第 15 卷第 3 期　　湖 泊 科 学　　Vol.15, No.3
2003 年 9 月　　Journal of Lake Sciences　　Sep., 2003

湖泊中有色可溶性物质对近紫外及蓝光衰减的影响*

杨顶田[1,2] 陈伟民[1] 吴生才[1,2] 朱广伟[1] 张运林[1,2] 曹文熙[3]

（1:中国科学院南京地理与湖泊研究所，南京 210008;
2:中国科学院研究生院 100039; 3: 中国科学院南海海洋研究所，广州 510301）

提 要　研究巢湖（藻型湖泊）和龙感湖（草型湖泊）的有色可溶性物质（CDOC）对近紫外及蓝光衰减的影响时发现：巢湖水体中可溶性有机碳含量比龙感湖大．2 个湖泊中来源不同的可溶性有机碳对光的吸收极其相似，只是在量上有差异．在巢湖水体中，光的衰减曲线在 355-400nm 之间有一个峰，且 *Kd* 值较大，而在龙感湖水体中，光的衰减曲线在 500nm 以下时随着波长的递减而增加．从 CDOC 对 *Kd* 的贡献来看，它们之间最大的相关是在 355nm 左右，这是悬浮质、叶绿素以及 CDOC 共同作用的结果．

关键词　巢湖　龙感湖　有色可溶性物质　光衰减
分类号　P341

有色可溶性物质（CDOC），是指由水生生物分泌的、藻类和水生高等植物组织在水中腐烂而形成溶解在水中的以及流域进入水体中的有机物质，包含腐殖酸、邻苯二酚等．有色可溶性物质是总可溶性有机碳（TDOC）中的主要成分．有色可溶性物质在水体中属于惰性物质，在水环境中具有良好的保守性，有极其稳定的性质[1]．有色可溶性物质的光吸收直接和间接地减少了浮游植物的光合作用[2]，严重地干扰了光学遥感确切估算的海洋初级生产力和海洋泥沙含量，它能够把其它几乎无共同性的学科联系起来[3]．水体中有色可溶性物质的重要性在于，这些物质对光谱的长波波谱吸收很少，但对偏紫光谱吸收较多[4]．

在国外，对于有色可溶性物质对光衰减的研究，可以追溯到 1966 年[5]，近年来，随着海洋光学遥感的发展，加快了对海水有色可溶性物质的研究[6-12]，如开展的有色可溶性物质与浮游植物间的吸收比，有色可溶性物质对水色的影响，沿岸水体有色可溶性物质的荧光效应应用于海水交换强度和周期的研究等等；在国内，对有色可溶性物质的研究很少，且集中在海洋水体中[1, 3]，对于湖泊中有色可溶性物质对光的影响尚未见有报道．本文主要研究不同类型湖泊中有色可溶性物质的浓度，以及其对光的吸收特征，进而研究其在水体中光谱衰减所占的份量，找出有色可溶性物质与近紫外及蓝光衰减之间的关系，为进一步研究淡水水体中有色可溶性物质的作用打下基础．

1 材料与方法

每个采样点的采样以上、中、下三层作为采水层，上层在 0.5m 左右，下层以离底层

* 中国科学院知识创新工程重大项目（KZCX1-SW-12）、国家自然科学基金（40076012）联合资助.
2002-12-23 收稿；2003-04-21 收修改稿. 杨顶田，男，1969 年生，博士，现在中国科学院南海海洋研究所（510301）工作.

0.5m 左右，中层根据水体的深度而定． 野外观测所用的仪器为 MACAM 公司的 SR9910 型水下分光光谱仪，配以 4 m 的石英光纤．光谱的测定范围在 280-750nm 内，波谱间隔为 5 nm，每观测一次需 40 s 左右．仪器的灵敏度在 10^{-6} μE/(m^2· s)级，绝对精度在±5%．采集数据前将仪器进行校正，每次采集数据后将仪器擦净，并用擦镜纸将镜面拭干．CDOC 对光吸收的测定是将湖水用 Whatman 公司的 GF/F 滤纸过滤，放在紫外分光光度计下在 240-800nm 范围内进行检测．可溶性总有机碳(TOC) 、可溶性总碳(TC)、可溶性总无机碳(TIC)的测定是将湖水用 Whatman 公司的 GF/F 滤纸过滤后用 1020 型 TOC 仪（O.I.分析仪器公司，范围 0.5-500mg/kg，精确度 3% RSD）直接进行检测．

