

DOI: 10.5846/stxb201409101787

邵田田, 宋开山, 丁智, 赵莹, 王铭, 杜嘉, 张柏. 辽河水体光学吸收特性的季节变化. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Shao T T, Song K S, Ding Z, Zhao Y, Wang M, Du J, Zhang B. Absorption Characteristics and Seasonal Variations of Optically Active Water Constituents from Liaohe River. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

辽河水体光学吸收特性的季节变化

邵田田^{1,2}, 宋开山^{1,*}, 丁智³, 赵莹¹, 王铭¹, 杜嘉¹, 张柏¹

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要:吸收特性是水体重要的光学特性,也是建立生物光学模型的基本参数。本文利用 2013 年 5 月和 9 月辽河流域水体实测数据对总悬浮颗粒物、浮游植物、非藻类颗粒物以及有色溶解有机物(CDOM)的吸收特性、季节变化进行了研究。研究表明,总颗粒物的吸收光谱曲线与非藻类颗粒物的吸收光谱基本保持一致并且与非藻类颗粒物的吸收 $[a_d(\lambda)]$ 以及浮游植物的吸收 $[a_{ph}(\lambda)]$ 都呈现显著相关。两个季节, $a_d(440)$ 均是总吸收的主要组成部分,CDOM 的吸收 $[a_{CDOM}(440)]$ 则大于 $a_{ph}(440)$ 的贡献率,但 9 月 $a_d(440)$ 的吸收所占比例较 5 月高。辽河水体非藻类颗粒物中矿物颗粒物的含量较其他一般水体要高。通过分析 5 月及 9 月的 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 发现浮游植物中辅助色素与叶绿素 a 浓度(Chla)的组成季节性变化不大,但其空间特征表现较为明显。另外,CDOM 的吸收特性与非藻类颗粒物的吸收相似,呈现出较大的空间差异性;辽河 S_{CDOM} 基本小于其它河流、湖泊、河口等水体,其 CDOM 主要由大分子物质组成。

关键词:辽河;吸收特性;颗粒物;CDOM;季节变化

Absorption Characteristics and Seasonal Variations of Optically Active Water Constituents from Liaohe River

SHAO Tiantian^{1,2}, SONG Kaishan^{1,*}, DING Zhi³, ZHAO Ying¹, WANG Ming¹, DU Jia¹, ZHANG Bai¹

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The absorption characteristics of optically active constituents (OACs) in water column are important optical properties and key parameters for bio-optical modeling. Inherent optical properties (IOPs) of OACs are mainly determined by three components, i.e., the spectral absorption of non-algal particles, phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter (CDOM). Spectral absorption properties, seasonal and spatial variability of particulates (total suspended matters (TSM), including phytoplankton and non-algal particles) and CDOM absorption characteristic were analyzed from water samples collected in May and September 2013, respectively. Compositions of CDOM and non-algal particles were also examined at the same time. The results demonstrated that most absorption curves of the total suspended particulate $[a_p(\lambda)]$ were similar to non-algal particles absorption $[a_d(\lambda)]$, showing great variations along the Liaohe River observed at the same time. Significant correlations were obtained between $a_p(\lambda)$ and $a_d(\lambda)$, especially the correlations between $a_p(440)$ and $a_d(440)$ ($R = 0.99$ both in May and September). Meanwhile, strong relationships between $a_p(\lambda)$ and the absorption of phytoplankton $[a_{ph}(\lambda)]$ were exhibited at 675 nm, with correlation coefficient (R) = 0.81 in May and $R = 0.55$ in

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2013CB430401);国家自然科学基金项目(41471290)

收稿日期:2014-09-10; 网络出版日期:2015-04-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songks@iga.ac.cn

September, respectively. Moreover, close relationships between a_p and TSM at both 440 and 675 nm were revealed while significant correlations were obtained between $a_p(675)$ and Chla for samples collected in both seasons. According to our investigation, no significant relationships were exhibited between $a_p(\lambda)$ and dissolved organic carbon (DOC). A close relationships between $a_p(\lambda)$ and inorganic suspended particulate (ISM) and organic suspended particulate (OSM) were recorded in September, while it was not the case for samples in May. Significant correlations were also yielded between CDOM and DOC concentration for samples collected in September ($R = 0.90$) at 440 nm, which was higher than that in May ($R = 0.55$). Moreover, content of mineral particulates in Liaohe River was higher than most other water bodies based on the analysis of slopes of non-algal particles absorptions. The composition of auxiliary pigments and Chla concentration in phytoplankton showed small seasonal variations but great spatial variability as indicated by the ratio of $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$. Furthermore, absorption characteristics of CDOM exhibited similar curves with non-algal particles, however showed great variability among different sampling sites. In addition, CDOM absorption slopes (S_{CDOM}) of the Liaohe River, though exhibiting greatly spatial variations, were smaller than other water bodies, which indicated that the CDOM composition of Liaohe River was inclining to have high molecular weight. Our investigation indicated that the total particulate absorption was dominated by the non-algal particles at 440 nm both in May and September. The average contribution rate of non-algal particles is 67.46% in May, while for 97.5% of water samples, the contribution rate of non-algal particles reaches up to 50% in September. Consequently, contribution rate of non-algal particles at 440 nm in September was higher than that in May for the high precipitation while contribution rate of $a_{CDOM}(440)$ was litter higher than that of $a_{ph}(440)$ in both months.

Key Words: Liaohe River; absorption characteristics; particulates; CDOM; seasonal variations

水体光学活性物质 (Optically Active Constituents, OACs) 的固有光学特性 (Inherent Optical Properties, IOPs) 具有不受光照条件影响的优点, 是基于水体辐射传输理论的生物光学模型反演各种水质参数的基础, 具有严格的物理意义, 在水色遥感中有着重要作用^[1-2]。

内陆水体的吸收系数和后向散射系数是水体的两个主要固有光学参量^[3], 其中固有光学吸收特性受 4 种物质影响: 纯水、浮游植物、非藻类颗粒物和有色溶解有机物 (Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)。在指定波段, 水体的总吸收系数等于各组分在该波段的吸收系数之和^[4], 即 $a = a_w + a_{ph} + a_d + a_{CDOM}$, 其中 a_w 、 a_{ph} 、 a_d 和 a_{CDOM} 分别代表 4 种相应物质的吸收系数。纯水对光的衰减是所有水体都共有的^[5], 因此水体固有光学吸收特性主要受制于非藻类颗粒物、浮游植物和 CDOM 的光谱吸收, 而作为水体的固有光学特性, 三者是水色遥感的生物-光学模式、光辐射传输、初级生产力估算和生态过程模拟的基本参数^[5]。不同于 I 类大洋水体, 在近岸的 II 类水体和内陆的湖泊水体中, 由于陆源的非藻类颗粒物和 CDOM 的大量输入, 导致水体的固有光学特性不再仅由浮游植物所决定^[6-7]。大量研究都比较集中于海洋 I 类水体、国外内陆水体以及国内富营养化较为严重的长江中下游的内陆湖泊^[5, 8-9], 少量研究集中于石头口门水库^[10]、官厅水库^[7]、千岛湖^[11]等污染较轻或者很纯净的水体, 而对于河流水体固有光学吸收特性的研究相对较少^[12]。河流作为连接大洋水体和内陆水体的纽带, 其固有光学特性不同于内陆湖泊, 也不同于近岸 II 类水体。

