

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM_{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM_{2.5}改善效果评估 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O₃污染特征及敏感性 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO_x排放特征对比分析 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe⁰/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO₂及CH₄排放与市政排水管网污水输入的关联影响 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N₂O排放的影响 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律

温佳琦¹, 王皓冉¹, 陈永灿^{1,2}, 刘昭伟^{1*}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 绵阳 621010)

摘要: 水电站运行影响河流的栖息地环境, 进而影响底栖动物群落结构, 从而对河流生态健康造成影响. 基于牡丹江镜泊湖电站至石岩电站江段的底栖动物采样数据, 分析该江段的底栖动物沿程变化规律以及梯级水电站群对水生态环境的影响. 结果表明, 梯级电站的运行对研究江段的多种生境因子造成了影响, 改变了江段内底栖动物的群落结构. 在电站的上游和下游, 底栖动物群落结构差别明显, 其中, 电站下游环境敏感种的数量多于上游. 相比坝式水电站, 引水式水电站对底栖动物的影响较小. 空间上来看, 电站运行影响沿程逐渐减弱, 底栖动物的密度和丰度呈现沿程增加的趋势.

关键词: 牡丹江; 底栖动物; 梯级电站; 沿程变化; 生境因子

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3266-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.201912084

Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River

WEN Jia-qi¹, WANG Hao-ran¹, CHEN Yong-can^{1,2}, LIU Zhao-wei^{1*}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Hydropower plant operation changes river habitats in various aspects, and thus affects the community composition of the river ecosystem. As a result, the river health is adversely affected. The influence of a hydropower plant cascade on river continuity is even more pronounced. In this study, benthic macroinvertebrates and environmental factors were sampled from the Jingbohu Hydropower Plant to the Shiyan Hydropower Plant, along the Mudan River, and the influence of a hydropower plant cascade on the longitudinal distribution of benthic macroinvertebrates was analyzed. The results demonstrate that the hydropower plant cascade affected several environmental variables and led to changes in the community composition of benthic macroinvertebrates in the Mudan River. Significant differences were observed between sites upstream and downstream of the hydropower plants, with more sensitive species downstream of the hydropower plants. "Run-of-river" hydropower plants exert less adverse influence on benthic macroinvertebrates than dam-type plants. The influence of hydropower plants decreases along the longitudinal direction of the river, with the density and richness of benthic macroinvertebrates increasing.

Key words: Mudan River; benthic macroinvertebrates; hydropower plant cascade; longitudinal change; environmental variable

水力发电具有廉价、清洁的巨大优势, 在全球气候变化的大背景下具有庞大的开发潜力. 然而, 水电站的建造会破坏河流生态环境, 如筑坝破坏河流连通性, 改变河流原有的水文和水力学特性, 筑坝形成的水库变为静水环境, 水库下游则为受电站泄流控制的人工流量过程, 使下游河道中河流理化条件发生变化^[1]. 水生生物的生命活动依赖于其栖息地的环境, 河流理化性质的变化进而对生物群落产生影响, 改变各种水生生物的数量和群落结构, 并影响它们的生命活动. 大型底栖无脊椎动物 (benthic macroinvertebrate, 下称底栖动物) 位于河流生态系统食物链的中间环节, 因其活动范围大、对环境变化反应灵敏、监测成本低的特点, 被广泛应用于评估河流生境状况, 是研究以修建水电站为代表的人类活动对河流生境影响的常用指示生物.

根据集中水头方式的差异, 水电站有坝式水电站和引水式水电站之分. 国内外学者对坝式水电站的生态影响已有大量研究. 筑坝形成的水库内流速

低、泥沙沉积和水质变化, 导致库区内静水生物增加^[2]; 坝下水温偏低, 水质的变化和营养物质的减少使敏感物种减少, 耐污物种增加, 总生物密度增加, 但丰度和生物多样性下降^[3]. 另外, 如果坝式水电站承担日调度任务, 则会引起下游流量的剧烈波动, 显著减少底栖动物的数量, 改变群落结构^[4]. 这些影响会随着栖息地到坝址距离的增加而有所减弱^[5,6]. 而引水式电站对河流的连通性影响较小, 但形成的减水段内流量减少, 会造成岸边底质裸露、植被贫瘠, 并影响部分水质参数. 栖息地生境因子的变化进而影响河流底栖动物的生物密度、功能摄食类群等群落结构特征^[7].

水电站的梯级开发会加剧生境的破碎化^[1]. 现有研究多关注坝式水电站形成的梯级水库^[2,8,9], 对

收稿日期: 2019-12-12; 修订日期: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91647116, 51579130)

作者简介: 温佳琦 (1994 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境水力学和生态水力学, E-mail: wjq16@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: liuzhw@mail.tsinghua.edu.cn

实际开发中常见的梯级引水式电站的研究则较少。已有的一些研究指出, 电站库区内、减水段和下游混合段的生物多样性和生物量有所不同^[10], 底栖动物摄食功能类群随河流生境物理因子的变化发生改变^[11]。

以往的研究多关注大坝附近或者引水段的底栖动物变化, 研究对象仅限于单个电站或者 2~3 个电站的梯级电站, 尚缺乏长距离的、梯级电站作用下的底栖动物的沿程变化规律研究。因此, 本文的研究目的在于: ①探究梯级电站影响下的大型底栖动物群落结构沿程变化规律; ②比较引水式水电站和坝式水电站对底栖动物群落结构的影响, 分析不同水电站影响底栖动物群落结构的生境因子。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样点布置

牡丹江位于黑龙江省东南部, 是松花江干流右岸最大的支流, 全长约 726 km, 流域面积 37 023 km², 年平均径流量 168 m³·s⁻¹, 主要支流有珠尔多河、海浪河^[12]。本文的研究范围从牡丹江中游的镜

