

DOI: 10.5846/stxb201905060911

池仕运, 赵先富, 高少波, 张爱静, 胡俊, 李嗣新, 胡菊香, 董方勇. 丹江口水库秋季底栖动物群落状态和空间分布及其与环境因子的关系. 生态学报, 2021, 41(3): 1229-1241.

Chi S Y, Zhao X F, Gao S B, Zhang A J, Hu J, Li S X, Hu J X, Dong F Y. The spatial distribution pattern of autumn macroinvertebrates in relation to environmental factors in Danjiangkou Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1229-1241.

丹江口水库秋季底栖动物群落状态和空间分布及其与环境因子的关系

池仕运¹, 赵先富¹, 高少波¹, 张爱静², 胡俊¹, 李嗣新¹, 胡菊香¹, 董方勇^{1,*}

1 水利部中国科学研究院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079

2 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038

摘要:为探讨丹江口水库底栖动物群落状态和空间分布及其与环境因子之间的关系,于2013年秋季(11月)对丹江口水库底栖动物进行了详细调查,共检出底栖动物35种,常见种为霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓,优势种为霍甫水丝蚓和正颤蚓。调查结果表明,丹江口水库底栖动物群落结构存在空间差异,现存量处于较高水平,未见明显衰退现象。就底栖动物群落状态(IICS)而言,汉江库区要好于丹江库区,库峡要稍好于库区和库湾。为揭示主要物种的环境偏好以及对底栖动物分布具有重要影响的环境因子,采用协惯量分析(Co-inertia Analysis, CIA)和典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)。CCA的分析结果表明,水温、浊度、电导率、溶解氧、叶绿素a、镉、总氮、铜、高锰酸盐指数和硼对物种分布具有重要的影响。偏最小二乘法(Partial Least Square, PLS)的分析结果表明,pH、电导率、总氮、硼、铜、镉和钒能很好地预测IICS分值,是底栖动物群落发展的制约因素。结合CCA和PLS分析结果来看,对底栖动物具有重要影响的环境因子主要为电导率、总氮、硼、铜和镉。

关键词:底栖动物;空间分布格局;群落状态指数IICS;协惯量分析;典范对应分析;偏最小二乘法

The spatial distribution pattern of autumn macroinvertebrates in relation to environmental factors in Danjiangkou Reservoir

CHI Shiyun¹, ZHAO Xianfu¹, GAO Shaobo¹, ZHANG Aijing², HU Jun¹, LI Sixin¹, HU Juxiang¹, DONG Fangyong^{1,*}

1 Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China

2 Construction and Administration Bureau of South-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China

Abstract: To explore the community status, the spatial distribution pattern, and the relation to environmental factors, a detailed investigation of macroinvertebrates in Danjiangkou Reservoir was carried out in the autumn (November) of 2013. In this study, a total of 35 species were identified, thereinto, *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Branchiura sowerbyi* were the common species, while *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Tubifex tubifex* were the dominant. The macroinvertebrates had significant spatial differences in community, and their standing crops were at a high level, without obvious decline. In terms of the status of macroinvertebrate community (IICS, the integral index of the community state), the Hanjiang region was better than the Danjiang region, and the Kuxia was better than the Kuzhong and Kuwan. The co-inertia analysis (CIA) and canonical correspondence analysis (CCA) were applied to reveal the environmental preferences of the main species and the

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405303);典型大城市水库水源地水环境质量评估(KFJ-SW-YW036);国家自然科学基金项目(51409178);江西省水利厅重点科研项目(KT201624)

收稿日期:2019-05-06; 网络出版日期:2020-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dfy1008@sina.com

important environmental factors that affecting the species spatial distribution. The results of CCA analysis showed that water temperature, turbidity, conductivity, dissolved oxygen, chlorophyll a, antimony, total nitrogen, molybdenum, permanganate index, and boron had significant effects on species distribution. The results of partial least-square (PLS) showed that pH, conductivity, total nitrogen, boron, molybdenum, antimony, barium, and vanadium could well predict the IICS, being the limiting factors for the community development. Combining CCA with PLS, conductivity, total nitrogen, boron, molybdenum and antimony were the main environmental factors with important effects on macroinvertebrate communities.

Key Words: macroinvertebrates; spatial pattern; integral index of the community state; co-inertia analysis; canonical correspondence analysis; partial least-square

丹江口水库是南水北调中线工程的水源地,其生态环境质量直接关系到华北地区的用水安全,因此库区生态状况一直受到国内外专家学者的关注^[1]。关于丹江口水库水生生物的调查多集中于鱼类^[2-3]、浮游植物^[4-10]和浮游动物^[4, 9, 11-12],而底栖动物的相关研究报道相对偏少^[13-15]。底栖动物是水生态系统的重要组成部分,既是鱼类等经济动物的天然饵料,也是水域中有机碎屑的分解者,作为食物链的中间环节,其在生态系统的物质循环和能量流动过程中起到承上启下的作用^[16]。此外,底栖动物对环境变化敏感,迁移能力差,只能被动地耐受和适应环境的变化,其生活史较长的特性可有效地反映出水体长期的营养状态或污染程度,因此多被应用于水环境监测以及生态系统的健康评价^[13]。

1959年,中国科学院水生生物研究所对即将淹没库区的水生生物进行过系统调查,基于当时条件的限制,关于底栖动物的相关调查较为不充分^[17]。20世纪90年代,基于发展水库渔业的目标,水利部中国科学院水库渔业研究所对丹江口水库的饵料生物资源进行了调查^[15]。为满足南水北调工程庞大调水量的需要,丹江口水库于2012年开始加高加固从而扩大库容量,并于2014年12月2日正式向沿线城市和京津地区调水。至此,一些过去的库区岸线陆续被淹没,水库面积相应大幅增加,汉江库区回水长度由177 km增加到193.6 km,丹江库区由80 km增加到93.5 km,水库调节性能也由初期的完全年调节变为不完全多年调节^[1]。虽然2007—2008年张敏等对丹江口水库底栖动物的分布格局和季节动态进行了研究,并对库区水质进行了水质生物学评价^[13],但其设置站位较少,未覆盖库湾和主要入湖库汉以及新淹没库区,其数据已不能满足当前需要。此外,关于丹江口水库底栖动物群落结构和状态与相关环境因子关系的研究报道也较为匮乏。为全面系统了解丹江口水库正常蓄水位大幅提升前的水生态环境,作者于2013年秋季(11月)在丹江口水库结合常规水质理化监测站位共设置42个站位,涵盖库湾、库峡和库中,对丹江口水库底栖动物和水环境进行了系统调查。本研究探讨了丹江口水库底栖动物的空间分布格局,评估了不同区域底栖动物的群落状态,并采用多元统计手段揭示了底栖动物与水质理化相关的环境因子间的关系,以期对南水北调中线工程水源地的水质安全和水生态系统健康维护提供必要的基础资料以及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

丹江口水库(32°36′—33°48′N, 110°59′—111°49′E)位于汉江中上游,水域横跨鄂、豫两省,是亚洲第一大人工淡水湖和南水北调中线工程水源地。水库于1973年建成,成“V”字形,由汉江库区和丹江库区组成,水面最宽达20 km,最窄不足300 m,最大水深达80 m。多年平均入库水量为394.8亿m³,2012年丹江口大坝加高后,水库正常蓄水位从157 m提高至170 m,水域面积由700 km²扩展至1022.75 km²,蓄水量由174.5亿m³增加至290.5亿m³。水质连续25年稳定在国家二类以上标准,水质保持优良。2014年秋向南水北调中线工程沿线地区和城市提供生活和生产用水。水库具有防洪、发电、灌溉、航运、养殖、旅游等综合效益^[13, 15, 18]。库区为北亚热带大陆性季风气候,具有显著的过渡性气候特征。年平均气温15—16℃,极端最高温度

