

doi: 10.7541/2016.125

浑河流域2010—2014年的鱼类群落和水生态健康变化分析

刘伟^{1,2} 张远^{1,2} 高欣^{1,2} 贾晓波^{1,2} 马淑芹^{1,2} 刘思思^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院流域水生态保护技术研究室, 北京 100012; 2. 环境标准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为了解浑河流域鱼类群落结构的变化趋势和水生态健康变化, 分别于2010年和2014年对浑河流域46个采样点进行了鱼类和环境因子调查。其中2010年采集到鱼类15039尾, 隶属于6目9科32种; 2014年采集到鱼类10483尾, 隶属于6目10科41种。Mann-Whitney U检验表明从2010年到2014年鱼类总物种数、香农多样性指数、底层物种数百分比、植食性和肉食性个体数百分比等鱼类特征参数显著上升。典型对应分析(CCA)结果表明, 2010年显著影响鱼类群落结构的环境因子为流速、电导率、河流等级和钙离子浓度; 而2014年显著影响鱼类群落结构的环境因子则为电导率、河流等级和氨氮浓度。2010年和2014年的鱼类完整性指数(F-IBI)评分分别为 48.76 ± 24.82 和 50.41 ± 17.35 , 与2010年的评价结果相比, 2014年F-IBI结果稍有改善, 其中极好和好的点位数分别少3个和1个, 一般的点位数多9个, 而极差和差的点位分别少4个和1个。

关键词: 鱼类; 群落结构; 生物完整性指数; 浑河流域

中图分类号: Q145⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2016)05-0968-10

鱼类作为河流生态系统食物链的顶级群落, 对各种形式的人类干扰较为敏感, 鉴定分类信息完善, 寿命较长能提供时间连续性的评价, 因此在河流生态健康评价中占有重要的地位^[1, 2]。研究发现, 鱼类的群落结构受水文条件^[3]、地形地貌^[4]、水环境质量^[5]、生物作用^[6]等多种因素的共同作用, 因此鱼类群落结构与一系列的环境变量存在可预测的关系。但由于不同时期的干扰强度不同且干扰具有时间累加效应, 鱼类群落结构会随时间而发生变化, 影响鱼类群落结构的环境因子也随之变化^[7]。因此, 分析鱼类群落结构的时间变化趋势及不同时期影响鱼类群落结构的主要因子对河流生态系统的恢复和管理具有重要意义。

随着国家水专项的实施, 辽河流域有机污染物得到了显著削减, 水质逐渐改善, 水生态健康水平不断提高^[8]。研究者针对辽河水生态系统展开了细致而广泛的调查工作, 取得了重要的成果^[9, 10], 基于鱼类和藻类的生物完整性评价也在这一区域广泛开展^[11, 12]。目前, 国内针对河流水生态的调查工作,

一般都是一次评价^[13]或不同季节的比较^[14], 即在相对集中的1—2年内, 对某一流域进行水生生物调查, 从而构建生物完整性评价体系对该流域进行健康评价。然而由于国家环境保护措施的开展, 某一流域的鱼类群落和健康状况也会随之发生变化, 导致先前的健康评价具有落后性和不适性。通过不同年份的多次调查可以为管理者提供科学及时有效的流域健康状况信息从而有效地进行受损流域生态系统的恢复。因此, 本文基于2010年和2014年在浑河流域46个样点鱼类调查的基础上, 分析4年中由于国家水专项的开展, 浑河流域鱼类群落结构的变化及影响鱼类群落因子的变化, 并基于鱼类完整性指数进行河流健康评价, 分析浑河流域生态健康变化趋势, 以期为浑河流域水生态系统的保护和管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

浑河流域是辽河重要支流之一, 位于辽宁省东

收稿日期: 2015-09-06; 修订日期: 2016-01-05

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-001-02)资助 [Supported by Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment in China (Grant No. 2012ZX07501-001-02)]

作者简介: 刘伟(1991—), 男, 湖北黄冈人; 硕士; 主要从事流域生态学研究。E-mail: weizaitjdx@126.com

通信作者: 张远, E-mail: zhangyuan@craes.org.cn

部地区(40.71°–42.17°N, 122.13°–125.21°E), 全长为415 km, 流域面积达 $1.14 \times 10^4 \text{ km}^2$, 发源于抚顺市清源县长白山支脉滚马岭。浑河为不对称水系, 东侧支流密集, 坡陡谷深, 水量丰富; 西侧支流很少, 水量不大。浑河流经辽宁中部城市群, 重工业发达, 人口稠密, 为沿岸城市废水排放的主要通道。浑河上游建有大伙房水库, 集水面积 5437 km^2 , 库容量为 $21.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。大伙房水库以上区域为低山丘陵区, 森林覆盖率高; 中下游为平原地区, 工业区密集, 土地开发程度高。

