

三峡库区土地利用对河流溶解性有机质的多时空尺度影响^{*}

郑达燕^{1,2}, 刘睿^{1,2}, 张柳柳^{1,2}, 郑财贵^{3,4}, 张静^{1,2,3**}

(1:重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331)

(2:重庆师范大学 GIS 应用研究重庆市重点实验室,重庆 401331)

(3:重庆市规划和自然资源调查监测院,重庆 401120)

(4:自然资源部国土空间规划监测评估预警重点实验室,重庆 401120)

摘要:三峡库区拥有目前世界上规模最大的水利枢纽工程,自投入使用以来,为长江流域提供了丰富的水源及电力,促进了经济的发展,但同时也对该区域的生态环境造成了严重的冲击。澎溪河流域作为三峡库区长江流域干流的典型回水区和消落带,是众多学者研究三峡库区生态环境变化的重点区域。为探究不同时空尺度下土地利用对河流溶解性有机质(DOM)的影响,以澎溪河流域为研究对象,基于紫外-可见光谱分析和三维荧光光谱矩阵-平行因子分析,结合河段缓冲区、河岸带缓冲区及子流域3种空间尺度的二级土地利用类型,解析了旱雨季水体DOM的组成及来源特征,并采用相关分析和冗余分析方法探讨了3种空间尺度下土地利用方式对旱雨季水体DOM的多时空尺度影响。结果表明:(1)旱季水体DOM荧光组分以陆源类腐殖质所占比例更大,雨季水体DOM荧光组分以富里酸贡献为主。(2)流域内陆源输入和内源产生对水体DOM丰度均有贡献,雨季较旱季水体DOM的陆源性更强,自生源特征较弱。(3)土地利用在雨季和子流域尺度下对水体DOM的影响更显著,其中,雨季子流域尺度下,土地利用指数对水体DOM参数的解释率为90.35%。(4)不同土地利用方式对水体DOM产生的影响不同,灌木林、滩地和香农多样性指数对水体DOM的解释率最大。旱季,高覆盖度草地、边界密度与溶解性有机碳等水体DOM参数呈正相关关系,雨季则相反。河岸带缓冲区和子流域尺度下,灌木林、有林地、河渠和滩地与其呈负相关关系,水库坑塘、斑块密度与其呈正相关关系,河段缓冲区则相反。该研究可为合理的土地规划提供基础数据,以期为三峡库区河流生态系统和水资源管理提供参考。

关键词:溶解性有机质;土地利用;冗余分析;三峡库区;澎溪河流域

Effects of land use on multi-temporal scales of dissolved organic matter in Three Gorges Reservoir^{*}

Zheng Dayan^{1,2}, Liu Rui^{1,2}, Zhang Liuliu^{1,2}, Zheng Caigui^{3,4} & Zhang Jing^{1,2,3**}

(1: School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, P.R.China)

(2: The Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, P.R.China)

(3: Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401120, P.R.China)

(4: Key Laboratory of Monitoring, Evaluation and Early Warning of Territorial Spatial Planning Implementation, Ministry of Natural Resources, Chongqing 401120, P.R.China)

Abstract: The Three Gorges Reservoir area has the largest water conservancy project in the world. In this context, it potentially provides water resources and promotes economic development, and yet causes serious impacts on ecological environments in the same time. In order to explore the effects of land use on riverine dissolved organic matter (DOM) at distinct spatial and temporal scales, we investigated a typical backwater area and water level fluctuation zone (Pengxi River basin) in the Three Gorges Reservoir area. Techniques of UV-Vis spectral analysis and 3D fluorescence spectral matrix-parallel factor analysis were used to analyze temporal variations of DOM composition and source characteristics. Landscape patterns reach buffer, riparian buffer and catchment

* 2022-09-12 收稿;2022-12-24 收修改稿。

重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0549)、重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202200517)和重庆师范大学基金项目(20XLB022)联合资助。

** 通信作者;E-mail: zhangjing@cqnu.edu.cn。

were jointly employed to examine the influences of land use on surface water DOM at distinct spatial scales. The results showed that high protein-like abundance was observed in the dry seasons, whereas fulvic acids were dominated in the wet seasons. Both terrestrial and autochthonous inputs constrained DOM sources in the river basin, while terrestrial signals were particularly pronounced in the wet seasons in comparison to the dry seasons. Land use exhibited significant effects on riverine DOM in the wet seasons; land use indexes explained 90.35% of DOM parameters under the catchment scale. Specifically, shrublands, mudflats and Shannon's Diversity Index (SHDI) largely deciphered DOM variables. High cover grassland, edge density (ED) and dissolved organic carbon (DOC) were positively and negatively correlated with aquatic DOM in the dry and wet seasons, respectively. We found discrepant correlations among shrubland, forested land, rivers and canals, reservoir ponds, mudflats, patch density (PD) and DOM, spatially. At the riparian buffer and catchment scales, shrublands, forested lands, river channels and mudflats were negatively correlated with DOM, whereas reservoir ponds and PD were positively correlated with DOM. Our study may provide basic data for rational land planning, as well as assist understandings for river ecosystem and water resources management in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: Dissolved organic matter; land use; redundancy analysis; Three Gorges Reservoir area; Pengxi River basin

溶解性有机质(DOM)是可通过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 孔径滤膜^[1-3],由腐殖质、蛋白质和碳水化合物等有机化合物组成的复杂混合物^[4-6],是区域和全球碳循环的重要组成部分^[7-8],通常用溶解性有机碳(DOC)浓度表征^[9-11]。水生生态系统中DOM来源可分为外源输入和内源产生,外源输入包括大气降水、地表径流、地下水以及工业和生活污水的排放,内源产生主要为浮游生物、水生植被和一系列微生物的生命活动以及光化学降解^[12-14]产生的有机物。同时,DOM具有一定的光学特性^[15-16],主要包括能够吸收紫外线和可见光波长的有色溶解性有机质(CDOM)以及可将所吸收的一部分光作为荧光发出的荧光溶解性有机质(FDOM),二者可通过紫外-可见光谱分析技术和三维荧光光谱技术对其性质进行表征^[17-18]。

土地利用方式决定流域内的植被种类及耕作措施,对水体污染物的进入与输送产生影响,从而影响地表水环境^[19]。现阶段国内外学者在水体DOM对土地利用类型响应的研究中,大多探讨了农业用地、湿地、林地和建设用地等一级分类的土地利用类型对水体DOM的影响^[20-22],缺乏基于更为精细的土地利用类型的研究。例如,Bhattacharya等^[20]和Graeber等^[21]基于冗余分析方法发现,湿地和农业用地区域溶解性有机碳(DOC)浓度较高,且水体DOM具有较高的腐殖质特征,林地区域水体DOM的类腐殖质荧光组分含量较低。Shi等^[22]基于相关性分析和多元逐步回归分析方法探究了长江三角洲天目湖流域土地利用与水体DOM的关系,发现水体DOM中类腐殖质物质和类色氨酸含量与林地面积呈反比,与农业用地和城镇用地面积呈正比。同时,景观结构也是影响流域径流中有机物输送的重要因素^[23-25],但基于此的研究较少。Li等^[26]研究表明,景观斑块破碎化程度对水体DOM的输入具有减缓效应,景观斑块连通性和聚集性对流域出口处水体DOM中类腐殖质荧光组分有一定的增强效应。因此,基于更为精细的土地利用类型,结合流域景观破碎度、优势度、形状复杂度、聚集度和分离度、异质性等景观格局特征,进一步研究土地利用-景观格局对水体DOM的影响,对土地利用的综合管理与水环境保护具有重要意义。

此外,国内外学者对于不同空间尺度下土地利用-景观格局特征与水环境的关联性研究中,主要从河段、河岸带和子流域等尺度来探究两者之间关系及尺度效应,如土地利用对常规水质指标的影响机制研究等^[27-29]。在土地利用方式与水体DOM的研究中大多以流域为空间尺度^[20-21,30],其它空间尺度的研究较少。例如,Shao等^[31]以 100 m 为间隔,分析了 $100\sim 1000\text{ m}$ 河岸带缓冲区和子流域空间尺度下,土地利用方式对水体DOM的影响,结果表明,1000 m河岸带缓冲区尺度和子流域尺度下,二者的相关性更强。在时间尺度上,已有研究主要基于流域的水文和季节性特征,分析了水体DOM的组分特征和来源差异^[32-34]。如Ma等^[32]研究表明雨季水体DOM的芳香性、腐殖质和木质素含量高于旱季,旱季水体DOM的自生源特征较强,陆源性较弱。因此,研究不同时空尺度土地利用方式与水体DOM性质之间的关系,不仅可以丰富土地利用与水环境指标间的空间尺度研究,还可为流域非点源污染治理、改善水体环境提供理论依据。

三峡水库是世界上最大的人工水库,平均库容为 393亿m^3 ,自投入使用以来,其水文、土地利用及人口分布等发生了较大的变化^[35-37]。以往研究主要集中于三峡库区水体DOM的组成和来源解析^[38-39]、生物降解性^[40-42]以及水文异质性和城镇化对水体DOM组成及来源的影响^[32,43-44],而关于土地利用对水体DOM的

影响方面研究较少^[45-46],且没有针对澎溪河全流域的土地利用与水体DOM之间关系的研究。因此,为进一步明确水文异质性和土地利用与水体DOM的联系,本研究基于三峡库区的旱雨季水体DOM参数,结合二级土地利用类型和子流域、河段缓冲区、河岸带缓冲区等3种空间尺度,以三峡库区典型消落带澎溪河流域为研究对象,采用光谱解析和冗余分析等方法,探讨了河流水体DOM的组成、来源以及土地利用方式对水体DOM的多时空尺度影响。本研究旨在探究不同时空尺度下土地利用方式对水体DOM的影响程度,以期为三峡库区水体DOM与土地利用研究提供新视角,并为三峡库区土地利用规划和河流水资源管理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

澎溪河($30^{\circ}50' \sim 31^{\circ}42'N$, $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'E$)位于三峡库区中部,发源于重庆市开州区雪宝山,流经开州区和云阳县,汇入长江。流域内有东河、南河、普里河等支流,流域总面积为 5172.5 km^2 ,长度182.4 km,是三峡库区消落带面积最大的支流^[47]。流域属亚热带湿润季风气候,降雨相对充沛,多年平均降水量介于1100~1500 mm之间,多年平均气温为 18.6°C ^[47-48],海拔高度介于148~2549 m之间,地势北高南低,河道平均坡降为0.125%。流域内土地利用类型以旱地、水田和疏林地为主,中覆盖度草地、有林地、灌木林等土地利用类型次之(图1)。