2 结果

2.1 采样点的设置及样点概况

在安徽巢湖（2002 年 10 月 11 日）和龙感湖（2002 年 10 月 13 日）进行布点．巢湖的样点设置为 C1（117° 23′ 48″ E，31° 39′ 53″ N），C2（117° 24′ 24″ E，31° 35′ 48″ N），C3（117° 36′ 13″ E，31° 31′ 55″ N），C4（117° 45′ 01″ E，31° 35′ 30″ N）．在样点 C4 水较清，无藻华，但在 C4 采样点至 C3 采样点的途中可以见到条带状黄色水华，水色在 16 左右；在 C3，C2 和 C1 采样点均出现水华．龙感湖的样点设置主要为 L1（116° 03′ 39″ E，29° 56′ 14″ N），L2（116° 07′ 02 ″ E，29° 56′ 12 ″ N），L3（116° 12′ 19″ E，29° 57′ 23″ N）；采样点的水质状况较好，在 L1 采样点可以见到大量的高等水生植物，在 L2 采样点和 L3 采样点虽未见到沉水植物，但水质较好．采样时水体中的基本物理参数及水化学指标见表 1．

表 1 采样时巢湖、龙感湖水体中基本物理化学参数

Tab.1 Some physico-chemical characteristics of Chao Lake and Long Lake

点位	表层温度(℃)	透明度(cm)	风向	风速(m/s)	电导率(mS/m)	TDS(mg/L)	水深(m)	底泥深(m)	pH
C1	25.0	30	0	0	262	125	2.7	1.0	8.38
C2	21.8	40	0	0	250	119	3.3	1.0	8.15
C3	22.0	45	0	0	241	115	3.8	3.0	8.36
C4	22.1	60	90	2.8	265	126	3.4	0.6	7.90
L1	21.7	170	0	0	192.8	92	2.52	1.0	7.36
L2	22.3	100	120	0.5	198.7	94	2.80	0.5	8.4
L3	22.9	100	45	3.5	169.6	80	2.76	0.5	8.25

2.2 各采样点水体中可溶性 TC、TIC、TOC 含量

水样经过 Whatman 公司 mGF/F 滤纸过滤，所测的是可溶性 TC、TIC、TOC 含量，大量的在浮游植物、浮游动物、以及细菌及其它一些悬浮质中的碳不包括在内．从表 2 中看出，龙感湖与巢湖水体中的可溶性 TC 相差不大，但其中的可溶性有机碳和可溶性无机碳的相差较大．巢湖水体中可溶性 TC 含量的平均值在 23.767mg/L，龙感湖水体中可溶性 TC 含量的平均值在 22.823 mg/L，相差 0.944mg/L；巢湖水体中可溶性 TOC 含量的平均值在 9.83mg/L，龙感湖水体中可溶性 TOC 含量的平均值在 7.133 mg/L，相差 2.697mg/L．龙感湖中的可溶性有机碳浓度明显比巢湖中的可溶性有机碳浓度要小，而无机碳比巢湖要大．

表 2 巢湖、龙感湖各采样点水体中可溶性 TC、TIC、TOC 含量　　单位: mg/L

Tab.2 The dissolved TC, TIC, TOC cocentrations in samples in Chaohu Lake and Longgan Lake

项目	C1	C2	C3	C4	L1	L2	L3
TC	22.270	24.548	24.567	23.694	23.780	21.113	22.754
TIC	14.106	13.886	13.825	14.414	15.663	16.21	14.369
TOC	8.164	10.661	10.741	9.28	8.116	4.903	8.385

2.3 有色可溶性物质（CDOC）对光谱的吸收

水体中含有的有色可溶性物质（CDOC）对 500nm 以下的光谱吸收较大[2]，同时也是保护水体中生物免受紫外线伤害的重要物质[13]．黄质对光谱的吸收随着波长的加大而减弱，根据这种关系，Bricaud．*et al*[8]在 1981 年提出如下的公式:

$$a(l)=a(l_0)\exp[S_k(l_0-l)]$$

式中，α(λ)是指波长在 λ nm 的吸收系数，λ_0是参照波长，S_k是决定曲线形状的物理量．

从实验结果看，水体中的 DOC 对光谱的吸收主要在 450nm 以下，并且波长越长，其吸收强度越小，呈现指数量级衰减，而对 500nm 以上的波长光吸收较少，从图 1 可以看出，龙感湖的 L1 点水体中 CDOC 对紫外光部分的吸收高于 L2 样点，而巢湖的四个采样点水体中的 CDOC 对紫外光谱部分的吸收相差不大（图 2）．水体中来源不同的 CDOC，对光谱吸收的曲线极为相似的，由此可见，虽然 CDOC 成分相当复杂，但其光谱特性还是相似的．