泊湖坝下起至石岩电站, 流长约 56.5 km。

河段内共有水电站 7 座, 其中镜泊湖电站为混合式电站, 下辖新旧两个电站, 旧电站厂房位于堤坝后方, 新电站为地下厂房, 通过从镜泊湖水库中引水进行发电, 尾水经过沿河岸的管道汇入牡丹江, 在大坝和出水口之间形成一段流量较低的河段; 红卫一、红卫二和红农这 3 个电站为坝式水电站, 依次位于这段低流量河段内, 发电的水主要来自镜泊湖瀑布溢流和渗漏的水; 下游阿堡电站建有拦河坝形成阿堡水库, 江西-渤海电站为引水式水电站, 从阿堡水库库区引水发电, 并在河道内形成一段减水段。

为探究底栖动物的沿程变化规律以及受水电站运行的影响, 在研究河段内沿程布置了 21 个采样点 (位置见图 1, 名称见表 1)。红卫一、红卫二和红农电站的挡水建筑物上下游 1 km 内各有 1 个采样点; 镜泊湖电站有 2 个出水口, 第 1 个出水口下游及第 2 个出水口的上下游各有 1 个采样点; 阿堡电站拦河坝上下游各有 1 个采样点。江西-渤海电站的引水段、出水口处以及下游各有 1 个采样点; 石岩电站库区内无采样点, 下游有 1 个采样点。

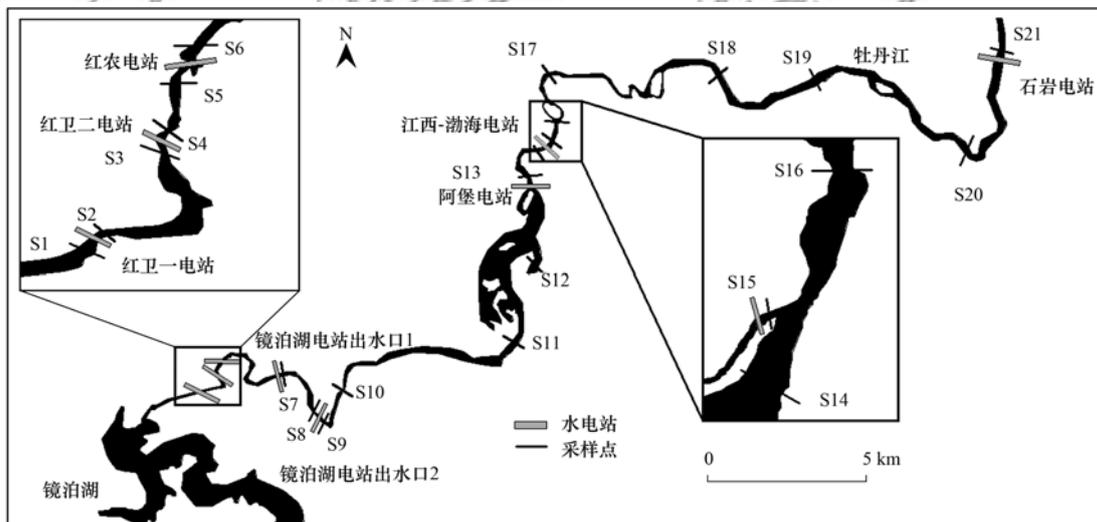


图 1 研究区域及采样点位置示意

Fig. 1 Sketch of the study area and sampling sites

表 1 各采样点的编号与名称

Table 1 Numbers and names of the sampling sites

编号	采样点名称	编号	采样点名称	编号	采样点名称
S1	红卫一库区	S8	镜泊湖出水口 2 上游	S15	江西-渤海电站出水口
S2	红卫一下游	S9	镜泊湖出水口 2 下游	S16	江西-渤海电站下游
S3	红卫二库区	S10	五七大桥	S17	三陵桥
S4	红卫二下游	S11	小朱家渡口	S18	哈达湾
S5	红农电站库区	S12	阿堡电站库区	S19	下官湾
S6	红农电站下游	S13	阿堡电站下游	S20	三道亮子
S7	镜泊湖出水口 1 下游	S14	江西-渤海电站减水段	S21	石岩电站下游

1.2 采样方法

2014 年秋天对研究区域的底栖动物进行了野

外采样。在每个采样点选择 3 个位置采样, 在计数时取平均值。采样方法为踢网法, 使用 1 m × 1 m、网孔

直径为 0.375 mm 的踢网,采样面积 1 m². 将采集的样品经孔径为 0.5 mm 的网筛筛洗后分别装袋,带回实验室进行鉴定与计数. 将采集的样品置于白瓷盘上,用镊子挑选出底栖动物并使用 75% 酒精固定. 参考底栖动物图谱在显微镜下对底栖动物进行鉴定,区分至尽可能低的分类单元(科或属),按照分类计数、称重. 底栖动物中的蜉蝣目(Ephemeroptera)、襁翅目(Plecoptera)和毛翅目(Trichoptera)动物是对水体污染非常敏感的动物,因此将这 3 种动物(合称 EPT)归为一类,统计其总数^[13].

在底栖动物采样的同时,测量栖息地的生境因子,包括水深、流速、河流底质组成和水质指标等^[14]. 使用水深探杆测量采样点的水深,LS300 便携式流速仪测量流速,CT-6023 pH 计测量 pH,YSI Pro ODO 溶氧仪测量水体溶氧含量. 这些生境因子取 3 个位置测量值的均值. 同时,在每个采样点使用水样采集器采集水样,装入统一规格聚乙烯贮样容器,测定水样水质,包括 COD、高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮等指标.

1.3 数据分析

无重复双因素分析:对河段内除石岩电站的 5 座电站的上下游共 10 个采样点的 Margalef 丰富度指数、物种丰度、底栖动物密度和 EPT 密度进行无重复双因素分析,以探究底栖动物受梯级电站影响的沿程变化和采样点相对于水电站位置的影响. 其中 Margalef 指数(I_M)反映一个区域的物种丰富程度,能较好地区分群落差异. 其计算公式为^[13]:

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

式中, S 为物种丰度, N 为采样点的底栖动物总数量.

