

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0038

王丽媛,杨丽伟,罗文磊,等. 基于东鱼河摇蚊群落的水环境质量评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 89-97. WANG L Y, YANG L W, LUO W L, et al. Evaluations of water quality based on Chironomidae community in the Dongyu River, Shandong Province, China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 89-97. (in Chinese)

基于东鱼河摇蚊群落的水环境质量评价

王丽媛¹, 杨丽伟¹, 罗文磊², 陈诗越¹, 陈影影¹

(1. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要:东鱼河作为南四湖最长的人湖河流,其水质状况对于南四湖的水环境质量具有重要影响。为分析东鱼河摇蚊群落结构与水体富营养化的关系,于2013年5月对东鱼河8个采样点表层松散2 cm底泥中的摇蚊幼虫头壳进行了分析。东鱼河底泥中共鉴定出30个摇蚊属种,主要属种由 *Glyptotendipes pallens-type* (20.42%)、*Cricotopus sylvestris-type* (18.23%)、*Chironomus plumosus-type* (15.24%)、*Tanytarsus mendax-type* (7.35%)、*Dicrotendipes nervosus-type* (7.12%)、*Chironomus anthracinus-type* (6.23%)、*Polypedilum nubifer-type* (5.38%)组成,共占所有摇蚊含量的79.97%。其中 *Glyptotendipes pallens-type*、*Cricotopus sylvestris-type* 和 *Chironomus plumosus-type* 是东鱼河的优势种,占全流域的53.89%。基于生物多样性指数及主成分分析对东鱼河水质进行分析,结果表明,东鱼河水体处于轻度-中度污染等级;冗余分析得到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是影响东鱼河摇蚊组合分布的主要水环境因子,且不同摇蚊属种对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的响应不同。此外,结合摇蚊组合生态特性综合分析得,中游、中下游污染较严重,是东鱼河水污染治理的重点区域。

关键词:摇蚊;生物学评价;冗余分析;水环境质量;东鱼河

中图分类号:X82 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluations of water quality based on Chironomidae community in the Dongyu River, Shandong Province, China

WANG Liyuan¹, YANG Liwei¹, LUO Wenlei², CHEN Shiyue¹, CHEN Yingying¹

(1. School of Geography, Geomatics, and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: As the longest river discharging into the Nansi Lake, the Dongyu River plays an important role on the water quality of the Nansi Lake. To better understand the relationship between the community structure of chironomid and eutrophication of the Dongyu River, the head shells of larvae preserved in the upper 2-cm-thick loose bottom sediments were investigated with eight samples collected in May 2013. A total of 30 Chironomus species were identified in the Dongyu River surface sediments. The main genus were composed of *Glyptotendipes pallens-type* (20.42%), *Cricotopus sylvestris-type* (18.23%), *Chironomus plumosus-type* (15.24%), *Tanytarsus mendax-type* (7.35%), *Dicrotendipes nervosus-type* (7.12%), *Chironomus anthracinus-type* (6.23%), and *Polypedilum nubifer-type* (5.38%), accounting for 79.97% of the total counts. Based on the biodiversity index and principal component of the Dongyu River, the water body was in a mild to moderate pollution level. Redundancy analysis showed that $\text{NH}_3\text{-N}$ was the main water environmental factor resulting in the distribution of the chironomid in the Dongyu

收稿日期:2018-07-14 修回日期:2019-01-15 网络出版时间:2019-01-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190126.1458.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(41807430);江苏省研究生科技创新项目(KYCX18_2122)

作者简介:王丽媛(1994—),女,山东临沂人,主要从事湖泊生态与环境方面的研究。Email:993096690@qq.com

通信作者:陈诗越(1969—),男,江苏南京人,教授,博士,主要从事环境地学、湖泊沉积与环境演化以及湖泊生态与环境影响评价等研究。
E-mail:chenshiyue@jnsu.edu.cn

River, and the responses of different species of Chironomid to $\text{NH}_3\text{-N}$ were varied. It can also be inferred that the Dongyu River is a medium-eutrophic river, according to the ecological characteristics of the chironomid combination, with serious pollution in the middle and lower reaches, which are the key areas for water pollution control.

Key words: Chironomidea; biological evaluation; redundancy analysis; water quality; Dongyu River

南四湖是南水北调东线重要的调蓄湖泊,东鱼河作为南四湖最大的入湖河流,其水质状况不仅关系到河流沿线居民的生产生活和经济的发展,同时也关系到南水北调东线输水工程的水质安全^[1-2],对入南四湖河口水质有着重要影响。东鱼河作为一条人工河,桥、涵、闸建筑物 108 座,河流受人工控制较强,东鱼河水质主要受到沿岸居民生产生活影响。武周虎等^[3]就 2010—2011 年的南四湖的 35 个人湖河口水质监测数据分析其等标污染物负荷,东鱼河负荷比为 7.0%,是南四湖 10 条主要排污河流之一,也成为南四湖治污的重点。东鱼河作为国家水资源监控能力建立淮河流域二期项目之南四湖 19 条入湖河流水量监控站点之一^[4],其流域范围内自然条件恶劣,降水量小于蒸发量,更增大了污染物扩散及转化的阻力,加剧水质安全的威胁。近些年在人类活动的干扰下,水质状况越来越差,径流量逐渐降低^[5],随着当地城镇化进程加快、城镇人口数量增加,城市生产用水量大幅度增加,加快东鱼河水环境治理具有现实意义。