42.6℃,极端最低温度-13.2℃,最冷月平均气温 2.4℃,最热月平均气温 28.4℃,年无霜期 230—250 天,年平均降雨量 800—1000 mm,但自然降水时间分布不均,主要集中在 7—9 月^[1, 8]。

1.2 站位设置与样品采集

依据丹江口水库的形态特征并结合常规水质监测断面,共设置 42 个站位(图 1),其中汉江库区设置 27 个站位(库峡 6 个站位、库中 12 个站位、库湾 9 个站位),丹江库区设置 15 个站位(库峡 1 个站位、库中 9 个站位、库湾 5 个站位),具体站位信息见表 1。采样采用改良彼得孙挖泥器(面积 1/16 m²),每个站位采集 2—4 个重复样,合并成一个大样进行分析。样品采集后经 60 目(425 μm)筛绢布筛选干净放入 500 mL 的塑料瓶中加入 10%的福尔马林固定保存,室内在解剖盘中进行分拣,置入 100 mL 的塑料标本瓶中长期保存。标本鉴定后计数,称重,按采样面积折算成密度(个/m²)和生物量(湿重 g/m²)。采样方法按照水库渔业资源调查规范(SL167—96)进行。底栖动物摇蚊类鉴定到属,寡毛类鉴定到种或属,同步用便携式 YSI 水质分析仪测定水温、pH、电导率、溶解氧、浊度和叶绿素 a,用塞氏透明度盘测定水体透明度,采集水样并带回实验室测定水体中总磷、总氮水平和硼、钛、镍、钼、锑、钡、钒等金属离子含量。

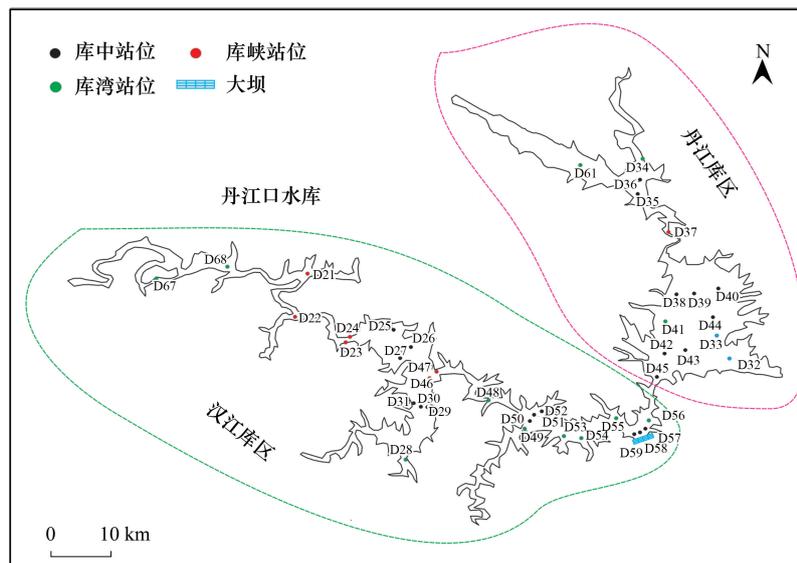


图 1 丹江口水库采样站位分布图

Fig.1 The sampling sites in Danjiangkou Reservoir

表 1 丹江口水库采样站位具体信息表

Table 1 The information of sampling sites in Danjiangkou Reservoir

库区 Reservoir area	站位编码 Site code	站位位置说明 Site location	经纬度 Longitude and latitude		
汉江库区	库峡	D21	龙门	32°47'56.12"N 110°59'26.35"E	
		D22	泗河	32°44'22.66"N 110°59'19.98"E	
		D23	莫家河	32°42'13.87"N 111°03'39.31"E	
		D24	莫家河	32°42'18.38"N 111°03'40.50"E	
		D46	龙口	32°39'24.26"N 111°11'58.95"E	
		D47	龙口	32°39'23.27"N 111°12'18.75"E	
	库中	D25	刁家店	32°43'07.94"N 111°07'51.62"E	
		D26	汉 I	32°42'25.70"N 111°07'55.85"E	
		D27	肖川	32°41'14.00"N 111°08'12.32"E	
		D29	汉 II	32°36'19.21"N 111°10'53.33"E	

续表

库区 Reservoir area	站位编码 Site code	站位位置说明 Site location	经纬度 Longitude and latitude	
	D30	汉 II	32°36'25.98"N 111°10'48.33"E	
	D31	汉 II	32°36'24.48"N 111°10'07.82"E	
	D50	浪河口	32°34'57.36"N 111°19'38.53"E	
	D51	浪河口下	32°35'31.72"N 111°20'16.60"E	
	D52	浪河口下	32°35'46.69"N 111°20'10.39"E	
	D57	坝上	32°33'36.39"N 111°29'43.85"E	
	D58	坝上	32°33'32.52"N 111°29'32.86"E	
	D59	坝上	32°33'29.34"N 111°29'21.88"E	
库湾	D28	草店库湾	32°30'39.41"N 111°08'56.65"E	
	D48	土台乡库湾	32°36'41.45"N 111°16'31.85"E	
	D49	浪河口库湾	32°34'08.77"N 111°19'13.15"E	
	D53	牛河库湾	32°33'24.65"N 111°23'09.91"E	
	D54	三官殿库湾	32°32'52.11"N 111°24'57.57"E	
	D55	凉水河库湾	32°35'10.84"N 111°27'48.80"E	
	D56	羊山库湾	32°34'17.79"N 111°30'25.54"E	
	D67	柳陂库湾	32°47'34.88"N 110°45'54.66"E	
	D68	神定河库湾	32°48'09.40"N 110°53'43.52"E	
丹江库区	库峡	D37	白渡滩	32°51'39.83"N 111°33'08.66"E
	库中	D35	丹 I	32°56'07.47"N 111°28'56.66"E
		D36	丹 II	32°56'23.45"N 111°29'16.08"E
		D38	太平洋 2	32°47'03.36"N 111°33'13.44"E
		D39	太平洋 2	32°46'47.67"N 111°34'30.81"E
		D40	太平洋 2	32°46'10.67"N 111°36'45.56"E
		D42	太平洋 1	32°42'46.27"N 111°31'44.97"E
		D43	太平洋 1	32°43'04.14"N 111°32'48.01"E
		D44	太平洋 1	32°43'53.92"N 111°36'25.24"E
		D45	台子山	32°38'30.19"N 111°31'20.94"E
	库湾	D32	九重镇库湾	32°40'55.07"N 111°36'48.64"E
		D33	香花库湾	32°42'56.06"N 111°37'21.76"E
		D34	马蹬库湾	32°57'03.22"N 111°29'54.12"E
		D41	仓房镇库湾	32°44'49.59"N 111°31'21.46"E
		D61	老城镇库湾	32°57'29.10"N 111°26'01.19"E

