

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋铁锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价

黄尤优^{1,2,3}, 曾燊^{1,2}, 刘守江⁴, 马永红^{1,2}, 胥晓^{1,2}

(1. 西华师范大学西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 南充 637009; 2. 西华师范大学生命科学院, 南充 637009; 3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 4. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637009)

摘要: 为了揭示大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构, 沿河段自上而下对 9 个采样断面的藻类植物、浮游动物、底栖无脊椎动物、鱼类进行了采样分析; 同时, 结合河段实际情况利用专家打分法确定不同生物类群的权值, 并通过创建的水质生物综合评价指数 (comprehensive evaluation of water quality index, CEWI) 对水质进行评价。结果表明: ①大渡河老鹰岩河段共采集到藻类植物 6 门 31 科 56 属 105 种, 其中硅藻的物种数量最为丰富; 整个河段藻类植物的平均细胞密度为 $17.9978 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均生物量为 $0.4463 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 龙头石、礼约河和小水河的藻类种群密度最高; ②浮游动物有 3 门 11 科 12 属 26 种, 其中原生动物门最为丰富, 占 80.77%; 整个河段浮游动物的平均密度为 $40.89 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均生物量为 $13.26 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体群落组成较为简单, 种类和数量偏少; ③底栖无脊椎动物有 6 门 14 科 14 属 14 种, 其中昆虫纲最为丰富, 占 57.16%; 礼约河和小水河两条支流中的底栖动物相对分布较多; ④水质整体 CEWI 均值为 2.69828, 属轻度污染; 各样点 CEWI 值与各单项水质评价指数间均呈极显著正相关, 表现出高度的一致性; 此外, 松林河和南桤河属中度污染 ($1 < \text{CEWI} \leq 2$), 而礼约河和老鹰岩一级样点水质清洁 ($\text{CEWI} > 3$); 其中, 松林河的水质最差, CEWI 值最小, 达 1.6207; 而礼约河的水质最优, CEWI 值最高, 达 3.9545; 其余样点水质均受到不同程度的轻度污染。

关键词: 大渡河; 水生生物; 群落结构; 水质; 生物多样性

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0132-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.01.018

Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River

HUANG You-you^{1,2,3}, ZENG Yu^{1,2}, LIU Shou-jiang⁴, MA Yong-hong^{1,2}, XU Xiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation (Ministry of Education), China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. College of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Land and Resources College, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: In order to understand the aquatic community structure in the Laoyingyan section of the Dadu River, we collected samples from 9 aquatic sampling points along that section, and studied the phycophyta, zooplankton, benthic invertebrate and fish in them; we also used expert scoring method based on the actual situation of the river to weigh different biome. The water quality was evaluated using comprehensive evaluation of water quality index (CEWI). The results showed that: ① there were a total of 105 phycophyta species, belonging to 6 phyla, 31 families, and 56 genera in the Laoyingyan section of the Dadu River, among which, diatom species had a higher richness than the others. The mean cell density of the phycophyta was $17.9978 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, the mean biomass was $0.4463 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the highest population density sites were LTS, LYH and XSH. ② there were a total of 26 zooplankton species, belonging to 3 phyla, 11 families, and 12 genera, among which, Protozoa had a higher richness than the others, accounting for 80.77% of all the zooplankton species; The mean density of the phycophyta was $40.89 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, and the mean biomass was $13.26 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The whole community composition was simple, characterized by few species and small population size. ③ there were a total of 14 benthic invertebrate species, belonging to 6 phyla, 14 families, and 14 genera, among which, insecta had a higher richness than the others, accounting for 57.16% of the benthic invertebrate species. Benthic invertebrate had higher population densities in LYH and XSH. ④ The mean CEWI of the whole river water was 2.69828, characterized by slightly polluted water quality. The CEWI value between every collection point and the individual water quality evaluation index showed a significant positive correlation, manifesting a high consistency. In addition, the water quality of SLH and NYH was mesosaprobic ($1 < \text{CEWI} \leq 2$), and the water quality of LYH and LYY1 was clean ($\text{CEWI} > 3$), among which the worst was SLH with a lowest CEWI of 1.6207, and the best was LYH with a highest CEWI of 3.9545, all the other samples were subjected to different degrees of light pollution.

Key words: Dadu River; aquatic organism; community structure; water quality; biodiversity

收稿日期: 2015-04-19; 修订日期: 2015-09-04

基金项目: 西华师范大学基本科研项目(14D010); 四川省教育厅一般项目(16ZB0177); 国家自然科学基金青年基金项目(51309196)

作者简介: 黄尤优(1981~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境生态学与生物多样性保护、景观格局与过程, E-mail: yhuang_cwnu@163.com

大渡河是长江流域岷江水系最大支流,干流水能资源丰富,是国家规划的十二大水电基地之一^[1,2]。其中,大渡河老鹰岩河段为大渡河干流规划的 22 个梯级中的第 16 个梯级电站,上衔龙头石梯级,下接瀑布沟梯级电站,河段长约 23 km,天然落差 55 m^[3],工程的开发主要任务为发电,促进地方经济社会发展。但大量以经济利益为优先考虑的水电开发,不但给当地社会带来巨大影响,同时也导致了原有的河流生态环境发生复杂变化,造成藻类植物、浮游动物、底栖动物和鱼类等生物群落的组成、结构和功能发生改变。根据国家“十一五”规划中明确提出的“在保护生态基础上有序发展水电”的要求,迫切需要对该河段水生生物群落结构进行及时监测与评估,提出切实可行的水生生态保护方案,使水生生态系统、生物多样性得到有效保护。