1.2 数据获取

采样点设置 依据浑河水系的分布并综合考虑野外的可达性及可操作性, 在浑河干流及10条支流(苏子河、红河、英额河、社河、章党河、古城河、李石河、白塔堡河、细河和蒲河)设置46个采样点(图1), 并分别于2010年6月和2014年8月对这46个采样点进行鱼类调查。

样品采集 对于可涉水河段($<1.5 \text{ m}$), 沿河岸在采样点上下游各设置200 m长度的调查范围, 采用电鱼法, 每个样点鱼类采集时间为30min。对于不可涉水的河段($\geq 1.5 \text{ m}$), 选用电鱼法和挂网法(网径 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ 和 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 三种)配合进行, 电鱼法只在靠近河岸的浅水区进行; 挂网在深水区进行, 在不同类型的生境下布设网具,

挂网时间为60min。待样品采集后, 在野外进行测/称量和鉴定, 记录鱼的全长、体长、体重和数量等。对于现场不能鉴定的样品, 用5%的甲醛保存鱼类样品, 带回实验室鉴定。鱼类鉴定主要依据《东北地区淡水鱼类》^[15]。

环境因子调查 环境因子的调查包括自然地理因子、水化学因子、物理因子和栖息地质量(QHEI)调查。

自然地理因子包括: 海拔和河流等级。其中, 海拔通过GPS (Trimble-Juno SB)测得; 河流等级用Strahler (1957)提出的方法从1:25万水系图获取。

水化学因子包括: pH、溶解氧含量(DO)、电导率(EC)、总溶解性固体(TDS)、悬浮物固体含量(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})、碱度(Alk)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、活性磷酸盐(PO_4^{3-})。其中, pH、DO、EC和TDS利用手持式YSI多参数水质分析仪(YSI ProPlus)现场测定, 其他指标通过采集水样, 低温运送至实验室, 48h内按照《水和废水分析检测方法》中规定方法进行测定。

物理因子包括水深(Depth)、流速(Flow rate)和河宽(Width)。具体测量方法为: 分别在采样点和采样点上下游50 m河段内取一个断面, 采用激光测距

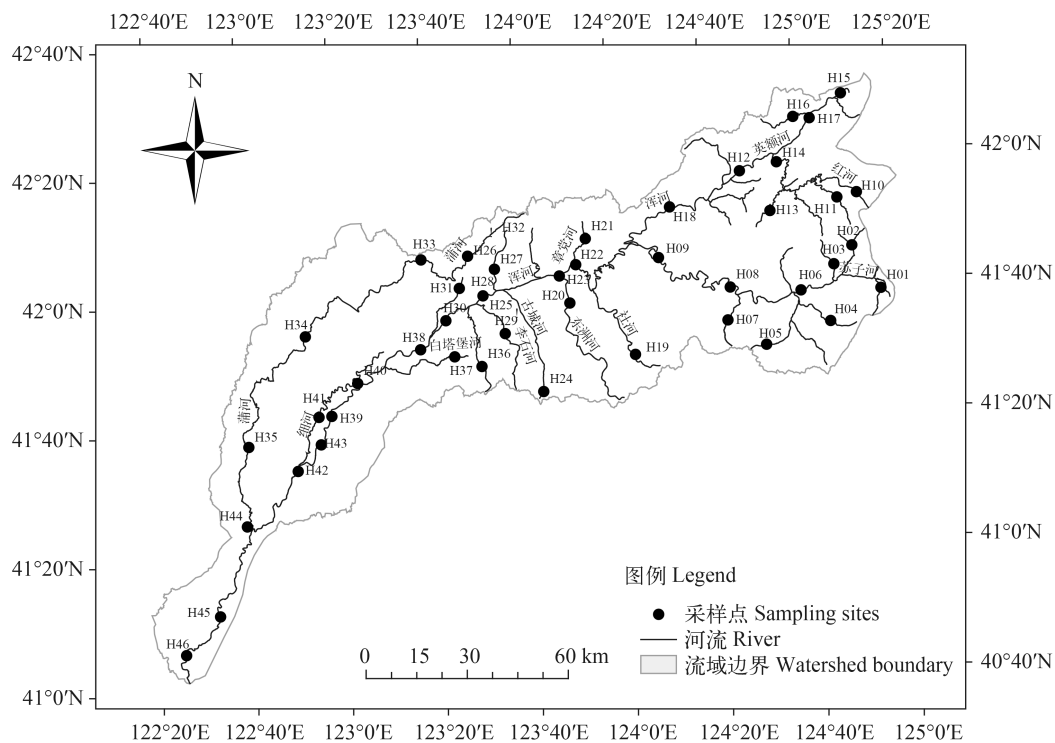


图1 浑河流域采样点分布

Fig. 1 Location of the sample sites in the Hun River Basin

仪(Leupold RX-IV)测量断面湿宽,同时每个断面从河岸开始每隔1 m用流速仪(FP 201)测量一次水深和流速直到对面河岸,流速采用五点法计算,最终结果取3个断面的平均值。