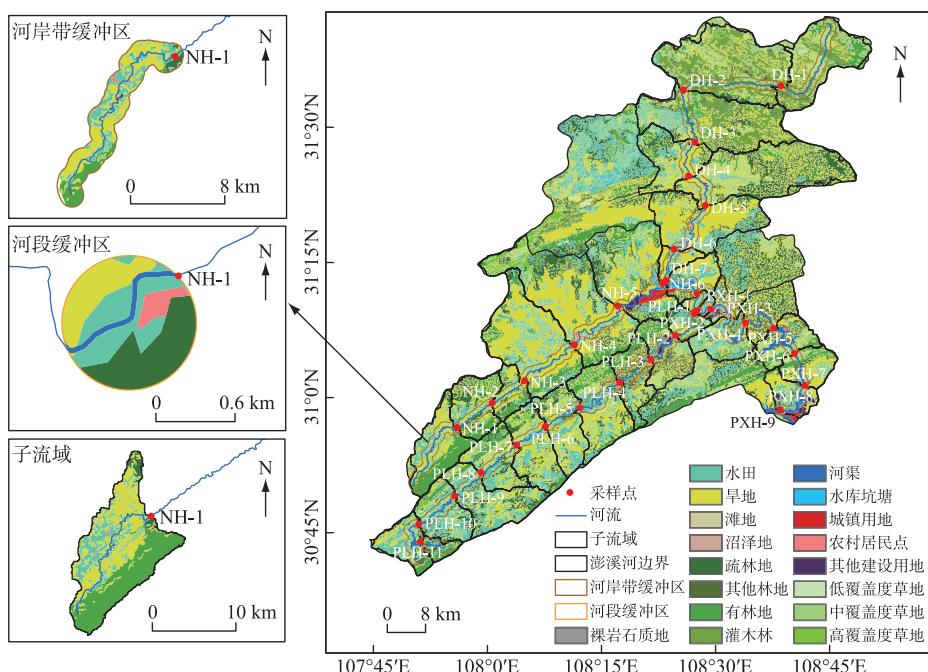


图1 澄溪河流域采样点及土地利用的空间分布
(DH-1~DH-7为东河流域内采样点,NH-1~NH-6为南河流域内采样点,
PLH-1~PLH-11为普里河流域内的采样点,PXH-1~PXH-9为澄溪河干流流域内采样点)

Fig.1 Location, land use and distribution of sampling sites in Pengxi River Basin

1.2 数据来源

1.2.1 基础数据 Landsat 8 OLI 遥感影像和 DEM 高程数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。基于人工目视解译和支持向量机方法,结合研究区实际情况,参考《土地利用现状分类》标准(GB/T21010—2007),将澄溪河流域分为水田(L1)、旱地(L2)、有林地(L3)、灌木林(L4)、疏林

地(L5)、其它林地(L6)、高覆盖度草地(L7)、中覆盖度草地(L8)、低覆盖度草地(L9)、河渠(L10)、水库坑塘(L11)、滩地(L12)、城镇用地(L13)、农村居民点(L14)、其它建设用地(L15)、沼泽地(L16)、裸岩石质地(L17)共17类二级土地利用类型。分类结果经混淆矩阵精度验证,分类总精度为86.36%,Kappa系数为0.85,满足精度要求。

1.2.2 空间尺度划分 在土地利用与水环境指标的相关研究中,大多集中在河岸带缓冲区、河段缓冲区及子流域3种空间尺度^[27-29],本研究参考前人研究并结合澎溪河流域特征,选取500 m河段缓冲区、1000 m河岸带缓冲区和子流域3个空间尺度下的土地利用类型百分比和景观格局指数构成土地利用指数表征流域内的土地利用方式,与水体DOM参数的多时空尺度响应关系进行探讨。运用ArcGIS 10.5平台和DEM高程数据,基于水流路径方向进行水文分析,得到以采样点为出水口的流域内各采样点的子流域范围。以监测点上游500 m处为圆心,设置半径为500 m的点缓冲区,生成500 m河段缓冲区;以子流域为边界截取河流,向左右两岸各延伸1000 m,生成1000 m河岸带缓冲区。基于缓冲区和子流域范围提取每个采样点对应区域的土地利用数据,运用Fragstats 4.2软件进行景观格局指数的提取,得到土地利用指数。

1.2.3 取样与分析

(1) 样品采集及预处理

本研究于2019年11月(旱季,高水位,“涨水期”)和2020年7月(雨季,低水位,“落干期”)对澎溪河流域33个采样点开展了野外样品采集工作,采集河流上层水样用于后续实验室分析。取样当天用玻璃纤维膜(GF/F 47 mm, 0.45 μm, Whatman)对原水样进行抽滤处理,并将滤液移置聚乙烯塑料瓶中规范储存。随后将预处理后的样品冷藏,并尽快(一周内)送至实验室进行检测。

(2) 实验室分析

本研究中,样品DOC浓度使用vario TOC cube select总碳分析仪(Elementar,德国)检测。使用UV-1500 PC紫外-可见分光光度计(Macy,上海)测定水样的紫外-可见吸收光谱,用10 mm石英比色皿在200~700 nm范围内扫描,扫描间隔为1 nm。三维荧光激发-发射矩阵(EEMs)利用F-7000荧光光谱仪(Hicachi,日本)测定,其激发(λ_{Ex})和发射波长(λ_{Em})扫描范围分别为200~450 nm(间隔5 nm)和250~600 nm(间隔2 nm)。本实验在25℃室温条件下进行,并使用Milli-Q超纯水做空白对照。用插值法消除瑞利散射和拉曼散射^[49],使用非线性函数(non-linear function fits)拟合校正EEM的内滤效应^[50]。DOC浓度测量一式三份,剔除异常值,记录读数平均值,确保大多数样品的DOC浓度变异系数(coefficient of variance, CV)小于1%。

(3) 光学参数分析

紫外-可见吸收光谱波长λ的吸收系数 $a(\lambda)(\text{m}^{-1})$ 由公式(1)计算,本研究选取紫外-可见吸收光谱波长为254、280、350 nm处的吸收系数用于描述澎溪河流域的CDOM特征^[10,51-53]。

$$a(\lambda) = 2.303 A(\lambda)/b \quad (1)$$

式中, $A(\lambda)$ 为CDOM吸收波长为λ时的吸光度, b 为吸光路径长度,即比色皿宽度。

本研究基于三维荧光光谱数据提取3个荧光特征参数,对研究区内水体DOM的来源特征进行分析:1)荧光指数(fluorescence index, FI), λ_{Ex} 为370 nm时, λ_{Em} 在450 nm和500 nm处的荧光强度比值^[54-56]。该指数是用于判断水体DOM内外源的重要指标,FI>1.9时,表明DOM来源主要由微生物和藻类(内源性)控制,即其内源性特征更为明显,FI<1.4时,内生贡献相对较低,DOM主要来源于外源输入^[33,55,57]。2)自生源指数(autochthonous index, BIX), λ_{Ex} 为310 nm时, λ_{Em} 在380 nm和430 nm处的荧光强度比值计算所得^[58-60]。该指数可表征DOM的自生源强弱,当0.6< BIX < 0.8时,表示水体DOM的自生源贡献较少,当0.8 < BIX < 1.0时,表示水体DOM的自生源特征较为显著,当BIX > 1.0时,表示水体DOM来源以自生源为主^[56,60-61]。3)腐殖质指数(humification index, HIX), λ_{Ex} 为254 nm时, λ_{Em} 在435~480 nm和300~345 nm处的平均荧光强度比值计算所得^[54,56,60]。该指数可反映水体DOM的腐殖化程度,HIX值越大,表明水体DOM的腐殖化程度越高^[61]。

1.3 数据统计与处理

本研究基于Matlab2018a中的DOMFluorv1.71工具箱,运用平行因子分析(PARAFAC)方法识别河流溶解性有机质的不同荧光组分,以输出的主要荧光组分结果及每个组分荧光强度的最高峰值(Fmax)表示水体

DOM 的荧光特征和相对浓度^[57,62]。基于 33 个采样点的三维荧光光谱数据,利用折半分析法(split-half analysis)将数据库分为 2 个随机的子数据库,通过对比不同组分时模型的激发和发射光谱的误差平方和曲线来初步确定模型的组分。组分对应的曲线越平滑,所含波峰越少,则模型的拟合效果越好。通过对比 2 个子数据库激发和发射波长的载荷,以及模型拟合的三维荧光光谱与实测的三维荧光光谱的一致性来验证模型的可靠性,并最终确定组分的个数。

运用 SPSS Statistics 24 软件,首先对各空间尺度下的土地利用指数及旱雨季的 DOM 参数进行显著性检验,判断各时空尺度下土地利用指数及 DOM 参数是否具有显著性差异。其次,本研究参考前人研究成果,在充分考虑各个景观格局指数生态学意义和澎溪河实际景观特征的基础上,从表征景观破碎度、优势度、形状复杂度、聚集度和分离度、异质性 5 个方面^[29,63-64],运用 Spearman 相关分析筛选出斑块数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、边界密度(ED)、景观形状指数(LSI)、景观分割指数(DIVISION)、聚集度指数(AI)和香农多样性指数(SHDI)等景观格局指数参与分析。

冗余分析(redundancy analysis, RDA)能够反映多个解释变量对所有响应变量的影响,同时可以得到单个解释变量对响应变量的解释率^[65]。因此,本研究采用该方法解析土地利用方式对水体 DOM 参数变异的解释能力,其中,土地利用指数为解释变量,水体 DOM 参数为响应变量。

2 结果与分析

2.1 多尺度土地利用-景观格局特征统计分析

本研究基于筛选出的土地利用类型面积占比和景观格局指数组成土地利用指数,用于分析土地利用对水体 DOM 的影响。基于澎溪河流域的 33 个采样点,不同空间尺度下土地利用类型面积占比的统计分析结果如图 2 所示,不同空间尺度下景观格局指数的统计分析结果如表 1 所示。流域内人类活动主要以农业活动为主,土地利用类型主要为旱地、水田和疏林地,中覆盖度草地、有林地、灌木林等土地利用类型次之。从河岸带缓冲区、河段缓冲区到子流域,水田的面积占比逐渐减少,灌木林、有林地、疏林地面积占比有所增加。与其它 2 个空间尺度相比,子流域范围内 NP 值较大,而 PD 值较小。即子流域尺度下,景观斑块分布较集中,破碎化程度较小。从河段缓冲区、子流域到河岸带缓冲区尺度 LPI 值逐渐减小,说明各空间尺度下,人类活动强度逐渐减小,斑块优势度减小,斑块面积更加均匀。与缓冲区尺度相比,子流域尺度下 ED 值较小,即子流域尺度下斑块的边界更简单,斑块规整性较高。LSI 在子流域尺度值最大,在河段缓冲区最小,说明在子流域尺度下斑块形状最复杂,而河段缓冲区尺度下则相对简单。DIVISION 和 AI 分别表征景观斑块的分离度和聚集度,本研究中,河段缓冲区尺度下,斑块的分离度较小,即景观斑块的聚集性更强。子流域尺度下 SHDI 的值最大,说明该区域内景观类型更丰富,景观异质性更高。