凝聚法聚类分析:对所有采样点的物种组成进行凝聚法聚类分析,以比较各采样点群落组成的相似程度. 衡量各采样点物种组成相似度的指标为 Bray-Crutis 距离(d^{BC}):

$$d^{BC}(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^n |y_{i,k} - y_{j,k}|}{\sum_{k=1}^n (y_{i,k} + y_{j,k})} \quad (2)$$

式中, n 为采样点中物种的总数, $y_{i,k}$ 和 $y_{j,k}$ 分别为第 i 和 j 个采样点中第 k 个物种的数量. Bray-Crutis 距离的取值范围为 0 ~ 1, 0 代表两个采样点的物种组成完全相同, 1 则代表完全不同. 采用组平均法进行聚类分析^[15].

典范对应分析:对河段内除石岩电站的 5 座电站的上下游的采样点进行典范对应分析,分析与底

栖动物组成相关的生境因子以及生境因子在不同采样点的特点.

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落结构状况

在研究范围内,共采集到物种 4 纲 14 目 32 科,包括昆虫纲、寡毛纲、双壳纲和腹足纲. 其中以昆虫纲动物最多,共 9 目 26 科,优势物种为原石蛾科(Rhyacophilidae)动物. 各采样点采集到的底栖动物的个体数相差较大. 采集到底栖动物个体总数最少的为 S21 石岩电站下游采样点,仅采集到底栖动物 4 只;最多的为 S18 哈达湾采样点,共采集到 182 只. 采集到 EPT 最少的是 S3 红卫二库区采样点和 S21 石岩电站下游采样点,没有采集到 EPT;最多的为 S16 江西-渤海电站下游采样点,共采集到 107 只.

图 2 展示了各采样点的底栖动物密度、EPT 密度、物种丰度与 Margalef 指数的沿程变化. 从河流整体的变化趋势上看,直至 S16 江西-渤海电站下游采样点,底栖动物的密度、丰度与 Margalef 丰富度指数有沿程增加的趋势,从 S17 三陵桥采样点开始则有所下降. 这一下降主要表现为,在底栖动物密度较高的 S17 三陵桥采样点和 S18 哈达湾采样点采集到的底栖动物以潜水蝾科动物为主,分别占采样点采集到总底栖动物数量的 41% 和 78%. 单一物种的巨大优势影响了栖息地的物种丰富度.

为探究不同类型的水电站对底栖动物的影响,选取坝式水电站库区内(或引水式电站减水段内)和下游段的采样点,比较底栖动物数量与敏感物种数量的变化. 镜泊湖电站与石岩电站库区内无采样点,因此比较除镜泊湖电站和石岩电站的 5 座水电站. 除了 S6 红农电站下游 EPT 低于库区内,其他电站的底栖动物密度和 EPT 密度都在下游采样点增加(表 2).

将这 5 个水电站按照上下游顺序排列,分别比较电站的库区内(或减水段内)和下游段的底栖动物密度、丰度及 EPT 密度. 如图 3 所示,从上游镜泊湖始至江西-渤海电站,底栖动物的密度与丰度有增加的趋势. 除 S16 江西-渤海电站下游的采样点的 EPT 密度相较上游减水段显著增加以外,其余 4 个电站的 EPT 密度沿程未表现出明显的增减趋势. 除江西-渤海电站,其他各电站的库区内底栖动物的丰度和数量均低于上一电站下游采样点处的值;江西-渤海电站减水段(S14)的底栖动物丰度、总密度高于阿堡电站下游(S13)的值. 下游采样点的物种丰富度均高于库区(减水段内)采样点.

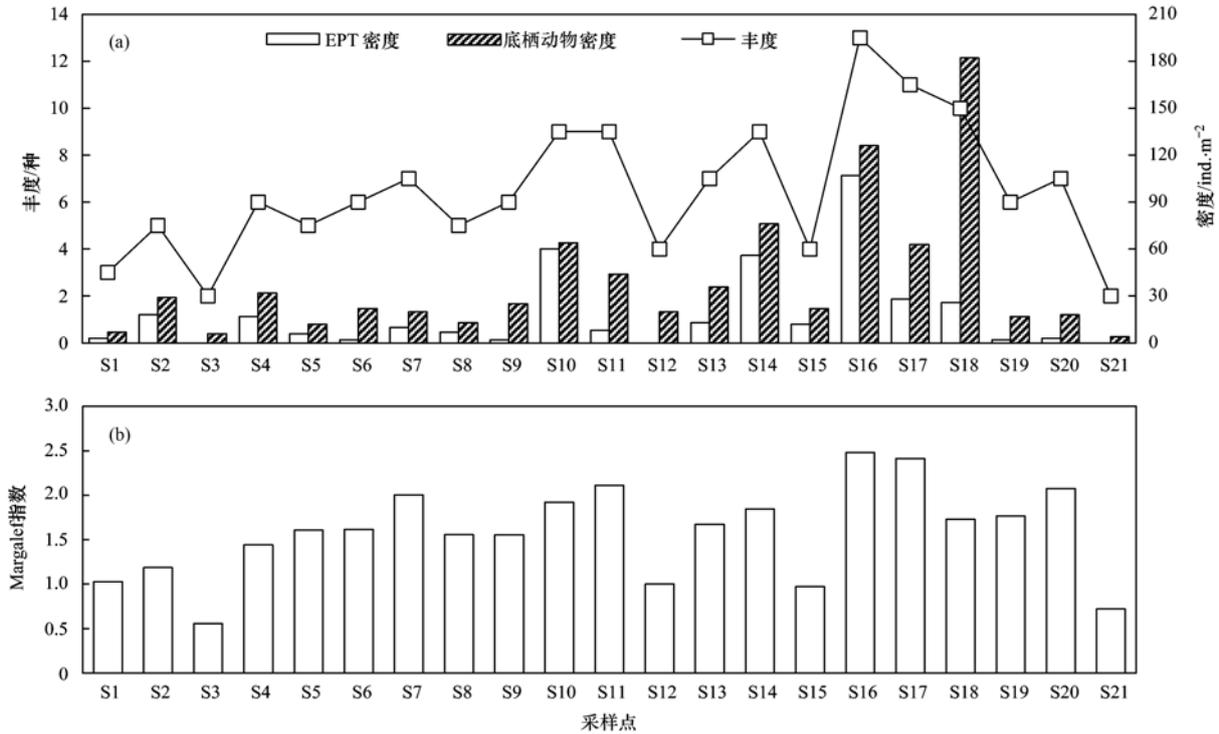


图 2 各采样点的底栖动物密度、EPT 密度与物种丰度和 Margalef 指数

Fig. 2 Total benthic macroinvertebrate density, EPT density, and richness and Margalef index of the sampling sites

