



## 嘉兴河网大型底栖动物与氮磷、重金属的相关分析

黄子晏, 杜士林, 张亚辉, 张瑾, 孟睿, 何连生

引用本文:

黄子晏, 杜士林, 张亚辉, 等. 嘉兴河网大型底栖动物与氮磷、重金属的相关分析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(8): 1787–1798.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0506>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究

刘丽娜, 马春子, 张靖天, 何卓识, 霍守亮, 席北斗

*农业环境科学学报*. 2018, 37(3): 520–529 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1131>

### 基于大型底栖动物群落生物指数的清河水环境模糊综合评价

陈佳勃, 赵瑞辰, 王艳杰, 李法云

*农业环境科学学报*. 2018, 37(12): 2837–2845 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1159>

### 洞庭湖底栖动物长期演变特征及影响因素分析

王小毛, 欧伏平, 王丑明, 田琪, 黄谦, 张雷, 卢少勇

*农业环境科学学报*. 2016(2): 336–345 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.018>

### 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价

宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 葛红光, 李琛, 赵佐平

*农业环境科学学报*. 2020, 39(7): 1576–1584 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0143>

### 夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估

徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 崔俊丽, 刘艳萍, 李家飞

*农业环境科学学报*. 2017, 36(6): 1202–1209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1179>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄子晏, 杜士林, 张亚辉, 等. 嘉兴河网大型底栖动物与氮磷、重金属的相关分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1787–1798.

HUANG Z Y, DU S L, ZHANG Y H, et al. Analysis of the relationship between the distribution of the macrozoobenthos community and nitrogen-phosphorus factors and heavy metals in the Jiaxing river network[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1787–1798.



开放科学 OSID

## 嘉兴河网大型底栖动物与氮磷、重金属的相关分析

黄子晏<sup>1,2</sup>, 杜士林<sup>1</sup>, 张亚辉<sup>1\*</sup>, 张瑾<sup>2</sup>, 孟睿<sup>1</sup>, 何连生<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院环境检测与实验中心, 北京 100012; 2. 安徽建筑大学环境与能源工程学院安徽省水污染控制与废水资源化重点实验室, 合肥 230601)

**摘要:**为探究嘉兴河网水体和表层沉积物氮磷及重金属分布特征及其与大型底栖动物的响应关系,2019年3月(平水期)及7月(丰水期)对嘉兴河网的大型底栖动物与表层水和沉积物进行调查,分析了大型底栖动物与表层水、沉积物、间隙水中氮磷及重金属(Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Cd、Hg、As)之间的关系。结果表明:两个水期共检测出18种底栖动物,隶属3门5纲14科,其中环节动物9种、软体动物6种、节肢动物3种,铜锈环棱螺与霍甫水丝蚓为广泛分布物种。通过冗余分析(RDA)可得,表层水总磷[TP(S)]、表层水总氮[TN(S)]和间隙水总磷[TP(J)]是导致底栖动物空间分布和群落结构化差异的主要影响因素。将种群密度和生物多样性指数与氮磷及重金属含量进行相关性分析,Pielou均匀度指数( $J$ )在平水期与TN(J)呈显著正相关,在丰水期与TN(S)呈显著正相关;寡毛类密度与水体中Hg呈正相关;软体动物密度与水体中Pb呈显著正相关,而与沉积物中Ni、Pb呈显著正相关;Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )和Margalef丰富度指数( $d$ )与沉积物中重金属含量呈负相关。研究表明,底栖动物群落结构和空间分布对氮磷、重金属具有较好的相关性,可为嘉兴河网大型底栖动物群落的修复与管理提供依据。

**关键词:**嘉兴河网; 底栖动物; 氮; 磷; 重金属污染

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)08-1787-12 doi:10.11654/jaes.2021-0506

### Analysis of the relationship between the distribution of the macrozoobenthos community and nitrogen-phosphorus factors and heavy metals in the Jiaxing river network

HUANG Ziyan<sup>1,2</sup>, DU Shilin<sup>1</sup>, ZHANG Yahui<sup>1\*</sup>, ZHANG Jin<sup>2</sup>, MENG Rui<sup>1</sup>, HE Liansheng<sup>1</sup>

(1. Environmental Analysis and Testing Laboratory, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Water Pollution Control and Wastewater Resource of Anhui Province, College of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** This study investigated the distribution characteristics of nitrogen, phosphorus, and heavy metals in water and surface sediments of the Jiaxing river network and the associated response of macrobenthic fauna. Additionally, the seasonal variations of nitrogen, phosphorus, and heavy metals in water and sediment of the Jiaxing river network were analyzed in March (normal season) and July (wet season) of 2019. Based on the benthic survey data of the normal season and wet season, redundancy analysis (RDA) was applied to screen the nitrogen-phosphorus factors and heavy metals (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, Hg, As) and assess the ecological health of the urban rivers. In total, 18 species of macrobenthos, belonging to 3 phyla, 5 classes, and 14 families, were detected from the survey. There were 9 species of annelids, 6 species of molluscs, and 3 species of arthropods. *Bellamya* and *Limnodrilus hoffmeisteri* are widely distributed. The zoobenthos

收稿日期:2021-04-27 录用日期:2021-07-07

作者简介:黄子晏(1996—),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,从事环境毒理学与生态风险评估。E-mail:805015725@qq.com

\*通信作者:张亚辉 E-mail:zhangyahui@craes.org.cn

基金项目:平原河网水质改善与生态修复成套技术综合示范课题(2017ZX07206-003)

**Project supported:** The Comprehensive Demonstration Project on Water Quality Improvement and Ecological Restoration of River Network in the Plain (2017ZX07206-003)

community is characterized by simple structure, low species richness, and high pollution tolerance, and molluscs have the highest density and frequency. RDA showed that total P and total N in surface water[TP(S), TN(S)], and total P in interstitial water[TP(J)] were the main factors influencing the spatial distribution and community structure differences of the benthos. The distribution characteristics of benthos community structure corresponded well with the spatial distribution of water quality indexes. The density of molluscs was higher in the areas with higher nitrogen and phosphorus contents. Correlation analysis between population density and heavy metal content showed that TN(S) in surface water and TP(J) in interstitial water had greater effects on the density of benthos. The Pielou evenness index ( $J$ ) was significantly positively correlated with TN. Oligochaete density was positively correlated with Hg in the water, and molluscs were positively correlated with Pb in the water. Molluscs were also positively correlated with Ni and Pb in sediments. The Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ),  $J$ , and Margalef richness index ( $d$ ) were negatively correlated with the heavy metal content in sediments. Therefore, the community structure and spatial distribution of zoobenthos have good correlations with nitrogen, phosphorus, and heavy metals, which can provide a basis for the restoration and management of macrozoobenthos in the Jiaxing river network.