表 1 3 种空间尺度下景观格局指数统计

Tab.1 Landscape metrics in three spatial scales in Pengxi River Basin

空间尺度	NP	PD	LPI	ED	LSI	DIVISION	SHDI	AI
河段缓冲区	9.91±4.11	12.61±5.23	36.07±8.93	76.39±23.67	2.81±0.52	0.75±0.08	1.12±0.27	96.96±1.07
河岸带缓冲区	89.61±28.55	3.77±1.12	20.50±9.44	63.24±12.37	9.42±1.90	0.91±0.05	1.48±0.30	96.98±0.60
子流域	199.97±93.28	1.98±1.04	22.68±9.87	57.59±11.56	16.83±5.89	0.91±0.05	1.56±0.22	97.21±0.56

2.2 水化学特征统计分析

基于研究区域内的 33 个采样点,获取澎溪河流域旱雨季 DOC 浓度、CDOM 吸收系数、EMM-PARAFAC 得到的组分百分比以及荧光特征参数,共同组成一套水体 DOM 指数,分析土地利用对水体 DOM 的影响,基于 3 个荧光特征参数分析水体 DOM 的来源特征,各参数统计结果如图 3 所示。分析结果表明,除 BIX 外,其他 DOM 参数在旱季和雨季均表现出显著差异($P<0.05$),其中,DOC 浓度、FI、HIX 等 DOM 参数旱季高于雨季, a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 等 DOM 参数则雨季高于旱季。

2.2.1 DOC 浓度和 CDOM 吸收系数 研究区域内所统计的 DOC 浓度最大值(7.88 mg/L)出现在旱季的南河下游汉丰湖附近,雨季 DOC 浓度最小值为 1.42 mg/L,总体来说旱季 DOC 浓度大于雨季 DOC 浓度。旱季和

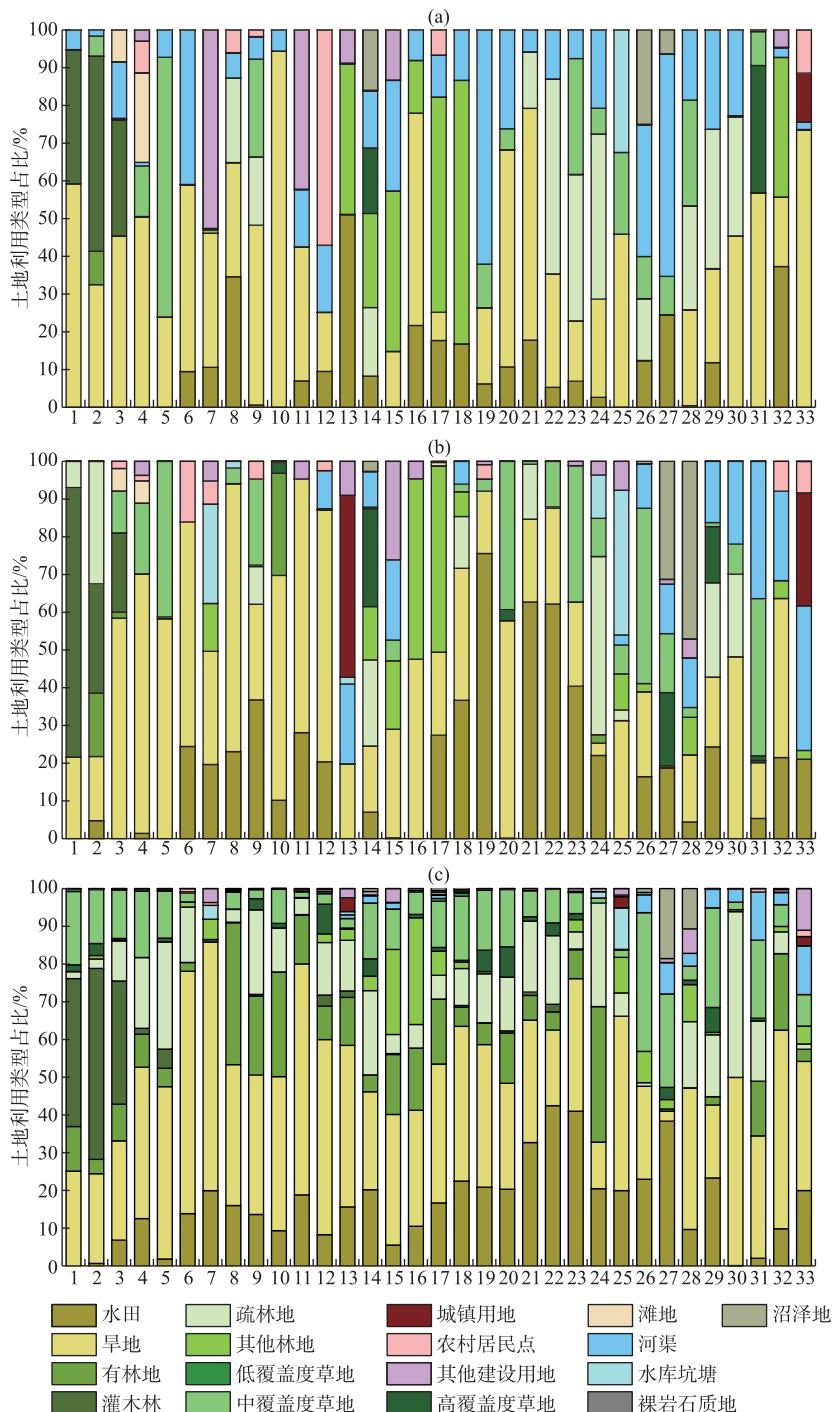


图 2 3 种空间尺度下澎溪河流域土地利用类型面积占比统计(1~7 为东河的 7 个采样点(DH-1~DH-7), 8~13 为南河的 6 个采样点(NH-1~NH-6), 14~24 为普里河的 11 个采样点(PLH-1~PLH-11), 25~33 为澎溪河干流的 9 个采样点(PXH-1~PXH-9); (a)、(b)、(c) 分别为河段缓冲区、河岸带缓冲区、子流域 3 个空间尺度下各采样点对应的土地利用类型占比)

Fig.2 Statistics of land use proportions in three spatial scales in Pengxi River Basin

雨季 DOC 浓度的均值分别为 4.47 和 2.88 mg/L。研究期间,所选取的吸收系数均为雨季大于旱季,旱季和雨季 a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 的均值分别为 7.84、7.13、5.90 m⁻¹ 和 26.01、20.55、9.46 m⁻¹。

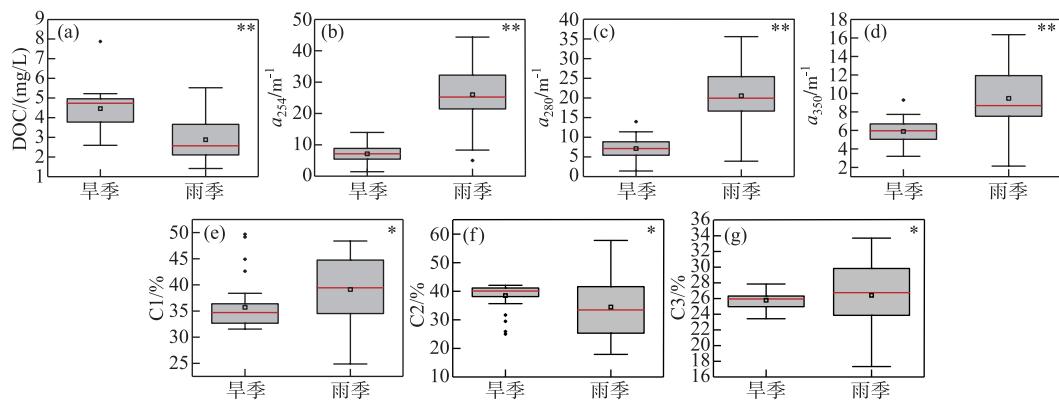


图 3 旱雨季澎溪河流域 DOM 参数描述性统计(* 表示水体 DOM 参数旱雨季差异的显著性检验,
* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。黑线、红线、箱体下沿、箱体上沿、上误差棒、
下误差棒和散点分别表示中位数、平均值、25% 分位、75% 分位、5% 分位数和离群值)

Fig.3 Descriptive statistics of DOM parameters in Pengxi River Basin in dry and rainy seasons

2.2.2 三维荧光光谱矩阵-平行因子分析 澄溪河流域水体 DOM 的 EEM-PARAFAC 结果如表 2 和附图 I 所示。利用 EEM-PARAFAC 方法在旱雨季澄溪河流域水体中各鉴别出 3 个荧光组分,旱季 C1($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 230$ 、 $275/410$)^[66,67]、C2($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 245/452$)^[6,9,34] 和 C3($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 270/340, 492$)^[67,69], 雨季 C1($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 245/420$)^[66-67,70]、C2($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 230, 275/334$)^[7,71-72] 和 C3($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em} = 270/482$)^[67,69,70](表 2)。组分 C1 主要为陆生或自生生物转化产物中的富里酸物质,一般来源于陆生植物或土壤有机物^[33]。C3 组分以及旱季的 C2 组分均为陆源类腐殖质,主要来源于陆表径流输入或污水排放^[73],该类物质较难被微生物降解,在淡水和海水环境中广泛存在^[6]。雨季的 C2 组分具有荧光峰 T 峰(275~285/320~360 nm)的特征,主要代表类蛋白质中的类色氨酸物质^[7,71-72],来源于原生地微生物降解作用或生活污水排放^[61]。本研究基于 EEM-PARAFAC 结果中的各组分荧光强度数据,计算各组分相对贡献率。

表 2 澄溪河流域水体 DOM 荧光组分特征识别

Tab.2 Identification of DOM fluorescence components in Pengxi River Basin

季节	荧光组分	$\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}/\text{nm}$		类型
		本研究	文献值	
旱季	C1	230(275)/410	245(335)/410 ^[66] ; 240(330)/430 ^[67] ; 220(285, 355)/425 ^[67] ;	富里酸
	C2	245/452	245(355)/468 ^[9] ; 254/459 ^[6] ; 240(350)/459 ^[34] ;	陆源类腐殖质
	C3	270/340(492)	270(380)/47 ^[67] ; 275(345)/479 ^[68] ; 260(360)/480 ^[69] ;	陆源类腐殖质
雨季	C1	245/420	245(335)/410 ^[66] ; 240(330)/430 ^[67] ; 220(285, 355)/425 ^[70] ;	富里酸
	C2	230(275)/334	275/337 ^[7] ; 232(274)/338 ^[71] ; 225(275)/335 ^[72] ;	色氨酸
	C3	270/482	270(380)/470 ^[67] ; 275(345)/479 ^[69] ; 260(360)/480 ^[70] ;	陆源类腐殖质