表 2 各电站库区(或减水段内)采样点底栖动物密度与 EPT 密度与下游采样点的对比/ind.·m⁻²

Table 2 Comparison of total benthic macroinvertebrate and EPT between sites in the reservoir (or depleted reach) and sites downstream of the plant/ind.·m⁻²

项目	类型	红卫一电站	红卫二电站	红农电站	阿堡电站	江西-渤海电站
底栖动物密度	库区/减水段	7	6	12	20	76
	下游	29	32	22	36	126
	增减趋势	增加	增加	增加	增加	增加
EPT 密度	库区/减水段	3	0	6	0	56
	下游	18	17	2	13	107
	增减趋势	增加	增加	减少	增加	增加

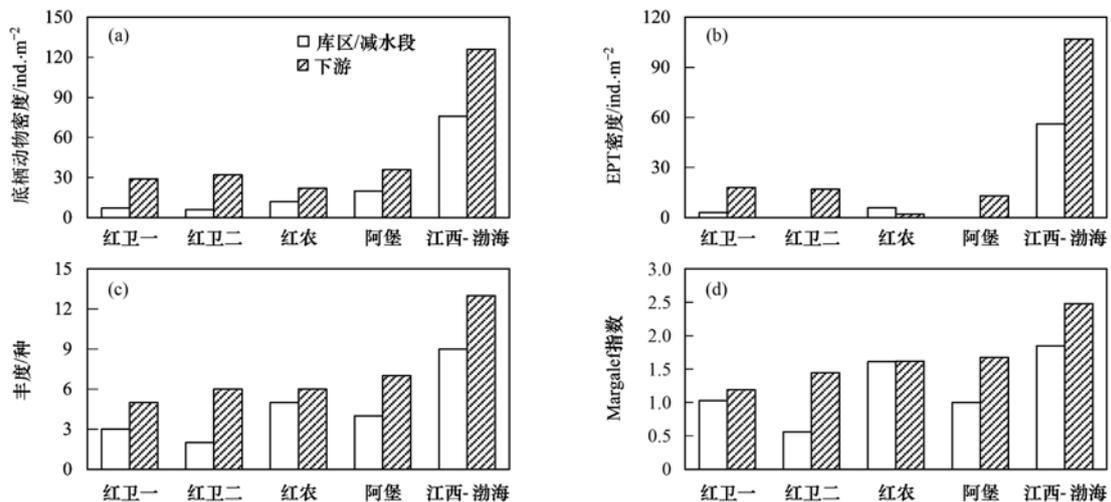


图 3 牡丹江上 5 座电站的库区内(或减水段内)和下游段采样点的生物总密度、EPT 密度、物种丰度和 Margalef 指数

Fig. 3 Comparison of total benthic macroinvertebrate density, EPT density, richness, and Margalef index of five hydropower plants between sites in the reservoir (or depleted reach) and sites downstream of the plants

2.2 生境因子与水质状况

根据地表水环境质量标准(GB 3838-2002),研究江段的水质整体为IV类水,个别采样点的水质为V类或劣V类. S5(红农电站库区)、S12(阿堡电站库区)和S15(江西-渤海电站出水口)由于总氮含量较高(表3),为V类水. S17(三陵桥)和S18(哈达湾)水样氨氮与总氮超标,为劣V类水.

除S15江西-渤海电站出水口采样点,各采样点

的流速不超过 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在库区或减水段内采样点较低,在电站下游则会相对其上游有所增加. 除S15采样点外,底栖动物丰度、密度与流速具有相近的变化趋势. 而在S15采样点处,受到江西-渤海电站发电尾流的直接影响,流速为全部采样点中的最大值($1.50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),过高的流速不利于底栖动物的附着与生存,因此采集到的底栖动物明显减少,总密度仅 $22\text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$,丰度($S=4$)和物种丰富度(Margalef指数= 0.97)也大幅下降(图4).

表3 主要监测点的生境因子

Table 3 Environmental variables at the main sampling sites

采样点	流速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	pH	COD $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氨氮 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	总磷 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	总氮 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
S01	<0.01	7.43	14.6	4.3	0.186	0.197	1.26
S02	0.44	7.46	14.1	4.2	0.226	0.206	1.45
S03	<0.01	7.51	14.6	4.3	0.204	0.195	1.33
S04	0.28	7.55	14.1	4.2	0.192	0.179	1.16
S05	0.05	7.62	14.4	4.2	0.232	0.191	1.53
S06	0.58	7.60	14.6	4.3	0.261	0.207	1.07
S12	<0.01	7.39	15.4	4.2	0.404	0.302	1.60
S13	0.21	7.42	14.6	4.5	0.335	0.263	1.26
S14	0.28	7.46	13.9	4.3	0.381	0.244	1.35
S15	1.50	7.52	14.1	4.0	0.353	0.258	1.70
S16	0.57	7.49	14.1	4.2	0.301	0.201	1.50
S17	0.23	7.35	17.0	5.0	12.6	0.298	16.5
S18	0.38	7.27	16.8	4.9	15.7	0.412	18.4

