

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 01. 01

渭河流域河流健康调查与评价

徐宗学^{1,2}, 顾晓昀^{1,2,3}, 刘麟菲^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:在渭河流域开展野外采样调查, 并采用水文改变指标法、综合水质标识指数法、生物完整性指数法等分析和评价渭河流域的水文、水质和水生态现状。结果表明:①林家村、魏家堡和咸阳 3 个站点的水文情势改变程度为高度改变, 而临潼、华县的水文情势改变程度为中度改变;②渭河流域丰水期水环境质量状况优于枯水期, 影响渭河水系的主要环境因子为总氮(TN)和总磷(TP), 影响泾河和北洛河水系的主要环境因子为电导率;③渭河流域鱼类和底栖动物在丰、枯水期的生物完整性差异较小, 着生藻类在丰、枯水期的生物完整性差异则较大。提出以下建议:①控制水利工程的过量开发利用, 合理调控闸坝的蓄放水过程;②在河道沿岸建设污水处理厂, 对排河污水进行拦截和处理, 并定期监测水体理化性质, 重点关注 TN、TP 和电导率;③控制渭河流域内的石油开发强度, 恢复河岸带及边坡生境, 以保证水生生物的正常栖息和繁衍。

关键词:河流健康; 水文情势; 水环境质量; 水生态系统; 生物完整性指数法; 渭河流域

中图分类号: X821 文献标志码: A 文章编号: 1004 - 6933 (2018) 01 - 0001 - 07

Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin

XU Zongxue^{1,2}, GU Xiaoyun^{1,2,3}, LIU Linfei^{1,2}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China;
3. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Field sampling survey was conducted in Weihe River Basin, and methods such as indicators of hydrologic alteration, comprehensive water quality identification index and index of biotic integrity were applied to analyze the status of hydrological, water quality and water ecology of Weihe River Basin. The results show that the hydrological regimes at Linjiacun, Weijiapu and Xianyang have been markedly altered, while those at Lintong and Huaxian have been moderately altered. The water quality of Weihe River Basin in wet seasons is better than that in dry seasons. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) are the primary pollution factors in Weihe River, while conductivity is primary one in the Jinghe River and Beiluohe River. The biotic integrity of fish and benthic macroinvertebrate in wet seasons differs slightly from that in dry seasons, while the biotic integrity of periphytic algae in wet seasons has great differences from that in dry seasons. According to the main problems of river health in Weihe River Basin, the following countermeasures and suggestions are put forward. Excessive development and utilization of water conservancy projects should be controlled and water storage and release of dams should be regulated reasonably. Sewage disposal plants should be set up on both sides of the rivers to intercept and dispose the drainage. And water quality should be monitored termly, in which TN, TP and conductivity should be focused on. The oil development intensity in Weihe River Basin should be controlled to reinstate riverbank belt and slope

基金项目: 国家自然科学基金(51279005)
作者简介: 徐宗学(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

habitat, guaranteeing the normal habitat and reproduction of aquatic organisms.

Key words: river health; hydrological regime; water quality; aquatic ecosystem; Index of Biotic Integrity; Wei River basin

河流系统是由水生生物群落与非生物环境组成的自然生态系统。各国对河流健康的管理经历了过度开发利用—水资源管理—水环境污染治理—水生态管理不断深化的过程^[1],逐渐形成水资源—水环境—水生态的河流健康综合管理理念,水文情势、水质和水生生物成为河流健康调查与评价对象的重要组成部分。水文循环作为联系大气圈—地圈—生物圈的重要纽带,决定着水资源的形成与演变规律,也决定着流域的水环境和水生态状况。受气候变化和人类活动的双重影响,全球范围内的流域水文水资源时空演变规律正在发生剧烈变化,尤其是河流的水文情势不断发生重大改变,因此,开展水文水资源研究对流域可持续发展具有重要的现实意义^[2-4]。当水体中的某些化学物质达到一定限度时,水体功能和环境质量就会受到损害,因此,水质在一定程度上可以直接表征河流的健康状况。水质变化不仅可以反映水文特征、水生生物特征等在流域中的分布,而且能够体现流域内社会经济和人类活动对水环境质量的影响。随着水环境污染问题的日益突出,水质变化已成为众多学者关注的热点^[5-6]。水生生物与水生态系统之间时刻进行着物质和能量的交换,是河流系统的重要组成部分。水生生物受水文情势、水环境质量等多种因素的综合影响,其群落结构与生物特性对环境变化具有高度敏感性,能迅速反映不同时空尺度上河流的变化特征,是表征河流健康状况的重要指示因子^[7-8]。