**Keywords:** Jiaxing urban river network; macrobenthos; nitrogen; phosphorus; heavy metal pollution

底栖动物是水生态系统的重要组成部分,在生态系统物质循环和能量循环过程中有着重要的连接作用<sup>[1]</sup>。由于其具有分布广、生命周期长、移动能力差、活动范围小、环境变化敏感,且对栖息地环境具有累计反映特征等特点<sup>[2-3]</sup>,多被应用于水环境监测和生态系统的健康评价,是河流生态学研究的经典模式生物<sup>[4-6]</sup>。

水体富营养化是破坏河道自然生态平衡和影响水质使用功能的现象<sup>[7]</sup>。底泥中各形态氮的时间分布特征和空间分布特征及其占总氮的比例,对于底泥-表层水界面的营养盐交换以及底泥氮的生物可利用性影响重大<sup>[8-9]</sup>。因此,沉积物氮的释放可能对水质产生重要影响。有研究表明沉积物为表层水体氮的一个重要来源<sup>[10-11]</sup>。间隙水的移动与沉积物氮磷的迁移、释放及转化密切相关<sup>[12]</sup>。大型底栖动物活动可以促进沉积物中氮磷的释放,同时生物体自身代谢也会释放出氮磷<sup>[13]</sup>。高的氮、磷浓度能导致底栖动物逐渐消亡等。刘乐丹等<sup>[14]</sup>的研究表明,底栖动物密度与总氮(TN)显著正相关,多样性与总磷(TP)显著负相关。工业废水和农业及生活废水进入生态环境脆弱的内陆流域水体使河网中重金属污染进一步加重<sup>[15]</sup>。多项研究<sup>[16-19]</sup>表明嘉兴市部分土壤重金属污染严重,陆源污染通过雨水径流进入水体,并经过一系列复杂作用沉积在底泥中,造成表层沉积物污染严重。沉积物水体重金属含量超过承载能力,可能会释放进入水体,形成二次污染,威胁生态系统健康<sup>[20-21]</sup>。

国内外对利用大型底栖动物对河流生态健康状况进行评价的研究多集中在自然河流、湖泊<sup>[4,22-24]</sup>,有关城市河流生态系统中生境因子对大型底栖动物群落的影响调查较少。城市化所引发的一系列“城市溪流综合征”<sup>[25]</sup>,已经成为河流生物多样性丧失的重要原

因之一,嘉兴河网纵横交错,河网污染情况加剧使城市河流生态系统健康受到了严重威胁<sup>[26]</sup>。通过大型底栖动物群落对城市流域生境的需求,建立准确的底栖动物与生境因子间的响应关系,对流域水资源管理、城市河流生态恢复有重要意义<sup>[27]</sup>。因此本文以嘉兴河网为研究区域,采集和测定底栖动物样品,通过冗余分析分析大型底栖动物与表层水、沉积物和间隙水的氮磷以及重金属之间的相关性,为嘉兴河网水体富营养化、重金属污染与物种多样性的科学治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

嘉兴市位于浙江省东北部( $30^{\circ}21' \sim 31^{\circ}02'$  N,  $120^{\circ}18' \sim 121^{\circ}16'$  E),东临大海,南倚钱塘江,北望太湖,西接天目之水,大运河纵贯境内。河面总面积268.93 km<sup>2</sup>,市域湖泊(湖荡)众多。嘉兴市域为太湖东南部的浅碟形洼地,全市河湖密布,大小河湖纵横相连,属平原河网地区。城镇区域规模扩大、填湖填浜、修路筑房、建造高楼大厦时缺乏对地下管网和排水系统的科学规划布局,使水环境和河湖水系遭到破坏,河网连通受阻,导致污染物难以扩散稀释,城市河流的生态系统健康受到严重威胁。为研究嘉兴河网大型底栖动物群落分布特征,于2019年3月(平水期)与7月(丰水期)在嘉兴河网进行底栖动物与表层水、沉积物、间隙水中氮磷和水体及沉积物中重金属的采集与调查分析。33个采样点位主要位于南湖区与秀洲区的各个交汇口、断面处、河流主要出入口以及湖中心区域,具体采样点位分布见图1。

### 1.2 底栖动物的采集

底栖动物标本的采集及处理依据《内陆水域渔业自然资源调查手册》<sup>[28]</sup>、水库渔业资源调查规范(SL

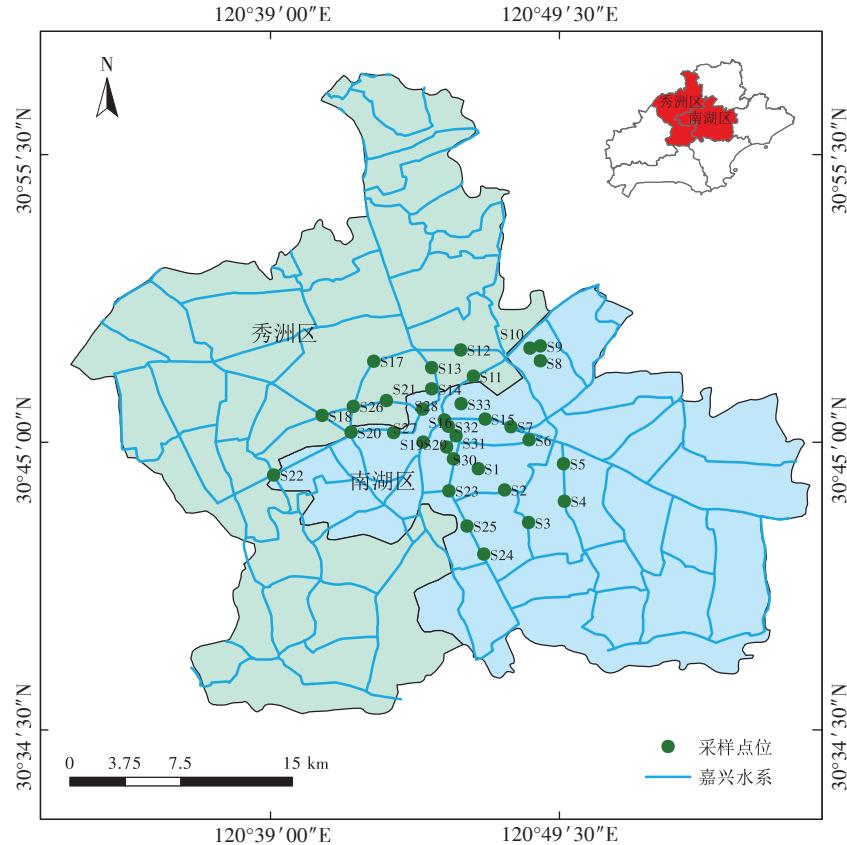


图1 嘉兴河网采样点分布图

Figure 1 Sampling sites distribution map of Jiaxing urban river network

167—1996)以及淡水生物资源调查方法。采用1/16 m<sup>2</sup>的彼得生进行定量采集。样品经60目筛网筛选后,置于解剖盘中将动物拣出,拣出的动物用5%的福尔马林固定,然后带回实验室进行种类鉴定、计数及称量。湿质量的测量方法为:先用滤纸吸干样品表面的水分,再用万分之一天平称取质量,并根据采样面积换算成密度(ind·m<sup>-2</sup>)和生物量(g·m<sup>-2</sup>)<sup>[29]</sup>。

### 1.3 水样和沉积物样品采集

水样和沉积物的采集方法根据《地表水和污水检测技术规范》(HJ/T 91—2002)进行。主要调查的生境因子包括表层水体总氮[TN(S)]和总磷[TP(S)]、间隙水总氮[TN(J)]和总磷[TP(J)]、沉积物总氮[TN(D)]和总磷[TP(D)]、温度、pH、溶解氧。其中温度、pH、溶解氧使用便携式水质参数仪(哈希,HQ40d)现场测定。采集500 mL水样于采样瓶中,置于-20 ℃冰箱中冷冻保存,尽快带回实验室分析其余生境因子。表层水与间隙水具体分析方法参照《水和废水检测方法》(第四版)。水质TN使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP使用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定。沉积物样品装入自封袋中,低温保温箱

带回实验室,自然风干后研磨过100目网筛。沉积物样品TN采用总氮分析仪(Elementar-vario MACRO CHNS)进行测定,总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(Elementar-vario TOC select)进行测定。水体及沉积物中重金属的检测方法见参考文献[12]。

### 1.4 大型底栖动物多样性指数计算

运用Shannon-Wiener多样性指数( $H'$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )和Margalef丰富度指数( $d$ )<sup>[30-32]</sup>来表征嘉兴河网底栖动物的多样性。

$$H' = -\sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

$$d = (S-1) / \log_2 N \quad (3)$$

式中: $S$ 为群落中物种数目; $N$ 为样方中观察到的个体总数; $n_i$ 为第*i*种物种的个数。

### 1.5 潜在生态风险指数法

潜在生态危害指数法为瑞典学者HAKANSON在1980年提出<sup>[33]</sup>,该方法综合考虑了区域背景值的影响,不仅可以反映沉积物中单一重金属元素的环境影响,还可以反映多种重金属污染物的综合效应,是目