1.3 数据处理与分析

本文采用多响应置换过程 (Multi-Response Permutation Procedures, MRPP) 来检验底栖动物群落的空间差异。MRPP 分析过程中采用 Bray-Curtis 相似性系数进行测度。协惯量分析 (Co-inertia Analysis, CIA) 是基于协方差矩阵, 找出物种空间和环境空间存在的协同结构, 并将物种变量和环境变量投影到同一空间 (有时称为协惯量平面) 的一种多元统计方法^[19-20]。典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 是基于对应分析 (Correspondence Analysis, CA) 一种直接梯度分析方法, 可以将物种数据与环境数据一起进行强制排序, 从而在空间上反映生物群落与环境因子的关系^[21]。采用 CIA 和 CCA 分析来探讨底栖动物物种和环境因子之间的关系, 并筛选对底栖动物群落结构影响较为显著的影响因子。多元统计分析过程中用到的物种数据取自定量数据 (物种个体数转换成密度)。

采用群落状态指数 IICS (Integral Index of the Community State) 来评估丹江口水库底栖动物群落结构状态。该指数基于四个指标来对底栖动物群落结构的整体状态进行评估, 分别为底栖动物的密度 R_N

(ind./m²)、生物量 R_B (g/m²)、单站物种数 R_S (S) 和 Shannon-Wiener 指数 R_H 。该指数基于秩排序计算综合得分, $IICS = (\sum_1^k P_i R_i) / \sum_1^k P_i$, 式中, R_i 为第 i 指标的秩得分(秩 1 对应单个指标的最大值), P_i 为第 i 指标的权重。本研究中 $IICS = (R_N + 2R_B + R_S + R_H) / 5$ 。底栖动物的现存量和多样性越高, 表明底栖动物群落状态越好, $IICS$ 分值越低, 反之, $IICS$ 分值越高^[22]。采用偏最小二乘法(PLS)构建模型来判断各环境因子对 $IICS$ 分值的影响程度, 变量权重因子大于 0.20 表明其对 $IICS$ 分值有重要影响, 是很好的预测变量^[23]。

本文中 Mann-Whitney 检验、Kruskal-Wallis 检验和 PLS 分析均采用 SPSS V20.0 软件进行。MRPP 分析采用多元统计分析软件 PC-ORD V6.22 进行, CIA 和 CCA 分析则采用多元统计分析软件 Canoco V5.0 进行。

2 结果与分析

2.1 水环境特征

丹江口水库各项水环境指标见表 2。由表 2 可见, 采样站位汉江库区平均水深要大于丹江库区, 而不同区域中各站位平均水深为库中>库峡>库湾。采样站位的水温变幅较大, 在 16.3—22.9℃ 之间波动, pH 在 7—9 之间波动, 整体偏弱碱性。电导率丹江库区要高于汉江库区, 库湾要高于库峡和库中。汉江库区和丹江库区透明度均值高于 200 cm, 其中丹江库区透明度均值在 250 cm 以上, 最高达 480 cm。溶解氧除汉江库区部分站位稍低外, 其余站位溶氧水平均达 7.0 mg/L, 最高可达 10.12 mg/L。高锰酸盐指数除丹江库区部分站位超过地表水 II 类限值外, 其余大部分站位数值均在 II 类限值(4.0 mg/L) 以内。就总磷含量而言, 绝大部分站位总磷含量均在地表水 III 类限值(0.05 mg/L) 以内。总氮除丹江库区部分站位处于劣 V 类外, 绝大部分站位不超过地表水 IV 类限值(1.5 mg/L)。就金属离子含量而言, 丹江库区要明显高于汉江库区。

表 2 丹江口水库水环境指标

Table 2 The feature characteristics of waterbody in Danjiangkou Reservoir

参数 Parameters	库区 Reservoir region				
	汉江库区	丹江库区	库峡	库中	库湾
水深 Water depth/m	24.1(4.3—41.8)	17.5(2.5—32.9)	18.5(10.6—30.6)	24.4(2.5—41.8)	16.2(4.3—28.0)
水温 Water temperature/℃	22.3(16.3—22.9)	21.7(17.4—22.9)	22.3(21.6—22.7)	22.6(18.3—22.9)	21.3(16.3—22.9)
pH	8.2(8—8.4)	8.2(7.8—8.4)	8.2(8—8.3)	8.2(8—8.4)	8.2(7.8—8.4)
电导率 Conductivity/(μS/cm)	276.2(254—460)	356.9(297—536)	290.7(275—354)	295.5(261—505)	322.2(254—536)
浊度 Turbidity(NTU)/(mg/L)	1.99(0.10—7.40)	2.39(0—21.90)	3.94(1.6—7.40)	0.97(0—3.80)	2.87(0—21.90)
叶绿素 a Chlorophyll a/(μg/L)	2.77(0.80—10)	3.27(0.60—11.70)	1.31(0.80—2.40)	2.84(0.60—11.70)	3.91(0.80—11.70)
透明度 Transparency/(cm)	208.5(100—400)	257.1(40—480)	142.9(100—200)	266(100—480)	207.9(40—320)
溶解氧 Dissolved oxygen/(mg/L)	7.52(5.64—9.76)	8.09(7.36—10.12)	8.04(7.34—8.66)	7.7(6.7—10.12)	7.56(5.64—9.76)
高锰酸盐指数 Permanganate index/(mg/L)	2.29(1.77—3.95)	2.42(1.28—4.17)	2.21(1.77—2.64)	2.24(1.91—3.6)	2.53(1.28—4.17)
总磷 Total phosphorus/(mg/L)	0.0282(0.015—0.048)	0.0249(0.013—0.072)	0.032(0.015—0.048)	0.023(0.013—0.04)	0.03(0.013—0.072)
总氮 Total nitrogen/(mg/L)	1.178(0.53—1.573)	1.403(0.81—2.33)	1.309(1.15—1.573)	1.241(1.07—1.62)	1.248(0.53—2.33)
硼 Boron/(μg/L)	9.4(8.4—13)	12.7(10.6—20.5)	10.5(9.3—12.8)	10.4(8.4—18.3)	10.8(8.4—20.5)
钛 Titanium/(μg/L)	1(0.5—2.8)	1.3(0.7—2.4)	0.8(0.5—1.2)	1.2(0.6—2.4)	1.3(0.5—2.8)
镍 Nickel/(μg/L)	5.8(3.5—11.4)	7.4(5—10.4)	4.6(3.5—7.2)	6.1(3.8—10.4)	7.6(4.2—11.4)
钼 Molybdenum/(μg/L)	3.5(1.6—4)	7.4(3.7—17.7)	4.1(3—7.9)	5(3.5—12.3)	5(1.6—17.7)
锑 Antimony/(μg/L)	1.1(0.2—1.5)	2.7(1.5—6)	1.1(0.5—2.9)	1.8(1.2—4.1)	1.7(0.2—6)
钡 Barium/(μg/L)	48.2(39.5—65.1)	75.3(60.6—147.4)	49.5(42.7—72.8)	55.7(39.5—79.1)	63.8(45.6—147.4)
钒 Vanadium/(μg/L)	2.2(1.2—2.5)	2.6(1.3—2.9)	2.3(2.1—2.7)	2.4(2.1—2.8)	2.2(1.2—2.9)