生境质量调查评价参照郑丙辉等^[16]的研究,选取10个评价指标(底质、栖境复杂性、速度和深度结合、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸边土壤利用类型),每项20分,共计4个得分等级(好16—20、较好11—15、一般6—10、差0—5)。

1.3 数据分析

鱼类群落结构 参照以往的研究^[11, 13]并结合鱼类的习性、栖息地等信息,将池沼公鱼(*Hypomesus olidus* McAllister)、马口鱼(*Opsariichthys bidens* Günther)、洛氏鳅(*Phoxinus lagowskii* Dybowski)、北方花鳅(*Cobitis granoei* Rendahl)、点纹银鮡(*Squalidus wolterstorffi* Regan)、沙塘鳢(*Odontobutis obscurus* Temminck et Schlegel)视为敏感种;将鲫(*Carassius auratus* Linnaeus)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva* Temminck et Schlegel)、鲮(*Hemiculter leucisculus* Basilewsky)、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus* Cantor)视为耐受种。

采用Mann-Whitney U检验分析不同年份鱼类特征参数和环境因子的差异显著性。对2010年和2014年各样点鱼类多度数据进行去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)发现,最长轴的梯度长度分别为3.1和3.6,介于3.0—4.0,均可以采用典型对应分析(CCA)^[17]。在对鱼类数据和环境因子数据进行典型对应分析时,先对所有数据进行 $\log_{10}(x+1)$ 转换,然后将通过999次蒙特卡罗检验后单个因子贡献率的 P 值小于0.05的环境因子作为显著影响鱼类群落的环境因子。此外,在进行DCA和CCA分析前,需剔除出现频率低于5%的鱼类,以避免稀有种的干扰。Mann-Whitney U检验于SPSS 19.0中进行,DCA和CCA分析在Canoco 5.0中进行。

鱼类生物完整性(F-IBI)评价 (1)核心参数的筛选:根据渠晓东等建立的标准化参照点和受损点的选取方法^[18],综合考虑水质和栖息地质量评分筛选敏感点(水质达到Ⅱ类水体,栖息地质量评分 >120 ,人类活动强度和河岸边土壤利用类型两项得分之和 ≥ 24)和受损点(水质等级低于Ⅳ级,栖息地质量评分 <90 ,人类活动强度和河岸边土壤利用类型两项得分之和 ≤ 18)。参考裴雪娇等^[11]、黄亮亮等^[19]和张浩等^[20]确立的候选指标,结合本研究实际采集鱼类的情况和数据的可获得性,确立了5类23个候选指标(表1)。参照王备新等^[21]的研究方法,

对这23个指标分别进行分布范围、判别能力和相关性分析($|R|<0.9$)的检验,最终筛选出F-IBI的核心参数。(2)比值法计算F-IBI值:王备新等^[21]研究发现比值法的准确率明显优于3分法和4分法,因此本研究采用比值法计算F-IBI核心参数的分值,比值法具体计算公式见裴雪娇等^[11]。(3)IBI指标体系评价标准:参照渠晓东等^[18]研究中的方法,将所有样点得分的95%分位数值作为健康评价标准,若样点的F-IBI值大于95%分位数值,则该样点为极好。将小于95%分位数的分布范围进行4等分,确定出好、一般、差、极差4个等级的划分标准。

2 结果

2.1 浑河流域鱼类群落结构和环境因子的变化趋势

于2010年在浑河流域46个采样点共采集到鱼类15039尾,隶属于6目9科32种,其中种类最多的为鲤科(Cyprinidae, 20种),占62.5%;其次为鳅科(Cobitidae, 4种),占12.5%;塘鳢科(Eleotridae, 2种),占6.25%,渔获量较大的物种分别为洛氏鳅(35.52%)、棒花鱼(*Abbottina rivularis* Basilewsky, 20.42%)、宽鳍鳊(*Zacco platypus* Temminck et Schlegel, 13.03%)、鲫(6.80%)和麦穗鱼(4.04%),占总渔获量的79.81%。而在2014年在相同的采样点采集到鱼类10483尾,隶属于6目10科41种,种类数最多的为鲤科(21种),占51.22%;其次为鳅科(6种),占14.63%;鰕虎鱼科(Gobiidae, 4种),占9.76%,渔获量较大的物种分别为洛氏鳅(22.35%)、北方条鳅(*Nemachilus nudes* Bleeker, 18.10%)、棒花鱼(9.49%)、宽鳍鳊(9.44%)和波氏吻虾虎(*Rhinogobius cliffordpopei* Nichols, 9.33%),占总渔获量的68.71%。

通过对鱼类群落结构的Mann-Whitney U检验分析(表2),可以发现,从2010年到2014年,鱼类种类数和香农多样性指数显著上升,而鱼类个体总数则无明显差异。鲤科物种数百分比显著下降,鰕虎鱼科和塘鳢科物种数百分比则显著升高。此外,中下层鱼类物种数百分比显著下降,而底层鱼类物种数百分比显著上升。植食性和肉食性个体数百分比都有显著上升,其余参数的变化则不显著。

