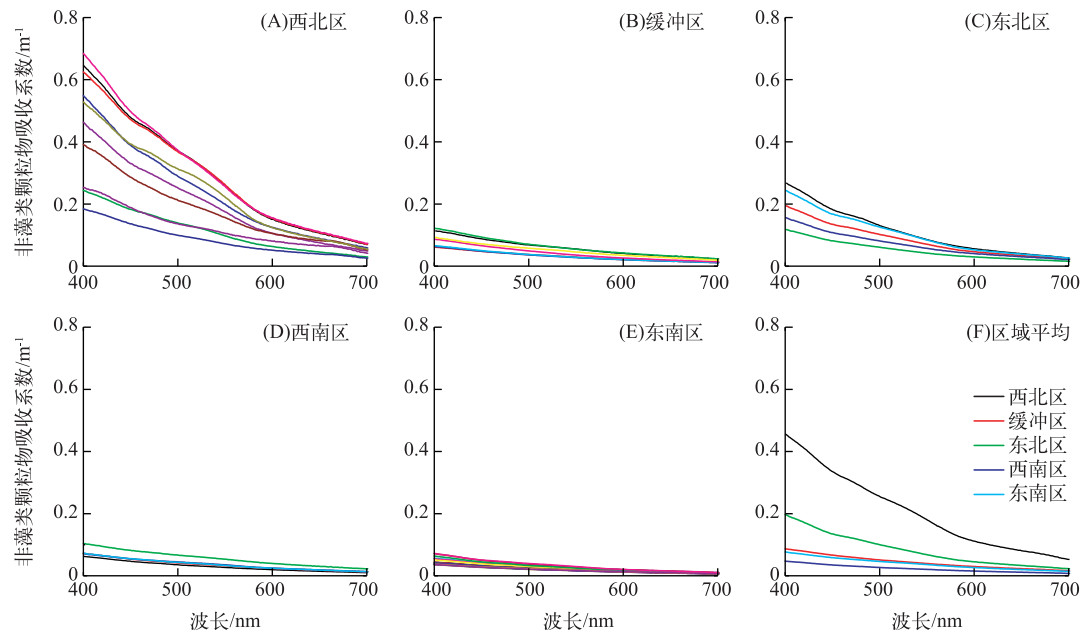


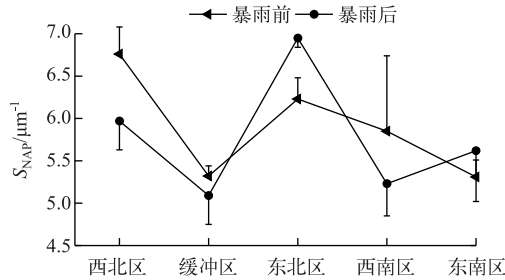
图 15 千岛湖暴雨后各区域非藻类颗粒物光谱吸收系数及各区域平均光谱吸收系数

Fig.15 Spectral absorption of NAP and its average value in different regions of Lake Qiandao after rainstorm

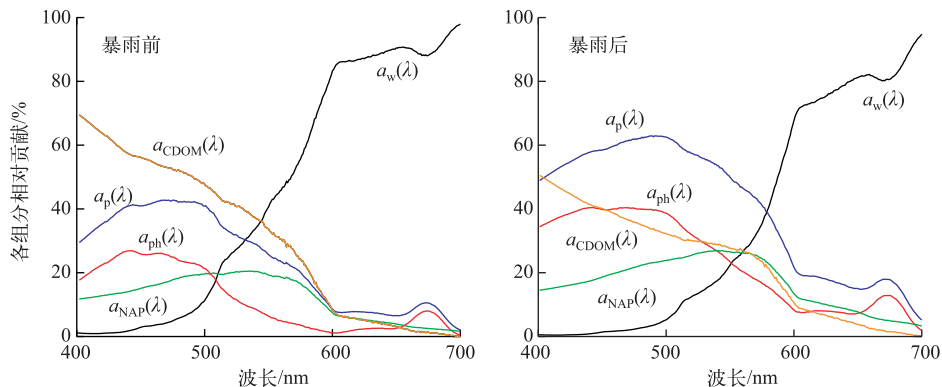
表明千岛湖大多数站点中有机颗粒物占主导.