括号内为数值变化范围, 即最小值至最大值

2.2 群落结构组成的空间分布

本次调查共检出底栖动物 35 种, 其中水生昆虫 19 种, 软体动物 8 种, 寡毛类 6 种, 甲壳动物 1 种, 其他

1 种(表 3)。水生昆虫密度占比 1.70%,软体动物密度占比 0.13%,甲壳动物密度占比 0.02%,寡毛类密度占比高达 98.14%。常见种为霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri* (出现率 80.49%) 和苏氏尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi* (78.05%)。优势种为霍甫水丝蚓和正颤蚓 *Tubifex tubifex*,密度占比分别为 64.10%和 30.31%。汉江库区和丹江库区优势种均为霍甫水丝蚓和正颤蚓。密度贡献比上,霍甫水丝蚓在汉江库区占比 60.08%,在丹江库区占比 86.49%,而正颤蚓在汉江库区和丹江库区密度占比分别为 33.98%和 9.82%。库峡出现的优势种为霍甫水丝蚓,密度占比高达 82.38%;库中优势种为霍甫水丝蚓和正颤蚓,密度占比分别为 72.68%和 23.17%;库湾的优势种分别为正颤蚓和霍甫水丝蚓,密度占比分别为 62.19%和 32.69%,经 MRPP 检验,汉江库区和丹江库区底栖动物群落结构组成差异显著($P < 0.05$),库峡和库中底栖动物群落结构差异显著($P < 0.05$),但与库湾差异未达显著水平($P > 0.05$),库中与库湾群落结构组成相似度较高,经 MRPP 检验差异不显著($P > 0.05$)(表 4)。

表 3 丹江口水库底栖动物名录
Table 3 The list of macroinvertebrates in Danjiangkou Reservoir

类群 Groups	物种 Species name	汉江库区			丹江库区		
		库峡	库中	库湾	库峡	库中	库湾
水生昆虫	蜉蝣 Ephemeraeidae sp.	+					
Aquatic insects	螳 Coenagrionidae sp.			+			
	蜻 Libellulidae sp.			+			+
	大蜓 Corulegastridae sp.						+
	螻 Ceratopogonidae sp.	+	+				
	幽蚊 Chaoboridae sp.	+					
	摇蚊 Chironomus sp.		+	+		+	+
	菱跗摇蚊 Clinotanypus sp.	+		+			+
	隐摇蚊 Cryptochironomus sp.	+					
	内摇蚊 Endochironomus sp.			+			
	二叉摇蚊 Dicrotendipes sp.			+			
	小摇蚊 Microchironomus sp.		+				
	多足摇蚊 Polypedilum sp.	+		+			
	前突摇蚊 Procladius sp.	+	+	+	+		+
	流水长跗摇蚊 Rheotanytarsus sp.			+		+	
	齿斑摇蚊 Stictochironomus sp.	+					
	长跗摇蚊 Tanytarsus sp.			+			
	斑特突摇蚊 Thienemanimyia sp.			+			
	摇蚊蛹 Chironomiae Pupa	+					
软体动物	梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>			+		+	
Molluscs	赤豆螺 <i>Bithynia fuchsiana</i>			+			
	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	+	+				
	凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>			+			
	淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i>			+			
	纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>			+			
	椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>			+			
	园顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i>	+		+			
寡毛类	日本管水蚓 <i>Aulodrilus japonicus</i>						+
Oligochaetes	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	+	+	+	+
	巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>	+	+	+			
	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	+	+	+	+	+
	正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	+	+	+		+	
	头鳃虫 <i>Branchiodrilus</i> sp.						+
甲壳动物	长臂虾科 Palaemonidae sp.			+			+
线虫	线虫 Nematoda	+					

表中“+”表示物种出现在该区域

表 4 丹江口水库不同区域底栖动物群落结构差异 MRPP 检验

Table 4 The results of MRPP tests on macroinvertebrates in different areas in Danjiangkou Reservoir

群组 Pair groups	检验统计量 Test statistic	一致性统计量 Agreement statistic	<i>P</i>
汉江库区 vs. 丹江库区	-2.866	0.024	0.0182
库峡 vs. 库中	-2.361	0.034	0.0311
库峡 vs. 库湾	-1.562	0.021	0.0774
库中 vs. 库湾	-0.700	0.008	0.1921

MRPP: 多响应置换过程 Multi-response permutation procedures

2.3 现存量和物种多样性的空间分布

汉江库区和丹江库区底栖动物密度和生物量见表 5。汉江库区密度和生物量差异均极为显著(Mann-Whitney 检验,密度: $Z=-2.709, P<0.01$; 生物量: $Z=-3.382, P<0.01$)。不同区域底栖动物平均密度为库中>库湾>库峡,平均生物量为库峡>库湾>库中,但经 Kruskal-Wallis 检验差异均不显著($P>0.05$)。就单站物种数而言,汉江库区显著高于丹江库区(Mann-Whitney 检验, $P<0.05$)。就香依威纳指数,汉江库区和丹江库区差异不显著($P>0.05$)。不同区域的平均单站物种数和平均香依威纳指数均是库峡>库湾>库中,经 Kruskal-Wallis 检验单站物种数差异显著($P<0.05$),而香依威纳指数不显著($P>0.05$)。

表 5 丹江口底栖动物现存量和多样性

Table 5 The standing crops and diversity indices of macroinvertebrate in Danjiangkou Reservoir

区域 Region	密度/(个/m ²) Density	生物量/(g/m ²) Biomass	香依威纳指数 Shannon-Wiener index	单站物种数/个 Species number per site
汉江库区	3642.5(72—18464)	11.35(0.02—62.49)	0.71(0—1.83)	4.0(1—10)
丹江库区	1245.9(11.1—9896)	2.68(0.01—25.73)	0.6(0.18—1.10)	2.8(2—4)
库峡	1982.5(40—10560)	11.97(0.02—54.58)	0.92(0.30—1.66)	4.9(3—7)
库中	3642.8(80—18464)	6.81(0.06—31.88)	0.48(0—1.18)	2.9(1—7)
库湾	2075.6(11.1—17208)	8.87(0.01—62.49)	0.83(0.07—1.83)	4.1(2—10)

括号内为数值变化范围,即最小值至最大值

2.4 底栖动物与环境因子关系分析

进行 CIA 分析前,先对物种数据进行 DCA 分析从而获取物种得分,然后对环境数据进行 PCA 分析进而获取环境得分。将物种变量和环境变量投影到同一空间的 CIA 分析结果表明,排序轴 1 和排序轴 2 一共解释了 84.96%的物种-环境数据变异,其中第一轴解释了 55.51%的数据变异。在丹江口水库中,霍甫水丝蚓和正颤蚓和透明度呈较强的正相关关系,而与 pH、总磷、浊度和溶氧呈现较强的负相关关系,而菱跗摇蚊、幽蚊、前突摇蚊、河蚬和巨毛水丝蚓则正好相反,与此同时,摇蚊属摇蚊则与叶绿素 a、高锰酸盐指数、电导率、硼呈现较强的正相关关系,而与钒、水温和总氮则呈现较强的负相关关系(图 2A)。

进行 CCA 分析时,鉴于环境因子较多,利用前置选择(Forward Selection)筛选出较为重要的环境因子。在分析过程中,蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo permutation test)结果表明 CCA 第一排序轴和所有排序轴的典范系数反映的回归系数均具有显著性($P<0.05$),表明排序结果良好。前置选择结果表明有 10 个环境因子对水库底栖动物群落结构有重要的影响,在剔除 7 个不重要的环境因子后,虽然第一和第二排序轴的物种数据累计解释率有所下降,但物种环境数据相关性仍然很高,且物种-环境数据累计解释率由 45.41%上升到 51.07%(表 6)。在 CCA 排序图中,箭头表示环境因子,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与研究对象分布相关程度的大小,连线越长,代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大。箭头连线与排序轴的夹角代表环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高。这 10 个对底栖动物群落结构有重要影响的环境因子分别为水温、浊度、电导率、溶解氧、叶绿素 a、镉、总氮、钼、高锰酸盐指数和硼(表 7 和图 2B)。

