环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷 第5期
2024年 5月 15日

目 次

白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源

孟佳靖[1]，窦红[2]，陈哲[1]，周石磊[1*]，底怡玲[1]，武辰彬[1]，王晨光[1]，张家丰[1]，崔建升[1]

（1. 河北科技大学环境科学与工程学院，河北省污染防治生物技术实验室，石家庄 050018；2. 石家庄市环境监控中心，石家庄 050018）

摘要： 溶解性有机物（DOM）是全球最大的有机碳储存库，在天然水体的生物地球化学循环中起着至关重要的作用. 河流是连接源头与受纳水体的过渡区，是进行DOM交换的关键环节. 因此，运用紫外-可见光谱技术（UV-vis）和三维荧光光谱技术（EEMs）结合平行因子分析法（PARAFAC），分析了夏季汛期白洋淀流域府河、小白河、白沟引河和瀑河水体中溶解性有机物的光谱特征及其来源. 结果表明，府河和小白河水体的a_{245}和a_{355}显著高于白沟引河和瀑河；E_2/E_3显示入淀河流水体DOM相对分子质量大小为：瀑河 > 白沟引河 > 府河 > 小白河. 三维荧光通过PARAFAC共解析出3种组分，分别为类酪氨酸（C1）、陆源类腐殖质（C2）和类色氨酸（C3）；各荧光组分间不存在差异（$P > 0.05$），C2和C3组分在不同入淀河流间存在差异（$P < 0.05$）；易降解类蛋白质组分（C1 + C3）占比高于类腐殖质组分C2. 各入淀河流自生源指数BIX都大于1，腐殖化指数HIX都小于4，表明入淀河流水体自生源特征明显，腐殖化程度较弱；府河水体具有最高的FI指数（1.96 ± 0.25）和最低的HIX指数（0.46 ± 0.08），且沿入淀河流方向自生源特征逐渐加强，表明府河水体呈现更高的内源特征. 经入淀河流水体DOM的荧光组分与特征参数相关性分析得出，府河水体与小白河水体相关性呈现相似关系，白沟引河水体与瀑河水体呈现相似关系；各入淀河流水体DOM的荧光组分与水质参数的相关性呈现明显差异，并且与水体氮、磷关联较强；经多元线性回归分析，各入淀河流在C1组分之间不存在显著差异，在C2组分和C3组分之间存在显著差异. 综上所述，通过对夏季汛期入淀河流水体的DOM光谱特征及来源的研究，进一步认识了白洋淀入淀河流的碳循环过程.

关键词： 白洋淀；入淀河流；溶解性有机物（DOM）；紫外-可见光谱（UV-vis）；三维荧光光谱（EEMs）

中图分类号： X522　**文献标识码：** A　**文章编号：** 0250-3301（2024）05-2640-11　**DOI：** 10.13227/j.hjkx.202304118

Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season

MENG Jia-jing[1], DOU Hong[2], CHEN Zhe[1], ZHOU Shi-lei[1*], DI Yi-ling[1], WU Chen-bin[1], WANG Chen-guang[1], ZHANG Jia-feng[1], CUI Jian-sheng[1]

(1. Hebei Key Laboratory of Pollution Prevention Biotechnology, College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Shijiazhuang Environmental Monitoring Center, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: DOM is the largest reservoir of organic carbon in the world, and it plays a crucial role in the biogeochemical cycles of natural water bodies. A river is a transition area connecting source water and receiving water that controls the DOM exchange between them. Therefore, in this study, ultraviolet visible spectroscopy (UV-vis) and three-dimensional fluorescence spectroscopy (EEMs) combined with parallel factor analysis (PARAFAC) were used to analyze the spectral characteristics and sources of dissolved organic matter in the Fuhe River, Xiaobai River, Baigouyin River, and Puhe River of Baiyangdian. The results showed that a_{245} and a_{355} in the Fuhe River and Xiaobai River were significantly higher than those in the Baigouyin River and Puhe River. E_2/E_3 showed that the DOM relative molecular mass of the inflow river water body was Puhe River > Baigouyin River > Fuhe River > Xiaobai River. Three components, tyrosine-like (C1), terrigenous humus (C2), and tryptophan-like (C3), were determined using three-dimensional fluorescence through PARAFAC. There was no difference among the fluorescence components (P>0.05), but there were differences among the C2 and C3 components (P<0.05). The proportion of easily degradable protein-like components (C1+C3) was higher than that of humus-like components (C2). The autogeny index BIX was greater than 1, and the humification index HIX was less than 4, indicating that the autogeny characteristics of the river bodies were obvious, and the humification degree was weak. The FI index was the highest (1.96±0.25), and the HIX index was the lowest (0.46±0.08), and the self-generated source characteristics gradually strengthened along the direction of the river entering the lake, indicating that the water body of the Fuhe River showed higher endogenous and autogenic characteristics. Based on the correlation analysis of fluorescence components and characteristic parameters of DOM, the correlations between the Fuhe River and Xiaobaihe River and between the Baigouyin River and Puhe River bodies were similar. The correlation between fluorescence components of DOM and water quality parameters of each lake was significantly different, and it was strongly correlated with nitrogen and phosphorus in water. According to multiple linear regression analysis, there was no significant difference among C1 components, but there was a significant difference between C2 and C3 components. In summary, the carbon cycle process of Baiyangdian Lake was further understood through the study on the DOM spectral characteristics and sources of the inflow river waters in the summer flood season.

Key words: Baiyangdian Lake; inflow rivers; dissolved organic matter(DOM); ultraviolet-visible spectroscopy(UV-vis); three-dimensional fluorescence spectroscopy(EEMs)

收稿日期： 2023-04-14；**修订日期：** 2023-06-26

基金项目： 国家自然科学基金项目（51909056）；河北省自然科学基金项目（E2021208011）；河北省研究生创新能力培养项目（CXZZSS2023090）；大学生创新创业项目（202210082010，202204149）

作者简介： 孟佳靖（1999~），女，硕士研究生，主要研究方向为天然水体DOM的特征解析，E-mail：mjj84040225@163.com

* 通信作者，E-mail：ZSLZhouShilei@126.com

溶解性有机物是一种复杂的有机化合物，主要由类蛋白物质(类色氨酸、类酪氨酸等)和类腐殖质(类富里酸等)组成[1,2]，具有影响水环境中的营养物质转化与碳循环的作用[3,4].天然水体DOM主要来自于土壤中类腐殖质、动植物死亡降解等的陆源输入以及浮游植物释放、浮游生物残体降解等的内源贡献[5].河流[6]是连接陆地与江、海、湖泊之间[7]的过渡区，在碳传递过程中发挥着重要作用.河流DOM的变化与流域周边土壤类型、人类活动以及城市污水排放有关[8].此外，水体中微生物的降解也会使河流的DOM发生变化[9].

白洋淀是我国华北地区最大的湿地系统，素有“华北之肾”的美誉[10]，具有一定自我调节能力，且受入淀河流影响较大，其特殊性直接影响雄安新区水环境安全及生态文明建设[11].经相关资料显示，为维持白洋淀的生态功能，将黄河水、南水北调水、水库水以及再生水汇入不同入淀河流对白洋淀淀区水体进行补给[11]，造成不同来源的入淀河流水质情况错综复杂.例如，宁成武等[12]在研究夏季巢湖溶解性有机质中发现南淝河作为合肥市纳污河流，受城市污水排放的影响，其腐殖化程度和内源特征明显不同于其他入湖河流；张紫薇等[13]研究的岗南水库沉积物DOM发现其具有低腐殖化、强自生源的特征，而张柳青等[14]在南水北调湖泊中发现其水体可溶性有机物来源主要为陆源类腐殖质.由此可得，河流来源不同致使水体中DOM的性质和特征也会有所差异，造成不同河流水体DOM与水质参数关联性呈现出不同特征，进而对研究受纳水体DOM的演变和环境效应带来挑战.因此，研究不同来源入淀河流DOM特征非常有必要.

与此同时，DOM的组成与结构也影响水系统中有机污染物的吸收和降解[15]，并且受人为活动影响较为强烈.DOM作为水环境中最大的溶解性有机碳储存库[16]，在生物地球化学循环中起着重要作用.众所周知，夏季高温加快微生物活动，从而影响河流水体的DOM降解；同时由于汛期到来，大量降水会使陆地DOM随着水流流入江河湖泊中，使水体的DOM发生变化.然而，关于白洋淀入淀河流DOM的研究却鲜见报道，尤其是对夏季汛期入淀河流DOM特征的研究更少.因此，本研究通过对夏季汛期白洋淀不同来源的入淀河流DOM的组成以及特征进行解析，并对各来源河流水体DOM的环境关联特性进行分析，以期为深入探究白洋淀入淀河流DOM转化机制提供支持.

