

黄河流域底栖动物调查研究进展

李学军¹,张景晓¹,于森¹,董静¹,高云霓¹,张曼¹,秦祥朝²,周艳丽²

(1.河南师范大学 水产学院,河南 新乡 453007;

2.生态环境部黄河流域生态环境监督管理局 生态环境监测与科学研究中心,郑州 450004)

摘要:底栖动物是水生态系统的重要组成部分之一,其群落结构和多样性对于监测水体的营养状况和维护水生生态系统的健康具有重要意义.黄河是中华民族的母亲河,是连接三江源、祁连山、汾渭平原、华北平原等一系列“生态高地”的巨型生态廊道,具有重要的生态功能.目前,黄河流域水生态环境监测主要以水质监测为主.受黄河特殊的水文条件和生境异质性等因素影响,黄河流域底栖动物的调查研究开展较少且数据较为分散,缺乏系统的分析研究.为此,系统总结了黄河流域干支流及其附属水体底栖动物的研究进展,以期为实现黄河流域生态保护和高质量发展提供科学支撑.

关键词:黄河流域;底栖动物;群落结构;水生态健康评价

中图分类号:Q958

文献标志码:A

黄河发源于青藏高原,位于 $95^{\circ}53'E\sim 119^{\circ}05'E,32^{\circ}10'N\sim 41^{\circ}50'N$ 之间,南以秦岭为界,北至阴山,向东汇入渤海,流域面积约80万 km^2 ,东西总长约1900 km,南北宽约1100 km.黄河是世界第五长河、中国第二大河,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东9个省区,是中华民族的母亲河^[1].黄河是“青藏高原生态屏障”、“黄土高原—川滇生态屏障”和“北方防沙带”的重要组成部分,构成了西北重要的生态屏障,是连接青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道.在我国“两屏三带”为主体的生态安全战略格局中占据重要地位^[2].习近平总书记对黄河流域生态环境保护工作高度重视,先后多次实地考察黄河流域生态保护和高质量发展情况,黄河流域生态保护和高质量发展已成为重大国家战略.

开展黄河流域底栖动物的调查研究,对于黄河流域生态保护具有重要意义.底栖动物是指其生活史的全部或大部分时间生活于水体底部的一类生物,是水生态系统的重要组成部分,在调节水生生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要功能.底栖动物的寿命长,迁移能力弱,对环境条件变化敏感,可综合反映水体长期的健康状况,是用于水生态环境监测的理想指示生物^[3].通过调查黄河流域底栖动物,有助于深入了解黄河流域生态系统的结构和功能,对黄河流域水环境状况监测和完善黄河流域水生态健康评价体系具有重要意义.本文从底栖动物群落结构组成、水生态健康评价应用和影响底栖动物分布的环境因子3个方面入手,系统总结了黄河流域干流、支流及其重要附属水体(湖库)的底栖动物研究进展,以期为黄河流域水生生物群落结构的系统性研究提供数据支撑,助力黄河流域生态保护和高质量发展.

1 黄河流域底栖动物群落结构组成

1.1 黄河干流

黄河干流全长5464 km,全河可分为河源区、上游、中游和下游3段.其中,河源区是指唐乃亥水文站以上的黄河流域,涉及青海、四川和甘肃三省,是全流域重要的产水区和水源涵养区;上游从青海唐乃亥至内蒙

收稿日期:2021-06-19;修回日期:2021-08-16.

基金项目:国家自然科学基金(U1904124);河南省重大公益专项项目(201300311300);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(212102310842);河南师范大学科研启动课题(5101229170133).

作者简介(通信作者):李学军(1967—),男,河南新乡人,河南师范大学教授,博士生导师,研究方向为水域生态学, E-mail: xjli@htu.cn.

古托克托县的河口镇,主要位于青藏高原、宁蒙河套地区,区域覆盖青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区,此流域河道较长,摆动剧烈,形成了众多的滩地和沼泽湿地;黄河中游是指自河口镇至河南省郑州市桃花峪的河段,包括陕西省、山西省、内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、河南省,中游泥沙含量明显增多,河川径流的季节性变化较大,生境稳定性较差;下游从郑州花园口至东营入海口,包括河南省和山东省,河道横贯华北平原,河道宽阔平坦,绝大部分河段仅靠堤防约束,成为海河流域与淮河流域的分水岭^[4]。总体来看,黄河干流流速大,底质多为颗粒较细的流沙底质,底栖生物采集难度较大。目前,有关黄河干流底栖动物的调查研究主要集中在上游和部分支流入干区。1981—1982年,由大连水产学院和青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河南、山东 8 省区成立的渔业调查协作组,对黄河干流从河源区到下游共计 18 个断面的渔业资源进行了系统的摸底调查,共采集到底栖动物 71 种,其中以摇蚊科幼虫最多,共计 38 种;黄河干流的底栖动物平均生物量为 2.44 g/m²,其中摇蚊科幼虫 1.9 g/m²,占总生物量的 77.71%,水生昆虫占 13.95%,软体动物占 8.02%^[4]。2003—2007 年,袁永锋等^[5]先后 9 次对黄河干流中上游河段的水生生物资源进行了调查,共采集到底栖动物 14 种,其中以萝卜螺(*Radix* sp.)、钩虾(*Gammarus* sp.)和摇蚊幼虫分布较为广泛。2002—2007 年,沈红保和李科社对黄河上游进行渔业资源调查时,共鉴定出底栖动物 18 种^[6]。蒋晓辉和王洪铸于 2008 年春季(4~6 月)和秋季(9~10 月)分别对黄河干流刘家峡以下约 3 800 km 中的 17 个干流河段和 4 个水库的水生生物资源进行了调查,并分析了黄河干流水生态系统理化特征和生物群落结构的沿程变化,此次调查共采集到底栖动物 73 种,隶属 28 科 56 属,其中昆虫种类数最高,有 17 科 40 属 47 种,占总数的 65%;其次为寡毛类,有 2 科 7 属 17 种,占总数的 23%;软体动物和其他动物各有 5 科 5 属 5 种,各占总数的 7%,物种数分布依次为中游(19 种),上游(14 种),下游(10 种),2008 年黄河干流水生生物状况与 20 世纪 50、80 年代相比,除底栖动物外其他生物种类和数量均有明显下降^[7]。褚可成等^[8-9]对黄河兰州段的底栖动物进行了调查,2013 年共发现底栖动物至少 17 种,其中甲壳动物 1 种,水生昆虫至少 5 种,环节动物 7 种,软体动物 2 种,线虫动物 1 种,2018 年共发现底栖动物至少 22 种,数量有所增加。总体上,甲壳动物、水生昆虫和环节动物为各个断面的优势种。谢元等^[10]于 2015 年 4 月和 10 月在黄河流域湟水、汾河、渭河和洛河等支流入干区进行了底栖动物监测,4 个人干区春秋两季共采集到底栖动物 53 种,隶属于 25 科 47 属,种属数量排序为洛河(28 种)>湟水(26 种)>汾河(23 种)>渭河(17 种)。舒凤月等^[11]于 2015 年 5 月对黄河山东段河岸带 8 个断面的底栖动物群落进行了系统调查,共采集到 37 种底栖动物,其中水生昆虫 27 种,河岸带大型底栖动物的平均密度为(2 129±436)ind/m²,平均生物量为(2.20±0.75)g/m²。