据统计,地球上已有 15 000 多种摇蚊属种,数量占湖底栖息动物总密度的 50% 以上^[6],摇蚊生命周期短,是淡水底栖动物中分布最广、种类最多、密度和生物量最大的无脊椎动物。据研究表明,摇蚊对底泥中的氮、磷的释放有明显的促进作用,在加速水体物质循环中的有机物矿化作用和消除有机物污染方面具有显著作用^[7-8]。一方面,摇蚊对水环境极其敏感,水环境因子的变化在很大程度上会影响其群落结构,且不同种类的摇蚊幼虫对水环境的敏感程度不同^[9-10],如底泥重金属物质及水体中的有机物含量变化等都能引起摇蚊优势种的改变^[11];另一方面,其几丁质头壳可以完整的保留在湖泊沉积物中^[12],底泥松散表层沉积物中的摇蚊亚化石可以反映近 3~5 a 的水环境状况。摇蚊亚化石是水环境污染状况的良好指示器,在评价水环境质量及健康方面具有相对优势,目前被广泛应用于水环境质量的检测^[13]。仲嘉等^[14]根据大清河摇蚊幼虫群落分布组合特征,成功评价了大清河不同流域的水环境状况。张恩楼等^[15]人根据太白湖 150 a 的摇蚊记录,分析了太白湖湖泊营养化的演变过程。本研究

于 2013 年 5 月采集东鱼河底泥表层 2 cm 厚的样泥中和表层水样,判别底泥中的摇蚊幼虫头壳属种,进而分析近年摇蚊群落组成与水质状况的关系,以期反映东鱼河水环境状况,为东鱼河水环境治理和保障沿线居民生产生活提供重要保障。

1 研究区域概况

东鱼河($34^{\circ}54'59''\sim 35^{\circ}08'12''\text{N}$, $115^{\circ}43'47''\sim 116^{\circ}09'50''\text{E}$)位于山东省境内,是鲁南地区第一大人造河流。西起菏泽市东明县刘楼,于鱼台县城东部的西姚注入昭阳湖,是南四湖重要的入湖河流之一,是南水北调东线一期截污导流工程的重要组成部分^[16]。东鱼河全长 172.1 km,流域总面积 5 923 km^2 ,占南四湖总面积的 18.7%,是注入南四湖流域面积最大的河流。东鱼河属于温带大陆性气候,四季分明,雨热同期,降水量空间分布不均匀,年径流量变化很大,7、8 月径流量占全年径流量的 2/3,降水集中在夏季,夏季的径流量占全年径流量的 90% 以上。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

本次实验利用 GPS 定位,于 2013 年 5 月份从东鱼河上游直至河流入湖口处共设置 8 个采样点(图 1),分别记作 DYH-1、DYH-2、…、DYH-8。利用 Kajak 重力采样器在各采样点处采集表层 2 cm 的底泥样品,同时在相同采样点处利用盖式采水器采集水样 1 L,并现场测定、记录了水温、溶解氧、水面宽度、水深、岸带宽度、坡度和植被类型等。摇蚊幼虫头壳的处理方法按照标准方法进行^[17],在 75 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴锅中将 10% 的 KOH 的泥样放入并加热 15 min,分别在 212 μm 和 90 μm 的筛子下过滤。在相应倍数的显微镜下挑选出剩余样品中的摇蚊头壳,使用 Hyderomatrix 进行摇蚊头壳封片。封片后在 100~400 倍数下的显微镜进行头壳鉴定,鉴定标准以头壳的完整度计数,计数中具有完整的或者绝大部分的为计量 1,不完整的半个则为 0.5,其余的完整度不做统计。在对摇蚊幼虫属种进行鉴定中,借鉴 Wiederholm 的方法和 Brooks 方法。