通过Mann-Whitney U检验分析2010年和2014年浑河流域的环境因子(表3),发现pH、电导率、钙离子浓度和碱度这些表征无机性污染的指标显著性上升,而水深、流速、溶解氧和表征有机污染的总氮、高锰酸盐指数、氨氮及磷酸根浓度这些指标显著下降,即相对于2010年,2014年的水深变浅,流速变小,有机性污染减轻而无机性污染加重。

表 1 F-IBI候选指标列表

Tab. 1 List of F-IBI candidate metrics for the Hun River Basin

属性归属 Attribute	候选参数指标 Candidate metrics	参数缩写 Abbreviation	对干扰的响应 Response to disturbance
种类组成与丰度 Composition and richness	鱼类总种类数	M1	下降
	Shannon-Wiener多样性指数	M2	下降
	鲤形目种类数	M3	下降
	鲈形目种类数	M4	下降
	鲤科鱼类物种数百分比	M5	上升
	鳅科鱼类物种数百分比	M6	下降
	鰕虎鱼科鱼类物种数百分比	M7	下降
	塘鳢科物种数百分比	M8	下降
	中上层鱼类物种数百分比	M9	下降
	中下层鱼类物种数百分比	M10	下降
营养结构 Trophic structure	底层鱼类物种数百分比	M11	下降
	杂食性鱼类个体数百分比	M12	上升
	植食性鱼类个体数百分比	M13	下降
	肉食性鱼类个体数百分比	M14	下降
	昆虫食性鱼类个体数百分比	M15	下降
繁殖共位群 Reproductive guild	产黏性卵鱼类物种数百分比	M16	上升
	产沉性卵鱼类物种数百分比	M17	下降
	产浮性卵鱼类物种数百分比	M18	下降
	筑巢产卵鱼类物种数百分比	M19	下降
耐受性 Tolerance	特殊产卵方式鱼类物种数百分比	M20	下降
	敏感性鱼类个体百分比	M21	下降
鱼类数量与健康状况 Quantity and health	耐受性鱼类个体百分比	M22	上升
	鱼类个体总数	M23	下降

表 2 浑河流域两个年份鱼类特征参数比较

Tab. 2 The comparison of fish parameters between two years in the Hun River Basin

鱼类特征参数 Fish parameters	2010	2014	<i>P</i>
M1	7.87±3.65	10.09±3.33	0.006*
M2	1.67±0.62	2.17±0.60	0*
M5	67.29%±18.70%	58.33%±16.64%	0.016*
M6	19.76%±17.04%	21.75%±15.14%	0.556
M7	2.65%±4.85%	13.19%±8.87%	0*
M8	5.16%±8.14%	1.61%±3.37%	0.026*
M9	13.23%±14.20%	11.56%±6.17%	0.853
M10	52.92%±18.90%	43.23%±16.57%	0.009*
M11	29.50%±18.61%	41.73%±18.57%	0.001*
M12	89.51%±17.63%	90.54%±11.00%	0.105
M13	3.50%±11.54%	3.84%±7.37%	0.002*
M14	0.28%±1.68%	0.81%±2.28%	0.009*
M15	6.71%±13.99%	4.78%±6.67%	0.289
M21	33.80%±36.69%	17.52%±22.50%	0.190
M22	30.63%±32.71%	23.21%±25.94%	0.401
M23	326.93±446.93	227.89±166.60	0.897

注: **P*<0.05Note: **P*<0.05

2.2 影响浑河流域鱼类群落结构的环境因子随时间的变化

分别对2010年和2014年浑河流域的环境因子进行CCA分析(图2), 结果表明: 在2010年显著影响浑河流域鱼类群落结构的环境因子为河流等级、钙离子浓度、电导率和流速; 而在2014年显著影响浑河流域鱼类群落结构的因子为河流等级、电导率和氨氮浓度。其中, 两个CCA图都表现出电导率和河流等级与第一轴正相关, 且位于干流下游的电

导率明显高于上游干流和周边支流, 位于大伙房水库上游的支流点位都处在第二、三象限, 与河流等级呈负相关。在2010年的样点与环境因子的CCA图中, 钙离子浓度与河流等级相关性较高, 表明随着河流等级的升高, 钙离子浓度也不断升高。此外, 位于中上游点位的流速明显高于下游点位的流速。而在2014年样点与环境因子的CCA图表明, 氨氮浓度与第一轴正相关, 且下游区域的浓度明显高于中上游区域。

表3 浑河流域两个年份环境因子比较

Tab. 3 The comparison of environmental factors between two years in the Hun River Basin