然而,学者们关于大渡河老鹰岩河段的研究主要集中在地质灾害危险性评价及治理工程设计^[4]、老鹰岩滑坡成因机制与运动特征研究^[5]、水电开发特点及其空间格局分析^[6]、水电开发背景下的旅游资源开发^[7]等,针对梯级电站工程背景下环境保护与实践的研究也仅限于理论综述^[6],量化的水环境生物监测、水生生物群落结构组成、水质评价等方面尚属空白。此外,鉴于河流生态系统中水生生物特征对水环境变化的密切响应,利用生物学方法评价水质对河流监测具有重要作用^[8-11],但目前大多研究均采用单一生物类群进行水质评价^[12-18],综合多种生物类群共同评价水质的方法研究较少。本研究在实地调查的基础上,以大渡河老鹰岩河段的水生生态系统为对象,结合流域藻类植物、浮游动物、底栖无脊椎动物、鱼类的实际情况,对该河段水质进行综合不同生物类群的定量评价,以期为大渡河老鹰岩河段的生物多样性保护及生态监测等提供理论基础,为水电工程背景下的水生生态系统健康评价及流域生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大渡河(99°42' ~ 103°48'E, 28°15' ~ 33°33'N)发源于青海省果洛山东南麓,流经四川省阿坝、甘孜、雅安等地区。大渡河老鹰岩河段上起龙头石水电站厂房尾水,下至瀑布沟电站的回水末端,属大渡河中游,河段长约 23 km。其中龙头石坝址至安顺场(松林河口)长约 8 km,天然落差 21 m,河道平均坡降 2.63‰;安顺场(松林河口)至石棉长约 15 km,

天然落差 34 m,河道平均坡降 2.27‰。老鹰岩河段穿行于高山峡谷区,水面较窄,水深 5 ~ 10 m,上、下端流域面积 63 110 ~ 66 006 km²,区间流域面积 2 896 km²,多年平均流量 1 020 ~ 1 140 m³·s⁻¹,区间流量 120 m³·s⁻¹,平均比降 3.2‰ ~ 4.5‰,是典型的山区河流。大渡河老鹰岩河段地处中高山区,属四川盆地亚热带湿润气候区,多年平均气温 16.9℃,多年平均年蒸发量 1 637.5 mm,多年平均相对湿度 69%,多年平均风速 2.3 m·s⁻¹,多年平均年降水量 801.3 mm;河谷地区植被主要为农田和干旱河谷灌丛,乔木呈零星或小片集中分布,高海拔地区植被则以针叶林和阔叶林为主^[19]。

1.2 采样断面的设置

根据四川省大渡河老鹰岩河段兼顾干流与主要支流的地形特点、水文条件、鱼类分布、生态习性及其工程建设情况等,充分考虑采样断面的代表性、可比性和易达性,以便尽可能地代表该开发河段水生生物及环境的实际状况,于 2012 年 9 月从龙头石坝址下游处的断面开始,至老鹰岩三级坝址处的大渡河断面为止,自上而下共设立了 9 个水生生物采样断面:龙头石(LTS)、老鹰岩一级(LYY1)、松林河口下游 1.5 km(SLHK)、老鹰岩二级(LYY2)、老鹰岩三级(LYY3)、礼约河(LYH)、松林河(SLH)、小水河(XSH)、南桠河(NYH),对河段浮游生物、底栖生物,鱼类进行了采样分析。采样点布设详见图 1。

1.3 水生生物调查方法

在采样点的范围内进行断面采集,浮游藻类的样品采集使用采样器分别采集水面下 0.10、0.5 和 1.0 m 的水样各 1 L,混匀后立即加入 15 mL 鲁哥氏液固定,静置沉淀 24 h,吸去上清液,将剩余水样浓缩至 10 mL,作定量计数^[15,20],根据浓缩倍数计算藻细胞密度。浮游动物采用 2 500 mL 有机玻璃采水器采集,每个断面采水均为 2 次,每次随机采样 10 L,共 20 L 混合水样,用 25 号(网孔直径为 0.064 mm)浮游生物网过滤、浓缩成 1 L 水样,装入编号瓶内,用 30 mL 鲁哥氏液现场固定,静置 48 h 后定容 30 mL^[21]。底栖动物的调查用采样面积为 1/16 m² 的彼得逊采泥器采集,采得的泥样用 60 目分样筛小心淘洗和筛选。各类标本用 5% 的福尔马林液固定后带回实验室镜检^[22]。鱼类野外调查用网目 3 cm 的撒网,在大渡河龙头石电站尾水区至瀑布沟电站库尾河段的湾、沱、漕及各支流的河口处等进行捕捞,鉴定和统计所有捕捞鱼类的种类和数量。