2.3 不同时空尺度下土地利用指数对 DOM 的影响

本研究主要探讨了旱季和雨季 2 种时间尺度,河段 1000 m 缓冲区、河岸带 500 m 缓冲区以及子流域 3 个空间尺度下土地利用指数对水体 DOM 参数的影响。如表 3 所示,土地利用指数对 DOM 参数的解释率均达 75% 以上,且前两个轴占所有轴总解释率的 90% 以上。其中,旱季,按照各空间尺度下解释率进行排序,结果为河段缓冲区(84.41%)>子流域(83.95%)>河岸带缓冲区(81.94%)。雨季,按照各空间尺度下的解释

率排序,结果为子流域(90.35%)>河岸带缓冲区(86.84%)>河段缓冲区(76.73%)。在河岸带缓冲区和子流域尺度,土地利用指数对水体 DOM 参数的解释率均表现为雨季高于旱季,在河段缓冲区尺度则相反。基于流域不同空间尺度的土地利用特征,对水体 DOM 参数解释率较高的土地利用指数中土地利用类型占比的解释率差异较大,且子流域尺度土地利用指数对水体 DOM 参数的解释率强于河岸带缓冲区尺度。3 种空间尺度下,面积占比较高的土地利用类型均为水田和旱地,但在子流域尺度林地和草地的比例增加,且在子流域尺度下二者对水体 DOM 参数的解释率较高(表 3),从而使得总解释率较高。缓冲区尺度下,林地占比较低,除水田和旱地外,水域、建设用地等占比增加,导致土地利用类型对水体 DOM 参数的影响效果各异,最后导致该空间尺度下总解释率较低。

不同时空尺度下各土地利用指数对水体 DOM 参数的解释率有一定差异(表 3)。旱季各空间尺度下,对水体 DOM 解释率较大的土地利用面积占比和景观格局指数按总解释率排序,结果分别为滩地>灌木林>有林地和 DIVISION>SHDI>NP,土地利用指数在 3 种空间尺度下的最大解释率分别为 35.1%、14.2%、10.9% 和 6.5%、3.4%、3%(表 3)。雨季,灌木林的面积占比对 DOM 参数的解释率最大,在河段缓冲区、河岸带缓冲区、子流域尺度下的解释率为 40.2%、38%、27.9%,其次解释率较大的土地利用指数为水田、滩地、农村居民点、LSI 和 SHDI。综上,在所有时空尺度下,土地利用类型面积占比对水体 DOM 参数的解释率较景观格局指数更大,其中,灌木林和滩地对 DOM 参数的解释率最大。除此之外,土地利用指数对水体 DOM 参数的解释率具有一定的季节性差异(表 3),如雨季子流域尺度下,3 种不同覆盖度的草地面积占比对水体 DOM 的解释率高于旱季。河岸带缓冲区尺度下,城镇用地、农村居民点等建设用地面积占比对水体 DOM 参数的解释率则表现为旱季高于雨季,这与旱雨季草地对水流的截留、渗透、蓄积能力差异以及人类活动对河流水体的干扰程度有关。

表 3 澄溪河流域土地利用指数与 DOM 的 RDA 结果
Tab.3 RDA results of land use index and DOM in Pengxi River Basin

季节	旱季			雨季		
	空间尺度解释率/%	河段缓冲区	河岸带缓冲区	子流域	河段缓冲区	河岸带缓冲区
第一轴	79.56	74.89	77.49	61.4	68.48	71.42
第二轴	2.78	3.79	3.51	9.79	14.08	12.33
所有轴	84.41	81.94	83.95	76.73	86.84	90.35
Pseudo-F	2.9	1.5	1.8	1.7	2.2	3.2
解释变量	L12(35.1)	L12(15.7)	L12(24.0)	L4(38.0)	L4(27.9)	L4(40.2)
(解释率/%)	L3(10.9)	L4(11.1)	L4(14.2)	L12(4.9)	L17(6.8)	L1(6.4)
	L15(9.8)	L17(6.6)	L6(8.4)	LSI(4.0)	L12(6.4)	L5(4.9)
	L4(6.7)	L13(6.5)	L17(7.3)	L8(3.4)	L14(5.6)	L8(4.3)
DIVISION(3.3)	L14(4.4)	DIVISION(6.5)	L3(3.0)	L10(4.4)	L7(3.5)	
	NP(3.0)	L2(4.7)	L10(2.7)	L7(2.6)	SHDI(3.6)	L6(3.2)
	L7(2.9)	L8(4.2)	L5(2.6)	L15(2.4)	AI(3.2)	L13(3.0)
	L11(1.7)	L15(4.1)	ED(2.5)	L11(2.2)	L1(2.9)	L12(2.7)
	SHDI(2.2)	SHDI(3.4)	L7(2.3)	ED(2.0)	L5(2.9)	NP(2.5)
	AI(2.1)	DIVISION(3.2)	LPI(1.7)	L14(1.8)	NP(2.9)	ED(2.3)

土地利用指数与水体 DOM 指数的相关性分析结果如图 4 所示。在大多数尺度下,DOC 浓度与水田、其他林地、城镇用地、LPI、AI 和 SHDI 等土地利用指数呈正相关关系,与旱地、有林地、灌木林、低覆盖度草地、NP、LSI、DIVISION 等土地利用指数呈负相关关系。此外,DOC 浓度与高覆盖度草地、ED 的相关性具有季节性差异,在旱季,二者呈正相关关系,雨季则相反。DOC 浓度与灌木林、有林地、河渠、水库坑塘、滩地、PD 的相关性存在空间尺度差异,在河岸带缓冲区和子流域尺度,灌木林、有林地、河渠和滩地与其呈负相关关系,水库坑塘、PD 与其呈正相关关系,河段缓冲区则相反。 a_{254} 、 a_{280} 、 a_{350} 均与 DOC 浓度呈正相关,故三者与土地利用指数的关系基本一致。DOC 浓度与陆源类腐殖质荧光组分(旱季 C2、C3;雨季 C3)呈正相关,与类蛋白

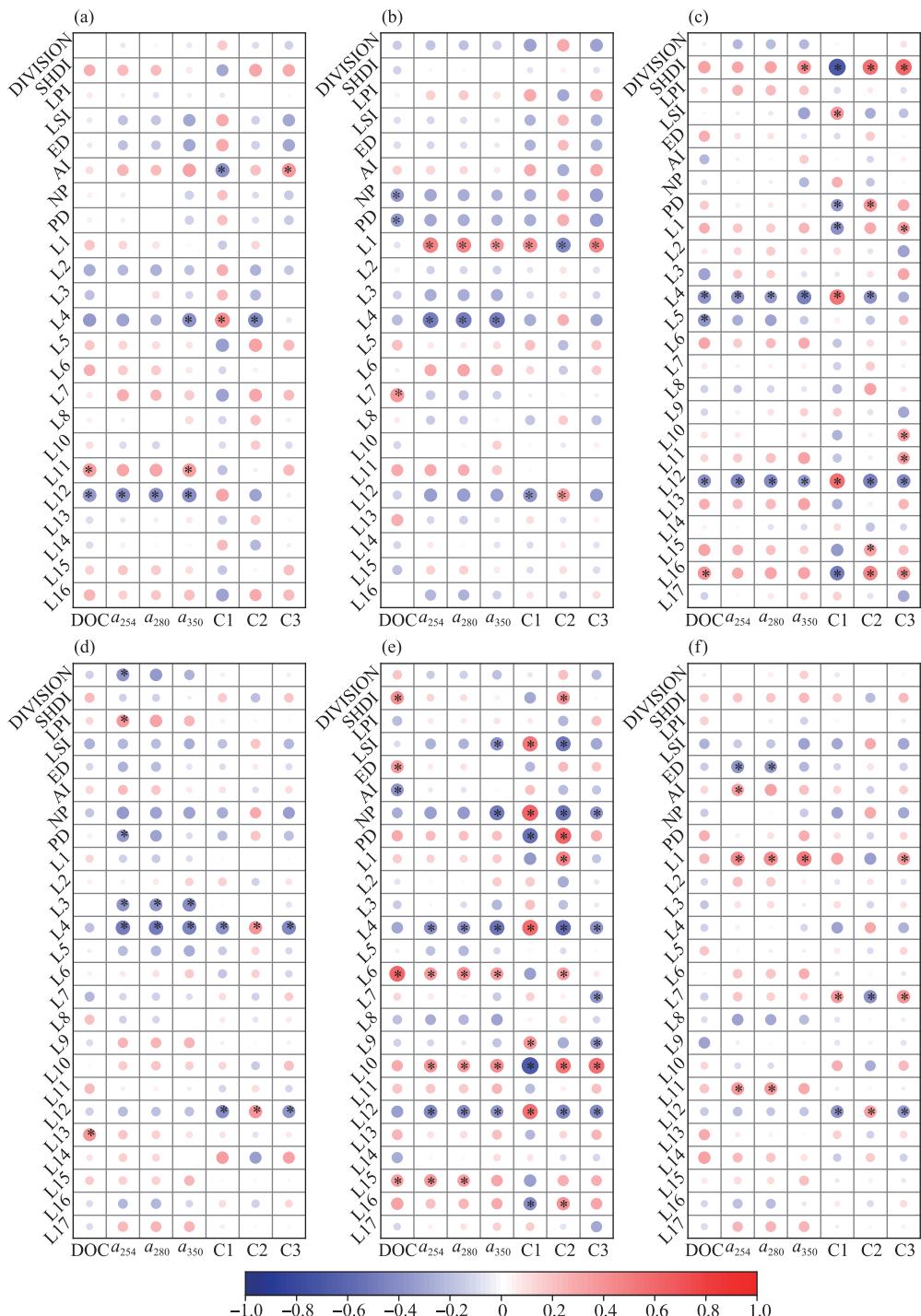


图4 澄溪河流域土地利用指数与水体DOM相关性分析图(*表示 $P \leq 0.05$,横轴变量包括土地利用类型面积占比和景观格局指数,(a)、(b)为河段缓冲区尺度下旱季、雨季的相关性分析图,(c)、(d)为河岸带缓冲区尺度下旱季、雨季的相关性分析图,(e)、(f)为子流域尺度下旱季、雨季的相关性分析图。)

Fig.4 Correlation analysis of land use index and DOM of water bodies in Pengxi River Basin

质荧光组分色氨酸(雨季 C2)呈负相关。DOC 浓度与富里酸荧光组分的相关性具有季节性差异, 在旱季与富里酸荧光组分(旱季 C1)呈负相关, 在雨季则与其(雨季 C1)呈正相关。

