

新疆艾比湖主要入湖河流精河与博尔塔拉河三维荧光光谱特性及其与水质的关系*

张海威^{1,2}, 张 飞^{1,2,3**}, 李 哲^{1,2}, Abduwasit Ghulam^{1,4}, Kung Hsiangte⁵, 任 岩^{1,2}, 陈 芸⁶

(1: 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

(2: 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

(3: 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

(4: 美国圣路易斯大学可持续发展中心, 圣路易斯 63108)

(5: 美国孟菲斯大学地球科学系, 孟菲斯 38152)

(6: 澳大利亚联邦科工组织水土研究所, 堪培拉 2601)

摘 要: 以艾比湖主要入湖河流——精河与博尔塔拉河为研究对象, 分别分析了精河与博尔塔拉河的水体溶解性有机质 (DOM) 的组成结构及水质参数与荧光指数的关系。利用平行因子分析法对三维荧光光谱 (EEM) 分析发现, 精河与博尔塔拉河均含有 C1 (260/420 nm) 腐殖酸等有机质、C2 (240, 240/490 nm) UVC 类腐殖质、C3 (220/280, 300/450 nm) 蛋白质类有机质和 C4 (260, 270/530 nm) 类腐殖质, 且不同荧光组分结构具有一定差异性。为了进一步了解 DOM 组分特征, 采用三维荧光区域积分法分析各区域标准体积百分比, 结果表明精河与博尔塔拉河 EEM 的区域 I 与区域 II 蛋白质有机质含量最高, 区域 III 富里酸含量最低。相关性分析表明, 主要入湖河流的水质参数与荧光指数中, 自生源指数 (BIX) 与总氮 (TN) 浓度以及腐殖化指数 (HIX) 与铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 浓度的相关性较强, 相关系数分别为 0.831 和 0.684, 且具有显著性; HIX 与 TN 浓度的相关系数为 0.604, 达到显著性水平。进而对相关性较强的水质参数与荧光指数进行 3 次拟合, 其中 HIX 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的拟合效果最好, 相关性系数为 0.908, 其次是 BIX 与 TN 浓度, 相关性系数为 0.844。总之, 通过分析精河与博尔塔拉河三维荧光特征, 以及探讨荧光指数与水质参数的关系, 可为治理干旱区水环境问题提供理论依据和参考。

关键词: 水质; 荧光光谱; 荧光指数; 艾比湖; 入湖河流; 精河; 博尔塔拉河

Characteristics of three dimensional fluorescence spectra and its correlation with water quality in Jinghe and Bortala River from Lake Ebinur's major inflow tributaries, Xinjiang

ZHANG Haiwei^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2,3**}, LI Zhe^{1,2}, ABDUWASIT Ghulam^{1,4}, KUNG Hsiangte⁵, REN Yan^{1,2} & CHEN Yun⁶

(1: College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Xinjiang Wisdom City and Environment Modeling, Urumqi 830046, P.R.China)

(4: Center for Sustainability, Saint Louis University, St. Louis 63108, USA)

(5: Department of Earth Sciences, University of Memphis, Memphis 38152, USA)

(6: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Land and Water, Canberra 2601, Australia)

Abstract: Water quality potential factor and chromophoric dissolved organic matter fluorescence in Lake Ebinur and its major inflow tributaries were analyzed. Results indicated that three dimensional fluorescence spectra (EEM) of Jinghe River and Bortala River showed that all sampled water bodies contained C1 (260/420 nm) humic organic matter, C2 (240, 240/490 nm) and C4 (260, 270/530 nm) kind of humus, and C3 (220/280, 300/450 nm) protein like, which was based on PARAFAC analysis meth-

* 国家自然科学基金项目 (41361045) 和国家自然科学基金-新疆联合基金项目 (U1503302) 联合资助。2016-08-06 收稿; 2016-11-21 收修改稿。张海威 (1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: yumiko_RS@163.com.

** 通信作者; E-mail: zhangfei3s@163.com.

od. In order to further understand the characteristics of DOM components, it was found that protein organic matter was the highest and fulvic acid was the lowest in Jinghe River and Bortala River, based on FRI analysis and the regional standards related to water quality and fluorescence. Among the correlation coefficients of water quality parameters and fluorescence indexes, biological index (*BIX*) and total nitrogen (TN) concentration, humification index (*HIX*) and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) were high in Lake Ebinur's major inflow tributaries: the correlation coefficients were 0.831 and 0.684, at $P < 0.01$ significant level, respectively. Correlation between *HIX* and TN concentration was 0.604 at $P < 0.05$ significant level. The water quality parameters and the fluorescence indexes showed a three fitting relationships, while the *HIX*- $\text{NH}_4^+\text{-N}$ fitting effect is best with the correlation coefficient of 0.908. The second one is the *BIX*-TN with the correlation coefficient of 0.844. The results of this work can provide scientific support for the water quality management and restoration in this area.