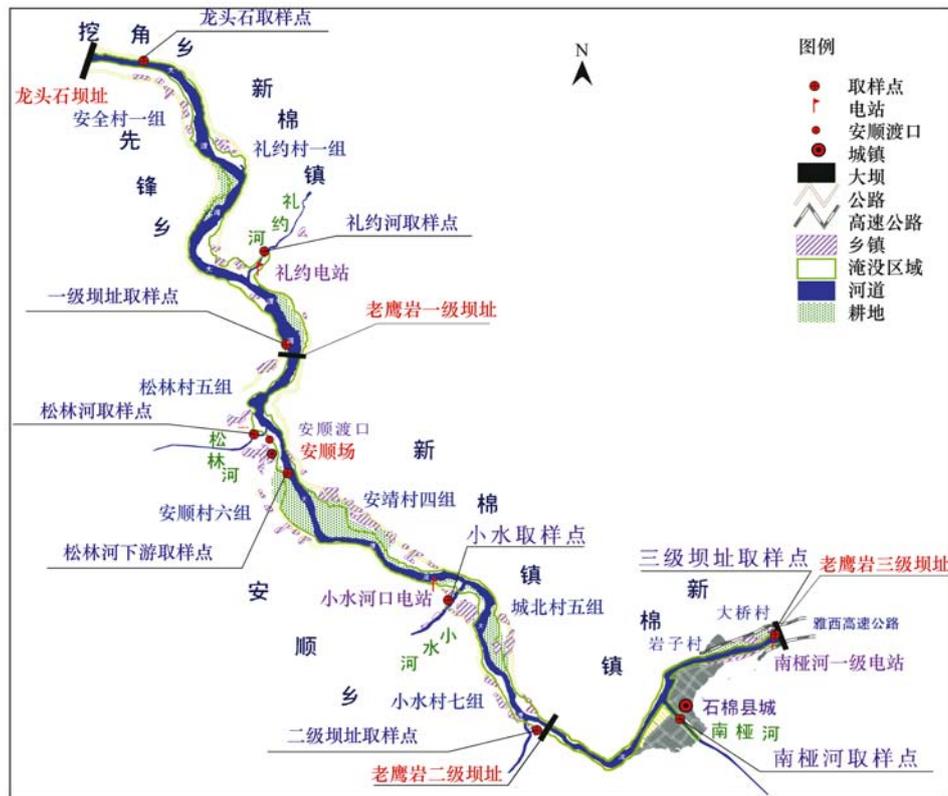


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.4 水质指标的采样及测定方法

于 2012 年 9 月,分别对老鹰岩河段设立的 9 个水生生物采样断面(图 1)进行采样,每个断面选取 2 个点(岸边大于 0.5 m 处和河中位置),每个采样点采集约 10 L 的样品,采样点尽量选择水流畅通和靠近主流地段,避开河流中回流区,死水区或污染源区,以保证取水断面水流混合相对均匀.此次的水样调查主要是进行现场的采样与检测,水样采集完后及时进行标记,并同时测定水温, pH 值及采样点的经纬度等信息.其余采样细节参考河流采样技术指导 HJ/T 52-1999^[23].

1.5 水质生物综合评价指数的建立

河流水环境与水生生物群落之间保持着相对平衡关系,若水环境发生污染和破坏,必将作用于生物个体、种群和群落,影响河流生态系统中固有生物种群的数量、物种组成及其多样性、稳定性等^[24,25].因此利用河流水质生物监测不仅能较好地反映出环境污染对生物产生的综合效应而且灵敏性高.同时,不同生物类群对水体的敏感性和反应不同,藻类的种群结构和污染指示种是水质生物学评价中的首要参数,在一定程度上可迅速反映水环境条件的改变和水质污染的程度;浮游动物中不少种

类对环境变化也比较敏感,其自身能积累和代谢一定量的污染物,发挥“水质净化器”的作用;大型底栖动物则因其行动能力差、寿命长、体型相对较大、易于辨认和分布广泛,已成为水体长期污染指示生物的主要选择对象^[8,26].因此,本研究试图利用不同生物类群建立河段水质生物综合评价指数 CEWI (comprehensive evaluation of water quality index),对河段水质状况进行定量分析,以期能对水环境质量做出全面的综合判断.公式为:

$$CEWI = \sum_{i=1}^n [W_i \times BI_i \times (3/VR_i)] \quad (1)$$

式中,CEWI 为河段水质生物评价指数; W_i 为专家打分法确定的第 i 类生物类群的权重; BI_i 为第 i 类生物类群的生物评价指数; VR_i 为第 i 类生物类群生物评价指数的取值范围; n 为选取的生物类群数.当 $CEWI = 0$ 为严重污染; $0 < CEWI \leq 1$ 为重度污染; $1 < CEWI \leq 2$ 为中度污染; $2 < CEWI \leq 3$ 为轻度污染; $CEWI > 3$ 为清洁.

1.6 生物评价指数的选取

多样性指数法能以藻类、浮游动物等种群结构和细胞密度的变化为基本依据,判定河流的营养状况、富营养化程度和发展趋势,其中

Margalef 丰富度指数 (d)、Shannon 多样性指数 (H') 值越大, 水质越清洁^[15]。而 Beck 生物指数 (B1) 则是利用底栖动物评价水质好坏的一个重要指标, B1 值越大, 水质越清洁, 目前已在多种水体 (如溪流、河流、湖泊和水库) 的水质生物学评价中广泛应用^[12-14, 27]。本研究根据老鹰岩河段水生生物群落结构实际情况, 综合考虑不同生物种类数量及生物量比例, 利用专家打分法^[28], 邀请水生生物方面的专家进行打分, 确定该河段

分别选用藻类植物的 Margalef 丰富度指数 (d)、浮游动物的 Shannon 多样性指数 (H') 和底栖无脊椎动物的 Beck 生物指数 (B1) 共 3 种生物类群的 3 个指标 (表 1) 进行水质综合评价, 经标准化处理后的 3 种生物类群权重分别为: 0.71、0.17、0.12; 并结合公式 (1) 生成该河段水质生物综合评价指数, 公式为:

$$CEWI = 0.71 \times d \times (3/3) + 0.17 \times H' \times (3/3) + 0.12 \times B1 \times (3/10) \quad (2)$$

表 1 生物多样性评价指数与河流水质对应关系^[12, 13, 27, 29]

Table 1 Biodiversity index and the corresponding relationship with water quality index