3 讨论

3.1 澄溪河 DOM 来源分析

本研究旱雨季荧光指数 FI 均大于 1.9, 旱季和雨季 FI 值分别为 2.31 ± 0.09 和 2.16 ± 0.10 (图 5), 表明水体 DOM 以水生生物和细菌等内源贡献为主。除采样点 DH-2 和 PLH-2 外, 其他采样点的 FI 均表现为旱季高于雨季, 内源特征更为明显。其中, 东河与南河交会, 汇入主干河流时(DH-7), FI 值明显减小, 自生源特征降低, 这与该采样点周围的建设用地面积显著增加, 人类活动强度增强密切相关(图 2)。旱、雨季 BIX 的最大值、最小值及均值分别为 0.78、0.99、0.84 和 0.71、1.07、0.82(图 5), 表明水体 DOM 来源受到陆源输入和内源产生两种结果的共同影响, 旱季水体 DOM 的自生源特征更为明显^[74-76], 与 FI 值所得结论一致。其中, 东河汇入澄溪河途中, 采样点的 BIX 先增加后减小, 其原因在于随着河流流量及宽度的增加, 水体生物量增加, 本地产生的有机质增加。之后随着沿途建设用地增加, 受人类活动的扰动, 自生源特征减弱。旱、雨季 HIX 值分别介于 0.64~0.87 和 0.53~0.85, 均值分别为 0.82 和 0.72(图 5), 表明水体 DOM 腐殖化程度较低。但旱季和雨季 HIX 值的差异较小, 无法区别旱季和雨季水体 DOM 的腐殖化差异。进一步结合旱季和雨季的 CDOM 参数和荧光组分特征(图 3, 附图 I), a_{254} 和腐殖峰的季节性差异更大, 更具有区分性, 可以明显表明雨季水体 DOM 的腐殖化程度高于旱季, 且与 FI 的结论一致。故流域内水体 DOM 的腐殖化程度较低, 且雨季高于旱季。

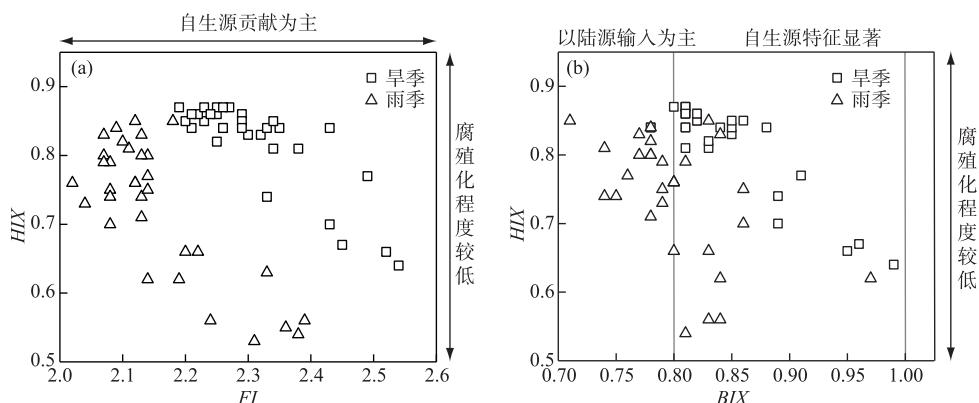


图 5 澄溪河流域荧光特征参数表征

Fig.5 Characterization of fluorescence characteristic parameters in Pengxi River Basin

总体分析来看, 澄溪河流域水体 DOM 来源以陆源输入和内源产生共同影响, 其中, 旱季自生源特征较雨季更明显, 雨季陆源输入贡献更大(图 5), 主要是流域内水体为自然水体, 补给方式主要为大气降水, 旱季降水较少, 陆源输入减少, 即旱季自生源特征更为明显。尤其是夏季 7—8 月, 持续的强降水事件引起河流周边的地表径流量增加和土壤的淋溶作用增强, 导致河流中陆地 DOM 输入大幅增加^[77-79], 与林绍霞等^[33]、Ma 等^[45]、Jiang 等^[46]学者的研究结果一致。然而, 由于流域面积大小、人类活动强弱等流域特征的不同, 也可能导致水体性质的不同^[80]。如 He 等^[81]研究表明蓄水期(11 月), 陆地来源的 DOM 比例相对较高, 本地产生的 DOM 比例较低。此外, 不同流域的土地利用方式也影响着水体 DOM 的来源, 本研究中, 部分以林地为主的采样点(DH-1、DH-2)区域陆源性更强, 以水田、旱地等农业用地为主的采样点(DH-7、NH-4)区域则以自生源特征更为明显^[32,45](图 2, 图 5)。

3.2 土地利用-景观格局特征对水体 DOM 的影响

在不同时空尺度下, 各土地利用指数对水体 DOM 的影响存在明显差异(图 4), 且土地利用类型占比解释率较景观格局指数更高(表 3)。水田和旱地虽同为耕地, 但在不同空间尺度下, 与水体 DOM 参数的关系

存在差异。如在子流域尺度下,水田与 DOC 浓度、腐殖质荧光组分及 CDOM 吸收系数呈正相关,旱地与之呈负相关(图 4)。已有研究表明,耕地与 DOC 浓度等水体 DOM 参数呈正相关关系^[9,20,22],本研究则在一定程度上揭示了水田和旱地等两种不同耕地类型对 DOM 影响的内部差异,水田和旱地作为农业用地的两种土地利用类型,有着不同的耕作模式。水田为满足作物的灌溉需要,修筑田埂,形成汇水沟渠,更容易向河流中汇入 DOC 等有机物质^[82]。有林地、灌木林等林地和湿地土地利用类型与大多数水体 DOM 参数呈负相关(图 4),主要在于植被对近岸处溶解性有机质进入河流有一定的阻碍作用,且木本植被可以防止河岸的大面积破坏,随着近岸处的植被的衰老,其叶片增加了土壤粗糙度,减缓了径流和侵蚀的发生,使得输入水体的 DOM 减少^[26]。已有研究表明,湿地对进入水体的污染物和致富营养化物质具有一定的净化作用,对于陆源输入的 DOM 具有一定的缓冲效应,可减少水体 DOM 的输入^[83-85]。城镇用地、农村居民点和其他建设用地等土地利用类型均与大多数水体 DOM 参数呈正相关关系(图 4),与前人 DOM 参数主要与人类生产生活、城市污水排放有关的研究结论一致^[22,70,86]。本研究结果表明,草地对水体 DOM 的影响因覆盖度的高低而有所差异,高覆盖度草地和河岸带缓冲区尺度下的中、低覆盖度草地与大多数水体 DOM 参数呈正相关关系,其他空间尺度下则呈负相关关系(图 4)。已有研究中,草地与水体 DOM 参数主要呈负相关关系^[31]。一方面的原因在于草地可减弱地表径流,减少水体中陆地 DOM 的输入^[87],另一方面在于高覆盖度草地包括覆盖度大于 50% 的天然草地和改良草地^[88],该类型的土地利用区域水分充足,草被生长茂密,可为微生物和其他水生生物提供栖息、繁衍场所^[89],从而产生更多的有机物,且距离水体较近,更容易进入水体,从而增加了水体 DOM 的输入。

流域内水环境的改变不仅受到流域内土地利用类型的直接影响,景观类型的空间结构布局及其配置也极为关键^[90-92]。本研究中,表征景观斑块破碎度的 PD、NP 与绝大部分水体 DOM 参数呈负相关关系(图 4),这与 Li 等^[26]的研究结论一致。LPI 可表征不同空间尺度下的优势景观类型,其对水体环境的影响与区域内的最大斑块类型有关^[29,54],本流域各空间尺度下的优势斑块类型为水田、旱地等耕地(图 1,图 2),受人类干扰程度较大,与水体 DOM 参数呈正相关关系(图 4)。ED 和 LSI 等表征景观斑块形状的景观格局指数与水体 DOM 参数呈负相关关系(图 4),即斑块形状越复杂,对从陆地输入水体的有机物质的截留作用更大,从而可减弱陆源有机物向水体的传输。DIVISION 和 AI 分别表征景观斑块的分离度和聚集程度,本研究中,二者与水体 DOM 参数呈相反的相关性(图 4),景观斑块越聚集,水体 DOM 参数值越大。胡和兵等^[93]认为景观斑块越聚集,污染物质越容易集中生产和排放,即输入水体中的有机物质越多。本研究中,表征景观类型丰富度的 SHDI 与水体 DOM 参数呈正相关关系(图 4),景观类型越丰富,水体中 DOM 含量越高。这同样与区域内的优势斑块类型相关^[27],本研究中区域内优势斑块主要为水田、旱地等土地利用类型(图 2),其斑块类型的异质性越大,即进入水体的有机物质风险更大,DOM 浓度越高。

4 结论

1) DOM 三维荧光光谱矩阵-平行因子分析结果显示,流域内水体 DOM 以陆源类腐殖质组分和富里酸组分为主导,类色氨酸组分占比较小。流域内水体 DOM 来源以陆源输入和内源产生共同影响,其中,旱季自生源特征较雨季更明显,雨季陆源输入贡献更大。在进行土地规划时,要做好河流沿岸用地规划,尤其注意田埂及排水沟的规划,避免降雨时陆地有机物质进入河流,造成水体有机物质的增多。

2) 土地利用-景观格局特征在子流域尺度较缓冲区尺度下对水体 DOM 参数的解释能力更强,在时间尺度上,雨季的解释率明显高于旱季。在降雨量增多时,应注意流域内陆源物质向水体的输送,有效截留,避免陆源有机质向河流的直接排放。

3) 不同土地利用指数对水体 DOM 参数的影响具有一定差异,土地利用类型占比较景观格局指数对水体 DOM 参数影响更大。其中,在大多数时空尺度下,水田、其他林地、城镇用地、LPI、AI 和 SHDI 等土地利用指数与大多数水体 DOM 参数呈正相关关系,旱地、有林地、灌木林、低覆盖度草地、NP、LSI、DIVISION 等土地利用指数与其呈负相关关系,且不同覆盖度的草地对水体 DOM 参数的影响具有差异性。因此,在进行水资源管理和优化时,应注意对土地利用类型进行细分,如灌木林地相较于其他林地对陆源污染物的截留作用更为明显;不同覆盖度的草地对陆源有机质进入水体的屏障作用有所差异;一定空间尺度下,水田和旱地