2.3 CDOM 与颗粒物光谱吸收贡献

自然水体的总吸收主要包括纯水吸收、总颗粒物(浮游藻类颗粒物、非藻类颗粒物)吸收和 CDOM 吸收

图 16 千岛湖暴雨前、后各区域 S_{NAP} 平均值和标准差Fig.16 The average value and standard deviation of S_{NAP} in Lake Qiandao before and after rainstorm

3 个部分,其在水体总吸收的相对贡献量是研究光在水中利用率的重要特征^[33]. 本文使用的纯水吸收系数 $a_w(\lambda)$ 来自于文献[36]. 暴雨前、后各成分平均吸收光谱对总吸收光谱的相对贡献量如图 17. 暴雨前千岛湖水 550 nm 前 CDOM 吸收占主导地位,550 nm 后纯水的吸收贡献最大,其次在 500 nm 前浮游藻类吸收贡献量仅次于 CDOM,而在 650 nm 后主要是浮游藻类颗粒物吸收的贡献,CDOM 吸收和非藻类颗粒物吸收贡献几乎为零. 排除纯水的贡献,总的来看,暴雨前 CDOM 是千岛湖水体吸收的主要贡献量,其次是浮游藻类颗粒物的贡献;暴雨后 CDOM 吸收的贡献显著下降,浮游藻类颗粒物吸收贡献显著增加,非藻类颗粒物吸收也有所增强,总颗粒物吸收取代了 CDOM 吸收成为千岛湖水体中占主导地位的贡献. 这表明暴雨事件带来了大量的浮游藻类和非藻类颗粒物,随着湖泊水动力的混合过程,暴雨后总颗粒物在水体的吸收中占据了支配地位,这也说明暴雨事件导致了千岛湖水体光学特性的显著改变,给后续建立遥感生物光学模型带来了不确定性.

图 17 暴雨前、后千岛湖水体中纯水 $a_w(\lambda)$ 、CDOM 吸收($a_{CDOM}(\lambda)$)、浮游藻类颗粒物吸收($a_{ph}(\lambda)$)、非藻类颗粒物吸收($a_{NAP}(\lambda)$)和总颗粒物吸收($a_p(\lambda)$)的相对贡献比例Fig.17 Relative contribution of the absorption coefficients of pure water $a_w(\lambda)$, CDOM $a_{CDOM}(\lambda)$, phytoplankton $a_{ph}(\lambda)$, NAP $a_{NAP}(\lambda)$, and total particles $a_p(\lambda)$ to the total absorption coefficient before and after rainstorm in Lake Qiandao

为了研究特定波长处 CDOM、浮游藻类颗粒和非藻类颗粒物的相对贡献,选择 380、440、675 nm 3 个特征波段,按区域对其进行分析(图 18). 暴雨前:在紫外波段 380 nm 处,所有区域 CDOM 都占主要贡献,各数据点都集中在 CDOM 吸收比例系数为 1 的三角形顶点处;随着波段增加,在 440 nm 处浮游藻类的吸收贡献量明显加强,特别是东南区表现的最为明显;在 675 nm 处,数据点集中到浮游藻类颗粒物吸收比例系数为 1 的一侧,非藻类颗粒物的贡献也明显增加. 暴雨后:各波段上数据点分布趋势与暴雨前基本一致,但较暴雨前部分站点浮游藻类颗粒物吸收贡献增强,特别在缓冲区的贡献明显变大. 由此可知暴雨前、后各波段