黄河干流底栖动物群落结构的显著特点是种、量皆少,这与黄河干流的水沙特点密切相关。独特的地理位置使黄河流域呈现“水少沙多、水沙异源”的特点,大面积的水土流失使黄河多年平均来沙量达 16 亿 t,年最大来沙量达 39 亿 t,为世界产沙河流之最^[12]。黄河干流上游至唐乃亥泥沙变化不大,泥沙含量从兰州、头道拐开始增加,黄河中游集中了绝大多数支流,这些支流带入大量泥沙,使干流中下游泥沙含量急剧增加^[13]。高流速和水中的悬浮泥沙会造成底栖动物的漂移和机械损伤,影响其摄食效率,对底栖动物的生存和生长产生严重影响^[14]。黄河干流底栖动物在含沙量较高的中游段,种类和生物量极少,干流下游区仅在枯水期可采集到底栖动物。黄河水流湍急,特别是汛期水流量急剧增加,含沙量也增大,两者的作用相互结合,是黄河干流底栖动物贫乏的重要原因之一。

1.2 黄河支流

黄河先后有 13 条重要支流汇入,这些支流分布在从上游青海至下游山东的 9 个省份。湟水发源于大坂山南麓青海省海晏县境,于甘肃省永靖县汇入黄河,是黄河上游最大的支流。李宁等^[15]对湟水河上游底栖动物的群落结构进行了全面调查,2015 年共鉴定出底栖动物 28 科 57 属 59 种,其中昆虫纲 7 目 54 种,占有底栖动物种类的 91.5%,个体数占有底栖动物数量的 76.4%。2016—2017 年共采集到底栖动物 8 目 25 科 42 属种,密度为 15~394 ind/m²,其中水生昆虫为优势类群,占总物种数的 86%;2018 年共鉴定出底栖动物 42 个分类单元,隶属于 2 纲 6 目 28 科,蜉蝣目四节蜉属(*Baetis* sp.)为第 1 优势种(35.5%)^[16-17]。

若尔盖湿地区发育的白河与黑河均为黄河上游段的重要支流,每年为黄河干流提供的水量占黄河年径流总量的 30%~40%^[1]。其中,白河发源于黄河流域最南端,于若尔盖县唐克镇入汇黄河干流。ZHOU 等^[18]于 2015—2016 年对白河的底栖动物现状进行了调查,两次采样工作共采集底栖动物样本 24 468 个,隶属于

37科73属73种,各采样点中水生昆虫的相对密度为3.7%~100%(52.5±33.2%),EPT类群(蜉蝣目 Ephemeroptera, 襁翅目 Plecoptera, 毛翅目 Trichoptera)的相对密度为0~87.0%(10.4±24.8%),底栖动物丰度为3~22(12±6),密度为8~4 700 ind/m²(844±1 082 ind/m²),生物量为0.001 1~1.115 4 g/m².

洮河是黄河上游的一级支流,是黄河水量的主要补给源^[19].曲修杰^[20]在黄河玛曲段及洮河、大夏河等黄河支流共采集到底栖动物12种,隶属于3门4纲12科,平均生物量为116.4 ind/m²和6.256 g/m²,生物量最大的类群为蜉蝣目,其次是毛翅目、半翅目和双翅目,优势种为四节蜉(*Cloeon* sp.)和扁蜉(*Ecdyru* sp.).郭小芳^[21]等对位于洮河干流的齐家坪水电站河段的底栖动物进行了调查,共监测到底栖动物12种,主要是水生昆虫(34 ind/m²)和寡毛类(21 ind/m²).

清水河发源于六盘山东麓,由中宁县泉眼山汇入黄河,是黄河宁夏段最大的一级支流,也是宁夏水土流失最严重的河流,每年输入黄河的泥沙约占宁夏入黄总沙量的49%^[22].2011年10月此里能布等^[23]对清水河流域15个样点进行了底栖动物调查,共采集到底栖动物33种,隶属于3门6纲,其中水生昆虫17种,寡毛纲4种,软体动物9种,优势种为霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、环棱螺(*Bellamya* sp.)和蚰,底栖动物平均密度为31.2 ind/m²,生物量平均值为5.91 g/m².2012年10月王振钟等^[24]在清水河流域设置了19个监测点位,共采集到底栖动物47种,数量最多的为水生昆虫27种(占57.4%),底栖动物丰度为20~533.3 ind/m²(平均141.8 ind/m²),生物量范围为0.157~62.393 g/m²(平均10.523 g/m²).

汾河是黄河的第二大一级支流,也是山西境内的第一大河流^[25].作为山西省煤炭经济最为集中的地区,汾河流域历史上面临着严峻的生态环境污染问题.近年来,有关汾河流域的底栖动物生态调查研究也在逐步开展.2009—2010年,李文华等^[26]对汾河的渔业资源现状进行了调查,在汾河上游静乐段共采集到底栖动物15种,其中昆虫纲6种.李安萍等^[27-28]于2014年分别对汾河兰村段和太原段底栖动物群落结构进行了调查,在兰村段共发现大型底栖动物37种,隶属于4门4纲,其中节肢动物占总数的56.76%,优势种为苏氏尾鳃蚓(*Branchiura dowerbyi*)、摇蚊幼虫、霍甫水丝蚓、中华颤蚓(*Tubifex sinicus*)和白旋螺(*Cyraul* *albus*),平均密度和生物量为801 ind/m²和592.4 g/m²;在太原段共发现大型底栖动物46种,隶属于4门6纲27科,物种属多于兰村段,平均密度和生物量为226 ind/m²和10.5 g/m².2016年王林芳等^[29]对汾河上中游调查时,共采集到底栖动物37属(种),平均密度为8 977 ind/m²,昆虫纲有20属(种),其中EPT分类单元有4种,常见敏感种为四节蜉.

渭河是黄河的最大支流,发源于甘肃渭源县,流经甘肃、宁夏、陕西三省,有泾河和洛河两大支流,全长818 km,由陕西潼关最终汇入黄河^[30].2011—2013年殷旭旺等先后4次对渭河流域底栖动物的群落结构进行了系统调查,共计鉴定出底栖动物116种,隶属于7纲16目56科,主要以水生昆虫(占78.4%)和软体动物(10.3%)为主,水生昆虫主要由EPT类和双翅目的摇蚊幼虫组成;渭河流域底栖动物的种类数表现为支流多于干流,丰水期底栖动物密度大于枯水期;渭河、泾河和洛河的上游物种数高于下游,渭河流域底栖动物密度较高的区域位于渭河干流及支流,而密度较低的区域集中于泾河全流域及洛河下游^[31-33].渭河干流关中段和陕西段的底栖动物优势类群则以耐污种摇蚊与颤蚓类为主^[34].杨海强等^[35]于2017—2018年对渭河干流及其秦岭北麓典型支流的底栖动物群落结构进行了调查,共鉴定大型底栖动物210种,属于5门8纲75科187属,优势类群为水生昆虫(占89%),且四节蜉属一种作为绝对优势种出现在所有调查河流中,源于秦岭北麓的支流石头河底栖动物总密度最高(616.3 ind/m²),总生物量最大(5.265 g/m²),而渭河干流底栖动物总密度最低(125.6 ind/m²),总生物量最小(0.289 g/m²).