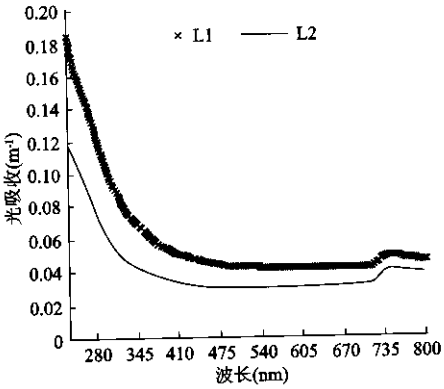

图 1 龙感湖采样点水体中 CDOC 的光谱吸收

Fig.1 Spectrum absorbance of CDOC in samples, Longgan Lake

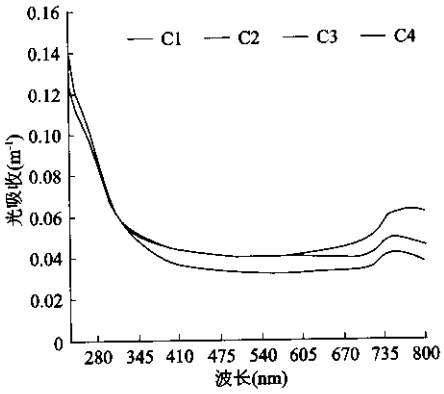

图 2 巢湖采样点水体中 CDOC 的光谱吸收

Fig.2 Spectrum absorbance of CDOC in samples, Chaohu Lake

2.4 各采样点的 K_d值

在水体中，光的衰减与水体深度呈现指数关系[1]

$$E_d(Z)=E_d(0)\exp[-K_dZ]$$

将式子的两端取自然对数并化简得:

$$K_d=z^{-1}\ln[E_d(0)/E_d(z)]$$

由于表面向下辐射的光能测定较难把握（波浪），所以测得的数据是以恰在水面下与

水下 1 m 处的下行辐照度比值（E_d（0^-m）/E_d（1m））几次测得的平均值为准．并测定水面上的下行辐照度（E_d（0^+m））的值，根据 E_d（0^-m）/E_d（0^+m）值为 96%（风速小于 5m/s，能见度大于 5km，太阳角度大于 46°）[14]，对 E_d（0^-m）值进行校正．

从图 3、图 4 看出，总体上巢湖水体中紫外光的衰减较龙感湖水体中紫外光的衰减要大．巢湖水体中，K_d最大值在 11.8 左右，最小值在 1.44 左右；龙感湖 K_d最大值在 8.8 左右，最小值在 0.9 左右；在巢湖中，在 350-400nm 之间有一个峰，而在龙感湖水体中，波长越短，衰减越快．在巢湖水体中，透明度与光衰减之间的关系较为明显，在透明度最大的 C4 点其 K_d值最小，而透明度最小的 C1 点，K_d值相对最大．

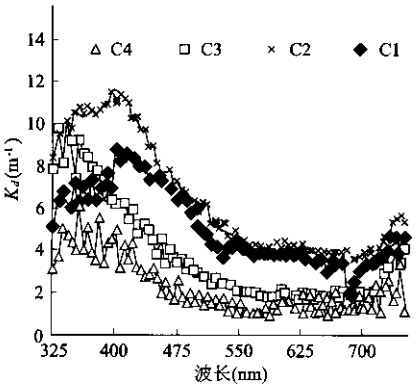

图 3 巢湖采样点的光谱衰减

Fig.3 The K_d in water of Chaohu Lake

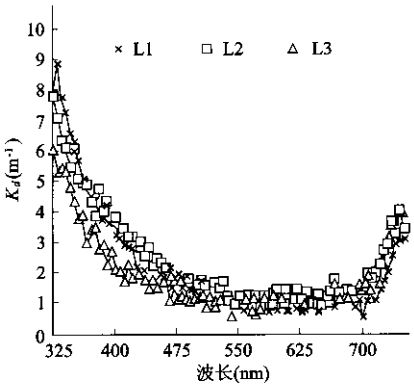

图 4 龙感湖采样点的光谱衰减

Fig.4 The K_d in water of Longgan Lake

2.5 CDOC 的含量与水体中光衰减之间的关系

光在水体中的衰减主要是由于水体中叶绿素、有色可溶性物质、悬浮颗粒以及水本身对光的吸收和散射．由于 CDOC 对 500 nm 以下光谱的吸收较大，本文对 500nm 以下的光谱与 CDOC 的含量之间的相关性进行了研究．从图 5 可以看出，CDOC 与光谱衰减之间的相关性最好在 355nm，相关值达到 0.71．从图 6 可以看出，随着 CDOC 含量的增高，K_d值也相对增高，呈现线形的增长关系．