Keywords: Water quality; fluorescence spectra; fluorescence index; Lake Ebinur; inflow tributaries; Jinghe River; Bortala River

水环境既是人类生产、生活的基础,又是各类污染物的主要归宿之一。近几十年来,随着艾比湖流域经济快速发展和人口急剧增长,人类对水资源的开发不断加剧,使水环境逐渐恶化,水体污染日益加剧^[1]。目前,水体质量评价的指标很多,主要依据地表水的用途进行分类。通常以一些水化学参数(如五日生化需氧量(BOD_5)、化学需氧量(COD))作为基准对地表水进行评价。如:刘萌等^[2]、朱媛媛等^[3]均以一些常规水化学参数对地表水进行现状分析及评价。然而水体荧光也是了解水质状况的一项参数,分析水体中溶解性有机质(DOM)的结构,有利于进一步了解水质。目前,可利用荧光光谱法对不同河流的荧光光谱特性进行分析。荧光光谱法具有快速、高灵敏度、低检测限、所需样品量少和对样品结构无破坏等特点^[4]。近年来,荧光光谱技术的发展实现了对激发和发射波长的同步快速扫描,并可生成三维激发-发射荧光光谱图。三维荧光光谱法为大型湖泊和河流的水质监测提供了潜在应用的可能。国外对此研究开展较早并取得了迅猛的发展和应用,利用荧光光谱技术可以快速、实时地分析各种水质状况,并能取得很好的效果^[5-6],如:三维荧光广泛应用于定量分析水体中的DOM组成结构,揭示了DOM在河流、湖泊、地下水、海洋及污水等水环境中的特征^[7-9]。早期一些学者通过识别5个荧光特征峰表征水体中的DOM组成结构^[10-11]。近年来,许多研究人员应用区域积分、平行因子、自组织神经网络等一些常规方法表征DOM组成结构。精河与博尔塔拉河是艾比湖的主要入湖河流,不仅对艾比湖国家级自然保护区的生态环境有重要的作用,而且为博乐市与精河县等地区提供了农业用水,这对绿洲农业的发展起着决定性的作用。因此,了解水质状况和DOM的结构组成对改善其河流生态环境及维护生态系统结构与功能都有着重要影响。

本文首先利用平行因子法与三维荧光区域积分法对精河与博尔塔拉河的DOM组分及其相对含量进行分析,其次探讨了水质参数与荧光指数的关系,为艾比湖流域河流治理与生态环境修复提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖是新疆第一大咸水湖,是亚洲干旱区典型的内陆湖泊。湖泊地处准格尔盆地中心,远离海洋,水蒸汽难以到达,但研究区的水分来自大西洋^[12]。艾比湖承接奎屯河、阿奇克苏河、精河、大河沿子河及博尔塔拉河来水。由于近几十年来气候的变化,入湖河流径流量逐年减少。其中奎屯河、阿奇克苏河及大河沿子河年径流量逐年减少,而作为入湖的主要河流精河与博尔塔拉河年径流量变化不大。因此,选择精河与博尔塔拉河作为研究对象。博尔塔拉河、精河流域($44^\circ 00' \sim 45^\circ 23' \text{N}$, $79^\circ 53' \sim 83^\circ 53' \text{E}$,图1)位于准噶尔盆地西南边缘,博尔塔拉蒙古自治州境内,东部与塔城市相邻,南部与伊宁市相邻。博尔塔拉河、精河流域西边、南边、北边三面环山,中间为狭长谷地,东部与准噶尔盆地连为一体,基本上可分为山、谷、盆3大地貌单元。盆地海拔从300 m左右逐渐降低到艾比湖水面的196 m。盆地由山前洪积、过渡区冲积、中心区湖积平原及湖泊组成。

1.2 样品采集

样品于2016年3月20日—3月29日分别采自艾比湖流域的博尔塔拉河与精河。从河流中间取水,沿博尔塔拉河上游每隔2 km采集一个水样,精河从上游的下天吉水库往下每隔2 km采集一个水样,在采集水样的同时,用GPS同步记录采样点的经纬度坐标。利用水质检测仪(YSI 600)现场检测河水的pH值、溶解氧