辽河水系流经沈阳、抚顺、鞍山、本溪等大中型工业城市, 随着工农业和大城市的迅速发展, 人为因素对辽河流域水环境的影响越来越大, 所产生的危害也逐年增加, 使辽河处于较为严重的污染状态^[13-14], 从而影响水体的固有光学吸收特性。因此作为东北地区南部向海输入的主要途径, 河流中的总悬浮颗粒物吸收 (非藻类颗粒物和浮游植物)、CDOM 的吸收将会影响辽河口以及渤海湾水体的固有特性, 为更好的全面理解内陆水体提供支持数据, 也为生物光学模型的发展和完善提供重要借鉴。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

辽河流域位于中国东北地区南部 ($116^{\circ} 30' - 125^{\circ} 47' E$, $38^{\circ} 43' - 128^{\circ} 30' N$), 流域面积为 22.9×10^4

km²。流域由 2 个独立水系所组成:一为东、西辽河,于福德店汇流为辽河干流,经双台子河由盘山入海,全长 1.39×10^3 km;另一水系为浑河、太子河于三岔河汇合后经大辽河由营口入海,全长 415.4 km。该区气候属于半湿润-半干旱的温带气候区,温度由南向北降低(4—7 °C),而降水量则自东向西递减(350—1 000 mm)。

1.2 野外样品的采集

于 2013 年 5 月(春季)、2013 年 9 月(秋季)对辽河流域主要河流进行重复采样,每次采集 40 组,共计 80 组数据进行辽河水体固有光学吸收特性及季节性变化的分析,具体采样点位置如图 1 和表 1 所示。

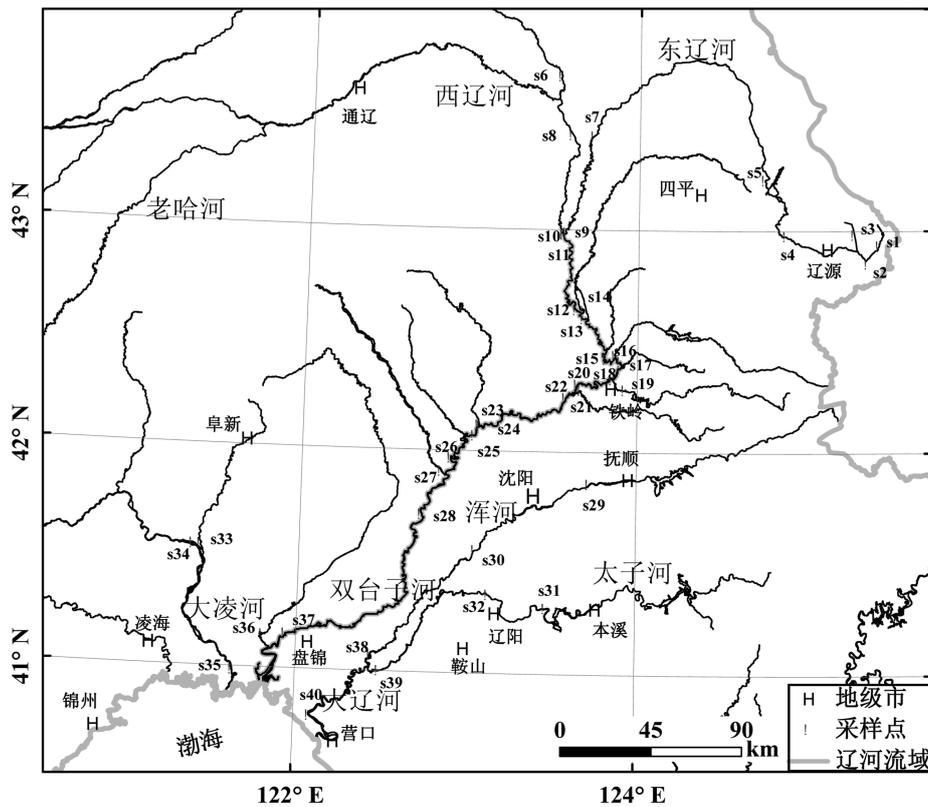


图 1 采样点位置分布示意图

Fig. 1 Map of Location of sampling stations

表 1 采样点编号及位置点

Table 1 Numbers of sampling sites and the corresponding locations

| 编号 Number | 位置点 Sites | 编号 Number | 位置点 Sites | 编号 Number | 位置点 Sites | 编号 Number | 位置点 Sites |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| s1 | 拉津河 | s11 | 东西交汇 | s21 | 凡河 | s31 | 太子河上 |
| s2 | 辽河源 | s12 | 辽河 | s22 | 辽凡交汇 | s32 | 太子河下 |
| s3 | 登杆河 | s13 | 辽河 | s23 | 秀水河 | s33 | 细河 |
| s4 | 二龙湖上 | s14 | 招苏台河 | s24 | 辽秀交汇 | s34 | 大凌河 |
| s5 | 二龙湖下 | s15 | 辽河 | s25 | 辽河 | s35 | 大凌河 |
| s6 | 新开河 | s16 | 清河 | s26 | 辽河 | s36 | 西沙河 |
| s7 | 东辽河 | s17 | 辽河 | s27 | 柳河 | s37 | 辽河 |
| s8 | 西辽河 | s18 | 柴河下 | s28 | 辽河 | s38 | 浑河 |
| s9 | 东辽河 | s19 | 柴河上 | s29 | 浑河上 | s39 | 太子河 |
| s10 | 西辽河 | s20 | 辽河 | s30 | 浑河下 | s40 | 辽河 |

在采样过程中,每个样点采集 2.5 L 水样并立刻放在车载冰箱里冷藏,送至实验室测量其光学参数等,整个测试过程需要 2—3 天。

1.3 固有光学特性物质吸收的测定

总悬浮物的吸收系数采用定量滤膜技术(QFT: quantitative filter technique)进行测定^[15],用直径 25 mm 的 GF/F(Whatman)滤膜过滤一定体积的水样,在 UV-2600 紫外分光光度计下测定其 380—800 nm 吸光度,并将各波段的吸光度减去 750 nm 波长处的吸光度来消除仪器间的差异,然后根据式(1)计算总悬浮物的吸收系数。

$$a_p(\lambda) = 2.303 \times \frac{S}{V} ODS(\lambda) \quad (1)$$

式中, $a_p(\lambda)$ 为 λ nm 处总悬浮物的吸收系数, V 为过滤的水样的体积,单位是 m^3 , S 为过滤留在滤膜上的有效面积,单位为 m^2 。