1　材料与方法

1.1　研究区概况及样品采集与测定

白洋淀位于河北省保定市，是河北地区最大的内陆湖泊[17]，具有一定的自我调节能力，但受入淀河流影响较大.历史上白洋淀共接收了由北、西、南而来的白沟引河、萍河、瀑河、府河和小白河等八大入淀河流.府河作为保定市的纳污河道，水体主要来源于再生水，贯穿整个市区；小白河承接黄河水，为白洋淀淀区输送了大量水源；白沟引河是人工开挖的河流，水体主要来源于南水北调工程，主要流经农业地区；瀑河是河北省滦河的主要支流之一，现在作为承接水库水的河道.基于对白洋淀入淀河流来源进行分析，确定府河、小白河、白沟引河和瀑河这4条来源不同的入淀河流为研究对象.

目前，本研究根据文献[11]以及实地调查，选取府河、小白河、白沟引河以及瀑河这4条入淀河流共20个具有代表性的采样点(图1)，于夏季7、8和9月对入淀河流水体进行采样，并分析该采样点水体DOM光谱特征.采集的水样在现场测定pH、水体温度(T)和溶解氧浓度(DO)，24 h内完成水样氨氮、硝氮、亚硝氮、总氮、总磷、溶解性总氮、溶解性总磷和高锰酸盐指数的测定，同时完成BOD_5的测定，水样经0.45 μm微孔纤维滤膜过滤得到溶解性有机物水体样品并放入4℃的冰箱中进行保存.

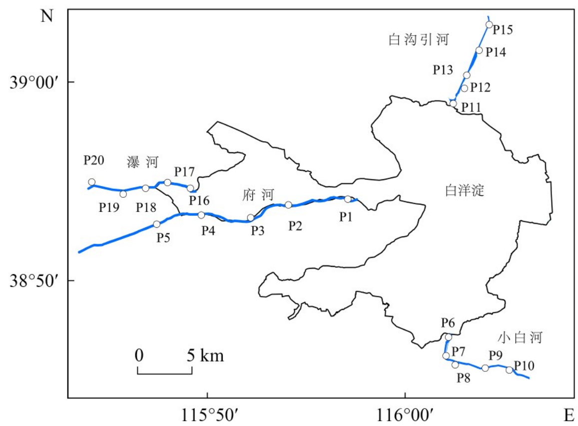


图1　白洋淀入淀河流采样点示意

Fig. 1　Schematic diagram of sampling sites in inflow rivers of Baiyangdian Lake

1.2　紫外-可见吸收光谱测定

利用紫外-可见分光光度计(DR6000，美国HACH公司)测定吸光度.测定波长范围为200 ~ 700 nm，间隔1 nm，仪器扫描速度为600 nm·min^{-1}，以Mill-Q超纯水调节空白，用1 cm石英比色皿测得吸光度.紫外-可见吸收光谱参数计算如表1所示.吸收

系数公式为[18]：

$$\alpha'(\lambda)=2.303\times D(\lambda)\div\gamma \quad (1)$$

$$\alpha(\lambda)=\alpha'(\lambda)-\alpha'(700)\times\lambda\div 700 \quad (2)$$

式中，λ为实际扫描波长，nm；γ为光程路径，m；$\alpha'(\lambda)$为未经散射矫正时在λ处的吸收系数，m^{-1}；$\alpha(\lambda)$为经散射矫正后在λ处的吸光度系数，m^{-1}；$D(\lambda)$为吸光度.

1.3 三维荧光光谱测定

利用F-7000荧光分光光度计进行三维荧光光谱的测定.具体设置如下：发射波长(E_m)为250 ~ 600 nm，间隔为1 nm；激发波长(E_x)为200 ~ 450 nm，间隔为5 nm；扫描速度为1 000 nm·min^{-1}.用Mill-Q超纯水去除散射的影响，用Delaunnay三角形内插值法消除瑞利散射和拉曼峰散射影响[19].利用核一致性分析确定荧光组分数，用折半分法分析数据结果，以R.U.为单位对数据进行标准化处理[20]，并计算出入淀河流组分的荧光强度.三维荧光光谱参数计算如表1所示.

表1 紫外-可见光谱和三维荧光光谱相关参数描述

Table 1 Description of parameters related to UV-Vis and three-dimensional fluorescence

光谱参数	参数定义	环境意义及特征描述
E_2/E_3	A_{250}/A_{365}	表示DOM相对分子质量大小[21]
E_3/E_4	A_{300}/A_{400}	表示水体DOM腐殖化程度[22]
E_4/E_6	A_{465}/A_{665}	表示DOM腐殖化程度和芳香性[23]
S_R	$S_{275\sim295}/S_{350\sim400}$	表示DOM来源和相对分子质量信息[23]
FI	$F(E_m = 450\ nm) / F(E_m = 500\ nm)$, $E_x = 370$ nm	表示DOM来源[24]
BIX	$F(E_m = 380\ nm) / F(E_m = 430\ nm)$, $E_x = 310$ nm	表示DOM自生来源的相对贡献[25]
HIX	AREA(E_m = 435~480 nm) / ARFA(E_m = 300~345 nm), $E_x = 370$ nm	表示DOM的腐殖化程度[26]
β/α	$F(E_m = 380\ nm) / F_{max}(E_m = 420\sim435\ nm)$, $E_x = 310$ nm	反映新生DOM所占比例[27]
Fn_{280}	F_{max}(340~360 nm), $E_x = 280$ nm	反映类蛋白相对丰度[28]
Fn_{355}	F_{max}(440~470 nm), $E_x = 355$ nm	反映类腐殖质相对丰度[28]

1.4 数据分析

在Matlab R2014a软件中使用N-way和DOMFluor工具箱对三维荧光光谱进行平行因子分析；应用SPSS(24.0)软件对夏季汛期入淀河流水体DOM中紫外-可见吸收光谱参数、荧光组分以及三维荧光特征指数进行相关性分析，并用单因素方差分析法分析水体样品中各参数的差异性；利用多元线性回归分析对荧光组分和光谱参数及水质参数进行解析；利用OpenFluor数据库对三维荧光光谱组分进行筛分对比；利用Origin(2021)绘制箱型图等有关图形；应用R软件进行主成分分析和相关性分析.