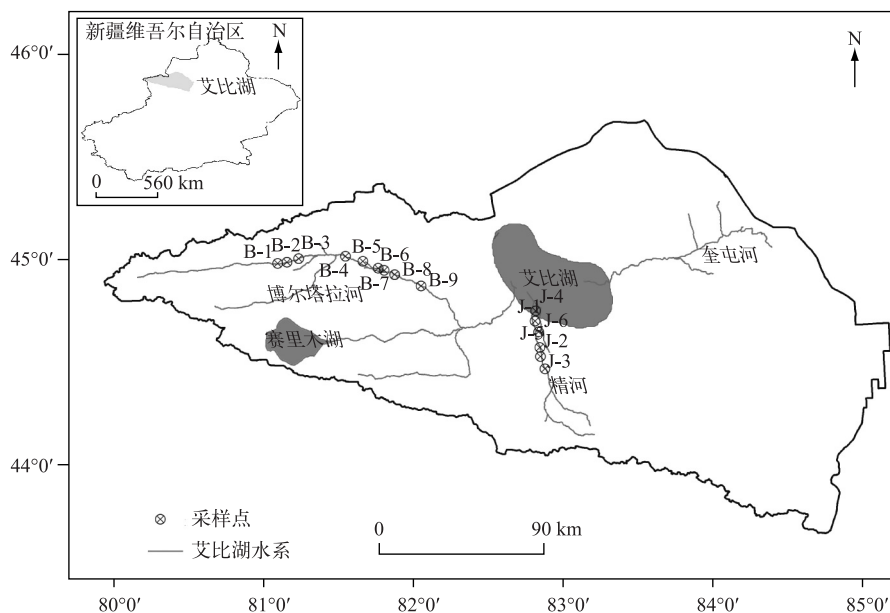


图1 研究区示意图

Fig.1 The sketch map of study area

(DO), 把水样冷藏在不 4°C 冷藏箱内, 运回实验室立即依据《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)测定 BOD_5 、COD、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)等水质参数, 并用预先灼烧过的 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 收集 30 ml 滤液于棕色玻璃瓶中置于 4°C 下保存。

三维荧光光谱(EEM)的获取采用日本日立 F-7000 型荧光分光光度计。激发波长(E_x)为 $200\sim 550\ \text{nm}$, 狭缝宽度 $5\ \text{nm}$, 增量 $5\ \text{nm}$; 发射波长(E_m)为 $280\sim 550\ \text{nm}$, 狭缝宽度 $5\ \text{nm}$, 增量 $2\ \text{nm}$ 。PMT 电压为 $700\ \text{V}$, 扫描速度为 $2400\ \text{nm}/\text{min}$ 。所有水样的三维荧光光谱分别减去空白光谱, 以去除拉曼散射的影响; 在位于发射波长等于激发波长或 2 倍激发波长的光谱区域内, 将瑞利散射及上方的光谱数据均赋为 0, 以消除瑞利散射的影响。

1.3 分析方法

1.3.1 平行因子分析法 平行因子分析法(PARAFAC)^[13]是基于三线分解理论, 采用交替最小二乘原理的迭代类型三维数阵分解算法, 将一个由多个 EEM 数据构成的三维阵列 X 分解为 3 个载荷矩阵后, 对 DOM 的三维荧光光谱进行解谱。

1.3.2 三维荧光区域积分法 荧光区域积分法是通过计算特定区域标准体积($\Phi_{i,n}$)和整体区域标准体积($\Phi_{T,n}$)反映对应区域具有特定结构荧光物质的含量和相对含量^[14-15]:

$$\Phi_i = \sum_{ex} \sum_{em} I(\lambda_{ex} \cdot \lambda_{em}) \Delta\lambda_{ex} \cdot \Delta\lambda_{em} \quad (1)$$

$$\Phi_{T,n} = \sum_{i=1}^5 \Phi_{i,n} \quad (2)$$

$$\Phi_{i,n} = MF_i \cdot \Phi_i \quad (3)$$

$$P_{i,n} = \frac{\Phi_{i,n}}{\Phi_{T,n}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\Delta\lambda_{ex}$ 为激发波长间隔; $\Delta\lambda_{em}$ 为发射波长间隔; $I(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ 指激发与发射波长所对应的荧光强度; $P_{i,n}$ 为荧光物质的相对含量; MF_i 是倍乘系数, 区域 I 为 20.4, 区域 II 为 16.4, 区域 III 为 4.81, 区域 IV 为 8.76, 区域 V 为 1.76。

1.4 数据分析与处理

采用 SigmaPlot 12.5 软件对各指标进行分析,同时使用 Matlab 2012a 软件对三维荧光进行平行因子模型分析及三维荧光区域积分.

2 结果与分析

2.1 主要入湖河流三维荧光光谱特征

采用平行因子分析法对精河与博尔塔拉河进行三维荧光光谱进行解谱,分析其河流 DOM 的不同组分.精河与博尔塔拉河水质均识别出 4 个荧光组分(图 2),包括 C1(260/420 nm)腐殖酸等有机质^[16-17]、C2(240,240/490 nm)UVC 类腐殖质^[18]、C3(220/280,300/450 nm)蛋白质类有机质^[19-20]以及 C4(260,270/530 nm)类腐殖质^[18].