环境因子 Environmental factors	2010	2014	P
pH	8.44±0.34	8.80±0.61	0.006*
EC (μs/cm)	270.12±198.80	399.91±291.48	0.005*
TDS (mg/L)	255.30±198.58	193.91±147.90	0.412
Depth (cm)	28.36±8.32	20.73±17.32	0*
Flow rate (m/s)	0.44±0.29	0.28±0.14	0.016*
Width (m)	78.18±106.01	83.56±126.86	0.963
DO (mg/L)	10.44±2.88	7.45±1.72	0*
SS (mg/L)	14.91±14.52	23.04±47.63	0.502
TN (mg/L)	6.41±4.04	1.50±1.02	0*
TP (mg/L)	0.26±0.44	0.16±0.16	0.639
Ca ²⁺ (mg/L)	30.13±18.16	57.93±22.13	0*
Mg ²⁺ (mg/L)	13.88±6.87	11.35±5.13	0.072
ALK (mg/L)	104.90±86.94	191.97±74.21	0*
COD _{Mn} (mg/L)	4.64±2.46	2.82±0.83	0*
NH ₃ -N (mg/L)	1.64±3.15	0.53±0.60	0.004*
NO ₃ -N (mg/L)	2.48±3.01	0.91±0.63	0.052
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0.22±0.38	0.06±0.09	0.016*
QHEI	112.80±30.70	105.54±18.13	0.256

注: *P<0.05
Note: *P <0.05

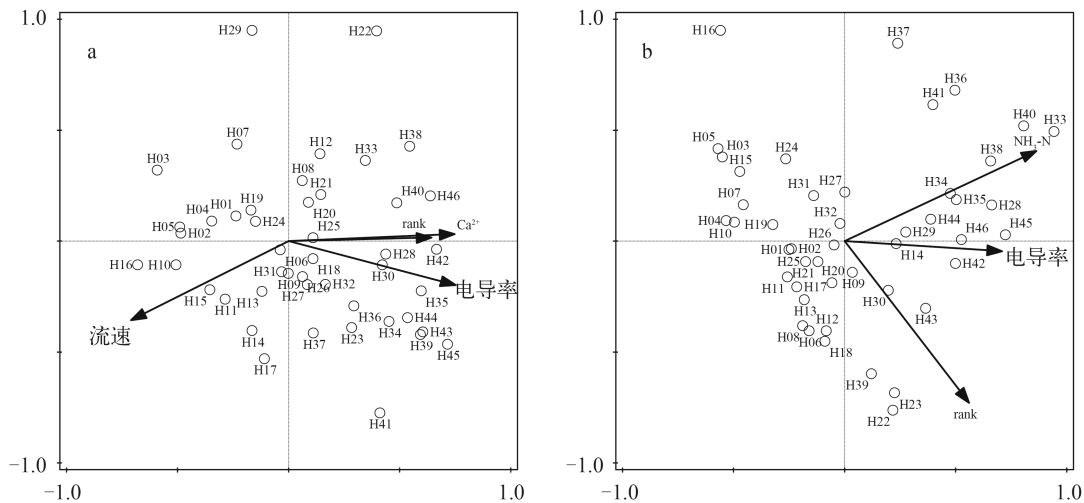


图2 浑河流域2010年(a)和2014年(b)环境因子与鱼类群落的典型对应分析图

Fig. 2 CCA biplot of environmental variables and species composition of 2010 (a) and 2014 (b) in the Hun River Basin

2.3 鱼类完整性评价结果随时间的变化

构建浑河流域鱼类完整性的核心参数分布范围和评分方法如表 4 所示, 基于 F-IBI 的浑河健康评价标准如表 5 所示。浑河流域 2010 年和 2014 年的鱼类完整性 (F-IBI) 评价结果如图 3 所示。

浑河流域 2010 年和 2014 年两个年份的鱼类完整性评价结果大致相同, 即浑河上游的支流苏子河、英额河、红河和社河健康状况较好, 浑河中游干流和周边支流的健康状况一般, 而位于浑河下游的浑河干流及支流健康状况较差。经 Pearson 相关性分析发现, 2010 年和 2014 年的 F-IBI 的相关系数为 0.756 ($P < 0.01$)。2010 年和 2014 年的 F-IBI 评分分别为 48.76 ± 24.82 和 50.41 ± 17.35 , 2010 年评价结果为极好的点为 4 个, 占总样点的 8.7%; 好的点为 14 个, 占 30.4%; 一般的点为 11 个, 占 23.9%; 差的点为 11 个, 占 23.9%; 极差的点为 6 个, 占 13.1%。而 2014 年评价结果为极好、好、一般、差和极差的点位数分别为 1 (2.2%)、13 (28.3%)、20 (43.5%)、10 (21.7%) 和 2 (4.3%)。与 2010 年的 F-IBI 评价结果相比, 2014 年鱼类完整性评价结果中极好和好的点位数分别少 3 个和 1 个, 一般的点位数多 9 个, 而极差和差的点位数分别少 4 个和 1 个。