非藻类颗粒物的吸收是利用 UV-2600 紫外分光光度计测得非藻类颗粒物的吸光度,然后根据式(1)计算其吸收系数。在非藻类颗粒物的吸收测定之前,需要用 0.1% 的次氯酸钠浸泡滤膜,将滤膜上的色素溶解,并使用空白滤膜作为参比,测得其吸光度。浮游植物的吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 则是通过总悬浮物吸收系数减去非藻类颗粒物吸收系数所得,如式(2)所示。

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (2)$$

CDOM 吸收系数的测定是通过 0.22 μm 的微孔聚碳酸酯膜过滤水样后,利用 UV-2600 紫外分光光度计测得 200—800 nm 的吸光度,然后根据式(3)计算各波长的吸收系数。

$$a_{CDOM}(\lambda') = 2.303 OD(\lambda) / l \quad (3)$$

式中, $a(\lambda')$ 为未校正的吸收系数(m^{-1}); $D(\lambda)$ 为吸光度; l 为光程路径(m)。为消除过滤液中残留细小颗粒物的散射,本文用 750 nm 处吸收系数进行校正^[16],如式(4),得到校正后的吸收系数(m^{-1})。

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda') - a_{CDOM}(750)(\lambda/750) \quad (4)$$

1.4 其他参数的获取

叶绿素 a (Chlorophyll a, Chla) 浓度通过 90% 的丙酮溶液萃取,并用 UV-2600 紫外分光光度计分别测得 630、647、664 和 750 nm 处的吸光度,计算出叶绿素 a 的浓度^[17]。总悬浮颗粒物浓度(Total Suspended Matters, TSM)、无机颗粒物浓度(Inorganic Suspended Particulate, ISM)、有机颗粒物浓度(Organic Suspended Particulate, OSM)的测定采用称重法获得。溶解有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)浓度的测试基于总有机碳分析仪(日本岛津, TOC-VCPN)获得。

1.5 S 值的获取

S_{CDOM} 是 CDOM 吸收曲线的斜率,可以反映 CDOM 组成分子的大小,表征 CDOM 的来源^[18-19]。对于 S_{CDOM} 的获得主要基于吸收波谱波段以及拟合方法的选择^[20-21]。本研究选择常用波段范围 280—400 nm、280—320 nm 以及 350—400 nm,根据式(5)采用非线性拟合方法进行 S 值的求算。

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(\lambda_0) \exp[S_{CDOM}(\lambda_0 - \lambda)] \quad (5)$$

式中, $a_{CDOM}(\lambda)$ 是 CDOM 在特定波长的吸收系数(m^{-1}); $a_{CDOM}(\lambda_0)$ 是参考波段(通常选择 440 nm)的吸收系数(m^{-1})。

另外,对于 II 类水体来说,可以用式(6)表示非藻类颗粒物在波长 λ 处的吸收系数^[7]。

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[S_d(\lambda_0 - \lambda)] \quad (6)$$

其中, $a_d(\lambda)$ 表示非藻类颗粒物在波长 λ 的吸收系数(m^{-1}); λ_0 是参照波长,一般取 440 nm; S_d 是指数函数曲线斜率参数(μm^{-1})。本文采用最小二乘法拟合,建立非藻类颗粒物在 400—700 nm 吸收模型。

2 结果与分析

2.1 总悬浮颗粒物吸收特征

春、秋季辽河采样点的总悬浮颗粒物吸收系数[Absorption of Total Suspended Particulate, $a_p(\lambda)$]、非藻类

颗粒物吸收系数 [Absorption of non-algal Particles Absorption, $a_d(\lambda)$]、浮游植物吸收系数 [Absorption of Phytoplankton, $a_{ph}(\lambda)$] 的吸收光谱曲线如图 2 所示。

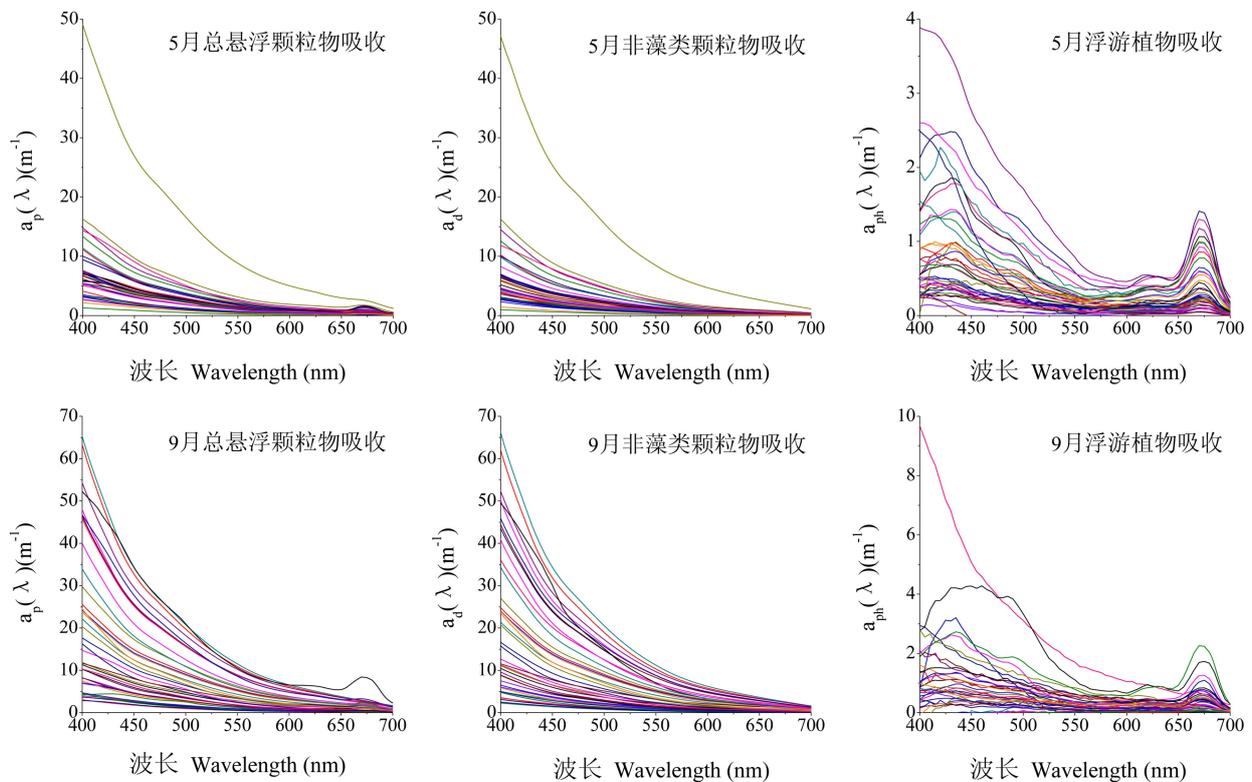


图 2 不同季相总悬浮物 [total suspended particulate, $a_p(\lambda)$]、非藻类颗粒物 [non-algal particles absorption, $a_d(\lambda)$]、浮游植物 [phytoplankton, $a_{ph}(\lambda)$] 的吸收谱特征