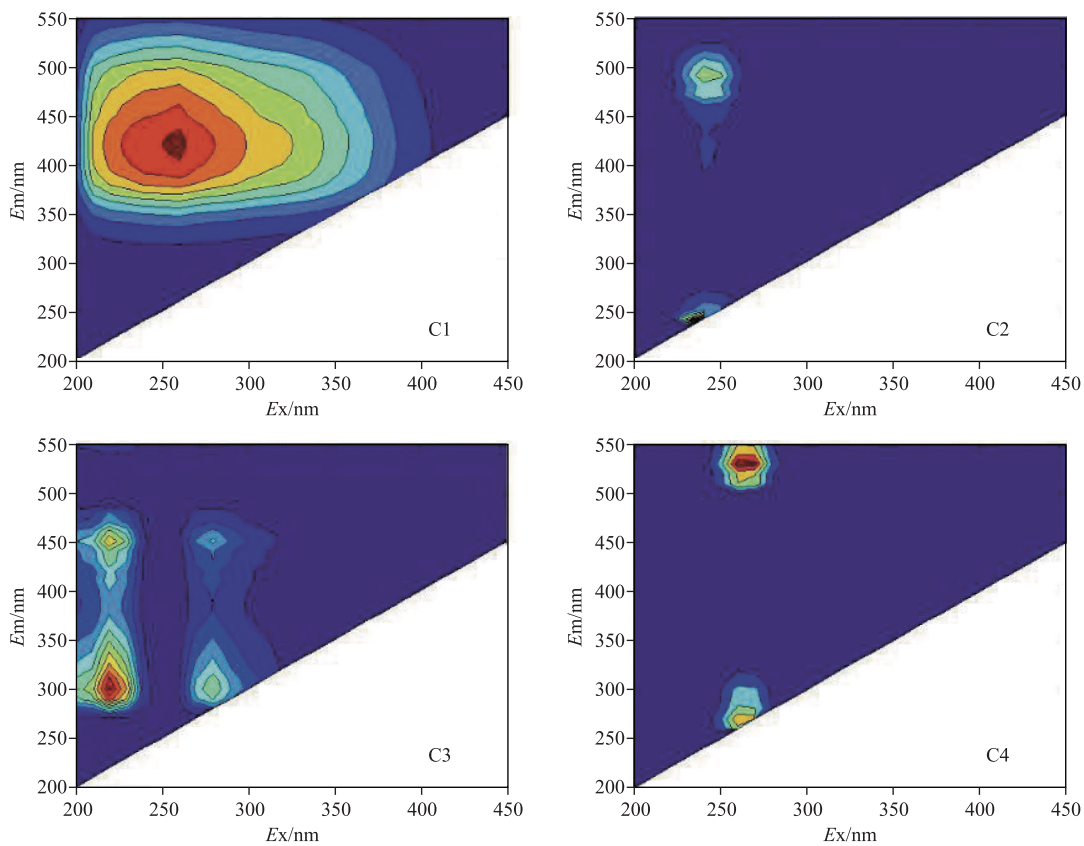


图 2 基于平行因子分析法的艾比湖主要入湖河流荧光组分

Fig.2 Fluorescence components identified by PARAFAC model in the main inflow rivers of Lake Ebinur

为了更深入地了解 DOM 荧光特征,采用三维荧光区域积分法定量分析 DOM 荧光组分特征,利用连续的激发和发射波长将三维荧光光谱划分为 5 个区域^[21]:区域 I ($E_x/E_m = 220 \sim 250/280 \sim 330$ nm) 为络氨酸类蛋白质;区域 II ($E_x/E_m = 220 \sim 250/330 \sim 380$ nm) 为色氨酸类蛋白质;区域 III ($E_x/E_m = 220 \sim 250/380 \sim 550$ nm) 为类富里酸;区域 IV ($E_x/E_m = 250 \sim 400/280 \sim 380$ nm) 为溶解性微生物代谢产物;区域 V ($E_x/E_m = 250 \sim 400/380 \sim 550$ nm) 为类腐殖酸. 通过计算特定区域光谱积分和整体区域标准体积之比,反映对应区域具有特定结构荧光物质的含量和相对含量(图 3).

本研究选取的精河 J-1 采样点位于精河县城附近,J-3 采样点在精河上游的下天吉水库,J-6 采样点位于县城和下天吉水库中间处. 博尔塔拉河 B-1 采样点位于温泉县附近,B-6 采样点在中间的村庄,B-9 采样点大

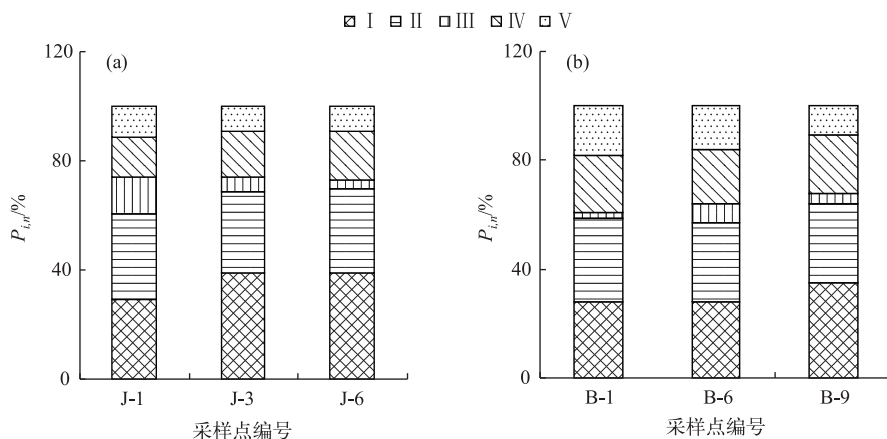


图3 精河(a)和博尔塔拉河(b)DOM组分的分布百分比

Fig.3 Distributions of the abundance of DOM components in Jinghe River(a) and Bortala River(b)