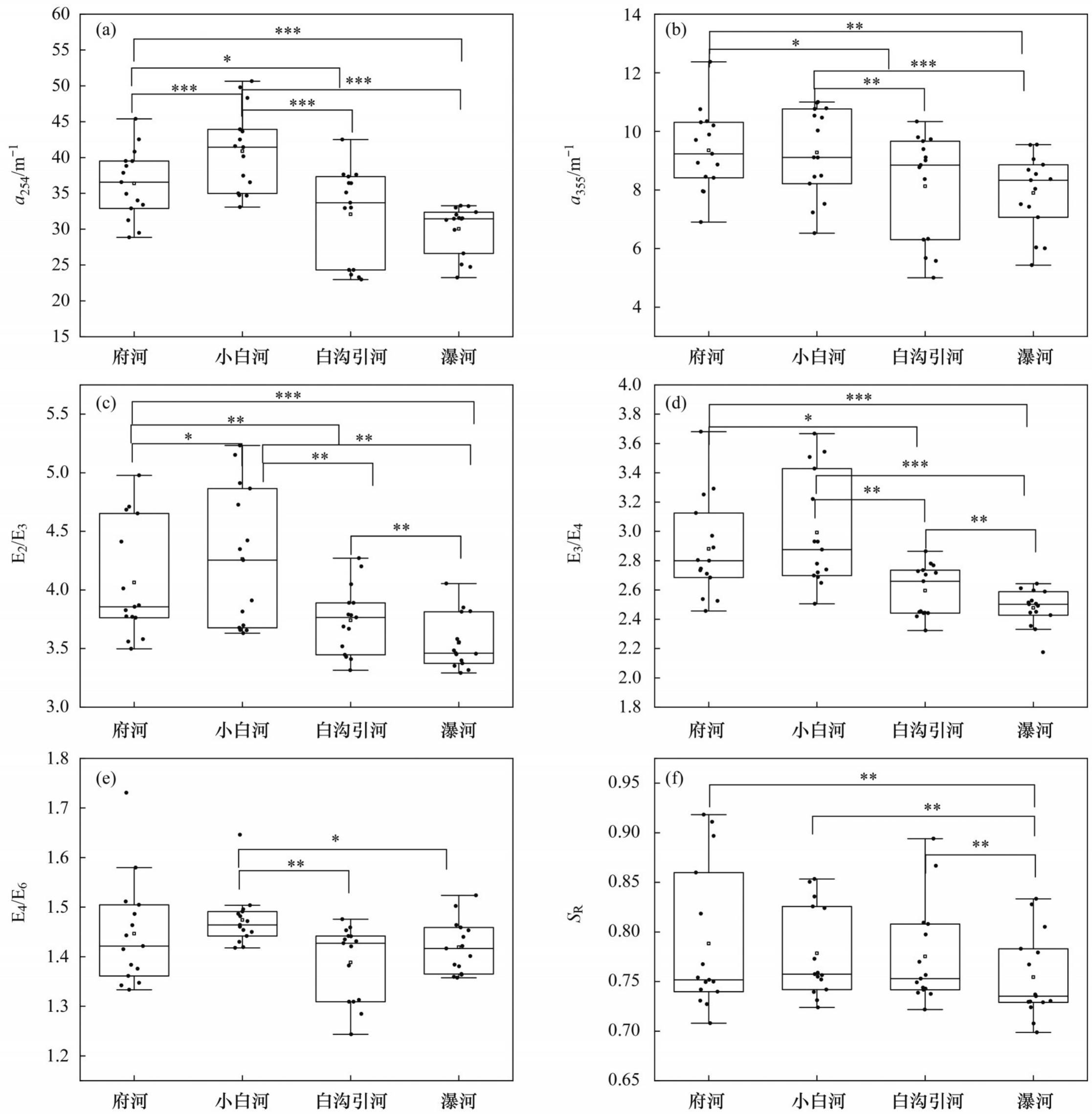
2 结果与讨论

2.1 紫外-可见吸收光谱特征参数分析

本研究用a_{254}和a_{355}表示白洋淀不同入淀河流DOM相对浓度的变化情况，水体DOM的相对浓度呈现显著差异(图2).由图2可知，小白河和府河水体DOM的a_{254}和a_{355}较高，白沟引河的DOM相对浓度次之，瀑河水体的a_{254}和a_{355}最低，分别为(30.04 ± 3.37)m^{-1}和(7.89 ± 1.29)m^{-1}.其中，府河流经区域主要以城市为主，并且作为城市的纳污河道一直受生活污水污染，瀑河流经区域主要以农村为主，沿途多为森林和农田.因此，水体DOM的a_{254}与a_{355}差异变化可以一定程度上反映入淀河流水体DOM的来源.同时府河和小白河分别与白沟引河和瀑河呈现显著差异($P < 0.05$)；白沟引河各个采样点的a_{355}分布较分散，差异性较大.其中，4条入淀河流a_{355}的值要高于白洋淀冬季冰封期淀区[20](a_{355}为2.57 ~ 6.77 m^{-1}).

为进一步了解白洋淀夏季汛期入淀河流水体DOM的特性，本研究就紫外-可见光谱中相关参数E_2/E_3、E_3/E_4、E_4/E_6以及S_R(图2)进行分析，以此来判断水体DOM相对分子质量大小、腐殖化程度以及来源等信息.结果表明，小白河各采样点E_2/E_3值为4.06 ± 0.49，府河、白沟引河次之，值分别为4.06 ± 0.49和3.74 ± 0.29，瀑河的E_2/E_3值最小为3.56 ± 0.23，由于E_2/E_3的值与DOM相对分子质量大小呈反比，即瀑河DOM相对分子质量最大，并与府河、小白河和白沟引河呈显著差异($P < 0.001$)；岳龙飞等[29]在研究白洋淀入淀河流溶解性有机物时，府河的E_2/E_3值低于白沟引河，与本研究结论相反，表明府河与白沟引河采样点E_2/E_3沿程具有明显变化；府河、小白河、白沟引河和瀑河水体DOM的E_3/E_4值在2.17 ~ 3.68之间，各入淀河流间变化不明显，府河和小白河水体分别与白沟引河和瀑河水体DOM的E_3/E_4值呈现显著差异($P < 0.05$)；E_4/E_6值与水体DOM腐殖化程度呈反比，小白河各采样点的E_4/E_6值最高为1.47 ± 0.05，白沟引河和瀑河水体的E_4/E_6值较小，分别为1.39 ± 0.08和1.42 ± 0.05，与E_3/E_4值得出结论相同，表明白沟引河和瀑河水体腐殖化程度

较高，小白河水体腐殖化程度最弱，并且小白河水体的 E_4/E_6 与白沟引河和瀑河呈显著差异($P < 0.05$)；本研究中入淀河流所有采样点 S_R 值均小于1，府河、小白河、白沟引河和瀑河水体DOM的 S_R 值分别为 0.79 ± 0.07、0.78 ± 0.05、0.78 ± 0.05 和 0.75 ± 0.04. 瀑河水体DOM的 S_R 值明显低于其他入淀河流($P < 0.001$)，且 S_R 值与DOM相对分子质量大小呈现负相关关系，表明瀑河水体DOM相对分子质量高于其他入淀河流，与 E_2/E_3 结论相同. 此外，入淀河流水体DOM的 S_R 值(0.70 ~ 0.92)与鄱阳湖蝶形湖区(0.83 ± 0.24)和通江水域(0.75 ± 0.15)沉积物中DOM的研究结果相似[30].



***表示 P<0.001, **表示 P<0.01, *表示 P<0.05, 下同

图2　白洋淀入淀河流水体DOM的 a_{254}、a_{355}、E_2/E_3、E_3/E_4、E_4/E_6 和 S_R

Fig. 2　The a_{254}, a_{355}, E_2/E_3, E_3/E_4, E_4/E_6, and S_R of the DOM in inflow rivers of Baiyangdian Lake

2.2　汛期水体DOM荧光组分特征分析

2.2.1　DOM的荧光组分解析

通过平行因子分析对夏季汛期白洋淀4条入淀河流水体进行三维荧光解析，分析DOM组分构成. 汛期入淀河流水体样品共解析到3种组分. 其中，组分1有2个激发峰为240 nm和295 nm；组分2有2个激发峰为245 nm和310 nm；组分3有2个激发峰为200 nm和275 nm(表2)，综合分析得到：C1为类酪氨酸，C2为陆源类腐殖质，C3为类色氨酸.

表2　白洋淀入淀河流水体样品DOM的荧光组分特征

Table 2　Characteristics of components of DOM in water samples in inflow rivers of Baiyangdian Lake

组分	E_x/E_m/nm	物质	文献中波长/nm
C1	295(240)/340	类酪氨酸	275/340,220/325[11]
C2	245(310)/426	陆源类腐殖质	260/425,315/415[31,32]
C3	200(275)/338	类色氨酸	200~250/330~380[33]

2.2.2　DOM的荧光组分强度及分布特征

图3展示的是夏季汛期白洋淀4条入淀河流采

样点，府河、小白河、白沟引河和瀑河的三维荧光组分荧光强度情况. 结果表明，入淀河流组分间不存在差异($P > 0.05$)，C2和C3组分在各入淀河流间存在显著差异($P < 0.05$)；C1组分为类酪氨酸，府河水体C1组分含量最高，为(0.37 ± 0.37)R.U.，瀑河、小白河次之，白沟引河水体含量最低，为(0.19 ± 0.12)R.U.. 束乐乐等[34]在研究长江口门附近水体的溶解性有机质时发现，夏季温度升高致使水体微生物生长繁殖速度加快，类酪氨酸与微生物活动密切相关，证实府河水体微生物含量较高[图3(a)]. C2组分作为陆源类腐殖质，大多来源于陆源输入以及动植物降解，府河和小白河的C2组分含量远高于白沟引河与瀑河，依次为(0.26 ± 0.05)、(0.26 ± 0.03)、(0.19 ± 0.04)和(0.18 ± 0.06)R.U. [图3(b)]. C3组分为类色氨酸，与水中浮游植物降解和微生物代谢过程相关，小白河水体C3组分含量最高，为(0.27 ± 0.12)R.U.，小白河承接于黄河水，在研究黄河水清水河流域中发现其类色氨酸组分占比最高[35] [图3(c)]. 总荧光强度在不同入淀河流之间存在差异，府河水体的总荧光强度值最大，达到(0.83 ± 0.40)R.U.，府河水体汇集了人们生活用水及城市面源污染水体，严重影响水体水质情况，与滇河流域入湖河流中污染最严重河流的总荧光强度的结论一致[36]. 而经农业流域的白沟引河水体总荧光强度最小，达到(0.56 ± 0.15)R.U.，充分说明了人类活动会严重导致水体中DOM含量的增加. 并且府河与白沟引河水体的总荧光强度间存在显著差异($P < 0.05$).