指数名称	表达式	评价标准	备注
Margalef 多样性指数 (d)	$d = \frac{S-1}{\ln N}$	$0 < d \leq 1$: 重度污染; $1 < d \leq 2$: 中度污染; $2 < d \leq 3$: 轻度污染; $d > 3$: 清洁	S 为样本的生物种类数; n_i 为样本中第 i 种生物的个体数; N 为样本中生物个体总数; A 为无明显污染环境中的生物种类; B 为耐中度有机污染的种类
Shannon-Wiever 多样性指数 (H')	$H' = - \sum_{i=1}^s (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$	$H' = 0$: 严重污染; $0 < H' \leq 1$: 重度污染; $1 < H' \leq 2$: 中度污染; $2 < H' \leq 3$: 轻度污染; $H' > 3$: 清洁	
Beck 生物指数 (B1)	$B1 = 2nA + nB$	$B1 = 0$: 严重污染; $1 \leq B1 \leq 9$: 中度污染; $B1 \geq 10$: 清洁	

2 结果与分析

2.1 研究河段的水体环境状况

由表 2 可知, 整个调查河段的海拔在 855 ~ 920 m 之间; 水体透明度的均值为 36.78 cm, 整体较为清洁; 其中 XSH 样点处透明度最高达 73 cm, 而

LYY2 与 LYY3 样点处透明度最低达 25 cm。整个河段水体偏酸性, 均值为 5.78; 干流与支流的 pH 值相当、变化不明显, 均呈弱酸性。平均水温约 17.11℃, 河水的平均流速约 2.86 m·s⁻¹, 平均溶氧量为 11.17 mg·L⁻¹, 一般不会影响到水生生物的存活。

表 2 各样点的环境指标¹⁾

Table 2 Environmental indices in different sampling sites

环境指标	干流断面					支流断面			
	LTS	LYY1	SLHK	LYY2	LYY3	LYH	SLH	XSH	NYH
经度/(°)	102.261 5	102.280 2	102.284 5	102.338 3	102.379 0	102.281 4	102.284 4	102.314 8	102.358 8
纬度/(°)	29.332 9	29.301 9	29.276 6	29.228 3	29.247 3	29.303 1	29.287 5	29.251 4	29.232 4
海拔/m	920	905	892	874	855	910	893	890	872
透明度/cm	36	34	26	25	25	35	27	73	50
pH	5.5	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5	6.5	5.5	5.5
温度/℃	16 ~ 16.9	17.4 ~ 17.6	18.6 ~ 18.8	16.5 ~ 17.0	16.1 ~ 16.3	16.8 ~ 17.4	17.0 ~ 17.1	18.0 ~ 18.3	16.0 ~ 16.2
河水流速/m·s ⁻¹	3.00 ~ 3.80	3.00 ~ 3.60	3.00 ~ 3.50	2.53 ~ 2.98	2.51 ~ 2.75	2.50 ~ 2.80	2.40 ~ 2.90	2.40 ~ 2.70	2.20 ~ 2.60
溶氧量/mg·L ⁻¹	11.07	10.80	11.35	11.54	11.20	8.90	12.64	12.41	10.62

1) 龙头石 (LTS)、老鹰岩一级 (LYY1)、松林河口下游 1.5km (SLHK)、老鹰岩二级 (LYY2)、老鹰岩三级 (LYY3)、礼约河 (LYH)、松林河 (SLH)、小水河 (XSH)、南桤河 (NYH), 下同

2.2 水生藻类植物区系组成与分布、密度与生物量

根据调查结果可知 (图 2, 表 3、4), 规划河段浮游植物共有 6 门 31 科 56 属 105 种, 硅藻门的物种最为丰富, 有 10 科 20 属 49 种, 占总物种数量的 46.67%; 其次为绿藻门, 14 科 23 属 34 种, 占 32.38%; 而红藻门与裸藻门数量最少, 分别有 2 科 2 属 2 种、1 科 1 属 2 种, 仅占 1.90%。从采样点物

种分布情况看, 礼约河、龙头石、小水河的物种最多, 分别有 55、54、52 种; 其次为老鹰岩一级电站坝址样点, 有 32 种; 而其它 5 个样点物种数量均少于 30 种。从优势类群的组成来看, 干流以硅藻门和绿藻门两大类别为优势类群, 其中以硅藻门植物为主; 龙头石样点因位于电站坝址下游, 河边建筑石料及工程弃渣较多, 为多种藻类在渣石缝隙中的生

存提供了条件,类群较为丰富;支流的藻类不管在物种数量还是在构成种群的个体数量方面,明显较干流丰富,尤其在礼约河和小水河两个断面较突出,其中礼约河样点以绿藻门的优美胶毛藻 (*Chaetophora elegans*) 和硅藻门的微细异极藻 (*Gomphonema parvulum*)、弧形短缝藻 (*Eunotia arcus*) 占绝对优势;而小水河样点则以绿藻门的莱哈衣藻 (*Chlamydomonas reinhardi*) 和小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 为优势类群. 从物种群密度和生物量来看(因黄藻门、红藻门、裸藻门的物种数量太少,故未作定量统计),以种群密度和生物量的大小,将9个样点分为3个阶层. 龙头石、礼约河、小水河的藻类种群生物量(湿重)相近,均超过了 $0.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 种群密度也是最大,均在 $14.0 \times 10^4 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,居第一阶层,其藻类植物类群之所以比较丰富,与采样点的位置有关;老鹰岩一级和

南桠河样点的生物量均大于 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 种群密度在 $7.41 \sim 9.54 \times 10^4 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 居第二阶层;其余4个点为第三阶层,其中松林河样点则因电站的阻隔和沿河居民的污染采集到的藻类植物不管是物种数量还是种群密度均为最低,仅发现了18种浮游藻类. 就类群的密度和生物量而言,硅藻门植物占有绝对优势.