致在进入博乐市附近. 精河络氨酸类蛋白质 $P_{1,n}$ 相对较大的部分介于 29.438% ~ 39.099% 之间, 色氨酸类蛋白质 $P_{2,n}$ 介于 29.773% ~ 31.013% 之间, 类富里酸 $P_{3,n}$ 在 3.189% ~ 13.653% 之间, 溶解性微生物代谢产物 $P_{4,n}$ 在 14.464% ~ 17.645% 之间, 类腐殖酸 $P_{5,n}$ 介于 9.154% ~ 11.605% 之间. 精河 DOM 的主要成分是络氨酸类蛋白质与色氨酸类蛋白质. J-3 采样点的络氨酸类蛋白质 (39.099%) 含量最高, 上游 J-6 采样点类富里酸 (3.183%) 含量最低; 而 J-6 采样点的溶解性微生物代谢产物相对含量高于 J-3 采样点, 总体上看精河水体中类蛋白质是 DOM 的主要成分 (图 3a). 博尔塔拉河络氨酸类蛋白质 $P_{1,n}$ 相对较大的部分介于 27.937% ~ 35.239% 之间, 色氨酸类蛋白质 $P_{2,n}$ 变化范围在 28.807% ~ 30.962% 之间, 类富里酸 $P_{3,n}$ 相对较少的部分介于 1.689% ~ 7.159% 之间, 溶解性微生物代谢产物 $P_{4,n}$ 介于 19.949% ~ 21.72% 之间, 类腐殖酸 $P_{5,n}$ 在 10.708% ~ 18.398% 之间. 络氨酸类蛋白质与色氨酸类蛋白质是博尔塔拉河 DOM 的主要成分 (图 3b). 综上所述, 精河与博尔塔拉河 DOM 的主要成分是类蛋白质有机质和溶解性微生物代谢产物, 两条河流的 DOM 组分中, 各个组分的相对含量具有一定的差异性但相差不大, 说明精河与博尔塔拉河三维荧光特性相似.

2.2 主要入湖河流荧光指数

荧光指数现在已被广泛应用, 它能为认识 DOM 的组成和性质提供有效的信息. 本文选取了一些常规的荧光指数描述水体的荧光指数特性 (图 4).

狭义的荧光指数 (fluorescence index, FI) 定义为 370 nm 激发波长下, 发射波长在 470 和 520 nm 处的荧光强度比值, 该值在 1.4 左右代表陆地或土壤源输入, 而在 1.9 左右代表微生物活动引起的自生来源, 用来区分 DOM 的不同来源^[22]. 精河水质 FI 在 1.6 ~ 2.0 之间; 博尔塔拉河 FI 变幅更小, 呈一条水平直线的趋势. 两条河流的 FI 值都在 1.8 左右波动, 说明两条河流中微生物活动是 DOM 组分转化的主要驱动力.

自生源指数 (biological index, BIX) 定义为 254 nm 激发波长下, 发射波长在 380 和 430 nm 处的荧光强度比值. $BIX > 1$ 代表生物或细菌引起的自生来源, 而介于 0.6 ~ 0.7 之间代表陆地源输入或受人类影响较大, 是反映 DOM 中自生贡献比例的指标^[23]. 精河与博尔塔拉河水质的 BIX 均在 0.6 ~ 0.8 之间, 表明河水中腐殖质来源主要受到人类活动的影响, 可能与人类的耕种、施肥、灌溉等活动紧密相关.

腐殖化指数 (humification index, HIX) 定义为 254 nm 激发波长下, 发射波长在 435 ~ 480 nm 与 300 ~ 345 nm 波段内的荧光强度平均值的比值. $HIX < 4$ 时, 说明 DOM 腐殖化程度较弱, 而高达 10 ~ 16 时, 则说明 DOM 具有显著的腐殖质特征^[22]. 博尔塔拉河水质的 HIX 变幅较大, 但总体上都小于 4; 精河水质 HIX 均小于 4, 说明精河与博尔塔拉河 DOM 组分腐殖化程度均较弱. 综上所述, 精河与博尔塔拉河水质主要受到人类活动及微生物活动的影响.

2.3 主要入湖河流水质现状

对精河 6 个采样点和博尔塔拉河 9 个采样点的水质状况进行分析发现, 精河与博尔塔拉河的 pH 变化

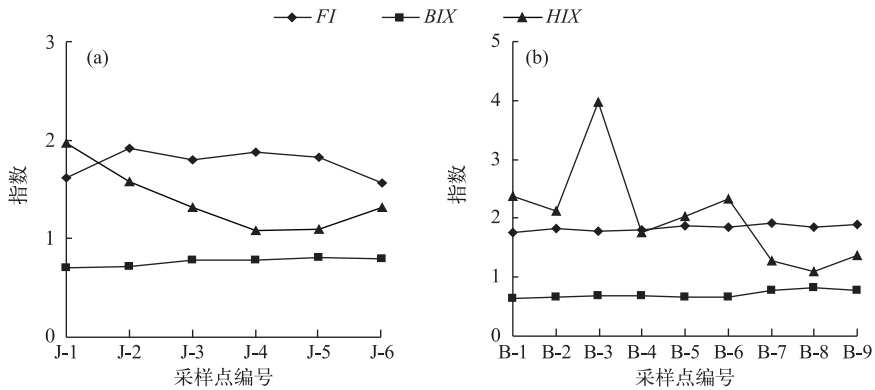


图4 精河(a)与博尔塔拉河(b)各采样点荧光指数的变化

Fig.4 Changes of the fluorescence index of water samples in Jinghe River (a) and Bortala River (b)