Fig. 2 Absorption spectrums of total suspended particulate [$a_p(\lambda)$], non-algal particles [$a_d(\lambda)$] and phytoplankton [$a_{ph}(\lambda)$] of the 40 sampling sites in different seasons

同时对比图 2 和表 2 可以发现,同一季节不同位置点 $a_p(\lambda)$ 的差异很大;不同季节相同采样点 $a_p(\lambda)$ 差异性也比较大,9 月的吸收明显高于 5 月。但是从曲线的形状来看,不同季节所有采样点的吸收系数大致随波长的增加呈现逐渐降低的趋势,但在 675 nm 附近存在不太明显的叶绿素 a 的吸收峰,这与浮游植物在该波段的特征吸收有关;而在另一个浮游植物特征吸收波段 440 nm 则观察不到吸收峰,这主要是因为非藻类颗粒物的吸收在总悬浮颗粒物的吸收中占有绝对优势(图 2),除 675 nm 附近的浮游植物强吸收波段外,非藻类颗粒物吸收在其他波段的吸收要远远大于浮游植物,致使浮游植物的吸收特征在总悬浮物的吸收中表现不明显。河流的流动性影响沉积物发生再悬浮,使得本文样品的总悬浮颗粒物的吸收曲线更接近于非藻类颗粒物的吸收,而这种颗粒物吸收类型的曲线经常出现在无机颗粒物浓度高的河流、河口、沿岸带等 II 类水体^[22-23]。

本文将 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 、 $a_d(440)$ 、 $a_d(675)$ 、 $a_{ph}(400)$ 、 $a_{ph}(675)$ 以及 $a_{CDOM}(440)$ 与水质参数 TSM、ISM、OSM、Chla 和 DOC 浓度进行相关分析(表 3)。可以看出,5 月和 9 月,总悬浮颗粒物的吸收与非藻类颗粒物的吸收都具有很强的相关性,特别是在 440 nm,相关系数均达 0.99; $a_p(440)$ 与 $a_{ph}(440)$ 虽呈显著性相关,但相关性较弱;而 $a_p(675)$ 与 $a_{ph}(675)$ 相关系数分别为 0.81(5 月)和 0.55(9 月),呈显著相关;另外, $a_p(440)$ 和 $a_p(675)$ 与 TSM 呈现显著相关, $a_p(675)$ 与 Chla 也表现出显著正相关。总悬浮颗粒物的吸收与 ISM、OSM 在 9 月份表现出显著正相关,而 5 月份不存在相关性。另外,两个季节,总颗粒物的吸收与 DOC 未表现出相关性。

2.3 非藻类颗粒物的吸收特征

水体中非藻类悬浮颗粒物主要包括矿物沉积物、非活性有机体(如排泄物、退化的藻类细胞等)以及非藻类活性有机体^[20],因此其吸收特性主要由矿物颗粒物与有机物所决定。辽河水体 $a_d(\lambda)$ 随着波长的增加呈

指数递减(图2), $a_d(440)$ 和 $a_d(675)$ 的变化范围呈现出较大的空间差异性(表2)。

表2 不同季节总悬浮物[total suspended particulate, $a_p(\lambda)$]、非藻类颗粒物[non-algal particles, $a_d(\lambda)$]以及浮游植物[phytoplankton, $a_{ph}(\lambda)$]的统计分析

Table 2 Statistical analysis of absorption of total suspended particulate [$a_p(\lambda)$], non-algal particles [$a_d(\lambda)$] and phytoplankton [$a_{ph}(\lambda)$] in different months

| 统计值 Statistic | $a_p(\lambda)$ (m^{-1}) | | $a_d(\lambda)$ (m^{-1}) | | $a_{ph}(\lambda)$ (m^{-1}) | | 时间 time |
|------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|--------------------------------|--------|------------|
| | 440 nm | 675 nm | 440 nm | 675 nm | 440 nm | 675 nm | |
| 最大值 Max | 31.15 | 2.55 | 29.29 | 1.96 | 3.25 | 1.43 | 5月 |
| 最小值 Min | 1.00 | 0.16 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | May |
| 均值 Mean | 5.38 | 0.77 | 4.55 | 0.33 | 0.83 | 0.44 | |
| 标准差 SD | 4.80 | 0.52 | 4.59 | 0.31 | 0.72 | 0.38 | |
| 最大值 Max | 40.05 | 8.48 | 39.93 | 6.75 | 5.91 | 2.29 | 9月 |
| 最小值 Min | 1.98 | 0.19 | 1.62 | 0.10 | 0.03 | 0.03 | September |
| 均值 Mean | 14.65 | 1.62 | 13.65 | 1.14 | 1.13 | 0.48 | |
| 标准差 SD | 11.78 | 1.38 | 11.36 | 1.19 | 1.22 | 0.46 | |

许多实测数据模拟表明,不同波段的非藻类吸收系数之间存在一定的关系。我们选择在水色遥感中较为重要的 440 nm 为参考波段,采用最小二乘法拟合,建立非藻类颗粒物的吸收模型(图3)。可以看出,两期数据典型样点的模拟值与实测值之间的吻合度非常好,非线性拟合的决定系数均大于 0.99,所有样点决定系数均大于 0.95。辽河水体 5 月份 $a_d(\lambda)$ 在 400—700 nm 按指数衰减规律拟合得到斜率 S_d 值的变化范围为 10.40—13.24 μm^{-1} ,均值为 11.14 μm^{-1} ;而 9 月份 $a_d(\lambda)$ 的 S_d 变化范围 8.51—13.06 μm^{-1} ,均值为 11.26 μm^{-1} 。

与国内其它研究相比,辽河 S_d 高于官厅水库(均值 6.7 μm^{-1})^[7],与巢湖(均值 11.9 μm^{-1})^[24]、太湖(均值 11.7 μm^{-1})^[5]、三峡水库(均值 11.5 μm^{-1})^[25]、石头口门水库(均值 11.78 μm^{-1} , 11.38 μm^{-1})^[10] 的 S_d 值相近,而小于滇池(均值 12.5 μm^{-1})^[26] 和珠江口(均值 12.0 μm^{-1})^[23]。Babin 等^[27] 认为,光谱斜率 S_d 的大小可能与非藻类颗粒物中所含的有机物与矿物颗粒的比例有关;而 Binding 等^[20] 则进一步确定 S_d 的大小与矿物颗粒物浓度有关,斜率越小,其浓度越高。由此可见,辽河水体非藻类颗粒物中矿物颗粒物的含量较其他一般水体要高。