我国正处于城市化快速发展的阶段,社会经济的发展对河流产生了巨大的影响,河流健康问题正逐渐从局部性、区域性向整体性、全国性演变。水资源短缺^[9]、水环境恶化和水生态脆弱成为当前我国河流健康管理面临的严峻考验。笔者采取野外采样调查方法,从渭河流域水文情势、水质现状和水生态现状等方面了解和评价渭河流域河流健康现状,并提出恢复、维持渭河流域河流健康的建议。

1 研究区概况

渭河是黄河最大的支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,干流全长 818 km,流域面积 13.43 万 km² (图 1(a))。泾河是渭河最大支流,北洛河是渭河第二大支流。渭河流域的水系呈不对称分布,北侧支流流经黄土高原丘陵沟壑区,源远流长,集水面积

大,主要支流有泾河、北洛河等,南侧支流源于秦岭北麓,源短流急,集水面积小,主要支流有石头河、黑河等。整个渭河流域大多被黄土覆盖,水土流失严重^[7, 10-11]。西安、宝鸡、咸阳等市拥有机械、航空、化工和有色金属等产业,是我国西北地区重要的工业基地。以铜川为中心的渭河北岸煤炭资源丰富,泾河的甘肃庆阳石油资源丰富,北洛河上游是陕北油气资源勘探开采重地,这些在渭河流域内形成了一条以能源为主的产业开发带。此外,自中华人民共和国成立以来,渭河流域共兴建大型水库 4 座、中型水库 28 座,林家村以下的关中地区共建成八大灌区。渭河是陕西关中地区的生命之河,其健康状况直接影响关中地区的经济可持续发展^[12-13]。

近年来,由于人口数量增多,气候变化剧烈,水资源需求急剧增加,而渭河流域的年平均径流量急剧减少、水环境污染日趋严重、水生态系统加速退化,渭河流域在水文、水质和水生态 3 方面的现状都不容乐观^[14]。有统计结果显示:①1991—2000 年林家村和华县水文站测得的年均径流量与 1981—1990 年相比分别减少了 53.9% 和 50.3%;②渭河流域水质指标的全年平均浓度单项分类评价超Ⅲ类水的河长占总河长的 76.3%,超Ⅴ类水的占 54.2%;③渭河流域河道内鱼虾数量急剧减少,河流功能不断退化^[15-17]。这些生态环境问题严重制约了渭河流域经济与社会的可持续发展。解决渭河流域的河流健康问题迫在眉睫,恢复并维持河流健康成为渭河流域管理和保护的首要目标。

2 研究方法 with 结果讨论

为了解渭河流域河流健康现状,笔者收集和分析了大量水文数据资料,并于 2011 年 10 月、2012 年 4 月、2012 年 10 月和 2013 年 4 月两个水文年的汛前和汛后分 4 次对渭河流域的水质和水生态现状进行了野外采样调查,共设置采样点位 77 个,具体的采样点布设如图 1(b) 所示。

2.1 渭河流域水文情势

天然的水文情势是河流系统健康的关键驱动力。定量描述天然水文情势,评价水利工程对河流的影响,是河流健康评价的重要组成部分^[18]。衡量水文情势改变程度的主要方法是对比分析影响前后水文情势的变化,识别径流量变化的突变点,根据突变点前后的时间序列,评估土地利用变化、水库修