图3(d) ~ 3(f)为各入淀河流水体三维荧光组分相对丰度变化情况，以分析水体DOM的结构组成情况. 入淀河流水体中各组分占比情况如下：C1组分在府河水体中占比最高，达到(40.40 ± 11.97)%，在白沟引河水体中占比最低，为(31.41 ± 18.53)%，并且白沟引河与瀑河水体在C1组分丰度上呈现显著差异($P < 0.05$)；C2组分在白沟引河水体中占比最高，达到(37.25 ± 17.94)%，并与瀑河水体呈现显著差异($P < 0.05$)；C3组分中小白河水体占比最高，为(32.87 ± 9.37)%；府河水体占比最低，为(24.46 ± 5.56)%，并与小白河、白沟引河和瀑河水体之间呈现显著差异($P < 0.05$). 从整体来看，白洋淀4条入淀河流水体各采样点的类蛋白质组分(C1 + C3)占比基本都大于陆源类腐殖质C2(除白沟引河7月采样点外)，并且各入淀河流水体7月类蛋白物质含量明显低于8月和9月，因为7月雨量最多，污染物质会随着雨水进入入淀河流中，致使水体陆源类腐殖质物质增多. 从整体来看，瀑河水体类蛋白质组分(C1+C3)组分占比最高，为(70.33 ± 11.38)%；白沟引河水体C2组分占比最高为(37.25 ± 17.94)%，其原因可能是白沟引河流经流域多以农田、森林为主，陆源输入相对明显.

2.3 DOM的荧光特征参数分析

为了进一步分析夏季汛期白洋淀各入淀河流水体DOM的光谱特征，本研究对DOM的荧光特征参数进行分析，分析结果如图4所示.

荧光指数FI代表入淀河流水体DOM来源情况[37]. 当FI > 1.9时，水体中DOM主要以微生物内源产生为主，当FI < 1.4时，水体中DOM主要以陆源输入为主. 如图4(a)，小白河和瀑河水体的FI值分别为1.90 ± 0.20和1.91 ± 0.30，表示水体DOM主要以微生物内源产生为主. 白沟引河水体FI值最小为1.73 ± 0.23，FI值在1.4 ~ 1.9之间，说明水体DOM同时受内源和外源的双重影响，符合白沟引河水体三维荧光组分丰度的变化情况. 府河除P4采样点(FI为1.66 ~ 1.77)外，其他点位FI值均大于1.9，且FI值为1.96 ± 0.25，显著高于其他入淀河流，与小流域庐江水体研究结果相似[38]，表明城市纳污河流水体DOM的自生源特征要比受农田、森林或其他径流影响的河流更强.

自生源指标BIX代表入淀河流水体内源物质对DOM的相对贡献程度[39]. 如图4(b)，府河水体的BIX为1.95 ± 0.90，小白河水体的BIX为1.69 ± 0.38，白沟引河水体的BIX为2.02 ± 0.83，瀑河水体的BIX为2.42 ± 0.97. 4条入淀河流的BIX值大于1，微生物活动明显，水体DOM主要以自生源特征为主. 其中，府河从上游到下游采样点BIX值明显升高，指示水体自生源特征沿入淀方向愈发明显. 此外，瀑河与小白河、白沟引河呈现显著差异($P < 0.05$). 本研究与宁成武等[12]研究夏季巢湖入湖河流南淝河中溶解性有机物的BIX结果一致，且南淝河也作为城市的纳污河流，BIX值均大于1.00，与府河情况相同.

腐殖化指数HIX表示入淀河流水体DOM的腐殖化情况[40]. 当HIX > 3时，水体腐殖化程度强，当HIX为1.5 ~ 3时，水体腐殖化程度较弱，当HIX < 1.5时，水体DOM主要来源于微生物. 本研究中4条入淀河流水体各采样点的HIX指数在0.22 ~ 0.75之间，数值远小于1.5，表明4条入淀河流水体DOM腐殖化程度较弱. 其中，府河水体DOM的HIX值在4条入淀河流中最小(0.46 ± 0.08)，从上游到下游，整体上HIX值逐渐降低，腐殖化程度逐渐减弱，水体自生源特征不断增强，充分说明府河水体DOM内源特征明显，并且与BIX结果一致. 此外，瀑河与白沟引河呈现显著差异($P < 0.01$).

新鲜度指数(β/α)反映新生DOM所占的比例同

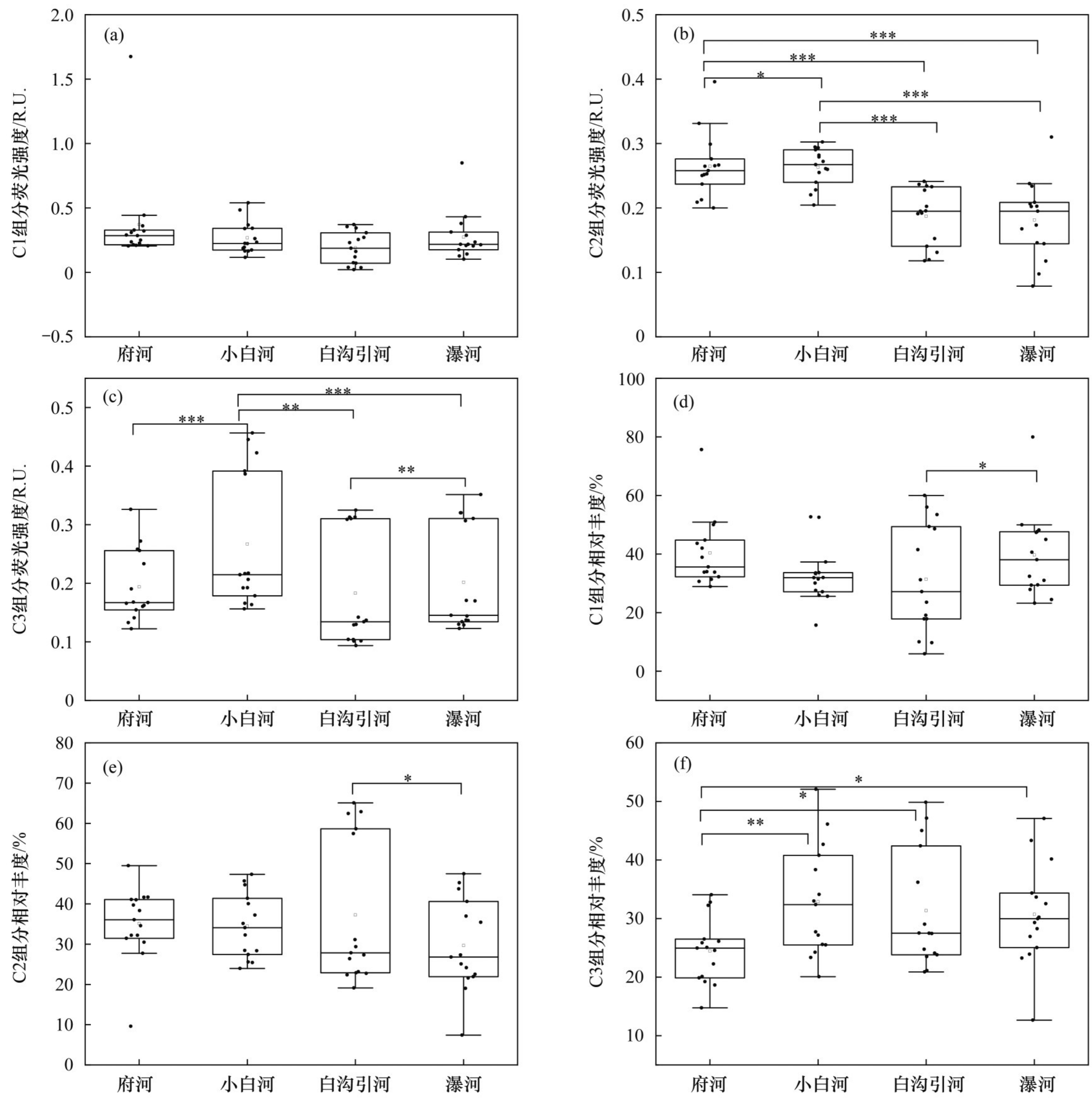


图3　白洋淀入淀河流水体DOM组分荧光强度和相对丰度

Fig. 3　Fluorescence intensity and percentages of components of DOM in water samples in inflow rivers of Baiyangdian Lake

时也是评估水体生物活性的重要依据.本研究中瀑河水体的β/α值最高，为1.94 ± 0.81，小白河水体的β/α值最低，为1.48 ± 0.29，表明瀑河水体新生DOM所占比例较高.其中，瀑河与小白河呈现显著差异($P < 0.05$).本研究与何杰[41]等采用光谱特征法研究不同污染景观水体河道中溶解性有机物HIX（HIX < 3）与β/α(景观水体$\beta/\alpha > 0.8$)结果相一致.