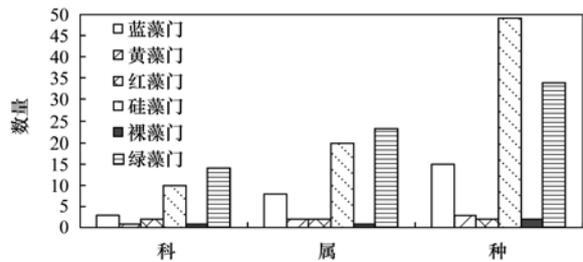


图2 水生藻类植物区系组成

Fig. 2 Flora composition of hydrobiontic algae

表3 各采样点水生藻类植物的种类数

Table 3 Species number of hydrobiontic algae in each sampling site

分类群	干流断面					支流断面			
	LTS	LYY1	SLHK	LYY2	LYY3	LYH	SLH	XSH	NYH
蓝藻门	8	3	1	5	2	5	0	9	5
黄藻门	2	0	1	1	1	2	1	2	1
红藻门	0	2	0	0	0	0	0	0	0
硅藻门	29	19	15	16	16	26	13	24	13
裸藻门	2	0	1	1	1	1	0	2	2
绿藻门	13	8	6	5	7	21	4	15	9
合计	54	32	24	28	27	55	18	52	30

表4 各采样点水生藻类植物种群密度及生物量

Table 4 Population density and biomass of hydrobiontic algae in each sampling site

采样点	蓝藻门		硅藻门		绿藻门		合计		
	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 /mg·L ⁻¹	密度 × 10 ⁴ /ind·L ⁻¹	生物量 /mg·L ⁻¹	
干流断面	LTS	15 361	0.004 8	116 692	0.314 6	17 544	0.024 4	18.338 4	0.355 2
	LYY1	10 217	0.000 7	41 427	0.265 2	8 873	0.017 0	9.544 0	0.285 2
	SLHK	5 443	0.000 4	36 638	0.144 9	8 977	0.003 9	6.614 4	0.161 1
	LYY2	13 351	0.003 5	41 122	0.177 3	5 500	0.004 9	7.750 0	0.194 2
	LYY3	8 773	0.000 6	30 225	0.112 4	6 112	0.006 8	5.688 6	0.127 6
支流断面	LYH	13 347	0.004 5	87 791	0.341 7	43 568	0.115 2	15.788 6	0.374 3
	SLH	/	/	25 144	0.089 4	4 452	0.003 4	4.300 8	0.092 5
	XSH	16 174	0.006 2	78 992	0.355 4	32 210	0.081 4	14.552 0	0.375 5
	NYH	11 662	0.007 1	39 925	0.247 2	6 500	0.048 4	7.412 2	0.265 7
均值	11 791	0.003 5	55 328.44	0.227 6	14 859.56	0.061 1	17.997 8	0.446 3	

2.3 浮游动物的区系组成与分布、密度与生物量

根据调查结果可知,规划河段浮游动物有3门4纲5目11科12属26种,其中原生动物门最为丰富,有2纲3目6科7属21种,占80.77%;假体腔动物门有1纲1目4科4属4种,占15.38%;而节

肢动物门最少,有1纲1目1科1属1种,仅占3.85%(图3);经分析比较,河段的浮游动物主要由根足纲的种类组成,占河段浮游动物种数的73.08%. 从采样点物种分布情况看(表5):干流断面为松林河口下游1.5km > 老鹰岩一级电站坝址 >

老鹰岩二级电站坝址 > 老鹰岩三级电站坝址 = 龙头石; 支流断面为南桠河 > 松林河 > 小水河 > 礼约河, 浮游动物的组成单一, 分布较少. 从物种密度与生物量来看(表 6), 该河段浮游动物的平均密度为 $40.89 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均生物量为 $13.26 \times 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中, 原生动物根足纲的平均密度与生物量最大, 分别为 $24.2 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $7.04 \times 10^{-4} \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总密度的 62.79% 和总重量的 53.26%; 其次是轮虫纲, 平均密度与生物量分别为 $9.89 \text{ ind}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.97 \times 10^{-4} \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总密度的 22.22% 和总重量的 19.89%, 整体河段浮游动物较为稀少, 种类较多的仅为原生动物. 总体上来看,

大渡河老鹰岩河段浮游动物群落组成较为简单, 种类和数量都偏少, 生物量偏低, 属于比较贫乏的水体.

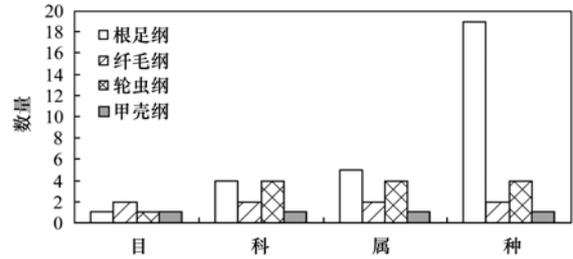


图 3 浮游动物的区系组成

Fig. 3 Flora composition of zooplankton

表 5 各采样点浮游动物的种类数

Table 5 Species number of zooplankton in each sampling site

分类群		干流断面					支流断面			
		LTS	LYY1	SLHK	LYY2	LYY3	LYH	SLH	XSH	NYH
原生动物门	根足纲	13	12	16	14	11	4	12	9	11
	纤毛纲	/	2	1	1	/	/	1	1	2
轮形动物门	轮虫纲	3	4	4	4	4	1	1	2	4
节肢动物门	甲壳纲	1	2	/	/	2	2	/	/	2
合计		17	20	21	19	17	7	14	12	19