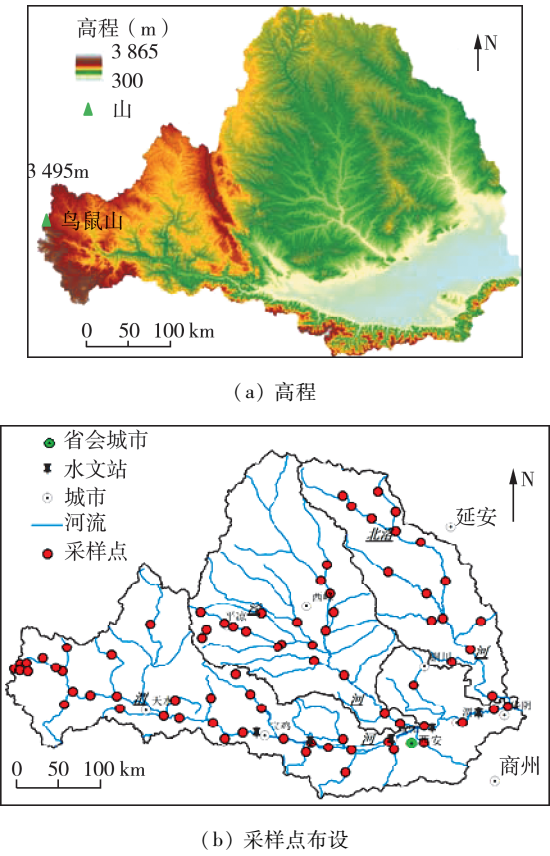


图1 渭河流域高程和采样点布设

建、地下水开发、灌溉等人类活动对水文情势产生的影响,进而分析水文情势的综合改变程度。

突变点诊断指的是对水文时间序列的突变点进行判断和分析,是水文统计分析中的重要内容,在对异常现象的分析和预测上有重要作用^[19]。突变点诊断的方法包括 Mann-Kendall 非参数检验、Pettitt 非参数检验、R/S 分析法、有序聚类分析法、贝叶斯突变点分析法、小波分析法等。其中,有序聚类分析法对均值变异序列或含均值变异序列的检验效果显著,因此采用有序聚类分析法进行突变点诊断具有一定优势^[18]。目前国际上常用的水文情势改变程度分析方法是基于水文改变指标法 (Indicators of Hydrologic Alteration, IHA) 的变化范围法 (Range of Variation Approach, RVA)。该法是由 Richter 等^[20-21]提出的用以分析大坝、水库等水利工程对天然径流水文情势影响的方法,主要以水文情势的流量、时间、频率、延时和变化率这 5 大特征为基础。

本研究选取林家村、魏家堡、咸阳、临潼、华县 5 个水文站点 1958—2008 年水文系列的日流量资料,应用有序聚类法和 IHA 法分析渭河流域的水文情势改变程度。研究发现,上述 5 个站点的主要突变年份包括 1971 年、1986 年、1991 年和 1994 年。结合林家村、咸阳、华县这 3 个站点在 1958—2008 年的年径流量变化情况,将 1986 年作为突变年份,将

1958—1985 年的水文系列作为人类活动影响前数据,将 1986—2008 年的水文系列作为影响后数据。IHA 分析发现,因受人类活动影响而显著改变的水文参数有 5 类:月流量、年极值、年极值出现时间、高低脉冲发生频率及历时和水文变化的频率。所有参数中林家村的改变程度最大,其余 4 个站点的差别不明显。 t 检验结果表明,林家村、魏家堡和咸阳 3 个站点的水文情势改变程度为高度改变,而临潼、华县的水文情势改变程度为中度改变。这与郭爱军等^[22]通过累积距平法和 Mann-Kendall 法得到的渭河流域径流序列分别在 1971 和 1991 年发生变异的结论基本一致,与马晓超等^[23]通过有序聚类分析、秩和检验、Pettitt 检验、Mann-Whitney 检验和 IHA 法得到的林家村、咸阳和华县水文改变度依次为 70.61%、74.25% 和 73.05% 的结论对比,华县的水文情势改变程度有所下降。

2.2 渭河流域水质现状

近年来,国内学者先后采用了多种不同的技术方法对渭河流域的水质进行评估,主要研究情况见表 1。

表1 渭河流域水质评估研究情况

主要作者	应用年份	研究方法	研究区域
张荔等 ^[24]	2006	EPA-WASP6 水质模型试错法	渭河陕西段
王彦丽 ^[25]	2011	模糊综合评价法	渭河陕西段
关建玲等 ^[26]	2012	综合污染指数法	渭河陕西段
牛姗姗等 ^[5]	2013	水质污染综合指数法	渭河干流陕西段
崔芳 ^[27]	2014	灰色关联分析法	渭河宝鸡市区段
王义民等 ^[28]	2015	水量水质耦合调控模型	渭河陕西段

综合水质标识指数以单项水质标识指数为基础,不仅能对 I ~ V 类水体进行评价,也能考虑恶臭的不利影响,对劣 V 类水体进行详细比较,适用范围广且易于操作,是目前最优选的水环境质量评价方法之一^[29]。