Fn_{280}和Fn_{355}分别代表类蛋白物质和类腐殖质物质的相对浓度水平[42]，Fn_{280}用来表征自生源对水体DOM组分的贡献，Fn_{355}表征陆源对水体DOM组分的贡献.从分析结果来看，该时期Fn_{280}明显高于Fn_{355}，进一步验证了夏季汛期各入淀河流水体自生源特征明显，类蛋白物质含量占比远高于类腐殖质物质占比的情况.小白河与白沟引河水体的Fn_{280}呈现显著差异($P < 0.05$)，府河和小白河与白沟引河和瀑河水体的Fn_{355}呈现显著差异($P < 0.001$).

2.4　DOM的荧光组分与特征参数及水质参数相关性分析

2.4.1　DOM的荧光组分与特征参数相关性分析

为了解夏季汛期白洋淀4条入淀河流DOM特征，本研究对入淀河流水体DOM的荧光组分与特征参数进行分析.图5分别代表府河、小白河、白沟引河和瀑河水体DOM组分与特征参数的相关性分析结果.从中得知，府河和小白河水体荧光组分与特征参数相关性呈现相似关系，白沟引河和瀑河水体荧光组分与特征参数之间呈现相似关系.C1组分与入淀河流水体的HIX呈显著负相关关系($P < 0.001$)，与白沟引河和瀑河水体的相关程度明显高于府河和小白河水体，相关系数分别为0.953、0.891、0.804和0.827，此外，C1组分还与4条入淀河流水体的BIX、β/α和Fn_{280}呈显著正相关关系($P < 0.001$).C2组分与白沟引河和瀑河水体的HIX呈现显著正相关

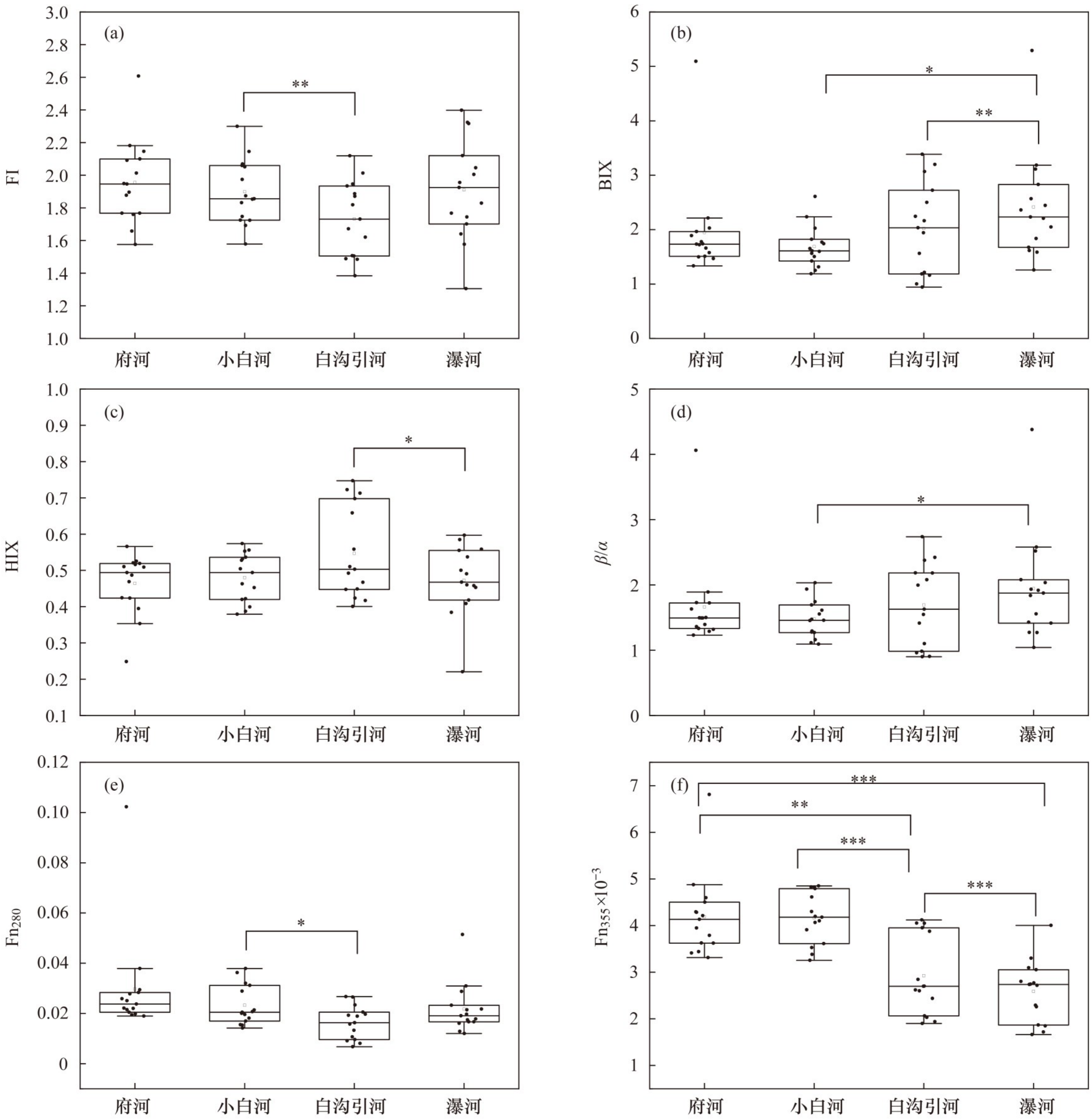


图4 白洋淀入淀河流水体DOM的FI、BIX、HIX、β/α、Fn_{280}以及Fn_{355}分布情况

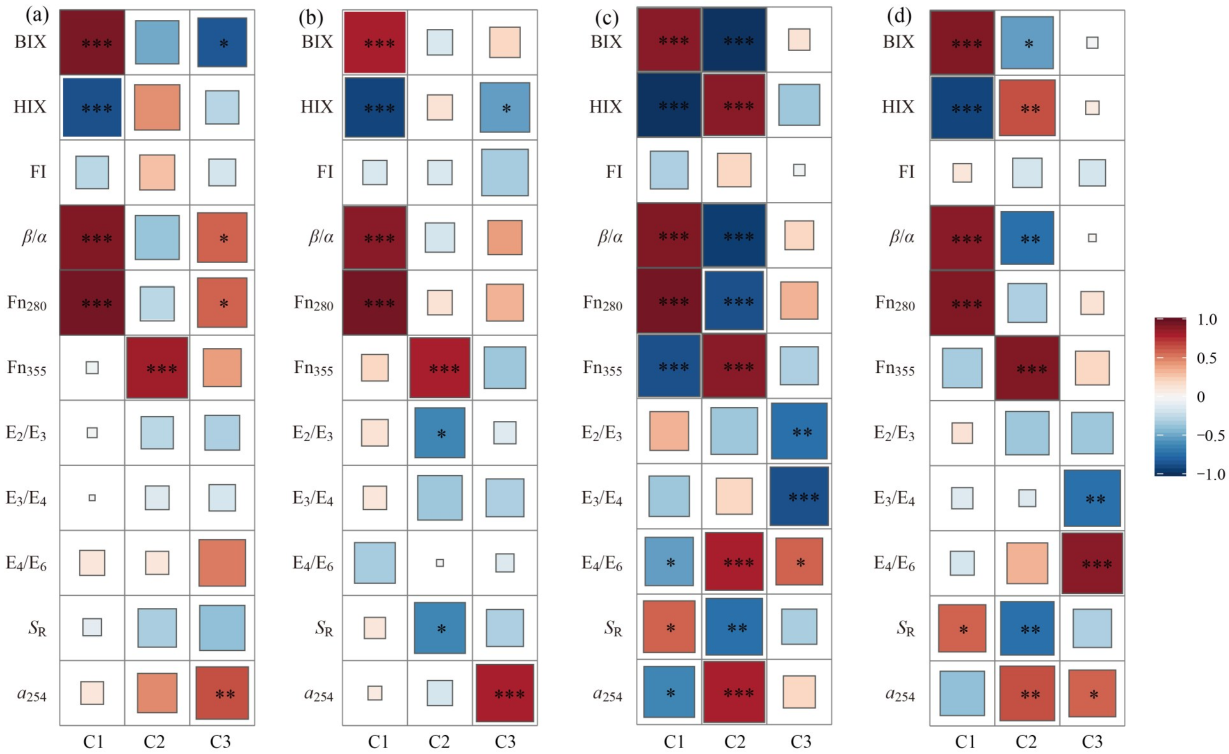
Fig. 4 FI, BIX, HIX, β/α, Fn_{280}, and Fn_{355} distributions of DOM in water samples in inflow rivers of Baiyangdian Lake

关系($P < 0.01$)，与府河和小白河水体相关性不显著，说明白沟引河和瀑河水体腐殖化程度相对高于府河和小白河水体.C2组分与白沟引河和瀑河水体的Fn_{355}相关性程度明显高于府河和小白河水体($P < 0.001$)，表示C2组分对白沟引河和瀑河水体陆源类腐殖质浓度影响水平更高.C3组分与C1组分同属类蛋白组分，相关性类似，C3组分与白沟引河和瀑河水体的E_3/E_4和E_4/E_6呈显著相关关系($P < 0.05$)，与府河和小白河水体无明显相关关系.