沁河发源于山西省沁源县的霍山南麓,由北向南流经山西省和河南省,于河南省武陟县汇入黄河,为黄河左岸的一级支流^[36].左中原等^[37]对沁河干流区域底栖动物的群落结构进行了调查,共采集到底栖动物3门5纲12种,其中昆虫纲动物6种.惠晓梅等^[38]于2017年对沁河山西段大型底栖动物进行了调查,共鉴定出大型底栖动物38种,隶属于4门7纲17目31科,昆虫纲的相对密度占比最大(占43.1%),双壳纲的相对生物量占比最大(占64.5%),底栖动物的平均密度为165 ind/m²,平均生物量为22.29 g/m².

大汶河又称汶水,是黄河流域山东段重要支流之一.发源于山东旋崮山北麓,自东向西流经山东济南、泰安等地区,下游又称大清河,最终汇注东平湖,经东平湖清河口出湖闸入黄河^[39].祁泽慧^[40]在大汶河流域共鉴定出底栖动物16种,分属于节肢动物门和软体动物门.2008年7月,张莹等^[41]对小清河口底栖动物群落

多样性特征进行了研究,共采集到底栖动物 38 种,隶属于 4 门 6 纲 35 科 37 属.刘春彤等^[42]于 2014 年 5 月至 2015 年 10 月在小清河 7 个采样点共采集并鉴定的底栖动物共 35 种,隶属于 7 纲 11 目 11 科,其中软体动物种类最多,共 14 种.汪峰等^[43]于 2015 年 5 月调查了小清河流域春季底栖动物的群落结构,共采集到底栖动物 23 种,平均密度为 1.19×10^3 ind/m².

1.3 黄河水系附属水体

扎陵湖与鄂陵湖是黄河源头两个最大的高原淡水湖泊,平均海拔超过 4 100 m.1981 年和 1982 年两湖共发现底栖动物 20 种,其中双翅目中摇蚊幼虫 14 种,隶属于 3 亚科 12 属;环节动物 2 种,为寡毛类和中华颈蛭(*Limnotrachelobdella sinensis*);软体动物 2 种,为扁螺(*Segmentinan nitidella*)和蚬(*Corbicula fluminea*);甲壳动物 1 种,为钩虾^[44].

沙湖是由黄河古河道洼地经过山洪刨蚀、地下水溢出汇集,并接受大气降水和地表水的补给而形成,是宁夏最大的天然半咸水湖泊.刘锦霞等^[45]于 1999 年对沙湖自然保护区的水生生物进行了调查与分析,共采集到底栖动物 29 种,其中水生昆虫 20 种(70%),平均密度为 546 ind/m².近年来沙湖水体富营养化日益严重,出现了水质退化等环境问题,导致大型底栖动物的种类和数量出现下降.苗藤等^[46]于 2013 年对沙湖底栖动物群落结构进行了调查分析,共采集到底栖动物 11 种,优势种为铜锈环棱螺和中华圆田螺(*Cipangopaludina chinensis*).贾铭宇等^[47]于 2013 年春季、夏季和秋季设置 8 个采样点调查了沙湖的大型底栖动物群落结构,共采集到 17 种大型底栖动物,其中直突摇蚊亚科与摇蚊亚科是主要组成种群,长足摇蚊亚科、椎实螺科、颤蚓科、长臂虾亚科分布较少.

乌梁素海是黄河改道形成的河迹湖,是内蒙古重要生态屏障“两湖一海”之一.近年来,随着乌梁素海自然补给水量不断减少,而城市污水和工业废水排放明显增加,导致乌海湖区面积急剧减少,湖泊生态功能严重退化.作为黄河流域典型的生态脆弱区之一,乌梁素海生态治理日益引起人们的关注.谢祚浑等^[48]曾在 1975—1994 年对北方盐碱水域中调查时,在乌梁素海中共采集到底栖动物 68 属(种),在所调查盐碱水域中种类最丰富,其优势种群为摇蚊幼虫.蔡士悦等^[49]于 1987 年在对乌梁素海的调查中共采集到底栖动物 12 种,其中节肢动物为 8 种且均为摇蚊幼虫,软体动物和环节动物各占 2 种.武国正等^[50]于 2004 年对乌梁素海的底栖动物进行了两次调查,共获底栖动物 4 科 11 种,底栖动物平均丰度为 3 031.4 ind/m²,平均生物量为 71.672 g/m².兰策介等^[51]在 2008 年对乌梁素海的调查中共采集到底栖动物 35 种,其中以水生昆虫最为丰富.近年来,乌梁素海底栖动物的种类数量急剧减少.高闻—^[52]在 2019 年 7—8 月在乌梁素海仅监测到大型底栖动物 7 科 9 种,优势种为狭萝卜螺(*Radix lagotis*)、白旋螺和摇蚊属等常见耐污种.

东平湖由鲁西南断陷带形成,大汶河经东平湖调蓄后流入黄河,作为山东省的第二大淡水湖泊,东平湖承担着接纳大汶河水和分滞黄河洪水的重要作用,在黄河流域山东段发挥了重要的生态和水利枢纽作用.近年来,研究人员也开展了有关东平湖大型底栖动物群落结构的调查工作.王志忠等^[53]在 2006 年和 2007 年对东平湖调查时,共采集到底栖动物 31 种,其中软体动物种类最多(67.74%),其次是昆虫类和寡毛类,底栖动物平均密度为 186.79(±102.35) ind/m².董贯仓等^[54-55]先后两次对东平湖底栖动物的群落结构进行了系统调查,2013 年共获得大型底栖动物 16 种,优势种主要集中于羽摇蚊幼虫(*Chironomus plumosus*)、中华圆田螺和霍普水丝蚓,平均密度为 484.17 ind/m²;2015 年共采集到大型底栖动物 19 种,其中软体动物种类最多(占 52.63%),渔业生产等人类活动对底栖动物的群落组成和分布产生了较大影响.

2 黄河流域底栖动物多样性与水生态健康评价

2.1 干支流

底栖动物是河流中最常见的生物类群之一,具有生命周期长、行动缓慢、分布广泛、形体相对较大、易于辨认和采集、生活场所比较固定、生活周期长和对水质变化敏感等特点^[56].在水生态健康评价中,基于底栖动物的多样性指数和完整性指数评价水生态健康状况是目前应用较为广泛的方法^[57].在黄河流域,李宁等^[58]利用底栖动物功能摄食类群的差异对湟水河的水生态环境进行了评价,研究发现集食者对环境变化有较强的适应性,撕食者和刮食者对水生态系统的扰动更加敏感,而滤食者对水质更加敏感.李宁等^[15]还采用