针对渭河流域的水环境现状,笔者采用综合水质标识指数和单项水质标识指数对渭河流域水环境质量进行分析。由图 2 可知,渭河流域丰水期水环境质量状况优于枯水期。丰水期水环境质量Ⅲ类以上的点位有 18 个,劣 V 类但不黑臭点位和劣 V 类并黑臭点位有 9 个,而枯水期水环境质量Ⅲ类以上的点位有 17 个,劣 V 类但不黑臭点位和劣 V 类并黑臭点位有 19 个。这与陈亚萍^[30]通过分析渭河陕西段丰、平、枯水期的高锰酸盐指数得到的枯水期水质污染是丰水期的 1.7 ~ 1.8 倍的结论基本一致,也间接支持了其河道生态水量能有效改善水质的结论。

3 个水系中,丰水期泾河水系的水环境质量最差,渭河和北洛河水系的水环境质量相差不大,渭河

水系的水环境质量略好于北洛河水系;枯水期3个水系的水环境质量状况差别不显著。从全年水环境质量来看,渭河水系的水环境质量空间差异性较大,枯水期的水环境质量明显要差于丰水期,泾河和北洛河水系的水环境质量普遍较差。影响渭河水系的主要环境因子为TN和TP,影响泾河和北洛河水系的主要环境因子为电导率。这与冉延平等^[31]分析得到2004—2010年影响渭河水质的主要污染因子包括TP、TN等的结论具有较好的一致性,也说明长时间以来,TN和TP一直是制约渭河流域水环境质量的关

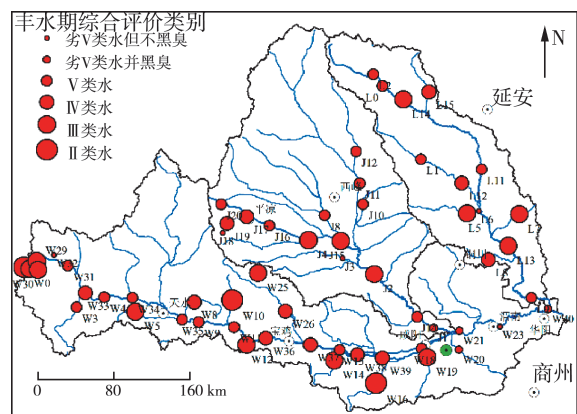
键因素。术,其中应用最为广泛的是生物完整性指数(Index of Biotic Integrity, IBI)。

生物完整性指数最早由 Karr^[36]在1981年提出,并以鱼类为例,构建了美国河流鱼类完整性指数。该指数突破了以往采用单一理化指标或单一生物指标评价水生态健康状况的局限性,可以从系统的角度全面反映待评价水域的健康状况,是目前水生态健康定量评价的热门方法^[37]。

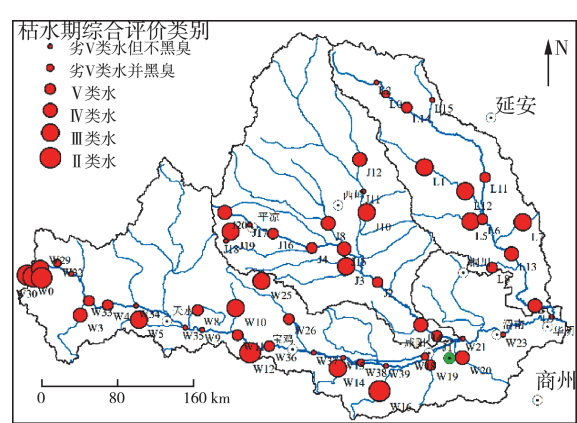
笔者运用生物完整性指数分别对鱼类、底栖动物和着生藻类这3种指示生物进行渭河流域水生态健康现状评价。鱼类生物完整性指数F-IBI健康评价结果如图3(a)和图3(d)所示。丰水期渭河流域整体健康状况较好,其中健康点位有7个,亚健康点位有16个,一般点位有19个,较差点位有15个,极差点位有3个;枯水期渭河流域整体健康状况一般,其中健康点位有3个,亚健康点位有8个,一般点位有20个,较差点位有22个,极差点位有7个。鱼类在丰、枯水期的生物完整性差异较小。渭河水系干流的健康状况优于支流,上游健康状况较好,从上游到下游表现出健康状况越来越差的趋势;泾河水系干流的健康状况优于支流马莲河,马莲河上游健康状况较差,泾河水系下游的健康状况极差;北洛河水系上游健康状况极差,支流的健康状况优于干流。这与刘铁龙等^[38]通过同时期渭河流域鱼类调查得到的渭河干流源头至宝鸡及南、北岸支流的鱼类完整性较高,关中地区、泾河中下游和北洛河干流源头及下游完整性较差的结论基本接近。