综上所述，不同入淀河流组分间不具有相关性，说明组分C1、C2和C3之间不存在相似的来源.值得注意的是BIX、β/α、Fn_{280}和HIX在C1组分和C2组分呈现完全相反的相关性关系.说明类酪氨酸C1主要来源于入淀河流水体中浮游植物的降解，受陆源输入影响较小；类腐殖质物质C2主要来源于外源输入，受水体微生物活动影响较小.这与林子深等[43]研究李家河水库上游水体溶解性有机物的类酪氨酸组分与类腐殖质组分的来源情况相似.府河水体受城市污水排放影响，小白河水体受黄河流域沿程外来污染物影响，白沟引河和瀑河水体流经水库，受外源污染影响较小，因此府河水体和小白河水体荧光组分与特征参数相关性相似，白沟引河水体和瀑河水体相关性相似.

2.4.2 DOM的荧光组分与水质参数相关性分析

为进一步了解夏季汛期白洋淀4条入淀河流DOM对水质的影响，本研究将基于DOM组分与环境因子指标进行相关性分析，相关性分析结果如图6所示.从中得知，在类蛋白组分(C1+C3)中，府河、小白河和白沟引河水体的荧光组分与水质参数相关性相似，就C1组分而言，白沟引河、府河和小白河



(a)府河，(b)小白河，(c)白沟引河，(d)瀑河；红色表示正相关关系，蓝色表示负相关关系，下同

图5　白洋淀入淀河流水体DOM的荧光组分与紫外-可见以及三维荧光参数指标的相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis of the fluorescence components of DOM and UV-visible and three-dimensional fluorescence parameters in the water body in inflow rivers of Baiyangdian Lake

水体与NO_3^--N、NO_2^--N、TN、TDN、TP和TDP呈负相关关系，其中，白沟引河水体与NO_3^--N($P < 0.001$)、NO_2^--N($P < 0.05$)、TN($P < 0.01$)和TDN($P < 0.001$)的相关性系数明显高于府河、小白河和瀑河．在C3组分中，府河、小白河和白沟引河水体与NO_3^--N、NO_2^--N、TN、TDN、TP和TDP呈负相关关系，但瀑河水体与NO_3^--N、NO_2^--N、TN、TDN、TP和TDP呈正相关关系．在C2组分中，各入淀河流间相关性并不相似，府河、小白河、白沟引河和瀑河水体与NO_2^--N、TN和TDN呈正相关关系．瀑河、小白河和府河水体与NH_4^+-N呈正相关关系，相关系数分别为0.832、0.683和0.220，白沟引河水体与NH_4^+-N呈显著负相关关系($P < 0.05$)，相关系数为0.536；白沟引河、府河和小白河水体与NO_3^--N呈正相关关系，相关系数分别为0.889、0.725和0.452，瀑河水体与NO_3^--N呈显著负相关关系($P < 0.05$)，相关系数为0.608.

由荧光组分与水质参数的相关性关系可知，3种DOM组分均参与了入淀河流水体中氮、磷元素的迁移转化．随着类酪氨酸组分C1和类色氨酸组分C3含量的增加，水体中氮素含量降低，这是因为类蛋白物质(C1 + C3)的形成会消耗水环境中的氮素，在赵海超等[44]调查洱海上覆水的DOM时，其类蛋白质组分和氮素之间的关系与白洋淀入淀河流水体的相同；由于类腐殖质组分与水体中氮、磷等营养元素均具有正相关性，表明入淀河流水体中类腐殖质与氮、磷元素联系更为密切，而类腐殖质物质大多是外源污染物输入而产生，说明入淀河流水体中氮、磷等营养元素在夏季汛期会随着降水进入入淀河流水体中．在研究芦江溶解性有机质时发现DOM会随氮、磷的外源输入进入水体[45]，表示入淀水体的DOM与氮、磷的迁移转化有关．

2.4.3　DOM的荧光组分与特征参数及水质参数多元线性回归

对荧光组分与特征参数及水质参数的多元线性回归分析．结果如表3所示，4条入淀河流DOM与特征参数和水质参数的回归方程在C1和C2组分的相关系数明显高于C3，并且关联的特征参数和水质参数在C2组分、C3组分之间存在显著差异．在C1组分中，4条入淀河流与HIX、Fn_{280}呈显著相关($P < 0.001$)．在C2组分中，4条入淀河流与Fn_{355}呈显著相关($P < 0.001$)，此外，府河和白沟引河水体与NO_3^--N呈显著相关($P < 0.001$)，小白河和瀑河水体与NH_4^+-N呈显著相关($P < 0.001$)．在C3组分中，府河、小白河和瀑河水体与NO_2^--N呈显著相关($P < 0.01$)，白沟引河和瀑河水体与TDP呈显著相关($P <$

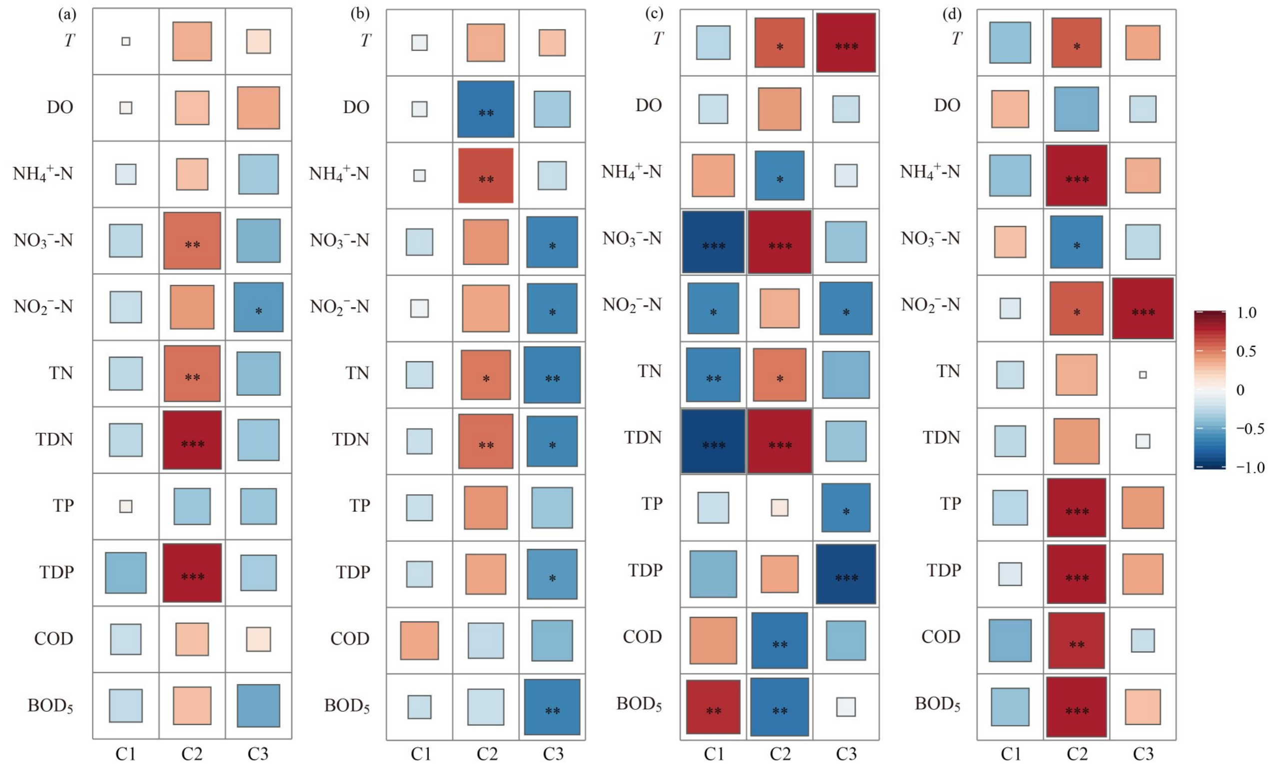


图 6 白洋淀入淀河流水体 DOM 的荧光组分与水质参数的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of DOM fluorescence components and water quality parameters in inflow rivers of Baiyangdian Lake