前较为广泛应用于评价沉积物重金属污染程度的方法<sup>[34]</sup>,该方法的计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i^i) = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times \frac{C_0}{C_n}) \quad (4)$$

式中: $E_r^i$ 为潜在生态风险系数; $T_r^i$ 为单个污染物的毒性响应系数,Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb的毒性响应系数分别为2、1、5、5、1、10、30、40、5; $RI$ 为多种金属的潜在生态风险指数。潜在生态危害等级划分标准见参考文献[19]。

## 1.6 数据分析

采用CANOCO5软件对生境因子与群落结构关系进行冗余分析(RDA),底栖动物数据进行平方根转化,环境因子(除pH外)进行 $\lg(x+1)$ 转化<sup>[24]</sup>。实验数据处理与统计分析采用Origin 9.0、SPSS 24.0、ArcGIS 10.6软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 大型底栖动物群落组成及密度

本次调查在33个采样点共采集到大型底栖动物

23种,由环节动物、软体动物及节肢动物组成,共3门5纲14科23属(表1)。其中平水期有6个点位、丰水期有11个点位未采集到任何物种。平水期共采集到14属,共3门4纲7科,腹足纲为优势种群,共3科6属;寡毛纲1科4属,蛭纲2科2属,昆虫纲1科2属。丰水期共采集到15属,共3门5纲7科,腹足纲为2科3属,寡毛纲1科8属,双壳纲2科2属,昆虫纲与蛭纲均为1科1属。铜锈环棱螺在丰水期中出现的频率达51.5%,平水期出现频率达30.3%,为广泛分布的物种。嘉兴河网群落结构整体呈现出结构简单、种类少、耐污能力高等显著特点。铜锈环棱螺(*Bellamya*)出现的频率最高,其次为霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)。

嘉兴河网底栖动物监测样点中底栖动物物种多样性差异明显,且底栖动物密度在两个水期差异较大。如图2所示,平水期各站点分布种类≤4种,物种数极低,只有S16物种较多,共记录4种;5个样点(S1、S9、S10、S22、S28)采集到3种,其他站点仅采集到0~2种。丰水期各站点分布种类≤5种,只有4个站点(S8、S10、S12、S13)物种≥4种,其他站点仅采集到≤3种。

表1 嘉兴河网底栖动物种类及密度

Table 1 Species and quantity of benthic fauna in Jiaxing river network

分类单元名称 Unit name		平水期 Normal season		丰水期 Wet season	
		密度 Abundance/(ind·m <sup>-2</sup> )	出现点位 Site	密度 Abundance/(ind·m <sup>-2</sup> )	出现点位 Site
寡毛纲	颤蚓科 霍甫水丝蚓	64	1、12、16、17、18、21、22	48	1、7、8、10、12、13、15、20、26、27、31
	水丝蚓属1种	24	17、18、22、25	29	2、8、13、18、19
	巨毛水丝蚓	16	16	32	13
	苏氏尾鳃蚓	32	32	42	8、15、20、26、32
	指鳃尾盘虫	—	—	16	15
	仙女虫属1种	—	—	16	18、33
	多毛管水蚯	—	—	39	8、10、12、13、22、32、33
蛭纲	正颤蚓	—	—	32	10
	舌蛭科 舌蛭属1种	32	16	16	12
	石蛭科 石蛭属1种	240	16	—	—
腹足纲	田螺科 铜锈环棱螺	94	1、2、5、6、7、9、10、11、13、15、23、24、25、27、28、29、33	171	1、3、4、6、7、9、12、23、32、33
	梨形环棱螺	16	1、15、28	—	—
	豆螺科 纹沼螺	16	4、5	—	—
	大沼螺	32	9、12、23、24、28	—	—
	长角涵螺	48	10	16	4、10
	萝卜螺属1种	—	—	16	6
	肋蜷科 方格短沟蜷	16	10、19	—	—
双壳纲	蚌科 圆头楔蚌	—	—	16	18
	蚬科 河蚬	—	—	32	12
昆虫纲	摇蚊科 摆蚊属1种	53	3、22、29	16	7
	隐摇蚊属1种	16	9	—	—

嘉兴河网底栖动物密度在两个水期差异较大。平水期生物密度为 $0\sim400 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均密度为 $90.18 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中环节动物密度为 $26.18 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ ,软体动物密度为 $58.67 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ ,节肢动物密度为 $5.33 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

$\text{m}^{-2}$ ,分别占总密度的29.0%、65.1%、5.9%。S6点位密度最大,且均为铜锈环棱螺。丰水期生物密度为 $0\sim672 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均密度为 $96.49 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中环节动物密度为 $38.30 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ ,软体动物密度为 $55.27 \text{ ind.} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

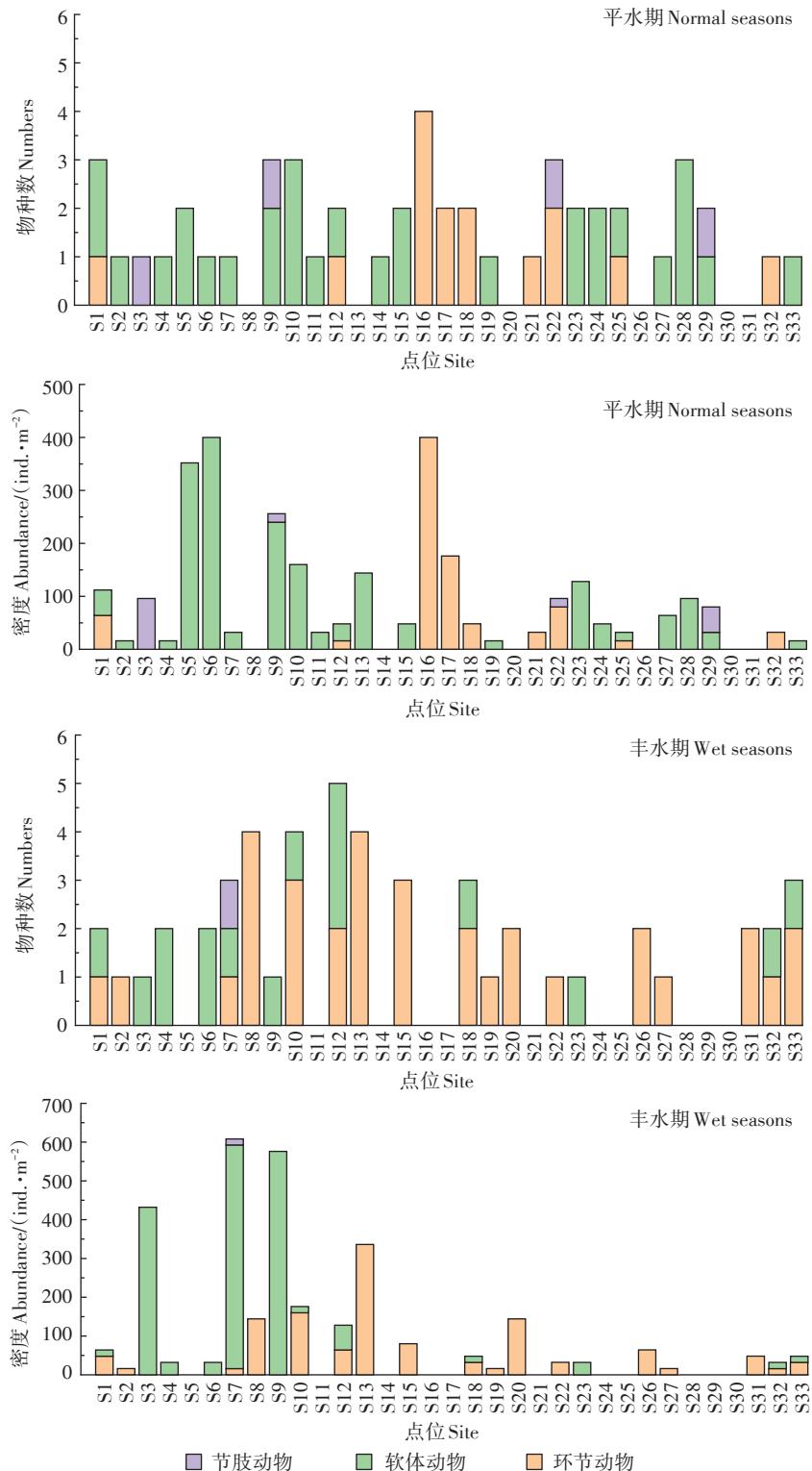


图2 平水期与丰水期的河网区底栖动物物种数与密度的时空分布

Figure 2 Spatial and temporal distribution of macrobenthos species number and density during normal and wet seasons