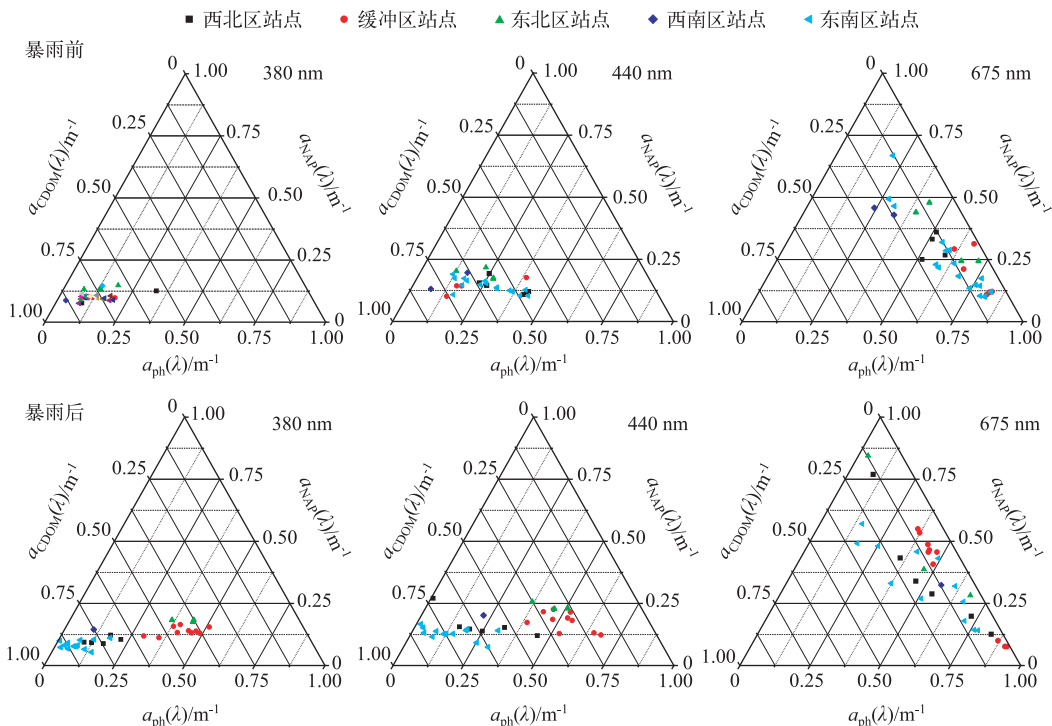


图 18 暴雨前、后千岛湖 CDOM 吸收($a_{\text{CDOM}}(\lambda)$)、浮游藻类颗粒物吸收($a_{\text{ph}}(\lambda)$)、非藻类颗粒物吸收($a_{\text{NAP}}(\lambda)$)在 380、440 和 675 nm 的相对贡献量

Fig.18 Ternary plots illustrating the contribution ratio of absorption coefficients by $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$, $a_{\text{ph}}(\lambda)$, $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ at wavelength of 380, 440, 675 nm in Lake Qiandao before and after rainstorm

对水体成分改变引起的光学性质变化的反馈是不同的,这取决于不同成分在不同波段所表现出来的光谱吸收特征.

3 结论

本文系统地研究了千岛湖暴雨前、后 CDOM、浮游藻类颗粒物和浮游非藻类颗粒物的光谱吸收特征及其空间分布,进一步分析了暴雨对千岛湖水体吸收特征的影响,主要结论如下:

1) 千岛湖作为典型的深水型内陆湖泊,其浮游藻类颗粒物和浮游非藻类颗粒物的吸收显著小于太湖等浅水型湖泊. 未遭受暴雨情况下,水体中有机颗粒物的含量高于无机颗粒物,且无机颗粒物的含量较低,水体的光学性质主要受浮游藻类主导. 但暴雨事件造成的外源性输入,导致部分区域无机颗粒物含量增加,其光学性质转变为受非藻类颗粒物主导. 非藻类颗粒物暴雨前 S_{NAP} 均值为 $5.62 \pm 0.57 \mu\text{m}^{-1}$,暴雨后为 $5.72 \pm 0.68 \mu\text{m}^{-1}$, S_{NAP} 受暴雨影响较大的区域为西北区、西南区和东北区,它们分别位于新安江、武强溪、富强溪和清平源的径流汇入区,影响最小的区域位于湖库蓄水区—西南区.