表 3 荧光组分与特征参数及水质参数多元线性回归[1)]

Table 3 Correlation matrix of DOM indices and three PARAFAC components of water samples in inflow rivers of Baiyangdian Lake

入淀河流	回归方程	相关关系
府河	$[C1] = 0.193\times HIX - 18.295\times Fn_{280} - 0.261$	0.992^{***}
	$[C2] = 31.951\times Fn_{355} - 0.011\times(NO_3^-\text{-}N) + 0.016\times TDN + 0.380\times TDP + 0.091$	0.857^{***}
	$[C3] = -0.158\times BIX + 7.952\times Fn_{280} - 0.623\times(NO_2^-\text{-}N) + 0.343$	0.605^{**}
小白河	$[C1] = 0.261\times HIX - 17.197\times Fn_{280} - 0.257$	0.949^{***}
	$[C2] = 44.209\times Fn_{355} - 0.04\times DO - 0.0190\times(NH_4^+\text{-}N) + 0.123$	0.842^{***}
	$[C3] = -0.200\times(NO_3^-\text{-}N) + 0.565\times(NO_2^-\text{-}N) - 0.059\times TN - 0.026\times BOD_5 + 0.576$	0.614^{**}
白沟引河	$[C1] = -0.238\times HIX - 14.464\times Fn_{280} - 0.084$	0.974^{***}
	$[C2] = 27.466\times Fn_{355} + 0.015\times T + 0.016\times(NO_3^-\text{-}N) + 0.005\times BOD_5 - 0.333$	0.987^{***}
	$[C3] = 0.038\times T - 2.312\times TDP - 0.703$	0.823^{***}
瀑河	$[C1] = -0.402\times HIX + 15.254\times Fn_{280} + 0.132$	0.983^{***}
	$[C2] = 64.348\times Fn_{355} + 0.009\times T + 0.013\times(NH_4^+\text{-}N) - 0.218$	0.948^{***}
	$[C3] = 1.194\times(NO_2^-\text{-}N) - 1.605\times TDP + 0.137$	0.794^{***}

1)“[ ]”表示组分的浓度

0.01).

前人研究表明 TDN、NO_3^--N、NH_4^+-N 和 NO_2^--N 等各种形式的氮都可能与水体中 DOM 结合[46]. 水体中的磷元素也与 DOM 的含量相关，但在生活污水含量较多的地方，磷与 DOM 的相关性并不显著[47]，与本文府河水体与磷元素之间的相关性并不显著($P > 0.05$)相一致. 程云轩等[48]对松花江沉积物研究结果表示，沉积物中的 4 个组分与 TP 和 TN 存在相关性，而这 4 条入淀河流水体的 C2 和 C3 组分也与 NO_3^--N、NH_4^+-N 和 TDP 存在一定联系. 其结果与相关性分析结果相似，展现出不同入淀河流 DOM 与特征参数和水质参数关联关系的差异. 综上，通过对夏季汛期白洋淀入淀河流水体 DOM 的荧光组分与特征参数及水质参数进行多元线性回归拟合，便于评估夏季汛期不同类型入淀河流水体 DOM 的特征，为管理人员治理该时期溶解性有机物提供参考.

3 结论

(1)夏季汛期白洋淀入淀河流三维荧光光谱共解析出了 2 种类蛋白物质(C1、C3)和 1 种类腐殖质(C2)，荧光组分之间差异不显著；夏季汛期入淀河流中类蛋白物质含量(C1+C3)占比大于类腐殖质

(C2)占比情况，说明类蛋白物质为白洋淀入淀河流DOM的主要成分.

(2)夏季汛期白洋淀入淀河流中府河和小白河的DOM相对浓度高于白沟引河和瀑河.FI指数较高，大于或接近1.9，HIX指数均低于4，说明入淀河流DOM主要来源于自生源且腐殖化程度较弱.

(3)府河水体和小白河水体荧光组分与特征参数相关性呈现相似关系，白沟引河水体和瀑河水体荧光组分与特征参数之间呈现相似关系；各入淀河流水体荧光组分与水质参数相关性呈现明显差异，并与氮、磷的迁移转化密切相关.多元线性回归方程可以很好地拟合水体荧光组分与特征参数及水质参数之间的关系，有利于分析汛期入淀河流水体DOM的特征变化.

参考文献：

[1] Zhang L, Fang W K, Li X C, *et al.* Linking bacterial community shifts with changes in the dissolved organic matter pool in a eutrophic lake[J]. Science of the Total Environment, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137387.

[2] Zhang W, Zhou Y Q, Jeppesen E, *et al.* Linking heterotrophic bacterioplankton community composition to the optical dynamics of dissolved organic matter in a large eutrophic Chinese lake[J]. Science of the Total Environment, 2019, **679**: 136-147.

[3] Ren H Y, Wang G X, Ding W C, *et al.* Response of dissolved organic matter (DOM) and microbial community to submerged macrophytes restoration in lakes: A review[J]. Environmental Research, 2023, **231**, doi: 10.1016/j.envres.2023.116185.

[4] Yamin G, Borisover M, Cohen E, *et al.* Accumulation of humic-like and Proteinaceous dissolved organic matter in zero-discharge aquaculture systems as revealed by fluorescence EEM spectroscopy [J]. Water Research, 2017, **108**: 412-421.

[5] 冯诗杰，韩智勇，费勇强，等.填埋场地下水溶解性有机物时空分布特征分析：以四川红层区某生活垃圾填埋场为例[J].环境科学研究，2023，**36**(6)：1156-1165.
Feng S J, Han Z Y, Fei Y Q, *et al.* Spatiotemporal distribution of dissolved organic matter in groundwater near municipal solid waste landfill in Red Bed Zone: a case study of a landfill in Sichuan province[J]. Research of Environmental Sciences, 2023, **36**(6): 1156-1165.

[6] 陈昭宇，李思悦.三峡库区城镇化背景下河流DOM的吸收及荧光光谱特征[J].环境科学，2019，**40**(12)：5309-5317.
Chen Z Y, Li S Y. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the three gorges reservoir area under the background of urbanization[J]. Environmental Science, 2019, **40** (12): 5309-5317.

[7] 张文浩，赵铎霖，王晓毓，等.太白山自然保护区水体CDOM吸收与三维荧光特征[J].环境科学，2020，**41**(11)：4958-4969.
Zhang W H, Zhao D L, Wang X Y, *et al.* Absorption and three dimensional fluorescence spectra of CDOM in the water of the Taibaishan Nature Reserve[J]. Environmental Science, 2020, **41** (11): 4958-4969.

[8] 石含之，刘帆，黄永东，等.土壤溶解性有机物的动态变化对水溶态铜的影响[J].生态环境学报，2021，**30**(9)：1896-1902.
Shi H Z, Liu F, Huang Y D, *et al.* Effects of dynamic change of dissolved organic matter in soil on water-soluble copper [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(9): 1896-1902.

[9] 高静，蒲晓，张玉虎，等.区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响[J].环境科学，2022，**43** (4)：1950-1957.
Gao J, Pu X, Zhang Y H, *et al.* Abundance and fluorescent components of dissolved organic matter affected by land use in a drinking water source[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1950-1957.

[10] Zhang T N, Chen Z Y, Zhang Z W, *et al.* Spatial and temporal dynamic response of abundant and rare aerobic denitrifying bacteria to dissolved organic matter in natural water: A case study of Lake Baiyangdian, China[J]. Environmental Research, 2023, **104**, doi: 10.1016/j.envres.2023.115524.

[11] 周石磊，张甜娜，陈召莹，等.输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应[J].环境科学，2021，**42**(9)：4319-4331.
Zhou S L, Zhang T N, Chen Z Y, *et al.* Structure of aerobic denitrification bacterial community in response to dissolved organic matter in Baiyangdian lake during the water delivery period[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4319-4331.

[12] 宁成武，包妍，黄涛，等.夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化[J].环境科学，2021，**42**(8)：3743-3752.
Ning C W, Bao Y, Huang T, *et al.* Sources and spatial variation of dissolved organic matter in summer water of inflow rivers along Chaohu Lake watershed[J]. Environmental Science, 2021, **42** (8): 3743-3752.