$m^{-2}$ , 节肢动物密度为  $0.49 \text{ ind.} \cdot m^{-2}$ , 分别占总密度的 39.7%、57.3%、0.5%。S7 点位与 S9 点位铜锈环棱螺密度均高达  $576 \text{ ind.} \cdot m^{-2}$ 。两个水期底栖动物密度均为软体动物>环节动物>节肢动物。嘉兴河网底栖动物密度在两个水期空间分布均为北部>中部>南部。在不同水期,南部与中部底栖动物密度平水期>丰水期,北部地区底栖动物密度丰水期>平水期。

## 2.2 大型底栖动物与氮磷及生境因子的相关性分析

嘉兴河网为典型的城市流域,底质类型较为单一,采用混凝土或浆砌石结构进行护坡。嘉兴河网各

项水环境指标均值见图 3。对 TN(S)、TP(S)、TN(J)、TP(J)、TN(D)、TP(D) 进行分析,两个水期 TP、TN 的最大值达到了 V 类水质,嘉兴河网 TP 的均值超过 V 类水质标准,富营养化严重。部分点位溶解氧(DO)含量较低,TOC 含量较高。参照水环境质量标准(GB 3838—2002),嘉兴河网整体水质处于 V 类水质。对河网中 TN、TP、温度、pH、TOC 进行相关性分析(图 4),以相关系数  $|r| > 0.75$  为阈值剔除相关性较强的因子,筛选出关键环境因子。

选择两个水期优势底栖动物进行去趋势对应分

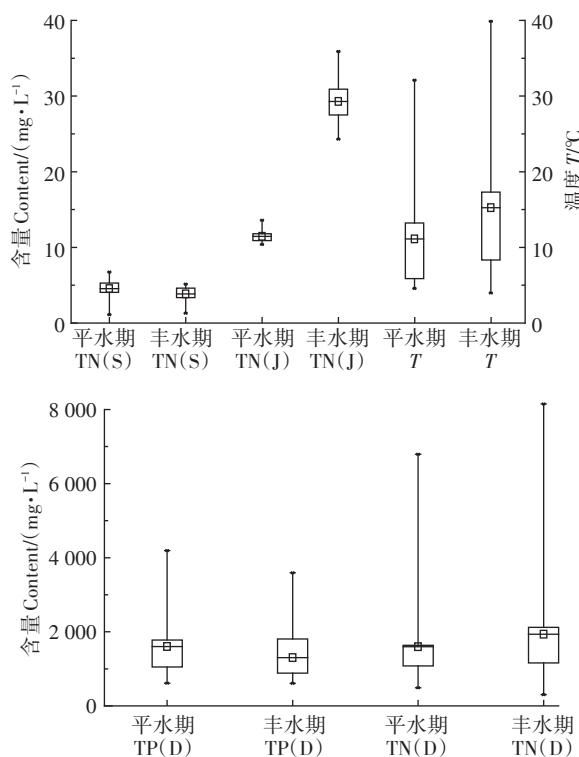
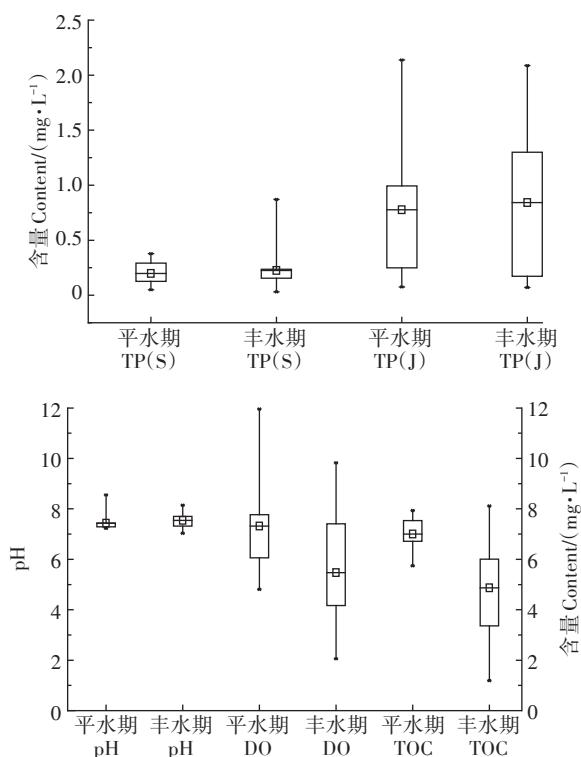


图 3 嘉兴河网氮、磷及生境因子

Figure 3 Nitrogen and phosphorus content and habitat factors in Jiaxing river network

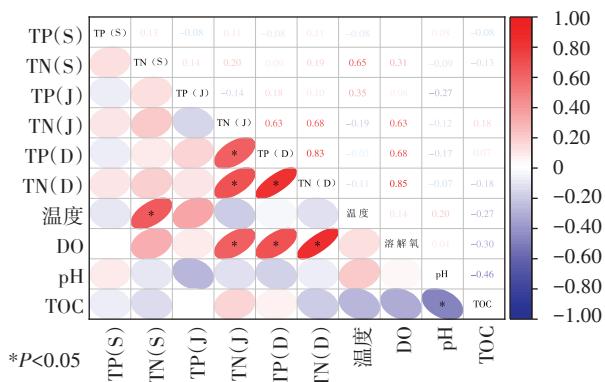
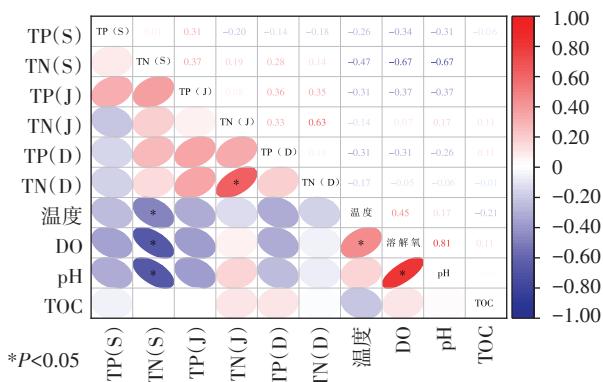


图 4 水体氮、磷与生境因子相关性系数分析

Figure 4 Correlation coefficient analysis of water nitrogen and phosphorus with habitat factors

析(DCA),两个水期最大梯度长度均小于3,选择RDA分析。分析结果表明(图5):对于平水期,前2轴特征值为0.311 2与0.124 3,物种与环境因子的排序相关性为0.748 0与0.649 2。TP(J)与TN(S)对底栖动物密度影响较大。轴1对物种与环境之间的累计解释率为65.83%。轴1与TN(S)、TP(S)、温度、pH相关性较高,轴2与TN(D)、TP(J)相关性较高。软体动物密度与pH、温度呈正相关,与其他较强生境因子呈负相关。对于丰水期,前2轴特征值为0.193 8与0.124 0,物种与环境因子的排序相关性为0.760 9与0.604 4。TN(S)与TP(J)对底栖动物密度影响较大。轴1对物种与环境之间的累计解释率达70.62%。轴1与TP(J)、TN(J)、TOC相关性较高,轴2与TOC、温度、pH、TP(S)相关性较高。软体动物密度与TOC、pH、TP(S)呈正相关,与其他生境因子呈负相关。