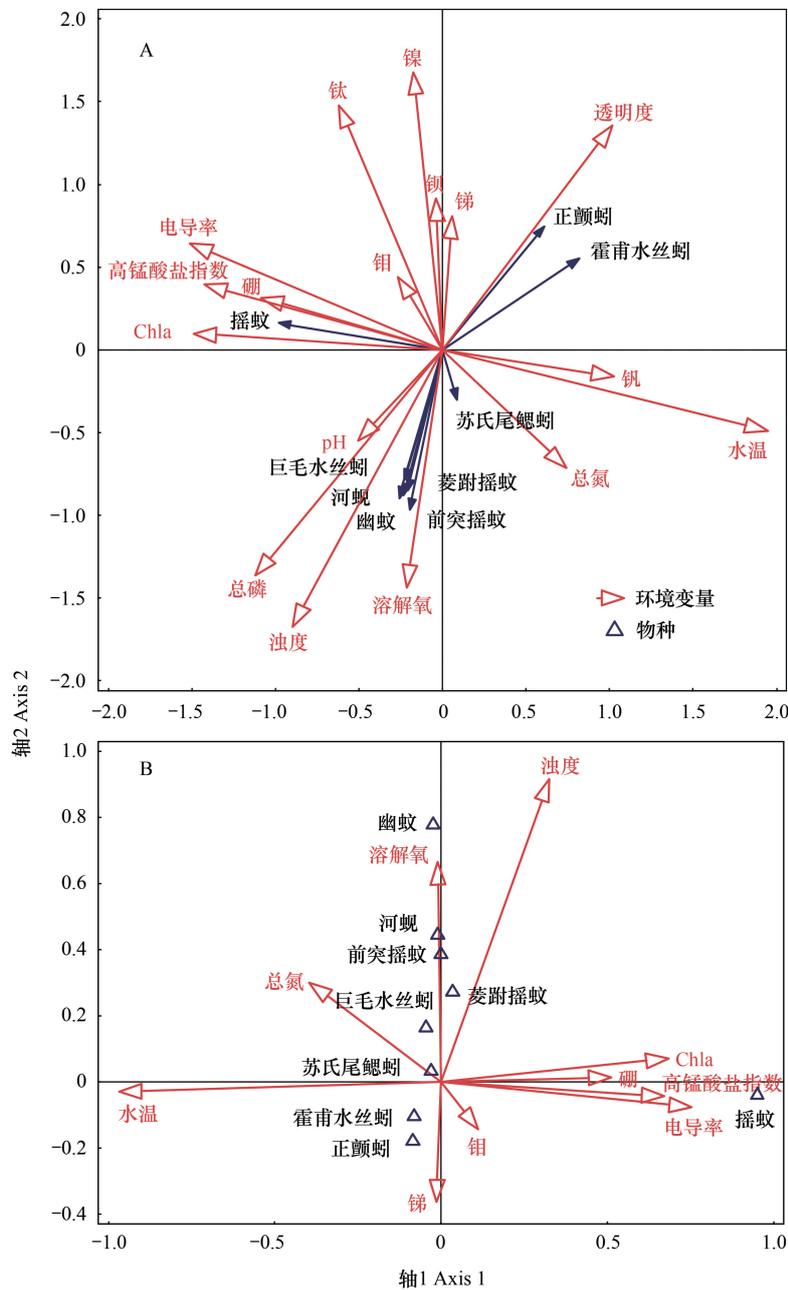


图 2 物种-环境空间排序图

Fig.2 Ordination plots of species-environment

表 6 CCA 分析中前两排序轴对数据的累计解释率及典范对应相关性

Table 6 The cumulated explanation of the first two axes and the canonical correspondence correlation in the CCA analysis

项目 Items	17 个环境因子 17 environment factors		入选的 10 个环境因子 10 selected environment factors	
	排序轴 1 Axis 1	排序轴 2 Axis 2	排序轴 1 Axis 1	排序轴 2 Axis 2
物种数据累计解释率/% Explained variation (cumulative)	20.11	32.04	19.72	30.94
物种-环境数据相关性 Pseudo-canonical correlation	0.973	0.937	0.968	0.905
物种-环境数据累计解释率/% Explained fitted variation (cumulative)	28.5	45.41	32.55	51.07

CCA: 典范对应分析 Canonical correspondence analysis

表 7 入选环境因子解释的重要性和显著性检验结果

Table 7 The importance of selected environmental factors and results of signification tests

环境因子 Environment factors	重要性排序 Importance weight	解释率 Explains/%	贡献率 Contribution/%	pseudo- <i>F</i>	<i>P</i>
水温 Water temperature	1	18.7	26.5	9.0	0.002
浊度 Turbidity	2	10.7	15.1	5.7	0.002
电导率 Conductivity	3	4.6	6.6	2.8	0.004
溶解氧 Dissolved oxygen	4	4.6	6.5	2.9	0.014
叶绿素 a Chlorophyll a	5	4.4	6.3	2.5	0.004
锑 Antimony	6	4.2	5.9	2.8	0.016
总氮 Total nitrogen	7	3.7	5.2	2.7	0.008
钼 Molybdenum	8	3.6	5.1	2.1	0.044
高锰酸盐指数 Permanganate index	9	3.4	4.8	2.4	0.012
硼 Boron	10	2.7	3.9	2.1	0.026

就底栖动物群落状态指数 (IICS) 分值而言,汉江库区要显著低于丹江库区 (Mann-Whitney 检验, $Z = -3.836, P < 0.01$) (图 3)。就不同区域而言,库峡 IICS 分值要稍低于库中和库湾,但区域差异不显著 (Kruskal-Wallis 检验, $P > 0.05$) (图 3)。PLS 分析结果表明,潜在因子 1 解释的方差最大 (表 8), 是很好的预测因子。考察各变量在潜在因子 1 中的权重 (表 9) 发现, pH、电导率、总氮、硼、钼、锑、钡和钒均对 IICS 分值有重要影响, 是很好的预测变量。与此同时, 这些环境因子权重系数均为正值, 表明这些变量对 IICS 分值的增加有促进作用, 也即对底栖动物群落状态具有较强的抑制作用。

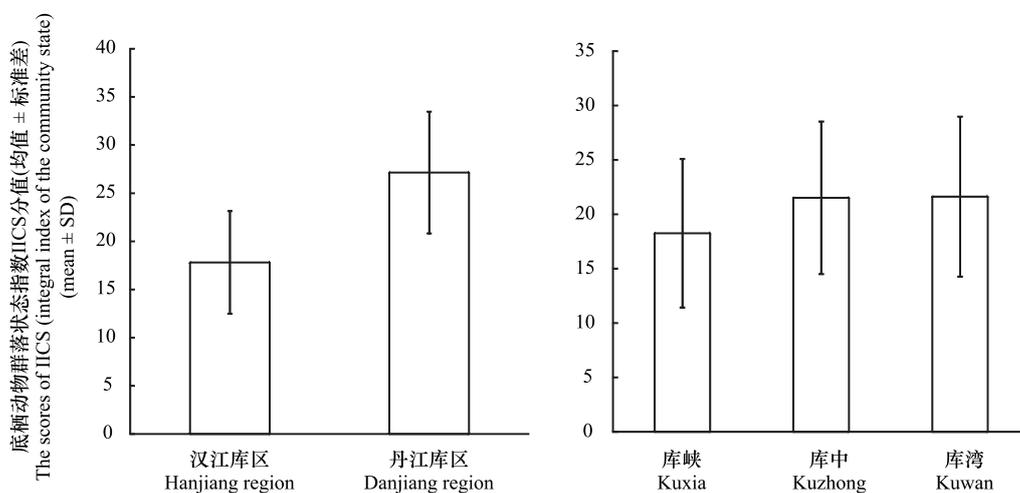


图 3 丹江口水库不同区域 IICS 分值比较

Fig.3 The IICS values of different areas in Danjiangkou Reservoir

表 8 PLS 模型中潜在因子解释的方差比例

Table 8 The explained proportions of variance from the latent factors in the PLS model