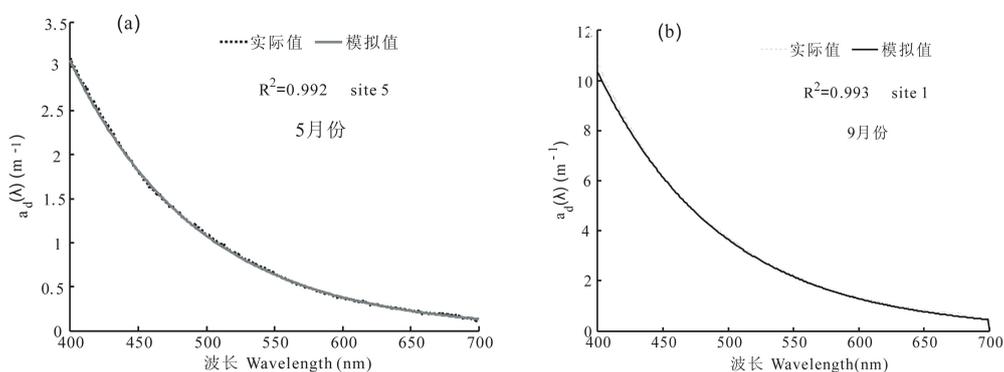


图3 典型采样点非藻类颗粒物吸收系数实测值与模拟值的对比

Fig. 3 Comparison of $a_d(\lambda)$ of measured and simulated based on selected sampling sites

已有研究表明,对于大洋 I 类水体而言,由于其非藻类颗粒物主要来源于浮游植物的降解^[23], $a_d(\lambda)$ 与 Chla 浓度存在较好的相关关系。而对于辽河流动水体来说, $a_d(\lambda)$ 与 Chla 浓度几乎不存在相关性,与 ISM、OSM 以及 DOC 的相关性较差,但与 TSM 存在显著相关性(表3),结果与昆承湖的研究类似^[28]。主要是因为悬浮泥沙等陆源性无机质输入是辽河非藻类颗粒物的主要来源,而浮游植物的降解作用所占比例较小。另外

表 3 颗粒物吸收系数与各组分浓度之间的相关性分析

Table 3 Correlations between absorption and components concentration

| 5月/9月 May/September | $a_p(440)$ | $a_p(675)$ | $a_d(440)$ | $a_d(675)$ | $a_{ph}(440)$ | $a_{ph}(675)$ | $a_{CDOM}(440)$ | TSM | ISM | OSM | Chla | DOC |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-----|
| $a_p(440)$ | 1/1 | | | | | | | | | | | |
| $a_p(675)$ | 0.73**/0.77** | 1/1 | | | | | | | | | | |
| $a_d(440)$ | 0.99**/0.99** | 0.64**/0.72** | 1/1 | | | | | | | | | |
| $a_d(675)$ | 0.98**/0.85** | 0.69**/0.95** | 0.99**/0.83** | 1/1 | | | | | | | | |
| $a_{ph}(440)$ | 0.36*/0.44** | 0.75**/0.64** | 0.22/0.34* | 0.25/0.50** | 1/1 | | | | | | | |
| $a_{ph}(675)$ | 0.20/0.083 | 0.81**/0.55** | 0.075/0.008 | 0.12/0.25 | 0.82**/0.64** | 1/1 | | | | | | |
| $a_{CDOM}(440)$ | 0.039/0.085 | -0.006/0.083 | 0.049/0.080 | 0.063/0.078 | -0.049/0.077 | -0.060/0.048 | 1/1 | | | | | |
| TSM | 0.52**/0.86** | 0.34*/0.49** | 0.53**/0.88** | 0.59**/0.62** | 0.056/0.22 | -0.011/-0.13 | 0.085/0.075 | 1/1 | | | | |
| ISM | -0.090/0.37* | -0.11/0.44** | -0.090/0.31 | -0.12/0.41** | -0.030/0.60** | -0.051/0.25 | 0.28/0.018 | -0.046/0.19 | 1/1 | | | |
| OSM | -0.080/0.37* | -0.062/0.42** | -0.084/0.31* | -0.11/0.40* | 0.004/0.57** | 0.002/0.21 | 0.30/0.015 | 0.022/0.19 | 0.93**/0.97** | 1/1 | | |
| Chla | 0.023/-0.10 | 0.59**/0.47** | -0.080/-0.16 | -0.006/0.22 | 0.66**/0.40* | 0.81**/0.85** | 0.042/-0.12 | 0.19/-0.25 | 0.015/0.099 | 0.071/0.061 | 1/1 | |
| DOC | -0.028/0.27 | -0.19/0.25 | 0.004/0.25 | -0.018/0.26 | -0.21/0.24 | -0.25/0.088 | 0.55**/0.90** | -0.19/0.26 | 0.079/0.20 | 0.072/0.22 | -0.16/-0.13 | 1/1 |

**表示在0.01水平上显著相关; *在0.05水平上显著相关

本文对特定波段(400 nm, 440 nm, 510 nm, 550 nm, 675 nm)的非藻类颗粒物的比吸收系数 $[a_d(\lambda):TSM]$ 进行计算^[23],结果如表 4。可以看出, $a_d(\lambda):TSM$ 随波长的增加而减小。辽河水体 $a_d(\lambda):TSM$ 的比值表现出较大的季节波动性,9 月份明显高于 5 月份的均值,主要原因在于 9 月份 $a_d(\lambda)$ 较 5 月份大很多(表 2,图 2),而 TSM 较为相近,导致两者的比值差距较大。另外对比前人研究发现,5 月份辽河水体 $a_d(\lambda):TSM$ 近似于美国 Erie 湖的结果^[23],小于太湖;而 9 月份较太湖高出很多。

表 4 不同季节特定波段 $a_d(\lambda):TSM$ 的统计分析 (m^2/g)

Table 4 Statistical analysis of $a_d(\lambda):TSM$ in different months at special wavelength

| 波长 (nm) Wavelength | | 400 | 440 | 510 | 550 | 675 |
|--------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5 月 | 最小值 Min | 0.0106 | 0.0067 | 0.0032 | 0.0020 | 0.0006 |
| May | 最大值 Max | 0.2537 | 0.1841 | 0.0911 | 0.0532 | 0.0096 |
| | 平均值 Mean | 0.0594 | 0.0389 | 0.0187 | 0.0112 | 0.0027 |
| | 标准差 SD | 0.0516 | 0.0374 | 0.0184 | 0.0106 | 0.0020 |
| 9 月 | 最小值 Min | 0.0068 | 0.0043 | 0.0018 | 0.0010 | 0.0002 |
| September | 最大值 Max | 2.0562 | 1.4551 | 0.6497 | 0.4030 | 0.2756 |
| | 平均值 Mean | 0.2723 | 0.1739 | 0.0830 | 0.0516 | 0.0181 |
| | 标准差 SD | 0.3893 | 0.2651 | 0.1236 | 0.0776 | 0.0442 |