[13] 张紫薇，周石磊，张甜娜，等.岗南水库沉积物溶解性有机物光谱时空分布特征及环境意义[J].环境科学学报，2021，**41** (9)：3598-3611.
Zhang Z W, Zhou S L, Zhang T N, *et al.* Spatiotemporal evolution and environmental significance of dissolved organic matter (DOM) in sediments of Gangnan reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(9): 3598-3611.

[14] 张柳青，彭凯，周蕾，等.南水北调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征[J].环境科学，2019，**40**(7)：3018-3029.
Zhang L Q, Peng K, Zhou L, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in key lakes in the middle reaches of the east route of the South-North water diversion project [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3018-3029.

[15] Wei M J, Huang S L, Zhang T Q, *et al.* DOM stratification and characteristics versus thermal stratification - A case study in the Panjiakou Reservoir, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, **42**, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101160.

[16] Wen Z D, Shang Y X, Song K S, *et al.* Composition of dissolved organic matter (DOM) in lakes responds to the trophic state and phytoplankton community succession[J]. Water Research, 2022, **224**, doi: 10.1016/j.watres.2022.119073.

[17] Wang Z R, Wang X, Zhang Y L, *et al.* Estimation of a suitable NDVI oriented for ecological water savings and phytoremediation in Baiyangdian Lake, North China[J]. Ecological Indicators, 2023, **148**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110030.

[18] Keith D J, Yoder J A, Freeman S A. Spatial and temporal distribution of coloured dissolved organic matter (CDOM) in Narragansett Bay, Rhode Island: implications for phytoplankton in coastal waters[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, **55** (5): 705-717.

[19] Lv L L, Liu G, Shang Y X, *et al.* Characterization of dissolved organic matter (DOM) in an urbanized watershed using spectroscopic analysis [J]. Chemosphere, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130210.

[20] 周石磊，孙悦，张艺冉，等.基于UV-vis和EEMs解析白洋淀冬季冰封期间隙水DOM的光谱特征及来源[J].环境科学学报，2020，**40**(2)：604-614.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based on UV-Vis and EEMs [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 604-614.

[21] Hu J, Yang N L, He T R, *et al.* Elevated methylmercury production in mercury-contaminated paddy soil resulted from the favorable dissolved organic matter variation created by algal decomposition[J]. Environmental Pollution, 2023, **324**, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121415.

[22] 周石磊，孙悦，苑世超，等.岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析[J].环境科学，2020，**41**

(6): 2635-2645.
Zhou S L, Sun Y, Yuan S C, *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment interstitial water from Gangnan Reservoir[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2635-2645.

[23] Lavonen E E, Kothawala D N, Tranvik L J, *et al*. Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production [J]. Water Research, 2015, **85**: 286-294.

[24] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al*. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(6): 706-719.

[25] He J, Wu X, Zhi G Q, *et al*. Fluorescence characteristics of DOM and its influence on water quality of rivers and lakes in the Dianchi Lake basin[J]. Ecological Indicators, 2022, **142**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109088.

[26] Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al*. Microbial aerobic denitrification dominates nitrogen losses from reservoir ecosystem in the spring of Zhoucun reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 998-1010.

[27] Clark M G, Biagi K M, Carey S K. Optical properties of dissolved organic matter highlight peatland-like properties in a constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2022, **802**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149770.

[28] Chen X F, Yu M D, He X S, *et al*. Fate of dissolved organic matter substructure in a full-scale wastewater treatment plant by using size exclusion chromatography multi-excitation-emission matrix analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **328**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129677.

[29] 岳龙飞, 李洪波, 梁淑轩, 等. 白洋淀入淀河流溶解有机物沿程变化特征及来源解析[J]. 环境工程技术学报, 2023, **13**(3): 1050-1060.
Yue L F, Li H B, Liang S X, *et al*. Variation characteristics and source analysis of dissolved organic matter along the river into Baiyangdian Lake [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, **13**(3): 1050-1060.

[30] 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 等. 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 847-858.
Luo Y Q, Wan Z W, Yan C X, *et al*. Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediments from Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 847-858.

[31] 闫晓寒, 韩璐, 文威, 等. 辽河保护区水体溶解性有机质空间分布与来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1419-1427.
Yan X H, Han L, Wen W, *et al*. Spectral characteristics and spatial distribution of DOM in surface Water of Liaohe reservation zone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1419-1427.

[32] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al*. Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries [J]. Chemosphere, 2011, **82**: 145-155.

[33] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al*. Fluorescence excitation- emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.

[34] 束乐乐, 杨红, 王春峰, 等. 长江口门附近水体溶解性有机质的荧光组分特征[J]. 海洋环境科学, 2023, **42**(2): 176-184, 192.
Shu L L, Yang H, Wang C F, *et al*. Characteristics of fluorescent components of dissolved organic matter in water near the mouth of the Yangtze river[J]. Marine Environmental Science, 2023, **42**(2): 176-184, 192.

[35] 徐斌, 裴东艳, 何斐, 等. 春灌背景下黄河上游清水河流域DOM的空间分布规律[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(5): 325-335.
Xu B, Pei D Y, He F, *et al*. Spatial distribution of DOM in the Qingshui River basin of the upstream Yellow River on spring irrigation season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(5): 325-335.

[36] 卜鸡明, 何佳, 焦立新, 等. 滇池流域入湖河流溶解性有机质的分布及来源[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(8): 2795-2804.
Bu J M, He J, Jiao L X, *et al*. Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter in the rivers that flow into the Dianchi Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(8): 2795-2804.

[37] Lin Y Y, Hu E, Sun C S, *et al*. Using fluorescence index (FI) of dissolved organic matter (DOM) to identify non-point source pollution: The difference in FI between soil extracts and wastewater reveals the principle[J]. Science of The Total Environment, 2023, **862**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160848.

[38] Tao P R, Jin M, Yu X B, *et al*. Spatiotemporal variations in chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in a mixed land-use river: Implications for surface water restoration[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111498.

[39] Zhang H Y, Qian W, Wu L, *et al*. Spectral characteristics of dissolved organic carbon (DOC) derived from biomass pyrolysis: Biochar-derived DOC versus smoke-derived DOC, and their differences from natural DOC[J]. Chemosphere, 2022, **302**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134869.

[40] Shang Y X, Song K S, Lai F F, *et al*. Remote sensing of fluorescent humification levels and its potential environmental linkages in lakes across China[J]. Water Research, 2023, **230**, doi: 10.1016/j.watres.2022.119540.

[41] 何杰, 李学艳, 林欣, 等. 光谱特征法辨识不同污染景观河道中溶解性有机物的组分与来源[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 1000-1010.
He J, Li X Y, Lin X, *et al*. Spectral feature method was used to identify the components and sources of dissolved organic matter in different polluted landscape channels [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 1000-1010.

[42] Zhang Z W, Meng J J, Chen Z Y, *et al*. Response of dissolved organic matter to thermal stratification and environmental indication: The case of Gangnan Reservoir[J]. Science of The Total Environment, 2023, **868**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161615.

[43] 林子深, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库上游水体溶解性有机物组分与来源[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1275-1283.
Lin Z S, Huang T L, Li K, *et al*. Dissolved organic matter components and sources in upstream of Lijiahe Reservoir[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 1275-1283.

[44] 赵海超, 李艳平, 王圣瑞, 等. 洱海上覆水DOM荧光特征及对富营养化的指示意义[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, **39**(12): 3888-3896.
Zhao H C, Li Y P, Wang S R, *et al*. Fluorescence characteristics of DOM in overlying water of Erhai Lake and its indication of eutrophication[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, **39**(12): 3888-3896.

[45] 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 等. 城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1560-1567.
Cao C L, Liang M Q, He G Y, *et al*. Fluorescent dissolved organic matter and its correlation with water quality in a urban river: A case study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1560-1567.

[46] Li S D, Lu L F, Wu Y F, *et al*. Investigation on depth-dependent properties and benthic effluxes of dissolved organic matter (DOM) in pore water from plateau lake sediments [J]. Ecological Indicators, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107500.

[47] Dong Y R, Li Y, Kong F L, *et al*. Source, structural characteristics and ecological indication of dissolved organic matter extracted from sediments in the primary tributaries of the Dagu River [J]. Ecological Indicators, 2020, **109**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105776.

[48] 程云轩, 赵可, 张越, 等. 松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1941-1949.
Cheng Y X, Zhao K, Zhang Y, *et al*. Fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter in Songhua Lake sediment[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1941-1949.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 45 No. 5

May 15, 2024

CONTENTS