3 讨论

3.1 不同年份鱼类群落结构和环境因子的差异

浑河作为辽河水系的水资源最丰富的河流, 是辽宁省中心城市圈的重要水源地, 但是由于近年来受到市区排放的污废水及沿岸农田面源污染的影响

响^[22], 浑河水质严重恶化, 导致鱼类群落结构发生急剧变化。根据辽河地区鱼类历史资料^[15], 20 世纪 80 年代浑太河水系共鉴定出鱼类 62 种, 其中鲤科鱼类 37 种, 鳅科鱼类 3 种 (浑河是浑太河水系的主要分支, 其鱼类种类与浑太河水系相差不大)。而 20 世纪 90 年代后期浑河共鉴定出鱼类 55 种, 其中鲤科鱼类 36 种, 鳅科 4 种^[23]。对比此次调查, 2010 年和 2014 年分别鉴定出鱼类 32 种和 41 种。可见, 近 30 年来由于水质恶化, 浑河流域的鱼类种数明显减少。

鱼类群落结构会随着年份而发生变化^[24], 对比 2010 年和 2014 年的鱼类群落结构, 发现 2014 年鉴定出的鱼类比 2010 年多 9 种, 样点的种类数和香农多样性指数明显增大, 且植食性和肉食性个体百分比都较 2010 年显著上升, 底层鱼类物种数百分比由于底栖性鰕虎鱼科的出现而显著上升, 表明鱼类群落功能由单一向复杂化发展, 水生态质量在缓慢恢复中。这与长江靖江段鱼类物种多样性的年际变化类似, 由于禁渔期制度的全面实施, 从 2002—2011 年, 鱼类物种丰富度和多样性呈显著上升的趋势^[25]。对比浑河两个年份的环境因子, 2014 年有机污染状况较 2010 年显著改善, 而无机污染状况则显著加剧。这主要是由于水专项的开展, 辽河流域作为重点流域进行了水污染治理, 控制重点主要集中在 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的控制减排上^[8], 因此有机污染显著减轻, 而无机污染情况由于挖沙、开山、采矿等活动的广泛开展而加重。由于有机污染物排放的消减, 浑河水环境明显改善, 鱼类群落功能复杂化, 种类明显增多, 底层鱼类种类数也因为有机物沉积减少而显著上升。

表 4 浑河流域鱼类生物完整性核心参数的分布范围和评分方法

Tab. 4 Distribution and scoring criteria of core F-IBI metrics in the Hun River Basin

核心参数 Core metrics	最大值 Maximum	95th 分位数 95% quantile	5th 分位数 5% quantile	最小值 Minimum	参数分值计算公式 Equations for scores
M3	14	13	2	1	$M3/13 \times 100$
M5	100	100	34.13	14.29	$(100 - M5)/65.87 \times 100$
M6	60	50	0	0	$M6/50 \times 100$
M11	80	63.49	0	0	$M11/63.49 \times 100$
M19	28.57	25	0	0	$M19/25 \times 100$
M21	98.62	89.49	0	0	$M21/89.49 \times 100$
M22	100	85.01	0.14	0	$(100 - M22)/99.86 \times 100$
M23	2472	723.65	11.55	1	$M23/723.65 \times 100$

表 5 基于 F-IBI 的浑河流域健康评价标准

Tab. 5 Assessment criteria of health for F-IBI of two years in the Hun River Basin

极好 Excellent	好 Good	一般 Moderate	差 Poor	极差 Very poor
>80.68	60.51—80.68	40.34—60.51	20.17—40.34	≤20.17