3 讨论

通过研究不同水体中 CDOC 含量对近紫外及蓝光衰减的影响，结果表明，由于水体中悬浮质、浮游植物以及其它因素的影响，CDOC 对 355 nm 左右光衰减的相关性最大，这也是巢湖水体中 Kd 值在紫外部分有一个吸收峰的主要原因．由于 CDOC 对近紫外及蓝光的吸收，在含 CDOC 较高的水体中，用 440nm 与 550nm 之间的关系[4]来计算叶绿素 a 的含量已经离真实值之间相差较远．取而代之的是 704nm 和 779nm 的光谱[15、16]，由于红外光较弱，给测定的准确性带来一定的困难．

在龙感湖中，L1 采样点水体中 CDOC 含量较高，可能是由于在 L1 采样点有大量的沉水植物，由于实验时已经是 10 月中旬，沉水植物开始衰败而腐烂分解，而 L2 未见到有沉水植物，因而 CDOC 的含量较少．在巢湖中，各采样点的 CDOC 相对较为平均，可能是由于

湖流把湖水充分混合的缘故．

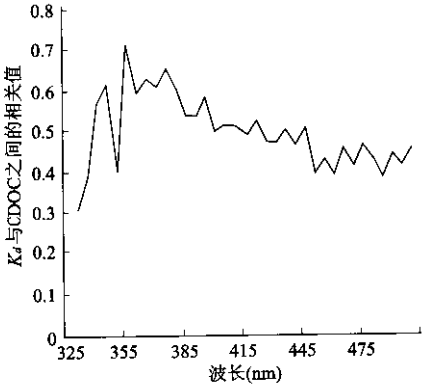

图 5 不同波长光 K_d 与 CDOC 之间的相关性

Fig.5 Relationship between K_d and CDOC at 355nm

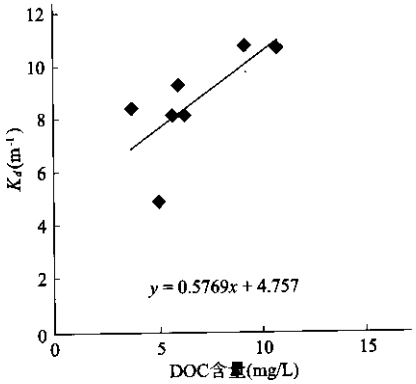

图 6 355nm 波长光 K_d 与 CDOC 的相关性

Fig.6 Relationship between K_d and CDOC at 355nm

一般的，在内陆水体中有色可溶性物质（CDOC）的含量较海水中要高[4]，这是由于湖泊面积较小，且较容易接受雨水冲刷而带来陆地上的有色可溶性物质．但在草型湖泊（龙感湖）中，CDOC 的含量较藻型(巢湖)湖泊水体中的含量要低，主要是草型湖泊中高等植物的分解较慢而藻型湖泊中低等藻类分解较快的缘故[17]．藻型湖泊中 CDOC 的较高含量，造成短波长的光在水体中衰减较快，这一方面减少了紫外光对水体生态系统的影响，另一方面，有利于上层藻类特别是具有气囊的微囊藻大量生长繁殖；藻类能够较快地运用有机营养物质，高 CDOC 为其快速生长提供了必要的条件．藻类的生长周期短，分解迅速，又加剧了水体中可溶性 CDOC 浓度的增大，这样反过来又促进了藻类的生长繁殖，而形成了有机可溶性物质循环．而草型湖泊中高等植物的生长周期较长，其分解也较为缓慢，同时在其上又有较多细菌、附着藻类以及其他微生物的吸附，也加快了对水体中 CDOC 的分解和吸收，因此，草型湖泊中的 CDOC 的浓度较低．