范围均在 7.93~8.20 之间,即河水呈弱碱性. 精河 BOD_5 浓度低于博尔塔拉河,且变幅小. 精河与博尔塔拉河 COD 浓度相差不大,COD 均值与中位数重叠,说明这两条河流水体 COD 浓度变化不大. 博尔塔拉河 NH_4^+-N 浓度平均值大于精河,且变幅较大(图 5).

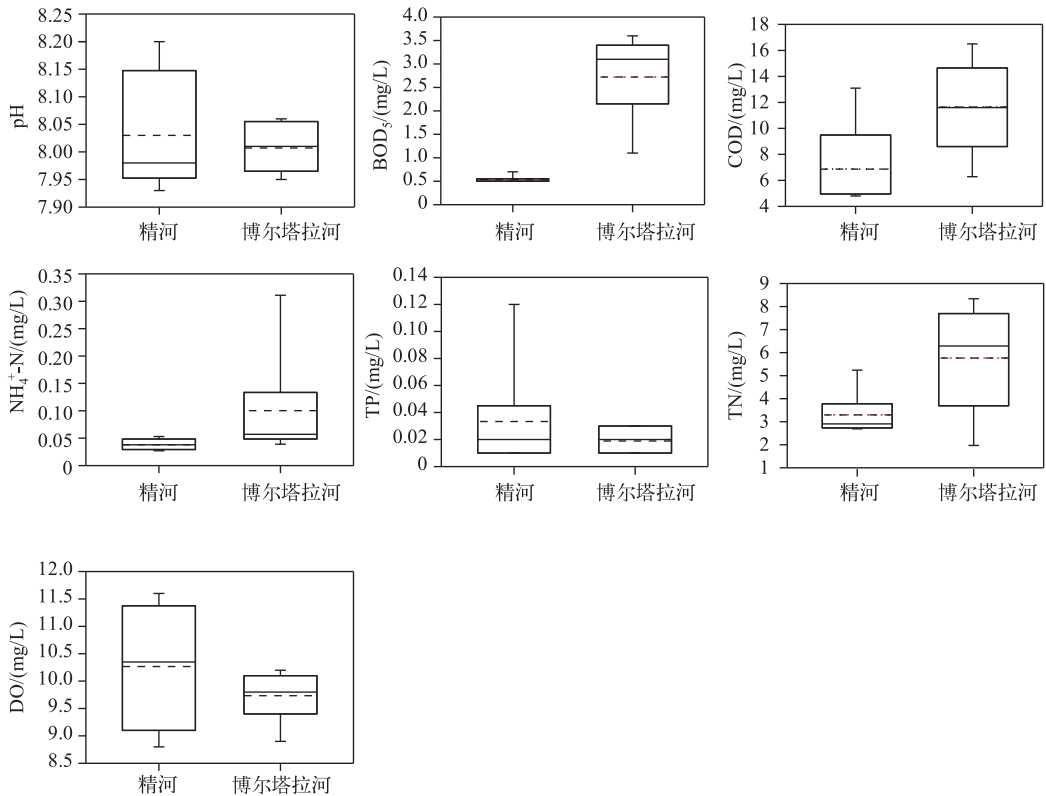


图5 精河与博尔塔拉河水质参数统计描述(虚线代表平均值)

Fig.5 Statistical description of water quality parameters in Jinghe River and Bortala River

河水中 TN、TP 浓度是影响水体富营养化的主要因素. 精河河水中 TP 浓度相对博尔塔拉河的高,而博尔塔拉河水体 TN 浓度比精河的高(图 5),且均超出了国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类

水域功能标准. 这两条河流水体中 TN 浓度普遍较高可能是因为雨水冲刷岸边土壤以及农作物施肥. 这两条河流水体中 DO 浓度普遍较高,超出了国家《地表水环境质量标准》中 DO 标准 4 倍多.

2.4 主要入湖河流水质参数与荧光指数的关系

为了探讨水质参数与荧光指数的关系,对主要入湖河流精河与博尔塔拉河的水质参数与荧光指数进行相关分析. 结果(表1)表明,*BIX* 与 TN 浓度以及 *HIX* 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的相关性较强,相关系数 *R* 分别为 0.831 和 0.684,均呈显著相关($P<0.01$);*HIX* 与 TN 浓度的 *R* 为 0.604,呈显著相关($P<0.05$). *BIX* 与水质参数(pH、 BOD_5 、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、TN)之间均呈负相关,仅与 TN 浓度的相关性显著. *BIX* 反映 DOM 腐殖质来源与人类活动有关,说明人类活动对河流 TN 浓度有影响. *HIX* 与水质参数(pH、 BOD_5 、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、TN)均呈正相关,仅与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 TN 浓度相关性显著. *HIX* 的大小反映 DOM 组分腐殖化程度,说明河流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度与河流中有机质腐殖化的强弱有关.