2.5 浮游植物吸收特征

辽河水体浮游植物的吸收曲线变化较大(图 2),反映了浮游植物吸收呈现较大差异的空间特征。另外, $a_{ph}(\lambda)$ 主要受水体中浮游藻类的浓度及种群组成的影响,随叶绿素浓度的变化而变化。浮游植物在蓝光波段的 440 nm 附近和红光波段的 675 nm 附近存在两个吸收峰(图 2),是浮游植物的两个特征吸收波段,675 nm 的吸收是叶绿素 a 作用的结果,而 440 nm 的吸收则是叶绿素 a 和其他辅助色素的共同作用结果。因此蓝光波段与红光波段的比值 $[a_{ph}(440)/a_{ph}(675)]$ 能在一定程度上反映辅助色素与叶绿素 a 浓度的组成比例^[29]。本文 5 月 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 的变化范围为 0.14—5.35 m^{-1} (均值为 2.08 m^{-1}),9 月 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 的变化范围 0.10—9.46 m^{-1} (均值为 2.56 m^{-1}),说明浮游植物中辅助色素与叶绿素 a 浓度的组成季节性变化不大。

5 月及 9 月 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 的变化范围及均值如表 2 所示,5 月 Chla 的变化范围为 0.001—21.42 $\mu g/L$,9 月 Chla 的变化范围为 2.94—138.84 $\mu g/L$ 。而据表 3 可知,辽河叶绿素 a 浓度与浮游植物吸收系数具有显著正相关关系。前人研究结果表明浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度存在线性或非线性关系,本文研究也证实了这种关系的存在。

2.6 有色溶解有机物的吸收特征

CDOM 的光谱吸收特征与非藻类颗粒物的吸收相似,在 700 nm 之后基本为 0,而在短波段(280—500 nm)呈指数增长(图 4),并呈现出较大差异性。5 月 $a_{CDOM}(440)$ 吸收范围为 0.37—2.21 m^{-1} ,均值为 0.94 m^{-1} ,而 9 月份的变化范围为 0.33—3.09 m^{-1} (均值为 1.03 m^{-1}),两期数据 $a_{CDOM}(440)$ 的最大值均出现在 s06(新开河,隶属西辽河),而且浓度最高的几个采样点均位于西辽河流域,表现出较大的空间差异性。西辽河样点浓度较高的主要原因是西辽河流域较为干旱,径流量和降雨量较少,从而使河流中 CDOM 的浓度较高^[30]。CDOM 是溶解有机物中有颜色的部分,因而在很多研究中都可以发现 CDOM 在特定波段的吸收系数与 DOC 浓度存在非常显著的正相关^[17, 19]。本文将 $a_{CDOM}(440)$ 与 DOC 浓度进行相关分析,发现两者在 5 月和 9 月都存在显著正相关,分别为 0.55 和 0.90(表 3)。DOC 组成可以分为有色部分和无色部分,而当 DOC 中无色的部分为常数或变化不大时,CDOM 吸收系数则会与 DOC 浓度存在非常好的相关性^[31]。辽河作为流动水体,携带更多陆源的 DOC,因而含有较多的有色 DOC,无色 DOC 的含量相对较低,从而使辽河水体两个季节 CDOM 吸收系数会与 DOC 浓度存在较强的相关性。而 9 月两者的相关性较 5 月更高,原因在于 2013 年 7、8、9 月,辽河流域的强降雨导致河流径流量增加(附 1),陆源 DOC 含量更高,因而 9 月相关性更强。

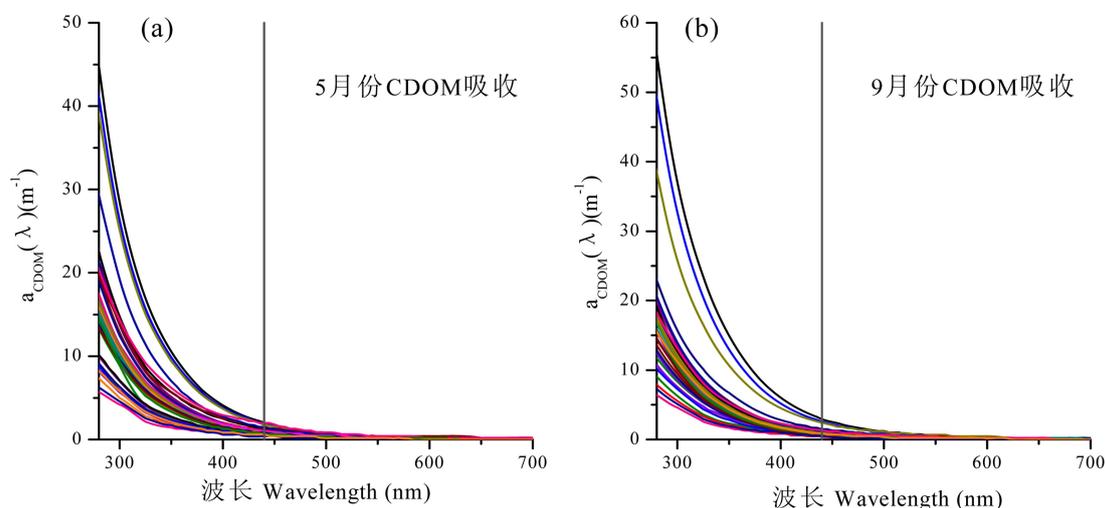


图 4 辽河水体不同季节 CDOM 吸收特征

Fig. 4 Absorption characteristics of CDOM in Liaohe River during different months

另外,本文将 $a_{CDOM}(440)$ 与其他组分及浓度进行相关分析发现,除与 DOC 具有显著正相关外,与其他所有参量几乎都不存在相关性(表 3)。 $a_{CDOM}(440)$ 与 Chla 之间较差的相关性说明辽河水体中自生 CDOM 的影响较小,而与总悬浮物的相关性说明外源物质对 CDOM 的影响也是有限,从而说明河流 CDOM 的来源及作用较为复杂。

S_{CDOM} 能够反映水体中 CDOM 分子量的大小与来源,因此本文利用 Matlab,基于最小二乘法对 280—400 nm、280—320 nm 以及 350—400 nm 的吸收曲线进行拟合求取斜率值,如图 5 所示。可以看出, S_{CDOM} 随采样位置点的空间变化而发生变化,但是 5 月与 9 月的 $S_{280-400}$ 、 $S_{280-320}$ 以及 $S_{350-400}$ 值随采样点空间位置的变化较为一致,这说明辽河水体 S_{CDOM} 受季节变化影响不大,跟采样点所处的地理位置与环境条件有关。