潜在因子 Latent factors	R_X^2	R_Y^2	调整后的 R^2 Adjusted R^2
1	0.417	0.439	0.414
2	0.082	0.226	0.635
3	0.219	0.045	0.669
4	0.062	0.032	0.691
5	0.023	0.052	0.740

PLS: 最小二乘法 Partial least square; R_X^2 为模型中自变量解释的方差比例, R_Y^2 为模型中因变量解释的方差比例

表 9 PLS 模型中各变量在潜在因子的权重

Table 9 The weights of different variable in the latent factors from the PLS model

变量 Variables	潜在因子 Latent factors				
	1	2	3	4	5
水温 Water temperature	-0.033	0.197	0.312	-0.128	-0.427
水深 Water depth	-0.137	-0.083	0.086	-0.262	0.121
pH	0.247	0.093	-0.311	-0.38	-0.403
电导率 Conductivity	0.361	0.08	0.032	0.114	0.192
浊度 Turbidity	-0.178	-0.311	-0.793	-0.379	-0.386
叶绿素 a Chlorophyll a	-0.156	-0.300	-0.570	-0.007	0.017
透明度 Transparency	0.115	-0.043	0.323	0.111	0.382
溶解氧 Dissolved oxygen	0.146	0.036	-0.364	-0.040	0.258
高锰酸盐指数 Permanganate index	0.022	0.021	0.062	0.526	-0.129
总磷 Total phosphorus	-0.149	0.004	-0.177	0.463	0.756
总氮 Total nitrogen	0.309	-8.89×10 ⁻⁶	0.023	0.090	-0.086
硼 Boron	0.318	-0.094	-0.185	-0.094	-0.169
钛 Titanium	0.101	-0.195	0.018	0.047	0.116
镍 Nickel	-0.052	-0.790	-0.578	-0.300	-0.427
钼 Molybdenum	0.371	0.097	0.092	0.098	0.121
锑 Antimony	0.388	0.207	0.317	0.329	0.422
钡 Barium	0.248	-0.266	-0.153	0.058	0.214
钒 Vanadium	0.341	0.111	-0.084	-0.357	-0.419

权重绝对值大于 0.2, 表示该变量很重要

底栖动物群落状态指数 ICS 与电导率、溶解氧和总氮成正相关关系, 与金属离子如硼、钼、锑、钡和钒, 成正相关关系; 密度与 pH、电导率、叶绿素和高锰酸盐指数成正相关, 并达到显著水平 ($P < 0.05$), 与金属离子硼、钼和锑成正相关关系; 生物量与 pH、电导率、叶绿素呈正相关关系, 与金属离子硼和钼呈正相关关系; 香依威纳指数与金属离子锑显著负相关; 单站物种数与 pH 显著正相关, 而与金属离子镍呈现显著负相关关系 (表 10)。

表 10 丹江口水库底栖动物生物参数与各环境因子秩相关性分析结果

Table 10 The Spearman correlations between biological metrics and environmental factors in Danjiangkou Reservoir

参数 Parameters	密度 Density	生物量 Biomass	香依威纳指数 Shannon-Wiener index	单站物种数 Species number per site
水温 Water temperature	-0.065	-0.079	-0.052	-0.071
水深 Water depth	-0.197	-0.155	0.082	-0.242
pH	0.405 **	0.559 **	0.054	0.312 *
电导率 Conductivity	0.420 **	0.341 *	-0.156	-0.019
透明度 Transparency	-0.050	-0.161	-0.180	-0.225
溶解氧 Dissolved oxygen	0.238	0.244	0.093	0.177
浊度 Turbidity	-0.005	0.118	0.176	0.251
叶绿素 a Chlorophyll a	0.477 **	0.353 **	-0.276	-0.233
高锰酸盐指数 Permanganate index	0.322 *	0.253	-0.062	-0.029
总磷 Total phosphorus	0.009	-0.001	0.050	0.132
总氮 Total nitrogen	0.123	-0.079	-0.114	-0.124
硼 Boron	0.449 **	0.361 *	-0.103	0.092
钛 Titanium	-0.094	-0.084	-0.152	-0.218
镍 Nickel	0.068	-0.039	-0.288	-0.333 *
钼 Molybdenum	0.443 **	0.388 *	-0.229	-0.175
锑 Antimony	0.400 **	0.287	-0.321 *	-0.306
钡 Barium	0.230	0.076	-0.217	-0.285
钒 Vanadium	0.267	0.198	-0.070	-0.058

* 代表 P 值小于 0.05, ** 代表 P 值小于 0.01

3 讨论

3.1 底栖动物的时空变化

丹江口水库成库前的本底调查显示,库区底栖动物总体贫乏,河道中无大型底栖动物,仅在河床的适宜区段出现一些小型种类,分布最广的是摇蚊幼虫,存在少量的颤蚓科种类和线虫。坝前底栖动物密度为 400 个/m²,生物量为 0.106 g/m²[17]。水库蓄水后,1992—1993 年的调查结果显示,丹江口水库有底栖动物 35 种,常见种和优势种为苏氏尾鳃蚓、颤蚓、霍甫水丝蚓、河蚬、梨形环棱螺、方格短沟蜷、淡水壳菜、直突摇蚊和幽蚊等。底栖动物平均密度为 185 个/m²,平均生物量 162.6 g/m²,软体动物对密度和生物量的贡献比均很高。丹江库区的底栖动物数量和生物量分别为 257 个/m²和 274.4 g/m²,汉江库区分别为 104 个/m²和 24.3 g/m²[15]。2007—2008 年的调查结果显示,丹江口水库有底栖动物 61 种,主要由寡毛类和摇蚊类组成。寡毛类密度在全年中占优势地位,占底栖动物总密度的 90%以上。底栖动物密度汉江库区大于丹江库区,且坝前区域最高,单个站位的密度最高达 33792 个/m²[13]。本次调查检出底栖动物 35 种,寡毛类对密度的贡献比仍然很高,高达 98.14%,单个站位密度最高达 18464.0 个/m²,位于汉江库区浪河口,这与近期的调查资料较为一致[24]。结合历史调查资料分析,丹江口水库寡毛类自进入 21 世纪后对底栖动物整体密度的贡献比越来越高,但随着软体动物密度占比的急剧下降,底栖动物生物量相比上世纪 90 年代呈现明显下降趋势,且呈现出汉江库区底栖动物密度高于丹江库区的特点,与 1992—1993 年的调查结果正好相反。