平水期嘉兴河网底栖动物群落 $H'$ 值、J值和d值的均值分别为0.48、0.62和0.15;丰水期的均值分别为0.69、0.44和0.23。对嘉兴河网表层水体、沉积物和间隙水的氮磷含量与大型底栖动物多样性进行相

关性分析(表2),底栖动物的J值在平水期与TN(J)呈正相关,丰水期与TN(S)呈显著正相关。 $H'$ 值和d值与嘉兴河网中氮磷含量无显著相关性。

### 2.3 大型底栖动物与重金属的相关性分析

对嘉兴河网表层水体重金属(Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg)含量与大型底栖动物特征进行相关性分析的结果见表3,寡毛类密度在平水期与As呈显著负相关关系,丰水期与Hg呈极显著正相关关系。软体动物平水期与Pb呈极显著正相关关系,节肢动物与重金属并未表现出相关性。 $H'$ 在平水期与Pb呈显著负相关关系,丰水期与Cu、As呈显著正相关关系;J在平水期与Pb呈极显著正相关关系;d在丰水期与Cu、As呈显著正相关关系。

软体动物在平水期与Cr、Ni呈显著和极显著正相关,丰水期与Pb呈极显著正相关; $H'$ 在平水期与Cr、Ni呈极显著负相关关系,丰水期与Mn呈显著负相关关系;J在平水期与Cr、Ni呈极显著负相关关系,丰水期与Pb呈极显著负相关关系;d在平水期与Cr、As和在丰水期与Mn呈显著负相关关系。其他大型底栖

表2 嘉兴河网水体、沉积物氮磷含量与大型底栖动物的相关性

Table 2 Correlation between nitrogen and phosphorus content in water and sediment and characteristics of macrobenthos

项目 Item	水期 Season	TP(S)	TN(S)	TP(J)	TN(J)	TP(D)	TN(D)
$H'$	平水期	0.441	-0.131	0.160	-0.428	-0.076	-0.260
	丰水期	-0.050	0.447	-0.121	0.072	0.140	0.160
J	平水期	-0.372	-0.361	-0.389	0.667*	0.079	0.376
	丰水期	0.129	0.713**	-0.175	0.093	-0.314	0.007
d	平水期	0.263	-0.279	-0.058	-0.198	-0.007	-0.214
	丰水期	-0.126	0.107	-0.144	-0.029	0.297	0.084

注:\*在0.05水平(双尾)相关性显著。\*\*在0.01水平(双尾)相关性显著。下同。

Note: \* Significant correlation at 0.05 level(double-tailed). \*\* Significant correlation at 0.01 level(double-tailed). The same below.

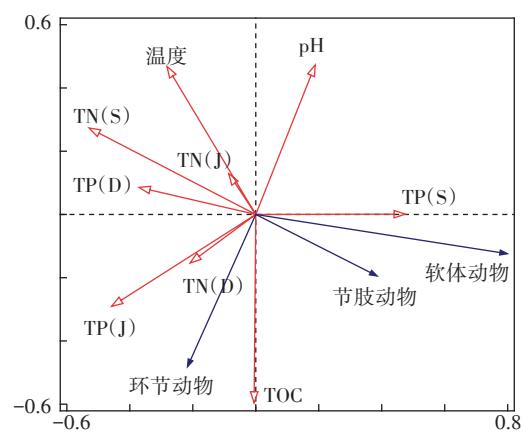
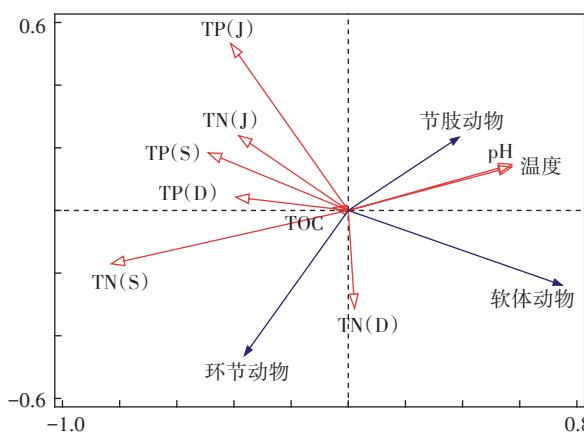


图5 平水期与丰水期物种环境-空间排序图

Figure 5 Species environment-spatial arrangement in normal season and wet season

表3 嘉兴河网水体中重金属与大型底栖动物特征的相关性

Table 3 Correlation between heavy metal content in river water and characteristics of macrobenthos

项目 Item	水期 Season	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
寡毛类	平水期	-0.127	-0.212	0.135	-0.195	-0.173	-0.648*	—	—	-0.281
	丰水期	-0.262	-0.352	-0.239	0.414	-0.283	-0.086	-0.002	0.791**	-0.066
软体动物	平水期	0.207	0.468	-0.079	0.533	0.518	0.486	—	—	0.864**
	丰水期	-0.061	0.020	-0.055	-0.108	-0.100	0.100	-0.239	-0.099	0.011
节肢动物	平水期	-0.020	0.257	-0.124	-0.103	-0.003	0.269	—	—	-0.061
	丰水期	-0.097	-0.030	-0.108	-0.138	-0.155	0.055	-0.260	-0.071	-0.043
<i>H'</i>	平水期	-0.289	-0.398	-0.171	-0.257	-0.568	-0.056	—	—	-0.598*
	丰水期	0.256	0.139	0.422	0.586*	0.275	0.550*	0.339	0.302	0.348
<i>J</i>	平水期	0.159	0.554	-0.051	0.459	0.563	0.337	—	—	0.929**
	丰水期	0.271	0.124	0.336	0.242	0.289	0.208	0.304	0.027	0.050
<i>d</i>	平水期	-0.265	-0.28	-0.233	-0.043	-0.451	0.060	—	—	-0.338
	丰水期	0.290	0.209	0.451	0.522*	0.285	0.618*	0.261	0.183	0.370

注:—表示含量为0,不存在变量,因此无法进行计算。

Note:— indicates that the content is 0 and there is no variable, so it cannot be calculated.

表4 表层沉积物中重金属含量、潜在生态风险指数与大型底栖动物的相关性

Table 4 Correlation between heavy metal content, potential ecological risk index and characteristics of macrobenthos in surface sediments

项目 Item	水期 Season	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	RF <sup>[19]</sup>
寡毛类	平水期	-0.16	0.388	-0.242	-0.168	-0.145	-0.064	0.437	-0.457	-0.383	0.184
	丰水期	0.140	0.470	-0.022	0.008	0.060	0.033	0.073	-0.089	-0.070	0.042
软体动物	平水期	0.703*	0.135	0.760**	-0.045	0.093	0.140	-0.378	0.258	0.036	-0.205
	丰水期	0.092	0.289	0.061	0.276	0.154	-0.046	-0.080	0.429	0.813**	0.043
节肢动物	平水期	-0.193	-0.338	-0.175	-0.169	-0.281	-0.415	-0.254	-0.088	-0.125	-0.309
	丰水期	0.130	0.317	0.061	0.320	0.214	0	-0.039	0.483	0.844**	0.089
<i>H'</i>	平水期	-0.777**	-0.048	-0.764**	-0.221	-0.241	-0.489	-0.218	-0.230	-0.105	-0.359
	丰水期	0.101	-0.521*	0.136	-0.009	-0.094	0.235	0.145	-0.331	-0.188	0.051
<i>J</i>	平水期	-0.849**	-0.005	-0.909**	0.016	0.107	0.074	-0.253	0.172	-0.072	-0.113
	丰水期	-0.038	-0.202	0.061	-0.250	-0.300	0.097	0.085	-0.405	-0.752**	-0.032
<i>d</i>	平水期	-0.592*	0.045	-0.575	-0.262	-0.249	-0.582*	-0.376	-0.261	-0.082	-0.498
	丰水期	0.119	-0.615*	0.164	0.089	-0.023	0.209	0.100	-0.181	0.143	0.053