底栖动物生物完整性指数B-IBI健康评价结果如图3(b)和图3(e)所示。丰水期渭河流域健康状况较好,其中健康点位有25个,亚健康点位有5个,一般点位有8个,较差点位有4个,极差点位有3个;枯水期渭河流域健康状况较差,其中健康点位有14个,亚健康点位有11个,一般点位有5个,较差点位有1个,极差点位有14个。底栖动物在丰、枯水期的生物完整性差异较小。渭源至天水的渭河水系干流及其右岸支流、宝鸡至西安的渭河水系右岸支流以及北洛河水系中上游,水生态健康状况较好;泾河水系水生态健康一般;渭河水系干流天水市至宝鸡市河段、渭河水系干流关中平原河段,水生态健康状况处于较差和极差水平。

着生藻类生物完整性指数P-IBI健康评价结果如图3(c)和图3(f)所示。丰水期渭河流域整体健康状况一般,其中健康点位有11个,亚健康点位有15个,一般点位有26个,较差点位有6个,极差点位有2个;枯水期渭河流域整体健康状况较好,其中健康点位有12个,亚健康点位有25个,一般点位有



(a) 丰水期综合评价类别分布



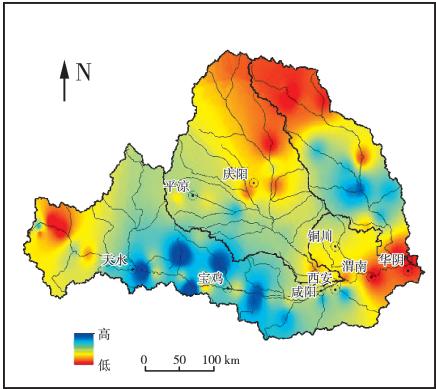
(b) 枯水期综合评价类别分布

图2 渭河流域水环境质量综合评价类别分布

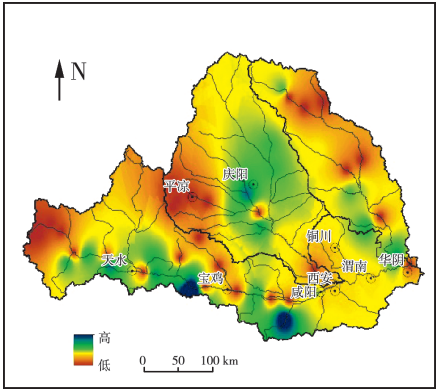
2.3 渭河流域水生态现状

近年来,随着水生态不断退化,水生态健康已经成为众多学者关注的热点问题。1977年英国学者开展利用底栖动物监测河流生物质量和利用理化指标预测生物种群的研究,从而创建了河流无脊椎动物预测和分类系统(River Invertebrate Prediction and Classification System, RIPACS)^[32],随后相继涌现出了河流评价计划(Australian River Assessment Scheme, AusRivAS)^[33]、快速生物监测协议(Rapid Bioassessment Protocols, RBPs)^[34]、溪流状态指数(Index of Stream Condition, ISC)^[35]等水生态监测技

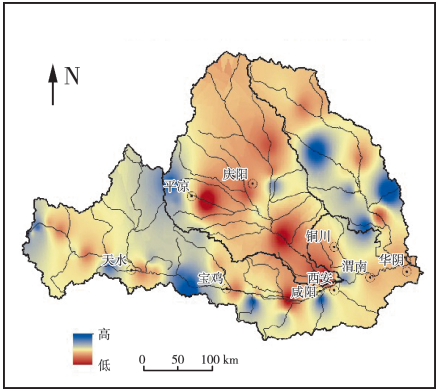
9 个,较差点位有 11 个,极差点位有 3 个。着生藻类在丰、枯水期的生物完整性差异较大。在丰水期,渭河水系健康点位均在干流右岸,上游和中游的健康状况要优于下游地区;泾河水系的健康状况较差,其中源头水体的健康状况最好,左岸支流蒲河、穿城固河和泾河下游健康状况较差;北洛河水系的健康状况与渭河水系相近,中游葫芦河、沙家河和白水河的健康状况较好。在枯水期,渭河水系整体健康状况较差,其中干流健康状况较差,下游健康状况极差,健康点位多分布于干流右岸及源头;泾河水系多数点位健康状况均为较好,其中源头的健康状况最好,马莲河健康状况一般;北洛河水系上游的健康状况较差,中下游地区较好,其中葫芦河上游和干流中游多为健康。