本次测定的是典型草型湖泊与藻型湖泊中的光谱分布，它们之间的差异性的反映是相当成功的，但时间已是 10 月，草型湖泊中的沉水植物有的已经开始枯萎，在靠近沉水植物区域的水体中 CDOC 已经开始升高，这就减小了草、藻型湖泊之间的差距．此外，本次测定时间较短（仅 10d 左右），测定的位点也较少，以后还应该加长测定时间，增多采样点数，选择不同的季节进行测定，以便更好反映草、藻型湖泊中 CDOC 的光谱特性．

致谢　范成新研究员，胡志新在测定采样时给予热情的帮助，在此表示感谢！

参 考 文 献

1　张绪琴，吴永森，张士魁等．胶州湾海水有色可溶性物质荧光分布的初步研究．遥感学报，2002，(6)：229-232

2　Michael T Arts, Richard D.Robarts, Furnie Kasai, *et al*. The attenuation of ultraviolet radiation in high dissolved organic carbon waters of wetlands and lakes on northern Great Plains. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45(2):292-299

3　Zhang X Q, Zhang S K, Wu Y S. Progress in research on yellow substance in sea water. *Journal of Oceanography of Huanghai &BoHai*, 2000,18(4):89-92

4 Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press,1994

5 Kalle K. The problem of the Gelbstaff in the sea. *Oceanogr Mar Brol Aruse Rev*, 1966,4:91-104

6 Morel A, *et al.* Analysis of variations in ocean color. *Limnol Oceanogr*, 1977,22(4):709-722

7 Vodacek A, *et al.* The use of in situ and airborne fluorescence measurements to determine UV absorption coefficients and DOC concentration in surface water. *Limnol Oceanogr*, 1995,40:411-415

8 Bricaud A, Moral, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of sea (yellow substance) in the UV and visible domain. *Limnol Oceanogr*, 1981,26(1):43-43

9 Ferrari G M, *et al.* Evaluation of the inflence of yellow substance absorption on the remote sensing of water quality in the bay of Naples: a case study. *Int J Remote Sensing*,1992,13(12):2177-2189

10 Hoge F E, *et al.* Inherent optical properties of the ocean: Retrival of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from fluorescence measurements. *Limnol Oceanogr*,1993,38(7):1394-1402

11 Hojerslev N K. Origin of the Kattegat waters, SPTE proceedings, Ocean Optics Meeting , Bergen,Norway,1994

12 Michael T Arts, Richard D Robarts, Furnie Kasai, *et al.* The attenuation of ultraviolet radiation in high dissolved organic carbon waters of wetlands and lakes on northern Great Plains. *Limnol Oceanogr*,2000, 45(2):292-299

13 Morris D P, Zagarese H, Williamson C E, *et al.* The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon. *Limnol.Oceanogr*, 1995,40:1381-1391

14 Gregg W W, Carder K L. A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmospheres. *LimnolOceanogr*, 1990,35:1657-1675

15 Herman J Gons. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland water. *Enviromental Science & Technology*. 1999,33(7):1127-1132

16 杨顶田，陈伟民，陈宇伟等. 太湖梅梁湾水体中初级生产力的光学检测. 湖泊科学，2002,14（4）：363-368

17 Verhoevena J T A, Artsa H H M. Carex litter decomposition and nutrient release in mires with different water chemistry. *Aquatic Botany*, 1992,43 (4) :365-377

The Effects of CDOC on the Attenuation of Close Ultraviolet and Blue Light in Chaohu Lake and Longgan Lake

YANG Dingtian[1,2], CHEN Weimin[1], WU Shengcai[1,2],
ZHE Guangwei[1], ZHANG Yunlin[1,2] & CAO Wenxi[3]
(1:Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China;
2: Graduate School of CAS, Beijing 100039, P.R. China; 3: Institute of South China Sea, CAS, Guangzhou 510301, P.R. China)

Abstract

The effects of CDOC on the attenuation of close ultraviolet and blue light in Chaohu Lake and Longgan Lake were studied. Results revealed that the difference of soluble TC in two lakes was not significant, but CTOC in Chaohu Lake was larger than that of Longgan Lake. The absorb curve of CDOC with different sources was similar except for difference in quantity. In Chaohu Lake, there could be observed a peak between 355-400nm on the attenuation curve and K_d was larger, while in Longgan Lake, the attenuation curve was increased with decreasing wavelengths under 500 nm. The best relationship between K_d and CDOC was at 355 nm as the result of co-effect of suspended solids, Chlorophyll and CDOC.

Keywords: Chaohu Lake; Longgan Lake; CDOC; light attenuation