2) 暴雨不仅改变 CDOM 吸收强度,同时也影响了 CDOM 组成成分和其相对分子质量的大小. 千岛湖暴雨前、后 CDOM 组成都以富里酸为主,暴雨后 CDOM 中富里酸的含量明显高于暴雨前. 暴雨前各区域 CDOM 相对分子质量较均匀,暴雨后其相对分子质量呈现从西北河口区向缓冲区、西南区递减的趋势;暴雨事件明显提高了 CDOM 光谱吸收系数,特别是在受新安江直接影响的西北径流汇集区,由于陆源有机物的输入导致该区域 CDOM 吸收相较于暴雨之前显著增强. 同时,因为暴雨作用使千岛湖的水动力状况的短暂改变,导致 S_{CDOM} 在空间上出现明显差异,其中西北区和西南区变化最为显著,而缓冲区影响最小.

4 参考文献

- [1] Tan XP, Min H. Main problems and protection countermeasures of ecological environment in Qiandao lake. *Environmental Pollution and Control*, 2004, **26**(3): 200-203. [谭湘萍, 闵怀. 千岛湖生态环境主要问题及保护对策. 环境污染与防治, 2004, **26**(3): 200-203.]
- [2] Han X, Zhu G, Wu ZX *et al.* Spatial-temporal variations of water quality parameters in Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao) and the water protection strategy. *J Lake Sci*, 2013, **25**(6): 836-845. DOI:10.18307/2013.0607. [韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 836-845.]
- [3] Luo XB, Wen J, Luo DQ *et al.* Effect and risk assessment of flood stress on the water quality of Qian-dao Lake. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, **14**(3): 118-121. [罗献宝, 文军, 骆东奇等. 洪水胁迫因子对千岛湖水质的影响与风险评价研究. 中国生态农业学报, 2006, **14**(3): 118-121.]
- [4] Yang C, Zhu GW, Zhang YL *et al.* Estimation of lake trophic level index with high-frequency sensor parameters. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(5): 1178-1185. [崔杨, 朱广伟, 张运林等. 湖库富营养化指标的高频监测方法研究. 环境科学学报, 2014, **34**(5): 1178-1185.]
- [5] Bricaud A, Morel A, Babin M *et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic(case 1) waters—Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C13): 31033-31044.
- [6] Ambarwulan W, Salama MS, Mannaerts CM *et al.* Estimating specific inherent optical properties of tropical coastal waters using bio-optical model inversion and in situ measurements: case of the Berau estuary, East Kalimantan, Indonesia. *Hydrobiologia*, 2011, **658**(1): 197-211.
- [7] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters—A reappraisal. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(C4): 7163-7180.
- [8] Matsuoka A, Hill V, Huot Y *et al.* Seasonal variability in the light absorption properties of western Arctic waters: Parameterization of the individual components of absorption for ocean color applications. *J Geophys Res*, 2011, **116**: C02007.
- [9] Ma RH, Tang JW, Duan HT *et al.* Progress in lake water color remote sensing. *J Lake Sci*, 2009, **21**(2): 143-158. DOI: 10.18307/2009.0201. [马荣华, 唐军武, 段洪涛等. 湖泊水色遥感研究进展. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 143-158.]
- [10] Wang WM, Chen HJ, Liang SK *et al.* The influence of heavy rainfall on the community structure of planktonic diatom in Jiaozhou Bay in summer. *Marine Sciences*, 2014, **38**(2): 46-52. [王为民, 陈洪举, 梁生康等. 夏季强降雨对胶州湾浮游硅藻群落结构的影响. 海洋科学, 2014, **38**(2): 46-52.]
- [11] Li PP, Shi W, Liu QG *et al.* Spatial and temporal distribution patterns of chlorophyll-a and the correlation analysis with environmental factors in Lake Qiandao. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 568-574. DOI:10.18307/2011.0412. [李培培, 史文, 刘其根等. 千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 568-574.]
- [12] Prieur L, Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(4): 671-689.
- [13] Roesler CS, Perry MJ, Carder KL. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(8): 1510-1523.
- [14] Effler SW, Perkins MG, Peng F *et al.* Light-absorbing components in Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research*, 2010, **36**(4): 656-665.
- [15] Mitchell BG. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT). *Proceeding of SPIE*, 1990, **1302**: 137-148.
- [16] Tassan S, Ferrari GM. A sensitivity analysis of the “Transmittance-Reflectance” method for measuring light absorption by aquatic particles. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(8): 757-774.
- [17] Arar EJ, Collins GB. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. Revision 1.2, Method 445.0 Version 1.2, US Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, OH. 1997.
- [18] Zhang YL, Qin BQ, Chen WM *et al.* A preliminary study of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Lake