EPT 分类单元、敏感类群、耐污类群等 10 个大型底栖动物群落组成指标并结合 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数对湟水河上游的水体健康状况进行了评价,评价结果与水体理化指标的结果基本一致.孙瑜晔等^[16]采用大型底栖动物 Shannon-Wiener 指数、Goodnight-Whitley 生物指数、Goodnight-Whitley 修正指数及 MBI 生物指数对湟水河上游水质进行了生物评价,结果显示 4 种指标的评价结果存在差异,指出 Shannon-Wiener 指数适用于种类较丰富的河流评价,而 Goodnight-Whitley 修正指数仅由寡毛纲的个体数来评价水质,有一定局限性.王林芳等^[29]在对汾河底栖动物多样性进行评价时采用了 EPT 科级分类单元数、BMWP 指数、Berger-Parker 优势度指数等多个指标,能够较好地表征汾河上中游流域大型底栖动物的物种完整性,底栖动物多样性综合评价结果为“较差”.应用大型底栖动物对汾河太原段水质健康评价主要采用了 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Hilsenhoff 指数,评价结果为轻污-中污状态^[27].徐宗学等^[33]在对渭河流域进行水质生物学评价时选取了 5 个参数构建了基于底栖动物的生物完整性指数的评价体系,结果表明渭河流域上游至下游的水生态健康状态呈下降趋势.曹宇廷^[59]依据底栖动物种类、密度和生物量指标,及是否有指示性物种和保护性物种分布,研究了渭河水生态健康等级评估指标体系.惠晓梅等^[38]选取了底栖动物相关的 8 个生物指数用于沁河山西段的水质评价并分析了各生物指数用于沁河水水质生物评价的适用性,受采样点位置差异、物种耐污值选择和采样点生境的影响,除 Margalef 指数外,其余生物指数评价结果准确率均低于 50%.

表 1 黄河水系及其附属水体底栖动物群落结构

Tab. 1 Distribution of macrozoobenthic communities in Yellow River and its attached water bodies

区域	底栖动物物种数				密度/ (ind · m ⁻²)	生物量/ (g · m ⁻²)	时间	文献
	水生昆虫	环节动物	软体动物	总物种数				
干流								
黄河全水系	103	12	39	167	—	0.12~182.57	1981—1983 年	[4]
黄河干流	38	5	6	71	—	2.44	1981—1983 年	[4]
黄河干流中上游	8	3	2	14	—	—	2003—2007 年	[5]
黄河干流上游	10	3	3	18	—	—	2002—2007 年	[6]
黄河干流	47	17	5	73	562 ± 101	0.588 ± 0.211	2008 年 4、5、9、10 月	[7]
黄河兰州段	5	7	2	17	—	—	2013 年 4、5、9、10 月	[8]
黄河兰州段	9	8	2	22	—	—	2018 年春季、秋季	[9]
黄河山东段	27	3	7	37	2 129 ± 436	2.20 ± 0.75	2015 年 5 月	[11]
黄河支流入干区	29	11	10	53	—	—	2015 年 4、10 月	[10]
支流								
湟水上游	54	1	2	59	—	—	2015 年 5、8 月	[15]
湟水上游	36	1	2	42	—	—	2016 年 5 月、2017 年 5 月	[16]
湟水上游	41	1	0	42	—	—	2018 年 4、5、7、8 月	[17]
白河	—	—	—	73	844 ± 1 082	0.244 9 ± 0.261 8	2015—2016 年	[18]
洮河	9	1	1	12	116.4	6.256	—	[20]
洮河	—	—	—	12	—	—	2011 年 9 月	[21]
支流								
清水河	17	4	9	33	31.2	5.91	2011 年 10 月	[23]
清水河	27	8	10	47	141.8	10.523	2012 年 10 月	[24]
汾河上游	6	3	2	15	—	—	2009—2010 年	[26]
汾河太原段	26	9	8	46	226.15	10.526	2014 年 5、10 月	[27]

续 表

区域	底栖动物物种数				密度/ (ind · m ⁻²)	生物量/ (g · m ⁻²)	时间	文献
	水生昆虫	环节动物	软体动物	总物种数				
汾河兰村段	21	7	8	37	156.25~367.19	27.675~741.170	2014年5、7、9月	[28]
汾河上中游	22	9	5	37	8977	17.33	2016年5月	[29]
渭河干流及支流	91	9	12	116	306.57~841.27	—	2011年10月、2012年4月	[31—33]
渭河干流及秦岭 北麓部分支流	187	11	5	210	125.6~616.3	0.289~5.265	2017年10月、2018年5月	[35]
沁河干流	6	2	2	12	—	—	5~10月	[37]
沁河山西段	26	3	8	38	165	22.29	2017年	[38]
大汶河流域	14	4	10	30	—	—	2016年10月	[40]
小清河	10	13	13	38	—	—	2008年7月	[41]
小清河	3	8	14	35	—	—	2014—2015年	[42]
小清河济南段	14	4	2	23	1190	—	2015年5月	[43]
附属水体								
扎陵湖								
和鄂陵湖	14	2	2	20		0.854~1.603	1981—1982年	[44]
沙湖	20	2	3	29	546		1999年7月	[45]
附属水体								
沙湖	4	1	6	11	416.89	97.4	2013年6、7、8月	[46]
沙湖	14	1	1	17	190~1 202		2013年3、7、9月	[47]
乌梁素海	29	4	3	68	1 160	5.66	1981—1983年	[48]
乌梁素海	8	2	2	12	2 619	15.57	1987年	[49]
乌梁素海	8	1	2	11	3 031.4	71.67	2004—2005年	[50]
乌梁素海	24	1	8	35	1 487	8.8	2008年7、9月	[51]
乌梁素海	3	2	4	9	—	—	2019年7、8月	[52]
东平湖	2	4	21	31	186.79	157.72	2006—2007年	[53]
东平湖	2	6	7	16	484.17	61.33	2013年	[54]
东平湖	3	5	10	19	155.47	12.2	2015年	[55]

2.2 湖 库

因不同生物指数计算的侧重点不同,受湖库生境差异、环境因子以外的渔业活动及人为干扰等因素影响,黄河流域不同湖库选用的水生态健康评价指标各不相同.武国正等^[50]采用了1952年Carlander分类对乌梁素海进行了水质生物评价,结果表明乌梁素海整体呈富营养化状态.董贯仓等^[54]选取Shannon-Wiener指数、Margalef指数、Goodnight-Whitley生物指数对东平湖的水生态健康进行了生物评价,指出以物种数及个体数量等生物多样性为侧重点的Shannon-Wiener指数和Margalef指数能较好地反映东平湖底栖动物及水环境的原始状况.黄旭蕾等^[60]基于黄河干流1980年和2008年大型底栖动物生态调查数据,计算了9种生物评价指数,并与河流环境变量进行相关分析后指出,Shannon-Wiener指数、Margalef指数、BMWP和FBI适合作为黄河水质评价指标.

应用底栖动物对水质进行评价的主要方法包括群落丰富度、种类个体数量比例、生物耐污能力、功能摄食类群组成等方面,由于黄河流域生境的复杂与异质性,致使黄河不同区域底栖动物相关参数的评价适用性存在差异.此外,黄河所流经的不同区域海拔、气温、降雨量差别很大,为消除区域差异对黄河健康评价结果的影响,在选择评价指标时,应避免与自然环境因子存在较高相关性的评价指标^[60].不同生物指数计算侧重点不同,应充分考虑生境情况,通过不断修正、完善底栖动物评价方法、评价指标、评价体系,才能准确评价和

预测黄河流域水生态健康状况.