本文对三个波段指数函数斜率值进行统计(表 5)并与前人的研究进行比较,发现结果与河流较为相近,而低于湖泊、河口的 S_{CDOM} 。如 Spencer 等^[32] 对美国河流的 CDOM 进行拟合发现,大多数的河流 $S_{350-400}$ 值在 $0.0165-0.0183 \text{ nm}^{-1}$ 内变化,而所有河流的最大值为 0.020 nm^{-1} ,最小值为 0.0160 nm^{-1} ,稍大于辽河水体;Chen 等^[12] 发现长江 $S_{350-400}$ 值在 $0.0121-0.0236 \text{ nm}^{-1}$ 之间变化,均值为 0.0148 nm^{-1} ,低于辽河水体;Zhang 等^[33] 发现长江中下游浅型湖泊 $S_{280-400}$ 的均值为 0.02 nm^{-1} ,大于本文 5 月份和 9 月份的值;刘忠华等^[9] 通过对太湖春季水体的研究发现其 $S_{280-320}$ 在 $0.0170-0.0268 \text{ nm}^{-1}$ 之间变化,均值为 0.0203 nm^{-1} ,明显大于辽河。因此,相对于其他河流与湖泊,辽河 CDOM 组成中大分子较多,这与辽河流域水土流失严重,水体携带较多的陆源 DOM 关系密切。

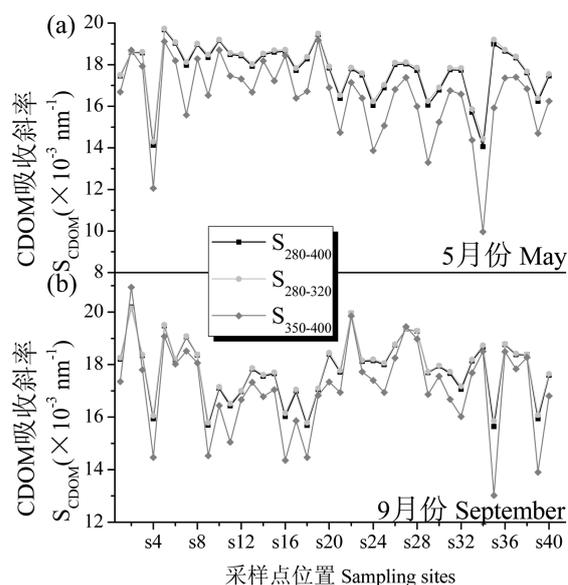
图 5 CDOM 吸收斜率 $S_{280-400}$ 、 $S_{280-320}$ 以及 $S_{350-400}$ 的时空变化
Fig. 5 Spatial variation of $S_{280-400}$, $S_{280-320}$ and $S_{350-400}$ in May and September

表 5 不同季节不同波段范围 CDOM 的吸收斜率统计分析

Table 5 Statistical analysis of S_{CDOM} in different months at special wavelength bands

| 时间 time | 波段范围 Wavelength (nm) | 最小值 Min (nm^{-1}) | 最大值 Max (nm^{-1}) | 平均值 Mean (nm^{-1}) |
|-----------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 5 月 | 280—400 | 0.0141 | 0.0197 | 0.0177 |
| May | 280—320 | 0.0143 | 0.0197 | 0.0178 |
| | 350—400 | 0.0100 | 0.0192 | 0.0165 |
| 9 月 | 280—400 | 0.0156 | 0.0202 | 0.0178 |
| September | 280—320 | 0.0158 | 0.0202 | 0.0179 |
| | 350—400 | 0.0130 | 0.0209 | 0.0171 |

2.8 光学活性物质对总吸收的贡献

决定内陆水体光吸收特性的物质主要有纯水、浮游植物、非藻类颗粒物、CDOM 四种。在给定波段,内陆水体总的吸收系数等于各组分在该波段各组分的吸收系数之和,其中,纯水的吸收是固定的^[34]。本文对 440 nm 处各种组分对总吸收的贡献进行分析,由于纯水在 440 nm 处的吸收非常小,仅有 0.00635 m^{-1} ,因此文中所指的总吸收将忽略纯水的吸收(图 6)。

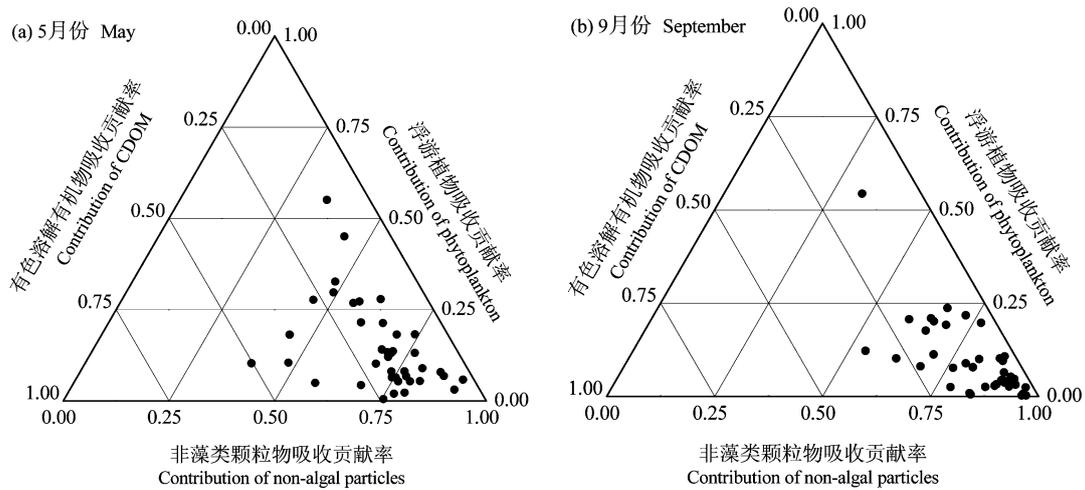


图 6 440 nm 处水中不同光学物质对总吸收的贡献

Fig. 6 Contribution of different water components to total absorption coefficients at 440 nm

可以看出,两个月份非藻类颗粒物的吸收在总吸收中占据主导地位。5 月有 38 个采样点的非藻类颗粒物吸收的贡献率在 40% 以上,32 个样点的贡献率在 50% 以上,平均贡献率为 67.46%;浮游植物的吸收对总吸收的贡献率较非藻类颗粒物的吸收低很多,平均贡献率仅为 14.45%;CDOM 的吸收对总吸收的贡献远小于非藻类颗粒物,但大于浮游植物的吸收,平均贡献率为 18.09%。相对于 5 月,9 月的非藻类颗粒物的吸收的贡献率更高,除有一个采样点的贡献率为 32.01% 外,其余所有样点的贡献率都在 50% 以上,最高达到 96.09%;浮游植物的吸收贡献率基本上低于 20%,平均贡献率为 9.54%;CDOM 的平均贡献率 10.27%,略大于浮游植物的吸收。由此可以看出,影响辽河春、秋季水体吸收特性的主要因素是非藻类颗粒物,而浮游植物和 CDOM 的影响相对较小,主要原因是辽河春季水体中叶绿素浓度相对较低,非藻类颗粒物是总悬浮物的主要组成部分;而由于 7—9 月降雨量的急剧增加,使地表径流增加,从而使得非藻类颗粒物的含量较高,其吸收贡献率较 5 月有所增加。