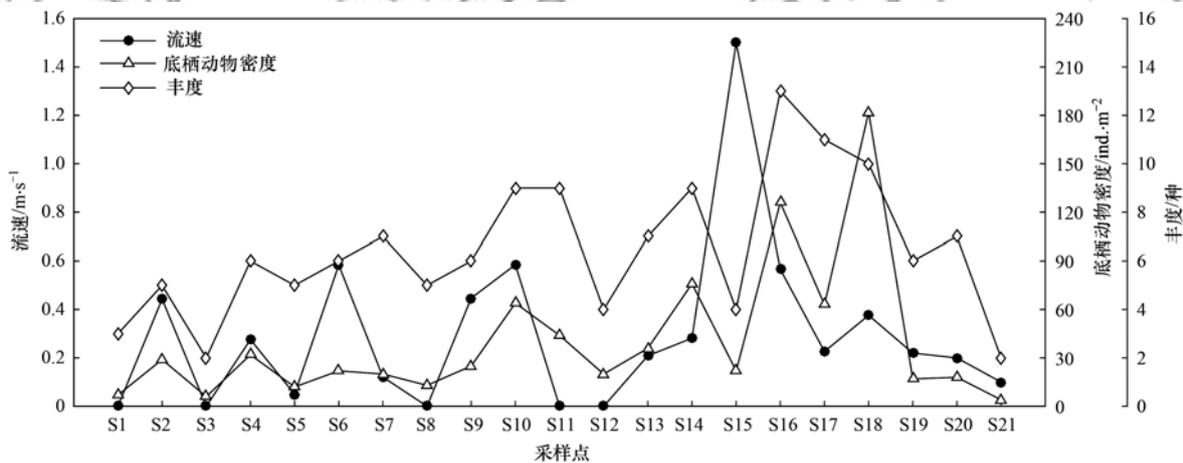


图4 各采样点底栖动物密度、丰度与流速的沿程变化趋势对比

Fig. 4 Trends along the study reach of total benthic macroinvertebrate density, richness, and flow velocity

2.3 无重复双因素方差分析

各采样点底栖动物的数量与群落结构与其相对于水电站的位置有关,并存在一定的沿程变化的趋势(图3和表2). 因此对5座电站的库区内(或减水段内)和下游段采样点进行无重复双因素分析,以分析沿程变化与水电站对各采样点底栖动物的影响. 结果显示,与沿程位置显著相关的是物种丰度和底栖动物密度. 电站相对位置则与Margalef指数、物种丰度和底栖动物密度显著相关. EPT密度与这两个因素的相关性均不显著(表4).

表4 无重复双因素分析结果¹⁾

Table 4 Results of two-way analysis of variance

(ANOVA) without repetition

项目	差异源	F	P
Margalef 指数	相对电站的位置	8.104 2	0.046 5 *
	沿程变化	6.322 3	0.050 9
物种丰度	相对电站的位置	23.058 8	0.008 6 **
	沿程变化	19.705 9	0.006 8 **
底栖动物密度	相对电站的位置	13.074 8	0.022 4 *
	沿程变化	22.369 0	0.005 3 **
EPT 密度	相对电站的位置	2.456 0	0.192 1
	沿程变化	1.458 5	0.361 7

1) * 表示显著性水平为 0.05 (显著), ** 表示显著性水平为 0.01 (非常显著)

2.4 凝聚法聚类分析

使用凝聚法聚类分析来比较各采样点的群落相似程度. 聚类分析结果表明, S21 石岩电站下游采样点与其余各采样点的差异很大. 去除 S21, 其余各采样点被分到 2 个主要分支下. 为研究水电站的影响, 仍然对 5 座电站库区/减水段内和下游的采样点进

行分析. 采样点 S1、S3、S5、S6 和 S12 位于同一分支下(记为 G1), S2、S4、S13、S14 和 S16 位于另一分支下(记为 G2). G1 中除 S6 红农电站下游采样点, 均为电站上游库区(或减水段内)采样点; G2 中除 S14 江西-渤海电站减水段采样点, 均为电站下游采样点(图 5).

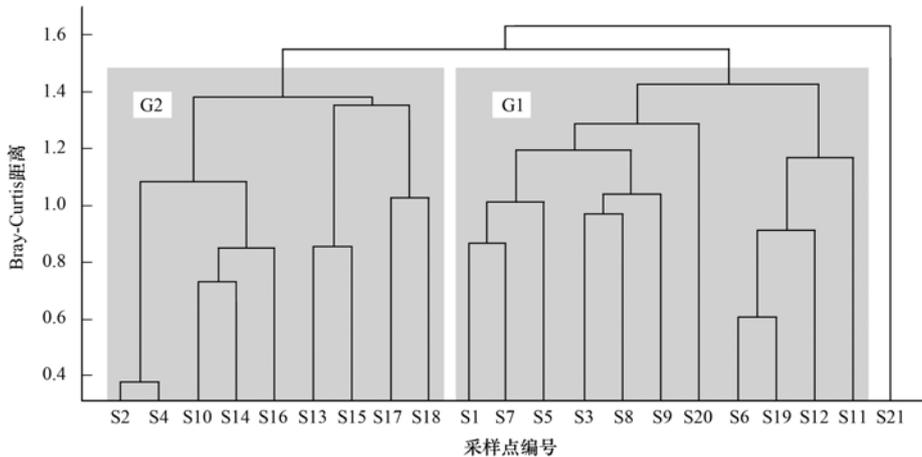


图 5 凝聚法聚类分析结果

Fig. 5 Results of hierarchical clustering analysis

G1 采样点中采集到的底栖动物主要为耐污性较强的物种, 敏感物种(耐污值为 1~3)的数量占总数的 32.2%, 在 S6 和 S12 采集到了耐污值为 9 的霍甫水丝蚓, 另外在 S1、S3 和 S5 采集到了较耐污的摇蚊亚科和扁泥甲科动物. 在 G1 采样点中零星采集到不耐污物种, 但数量较少, 且没有在多个采样点都出现的物种. G2 采样点采集到的底栖动物总量远高于 G1, 采集到的物种中有对水质要求较高的蜉蝣科、纹石蛾科、原石蛾科和钩虾科, 敏感物种数量占总数的 38.4%; 部分点也有摇蚊亚科、椎实螺科等耐污性中等的生物, S13 和 S16 出现了耐污性强的颤蚓科动物. 两组采样点中, 对水质敏感的 EPT 数

量占底栖动物总数量的比例有显著区别($P = 0.016$). 总体而言 G2 组采样点的底栖动物数量更大, 且多样性更好, 敏感物种的比例更高(图 6).