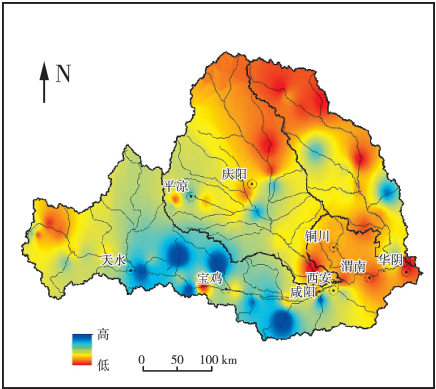
(a) 丰水期鱼类生物完整性健康评价



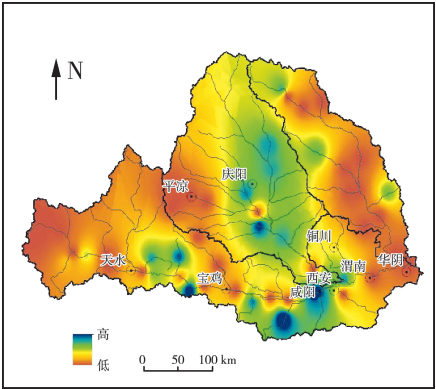
(b) 丰水期底栖动物生物完整性健康评价



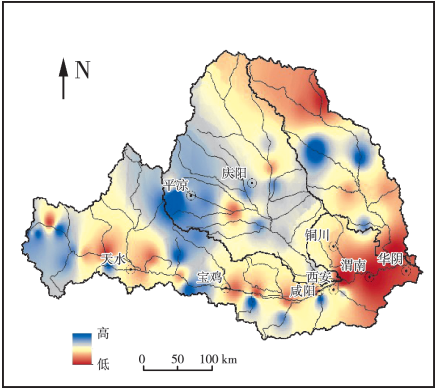
(c) 丰水期着生藻类生物完整性健康评价



(d) 枯水期鱼类生物完整性健康评价



(e) 枯水期底栖动物生物完整性健康评价



(f) 枯水期着生藻类生物完整性健康评价

图3 渭河流域水生态现状健康评价

3 结论与建议

- a. 林家村、魏家堡和咸阳 3 个站点的水文情势改变程度为高度改变,而临潼、华县的水文情势改变程度为中度改变。
- b. 渭河流域丰水期水环境质量状况优于枯水期。渭河水系的水环境质量空间差异性较大,枯水期的水环境质量劣于丰水期,泾河和北洛河水系的水环境质量普遍较差。影响渭河水系的主要环境因子为 TN 和 TP,影响泾河和北洛河水系的主要为电导率。
- c. 鱼类和底栖动物在丰、枯水期的生物完整性差异较小,着生藻类则较大。3 种水生生物的评价

结果存在一定的差异,但总体一致,表现为渭河水系干流渭源至天水段及其右岸支流、渭河水系右岸支流宝鸡至西安段以及北洛河水系中上游,水生态健康状况较好;泾河水系健康状况一般;渭河水系干流天水至宝鸡段以及关中平原段,处于较差和极差水平。

针对目前渭河流域河流健康存在的主要问题,提出以下几点建议。

a. 控制水利工程的过量开发利用,合理调控闸坝的蓄放水过程。

b. 在河道沿岸建设污水处理厂,对排河污水进行拦截和处理,并定期监测水体理化性质,重点关注TN、TP和电导率。

c. 控制流域内的石油开发强度,恢复河岸带及边坡生境,保证水生生物的正常栖息和繁衍。

参考文献:

[1] 夏朋,刘蓓. 国外水生态系统保护与修复的经验及启示 [J]. 水利发展研究,2011,11(6):72-78. (XIA Peng, LIU Qian. Overseas experiences and revelations of aquatic ecosystem protection and restoration [J]. Research of Water Resource Development, 2011, 11(6):72-78. (in Chinese))

[2] 黄显峰,郑延科,方国华,等. 平原河网地区河流生态修复技术研究与实践[J]. 水资源保护,2017,33(5):170-176. (HUANG Xianfeng,ZHENG Yanke,FANG Guohua, et al. Research and practices of river ecological restoration technology applied in plain river network area [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):170-176. (in Chinese))