表 1 水质参数与荧光指数相关性矩阵

Tab.1 Correlation matrix of water quality parameters and fluorescence indexes

	pH	BOD_5	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	TN	DO	<i>FI</i>	<i>BIX</i>	<i>HIX</i>
pH	1	-0.069	-0.150	-0.238	0.399	0.010	-0.587 *	-0.009	-0.346	0.014
BOD_5		1	0.600 *	0.146	-0.150	0.454	-0.243	0.304	-0.323	0.079
COD			1	0.089	-0.401	0.303	0.089	0.420	-0.333	0.062
$\text{NH}_4^+\text{-N}$				1	-0.210	0.061	0.013	0.069	-0.102	0.684 **
TP					1	0.155	-0.324	-0.457	-0.158	0.047
TN						1	-0.258	-0.143	-0.831 **	0.604 *
DO							1	-0.301	0.476	-0.211
<i>FI</i>								1	0.010	-0.170
<i>BIX</i>									1	-0.710 **
<i>HIX</i>										1

* 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关.

针对表 1 中荧光指数与水质参数具有显著性相关,首先选取与荧光指数呈显著相关的水质参数,再将荧光指数分别与水质参数进行 3 次函数拟合(图 6). 可以看出 *HIX* 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的 3 次拟合关系最好,且呈显著相关($R=0.908, P<0.01$). 其次为 *BIX* 与 TN 浓度,呈显著负相关($R=0.844, P<0.01$). 而 *HIX* 与 TN 浓度的 3 次拟合关系一般($R=0.678, P<0.05$).

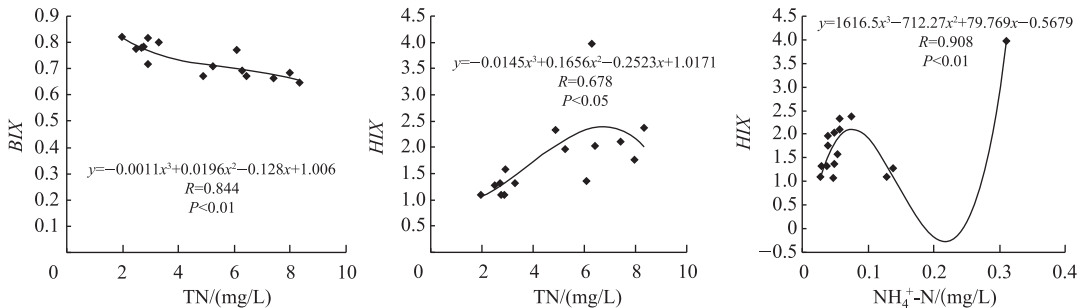


图 6 水质参数与荧光指数的关系

Fig.6 Relationship between water quality parameters and fluorescence indexes

3 结论与讨论

本文首次尝试探讨荧光指数与水质参数的关系,结果表明主要入湖河流 3 种荧光指数之间仅有 *BIX* 与

HIX 呈现显著负相关. *BIX* 反映的是 DOM 中腐殖质有机质的来源,而 *HIX* 反映的是 DOM 腐殖化程度的强弱,所以河流 DOM 中腐殖质的来源与 DOM 腐殖化程度没有直接关系. *FI* 被用于指示 DOM 中腐殖质的来源^[24],主要入湖河流的 *FI* 值在 1.8 左右(图 6),说明河流 DOM 中的腐殖质主要是由微生物活动引起的;*BIX* 均小于 1,说明主要入湖河流的腐殖质来源受到了人类活动的影响. 然而 *FI* 与 *BIX* 和 *HIX* 无显著相关性,说明河流中微生物的活动与 DOM 组分腐殖化强弱无关,与人类活动也没有直接关系. *HIX* 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度呈显著正相关,说明腐殖化程度的强弱与氮元素的迁移、转化活动紧密相关. *BIX* 与 TN 浓度呈显著负相关,说明氮元素的转化、迁移去向与腐殖质的来源不同. 总而言之,主要入湖河流的荧光指数与水质参数确实存在某种关系,本文对 3 种荧光指数与水质参数的研究存在单一性,不能全面说明荧光指数与多种水质参数的耦合关系,需进一步开展深入研究.

致谢:感谢艾比湖国家级湿地自然保护区陈丽华等工作人员的帮助,以及在稿件修改中得到了杨建英老师的帮助,在此致以诚挚的感谢!