等两种耕地由于不同的种植模式、耕作方式等对水环境的影响效果不同。

5 附录

附图 I 见电子版(DOI: 10.18307/2023.0426)。

6 参考文献

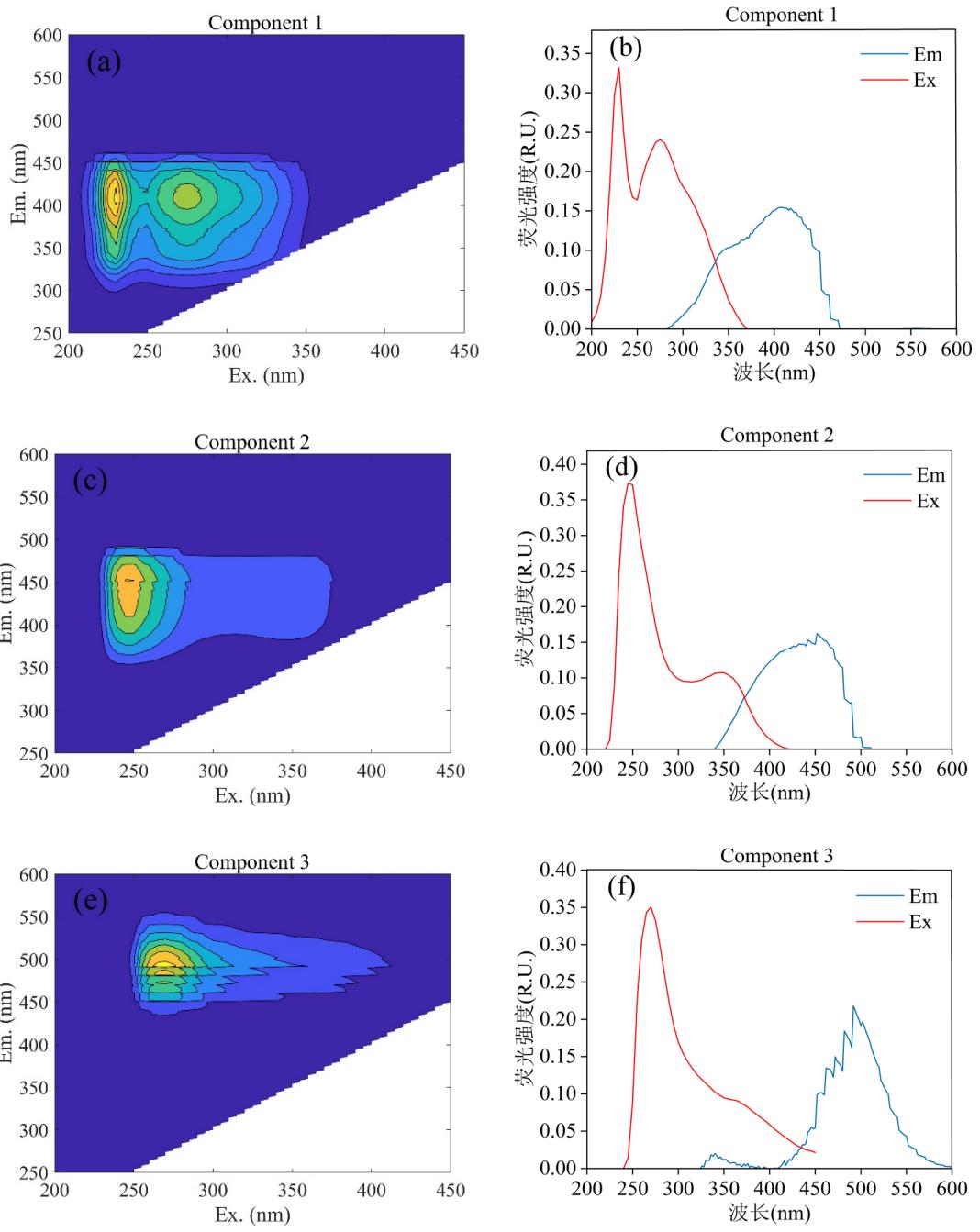
- [1] Roulet N, Moore TR. Browning the waters. *Nature*, 2006, **444**(7117): 283-284. DOI: 10.1038/444283a.
- [2] Cilenti A, Provenzano MR, Senesi N. Characterization of dissolved organic matter from saline soils by fluorescence spectroscopy. *Environmental Chemistry Letters*, 2005, **3**(2): 53-56. DOI: 10.1007/s10311-005-0001-6.
- [3] Wei ZM, Zhang X, Wei YQ et al. Fractions and biodegradability of dissolved organic matter derived from different composts. *Bioresource Technology*, 2014, **161**: 179-185. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.03.032.
- [4] Qiu LL, Cui HY, Wu JQ et al. Snowmelt-driven changes in dissolved organic matter and bacterioplankton communities in the Heilongjiang watershed of China. *Science of the Total Environment*, 2016, **556**: 242-251. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.199.
- [5] Jaffé R, McKnight D, Maie N et al. Spatial and temporal variations in DOM composition in ecosystems: The importance of long-term monitoring of optical properties. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, **113**: G04032. DOI: 10.1029/2008jg000683.
- [6] Xu Y, Li PH, Zhang CL et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediment pore water from Pearl River Estuary. *Science China: Earth Sciences*, 2021, **51**(1): 63-72. DOI: 10.1007/s11430-020-9671-9. [徐阳, 李朋辉, 张传伦等. 珠江口沉积物溶解性有机质来源及光谱特征的空间变化. 中国科学: 地球科学, 2021, **51**(1): 63-72.]
- [7] Lambert T, Teodoru CR, Nyoni FC et al. Along-stream transport and transformation of dissolved organic matter in a large tropical river. *Biogeosciences*, 2016, **13**(9): 2727-2741. DOI: 10.5194/bg-13-2727-2016.
- [8] Yang YJ, Yuan XF, Deng YM et al. Seasonal dynamics of dissolved organic matter in high arsenic shallow groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 2020, **589**: 125120. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125120.
- [9] Liu D, Du YX, Yu SJ et al. Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *Water Research*, 2020, **168**: 115132. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [10] Yang L, Zhang J, Yang GP. Mixing behavior, biological and photolytic degradation of dissolved organic matter in the East China Sea and the Yellow Sea. *Science of the Total Environment*, 2021, **762**: 143164. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143164.
- [11] Zhang ZY, Qin JH, Sun H et al. Spatiotemporal dynamics of dissolved organic carbon and freshwater browning in the zoige alpine wetland, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Water*, 2020, **12**(9): 2453. DOI: 10.3390/w12092453.
- [12] Zhang YL, Zhou L, Zhou YQ et al. Chromophoric dissolved organic matter in inland waters: Present knowledge and future challenges. *Science of the Total Environment*, 2021, **759**: 143550. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143550.
- [13] Tang JF, Li XH, Cao CL et al. Compositional variety of dissolved organic matter and its correlation with water quality in peri-urban and urban river watersheds. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 459-469. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.025.
- [14] Loiselle S, Vione D, Minero C et al. Chemical and optical photo transformation of dissolved organic matter. *Water Research*, 2012, **46**(10): 3197-3207. DOI: 10.1016/j.watres.2012.02.047.
- [15] Liu C, Li ZW, Berhe AA et al. Characterizing dissolved organic matter in eroded sediments from a loess hilly catchment using fluorescence EEM-PARAFAC and UV-Visible absorption: Insights from source identification and carbon cycling. *Geoderma*, 2019, **334**: 37-48. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.029.
- [16] Wei HB, Yu HB, Pan HW et al. Application of UV-visible absorption spectroscopy combined with two-dimensional correlation for insight into DOM fractions from native halophyte soils in a larger estuarine delta. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(14): 14197-14205. DOI: 10.1007/s11356-018-1645-7.
- [17] Kolic PE, Roy ED, White JR et al. Spectroscopic measurements of estuarine dissolved organic matter dynamics during a large-scale Mississippi River flood diversion. *Science of the Total Environment*, 2014, **485**: 518-527. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.121.
- [18] Wang K, Pang Y, He C et al. Optical and molecular signatures of dissolved organic matter in Xiangxi Bay and mainstream of Three Gorges Reservoir, China: Spatial variations and environmental implications. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1274-1284. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.117.
- [19] Song JW, Zhang XX, Jiang DY et al. Impact of land use types at different scales on surface water environment quality and its driving mechanism. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3016-3026. DOI: 10.13227/j.hjkx.202108234. [宋静雯, 张学霞, 姜东旸等. 不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制. 环境科学, 2022, **43**(6): 3016-3026.]
- [20] Bhattacharya R, Osburn CL. Spatial patterns in dissolved organic matter composition controlled by watershed characteristics in a coastal river network: The Neuse River Basin, USA. *Water Research*, 2020, **169**: 115248. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115248.
- [21] Graeber D, Gelbrecht J, Pusch MT et al. Agriculture has changed the amount and composition of dissolved organic matter in Central Euro-