[3] 张荔. 分布式水文模型构建及在渭河流域水环境解析中的应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

[4] 周祖昊,仇亚琴,贾仰文,等. 变化环境下渭河流域水资源演变规律分析[J]. 水文,2009,29(1):21-25. (ZHOU Zuhao,QIU Yaqin,JIA Yangwen, et al. Evolution law of water resources in Weihe River Basin based on dualistic water resources evolution model [J]. Journal of China Hydrology,2009,29(1):21-25. (in Chinese))

[5] 牛姗姗,张亚娟,陈洁,等. 渭河干流水质时空变化特征分析[J]. 人民黄河,2013,35(1):39-41. (NIU Shanshan,ZHANG Yajuan,CHEN Jie, et al. Temporal and spatial characteristics analysis of water quality of Weihe River [J]. Yellow River, 2013, 35(1):39-41. (in Chinese))

[6] BOZZETTI M,SCHULZ U H. An index of biotic integrity based on fish assemblages for subtropical streams in southern Brazil[J]. Hydrobiologia,2004,529:133-144.

[7] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水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 Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. 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. (in Chinese))

[8] 盛萧,毛建忠,曹然,等. 基于5种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价[J]. 水资源保护,2017,33(1):75-82. (SHENG Xiao,MAO Jianzhong,CAO Ran, et al. River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates [J]. Water Resources Protection, 2017,33(1):75-82. (in Chinese))

[9] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护,2017,33(5):1-4. (WANG Hongrui,HONG Siyang,QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage [J]. Water Resources Protection,2017,33(5):1-4. (in Chinese))

[10] 武玮,徐宗学,殷旭旺,等. 渭河流域鱼类群落结构特征及其完整性评价[J]. 环境科学研究,2014,27(9):981-989. (WU Wei, XU Zongxue, YIN Xuwang, et al. Fish community structure and biological integrity in the Wei River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2014,27(9):981-989. (in Chinese))

[11] 殷旭旺,徐宗学,鄢娜,等. 渭河流域河流着生藻类的群落结构与生物完整性研究[J]. 环境科学学报,2013,33(2):518-527. (YIN Xuwang, XU Zongxue, YAN Na, et al. Community structure and biological integrity of periphyton in the Weihe River Basin, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2):518-527. (in Chinese))

[12] 徐宗学,殷旭旺,武玮,等. 渭河流域常见水生生物图谱[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.

[13] 宋进喜,徐宗学,刘昌明,等. 渭河健康生命问题与维护对策[C]//中国科协2005年学术年会论文集. 太原:山西省新闻出版局,2005:708-713.

[14] 刘麟菲,宋佳,王博涵,等. 渭河流域硅藻群落特征及水生态健康评价[J]. 环境科学研究,2015,28(10):1560-1569. (LIU Linfei,SONG Jia,WANG Bohan, et al. Diatom community structure and aquatic system assessment of Wei River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2015,28(10):1560-1569. (in Chinese))

[15] 肖洁,罗军刚,解建仓,等. 渭河干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 人民黄河,2012,34(11):32-36. (XIAO Jie,LUO Jungang,XIE Jiancang, et al. Analysis on interannual and annual variation trend of runoff in the main stream of Weihe River [J]. Yellow River, 2012, 34(11):32-36. (in Chinese))

[16] 杜佳. 渭河河道生态服务功能评估与生态修复研究[D]. 西安:西北大学,2012.

[17] 陈靖. 基于GIS的渭河下游水质模拟及评价研究[D]. 西安:西北大学,2009.

[18] 武玮,徐宗学,李发鹏. 渭河关中段水文情势改变程度分析[J]. 自然资源学报,2012,27(7):1124-1137. (WU Wei, XU Zongxue, LI Fapeng. Hydrologic alteration analysis in the Guanzhong Reach of the Weihe River [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7):1124-1137.