4 参考文献

- [1] Wang Chouming, Zhang Yi, Shi Huihua *et al.* Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality in Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2016, **28**(2): 395-404. DOI: 10.18307/2016.0220. [王丑明, 张屹, 石慧华等. 洞庭湖大型底栖动物群落结构和水质评价. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 395-404.]
- [2] Liu Meng, Chen Shijian. Ground water quality assessment of Hong hu Area based on the Nemerow Index and principal component analysis method. *Journal of Central China Normal University: Nat. Sci.*, 2016, **50**(4): 633-640. [刘萌, 陈世俭. 基于内梅罗指数与主成分分析的洪湖地区地下水水质评价. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2016, **50**(4): 633-640.]
- [3] Zhu Yuanyuan, Tian Jinjun, Li Hongliang *et al.* Water quality assessment and pollution profile identification of Danjiangkou Reservoir, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(1): 139-147. [朱媛媛, 田进军, 李红亮等. 丹江口水库水质评价及水污染特征. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 139-147.]
- [4] Wu J, Pons MN, Potier O. Waste water fingerprinting by UV-visible and synchronous fluorescence spectroscopy. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(4/5): 449-456.
- [5] Baker A, Inverarity R, Charlton M *et al.* Detecting river pollution using fluorescence spectrophotometry: Case studies from the Ouseburn NE England. *Environ Pollut*, 2003, **124**(1): 57-70.
- [6] Baker A. Fluorescence properties of some farm wastes: Implications for water quality monitoring. *Water Research*, 2002, (1): 189-195.
- [7] Zhang YL, Yin Y, Feng LQ *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5110-5122.
- [8] Goldman JH, Rounds SA, Needoba JA. Applications of fluorescence spectroscopy for predicting percent wastewater in an urban stream. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(8): 4374-4381.
- [9] Yu HB, Song YH, Tu X *et al.* Assessing removal efficiency of dissolved organic matter in wastewater treatment using fluorescence excitation emission matrices with parallel factor analysis and second derivative synchronous fluorescence. *Biore-source Technology*, 2013, **144**: 595-601.
- [10] Wu H, Zhou Z, Zhang Y *et al.* Fluorescence-based rapid assessment of the biological stability of landfilled municipal solid waste. *Biore-source Technology*, 2012, **110**(2): 174-183.
- [11] He XS, Xi BD, Wei ZM *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy with regional integration analysis for characterizing composition and transformation of dissolved organic matter in landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **190**(1/2/3): 293.
- [12] Zhang F, Tiyp T, Johnson VC *et al.* Evaluation of land desertification from 1990 to 2010 and its causes in Ebinur Lake region, Xinjiang China. *Environ Earth Sci*, 2015, **73**(9): 5731-5745.
- [13] Wang Shuhang, Wang Wenwen, Jiang Xia *et al.* Distribution of chromophoric dissolved organic matter in Li hu Lake using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 517-524. [王书航, 王雯雯, 姜霞等. 基于三维荧光光谱—平行因子分析技术的蠡湖 CDOM 分布特征. 中国环境科学,

- 2016, **36**(2): 517-524.]
- [14] Huguet A, Vacher L, Relexans S *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [15] Chen W, Westerhoff P, Leenheer JA *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [16] Jin H, Cho J. Prediction of BOD, COD, and total nitrogen concentrations in a typical urban river using a fluorescence excitation-emission matrix with PARAFAC and UV absorption indices. *Sensors*, 2012, **12**: 972-986.
- [17] Cheng Qinglin, Zheng Binghui, Wang Shengrui *et al.* Optical signatures of chromophoric dissolved organic matter in water body of Tien Lake. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(3): 698-703. [程庆霖, 郑丙辉, 王圣瑞等. 滇池水体有色溶解性有机质 (CDOM) 三维荧光光谱特征. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(3): 698-703.]
- [18] Feng Weiyang, Wang Shengrui, Zhang Sheng. Effect of pH on the fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the sediment and overlying water from Erhai Lake. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 229-235. [冯伟莹, 王圣瑞, 张生. pH 对洱海沉积物-上覆水溶解性有机质荧光特征影响. 环境化学, 2014, **33**(2): 229-235.]
- [19] Ma Lina, Zhang Hui, Tan Wenbing *et al.* Evolution of dissolved organic matter properties in a constructed wetland of Xiao River, Hebei. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(1): 206-212. [马丽娜, 张慧, 檀文炳. 河北洮河人工湿地水体溶解性有机物质性质的演化过程研究. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(1): 206-212.]
- [20] Wang Qilei, Jiang Tao, Zhao Zheng *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in waters of typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir areas. *Environmental Chemistry*, 2016, **37**(6): 2082-2092. [王齐磊, 江韬, 赵铮等. 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征. 环境科学, 2016, **37**(6): 2082-2092.]
- [21] Vodacek A, Hoge FE, Swift RN *et al.* The in situ and airborne fluorescence measurements to determine UV absorption coefficients and DOC concentrations in surface waters. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(2): 411-415.
- [22] Cory RM, McKnight DM. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [23] Wang Z, Wu Z, Tang S. Characterization of dissolved organic matter in a submerged membrane bioreactor by using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy. *Water Research*, 2009, **43**: 1533-1540.
- [24] McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.