G1 和 G2 采样点的 pH、氨氮含量、高锰酸盐指数、总氮和总磷没有显著不同, COD 存在显著区别($P = 0.028$), G1、G2 两组的平均 COD 分别为 $14.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $14.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. EPT 所占比例与 COD 具有较强的负相关性($P = -0.826$). 另外, 虽然方差分析认为两组的流速无显著不同, 但 G1 组内除 S6 红农电站下游流速较高外, 其余采样点的流速均低于 G2 组内采样点的流速, 两组的平均流速分别为 $0.18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 5).

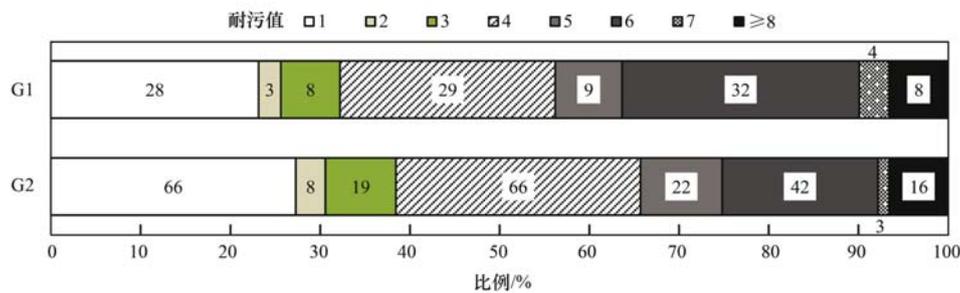


图 6 G1 和 G2 两组采样点中不同耐污值底栖动物占总数量的比例

Fig. 6 Percentages of species of different tolerance to pollution in the G1 and G2 sites

表 5 对 G1 和 G2 两组采样点, 对各水质指标与 EPT 百分比进行方差分析的 P 值¹⁾

Table 5 ANOVA P-value of water quality variables and EPT% between G1 and G2

项目	pH	氨氮	高锰酸盐指数	COD	总氮	总磷	流速	EPT%
<i>F</i>	0.459 5	0.323 4	0.100 0	7.127 3	0.015 2	5.913 5e-5	2.997 7	9.222 4
<i>P</i>	0.517 0	0.585 2	0.759 9	0.028 4*	0.904 9	0.994 1	0.121 6	0.016 1*

1) * 表示显著性水平为 0.05(显著), ** 表示显著性水平为 0.01(非常显著)

2.5 典范对应分析

对 5 个水电站附近的采样点进行典范对应分析. 由于部分物种仅在少数采样点出现, 且采集到的数量少, 因此在排序图中仅标出权重不低于 20% 的物种 (图 7). 前 4 个排序轴共解释了物种与生境因子相互关系的 79.5%, 其中第一排序轴与第二排序轴分别解释了 28.2% 和 22.5%. 对第一排序轴作用最大的生境因子是 COD (典范系数 $b = 1.0527$), 对第二排序轴作用最大的生境因子是高锰酸盐指数 ($b = 1.4529$) 和流速 ($b = 1.2377$). COD 与第一排序轴强相关 (相关系数 $r = 0.9734$); 与第二排序轴弱相关 ($r = 0.0023$). 流速与第一排序轴有较强的负相关性 ($r = -0.2551$), 与第二排序轴有较强的正相关性 ($r = 0.4937$).

典范对应分析中采样点的分布与聚类分析的结论吻合, G1 组内的采样点均分布在 y 轴左侧, G2 组内的采样点分布在 y 轴右侧. 对比不同水电站附近的采样点, 在坝式水电站库区内的采样点 (S1、S3、S5 和 S12) 均位于第四象限, 以低流速和较高的 COD 为特征; 而引水式水电站减水段内的采样点 S14 则位于第三象限, 流速中等, COD 低, 与 S2、S16 和 S4 等位于电站下游段的采样点更接近.

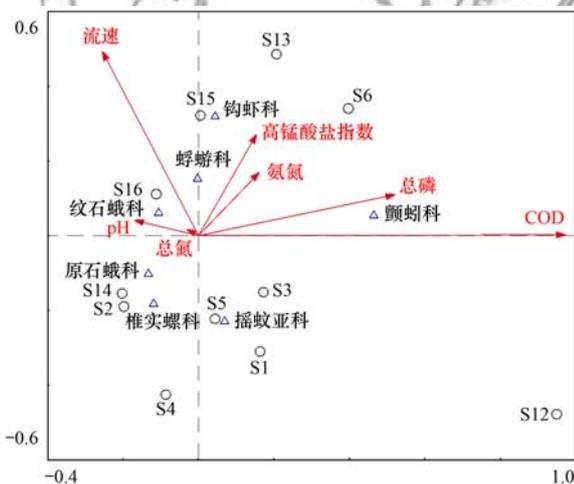


图 7 典范对应分析结果

Fig. 7 Results of canonical correspondence analysis

3 讨论

3.1 生境因子对底栖动物分布的影响

G1 与 G2 两组采样点之间的底栖动物群落结构组成存在显著区别, 其中 G2 组采样点的物种更为丰富、敏感物种更多、偏好较高流速的物种更多, 如纹石蛾科和原石蛾科动物, 分别占总数量的 27.6% 和 26.4%. 引起群落结构差异的主要生境因子可能为 COD 和流速. COD 与敏感物种的数量相关^[16], 流速则造成了 G2 中偏好高流速物种的增加.

研究河段内底栖动物丰度、密度与流速相近的变化趋势, 也说明了流速对底栖动物群落结构的影响. 过低的水流流速会降低生产力, 限制物质和能量的交换, 而高流速则会产生过大的水流剪切力, 使得部分种类的底栖动物难以固着在河床底质上, 不利于其生存. 一般认为超过 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速会限制大多数生物的生存^[13].