- Taihu, a shallow subtropical lake in China. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2005, **33**(4): 315-323.
- [19] Ledesma JIJ, Köhler SJ, Futter MN. Long-term dynamics of dissolved organic carbon: implications for drinking water supply. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**: 1-11.
- [20] 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.
- [21] Nelson NB, Siegel DA, Michaels AF. Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, **45**(6): 931-957.
- [22] Babin M, Stramski D, Ferrari GM *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(C7): 4.1-4.20.
- [23] Galgani L, Tognazzi A, Rossi C *et al.* Assessing the optical changes in dissolved organic matter in humic lakes by spectral slope distributions. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, **102**(2): 132-139.
- [24] Stedmon CA, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **51**(2): 267-278.
- [25] Keith DJ, Yoder JA, Freeman SA. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode Island: Implications for phytoplankton in coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**(5): 705-717.
- [26] Cao WX, Yang YZ, Xu XQ *et al.* Regional patterns of particulate spectral absorption in the Pearl River estuary. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(17): 1876-1882. [曹文熙, 杨跃忠, 许晓强等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式. 科学通报, 2003, **48**(17): 1876-1882.]
- [27] Wang SS, Wang YB, Fu QH *et al.* Spectral absorption properties of the water constituents in the estuary of Zhujiang River. *Environmental Sciences*, 2014, **35**(12): 4511-4521. [王珊珊, 王永波, 扶卿华等. 珠江口水体组分的吸收特性分析. 环境科学, 2014, **35**(12): 4511-4521.]
- [28] Chen Z, Li Y, Pan J. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China. *Continental Shelf Research*, 2004, **24**(16): 1845-1856.
- [29] Zhang Y, van Dijk MA, Liu M *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: Field and experimental evidence. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [30] Pérez GL, Llamas ME, Lagomarsino L *et al.* Seasonal variability of optical properties in a highly turbid lake (Laguna Chascomús, Argentina). *Photochemistry and Photobiology*, 2011, **87**(3): 659-670.
- [31] Peng F, Effler SW. Spectral absorption properties of mineral particles in western Lake Erie: Insights from individual particle analysis. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(5): 1775-1789.
- [32] Zhang YL, Qin BQ, Yang LY. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(12): 3969-3979. [张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. 生态学报, 2006, **26**(12): 3969-3979.]
- [33] Yin Y, Liu ML, Wang MZ *et al.* Coefficients of summer spectral absorption of particulate matter in Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao). *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 713-723. DOI:10.18307/2014.0509. [殷燕, 刘明亮, 王明珠等. 夏季新安江水库(千岛湖)颗粒物吸收光谱特征分析. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 713-723.]
- [34] Binding CE, Jerome JH, Bukata RP *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4): 1702-1711.
- [35] Zhang Y, Zhang B, Wang X *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **592**(1): 105-120.
- [36] Pope RM, Fry ES. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 1997, **36**(33): 8710-8723.