动物与重金属元素含量、综合污染指数未表现出相关性( $P>0.05$ )。结果表明,嘉兴河网表层水体与表层沉积物中重金属的含量对大型底栖动物多样性指数及个别种群的密度影响较大。

### 3 讨论

#### 3.1 大型底栖动物优势物种群落差异结构分析

本研究共采集到大型底栖动物30种,其中腹足纲物种属最多,中腹足目为优势种群。城市河流底栖动物季节波动规律相对较弱,城市化水质发生变化,底栖动物最先受到影响<sup>[7]</sup>。有研究表明,敏感物种EPT昆虫(蜉蝣目、毛翅目)为代表的敏感物种在城市

河流中完全消失或者明显减少<sup>[25,35]</sup>。EPT昆虫在本研究中也并未采集到。平水期与丰水期各站点物种数极低。平水期只有S16物种为4种;丰水期只有4个站点(S8、S10、S12、S13)物种≥4种,且多为软体动物和节肢动物。徐州、苏州、上海等城市河流底栖动物分布与嘉兴河网表现一致<sup>[36-38]</sup>。

铜锈环棱螺、霍甫水丝蚓等高度耐污物种是嘉兴河网采集到的优势物种。霍甫水丝蚓是适合指示低溶氧和富营养的生物,铜锈环棱螺耐受营养盐,寡毛类、摇蚊类、中腹足目、基眼目均为高耐污物种<sup>[35,39-40]</sup>。扬州市河网大型底栖动物也是以摇蚊类、寡毛类等耐污物种为主导种群<sup>[41]</sup>。有研究表明低氧会降低生物

的多样性,寡毛类生物可以在DO较低情况下大量存在<sup>[6,24,42]</sup>,如S21的DO只有 $2.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,只有霍甫水丝蚓与苏氏尾鳃蚓存在。大型底栖动物的群落组成依赖于河流生境的稳定性和多样性<sup>[43]</sup>,S30为河网交汇口,流速较大导致有机物难以聚集,难以为底栖动物提供适宜栖息地,在两个水期均未检测到生物体<sup>[44]</sup>。嘉兴河网生物多样性差异并不显著,但生物量具有显著差异,这可能是由于软体动物中螺类占比较多,与滆湖的调查结果相似<sup>[45]</sup>。嘉兴河网沉积物主要以淤泥为主,淤泥中有机物含量丰富,城市生活污水的排入使得氮、磷等物质增加,导致水体污染严重。底栖动物更适宜在水草植被丰富的生境条件下生存和繁殖<sup>[45-48]</sup>。戴齐等<sup>[42]</sup>的调查发现,沉水植物生长较好的地方要比其他河道软体动物物种数多出数倍。嘉兴河网东部地区氮、磷含量相对较高,耐污性浮游植物较多<sup>[49]</sup>,使得软体动物出现的频率以及密度大幅增加。如S3与S10位于农田附近,降雨丰富时污染物随着地表径流流入河道,使得水体TN、TP浓度产生空间差异,生物密度达到 $432\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 与 $672\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

### 3.2 大型底栖动物分布特征与氮磷、重金属含量的关系

#### 3.2.1 大型底栖动物与氮磷的相关性分析

底栖动物优势种与嘉兴河网表层水和沉积物氮磷的相关关系结果不同,但均存在显著的相关性。滆湖大型底栖动物群落分布与氮磷之间的关系也有相同结果<sup>[24]</sup>。白洋淀水体中 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N在春季与底栖动物生物量呈负相关,在夏季和秋季与底栖动物生物量呈正相关。有研究表明,相同种类底栖动物在不同水体中受到的影响也不同<sup>[49]</sup>。因此氮磷对底栖动物的影响不能描述为促进或抑制作用,而要考虑该水体的营养水平或其他地球生物化学指标<sup>[49-50]</sup>。 $J$ 值与对影响底栖动物密度较大的TN(S)、TN(J)呈显著正相关。 $H'$ 、 $J$ 和 $d$ 值与TP无显著相关性的原因有多种可能,区域因素和空间位置等对底栖动物多样性的影晌都是不可忽视的环境因素。

底栖动物的群落结构与水体理化性质、流域土地利用情况、区域位置等因素相关,但理化性质是最重要的因素之一<sup>[50]</sup>。水体pH与底栖动物种群和密度正相关,pH呈碱性时有利于植物进行光合作用,从而为底栖生物提供栖息地以及营养物质,若在酸性情况下,底栖动物密度会大量减少<sup>[51-52]</sup>。氮、磷等无机盐是水生植物生长所需的营养盐。生境因子TN、TP是嘉兴河网物种多样性降低的主要影响因素<sup>[53-54]</sup>。嘉

兴河网水体TN、TP污染较为严重,无生物体存在的9个点位TN达到V类水质标准。夏季动植物新陈代谢速度快,对氮的利用速率高,动植物共同作用导致氮浓度下降。TN(D)与TP(D)具有相关性,表明嘉兴河网沉积物氮、磷的输入形式和途径一致。TN(S)与pH呈负相关,研究表明偏酸或偏碱的水体环境均有利于沉积物TN、TP的释放<sup>[55]</sup>。TN浓度呈现出从间隙水到表层水递减的趋势,表明其有从沉积物向表层水体扩散的风险。平水期TN(J)浓度较丰水期偏低,可能是由于平水期温度相对低,沉积物中的氮分解缓慢,向水体释放的氮也较少。丰水期TP(J)浓度高于平水期,夏季水温偏高且沉积物氧化还原电位处于较强还原性环境,使沉积物中的磷容易释放<sup>[56]</sup>。水体中氮磷对底栖动物影响显著,而底泥中氮磷的影响较小,可以通过氮磷的吸附转移降低水体污染对底栖动物的胁迫。

#### 3.2.2 大型底栖动物与重金属的相关性分析

研究表明沉积物TN、TP的含量与重金属有显著相关性,嘉兴河网的沉积物重金属污染严重,9种重金属整体水平高于浙江省土壤背景值<sup>[17,57]</sup>。平水期沉积物中,Zn、Cu、Cr和Cd超标最为严重;丰水期Cd和Hg超标最为严重。软体动物在平水期与Cr、丰水期与Pb极显著正相关。当底泥污染较为严重时会向水体持续释放有毒物质<sup>[58]</sup>,由于底栖动物的耐受性不同,污染较为严重时会改变群落结构<sup>[59]</sup>。大型底栖动物对河流重金属污染具有一定的指示作用<sup>[22,60]</sup>。底栖动物多样性指数与沉积物重金属潜在风险指数呈现一定的关联性,潜在风险指数较高的点位物种丰富度较低。Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数与含量较高的重金属含量呈显著负相关关系。平水期降雨量相较于丰水期少,河网内径流较小,且嘉兴河网有机质含量较高,有机质与重金属可以通过络合作用产生吸附沉淀,进一步导致沉积物重金属含量增大,使得物种丰富度显著降低。平水期嘉兴北部重金属污染较为严重,重金属潜在风险指数较高的点位基本只有软体动物存在。无生物体存在的5个点位TN、TP为V类水质,水体环境较差。丰水期重金属污染较为严重的点位存在的物种均为寡毛类与软体动物。

城市化过程中,河道渠化、水坝、桥梁等一系列水利工程的修建,改变了河流的物理生境结构<sup>[25]</sup>。利用现浇混凝土、浆砌石块等结构对河流进行护坡。河道渠化通过清除河床中物质残体,增加流水对河床的冲