表 6 各采样点浮游动物密度及生物量

Table 6 Population density and biomass of zooplankton in each sampling site

采样断面	原生动物门										轮形动物门		节肢动物门		合计	
	纤毛纲		根足纲		轮虫纲		甲壳纲		密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹		
	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹	密度 /ind·L ⁻¹	生物量 × 10 ⁻⁴ /mg·L ⁻¹								
干流断面	LTS	0	0	25	7.5	6	1.8	2	2.4	33	11.7					
	LYY1	8	2.4	28	8.4	12	3.6	5	6	53	20.4					
	SLHK	11	3.3	35	10.5	16	4.8	0	0	62	18.6					
	LYY2	6	1.8	29	8.7	12	3.6	0	0	47	14.1					
	LYY3	0	0	24	7.2	18	5.4	5	6	53	18.6					
支流断面	LYH	0	0	10	3	2	0.6	1	1.2	13	4.8					
	SLH	4	1.2	23	4.9	3	0.9	0	0	30	7					
	XSH	4	1.2	18	5.4	5	1.5	0	0	27	7.3					
	NYH	7	2.1	26	7.8	15	4.5	2	2.4	50	16.8					
	平均	4.44	1.33	24.2	7.04	9.89	2.97	1.67	2.0	40.89	13.26					

2.4 底栖动物的区系组成与分布、密度与生物量

根据调查结果可知, 规划河段的底栖无脊椎动物有 6 门 7 纲 11 目 14 科 14 属 14 种, 其中昆虫纲最为丰富, 有 5 目 8 科 8 属 8 种, 占 57.16%, 最常见的是蜉蝣目的扁蜉 (*Eedyrus* sp.)、二翼蜉 (*Cloron* sp.)、毛翅目的纹石蛾 (*Hydropsyche* sp.) 以及襁翅目的石蝇 (*Perlodas* sp.), 其他种类均少. 从物种的分布上来看, 礼约河和小水河两条支流中的底栖动物相对分布较多, 干流中的分布相对较少, 而支流松

林河中的底栖动物较为贫瘠. 从物种密度与生物量来看(表 7), 底栖无脊椎动物的平均密度是 $20.33 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均生物量为 $19.11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中, 昆虫纲的种类平均密度最大 ($12.6 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), 其余的甲壳纲、腹足纲、寡毛纲、无尾感器纲、涡虫纲和纤毛纲的平均密度均较小, 且差异不大. 从生物量的角度看, 无尾感器纲的平均生物量最大 ($6.60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 其次是甲壳纲 ($4.74 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 平均生物量最小的是腹足纲 ($0.38 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$).

表 7 各采样点底栖动物密度及生物量¹⁾

Table 7 Population density and biomass of zoobenthos in each sampling site

采样断面	昆虫纲		甲壳纲		腹足纲		寡毛纲		无尾感器纲		涡虫纲		纤毛纲		合计	
	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量	密度	生物量
LTS	21	1.35	0	0	3	1.45	1	3.61	0	0	0	0	0	0	25	6.41
干流断面 LYY1	5	0.12	3	10.84	0	0	1	3.51	2	6.10	0	0	0	0	11	20.57
SLHK	15	1.22	0	0	0	0	3	2.57	2	6.36	0	0	3	2.65	23	12.79
LYY2	0	0	1	3.62	0	0	5	6.89	8	24.70	0	0	5	4.85	19	40.06
LYY3	10	0.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1.98	12	2.25
支流断面 LYH	32	2.04	5	18.06	2	0.97	0	0	1	3.13	5	15.79	0	0	45	39.99
SLH	2	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.06
XSH	21	1.68	1	3.03	2	0.96	0	0	0	0	4	13.00	0	0	28	18.68
NYH	7	0.22	2	7.14	0	0	3	4.70	6	19.09	0	0	0	0	18	31.14
平均	12.6	0.77	1.33	4.74	0.78	0.38	1.44	2.36	2.11	6.60	1.0	3.20	1.11	1.05	20.33	19.11

1) 密度单位: ind·m⁻²; 生物量单位: g·m⁻²

2.5 河段水质的生物学评价

通过对各个采样点水质生物综合评价指数 CEWI 的分析结果显示(表 8),大渡河老鹰岩河段及其支流的水质在 LYY1、LYH 两个断面最为清洁(CEWI>3);而在 SLH、NYH 两个断面则为中度污染,其中 SLH 样点水质最差,CEWI 值最小,达 1.6207;其余 5 个断面均受到不同程度的轻度污染.综合藻类植物的 Margalef 丰富度指数(*d*)、浮游

动物的 Shannon 多样性指数(*H'*)和底栖无脊椎动物的 Beck 生物指数(BI)这 3 个指标可知,LYH 受干扰最轻,*d* 值和 *H'* 值最高,分别为:3.24、6.13;而 SLH 受干扰最重,*d*、*H'*、BI 值最低,分别为:1.68、1.67、4,需加强保护.同时,利用 R 软件进行相关性分析可知(表 9),CEWI 和各单项水质评价指数间均呈极显著的正相关,相关系数均在 0.85 以上,与各单项水质评价指数结果表现出高度的一致性.