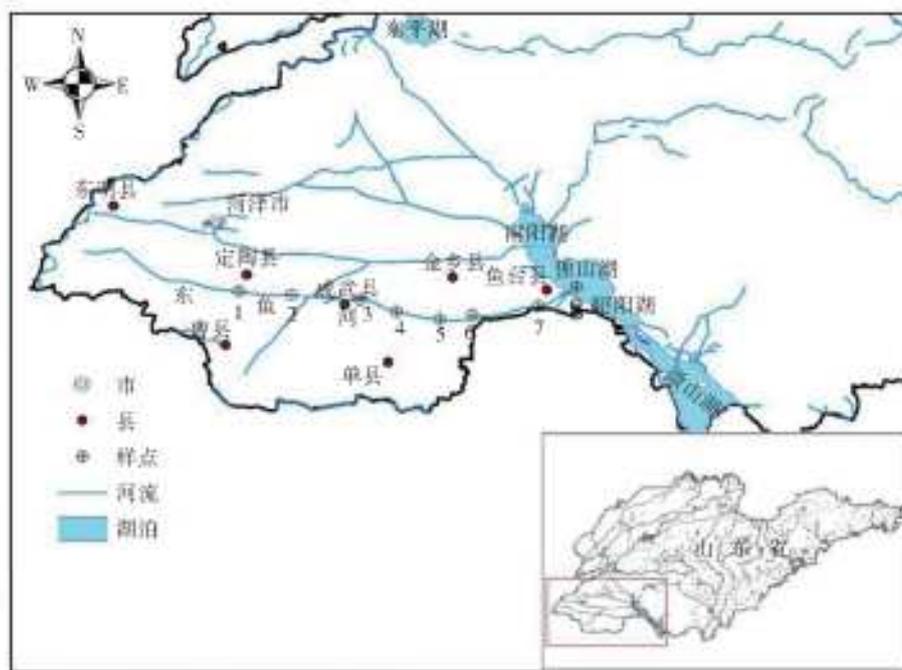


图1 东鱼河采样点

Fig. 1 The sampling sites within the Dongyu River

水质指标测定包括盐度(SAL)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、可溶性正磷酸盐(SOP)、溶解性总磷(STP)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、汞(Hg)和砷(As)等11项。将采集的部分水质样品过0.45 μm滤膜后滴入2滴饱和HgCl₂溶液抑制微生物活动,用以测定NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N、SOP、STP、TOC等指标,另取部分未过滤样品滴加HNO₃使pH<2,用以测定TP、Hg和As的质量浓度,将这两部分水样分别装于聚乙烯塑料瓶中,冷却保存。采用盐度计、溶解氧仪(810A)、钼锑抗分光光度法和N-(1-萘基)-乙二胺光度法分别测定SAL、DO、SOP和NO₂-N;采用纳氏试剂光度法测定NH₃-N(在测定氨氮前先用徐宁沉淀法将水样进行预处理,以消除水样中一些物质引起的干扰);采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定TP和STP;采用紫外光光度法和非红外线吸收分别测定NO₃-N和TOC;采用冷原子吸收分光光度法测定Hg,采用二乙基二硫代氯基甲酸银分光光度法测定As。

2.2 研究方法

2.2.1 生物学评价

生物学评价亦是结合理化指标分析,用生物学的方法对所测范围内的环境状况进行评价和预测,综合反映出河流的水环境质量^[18]。根据摇蚊的生态属性,不同种类的摇蚊对水环境的敏感程度不同,

采用生物学评价的方法可以根据摇蚊群落结构特征较为准确的评价出水体的污染状况。本文在运用Primer 5.0软件计算摇蚊多样性指数的同时进行多样性分析。运用Margalef指数^[19](d_m)、Shannon-Wiener指数^[20](H')和Pielou指数^[21](Je)分别计算摇蚊群落的丰富度、多样性和均匀度。计算公式为

$$d_m = (S-1)/\ln N \quad (1)$$

$$H' = -\sum(n_i/N)\ln(n_i/N) \quad (2)$$

$$Je = H'/\ln S \quad (3)$$

式中: S 为物种种类个数; N 为所有物种个数; n_i 为单个物种个体数。生物多样性指数水质评价标准^[22]详见表1。

表1 生物多样性水质评价标准
Tab. 1 Biodiversity evaluation indicators

Margalef 指数(d_m)	Shannon-Wiener 指数(H')	Pielou 指数(Je)	污染程度
>6	>3	>0.8	清洁
3~6	2~3	0.8~0.5	轻污染
2~3	1~2	0.3~0.5	中污染
0~2	0~1	0~0.3	重污染

2.2.2 排序分析

运用CANOCO4.5软件进行排序分析,排序分析是揭示摇蚊群落物种组成分布与水环境因子关系广泛采用的方法,本文主要采用趋势对应分析(DCA,也称降维对应分析)和冗余分析(RDA)。

DCA 是一种非约束性排序方法,用于摇蚊幼虫头壳数据(摇蚊群落结构特征)的分析,提取摇蚊数据的最大变率用以判别摇蚊属种对各水质指标梯度的响应模型,反映出影响摇蚊属种组合演替的主要环境因子^[23]。RDA 是一种线性模式分析方法,用于分析摇蚊群落结构与各水环境因子之间的关系。RDA 可以将摇蚊数据与水环境数据联系起来,揭示影响摇蚊组合分布的主要水环境因子,所以又称为约束性排序方法。分析过程中的响应变量和解释变量分别为摇蚊数据和水环境数据,通过非限定性蒙特卡洛置换($P < 0.05, n = 499$)检验每个变量的显著性,筛选出一组显著的解释变量。

2.2.3 主成分分析

运用 SPSS 软件将环境因子数据进行主成分分析(PCA)。PCA 分析是它可以将多维的水环境因子纳进统一系统中进行定量化研究^[24],然后利用主成分分析建立水环境评价模型,可以保证在原始数据信息处于最小损失的情况下,用少量变量代替多维变量来简化数据结构^[25],作为多指标分析,从众多环境变量中剔除相关因子,筛选出主要的少数独立综合环境因子,而且筛选出来的这些因子能够对研究结果做出充分及合理的解释^[26]。根据所计算的观测点水质污染综合得分,将水质污染程度做定

量化描述,得分越大,表示水环境污染程度越严重,进而对不同观测点水质状况进行评价分级^[27]。本文采用的水环境指标有 SAL、DO、NH₃-N、NO₃-N、NO₂-N、SOP、STP、TP、TOC、Hg 和 As。

3 结果与分析

3.1 东鱼河摇蚊群落特征

东鱼河 8 个采样点采集 1 572.5 个摇蚊幼虫头壳,分别隶属于 3 亚科 20 属,共 30 种。其中,DYH-4 摇蚊种类最多有 19 种,DYH-2 和 DYH-8 最少均为 11 种,DYH-1、DYH-3、DYH-5、DYH-6、DYH-7 分别为 13、18、16、17、17 种,其中丰度 > 2% 的有 22 个,详见图 2。东鱼河摇蚊幼虫头壳主要属种由 *Glyptotendipes pallens-type* (20.42%)、*Cricotopus sylvestris-type* (18.23%)、*Chironomus plumosus-type* (15.24%)、*Tanytarsus mendax-type* (7.35%)、*Dicrotendipes nervosus-type* (7.12%)、*Chironomus anthracinus-type* (6.23%)、*Polypedilum nubifer-type* (5.38%) 组成,质量浓度共占有所有摇蚊亚化石属种的 79.97%。其中 *Chironomus plumosus-type*、*Glyptotendipes pallens-type* 和 *Cricotopus sylvestris-type* 是东鱼河的优势种,占全流域的 53.89%,几乎全流域分布。