刷作用,底栖动物难以找到栖息地,也会导致物种多样性降低<sup>[61-62]</sup>。

## 4 结论

(1)嘉兴河网大型底栖动物总体呈现结构单一、物种丰富度低、耐污性高的特征。两个水期底栖动物密度排序均为软体动物>环节动物>节肢动物。嘉兴河网底栖动物密度在两个水期空间分布为北部>中部>南部。

(2)通过冗余分析和相关性分析,地表水TP、TN和间隙水TP是导致底栖动物空间分布和群落结构化差异的主要影响因素。平水期软体动物密度与地表水TP、地表水TN和间隙水TP呈负相关,丰水期软体动物密度与地表水TP呈正相关,与地表水TN和间隙水TP呈负相关。Pielou均匀度指数( $J$ )在平水期与间隙水TN呈正相关,在丰水期与地表水TN呈正相关。

(3)嘉兴河网表层水体与表层沉积物中重金属的含量对大型底栖动物多样性指数及个别种群的密度有良好的相关性。寡毛类密度在平水期与水体As呈显著负相关关系,丰水期与水体Hg呈极显著正相关关系。软体动物平水期与水体Pb呈极显著正相关关系。软体动物的密度与沉积物中Cr、Ni、Pb呈显著正相关。3种多样性指数均与表层沉积物重金属含量呈负相关。

## 参考文献:

- [1] DEVINE J A, VANNI M J. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 47(6):1107-1121.
- [2] ANON. Impacts of land use and water quality on macroinvertebrate communities in the Pearl River drainage basin, China[J]. *Hydrobiologia*, 2010, 652(1):71-88.
- [3] MORLEY S A, KARR J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound basin[J]. *Conservation Biology*, 2002, 16 (6):1498-1509.
- [4] 张敏, 邵美玲, 蔡庆华, 等. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2):281-290. ZHANG M, SHAO M L, CAI Q H, et al. Macrozoobenthos community structure and the biological assessment to the water quality of the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2):281-290.
- [5] RICHARDSON D M, COWLING R M. Biodiversity and ecosystem processes: Opportunities in Mediterranean-type ecosystems[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, 8(3):79-81.
- [6] 龚志军, 谢平, 唐汇涓, 等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. 水生生物学报, 2001, 25(3):210-216. GONG Z J, XIE P, TANG H J, et al. The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25(3):210-216.
- [7] 王朝霞. 河流水体富营养化与溶解氧的昼夜变化特点研究[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(10):60-62. WANG C X. Characteristics of diurnal variation of eutrophication and dissolved oxygen in river water[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2020, 40 (10):60-62.
- [8] 路丁, 郭沛涌. 湖泊沉积物磷污染及其释放风险研究[J]. 能源与环境, 2015(3):20-21. LU D, GUO P Y. Phosphorus pollution and its release risk in lake sediments[J]. *Energy and Environment*, 2015(3): 20-21.
- [9] ANON. Nitrogen dynamics in sandy freshwater sediments (Saginaw Bay, Lake Huron)[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2001, 27(1): 84-97.
- [10] 姜霞, 王秋娟, 王书航, 等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. 环境科学, 2011, 32(5):1285-1291. JIANG X, WANG Q J, WANG S H, et al. Characteristic analysis of the adsorption/desorption of nitrogen and phosphorus in the sediments of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1285-1291.
- [11] LI H, WANG Y, SHI L Q, et al. Distribution and fractions of phosphorus and nitrogen in surface sediments from Dianchi Lake, China[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2012, 6(1):195-208.
- [12] 王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2336-2344. WANG Y R, WANG S R, JIAO L X, et al. Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (6):2336-2344.
- [13] 杨明生, 熊邦喜, 杨学芬. 武汉市南湖大型底栖动物的时空分布和氮磷评价[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6):658-663. YANG M S, XIONG B X, YANG X F. Temporal and spatial distribution and nitrogen and evaluation of phosphorus of macrozoobenthos in Nanhу Lake, Wuhan[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(6):658-663.
- [14] 刘乐丹, 王先云, 陈丽平, 等. 淀山湖底栖动物群落结构及其与沉积物碳氮磷的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6):1269-1278. LIU L D, WANG X Y, CHEN L P, et al. Community structure of macrozoobenthos with relationships to carbon, nitrogen and phosphorus in the sediment of Dianshan Lake (Shanghai, China) [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2018, 27(6): 1269-1278.
- [15] 郭晶, 李利强, 黄代中, 等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1):44-51. GUO J, LI L Q, HUANG D Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(1):44-51.
- [16] 曹人升, 范明毅, 黄先飞, 等. 金沙燃煤电厂周围土壤有机质与重金属分析[J]. 环境化学, 2017, 36(2):397-407. CAO R S, FAN M Y, HUANG X F, et al. Analysis of organic matter and heavy metals in soils around the coal-fired power plant in Jinsha[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(2):397-407.
- [17] 丁婷婷, 杜士林, 王宏亮, 等. 嘉兴市河网重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2020, 39(2):500-511. DING T T, DU S