表 8 各样点水质评价结果

Table 8 Result of water quality in different sampling sites

采样点	<i>d</i>	<i>H'</i>	BI	CEWI	水质	
LTS	2.73	3.24	14	2.993 1	轻度污染	
LYY1	2.57	3.67	18	3.096 6	清洁	
干流断面 SLHK	2.47	3.29	14	2.817 0	轻度污染	
LYY2	2.60	1.76	5	2.325 2	轻度污染	
LYY3	2.77	2.07	9	2.642 6	轻度污染	
支流断面 LYH	3.24	6.13	17	3.954 5	清洁	
SLH	1.68	1.67	4	1.620 7	中度污染	
XSH	2.65	3.15	13	2.885 0	轻度污染	
NYH	1.86	1.91	8	1.933 3	中度污染	
均值	/	2.51	2.99	11.33	2.698 28	轻度污染

表 9 水质评价综合指数与单项指数的相关性分析¹⁾

Table 9 Correlation between CEWI and single indexes

单项水质评价指数	水质评价综合指数 CEWI	
	<i>r</i>	<i>P</i>
<i>d</i>	0.912 865 1	0.000 59 **
<i>H'</i>	0.923 657 3	0.000 38 **
BI	0.871 222 6	0.002 22 **

1) ** 表示 *P* < 0.01, 极显著

3 讨论

3.1 水生生物群落结构现状及影响因素分析

大渡河老鹰岩河段水生生物物种数量较为丰富,干流以硅藻门和绿藻门两大类别为优势类群,代

表物种有弧形峨眉藻(*Ceratoneis arcus*)、窗格平板藻(*Tabellaria fenestrata*)、钝脆杆藻中狭变种(*Fragilaria capucina* var. *mesolepta*)和线形菱形藻(*Nitzschia sublinearis*);支流的藻类明显较干流丰富,绿藻门和硅藻门植物仍占绝对优势,其中绿藻门植物代表种为优美胶毛藻(*Chaetophora elegans*)、莱哈衣藻(*Chlamydomonas reinhardi*)和小球藻(*Chlorella vulgaris*);硅藻门的代表种为微细异极藻(*Gomphonema parvulum*)、弧形短缝藻(*Eunotia arcus*).另外,水样观察结果显示有 4 个藻类类群为 9 个断面所共有,分别为双头针杆藻(*Synedra amphicephala*)、简单舟形藻(*Navicula simplex*)、微

细异极藻和小球藻 (*Chlorella vulgaris*), 其中有 3 个类群为硅藻类。因硅藻富含蛋白质, 成为鱼类直接或间接的最主要饵料。浮游动物主要由根足纲的种类组成, 占整个河段浮游动物种数的 73.08%。总体而言, 浮游动物的组成单一, 生物量偏低, 数量较少。底栖无脊椎动物昆虫纲最多, 其他种类均少, 最常见的是蜉蝣目的扁蜉 (*Eedyrus* sp.)、二翼蜉 (*Cloron* sp.)、毛翅目的纹石蛾 (*Hydropsyche* sp.) 以及襁翅目的石蝇 (*Perlodas* sp.), 在礼约河和小水河这两条支流中相对分布较多, 干流中的分布相对较少。河段调查共采集到鱼类标本 2 目 3 科 11 种 155 尾, 鲤科鱼类最多, 占 64.15%; 从渔获物组成看, 麦穗鱼 (*Pseudorasbora parva*) 的重量及尾数最多, 与齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*)、宽鳍鱮 (*Zacco platypus*) 构成该河段的优势类群。

大渡河老鹰岩河段水生生物种群数量、种群密度及生物量总体上较低。从藻类植物和浮游动物的分布来看, 大渡河的支流礼约河及小水河两个断面的物种数量、种群密度和生物量较高, 水质较清洁。浮游藻类和浮游动物作为鱼类直接或间接的饵料, 从食物链角度来看, 还不足以满足大量鱼群生存的需要, 所以鱼类种群较小。大坝的修建在一定程度上促使饵料生物的演替, 对不同类型鱼类产生差异性的影响。如对鲤 (*Cyprinus carpio*)、宽鳍鱮 (*Z. platypus*)、麦穗鱼 (*P. parva*) 等部分适应性强、不洄游或洄游距离短鱼类影响不大, 甚至是有利的; 但对齐口裂腹鱼 (*S. prenanti*)、墨头鱼 (*Garra pingi*)、重口裂腹鱼 (*S. davidi*)、短须裂腹鱼 (*S. wangchiachii*)、黄石爬鮡 (*Euchiloglanis kishinouyei*) 等部分长距离巡游习性的鱼类, 或典型的急流、流水环境的适应者和特化者, 则会产生较大不利影响。同时电站大坝的建设也会使鱼类上行通道被阻断, 对鱼类的遗传交流产生一定的阻隔影响。同历史资料相比^[30,31], 本次采集到的鱼类种类和数量较少, 且经济鱼类和特有鱼类的个体都比较小, 有小型化趋势, 说明老鹰岩河段鱼类资源已经较为贫乏, 跟近年来过度捕捞、生态环境变化等因素有关。

3.2 水质的生物评价及合理性分析

综合水质生物综合评价指数 (CEWI) 与单一生物类群的水质评价指数值可知, 大渡河老鹰岩河段水质整体上属于轻度污染水体, 但在 SLH、NYH 样点呈现出中度污染的特征; LYY1、LYH 样点的水质均优于其他样点, 为清洁水质。引起水质时空差异的主要影响因素: ①人畜的活动、垃圾的倒入和

生活污水的排入等污染源导致位于居民生活区附近的采样点水质情况较差, 而远离居民区的采样点的水质状况相对稍好。②LYH 的多样性指数较高原因在于它属于大渡河的支流, 其水流缓慢, 泥沙沉淀程度高, 水体透明度高, 有利于浮游动物和底栖动物的生存和繁衍, 其余采样点水流湍急, 水中泥沙含量大, 透明度低, 故浮游生物相对较少。