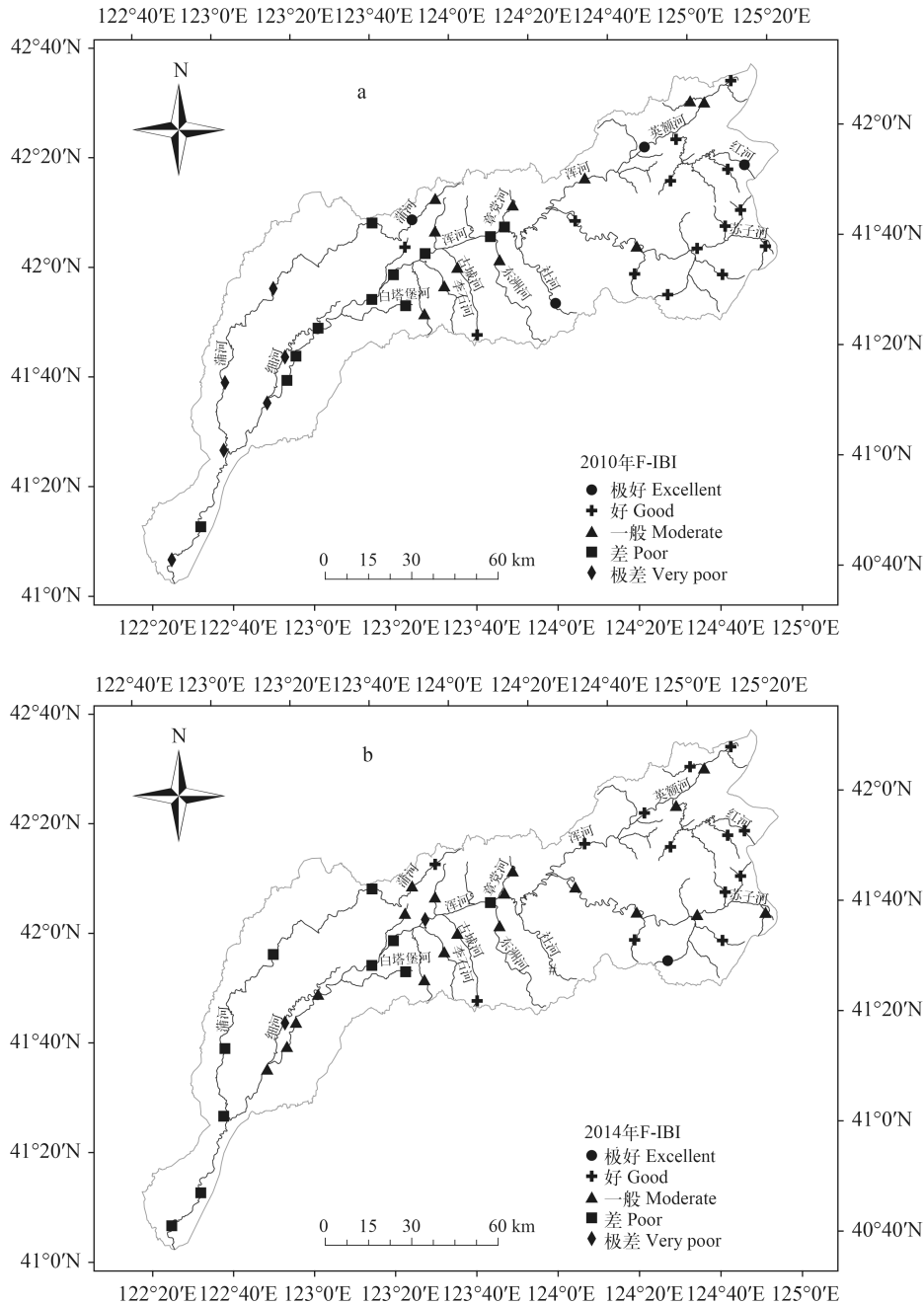


图3 浑河流域2010年(a)和2014年(b)的鱼类生物完整性评价

Fig. 3 The assessment of environmental condition of 2010 (a) and 2014 (b) in the Hun River Basin

3.2 不同年份影响鱼类群落结构的环境因子差异性

鱼类群落结构受到环境因子影响的机理是非常复杂的,不同河流、不同季节影响鱼类群落结构的环境因子都不相同^[10, 26, 27]。本调查发现不同年份影响鱼类群落结构的环境因子也不相同,对两个年份影响鱼类群落结构的环境因子为河流等级和电导率,此外在2010年影响鱼类群落结构的影响因子还有钙离子浓度和流速,而在2014年影响鱼类群落的显著性因子还包括氨氮浓度。从环境与样点的CCA图可以看出,在2010年和2014年电

导率较高的点均集中在浑河下游干支流,这里的人口集中,人为干扰大,污染集中,鱼类物种数相对较少。河流等级对鱼类群落结构具有较大影响,随着河流等级的增大,栖息地的复杂性和多样性也随之增加,鱼类物种数也出现线性或非线性的增加^[28]。尽管河流等级在2010年和2014年均对鱼类群落结构的显著环境因子,但其作用机制不尽相同。经Kruskal-Wallis检验发现,在2010年,浑河流域四级河流的鱼类物种数和个体数最大,其次为二级河流,五级河流最低;而在2014年,浑河流域四级河流鱼

类物种数和香农多样性指数最大, 其次为二级河流, 一级河流最低, 这可能是由于受到了中度干扰理论的影响^[28]。在2014年, 一级河流物种数最少, 主要原因是相比较于2010年, 浑河流域中下游污染控制措施较严, 水质得到了改善, 而上游源头区由于旅游开发和矿产资源的需求而不断受到人为干扰。流速仅在2010年是显著影响鱼类群落结构的环境因子, 这可能主要是因为2010年水流速度较高, 对底质冲刷较严重, 导致底层鱼类物种数较少, 从而鱼类群落结构受到影响。此次调查中也发现钙离子仅是2010年影响群落结构的显著性因子, 从2010年到2014年, 钙离子浓度显著升高, 经过逐渐的适应过程, 可能鱼体对钙离子的耐受程度加强, 从而导致2014年钙离子已经不再是显著影响鱼类群落结构的环境因子。氨氮是水体有机物污染的重要指标, 其对鱼类有毒害作用。由于浑河流域水体污染具有氨氮浓度较高的特点^[22], 而Amisah和Cowx^[29]的研究表明当氨氮严重超标后会导致鱼类物种数和个体数大幅减少。2010年的浑河流域的氨氮浓度均值大于1.5 mg/L, 在此浓度下, 鱼类物种数大幅减少, 相对耐污的鲤科鱼类比例较高。而在2014年氨氮浓度由于减排措施的展开而大幅消减, 鲤科鱼类比例显著下降, 出现对氨氮敏感的物种。此外, 氨氮作为藻类的重要营养物质, 会影响藻类的生长和繁殖^[12], 从而间接影响植食性鱼类的数量。在2014年, 植食性鱼类显著上升, 对氨氮耐受性较高的鲤科鱼类比例下降, 因此尽管2014年氨氮浓度较低, 但其是影响鱼类群落结构的显著性因子。因而当流域进行污染物的减排时, 由于水体的自净作用和污染物来源的减少, 引起水体环境因子的变化, 鱼类群落结构也随之变化, 同时由于鱼类适应性地形形成、新物种的出现、耐受性鲤科物种的减少及鱼类群落结构的复杂化, 导致影响鱼类群落结构的显著性因子也发生变化, 因此分析不同年份影响鱼类群落结构的显著性因子能及时有效地为管理部门提供数据支撑, 形成一个良性的反馈机制, 对于鱼类群落结构对环境因子的响应机制和对受损的生态系统进行恢复具有重要借鉴作用。