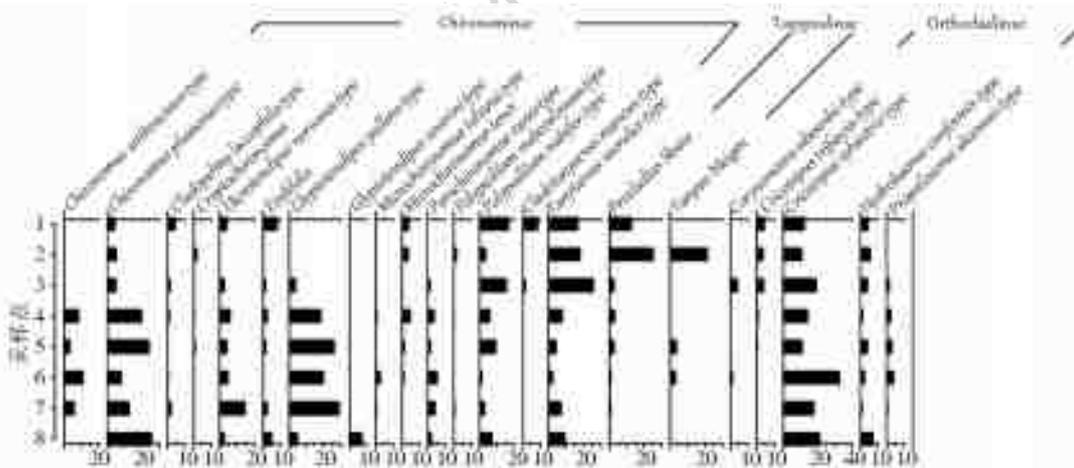


图 2 东鱼河主要摇蚊属种百分比

Fig. 2 Distributions of main chironomids in the Dongyu River

东鱼河 8 个采样点摇蚊的平均密度为 655 ind./m²,DYH-1 的摇蚊密度最低,为 80 ind./m²,DYH-4 的摇蚊密度最高,达到峰值,为 1 447 ind./m²。由图 3 可以看出,DYH-1、DYH-2、DYH-3 和 DYH-8 的摇蚊密度低,其余采样点摇蚊密度高,不同采样点摇蚊密度差异很大,整体上的摇蚊群落密度沿流域增加。并且摇蚊密度流域分布不均匀,反映出各采样点水质状况差别很大。

3.2 东鱼河水质评价

东鱼河 8 个采样点摇蚊 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数的波动范围依次为 2.43~3.54、1.35~1.99、0.53~0.75,东鱼河摇蚊平均值依次为 2.76、1.66 和 0.61。根据表 2 所示,Margalef 指数的环境质量评价结果为 25% 的轻污染等级,75% 中污染等级;Shannon-Wiener 指数环境质量评价结果为 100% 的中污染等级;Pielou 指数

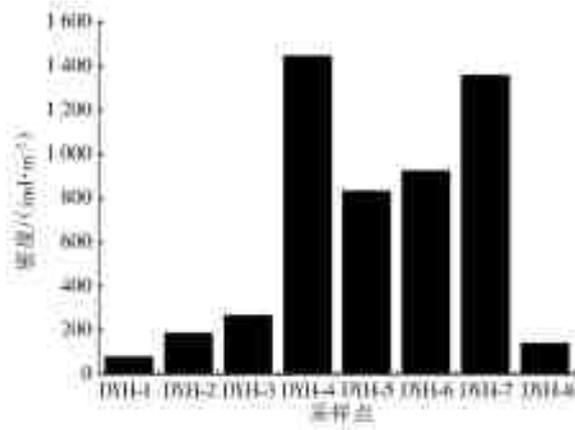


图3 东鱼河8个采样点摇蚊密度

Fig. 3 Density of chironomid larvae in the eight sampling points of Dongyu River

的环境质量评价结果为 87.5% 的轻污染等级, 12.5% 的中污染等级。Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数反映采样点 DYH-2、DYH-4、DYH-5、DYH-6、DYH-7、DYH-8 的水质状况都为中度污染。采样点 DYH-7 三个评价指标反映的水质状况都为中污染等级, 其余采样点三个生物指标评价结果不完全相同, 都处于轻度-中度污染状态, 这表明东鱼河不同流域的水体受污染程度不同, 反映的水质状况存在一定的差异, 整体属于“轻污染-中污染”等级。

表2 东鱼河水水质评价结果

Tab. 2 Bio-assessment of water quality of different sections in the middle reaches of Dongyu River

采样点	Margalef 指数(d_m)		Shannon-Wiener 指数(H')		Pielou 指数(Je)	
	数值	污染程度	数值	污染程度	数值	污染程度
DYH-1	3.29	轻污染	1.99	中污染	0.75	轻污染
DYH-2	2.54	中污染	1.76	中污染	0.69	轻污染
DYH-3	3.54	轻污染	1.87	中污染	0.63	轻污染
DYH-4	2.43	中污染	1.52	中污染	0.54	轻污染
DYH-5	2.48	中污染	1.53	中污染	0.55	轻污染
DYH-6	2.58	中污染	1.50	中污染	0.53	轻污染
DYH-7	2.45	中污染	1.35	中污染	0.48	中污染
DYH-8	2.74	中污染	1.75	中污染	0.68	轻污染