- (in Chinese))
- [19] 拜存有. 渭河流域关中段径流过程变异点诊断研究 [D]. 西安:西北农林科技大学,2008.
 - [20] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.
 - [21] 于松延,徐宗学,刘麟菲,等. 渭河生态流势指标体系的构建与应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):259-264. (YU Songyan, XU Zongxue, LIU Linfei, et al. Ecological flow regime indicator system for the Wei River[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2016,52(3):259-264. (in Chinese))
 - [22] 郭爱军,畅建霞,黄强,等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(8):212-220. (GUO Aijun, CHANG Jianxia, HUANG Qiang, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe Basin[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2014,42(8):212-220. (in Chinese))
 - [23] 马晓超,栗晓玲,薄永占. 渭河生态水文特征变化研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(1):16-21. (MA Xiaochao, SU Xiaoling, BO Yongzhan. Research on eco-hydrological alternation of Weihe River Basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2011,22(1):16-21. (in Chinese))
 - [24] 张荔,孙程,林金辉,等. WASP6 水质模型在渭河流域水环境容量解析中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(6):12-14. (ZHANG Li, SUN Cheng, LIN Jinhui, et al. Application of WASP6 model to water environmental capacity in Weihe River Basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2006,17(6):12-14. (in Chinese))
 - [25] 王彦丽. 渭河流域陕西段水环境质量综合评价与对策研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(11):34-38. (WANG Yanli. The water environmental quality of Wei River at Shannxi section [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(11):34-38. (in Chinese))
 - [26] 关建玲,王蕾,裴晓龙,等. 渭河陕西段水体主要污染物变化趋势分析[J]. 水土保持通报,2012,32(6):51-54. (GUAN Jianling, WANG Lei, PEI Xiaolong, et al. Trends of major pollutants found in Weihe River in Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(6):51-54. (in Chinese))
 - [27] 崔芳. 灰色关联分析法在渭河(宝鸡段)水质评价上的应用[J]. 河南科学,2014,32(10):2113-2116. (CUI Fang. Water quality assessment of Weihe River (Baoji Section) based on gray relational evaluation analysis[J]. Henan Science,2014,32(10):2113-2116. (in Chinese))
 - [28] 王义民,孙佳宁,畅建霞,等. 考虑“三条红线”的渭河流域(陕西段)水量水质联合调控研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(5):861-872. (WANG Yimin, SUN Jianing, CHANG Jianxia, et al. Joint regulation of water quantity and quality of Weihe River Basin based on “Three Red Lines” [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2015,23(5):861-872. (in Chinese))
 - [29] 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(2/3):275-281. (WU Wei, XU Zongxue, YU Songyan. Water quality assessment and analysis for the Wei River basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2013,49(2/3):275-281. (in Chinese))
 - [30] 陈亚萍. 渭河陕西段水体污染评价及控制对策研究 [D]. 西安:西北农林科技大学,2005.
 - [31] 冉延平,何万生,夏鸿鸣,等. 渭河水质的综合标识指数法评价研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2011,26(2):49-53. (RAN Yanping, HE Wansheng, XIA Hongming, et al. Assessment of the quality of Wei River water with comprehensive identification index method[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition),2011,26(2):49-53. (in Chinese))
 - [32] WRIGHT J F,SUTCLIFFE D W,FURSE M T. Assessing the biological quality of fresh waters:RIVPACS and other techniques [M]. UK: Freshwater Biological Association,2000.
 - [33] COSTANZA R, NORTON B, HASKELL B. Ecosystem health: new goals for environmental management [M]. Washington DC: Island Press,1992.
 - [34] 唐涛,蔡庆华,刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1191-1194. (TANG Tao, CAI Qinghua, LIU Jiankang. River ecosystem health and its assessment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(9):1191-1194. (in Chinese))
 - [35] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术,2005,36(11):15-19. (DONG Zheren. Overseas assessing technology for river health [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2005,36(11):15-19. (in Chinese))
 - [36] KARR J R. Assesment of Biotic Integrity Using Fish Communities[J]. Fisheries,1981,6(6):21-27.
 - [37] 张欣,徐宗学,刘麟菲,等. 应用底栖动物完整性指数评价济南市水生态健康状况[J]. 水资源保护,2016,32(6):123-130. (ZHANG Xin, XU Zongxue, LIU Linfei, et al. Health assessment of aquatic ecology in Ji'nan City using benthic-index of biotic integrity [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):123-130. (in Chinese))
 - [38] 刘铁龙,梁林江. 陕西省渭河流域水生态环境状况调查评价[J]. 陕西水利,2016(5):4-8. (LIU Tielong, LIANG Linjiang. Investigation and assessment of aquatic ecosystem condition in the Wei River Basin, Shaanxi [J]. Water Resources in Shaanxi,2016(5):4-8. (in Chinese))

(收稿日期:2017-07-11 编辑:彭桃英)