- L, WANG H L, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Jiaxing River Network, Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(2):500–511.
- [18] 傅晓钘, 刘婷婷. 桐乡某皮革厂周边土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(35):80–86, 145. FU X Y, LIU T T. Heavy metal pollution and health risk assessment of soil around a leather factory in Tongxiang[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(35):80–86, 145.
- [19] 石艳平, 黄锦法, 倪雄伟, 等. 嘉兴市主要生猪规模化养殖饲料和粪便重金属污染特征[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(9):1494–1497. SHI Y P, HUANG J F, NI X W, et al. Characteristics of heavy metal pollution in feed and feces of large-scale pig breeding in Jiaxing[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2015, 56(9):1494–1497.
- [20] ARMITAGE P D, MOSS D, WRIGHT J F, et al. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites[J]. *Water Research*, 1983, 17(3):333–347.
- [21] WIM G, KOEN L, NIELS D P, et al. Multimetric macroinvertebrate index flanders (MMIF) for biological assessment of rivers and lakes in flanders (Belgium) [J]. *Limnologica—Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(3):199–207.
- [22] 李利强, 王丑明, 张屹, 等. 洞庭湖大型底栖动物与表层沉积物重金属研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):286–291. LI L Q, WANG C M, ZHANG Y, et al. Study of macrozoobenthos and heavy metals of surface sediment in Dongting Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):286–291.
- [23] 徐兆礼, 沈焕庭. 长江口最大浑浊带区浮游动物的生态研究[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1):39–48. XU Z L, SHEN H T. Study on zooplankton ecology in the turbidity maximum zone of the Changjiang River estuary[J]. *Journal of Fishery Science of China*, 1995, 2(1):39–48.
- [24] 陈志宁, 张红高, 周歲, 等. 潟湖大型底栖动物群落分布和氮磷因子的相关分析[J]. 环境监控与预警, 2016, 8(1):45–50, 59. CHEN Z N, ZHANG H G, ZHOU W, et al. Analysis on the relationship between the distribution of macrobenthos community and nitrogen-phosphorus factor in the Gehu Lake[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2016, 8(1):45–50, 59.
- [25] 王强, 庞旭, 王志坚, 等. 城市化对河流大型底栖动物群落的影响研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(18):6275–6288. WANG Q, PANG X, WANG Z J, et al. Advances in research on the influence of urbanization on stream benthic macroinvertebrate communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18):6275–6288.
- [26] McKinney M L. Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(2):161–176.
- [27] 陈凌娜, 赵抗抗, 张双双, 等. 升金湖自然湿地越冬鹤类生境适宜性变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3):556–563. CHEN L N, ZHAO K K, ZHANG S S, et al. Study on the change of landscape pattern on habitat environment of winter cranes in Shengjin Lake nature wetland[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(3):556–563.
- [28] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京:农业出版社, 1991. ZHANG J M, HE Z H. Inland waters fisheries natural resources survey manual[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991.
- [29] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. LIU J K. Advanced aquatic biology[J]. Beijing: Science Press, 1999.
- [30] BELAOUSOFF S, KEVAN P G, MURPHY S, et al. Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) by using a range of ecological indices[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2003, 12(5):851–882.
- [31] JAYACHANDRAN P R, JIMA M, PHILOMINA J, et al. Assessment of benthic macroinvertebrate response to anthropogenic and natural disturbances in the Kodungallur–Azhikode estuary, southwest coast of India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(10).
- [32] PIELOU E C J. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131–144.
- [33] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975–1001.
- [34] MAANAN M, SADDIK M, MAANAN M, et al. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48:616–626.
- [35] RABURU P, MAVUTI K M, HARPER D M, et al. Population structure and secondary productivity of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Claparède) and *Branchiura sowerbyi* Beddard in the profundal zone of Lake Naivasha, Kenya[J]. *Hydrobiologia*, 2002, 488:153–161.
- [36] 戴雅奇, 熊昀青, 由文辉. 苏州河底栖动物群落恢复过程动态研究[J]. 农村生态环境, 2005(3):21–24. DAI Y Q, XIONG J Q, YOU W H. Dynamic restoration process of zoobenthos communities in Suzhou Creek[J]. *Rural Ecological Environment*, 2005(3):21–24.
- [37] 陈小华, 高伟, 刘文亮, 等. 平原河网地区大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8):1310–1316. CHEN X H, GAO W, LIU W L, et al. Characteristics of macrobenthos community structure and its relationship to environmental factors within a typical plain river network[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1310–1316.
- [38] 李朝, 蔡琨, 杜娟, 等. 徐州城市河流和湖泊的大型底栖动物群落结构及影响因子分析[J]. 生态科学, 2016, 35(1):61–66. LI C, CAI K, DU J, et al. Characteristics of macrobenthic community structure and its relationship with environmental factors in the Xuzhou's urban river and urban lake[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(1):61–66.
- [39] 袁伟, 金显仕, 戴芳群. 低氧环境对大型底栖动物的影响[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(3):293–296. YUAN W, JIN X S, DAI F Q. Influence of hypoxia environment upon macrobenthos[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(3):293–296.
- [40] 李艳, 蔡永久, 秦伯强, 等. 太湖霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri* Claparède)的时空格局[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3):450–459. LI Y, CAI Y J, QIN B Q, et al. Temporal and spatial patterns of *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparède in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3):450–459.
- [41] 胡威, 王丽, 莫康乐, 等. 扬州市河网大型底栖动物群落结构及其生境特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4):1440–1448. HU W, WANG L, MO K L, et al. Community structure and habitat characteristics of macrobenthos in river network of Yangzhou City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4):1440–1448.

- [42] 戴奇, 李双, 周忠良, 等. 上海城区河道底栖动物群落特征与沉积物重金属潜在生态风险[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1985–1992. DAI Q, LI S, ZHOU Z L, et al. Characteristics of zoobenthos community and potential ecological risk of heavy metals in urban rivers in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10): 1985–1992.
- [43] 张宇航, 张敏, 张海萍, 等. 北京河流大型底栖动物空间格局及其环境响应研究[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 101–110. ZHANG Y H, ZHANG M, ZHANG H P, et al. Study on the spatial pattern of macroinvertebrate and their responses to environmental changes in Beijing rivers[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(4): 101–110.
- [44] 吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜, 等. 太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 686–694. WU Z S, CAI Y J, CHEN Y W, et al. Assemblage structure investigation of macrozoobenthos and water quality bioassessment of the main river systems in Taihu basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(5): 686–694.
- [45] 邵勇, 王洪杨, 徐蛟, 等. 漏湖入湖河流春季大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1617–1628. SHAO Y, WANG H Y, XU J, et al. Community structure of benthic macro-invertebrates and biological assessment of water quality in the inflowing rivers of Lake Gehu in spring[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5): 1617–1628.
- [46] DUAN X H, WANG Z Y, XU M Z. Benthic fauna and river ecological assessment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [47] 闫云君, 李晓宇, 梁彦龄. 草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 176–182. YAN Y J, LI X Y, LIANG Y L. A comparative study on community structure of macrozoobenthos community between macrophytic and Algal lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(2): 176–182.
- [48] MCCORMICK P V, SHUFORD R, RAWLIK P S. Changes in macroinvertebrate community structure and function along a phosphorus gradient in the Florida Everglades[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 529(1): 113–132.
- [49] 姜登岭, 赵昊, 邬喜红, 等. 嘉兴城市河网区高、低水位期浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2540–2550. JIANG D L, ZHAO H, WU X H, et al. Model correspondence analysis of phytoplankton community and its environmental factors at high and low water levels in urban river network area of Jiaxing City[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(9): 2540–2550.
- [50] SANDIN L, JOHNSON R K. Local, landscape and regional factors structuring benthic macroinvertebrate assemblages in Swedish streams [J]. *Landscape Ecology*, 2004, 19(5): 501–514.
- [51] COURNEY L A, CLEMENTS W H. Effects of acidic pH on benthic macroinvertebrate communities in stream microcosms[J]. *Hydrobiologia*, 1998, 379(1): 135–145.
- [52] 童昌华. 水体富营养化发生原因分析及植物修复机理的研究[D].
- [53] JOHNSON R C, JIN H S, CARREIRO M M, et al. Macroinvertebrate community structure, secondary production and trophic-level dynamics in urban streams affected by non-point-source pollution[J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(5): 843–857.
- [54] 许佟, 高凡, 郭家选, 等. 环境因子对沉积物氮磷释放潜力的模拟研究[J]. 北京农学院学报, 2020, 35(4): 115–120. XU T, GAO F, GUO J X, et al. Simulation of environmental factors on the release potential of endogenous nitrogen and phosphorus[J]. *Journal of Beijing Agricultural College*, 2020, 35(4): 115–120.
- [55] 朱永青. 淀山湖底泥氮磷营养盐释放及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5): 70–77, 82. ZHU Y Q. Study on the releasing of nutrient from sediment of Dianshan Lake and its influencing factors[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2014, 36(5): 70–77, 82.
- [56] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2345–2354. LUO Y H, NIE X Q, LI X L, et al. Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6): 2345–2354.
- [57] 郭军辉, 殷月芬, 陈发荣, 等. 胶州湾表层沉积物重金属污染分布特征及其生态风险评价[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(3): 13–21. GUO J H, YIN Y F, CHEN F R, et al. The distribution characteristics of heavy metals in sediments of Jiaozhou Bay and its potential ecological risk evaluation[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(3): 13–21.
- [58] DONG R R, YANG S J, FENG R J, et al. Complete feminization of catfish by feeding limnodilus, an annelid worm collected in contaminated streams[J]. *Environmental Research*, 2014, 133(2): 371–379.
- [59] RASMUSSEN J J, MCKNIGHT U S, LOINAZ M C, et al. A catchment scale evaluation of multiple stressor effects in headwater streams[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 420–431.
- [60] 王昱, 李宝龙, 冯起, 等. 黑河重金属空间分布及与大型底栖动物的关系[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1354–1365. WANG Y, LI B L, FENG Qi, et al. Space distribution of heavy metals and its relationship with macrozoobenthos in the Heihe River, northwest China [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(3): 1354–1365.
- [61] POULTON B C, WILDHABER M L, CHARBONNEAU C S, et al. A longitudinal assessment of the aquatic macroinvertebrate community in the channelized lower Missouri River[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, 85(1): 23–53.
- [62] 张展羽, 卢敏, 朱成立. 城镇河道的水生态环境建设和保护[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 18–20, 33. ZHANG Z Y, LU M, ZHU C L. Eco-environmental protection and structure for urban river[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(6): 18–20, 33.