研究表明正颤蚓和霍甫水丝蚓为广布种,能在各种营养状态的湖泊中出现,并成为优势种或指示种[25]。历史资料显示,在同为亚热带深水型水库的丹江口水库和千岛湖水库中,这两个物种均为底栖动物的优势种[13,25],其在千岛湖水库全年的重要值(Importance Value, IV)均在 20%以上[25]。本次调查结果显示,霍甫水丝蚓和正颤蚓在全库的密度贡献比分别为 64.10%和 30.31%,仍为现阶段丹江口水库底栖动物的优势种。基于水质监测、浮游植物组成以及生态系统健康指数(EHI)的评价结果均认为丹江库区的水环境要好于汉江库区[8-9,26]。本次调查表明,极为耐受污染和低氧环境的正颤蚓在汉江库区超过 30%,但在丹江库区不超过 10%,似乎也表明丹江库区的水生态状态要好于汉江库区。但水环境测定结果显示(表 2),丹江库区和库湾水域中一些环境因子具有较高的数值,如丹江库区的高锰酸盐指数、总氮以及金属离子含量要稍高于汉江库区,预示着近年来丹江库区的水环境似乎有逐步劣于汉江库区的趋势,在丹江口水库即将承担南水北调重任的背景下,主要的水环境胁迫因素主要存在于丹江库区和一些重要库湾,这值得水环境部门注意。

3.2 底栖动物的空间分布

有研究表明,水库过渡区和湖泊区底栖动物在组成上会呈现出根本性的不同[27],其主要决定因素为干扰强度以及沉积模式,不同区域出现的常见种也是由少部分适应这种环境的物种组成[28]。针对底栖动物空间分布差异性的检验结果表明,丹江口水库底栖动物的空间差异性较为明显,具体表现在丹江库区和汉江库区以及库峡和库中的群落组成存在显著差异性。这种生物群落的空间差异性也在浮游植物上有所体现,如 2009—2010 年的调查显示丹江库区和汉江库区的浮游植物群落组成存在空间差异性[8]。基于底栖动物和浮游植物群落的空间差异性可能是丹江库区和汉江库区在水生态状况上存在差异的直接体现。基于 IICS 的评价结果显示,汉江库区底栖动物群落状态要好于丹江库区,这表现在汉江库区的 IICS 分值要显著低于丹江库区,这与汉江库区底栖动物具有较高的现存量以及物种多样性有关。推测原因可能是丹江库区的沉积物中有机质含量相对汉江库区要贫瘠一些,进而导致丹江库区的底栖动物发展相对受限一些,具体表现在其 IICS 分值相对要高一些。就不同区域而言,库峡的底栖动物群落状态要稍好于库中和库湾,这可能与库峡段水面较为狭窄,两岸水土侵蚀带来的营养盐输入相对充沛,进而导致原有河床沉积更为充分有较大关系。

在水库生态系统中,溶氧和水深对底栖动物的分布起到至关重要的作用,伴随外来粗颗粒有机物的输入导致的初级生产力的提高以及较长分层期的发生会导致底层水体长期缺氧进而造成底栖动物种群的衰退[29]。本研究中底栖动物密度、生物量和 Shannon-Wiener 指数与溶氧和水深相关性均不强,表明溶氧和水深

在丹江口水库并不成为底栖动物空间分布的限制因子,如水深达 40m 以上的坝前区域(站位 D57、D58)底栖动物密度分别为 3296.0、5208.0 个/m²,表明这些区域底部水体不存在长期缺氧现象,较为耐受低氧环境的霍甫水丝蚓生存状态良好。一般而言,随着水库年龄的增加,沉积物的富集作用导致底栖动物局限于一些较为耐受水底短期缺氧的种类,随着沉积物的逐步增多,许多种类消失并且幸存下来的种类丰度也呈下降趋势^[30],丹江口水库虽然成库 40 余年,但底栖动物丰度一直处于较高水平,未见明显衰退迹象。

3.3 底栖动物与环境因子关系

CIA 分析结果显示在丹江口水库中,霍甫水丝蚓、正颤蚓和透明度呈较强的正相关关系,但与 pH、总磷、浊度和溶氧呈现较强的负相关关系。这表明在丹江口水库中藻类丰度和总磷含量较低,透明度较高的水域对这两个物种的生长繁殖最为有利,也就是说水质较好的库中区域霍甫水丝蚓和正颤蚓的丰度处于相对较高的水平,而这些区域多处于深水区(也即水库的湖泊区),水体底部的低氧环境十分适合霍甫水丝蚓和正颤蚓的大规模定殖,同时这些区域的细微颗粒下沉也为典型的收集者正颤蚓和霍甫水丝蚓提供了稳定的食物来源^[31]。菱跗摇蚊、幽蚊、前突摇蚊、河蚬和巨毛水丝蚓多出现于水库的河流区,该区段的特点是水体尚具缓流,透明度较低,营养物质浓度较高^[31]。CIA 揭示的物种-环境关系表明这些物种与 pH、总磷、浊度和溶氧呈现较强的正相关关系而与透明度具有较强的负相关关系,进一步证实了这些物种的环境偏好。摇蚊属摇蚊多现于库湾区域,该区域叶绿素 a 含量较高,高锰酸盐指数、电导率和硼含量均处于较高水平(表 2),CIA 分析表明该物种丰度与叶绿素 a、高锰酸盐指数、电导率、硼正相关,而与钒、水温和总氮呈负相关关系,较好地解释来了该物种的环境偏好。

CCA 分析结果表明 17 个环境因子均能较好的解释丹江口水库底栖动物物种的空间分布,但其中有 10 个环境因子对物种分别具有重要的影响,剔除 7 个不太重要的环境因子后,物种-环境数据累计解释率有所上升。这 10 个环境因子分别为水温、浊度、电导率、溶解氧、叶绿素 a、锑、总氮、钼、高锰酸盐指数和硼。PLS 的分析结果表明 pH、电导率、总氮、硼、钼、锑、钡和钒对 IICS 分值有重要影响,能很好地预测 IICS 分值,并且对 IICS 分值的增加有促进作用,表明这些环境因子是底栖动物群落发展的制约因素。结合 CCA 和 PLS 分析结果来看,在丹江口水库中,对底栖动物具有重要影响的环境因子主要为电导率、总氮、硼、钼和锑。在水库生态系统中,水质理化因子并不能完全解释底栖动物的数据变异,一些未测量的潜在环境因子以及生物因子也对底栖动物的分布和扩散有着较为重要的影响^[32]。本研究中 CCA 的分析结果也只是基于现有已测定的环境因子筛选出的对底栖动物有重要影响的因子。

在亚热带水库系统中,浮游植物和底栖动物现存量之间存在较低的相关性,这与水库中底栖动物大部分种群以碎屑为食物来源有较大关系^[33]。研究表明,食物质量和沉积物组成对寡毛类和摇蚊有重要影响,可直接导致这些类群随季节和水深的不连续分布^[29,34]。本研究中 pH、电导率、叶绿素 a 和高锰酸盐指数可表征水体中包含浮游藻类在内的有机质含量,这些参数与密度和现存量存在显著的正相关关系,表明丹江口水库中底栖动物的主要食物来源应为浮游植物残渣或其分解产生的碎屑。很多研究表明,水深、水温、溶解氧以及营养盐是底栖动物分布的主要预测因素,与底栖动物密度具有较强的关联性^[35-38]。本研究中这些参数与底栖动物的密度和现存量均无显著的相关性,表明丹江口水库底栖动物现存量不受上述环境因子的限制,与浮游生物等生物因子的关联性更强一些。有研究表明,水库中金属离子锰对羽摇蚊和霍甫水丝蚓的空间分布起决定性作用^[38]。本研究中,金属离子硼和钼可以促进底栖动物现存量的升高,锑对底栖动物群落的多样性不利,这表明水体中一些金属离子对底栖动物也具有较强烈的影响效应,不容忽视。

参考文献 (References):

- [1] 包洪福,孙志禹,陈凯麒. 南水北调中线工程对丹江口库区生物多样性的影响. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 14-19.
- [2] 袁凤霞,黄道明. 丹江口水库鱼类资源及组成分析. 水利渔业, 1989, (2): 35-36.
- [3] 伦峰,李峥,周本翔,王晨溪,李玉英. 丹江口水库(河南辖区)鱼类资源调查. 河南农业科学, 2016, 45(2): 150-155.
- [4] 杨广,杨干荣,刘金兰. 丹江口水库浮游生物资源调查. 湖北农学院学报, 1996, 16(1): 38-42.