表 2 基于大型底栖动物指数的黄河流域水生态健康评价

Tab. 2 Health assessment of aquatic ecosystems in Yellow River using benthic macro-invertebrate indices

区域	指数	评价结果	文献
支流			
湟水河	Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数	多样性较低	[15]
	EPT 分类单元	支流优于干流,干流污染较重	[15]
湟水河	Shannon-Wiener 指数	轻度-中度污染	[16]
	Goodnight-Whitley 生物指数	轻度污染	[16]
	Goodnight-Whitley 修正指数	水质较差至极差	[16]
	MBI 生物指数	水质差至一般	[16]
汾河太原段	Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数	清洁-中污	[27]
	Hilsenhoff 指数	中污-重污	[27]
汾河上中游	多样性综合指数(分类单元数、EPT 科级分类单元比、BMWP 指数、Berger-Parker 优势度指数标准化后取平均值)	一般(29%)、较差(41%)、差(30%)	[29]
渭河	生物完整性指数 IBI(核心参数:EPT 分类单元数、敏感类群分类单元数、摇蚊个体相对丰度和耐污个体相对丰度)	健康(56%)、较好(11%)、一般(18%)、较差或极差(15%)	[33]
渭河	水生生态评估等级标体系(包括底栖动物种类、密度和生物量是否符合河流水生生物变动规律、有无指示性物种或保护物种分布)	不健康	[59]
沁河山西段	Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数	生物多样性一般;轻污染-重污染;Margalef 指数与水质评价的一致率最高	[38]
	Goodnight-Whitley 生物指数	轻污染	[38]
	生物污染指数 BPI	清洁-轻污染	[38]
	BMWP 指数和 ASPT 指数	中污染-重污染	[38]
	科级生物指数 FBI	轻污染-中污染	[38]
附属水体			
乌梁素海	Carlander 分类	富营养型	[50]
东平湖	Shannon-Wiener 指数	重污染(33%)中度污染(50%)轻度污染(17%),整体呈中度污染	[54]
	Margalef 指数	整体呈中度污染(67%)	[54]
	Goodnight-Whitley 生物指数	清洁(100%)	[54]

3 影响黄河流域底栖动物分布的环境因子

底栖动物是水生态系统的重要组成部分之一,其生物量、种类组成与分布、多样性水平受环境因素和人类活动的共同影响.黄河流域面积广,环境因子对底栖动物的影响十分复杂,不仅因子众多,而且各个因子对底栖动物不同类群的作用并不完全一致.底栖动物的生长繁殖与分布在黄河流域不同水系和区域间存在着明显的差异.

3.1 环境因素

3.1.1 理化指标

其木乐等^[17]利用主成分分析(PCA)研究了湟水河上游大型底栖动物与其环境因子之间的关系,结果表明水温、溶解氧、总磷、总氮等是底栖动物群落变动的主要因素^[17].王林芳等^[29]在对汾河进行调查时发现,不同种类大型底栖动物受水质理化因子影响的程度不同,颤蚓科主要受总磷、总氮、氨氮含量的影响,其他种类大型底栖动物主要受溶解氧、pH 等影响.李安萍等^[27]研究了汾河太原段底栖动物群落与环境因子间的关

系,指出水温、透明度、pH、溶解氧、总氮对底栖动物群落结构有重要影响,水生昆虫的分布与水体透明度和溶解氧呈极显著正相关,寡毛类的分布与溶解氧和透明度呈显著负相关,而软体动物的分布与环境因子相关性不显著。张台凡等^[34]在渭河研究中发现影响动物群落的主要环境因子有总氮、总碱度、化学需氧量、六价铬、总溶解固体,同时也证明了综合水质并不是底栖动物多度和分布的决定性原因。许宗学等^[33]研究发现渭河不同水域影响底栖动物分布的主要环境因子不同,其中对于渭河干流,影响底栖生物的主要环境因子是盐度,而对于北洛河,环境因子的影响则不显著。贾铭宇等^[47]在对沙湖的调查中发现,硝氮、pH、氯化物是沙湖影响大型底栖动物分布的主要限制因子,水温和溶氧也有一定影响。董贯仓等^[54]对东平湖底栖动物群落结构与环境因子间的关系进行了矩阵分析,结果表明水体理化因子是影响东平湖底栖动物群落结构的重要环境因素,东平湖底栖动物多样性特征与水体氨氮、总氮、叶绿素 a 等因子显著相关。

3.1.2 水文参数

其木乐等^[17]研究发现随着湟水河海拔、平均流速、最大流速的降低,底栖动物种类数逐渐减少,取而代之的是耐污种的出现。张台凡等^[34]研究发现流量和渗透系数是影响底栖动物群落分布的主要水文参数,渭河流域底栖动物的多度和分布是水体理化因子和水文参数综合作用的结果。河宽也是影响黄河流域底栖动物类群的水文参数之一,徐宗学等^[33]研究发现河宽为影响泾河大型底栖动物完整性指数的主要环境因子。

3.1.3 底质类型

研究表明不同底质组成影响着底栖动物分布,襁翅目多数分布在石块较多的城市用地中,双翅目则较多地分布在以细砂淤泥为主的的城市用地中,可能与其生活习性有关^[9]。殷旭旺等^[31]对渭河的研究中指出附石性的水生昆虫幼虫(蜉蝣目、毛翅目、襁翅目)在多石的底质类型以及流速较快的站点密度较大,淤泥和泥沙类的底质类型则更适合寡毛类及软体动物存活。

3.2 人类活动

董贯仓等^[55]研究发现东平湖进行航道采砂清淤使其具有较深的水深,一定程度上影响了底栖动物的存在。而在东平湖养殖水域中,网围网箱养殖会导致湖泊环境水质恶化,易形成以耐污的摇蚊幼虫为主,结构单一的底栖动物群落。李宁等^[61]研究发现随着城镇化强度的提高,湟水河物理生境退化,水体中各种有机质含量也快速升高,导致敏感底栖动物消失,耐污物种个体数量急剧上升并成为优势种,这些都对湟水河中下游及黄河水质和底栖生物造成很大的影响。王玥劼等^[62]在小浪底水库建成前后对大型底栖动物调查时发现,水库建成后底栖动物的种类和数量均有所增加。还有文献指出,水电站对底栖生物的影响较弱,而人类活动导致的湿地退化对大型无脊椎动物的生存造成了灾难性的影响^[63]。

4 展 望

(1)由于黄河干流河床底质不稳定、河流汛期无规律等因素,造成黄河流域底栖动物调查的历史资料和基础数据匮乏,大部分水生生物监测资料仅为某一点位在特定时间点的数据,在时间和空间尺度上缺乏系统的连续监测和跟踪研究。与长江和珠江等流域相比,黄河流域水生态调查研究的基础极为薄弱,今后的研究中应结合现有的历史资料,积极开展黄河流域底栖动物的长期观测,逐步构建黄河流域水生生物基础数据库,进而为黄河流域生态保护和治理提供有力科学支撑。

(2)目前已有大量针对底栖生物群落结构和分布特征的研究,并用于评价河流和湖库生态环境,但这些调查研究大多集中在长江流域以及珠江流域各段,黄河流域面积广、生境复杂,所流经的不同区域海拔、气温、降雨量等水文条件差别很大。为消除区域差异对黄河健康评价结果的影响,应针对黄河流域不同水系制订相应的水生态健康评价方法,选取合适的生物参数用作评价黄河水质的指标,同时应开展底栖动物敏感值和耐污值研究,建立适合黄河流域不同区段使用的底栖动物主要分类单元耐污值数据库,进一步提高将底栖动物用于黄河流域水生态健康评价的适用性和准确性。

(3)黄河干流泥沙含量大、流速高,且底质绝大部分为粒径较小的流沙,增加了底栖动物采集的难度,这也是前期黄河流域水生生物基础数据匮乏的重要原因之一。后续研究应逐步建立和完善黄河水生态监测体系,结合黄河流域干支流水文特性,优化底栖动物采样调查方法和调查时间,进一步推进黄河干支流水生态

调查研究.