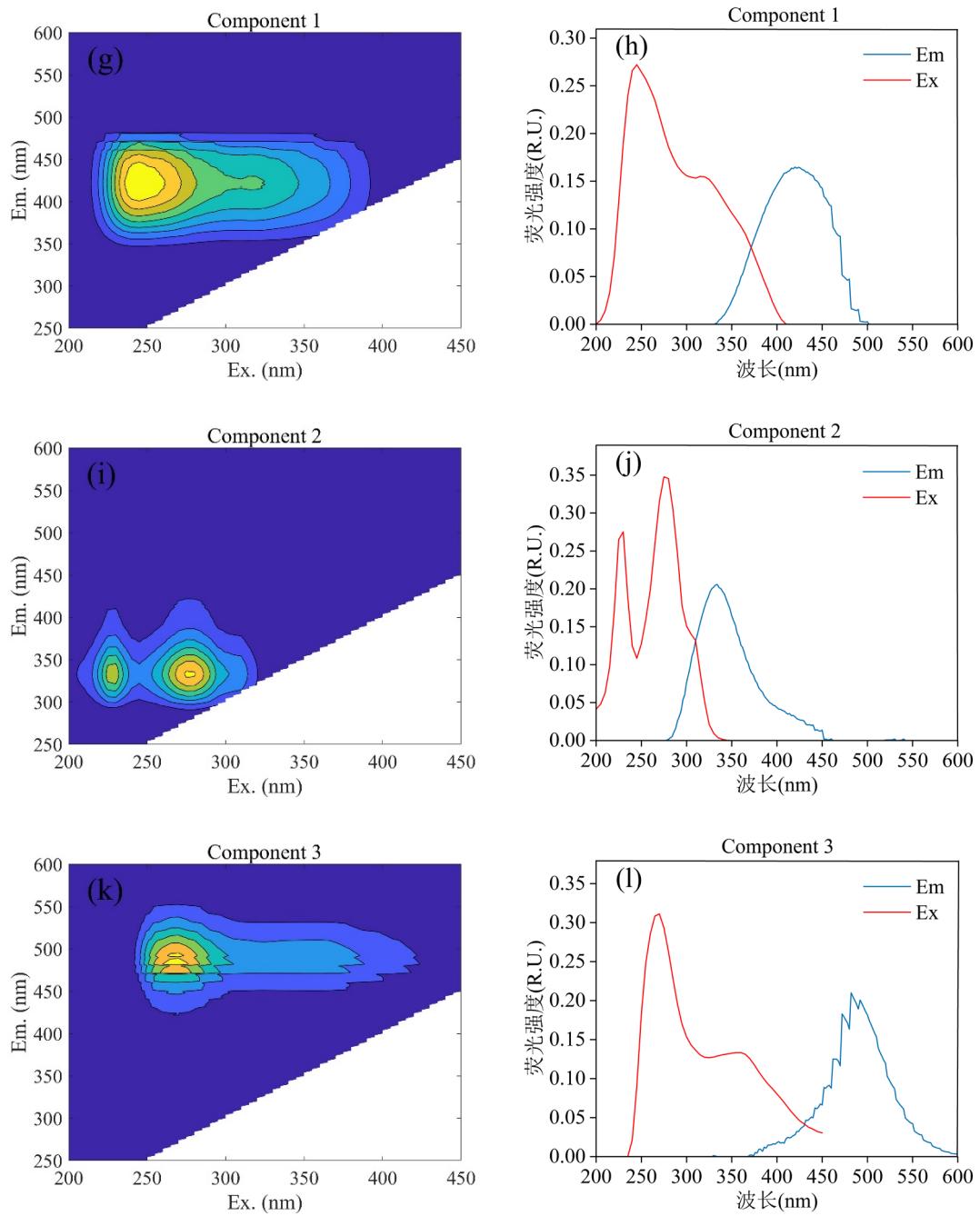
- pean headwater streams. *Science of the Total Environment*, 2012, **438**: 435-446. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.087.
- [22] Shi Y, Zhang LQ, Li YP et al. Influence of land use and rainfall on the optical properties of dissolved organic matter in a key drinking water reservoir in China. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**: 134301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134301.
- [23] Frost PC, Larson JH, Johnston CA et al. Landscape predictors of stream dissolved organic matter concentration and physicochemistry in a Lake Superior River watershed. *Aquatic Sciences*, 2006, **68**(1): 40-51. DOI: 10.1007/s00027-005-0802-5.
- [24] Ou Y, Wang XY. Review of the influence of landscapes on stream ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(23): 6624-6634. [欧洋, 王晓燕. 景观对河流生态系统的影响. 生态学报, 2010, **30**(23): 6624-6634.]
- [25] Zhao J, Yang K, Tai J et al. Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(11): 3180-3189. [赵军, 杨凯, 邰俊等. 区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展. 生态学报, 2011, **31**(11): 3180-3189.]
- [26] Li MM, Kong FL, Lia Y et al. Impact of sub-watershed characteristics and changes on sediment DOM quantity and quality over Jiaozhou Bay. *Ecological Indicators*, 2020, **118**: 106777. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106777.
- [27] Guo YY, Li SY, Liu R et al. Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 737-748. DOI: 10.18307/2021.0310. [郭羽羽, 李思悦, 刘睿等. 黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 737-748.]
- [28] Zhang LL, Liu R, Zhang J et al. The influence of sloping landscape features on riverine water quality in Upper Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(16): 6704-6717. [张柳柳, 刘睿, 张静等. 长江上游坡地景观特征对河流水质的影响. 生态学报, 2022, **42**(16): 6704-6717.]
- [29] Kang WH, Cai H, Lin GM et al. Influences of landscape on river quality under different geomorphological conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(3): 1031-1043. DOI: 10.5846/stxb201811182498. [康文化, 蔡宏, 林国敏等. 不同地貌条件下景观对河流水质的影响差异. 生态学报, 2020, **40**(3): 1031-1043.]
- [30] Cawley KM, Campbell J, Zwilling M et al. Evaluation of forest disturbance legacy effects on dissolved organic matter characteristics in streams at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(4): 611-622. DOI: 10.1007/s00027-014-0358-3.
- [31] Shao T, Wang T. Effects of land use on the characteristics and composition of fluvial chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yiluo River watershed, China. *Ecological Indicators*, 2020, **114**: 106332. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106332.
- [32] Ma YM, Mao R, Li SY. Hydrological seasonality largely contributes to riverine dissolved organic matter chemical composition: Insights from EEM-PARAFAC and optical indicators. *Journal of Hydrology*, 2021, **595**: 125993. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.125993.
- [33] Lin SX, Xiao ZQ, Zhang ZL et al. Fluorescence spectral characteristics and source apportionment of dissolved organic matters in water of Caohai Lake, Guizhou Province. *China Environmental Science*, 2021, **41**(3): 1325-1335. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0146. [林绍霞, 肖致强, 张转铃等. 贵州草海水体溶解性有机物的荧光光谱特征及来源解析. 中国环境科学, 2021, **41**(3): 1325-1335.]
- [34] He J, Zhu XH, Wei B et al. Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter from landscape river during flood season in Suzhou based on EEMs and UV-vis. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1889-1900. DOI: 10.13227/j.hjkx.202009087. [何杰, 朱学惠, 魏彬等. 基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源. 环境科学, 2021, **42**(4): 1889-1900.]
- [35] Ji DB, Cheng ZQ, Long LH et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods. *Water Resources Protection*, 2022, **38**(3): 34-42. DOI: 10.3880 /j.issn.1004 6933. 2022. 03. 005. [纪道斌, 成再强, 龙良红等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应. 水资源保护, 2022, **38**(3): 34-42.]
- [36] Tian P, Gong YW, Zhu ZL et al. Evaluation of land use change in the ecological barrier zone of the dam area of the Three Gorges Reservoir in recent 25 years. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(2): 78-85. [田培, 龚雨薇, 朱占亮等. 三峡水库坝区生态屏障区近25年土地利用变化评价. 水土保持学报, 2020, **34**(2): 78-85.]
- [37] Chen M, Su XL, Huang HM et al. Assessment of river habitat quality in the Three Gorges Reservoir Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 192-201. DOI: 10.5846 /stxb201712212298. [陈森, 苏晓磊, 黄慧敏等. 三峡库区河流生境质量评价. 生态学报, 2019, **39**(1): 192-201.]
- [38] Wang K, Pang Y, He C et al. Three Gorges Reservoir construction induced dissolved organic matter chemistry variation between the reservoir and non-reservoir areas along the Xiangxi tributary. *Science of the Total Environment*, 2021, **784**: 147095. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147095.
- [39] Wang K, Li PH, He C et al. Hydrologic heterogeneity induced variability of dissolved organic matter chemistry among tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2021, **201**: 117358. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117358.
- [40] Mao R, Chen HM, Li SY. Phosphorus availability as a primary control of dissolved organic carbon biodegradation in the tributaries of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir Region. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1472-1476. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.132.

- [41] Mao R, Li SY. Temperature sensitivity of biodegradable dissolved organic carbon increases with elevating humification degree in subtropical rivers. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 1367-1371. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.256.
- [42] Mao R, Li SY. Temporal controls on dissolved organic carbon biodegradation in subtropical rivers: Initial chemical composition versus stoichiometry. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 3064-3069. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.220.
- [43] Chen ZY, Li SY. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the Three Gorges Reservoir area under the background of urbanization. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5309-5317. DOI: 10.13227/j.hjkx.201904196. [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. 环境科学, 2019, **40**(12): 5309-5317.]
- [44] Chen ZY, Li SY. Seasonal variation of DOM spectral characteristics of rivers with different urbanization levels in the Three Gorges Reservoir area. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 195-203. DOI: 10.13227/j.hjkx.202004201. [陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化. 环境科学, 2021, **42**(1): 195-203.]
- [45] Ma YM, Li SY. Spatial and temporal comparisons of dissolved organic matter in river systems of the Three Gorges Reservoir region using fluorescence and UV-Visible spectroscopy. *Environmental Research*, 2020, **189**: 109925. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109925.
- [46] Jiang T, Wang DY, Wei SI et al. Organic matter in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area, China. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 249-259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.262.
- [47] Wang XF, Liu TT, Gong XJ et al. Phosphorus forms in rhizosphere soils of four typical plants in the Littoral Zone of the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1342-1356. DOI: 10.5846/stxb201812032635. [王晓锋, 刘婷婷, 龚小杰等. 三峡库区消落带典型植物根际土壤磷形态特征. 生态学报, 2020, **40**(4): 1342-1356.]
- [48] Tong XX, Chen CD, Wu SJ et al. Spatial distribution pattern of plant community and habitat impact analysis of the drawdown zone of Pengxi River in the Three Gorges Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 571-580. DOI: 10.5846/stxb201610272189. [童笑笑, 陈春娣, 吴胜军等. 三峡库区岷江河消落带植物群落分布格局及生境影响. 生态学报, 2018, **38**(2): 571-580.]
- [49] Bahram M, Bro R, Stedmon C et al. Handling of Rayleigh and Raman scatter for PARAFAC modeling of fluorescence data using interpolation. *Journal of Chemometrics*, 2006, **20**(3/4): 99-105. DOI: 10.1002/cem.978.
- [50] Ni MF, Jiang SH, Li SY. Spectroscopic indices trace spatiotemporal variability of dissolved organic matter in a river system with Karst characteristic. *Journal of Hydrology*, 2020, **590**: 125570. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125570.
- [51] Du YX, Lu YH, Jr JR et al. Direct versus indirect effects of human activities on dissolved organic matter in highly impacted lakes. *Science of the Total Environment*, 2021, **752**: 141839. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141839.
- [52] Amaral V, Romera-Castillo C, García-Delgado M et al. Distribution of dissolved organic matter in estuaries of the southern Iberian Atlantic Basin: Sources, behavior and export to the coastal zone. *Marine Chemistry*, 2020, **226**: 103857. DOI: 10.1016/j.marchem.2020.103857.
- [53] Li AD, Zhang Y, Zhou BH et al. Influence of algal blooms on DOM characteristics in water bodies in urban landscape river. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, **38**(1): 188-193. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)01-0188-06. [李安定, 张彦, 周北海等. 城市景观河道中藻华暴发对水体中 DOM 特征的影响. 光谱学与光谱分析, 2018, **38**(1): 188-193.]
- [54] Xiao LG, Chen WS, Chen GF et al. Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the South China Sea. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 160-167. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2014.01.008. [肖隆庚, 陈文松, 陈国丰等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 160-167.]
- [55] Yang J, Xu YP, Gao B et al. River water quality change and its relationship with landscape pattern under the urbanization: A case study of Suzhou City in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 827-835. DOI: 10.18307/2017.0406. [杨洁, 许有鹏, 高斌等. 城镇化下河流水质变化及其与景观格局关系分析——以太湖流域苏州市为例. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 827-835.]
- [56] Cui B, Gao HJ, Zheng ZP et al. Applying EEM coupled with 2D-COS to character structural composition of DOM and its spatial variations in an urban river. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(3): 369-377. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0568. [崔兵, 高红杰, 郑昭佩等. 基于三维荧光和二维相关光谱的城市河流溶解性有机质组成及其空间分异特征. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(3): 369-377.]
- [57] Wang D, Zhang F, Zhang ZY et al. Characteristics of three-dimensional fluorescence spectra and its correlation with water quality of surface water during dry and wet seasons in Lake Ebinur Watershed, Xinjiang. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 483-495. DOI: 10.18307/2020.0217. [王迪, 张飞, 张兆永等. 新疆艾比湖流域枯、丰水期三维荧光光谱特性及其与水质的关系. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 483-495.]
- [58] Lu S, Jiang T, Zhang JZ et al. Three-dimensional fluorescence characteristic differences of dissolved organic matter (DOM) from two typical reservoirs. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 516-523. [卢松, 江韬, 张进忠等. 两个水库型湖泊中溶解性有机质三维荧光特征差异. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 516-523.]
- [59] Zhang WH, Zhao DL, Wang XY et al. Absorption and three dimensional fluorescence spectra of CDOM in the water of the Taibaishan nature reserve. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4958-4969. DOI: 10.13227/j.hjkx.202004165. [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. 环境科学, 2020, **41**(11): 4958-4969.]
- [60] Lavonen EE, Kothawala DN, Tranvik LJ et al. Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production. *Water Research*, 2015, **85**: 286-294. DOI: 10.1016/j.watres.2015.08.024.