3.3 东鱼河水环境质量综合评价

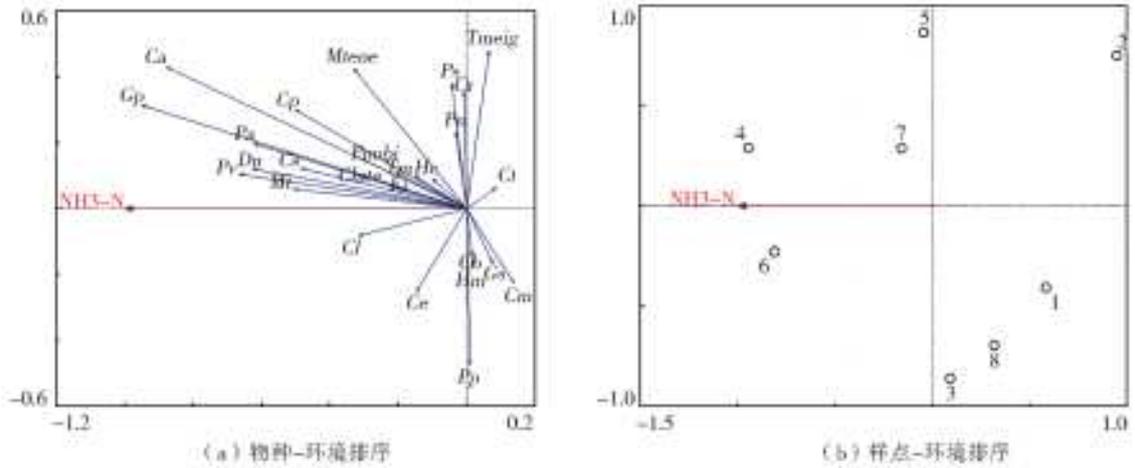
DCA 分析显示, 各轴中最大梯度长度为 1.33 ($SD < 2$), 表明摇蚊对水环境因子的响应为线性模型, 因此采用 RDA 分析摇蚊与水环境因子间的关系较合适。RDA 揭示了摇蚊群落结构与水环境因子之间的相互关系, 通过非限定性蒙特卡洛置换 ($p < 0.05, n = 499$) 检验, 剔除共线性参数 ($VIF \geq 5$), 筛选出 NH_3-N ($F = 5.012, P = 0.02$) 是影响摇蚊组成与分布的显著因子, 所解释的摇蚊变率为

45.5%, 说明该区域的环境变量与摇蚊组分之间具有极强的相关性。

由图 4(a) RDA 物种-环境排序图可知, NH_3-N 的质量浓度与第一轴关系密切, 沿第一轴的负向直线增加, 尤其是物种 *Microchironomus tabarui-type*、*Cladopelma laccophila-type*、*Parachironomus varus-type*、*Dicrotendipes nervosus* 和优势种 *Chironomus plumosus-type*、*Glyptotendipes pallens-type* 和 *Cricotopus sylvestris-type* 等几乎都随着 NH_3-N 质量浓度的增加呈线性增多; 而 *Paratanytarsus penicillatus-type*、*Cricotopus bicinctus-type*、*Tanpus Meigen*、*Cladotanytarsus mancus-type* 和 *Cricotopus trifascia-type* 等的分布受低质量浓度的 NH_3-N 的影响较大。其他丰度较高的摇蚊属种与 NH_3-N 的相关度不高, 表明东鱼河水环境中不同水质要素对摇蚊属种的响应差异显著, 且不同物种对不同水环境要素污染的响应差异显著。

图 4(b) RDA 样点-环境排序图可知, 东鱼河中游、中下游采样带点 (DYH-4、DYH-5、DYH-6、DYH-7) 散落在 NH_3-N 质量浓度高的区域。中游、中下游采样点摇蚊密度大, 属种 *Chironomus anthracinus-type*、*Glyptotendipes pallens-type*、*Prosilocerus akamusi-type* 等在此区域分布较多, 其中 *Prosilocerus akamusi-type* 是 IV 水体 (中污染水体) 的指示物种, 并且 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数的水质评价结果显示该区域水体属于中度污染等级, 污染较严重; 东鱼河上游及入湖口处采样点 (DYH-1、DYH-2、DYH-3、DYH-8) 散落在 NH_3-N 浓度低的区域, 该区域摇蚊密度小, 主要摇蚊属种为 *Tanytarsus mendax-type*、*Polypedilum nubifer-type*、*Procladius Skuse*, 其中 *Tanytarsus mendax-type* 是 III 类水体 (轻污染水) 的指示物种, 而 *Polypedilum nubifer-type* 是在 III 类水体及 IV 类水体中丰度最大, *Procladius Skuse* 为世界广适种, 具有耐酸性。因此东鱼河上游水体及入湖口处水体污染程度较轻, 中游及中下游水体污染较严重。

根据东鱼河 8 个观测点的水质指标, 采用 PCA 分析 (累计贡献率大于 85%, 共选出 3 个主成分) 所得结果见表 3。东鱼河上游观测点 DYH-1、DYH-2、DYH-3、DYH-8 的水质处于轻污染, 观测点 DYH-4、DYH-5、DYH-7 的水质处于中度污染, 观测点 DYH-6 的水质处于重污染。即东鱼河上游水质状况较好, 中游及下游水质污染较严重。主成分分析结果与生物学评价结果较为一致, 东鱼河整体处于轻度-中度污染等级。



注:图中 Ca=Chironomus anthracinus-type; Cp=Chironomus plumosus-type; Cl=Cladopelma laccophila-type; Clate=Cladopelma lateralis-type; Cr=Cryptochironomus; Dn=Dicrotendipes nervosus-type; Hc=Hydrobaenus conformis-type; Pa=Propiloscerus akamusi-type; us-type; Ei=Einfeldia; Gp=Glyptotendipes pallens-type; Gs=Glyptotendipes severini-type; Hm=Harnischia mentum; Mt=Microchironomus tabarui-type; Mtene=Microchironomus tener; Pv=Parachironomus varus-type; Pn=Polypedilum nubeculosum-type; Pnubi=Polypedilum nubifer-type; Cm=Cladotanytarsus mancus-type; Pp=Paratanytarsus penicillatus-type; Tm=Tanytarsus mendax-type; Ps=Procladius Skuse; Tmeig=Tanpus Meigen; Ce=Corynoneura edwardsi-type; Cb=Cricotopus bicinctus-type; Ct=Cricotopus trifascia-type; Cs=Cricotopus sylvestris-type。