有研究认为河道流量是影响底栖动物栖息地环境的重要因素, 河段内流量的补充有利于生态环境恢复^[13,17]. 在本研究 2 个流量减少的河段中, 江西-渤海电站下游采样点的底栖动物群落结构指标高于减水段内; 而镜泊湖电站出水口下游底栖动物群落结构的恢复有一定滞后, 出水口下游的 2 个采样点 (S8 和 S9) 与出水口上游低流量河段内的采样点相比, 底栖动物总量与丰度并无明显增加, 直至更下游的 S10 五七大桥采样点, 底栖动物总量、丰度、EPT 密度才有所增加. 造成这一滞后的原因可能与镜泊湖电站间歇式发电有关. 镜泊湖水电站是黑龙江省电网主要调峰电站^[18], 下游水流条件频繁变化, 影响了生活于此的大型底栖动物^[11]. 在经过河道调蓄作用削弱水流频繁变化的影响后, 则能观察到底栖动物由于河道水量增加而有所恢复的现象. 然而, S14 江西-渤海电站减水段采样点大型底栖动物物种丰富性更高, 聚类分析显示该点的群落组成更接近生境已有所恢复的下游采样点, 这可能是由于河床的阶梯状结构^[19]使采样点处产生了较大的流速 ($0.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 创造出了良好的栖息地条件.

3.2 不同水电站对河流生态的影响

坝式水电站和引水式电站以不同的机制影响河流底栖动物. 坝式水电站对河流生态的影响主要与水温、水质、流速以及营养物质的含量有关. 而引水式电站的影响主要与以下两方面有关: 河道内挡水建筑物的建设和发电引水导致流量减少^[7]. 引水式电站对河流水化学指标的影响不显著, 但显著改变了流速、水深、河道湿周等物理生境因子, 使减水段中动水栖息地缩减、加剧种间竞争与种内斗争、破坏滨河植被, 进而影响底栖动物群落^[7,11,17].

对比研究河段中的坝式水电站和引水式水电站, 坝式水电站附近的采样点相对于电站的上下游关系, 与其在聚类分析中的分组基本吻合; 而对引水式电站江西-渤海电站, 其减水段采样点 (S14) 的底栖动物数量和多样性虽然也都低于下游采样点 (与坝式水电站类似), 但聚类分析、方差分析和典范对应分析的结果都显示, S14 的群落组成与流速、COD 等生境因子更接近电站下游采样点. 可见就影响程度而言, 虽然引水式电站改变了底栖动物栖息

地的部分生境因子,但对生境因子和底栖动物造成的影响均弱于坝式水电站,底栖动物的数量和多样性相较于坝式水电站库区内更高。

3.3 底栖动物分布的沿程变化

图 3 和图 5 展示了研究河段内底栖动物的沿程变化。直至 S16 江西-渤海电站下游采样点,底栖动物的密度、丰度均有沿程增加的趋势。这一增加的总体趋势主要与两个因素有关:①研究河段由镜泊湖电站和江西渤海电站的减水段和下游段交替组成,下游段内流量增加,使生态环境得以恢复;②随着到拦河建筑物或电站出水口的距离增加,水电站运行产生的频繁扰动等影响因素沿程逐渐减弱^[4,17,20]。因此从研究河段整体来看,底栖动物的密度和物种多样性沿程逐渐增加。而在研究河段末端,底栖动物丰度和密度的整体下降趋势可能与水质的恶化有关。S18 哈达湾采样点的水质最差,虽然在该点采集到了最多的底栖动物,但其中 78% 为潜水蝾螈科动物(同目动物的耐污值为 5~8,属于一般耐污~耐污物种),EPT 的数量反而下降。水质恶化导致了该耐污物种的优势和 EPT 的减少。下游河段水质逐步恢复,但生态系统的恢复则有所滞后,加之受石岩电站运行干扰,并未恢复至上游的状态。

在河流的全尺度上,不同河段所处地区自然环境的差异,造成了河流上、中、下游栖息地生境因子(如水温、河道宽度、流速和水深等)的差别,造就了底栖动物分布的沿程变化^[21]。这一差别在较大的河流中表现得更明显。而在本研究关注的较小尺度的河段内,宏观自然环境的差异不大,底栖动物的分布则更多地取决于河段内修建水电站等设施、水质变化和能量输入^[10]等因素。

4 结论

(1)牡丹江江段内梯级电站的建设对多种生境因子造成了影响,从而改变了江段内底栖动物的群落组成。电站的建设改变了河道内的水质参数(如 COD)和流速,反映在 EPT 所占比例的差异、底栖动物的密度和丰度的沿程变化上,造成底栖动物群落组成的不同。

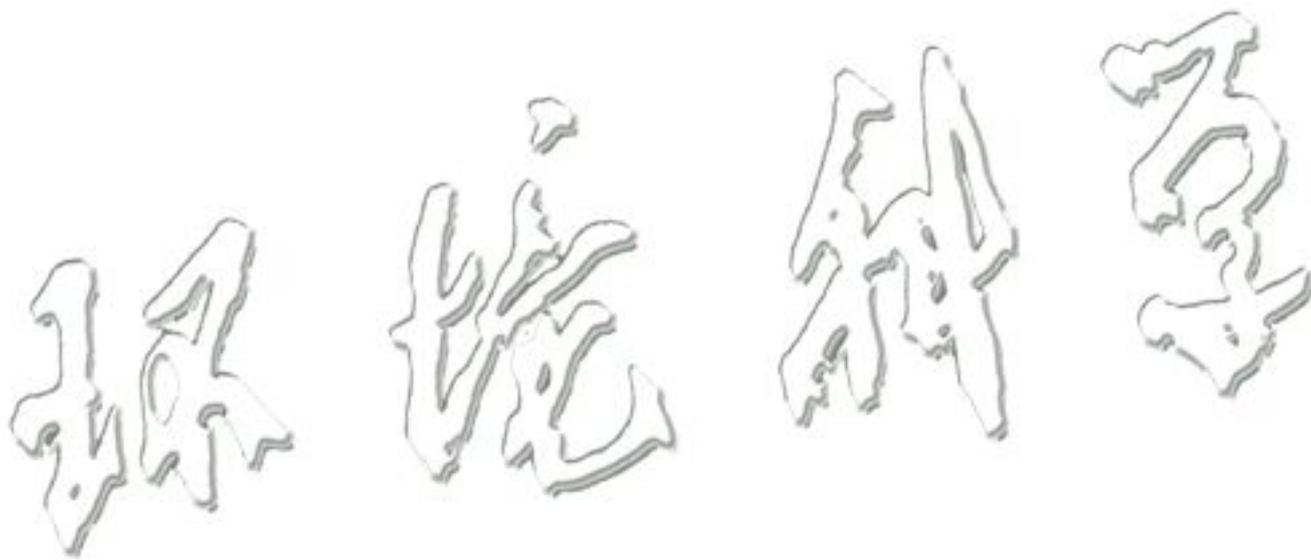
(2)比较坝式水电站与引水式水电站对底栖动物的影响,引水式电站同样会改变河流减水段内底栖动物栖息地的水动力条件和水质条件,对底栖动物(尤其是敏感物种)的生存产生影响,但其造成的影响弱于坝式水电站。