- [61] Ning CW, Bao Y, Huang T et al. Sources and spatial variation of dissolved organic matter in summer water of inflow rivers along Chaohu Lake watershed. *Environmental Science*, 2021, **42**(8) : 3743-3752. DOI: 10.13227/j.hjkx.202012089. [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. 环境科学, 2021, **42**(8) : 3743-3752.]
- [62] Maqbool T, Cho J, Hur J. Spectroscopic descriptors for dynamic changes of soluble microbial products from activated sludge at different biomass growth phases under prolonged starvation. *Water Research*, 2017, **123** : 751-760. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.033.
- [63] Li K, Wang L, Sun W et al. Spatial effect of landscape pattern on river water quality under urbanization. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1) : 343-352. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0330. [李昆, 王玲, 孙伟等. 城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析. 环境科学学报, 2020, **40**(1) : 343-352.]
- [64] Liu YN, Kong LQ, Xiao Y et al. Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3) : 844-852. DOI: 10.5846/stxb201801130100. [刘怡娜, 孔令桥, 肖燚等. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. 生态学报, 2019, **39**(3) : 844-852.]
- [65] Huang YP, Wang P, Xu QY et al. Influence of land use on carbon, nitrogen and phosphorus in water of Yuan River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9) : 2132-2142. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.04.24. [黄益平, 王鹏, 徐启渝等. 袁河流域土地利用方式对河流水体碳、氮、磷的影响. 环境科学研究, 2021, **34**(9) : 2132-2142.]
- [66] Zhang YN, Zhang L, Sun QX et al. Content characteristics of dissolved organic matter in overlying water of Tongzhou area of Beiyun River in flood and non-flood season and its influence on water quality. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8) : 3816-3824. [张亚楠, 张莉, 孙清轩等. 汛期非汛期北运河通州区域上覆水溶解性有机物组分含量特征及对水质的影响. 中国环境科学, 2021, **41**(8) : 3816-3824.]
- [67] Jin BC, Jiang MY, Bai WR et al. Fluorescence spectra characteristics of reclaimed water to replenish constructed wetlands using EEM-PARAFAC. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, **41**(4) : 1240-1245. [靳百川, 蒋梦云, 白文荣等. 三维荧光光谱-平行因子法解析再生水补给人工湿地 DOM 的光谱特征. 光谱学与光谱分析, 2021, **41**(4) : 1240-1245.]
- [68] Marcinek S, Santinelli C, Cindrić AM et al. Dissolved organic matter dynamics in the pristine Krka River Estuary (Croatia). *Marine Chemistry*, 2020, **225** : 103848. DOI: 10.1016/j.marchem.2020.103848.
- [69] Baghith SA, Sharma SK, Amy GL. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC. *Water Research*, 2011, **45**(2) : 797-809. DOI: 10.1016/j.watres.2010.09.005.
- [70] Yu MD, Liu SJ, Li GW et al. Municipal wastewater effluent influences dissolved organic matter quality and microbial community composition in an urbanized stream. *Science of the Total Environment*, 2020, **705** : 135952. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135952.
- [71] Zhu GC, Xiong NN, Wang XF et al. Correlation characteristics of electrical conductivity of surface waters with the fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy-parallel factor components of dissolved organic matter. *Journal of Fluorescence*, 2020, **30**(6) : 1383-1396. DOI: 10.1007/s10895-020-02628-6.
- [72] Wilson HF, Xenopoulos MA. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(1) : 37-41. DOI: 10.1038/ngeo391.
- [73] Zhou L, Zhou YQ, Zhang YL et al. Characterizing sources and composition of chromophoric dissolved organic matter in a key drinking water reservoir lake tianmu. *Environmental Science*, 2021, **42**(8) : 3709-3718. [周蕾, 周永强, 张运林等. 重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征. 环境科学, 2021, **42**(8) : 3709-3718.]
- [74] Wang B, Huang TL, Li N et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediment and overlying water of water source reservoir. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3) : 1309-1317. [王斌, 黄廷林, 李楠等. 水源水库沉积物及其上覆水 DOM 光谱特征. 中国环境科学, 2022, **42**(3) : 1309-1317.]
- [75] Li HB, Xie FZ, Li GL et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in the overlying water from Nanyi Lake. *China Environmental Science*, 2022, **42**(7) : 3306-3315. [李海斌, 谢发之, 李国莲等. 南漪湖上覆水溶解性有机质的光谱特征. 中国环境科学, 2022, **42**(7) : 3306-3315.]
- [76] Xu B, Pei DY, He F et al. Spatial distribution of DOM in the Qingshui River Basin of the upstream Yellow River on spring irrigation season. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(5) : 325-335. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0370. [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. 环境科学学报, 2022, **42**(5) : 325-335.]
- [77] Hur J, Jung NC, Shin JK. Spectroscopic distribution of dissolved organic matter in a dam reservoir impacted by turbid storm runoff. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **133**(1) : 53-67. DOI: 10.1007/s10661-006-9559-0.
- [78] Yang LY, Guo WD, Chen NW et al. Influence of a summer storm event on the flux and composition of dissolved organic matter in a subtropical river, China. *Applied Geochemistry*, 2013, **28** : 164-171. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.004.
- [79] Yang LY, Chang SW, Shin HS et al. Tracking the evolution of stream DOM source during storm events using end member mixing analysis based on DOM quality. *Journal of Hydrology*, 2015, **523** : 333-341. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.074.
- [80] Hong C, Liu MS, Xu C et al. Comparative analysis of correlation between water quality and land use pattern of different river hierarchies. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(24) : 7271-7279. DOI: 10.5846/stxb201303120406. [洪超, 刘茂松, 徐驰等. 河流干支流水质与土

- 地利用的相关关系. 生态学报, 2014, 34(24): 7271-7279.]
- [81] He D, Wang K, Pang Y et al. Hydrological management constraints on the chemistry of dissolved organic matter in the Three Gorges Reservoir. *Water Research*, 2020, 187: 116413. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116413.
- [82] Wang QL, Jiang T, Zhao Z et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in waters of typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir areas. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2082-2092. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.06.011. [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.]
- [83] Barber LB, Leenheer JA, Noyes TI et al. Nature and transformation of dissolved organic matter in treatment wetlands. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(24): 4805-4816. DOI: 10.1021/es010518i.
- [84] Liu J, Jiang T, Kothawala DN et al. Rice-paddy field acts as a buffer system to decrease the terrestrial characteristics of dissolved organic matter exported from a typical small agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(23): 23873-23885. DOI: 10.1007/s11356-019-05702-0.
- [85] Yao X, Yang GS. Progress on the study of water purification ability of natural wetlands. *Progress in Geography*, 2009, 28(5): 825-832. [姚鑫, 杨桂山. 自然湿地水质净化研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(5): 825-832.]
- [86] Zhao Y, Song KS, Li SJ et al. Characterization of CDOM from urban waters in Northern-Northeastern China using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(15): 15381-15394. DOI: 10.1007/s11356-016-6703-4.
- [87] Shen ZY, Hou XS, Li W et al. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 96-107. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.007.
- [88] Zhao MF, Zhou BR, Zhao T et al. Drought evaluation and driving force analysis of grassland in Qinghai Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1): 93-103. DOI: 10.11733/J.ISSN.1007-0435.2021.Z1.011. [赵梦凡, 周秉荣, 赵彤等. 青海省草地植被干旱评估及驱动力分析研究. 草地学报, 2021, 29(S1): 93-103.]
- [89] Xia PH, Li QH. Water environment and ecological restoration of measures at the inflow rivers of Hongfeng and baihua reservoirs. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(12): 7344-7346. [夏品华, 李秋华. 红枫湖·百花湖入库河流水环境状况及生态修复措施. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7344-7346.]
- [90] Zhang J, Lei G, Qi LH. Change of landscape pattern and nitrogen and phosphorus removal in Danjiangkou City, the middle route of the South-to-North Water Diversion Project. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2261-2271. DOI: 10.5846/stxb202004230973. [张建, 雷刚, 漆良华. 南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力. 生态学报, 2021, 41(6): 2261-2271.]
- [91] Qi LL, Wang JL, Ye H et al. Study on the land use landscape pattern and water quality change in the ‘three lakes’ basin in central Yunnan. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 199-208. [祁兰兰, 王金亮, 叶辉等. 滇中“三湖流域”土地利用景观格局与水质变化关系研究. 水土保持研究, 2021, 28(6): 199-208.]
- [92] Wang XP, Zhang F, Li XH et al. Correlation analysis between the spatial characteristics of land use/cover-landscape pattern and surface-water quality in the Ebinur Lake area. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7438-7452. DOI: 10.5846/stxb201701100078. [王小平, 张飞, 李晓航等. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析. 生态学报, 2017, 37(22): 7438-7452.]
- [93] Hu HB, Liu HY, Hao JF et al. Influence of spatial difference on water quality in Jiuxiang River watershed, Nanjing. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 794-801. DOI: 10.13227/j.hjkx.2012.03.034. [胡和兵, 刘红玉, 郝敬峰等. 南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响. 环境科学, 2012, 33(3): 794-801.]





附图 I 澎溪河流域水体 DOM 荧光组分特征((a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)和(g)、(h)、(i)、(j)、(k)、(l)分别为旱季和雨季荧光组分 C1、C2、C3)

Attached Fig. I Characteristics of DOM fluorescence components in Pengxi River Basin