图 4 RDA 分析结果摇蚊物种-环境和样点-环境排序

Fig. 4 The RDA ordination map of species-environment and samples-environment

表 3 东鱼河流域各监测点水质综合评判结果

Tab. 3 Comprehensive assessment results of water quality at each monitoring point in the Dongyu River

观测点	第一主成分得分	第二成分得分	第三成分得分	综合得分	排名	污染程度分级
DYH-1	-2.439	0.220	-2.593 146 4	-1.863	8	轻污染
DYH-2	-2.593	0.408	-0.920 991 5	-1.674	7	轻污染
DYH-3	-1.457	0.476	0.647 151 6	-0.716	6	轻污染
DYH-4	-1.0477	1.209	2.360 675 2	-0.043	4	中污染
DYH-5	0.907	-1.027	-0.121 457 8	0.322	2	中污染
DYH-6	5.144	1.685	-0.565 557 5	3.534	1	重污染
DYH-7	0.545	-0.961	0.331 198 3	0.176	3	中污染
DYH-8	0.741	-2.780	-0.037 925 9	-0.169	5	轻污染

4 讨论

摇蚊属种的组合分布受多种水环境要素的影响,如温度、pH、水深、食物、溶解氧等的变化都会是摇蚊组合发生变化。在浅水流域中,水质变化会在一定程度上影响摇蚊组合变化分布,因此摇蚊群落组合变化能很好的反应水环境污染状况^[28]。研究表明 *Chironomus plumosus-type* 和 *Propiloscerus akamusi-type* 为水体富营养化的指示生物^[29],曹艳敏等^[30]根据太湖梅梁湾 T0950 岩芯摇蚊亚化石组合变化,揭示了太湖梅梁湾湖区水体从 1940 年至今营养水平的演化。本文通过非限定性蒙特卡洛置换检验,仅筛选出 NH₃-N ($F=5.012, P=0.02$) 是东鱼河摇蚊组合分布的显著影响因子。根据张菊等^[31]的研究结果,东鱼河主要水环境污染因子为

NH₃-N、TP 和 Hg,张恩楼等^[15]已证明 TP 是影响摇蚊群落结构组成与分布的重要水环境因子,说明东鱼河水环境中 TP 对摇蚊群落组合分布的影响小于 NH₃-N。通过 RDA 分析得到, *Microchironomus tabarui-type*、*Parachironomus varus-type*、*Cladopelma laccophila-type*、*Parachironomus varus-type*、*Dicrotendipes nervosus* 为 NH₃-N 的耐污染属种,但其他丰度较高的摇蚊属种与 NH₃-N 的相关度不高,表明东鱼河水环境中不同水质要素对摇蚊属种的响应差异显著,且不同物种对不同水环境要素污染的响应差异显著。

东鱼河主要摇蚊属种中 *Chironomus plumosus-type* 为 V 类水体(重污染水体)的指示物种,主要分布于中游、中下游流域; *Cricotopus sylvestris-type* 是 IV 类水体指示物种,下游分布较多; *Polypedilum*

nubifer-type、*Tanytarsus mendax-type* 为Ⅳ类水体的指示物种, *Polypedilum nubifer-type*、*Tanytarsus mendax-type* 主要分布在东鱼河中游; *Glyptotendipes pallens-type* 为嗜酸性属种, 分布于中游、中下游河段; *Dicrotendipes nervosus-type* 为Ⅳ类水体指示物种, 在中游、中下游流域分布较多, *Tanytarsus mendax-type* 是Ⅲ类水体的指示物种, 而 *Polypedilum nubifer-type* 是在Ⅲ类水体及Ⅳ类水体中丰度最大。结合三种生物指标评价结果及主成分分析结果, 东鱼河水体处于轻度—中度污染等级, 中游、中下游水环境污染较严重, 域范围内差距很大。东鱼河中游、中下游水质较差, 污染主要来源于沿岸农业区带来的农业面源污染及生活污水的排放; 仅在 1997 年全区域的化肥使用量就高达 100 多万 t, 农药使用量达 2 500 万 t^[32], 大量的农业污染物残留, 难以根治, 使得沿线水环境污染难以在短时间内治理。东鱼河上游水体污染较轻, 上游主要为工业废水排放引起的水环境污染, 如菏泽、定陶县、成武县等设有大量工厂, 但在人为干扰下, 加强企业对污水的治理, 使得水体得到相应改善。总而言之, 人类活动是造成东鱼河水环境污染的主要原因, 随着城市化进程的加快, 东鱼河水环境势必面临着更加严峻的挑战, 加强东鱼河水环境治理不仅关系到南水北调东线水质安全, 更关系到沿线居民的生产生活。

本文基于摇蚊反映的东鱼河水水质状况与张菊等^[30]基于东鱼河水环境数据所反映的水质状况相吻合, 其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在中游上升, 在下游质量浓度下降, 且中游水体污染较严重, 这与摇蚊组合分布特征相呼应, 中游Ⅳ类水体指示属种密集, 水环境污染较严重, 上游Ⅲ类水体指示属种密集, 证明根据摇蚊群落结构所反映的水环境状况结果准确可靠。根据张伟分析的东鱼河上游东明县黄军营村及入湖口处的鱼台县西姚村的两个水质采样点 2000—2008 年的水质状况, 仅有黄军营村水体中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在 2005—2007 年间超标值, 其研究表明东鱼河水体在 2006—2008 年为轻污染河流^[33]。其研究设立采样点较少, 仅监测了东鱼河上游和入湖口两个采样点的水质状况, 不能反映东鱼河水体整体的水质情况, 其研究只能说明东鱼河上游及入湖口处水质状况较好。