(3)随着电站运行的影响沿程逐渐减弱以及河道内流量的补充,下游生态环境逐步恢复,底栖动物的密度和丰度有沿程增加的趋势。

参考文献:

- [1] 毛战坡,王雨春,彭文启,等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 134-140.
Mao Z P, Wang C Y, Peng W Q, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 134-140.
- [2] 李晋鹏,董世魁,彭明春,等. 梯级水坝运行对漫湾库区底栖动物群落结构及分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4101-4108.
Li J P, Dong S K, Peng M C, et al. Effects of cascading hydropower dams operation on the structure and distribution pattern of benthic macroinvertebrate assemblages in Manwan Reservoir, Southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 4101-4108.
- [3] Wu H P, Chen J, Xu J J, et al. Effects of dam construction on biodiversity: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221: 480-489.
- [4] Parasiewicz P, Schmutz S, Moog O. The effect of managed hydropower peaking on the physical habitat, benthos and fish fauna in the River Bregenzerach in Austria [J]. Fisheries Management and Ecology, 1998, 5(5): 403-417.
- [5] Chaves-Ulloa R, Umaña-Villalobos G, Springer M. Downstream effects of hydropower production on aquatic macroinvertebrate assemblages in two rivers in Costa Rica [J]. Revista de Biología Tropical, 2014, 62(S2): 179-201.
- [6] Mwedzi T, Bere T, Siziba N, et al. Longitudinal macroinvertebrate assemblages in contrasting discontinuities: the effects of damming in tropical streams [J]. African Journal of Ecology, 2016, 54(2): 183-194.
- [7] Anderson D, Moggridge H, Warren P, et al. The impacts of "run-of-river" hydropower on the physical and ecological condition of rivers [J]. Water and Environment Journal, 2015, 29(2): 268-276.
- [8] Jorcin A, Nogueira M G. Benthic macroinvertebrates in the Paranapanema Reservoir cascade (southeast Brazil) [J]. Brazilian Journal of Biology, 2008, 68(4): 1013-1024.
- [9] Lacerda Dos Santos N C, García-Berthou E, Dias J D, et al. Cumulative ecological effects of a Neotropical reservoir cascade across multiple assemblages [J]. Hydrobiologia, 2018, 819(1): 77-91.
- [10] 郭伟杰,赵伟华,王振华. 梯级引水式水电站对底栖动物群落结构的影响 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(6): 87-93.
Guo W J, Zhao W H, Wang Z H. Effects of cascade diversion-type hydropower stations on benthic macroinvertebrate Communities [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(6): 87-93.
- [11] 傅小城,唐涛,蒋万祥,等. 引水型电站对河流底栖动物群落结构的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(1): 45-52.
Fu X C, Tang T, Jiang W X, et al. Impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate communities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 45-52.
- [12] 王皓冉,陈永灿,刘昭伟,等. 牡丹江中游底栖动物分布及其与栖息因子的关系 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1197-1204.
Wang H R, Chen Y C, Liu Z W, et al. Correlation analysis of macroinvertebrate community and habitat factors in the middle reaches of Mudan River [J]. China Environmental Science, 2015, 35(4): 1197-1204.
- [13] 段雪花,王兆印,徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. 12-55.

- Duan X H, Wang Z Y, Xu M Z. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. 12-55.
- [14] Kelly D J, Hayes J W, Allen C, *et al.* Evaluating habitat suitability curves for predicting variation in macroinvertebrate biomass with weighted usable area in braided rivers in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2015, **49**(3): 398-418.
- [15] 覃林. 统计生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009. 116-128.
- [16] 迟国梁, 童晓立. 基于典范对应分析的大型底栖动物群落与水环境因子关系研究[A]. 见: 2015 第七届全国河湖治理与生态文明发展论坛论文集[C]. 广州: 中国水利技术信息中心, 2015.
- [17] Wang H R, Chen Y C, Liu Z W, *et al.* Effects of the "run-of-river" hydro scheme on macroinvertebrate communities and habitat conditions in a mountain river of Northeastern China[J]. *Water*, 2016, **8**(1): 31.
- [18] 周全, 吕婷婷, 李晓军. 镜泊湖水库综合利用要求及调度研究[J]. *东北水利水电*, 2012, **30**(10): 17-18, 35.
- [19] Wang Z Y, Lee J H W, Melching C S. River dynamics and integrated river management[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. 154-174.
- [20] Holt C R, Pfitzer D, Scalley C, *et al.* Longitudinal variation in macroinvertebrate assemblages below a large-scale hydroelectric dam[J]. *Hydrobiologia*, 2015, **755**(1): 13-26.
- [21] Jiang X M, Xiong J, Xie Z C. Longitudinal and seasonal patterns of macroinvertebrate communities in a large undammed river system in Southwest China[J]. *Quaternary International*, 2017, **440**: 1-12.



CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)