参 考 文 献

- [1] 水利部黄河水利委员会.黄河年鉴 2020[M].郑州:黄河年鉴社,2020.
- [2] 曹文洪,张晓明.新时期黄河流域水土保持与生态保护的思考[J].中国水土保持,2020(9):39-42.
CAO W H,ZHANG X M.Strategic thinking on soil and water conservation and ecological protection in the Yellow River basin in the new period[J].Soil and Water Conservation in China,2020(9):39-42.
- [3] ARMITAGE P D,MOSS D,WRIGHT J F,et al.The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites[J].Water Research,1983,17(3):333-347.
- [4] 何志辉,谢祚浑,史为良,等.黄河水系渔业资源[M].沈阳:辽宁科技出版社,1986.
- [5] 袁永锋,李引娣,张林林,等.黄河干流中上游水生生物资源调查研究[J].水生态学杂志,2009,30(6):15-19.
YUAN Y F,LI Y D,ZHANG L L,et al.Investigation and research on hydrobios resources in the middle and upper reaches of main Yellow River[J].Journal of Hydroecology,2009,30(6):15-19.
- [6] 沈红保,李科社.黄河上游渔业资源保护建议[J].河北渔业,2010(11):24-28.
SHEN H B,LI K S.Suggestions on fishery resources protection of the upper reaches of Yellow River[J].Hebei Fisheries,2010(11):24-28.
- [7] 蒋晓辉,王洪铸.黄河干流水生态系统结构特征沿程变化及其健康评价[J].水利学报,2012,43(8):991-998.
JIANG X H,WANG H Z.Change of structural characteristics and health assessment of aquatic ecosystems along the mainstream of the Yellow River[J].Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(8):991-998.
- [8] 陈锴,褚可成,许淑青,等.黄河兰州段底栖动物群落特征及其水质生物学的评价[J].环境研究与监测,2015,28(4):44-48.
CHEN E,ZHU K C,XU S Q,et al.Biomonitoring and water biological evaluation of macrobenthic community structure in Lanzhou section of the Yellow River[J].Journal of Environmental Research and Monitoring,2015,28(4):44-48.
- [9] 褚可成,陈锴,许淑青.2018年黄河兰州段底栖动物监测及其评价[J].甘肃科技,2019,35(11):1-3.
CHU K C,CHEN E,XU S Q.Monitoring and analysis of macrobenthic in Lanzhou section of the Yellow River in 2018[J].Gansu Science and Technology,2019,35(11):1-3.
- [10] 谢元,蒋晓辉,王婷,等.黄河典型支流入干区底栖动物群落结构特征比较研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(5):1067-1076.
XIE Y,JIANG X H,WANG T,et al.Comparative study on macroinvertebrate communities in confluence areas from typical tributaries to mainstream of the Yellow River[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2018,54(5):1067-1076.
- [11] 舒凤月,吴俊燕,孙晓倩,等.黄河山东段河岸带春季大型底栖动物群落结构与多样性[J].动物学杂志,2017,52(2):271-282.
SHU F Y,WU J Y,SUN X Q,et al.Distribution and diversity of riparian macrozoobenthic communities in Shandong reach of the Yellow River in spring[J].Chinese Journal of Zoology,2017,52(2):271-282.
- [12] 李夫星,陈东,汤秋鸿.黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J].水科学进展,2015,26(4):481-490.
LI F X,CHEN D,TANG Q H.Variations of hydro-meteorological variables in the Yellow River basin and their relationships with the East Asian summer monsoon[J].Advances in Water Science,2015,26(4):481-490.
- [13] 颜明,贺莉,王彦君,等.1950—2015年黄河下游河道排洪输沙时空演变[J].水土保持研究,2019,26(4):1-6.
YAN M,HE L,WANG Y J,et al.Temporal and spatial variation of flood-conveying and sediment-transporting capacity of the lower reaches of the Yellow River during 1950—2015[J].Research of Soil and Water Conservation,2019,26(4):1-6.
- [14] BILOTTA G S,BRAZIER R E.Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota[J].Water Research,2008,42(12):2849-2861.
- [15] 李宁,陈阿兰,杨春江,等.湟水河上游大型底栖动物多样性及水体理化因子调查分析[J].中国农学通报,2016,32(23):43-48.
LI N,CHEN A L,YANG C J,et al.Diversity of benthic macroinvertebrates and water physical and chemical indexes in upstream of Huangshui River[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(23):43-48.
- [16] 孙瑜畅,李宁,陈阿兰,等.湟水河上游大型底栖动物群落结构及水质生物评价[J].青海大学学报,2018,36(2):65-71.
SUN Y Y,LI N,CHEN A L,et al.Macroinvertebrate community structure and bio-assessment of the quality of water in upstream of Huangshui River[J].Journal of Qinghai University,2018,36(2):65-71.
- [17] 其木乐,李宁,白露超,等.湟水河上游底栖动物群落结构及其与环境因子间的关系[J].南京农业大学学报,2020,43(1):72-79.
QI M L,LI N,BAI L C,et al.Community structure of macrobenthos and its relationship with environmental factors in the upper reaches of Huangshui River[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2020,43(1):72-79.
- [18] ZHOU X D,XU M Z,WANG Z Y,et al.Responses of macroinvertebrate assemblages to environmental variations in the river-oxbow lake system of the Zoige wetland(Bai River,Qinghai-Tibet Plateau)[J].Science of The Total Environment,2019,659:150-160.
- [19] 闫兴沛.洮河流域水资源开发利用现状及存在问题探讨[J].甘肃科技,2020,36(19):8-10.
YAN X P.Discussion on the current situation and problems existed in water resources development and utilization of Taohe River basin.