- [5] 邬红娟, 彭建华, 韩德举, 简东, 邹清. 丹江口水库浮游植物及其演变. 湖泊科学, 1996, 8(1): 43-50.
- [6] 李玉英, 高宛莉, 李家峰, 文祯中, 刘慧, 胡兰群, 张乃群, 程序. 南水北调中线水源区浮游植物时空分布及其营养状态. 生态学杂志, 2008, 27(1): 14-22.
- [7] 申恒伦, 徐耀阳, 王岚, 张敏, 孔令惠, 蔡庆华. 丹江口水库浮游植物时空动态及影响因素. 植物科学学报, 2011, 29(6): 683-690.
- [8] 谭香, 夏小玲, 程晓莉, 张全发. 丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数. 环境科学, 2011, 32(10): 2875-2882.
- [9] 凡盼盼. 丹江口水库浮游生物群落结构与水质评价[D]. 南阳: 南阳师范学院, 2015.
- [10] 王英华. 丹江口水库浮游植物的时空格局[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2016.
- [11] 彭建华. 丹江口水库的浮游甲壳动物. 湖泊科学, 1995, 7(3): 240-248.
- [12] 孔令惠, 蔡庆华, 徐耀阳, 王岚, 张敏. 丹江口水库浮游轮虫群落季节变动特征及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, 22(6): 941-949.
- [13] 张敏, 邵美玲, 蔡庆华, 徐耀阳, 王岚, 孔令惠. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价. 湖泊科学, 2010, 22(2): 281-290.
- [14] 包洪福. 南水北调中线工程对丹江口库区生物多样性的影响分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [15] 韩德举, 彭建华, 简东, 邹清, 邬红娟. 丹江口水库的饵料生物资源及水体营养状态评价. 湖泊科学, 1997, 9(1): 57-62.
- [16] Devine J A, Vanni M J. Spatial and seasonal variation in nutrient excretion by benthic invertebrates in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 2002, 47(6): 1107-1121.
- [17] E. B. 波鲁茨基, 伍献文, 白国栋, 戈敏生, 王乾麟, 王士达, 陈受忠. 丹江口水库库区水生生物调查和渔业利用的意见. 水生生物学报, 1959, (1): 33-56.
- [18] 殷明, 施敏芳, 刘成付. 丹江口水库水质总氮超标成因初步分析及控制对策. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 35-36, 55-55.
- [19] Townsend C R, Scarsbrook M R, Dolédec S. Quantifying disturbance in streams: alternative measures of disturbance in relation to macroinvertebrate species traits and species richness. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, 16(3): 531-544.
- [20] Dolédec S, Chessel D. Co-inertia analysis: an alternative method for studying species-environment relationships. *Freshwater Biology*, 1994, 31(3): 277-294.
- [21] 胡俊, 龚成, 夏纬, 池仕运, 陈明秀, 李嗣新. 天鹅洲长江段浮游植物群落季节演替及环境因子研究. 海洋与湖沼, 2018, 49(1): 70-77.
- [22] Bakanov A I. Present-day state of zoobenthos in the upper volga reservoirs. *Water Resources*, 2003, 30(5): 559-568.
- [23] Malmqvist B, Hoffsten P O. Influence of drainage from old mine deposits on benthic macroinvertebrate communities in central Swedish streams. *Water Research*, 1999, 33(10): 2415-2423.
- [24] 王俊健. 丹江口水库浮游甲壳动物、浮游植物、大型底栖动物生物群落结构及与环境因子的相关性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [25] 胡忠军, 孙月娟, 刘其根, 何光喜, 陈来生, 曲宪成, 余员龙, 史文, 刘国栋. 浙江千岛湖深水区大型底栖动物时空变化格局. 湖泊科学, 2010, 22(2): 265-271.
- [26] 张红叶, 蔡庆华, 孔令惠, 徐耀阳, 张敏, 王岚. 丹江口水库生态系统健康综合评价. 应用与环境生物学报, 2012, 18(1): 86-92.
- [27] de Souza Beghelli F G, dos Santos A C A, Urso-Guimarães M V, do Carmo Calijuri M. Spatial and temporal heterogeneity in a subtropical reservoir and their effects over the benthic macroinvertebrate community. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2014, 26(3): 306-317.
- [28] White D S. The Benthic Macroinvertebrates of Kentucky Lake, a Mainstem Reservoir on the Tennessee River, U.S.A. *Transactions of the American Entomological Society*, 2014, 140(1): 83-99.
- [29] Real M, Prat N. Factors influencing the distribution of chironomids and oligochaetes in profundal areas of Spanish reservoirs. *Netherland Journal of Aquatic Ecology*, 1992, 26(2/4): 405-410.
- [30] Popp A, Hoagland K D. Changes in benthic community composition in response to reservoir aging. *Hydrobiologia*, 1995, 306(2): 159-171.
- [31] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- [32] Utete B, Zenda S, Mbuya W A, Tsamba J. Plankton and macroinvertebrate community composition in the pelagic and non-vegetated littoral drawdown zones of a shallow reservoir, Manjirenji, Zimbabwe. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2017, 15(1): 743-766.
- [33] McCullough J D, Jackson D W. Composition and productivity of the benthic macroinvertebrate community of a subtropical reservoir. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 1985, 70(2): 221-235.
- [34] O'Neill B J, Steffen J, Jakubauskas M. Effects of sedimentation on the profundal benthic macroinvertebrates of a great plains reservoir. *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 2014, 117(1/2): 61-68.
- [35] Pamplin P A Z, Rocha O. Temporal and bathymetric distribution of benthic macro-invertebrates in the Ponte Nova Reservoir, Tietê River (São Paulo, Brazil). *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2007, 19(4): 439-452.
- [36] Lv G J, Xiong B X, Liu M, Yang X F, Qin L, Chen P, Xu W, Liu J L, Wei K J. Composition and structure of benthic macroinvertebrate community in two reservoirs in Hubei province, China; response to eutrophication. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 20(1/3): 297-306.
- [37] Findik Ö. Spatial and seasonal distribution of macroinvertebrates in high altitude reservoir (Beyler Reservoir, Turkey). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(5): 994-1001.
- [38] Slavevska-Stamenković V, Paunović M, Smiljkov S, Stafilov T, Prelić D, Ristovska M, Gačić Z, Atanacković A. Factors affecting distribution pattern of dominant macroinvertebrates in Mantovo Reservoir (Republic of Macedonia). *Biologia*, 2012, 67(6): 1129-1142.