3 结论

本文通过辽河水体不同月份固有光学特性的分析,得到如下结论:

1) 辽河总颗粒物的吸收光谱曲线基本与浮游植物吸收光谱一致,并且具有很强的空间差异性;总颗粒物

的吸收与非藻类颗粒物的吸收以及浮游植物的吸收都呈现显著相关。两个季节,非藻类颗粒物在 440 nm 的吸收是总吸收的主要组成部分,而 $a_{CDOM}(440)$ 则大于 $a_{ph}(440)$ 的吸收。9 月非藻类颗粒物的吸收所占比例较 5 月高。

2) 通过非藻类颗粒物吸收斜率的对比分析发现辽河水体非藻类颗粒物中矿物颗粒物的含量较其他一般水体要高。

3) 两季节的 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 的变化范围比较相近(5 月均值为 $2.08 m^{-1}$, 9 月为 $2.56 m^{-1}$), 说明浮游植物辅助色素与叶绿素 a 浓度的组成季节性变化不大; 而同一季节随采样点变化较大, 说明其空间特征表现较为明显。

4) CDOM 吸收斜率(S_{CDOM})基本小于其他水体(河流、湖泊、河口), 说明辽河 CDOM 的组成主要是大分子物质, 与河流携带较多的陆源 DOM 关系密切。

致谢:感谢中国科学院东北地理与农业生态研究所水环境遥感学科组硕士研究生关莹、刘蕾、李思佳在数据采集与室内分析中给予的帮助;感谢马建行师弟在数据分析中给予的帮助和支持。

参考文献 (References):

- [1] Ma R H, Tang J W, Dai J F. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4305-4328.
- [2] Dall'Olmo G, Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*, 2005, 44(3): 412-422.
- [3] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 乐成峰, 黄昌春, 王利珍. 内陆湖泊水体固有光学特性的典型季节差异. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1117-1124.
- [4] Kirk J T O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Britain: Cambridge University Press, 1994.
- [5] 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.
- [6] IOCCG. IOCCG Report Number 5: Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Dartmouth, NS, Canada: IOCCG, 2006.
- [7] 雷霞, 郭子祺, 田野, 谢飞, 秦静欣. 官厅水库秋季悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性. *湖泊科学*, 2013, 25(6): 883-891.
- [8] 金鑫, 李云梅, 王桥, 刘忠华, 王彦飞, 张红, 尹斌, 徐祎凡, 徐昕. 巢湖水体漫衰减系数特性及其影响因子分析. *环境科学*, 2011, 32(6): 1581-1590.
- [9] 刘忠华, 李云梅, 吕恒, 檀静, 郭宇龙. 太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 438-447.
- [10] 李方, 徐京萍, 何艳芬, 张柏, 刘殿伟, 宋开山, 王宗明, 章光新. 长春市石头口门水库颗粒物光谱吸收特性. *湖泊科学*, 2009, 21(2): 280-287.
- [11] 王明珠, 张运林, 施坤, 高贇, 刘刚, 蒋浩. 千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异. *环境科学*, 2014, 35(7): 2528-2538.
- [12] Chen H, Meng W, Zheng B H, Wang C Y, An L H. Optical signatures of dissolved organic matter in the watershed of a globally large river (Yangtze River, China). *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, 43(6): 482-491.
- [13] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 胡成, 王彤, 徐成斌, 侯伟, 马放. 辽宁省辽河水生态系统健康评价. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 181-188.
- [14] 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪. 辽河流域非点源污染空间特征遥感解析. *环境科学*, 2013, 34(10): 3788-3796.
- [15] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique // *Proc. SPIE 1302, Ocean Optics X*, 137. Orlando, FL, United States, 1990: 137-148.
- [16] 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.
- [17] Song K S, Wang Z M, Blackwell J, Zhang B, Li F, Zhang Y Z, Jiang G J. Water quality monitoring using Landsat Themate Mapper data with empirical algorithms in Chagan Lake, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053506.
- [18] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, Minor E C, Kieber D J, Mopper K. 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.
- [19] Blough N V, Green S A. Spectroscopic characterization and remote sensing of non-living organic matter // Zepp R G, Sonntag C, eds. *The Role of Nonliving Organic Matter in the Earth's Carbon Cycle*. Chichester: John Wiley & Sons, 1995: 23-45.

- [20] Binding C E, John H J, Bukata R P, Booty W G. Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1702-1711.
- [21] Astoreca R, Rousseau V, Lancelot C. Coloured dissolved organic matter (CDOM) in Southern North Sea waters: Optical characterization and possible origin. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(4): 633-640.
- [22] Vaehaetalo A V, Wetzel R G, Paerl H W. Light absorption by phytoplankton and chromophoric dissolved organic matter in the drainage basin and estuary of the Neuse River, North Carolina (U.S.A). *Freshwater Biology*, 2005, 50(3): 477-493.
- [23] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 黄良民, 张建林. 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.
- [24] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 173-177.
- [25] 盖利亚, 刘正军, 张继贤. 三峡坝区水体吸收系数的特征研究. *遥感学报*, 2010, 14(2): 313-332.
- [26] 张红, 黄家柱, 李云梅, 吕恒, 吴传庆, 金鑫, 王彦飞, 尹斌. 滇池水体光学物质的吸收特性研究. *环境科学*, 2011, 32(2): 452-463.
- [27] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, Claustre H, Bricaud A, Obolensky G, Hoepffner N. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978—2012), 2003, 108(C7), doi: 10.1029/2001JC000882.
- [28] 柳彩霞, 郭子祺, 张宝钢, 雷霞, 马茵驰. 太湖流域昆承湖春季颗粒物和有色可溶性有机物吸收特性. *湖泊科学*, 2011, 23(5): 773-782.
- [29] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 刘胜, 张建林. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化. *热带海洋学报*, 2005, 24(5): 1-10.
- [30] Sobek S, Tranvik L J, Prairie Y T, Kortelainen P, Cole J J. Patterns and regulation of dissolved organic carbon: An analysis of 7,500 widely distributed lakes. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(3): 1208-1219.
- [31] Chen Z Q, Li Y, Pan J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1845-1856.
- [32] Spencer R G M, Butler K D, Aiken G R. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(G3): G03001, doi: 10.1029/2011JG001928.
- [33] Zhang Y L, Qin B Q, Zhang L, Zhu G W, Chen W M. Spectral absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(3): 451-459.
- [34] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380—700 nm) of pure water. (II). Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8710-8723.