- [J].Gansu Science and Technology,2020,36(19):8-10.
- [20] 曲修杰.黄河玛曲段水产种质资源保护区的调查研究[D].北京:中国农业科学院,2009.
QU X J.Study on aquatic germplasm resources protection district of Maqu waters of the Yellow River[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2009.
- [21] 郭小芳,王长征,王兴峰.水电站建设对洮河水生生物的影响及保护措施[J].水力发电,2013,39(12):4-5.
GUO X F,WANG C Z,WANG X F.Impact of hydropower station construction in the Taohe River on aquatic organisms and the protection measures[J].Water Power,2013,39(12):4-5.
- [22] 李颖曼,焦鹏,张晓华,等.宁夏清水河流域近 60 年降水量及入黄沙量变化[J].水土保持研究,2021,28(2):184-189.
LI Y M,JIAO P,ZHANG X H,et al.Change of precipitation and sediment of Qingshui River basin of Ningxia in recent 60 years[J].Research of Soil and Water Conservation,2021,28(2):184-189.
- [23] 此里能布,毛建忠,赵华刚,等.秋季清水河大型底栖动物群落结构及其水质评价[J].环境科学导刊,2013,32(4):51-55.
CILIN B,MAO J Z,ZHAO H G,et al.Community structure of zoobenthos and water quality assessment in Qingshui River in Autumn [J].Environmental Science Survey,2013,32(4):51-55.
- [24] 王振钟,李艳华,庞家平,等.底栖生物完整性指数在清水河流域健康评价中的应用[J].中国水运,2013,13(7):131-133.
WANG Z Z,LI Y H,PANG J P,et al.Application of benthic index of biological integrity in health assessment of Qingshui River basin[J].China Water Transport,2013,13(7):131-133.
- [25] 李军伟,李恩慧,穆阳阳,等.山西汾河流域水资源现状及生态修复研究[J].资源节约与环保,2020(11):23-25.
LI J W,LI E H,MU Y Y,et al.Study on the present statue of water resources and ecological restoration in Fenhe River Basin in Shanxi [J].Resources Economization and Environment at Protection,2020(11):23-25.
- [26] 李文华,赵瑞亮.汾河渔业资源现状及分析[J].山西水利,2015,31(5):31-32.
LI W H,ZHAO R L.Current situation and analysis of fishery resources in Fenhe River[J].Shanxi Water Resources,2015,31(5):31-32.
- [27] 李安萍,高晋华.汾河太原段底栖动物群落结构与水质生物学评价[J].太原师范学院学报(自然科学版),2016,15(4):81-86.
LI A P,GAO J H.Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Fenhe River[J].Journal of Taiyuan Normal University(Natural Science Edition),2016,15(4):81-86.
- [28] 李安萍,郭星,尹倩,等.汾河兰村段底栖动物的群落特征[J].山西大同大学学报(自然科学版),2017,33(1):56-59.
LI A P,GUO X,YIN Q,et al.The community structure of zoobenthos in lancun segment of Fenhe River[J].Journal of Shanxi Datong University(Natural Science),2017,33(1):56-59.
- [29] 王林芳,李华,党晋华,等.汾河上中游流域大型底栖动物群落特征及其多样性评价[J].环境化学,2020,39(1):128-137.
WANG L F,LI H,DANG J H,et al.Characteristics and diversity evaluation of macrobenthos in upper and middle reaches of Fen River basin[J].Environmental Chemistry,2020,39(1):128-137.
- [30] 武玮,徐宗学,于松延.渭河流域水环境质量评价与分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(4):275-281.
WU W,XU Z X,YU S Y.Water quality assessment and analysis for the Wei River basin[J].Journal of Beijing Normal University(Natural Science),2013,49(4):275-281.
- [31] 殷旭旺,徐宗学,高欣,等.渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].应用生态学报,2013,24(1):218-226.
YIN X W,XU Z X,GAO X,et al.Macrobenthos community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin,Northwest China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(1):218-226.
- [32] 殷旭旺,李庆南,朱美桦,等.渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价[J].生态学报,2015,35(14):4784-4796.
YIN X W,LI Q N,ZHU M H,et al.Community structure and biological integrity of macroinvertebrates in the wet and dry seasons of Wei River basin,China[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(14):4784-4796.
- [33] 徐宗学,武玮,殷旭旺.渭河流域水生生态系统群落结构特征及其健康评价[J].水利水电科技进展,2016,36(1):23-30.
XU Z X,WU W,YIN X W.Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe basin,China[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(1):23-30.
- [34] 张台凡,任超亮,王莉,等.渭河流域大型底栖动物多度及其影响因子研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2015,51(2):197-201.
ZHANG T F,REN C L,WANG L,et al.Macrobenthos abundance and its influencing factors in the Weihe River[J].Journal of Beijing Normal University(Natural Science),2015,51(2):197-201.
- [35] 杨海强,潘保柱,朱朋辉,等.渭河干流和秦岭北麓典型支流底栖动物群落结构及水质生物评价[J].湖泊科学,2020,32(6):1793-1805.
YANG H Q,PAN B Z,ZHU M H,et al.Structure of macroinvertebrate communities and bioassessment of water quality in the Weihe River mainstream and its typical tributaries from the northern Qinling Mountains[J].Journal of Lake Sciences,2020,32(6):1793-1805.
- [36] 秦勇,张东,赵志琦.沁河流域水化学组成的空间和时间变化特征[J].生态学杂志,2016,35(6):1516-1524.
QIN Y,ZHANG D,ZHAO Z Q.Spatial and temporal variations of hydrochemical compositions of river water in Qinhe basin[J].Chinese Journal of Ecology,2016,35(6):1516-1524.
- [37] 左中原,刘青,王志涛.沁河稀有经济鱼类栖息水域水质与饵料生物调查研究[J].水产养殖,2017,38(4):16-21.