5 结 论

东鱼河摇蚊的优势属种由 *Chironomus plumosus-type*、*Glyptotendipes pallens-type* 和 *Cricotopus sylvestris-type* 组成, 占全流域的 53.89%。

RDA 分析显示 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是影响东鱼河摇蚊群落组合分布的显著因子, 共解释了 45.5% 的摇蚊变率, 属种 *Microchironomus tabarui-type*、*Parachironomus varus-type*、*Cladopelma laccophila-type* 分布在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染较大的区域, 它们可视为水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染的指示生物。水环境生物学评价结果显示东鱼河不同流域受污染程度不同, 根据摇蚊群落结构分布特征, 东鱼河整体处于轻度—中度污染状态, 中游、中下游水体污染较严重, 为治理的重点区域。

参考文献(References):

- [1] 翟晓萌. 南四湖大型底栖动物研究及水质评价[D]. 济南: 山东师范大学, 2013. (ZHAI X M. Large benthic research and water quality evaluation in Nansi Lake [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013. (in Chinese))
- [2] 罗辉, 周建仁, 郭忠. 南水北调对南四湖水环境影响分析与评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 63-67. (LUO H, ZHOU J R, GUO Z. Analysis and assessment of the impact of South-to-North Water Diversion Project on water environment of Nansihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2005, 33(1): 63-67. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.2005.01.016.
- [3] 武周虎, 任杰, 张晓波, 等. 南四湖入湖河口水质综合分析改善效果评估[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(7): 80-84. (WU Z H, REN J, ZHANG X B, et al. Comprehensive analysis and improvement of water quality in the estuary of Nansi Lake [J]. Environmental Pollution and Prevention Journal, 2012, 34(7): 80-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3865.2012.07.017.
- [4] 韩俊丽. 东鱼河截污引流工程水质保障体系研究[J]. 山东水利, 2014, 16(10): 30-31. (HAN J L. Water quality assurance system of East Fish River sewage Interception diversion project [J]. Shandong Water Resources, 2014, 16(10): 30-31. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-6159.2014.10.015.
- [5] 张翠荣. 气候变化和人类活动对东鱼河流域径流影响的探析[J]. 水资源开发与管理, 2017, 13(7): 66-69. (ZHANG C R. Analysis on influence of climate change and human activity on runoff in Dongyu River basin [J]. Water resources development and Management, 2017, 13(7): 66-69. (in Chinese)) DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/tv.2017.07.019.
- [6] ARMITAGE P D, CRANSTON P S, PINDER L C V. The Chironomidae: the biology and ecology of non-biting midges[J]. Journal of the North American Benthology Society, 1996, 15(2): 183-214.

- logical Society, 1995, 14(3): 611-738. DOI: 10. 2307/5810.
- [7] 王元元, 宋进喜, 蒋卫威, 等. 摇蚊幼虫与霍甫水丝蚓扰动对河流沉积物中氮、磷、氧释放的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2504-2511. (WANG Y Y, SONG J X, JIANG W W, et al. Effect of bioturbation of Chironomid larvae and *Limnodrilus hoffmeiteri* on the release of nitrogen, oxygen and phosphate in the sediments from a river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2504-2511. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2014. 1036.
- [8] 商景阁, 张路, 张波, 等. 中国长足摇蚊 (*Tanytus chinensis*) 幼虫底栖扰动对沉积物溶解氧特征及反硝化的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 708-713. (SHANG J G, ZHANG L, ZHANG B, et al. Bioturbation effect of *Tanytus chinensis* larvae on denitrification rate and process in sediments [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(5): 708-713. (in Chinese)) DOI: 10. 18307/2010. 0512.
- [9] PETER B, DANIELA D, RADOVAN P, et al. Relict chironomid communities surviving in the coldest High Tatra Mountain lakes confirmed by a palaeolimnological survey[J]. *Biologia*, 2017, 72(8): 965-969. DOI: 10. 1515/biolog-2017-0102.
- [10] HIRABAYASHI K, YOSHIZAWA K, YOSHIDA N, et al. Progress of eutrophication and change of chironomid fauna in Lake Yamanakako, Japan[J]. *Limnology*, 2004, 5(1): 47-53. DOI: 10. 1007/s10201-003-0113-2.
- [11] 杨丽伟, 张菊, 邓焕广, 等. 东平湖底泥重金属污染及其对摇蚊分布的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 680-688. (YANG L W, ZHANG J, DENG H G, et al. Heavy metal pollution and its influence on the distribution of chironomids in the sediments of Lake Dongping, Shandong, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2016, 22(4): 680-688. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1145. 2015. 11023.
- [12] ZHANG E L, BEDORR D A, JONES R, et al. A sub-fossil chironomid-total phosphorus inference model for lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(17): 2125-2132. DOI: 10. 1007/s11434-006-2062-8.
- [13] 霍堂斌, 刘曼红, 姜作发, 等. 松花江干流大型底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 247-254. (HUO T B, LIU M H, JIANG Z F, et al. Macroinvertebrate community structure of macroinvertebrates and bioassessment of water quality in main stream of Songhua River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 247-254. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2012. 0040.
- [14] 仲嘉, 王卫民, 单保庆, 等. 大清河摇蚊幼虫群落结构特征及水质初步评价[J]. 中国农学通报, 2015, 31(32): 106-116. (ZHONG J, WANG W M, SHAN B Q, et al. Community Structure of Chironomid Larvae and Bioassessment of water quality in Daqing River [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(32): 106-116. (in Chinese)) DOI: 10. 11924/j. issn. 1000-6850. casb15060094.
- [15] 张恩楼, ALAN B, RICHARD J, 等. 长江中下游地区典型湖泊摇蚊亚化石-湖水总磷定量模型研究[J]. 科学通报, 2006, 51(11): 1318-1325. (ZHANG E L, ALAN B, RICHARD J, et al. Typical lake Yangtze River chironomid subfossil - LAKE total phosphorus quantitative model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(11): 1318-1325. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn. 0023-074X. 2006. 11. 013.
- [16] 张永利, 常家忠, 葛兆生. 南水北调东线山东段东鱼河流域治污探索[J]. 山东水利, 2007, 9(7): 53, 59. (ZHANG Y L, CHANG J Z, GE Z S. Shandong Section of Eastern South East Fish River pollution exploration[J]. *Shandong Water Resources*, 2007, 9(7): 53, 59. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-6159. 2007. 07. 025.
- [17] BROOK S J. Late-glacial fossil midge stratigraphies (Insecta: Diptera: Chironomidae) from the Swiss Alps [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2000, 159(3): 261-279. DOI: 10. 1016/S0031-0182(00) 00089-4.
- [18] 张丹, 丁爱中, 林学钰, 等. 河流水质监测和评价的生物学方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(2): 200-204. (ZHANG D, DING A Z, LIN X Y, et al. Monitoring and assessment of water quality in rivers with biological methods. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2009, 45(2): 200-204. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn. 0476-0301. 2009. 02. 022.
- [19] RDEATH R. Margalef's Index[J]. *Encyclopedia of Ecology*, 2008: 2209-2210. DOI: 10. 1016/B978-008045405-4. 00117-8.
- [20] 王晶, 焦燕, 任一平, 等. Shannon-Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1257-1263. (WANG J, JIAO Y, REN Y P, et al. Comparative study on two computing methods for estimating Shannon-Wiener diversity index[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(8): 1257-1263. (in Chinese)) DOI: 10. 11964/jfc. 20150509886.
- [21] PIELOU E C. *Ecological Diversity*[M]. New York:

- John Wiley, 1995.
- [22] 卢少俊. 南四湖大型底栖动物的群落结构及演替规律[D]. 济宁: 曲阜师范大学, 2012. (LU S J. Community structure and succession of macrobenthos in the Nansi Lake[D]. Jinan: Qufu Normal University, 2012. (in Chinese))
- [23] TER BRAAK C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct analysis[J]. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179. DOI: 10.2307/1938672.
- [24] HUANG B R, FRY J D. Root anatomical physiological and Morphological responses to drought stress for Tall Fescue cultivars[J]. *Crop Science*, 1998 38(4): 1017-1022. DOI: 10.2135/cropsci1998.0011183X003800040022x.
- [25] SUN L F, QI J Q, ZHAO X L, et al. The establishment of principal component analysis assessment model for drinking water quality of city resource[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 3547 (675-677): 960-963. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.675-677.960.
- [26] 吉祝美, 方里, 张俊, 等. 主成分分析法在 SPSS 软件中的操作及在河流水质评价中的应用[J]. *环境研究与监测*, 2012, 25(4): 68-73, 57. (JI Z M, FANG L, ZHANG J, et al. Principal component analysis of SPSS software and its application in river water quality assessment[J]. *Environmental Research and Monitoring*, 2012, 25(4): 68-73, 57. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-0254.2012.04.013.
- [27] 刘德林, 刘贤赵. 主成分分析在河流水质综合评价中的应用[J]. *水土保持研究*, 2006(3): 124-125, 128. (LIU D L, LIU X Z. Application of principal component analysis to the comprehensive evaluation of water quality in river[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006(3): 124-125, 128. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2006.03.040.
- [28] LANGDON P E, RUIZ Z, BRODERSEN K L. Assessing lake eutrophication using chironomids: understanding the nature of community response in different lake types[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(3): 562-577. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2005.01500.x.
- [29] 舒凤月, 孔亮, 王赛迪, 等. 山东南四湖摇蚊幼虫群落结构及其对富营养化过程的指示[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(1): 141-146. (SHU F Y, K L, WANG S D, et al. Chironomid larva community and indication to eutrophication progress in Lake Nansi, Shandong, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(1): 141-146. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1145.2013.00141.
- [30] 曹艳敏, 张恩楼, 沈吉, 等. 太湖梅梁湾摇蚊亚化石沉积记录及营养演化研究[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(4): 549-554. (CAO Y M, ZHANG E L, SHEN J, et al. Subfossil chironomid assemblages in sediments of Meiliang Bay, Lake Taihu and the trophic reconstruction[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(4): 549-554. (in Chinese)) DOI: 10.18307/2011.0409.
- [31] 张菊, 鲁长娟, 郭娜, 等. 南四湖支流东鱼河水质现状及健康风险评价[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(8): 56-59. (ZHANG J, LU C J, GUO N, et al. Water quality and environmental health risk assessment of Dongyu River[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(8): 56-59. (in Chinese))
- [32] 张勤勋, 孙辉. 浅谈东鱼河的水质污染及对策[J]. *菏泽师专学报*, 1999, 21(2): 59-60. (ZHANG Q X, SUN H. Talking about the water pollution and countermeasures of Dongyu River[J]. *Journal of Heze University*, 1999, 21(2): 59-60. (in Chinese)) DOI: 10.16393/j.cnki.37-1436/z.1999.02.021.
- [33] 张伟. 南四湖主要入湖河流水质分析与评价研究[D]. 济南: 济南大学, 2011. (ZHANG W. Analysis and evaluation on water quality for main inflow river of Nansihu Lake[D]. Jinan: Jinan University, 2011. (in Chinese))