本研究以大渡河老鹰岩河段水生生物结构为基础, 分别利用藻类植物的 Margalef 丰富度指数 (d)、浮游动物的 Shannon 多样性指数 (H') 和底栖无脊椎动物的 Beck 生物指数 (BI) 评价方法, 共同构建水质生物综合评价指数 (CEWI); 经相关性分析验证水质生物综合评价指数与各单项水质评价指数结果表现出高度的一致性, 降低了以某个类群或某些特征进行评价所带来的误差, 更准确地反映了大渡河老鹰岩河段的水质现状。从结果上看与夏杰^[32]对该河段上游水环境的研究认为该河段水质基本良好, 除个别断面的个别时期含 TN 外, 其余监测指标均达到 III 类水质标准的结果完全吻合; 同时对照各样点水体的 pH 值、透明度、溶氧量指标及生物物种数量、种群密度和生物量, 与该河段水质整体上属于轻度污染水体的结论保持一致; 进一步说明该评价指数可靠合理。

4 结论

(1) 大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构较为简单, 水生生物种群数量、种群密度及生物量总体上较低。其中, 浮游植物主要是浮游藻类共 6 门 31 科 56 属 105 种; 浮游动物共 3 门 4 纲 5 目 11 科 12 属 26 种; 底栖无脊椎动物共 6 门 7 纲 11 目 14 科 14 属 14 种; 鱼类共 10 科 45 属 53 种。

(2) 大渡河老鹰岩河段水质整体属轻度污染。其中, SLH、NYH 样点呈现出中度污染的特征; LYY1、LYH 样点的水质在两个采样点为清洁水质; 其余 5 个断面均受到不同程度的轻度污染。

(3) 随着梯级电站的建设和运营, 大渡河老鹰岩河段的水环境已存在一定的污染, 但只要措施得当、管理到位, 水电项目的建设会促进当地经济发展, 也是响应绿色经济发展潮流的举措。

参考文献:

- [1] 付兴友. 试论大渡河流域水电开发的龙头地位及作用[J]. 四川水力发电, 2013, 32(1): 88-94, 119.
- [2] 赵勇, 许模, 郭健, 等. 大渡河双家坪古平推式滑坡堆积特征及形成机制[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 58-64.
- [3] 钟青祥, 何红荣, 杨忠伟, 等. 大渡河流域梯级水电站集控

- 中心“调控一体化”系统的建设与运行[J]. 水电自动化与大坝监测, 2014, **38**(1): 63-66.
- [4] 景泽. 青川县马鹿乡老鹰岩地质灾害危险性评价及治理工程设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2010. 32-41.
- [5] 裴向军, 郝永峰, 张军新, 等. 老鹰岩滑坡成因机制与运动特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, **21**(4): 28-32.
- [6] 陈刚, 刘四华. 大渡河流域水电开发环境保护研究与实践[J]. 水力发电, 2010, **36**(6): 29-32.
- [7] 黄强. 大渡河上游水电开发背景下旅游领域若干重大问题研究[J]. 理论与改革, 2009, **36**(6): 152-155.
- [8] 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.
- [9] 牛红义, 吴群河. 水污染监测技术发展动向初探[J]. 环境科学动态, 2005, (2): 60-62.
- [10] 谢建春. 水体污染与水生动物[J]. 生物学通报, 2001, **36**(6): 10-11.
- [11] Szczepocka E, Szulc B, Szulc K, *et al.* Diatom indices in the biological assessment of the water quality based on the example of a small lowland river [J]. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 2014, **43**(3): 265-273.
- [12] 袁聿军. 大型底栖动物对淡水水质生物评价的研究进展[J]. 生物学通报, 2014, **49**(11): 1-4.
- [13] 刘其根, 查玉婷, 陈立侨, 等. 浙江分水江水库大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1377-1384.
- [14] 蔡永久, 刘劲松, 戴小琳, 等. 长荡湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(5): 1224-1232.
- [15] 马永红, 曾燊, 任丽萍, 等. 嘉陵江四川段藻类植物群落结构及水质评价[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2573-2579.
- [16] 林青, 由文辉, 徐风洁, 等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2014, **34**(23): 6918-6929.
- [17] 苏玉, 王东伟, 文航, 等. 太子河流域本溪段水生生物的群落特征及其主要水质影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(8): 1801-1808.
- [18] 王爱爱, 冯佳, 谢树莲. 汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 915-923.
- [19] 张海东. 项目群管理在大渡河流域水电开发中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2012. 29-32.
- [20] 邓洪平, 陈锋, 王明书. 嘉陵江南充段硅藻群落结构及水环境分析[J]. 水生生物学报, 2008, **32**(4): 586-591.
- [21] 徐杭英, 于海燕, 韩明春, 等. 浙江饮用水源地浮游动物群落特征及环境响应[J]. 生态学报, 2015, **35**(21): 7219-7228.
- [22] 沈洪艳, 曹志会, 刘军伟, 等. 太子河流域大型底栖动物功能摄食类群与环境要素的关系[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 579-590.
- [23] HJ/T 52-1999, 河流采样技术指导[S].
- [24] Li W K W. Macroecological patterns of phytoplankton in the northwestern North Atlantic Ocean [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 154-157.
- [25] 杨敏, 张晟, 刘朔孺. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2480-2486.
- [26] 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 等. 天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3952-3958.
- [27] 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.
- [28] 王涛. 重庆市阿蓬江湿地景观质量评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013. 4-5.
- [29] 刘曼红. 呼兰河口保护区及周边水域水生动物生态监测与健康评价[D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2012. 1-4.
- [30] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 50-61.
- [31] 乐佩琦. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(下卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 32-68.
- [32] 夏杰. 大渡河庐定段水环境容量研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009. 20-34.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行