- ZUO Z Y, LIU Q, WANG Z T. Investigation on the water quality and food organisms at the habitat of rare commercial fishes in Qin River [J]. *Journal of Aquaculture*, 2017, 38(4): 16-21.
- [38] 惠晓梅, 王爱花, 李超, 等. 沁河山西段大型底栖动物多样性及水质生物评价[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(1): 253-264.
HUI X M, WANG A H, LI C, et al. Diversity of macroinvertebrate and water quality bio-assessment in Qin River of Shanxi [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2019, 42(1): 253-264.
- [39] 温家华, 徐征和, 武玮, 等. 大汶河流域水生态系统健康评价研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(3): 118-124.
WEN J H, XU Z H, WU W, et al. Study on water ecosystem evaluation in Dawen River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2018, 16(3): 118-124.
- [40] 祁泽慧. 大汶河流域水生态系统评价与水生态文明建设的[D]. 济南: 济南大学, 2017.
QI Z H. Study on water ecosystem evaluation and water ecology civilization construction in the Dawen River valley [D]. Jinan: University of Jinan, 2017.
- [41] 张莹, 吕振波, 徐宗法, 等. 环境污染对小清河口大型底栖动物多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 381-387.
ZHANG Y, LYU Z B, XU Z F, et al. Impacts of environmental pollution on macrobenthos diversity in Xiaoqing estuary of Shandong Province, East China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 381-387.
- [42] 刘春彤, 曹升乐, 杨裕恒, 等. 基于底栖动物完整性指数的小清河健康评价[J]. *人民黄河*, 2018, 40(5): 83-88.
LIU C T, CAO S L, YANG Y H, et al. Health assessment of Xiaoqing River based on benthic-index of biotic integrity (B-IBI) [J]. *Yellow River*, 2018, 40(5): 83-88.
- [43] 汪峰, 单彪, 于涛, 等. 小清河流域春季底栖动物功能摄食类群与水环境因子的关系[J]. *河北渔业*, 2019(12): 41-46.
WANG F, SHAN B, YU T, et al. The relationship between macrobenthos functional feeding groups and environmental factors in Xiaoqing River basin in spring [J]. *Hebei Fisheries*, 2019(12): 41-46.
- [44] 秦建光, 沈成钢, 王兆军, 等. 扎陵湖和鄂陵湖渔业生物学基础调查[J]. *大连水产学院学报*, 1986(6): 31-44.
QIN J G, SHEN C G, WANG Z J, et al. The basic investigations on the fishery biology of Zhaling Lake and Eling Lake [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1986(6): 31-44.
- [45] 刘锦霞, 张平卿. 宁夏沙湖自然保护区水生生物调查与分析[J]. *新疆环境保护*, 2000(2): 105-106.
LIU J X, ZHANG P Q. Investigation and analysis for aquatic biology of Shahu natural protective area of Ningxia [J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2000(2): 105-106.
- [46] 苗滕, 康玉辉, 周念来, 等. 生态修复初期内沙湖底栖动物群落结构的初步研究及其生物学评价: 第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集[C]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2013: 395-402.
- [47] 贾铭宇, 翟浩, 刘曼红, 等. 沙湖大型底栖动物群落特征及其水环境评价[J]. *水产学杂志*, 2016, 29(2): 32-38.
JIA M Y, ZHAI H, LIU M H, et al. The community characteristics of macrozoobenthos and assessment of water environment in Shahu Lake [J]. *Chinese Journal of fisheries*, 2016, 29(2): 32-38.
- [48] 谢祚浑, 周一兵. 中国北方盐碱水域中的底栖动物[J]. *大连水产学院学报*, 2002(3): 176-186.
XIE Z H, ZHOU Y B. Zoobenthos in inland saline waters from autonomous region northern parts of China [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002(3): 176-186.
- [49] 蔡士悦, 史艇, 张久根, 等. 乌梁素海水污染与水生生物学研究[J]. *环境科学研究*, 1988(4): 14-23.
CAI S Y, SHI T, ZHANG J G, et al. Study on relation between water pollution and hydrobiology for the Wu Liang Su Hai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1988(4): 14-23.
- [50] 武国正, 李畅游, 周龙伟, 等. 乌梁素海浮游动物与底栖动物调查及水质评价[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 76-81.
WU G Z, LI C Y, ZHOU L W, et al. Zooplankton and Zoobenthos investigation in Lake Wuliangsu Hai and the estimation of nutrition status [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(3): 76-81.
- [51] 兰策介, 沈元, 王备新, 等. 蒙高原湖泊高等水生植物和大型底栖无脊椎动物调查[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 888-893.
LAN C J, SHEN Y, WANG B X, et al. Investigation of aquatic plants and benthic macroinvertebrates of lakes in Inner Mongolia-Xinjiang plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 888-893.
- [52] 高闻一. 乌梁素海水生生物多样性调查分析及健康评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
GAO W Y. Investigation and health assessment of hydrobiont biodiversity in Wuliangsu Hai [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [53] 王志忠, 王钦东, 陈述江, 等. 东平湖大型底栖动物多样性及其环境质量评价[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(20): 120-123.
WANG Z Z, WANG Q D, CHEN S J, et al. Biodiversity of macrozoobenthos and environmental quality assessment in Dongping Lake [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(20): 120-123.
- [54] 董贯仓, 刘超, 李秀启, 等. 东平湖底栖动物群落特征及水环境分析[J]. *生物学杂志*, 2015, 32(1): 39-43.
DONG G C, LIU C, LI X Q, et al. Study on community characteristics of macrozoobenthos and assessment of water quality in Dongping Lake [J]. *Journal of Biology*, 2015, 32(1): 39-43.

- [55] 董贯仓,刘超,朱士文,等.东平湖不同渔业水域大型底栖动物群落结构特征[J].海洋湖沼通报,2019(6):90-97.
DONG G C, LIU C, ZHU S W, et al. A comparative analysis of macrobenthic community characteristics of different fishery water areas in Dongping Lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(6):90-97.
- [56] 戴纪翠,倪晋仁.底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析[J].生态环境,2008,17(5):2107-2111.
DAI J C, NI J R. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5):2107-2111.
- [57] 王备新,杨莲芳,刘正文.生物完整性指数与水生态系统健康评价[J].生态学杂志,2006,25(6):707-710.
WANG B X, YANG L F, LIU Z W. Index of biological integrity and its application in health assessment of aquatic ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(6):707-710.
- [58] 李宁,杨春江,孙瑜昉,等.青海湟水河大型底栖动物群落结构及生态系统健康评价[J].中国农学通报,2017,33(35):141-148.
LI N, YANG C J, SUN Y Y, et al. Community structure of macrobenthos and assessment of ecosystem health in Huangshui River, Qinghai Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(35):141-148.
- [59] 曹宇廷.渭河水生生物调查与评估[J].甘肃水利水电技术,2018,54(8):1-5.
CAO Y T. Investigation and assessment of aquatic organisms[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2018, 54(8):1-5.
- [60] 黄旭蕾,李天宏,蒋晓辉.基于大型底栖无脊椎动物指数的黄河水质评价研究[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(3):553-561.
HUANG X L, LI T H, JIANG X H. Assessing water quality of the Yellow River with benthic macro-invertebrate indices[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(3):553-561.
- [61] 李宁,陈阿兰,杨春江,等.城镇化对湟水河上游水质和底栖动物群落结构的影响[J].生态学报,2017,37(10):3570-3576.
LI N, CHEN A L, YANG C J, et al. Impacts of urbanization on water quality and macrobenthos community structure upstream in the Huangshui River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10):3570-3576.
- [62] 王玥劼,张世敏,张宁,等.小浪底水库建库前后生物种群数量变化调查与分析[J].安徽农业科学,2013,41(18):7916-8080.
WANG Y J, ZHANG S M, ZHANG N, et al. Investigation and analysis of biological population quantity change before and after construction of Xiaolangdi reservoir[J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2013, 41(18):7916-8080.
- [63] PAN B Z, WANG Z Y, LI Z W, et al. An exploratory analysis of benthic macroinvertebrates as indicators of the ecological status of the Upper Yellow and Yangtze Rivers[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(5):871-882.

Progresses of macrozoobenthic investigation in Yellow River basin

Li Xuejun¹, Zhang Jingxiao¹, Yu Miao¹, Dong Jing¹, Gao Yunni¹, Zhang Man¹, Qin Xiangchao², Zhou Yanli²

(1. College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. Yellow River Basin Water Environm Monitoring Ctr, Ministry of Ecology and Environment, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Macrobenthos is an important part of aquatic ecosystems, its community structure and diversity are of great significance to eutrophication monitoring and the maintenance of aquatic ecosystem health. Known as the mother river of the Chinese nation, the Yellow River is also an ecological corridor for the connection of the source region of three rivers, the Qilian Mountain, Fen-wei plain and North China plain. The water resources issues and ecological functions of Yellow River are very important. At present, the monitoring of aquatic ecological environment in Yellow River is focusing on water quality. The survey and research of macrobenthos in Yellow River is limited by hydrologic condition and habitat heterogeneity, and the study of macrobenthos in Yellow River is not systematical. Therefore, major progresses of macrozoobenthic research in Yellow River are systematically summarised in this paper. The purpose of this study is to provide powerful technical support for the ecological conservation and high-quality development of the Yellow River Basin.

Keywords: Yellow River basin; macrobenthos; community structure; health assessment of aquatic ecosystems

[责任编辑 刘洋 杨浦]