3.3 不同年份水生态健康状况的差异

年跟踪评价是完整性评价中的重要方法, 用来分析人为干扰对生物完整性的影响^[30]。Zhu和Chang^[31]比较了长江上游1997—2002年的鱼类完整性变化, 发现随着人为活动干扰的加强, 鱼类完整性出现了明显的退化。此次在浑河流域发现2014年的IBI的平均评分为50.42, 略高于2010年的IBI平均评分48.76, 说明两年的评价结果总体上相

差不太大, 但2014年的健康状况稍有提高。从每一个点的健康状况变化来看, 2010年到2014年, 健康评价上升一个等级的点位12个, 上升两个等级的点为1个, 下降一个等级的点位有8个, 下降两个等级的点为2个, 评价结果没变化的点位为23个。这表明2014年的河流健康状况较2010年有了小幅的提升, 且河流评价等级上升的点位主要分布在浑河流域的中下游区域和上游支流的末端区域, 下降的点位主要分布在中上游支流的源头区域, 主要是水专项开展以来加强了浑河流域污染物的减排工作, 因此2014年浑河流域的有机污染物相对于2010年显著减少。而浑河流域的中下游区域企业集中, 人口密集, 开展减排后效果最明显, 随着污染物浓度的减少, 河流健康等级也随之上升。而浑河流域上游建有大伙房水库, 由于水库保护措施的开展, 上游支流入大伙房水库点位的健康等级也因此提升。而源头区域由于一般路况复杂, 监管比较困难, 随着人口的增长, 源头区域开始受到人为干扰, 此外由于矿石开挖和挖沙等活动的开展, 这些区域的生境受到破坏, 同时水体电导率、硬度和碱度显著升高, 导致这些区域健康等级下降。

参 考 文 献:

- [1] Harris J H. The use of fish in ecological assessments [J]. *Australian Journal of Ecology*, 1995, **20**(1): 65—80
- [2] Trautwein C, Schinegger R, Schmutz S. Cumulative effects of land use on fish metrics in different types of running waters in Austria [J]. *Aquatic Sciences*, 2012, **74**(2): 329—341
- [3] Marchetti M P, Moyle P B. Effects of flow regime on fish assemblages in a regulated California stream [J]. *Ecological Applications*, 2001, **11**(2): 530—539
- [4] Bhatt J P, Manish K, Pandit M K. Elevational gradients in fish diversity in the Himalaya: Water discharge is the key driver of distribution patterns [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(9): e46237
- [5] Figuerola B, Maceda-Veiga A, De Sostoa A. Assessing the effects of sewage effluents in a Mediterranean creek: fish population features and biotic indices [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **694**(1): 75—86
- [6] Suárez Y R, Petrere Jr M, Catella A C. Factors determining the structure of fish communities in Pantanal lagoons (MS, Brazil) [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2001, **8**(2): 173—186
- [7] Yu H C. Fish community structure in the Changjiang Estuary and adjacent waters [D]. Thesis for Master of Science. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao. 2008 [于海成. 长江口及邻近海域鱼类群落结构分析. 青岛: 中国科学院海洋研究所. 2008]
- [8] Meng W. Construction of technology system for water-

- shed water pollution treatment and management- exploration and practice of the major water program in Liaohe River Basin [J]. *Engineering Science*, 2013, **15**(3): 4—10 [孟伟. 辽河流域水污染治理和水环境管理技术体系构建-国家重大水专项在辽河流域的探索与实践. 中国工程科学, 2013, **15**(3): 4—10]
- [9] Wang W, Wang B, He X Y, *et al.* Study of zoning and distribution characteristics of fish in Taizi River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(5): 494—501 [王伟, 王冰, 何旭颖, 等. 太子河鱼类群落结构的分布特征. 环境科学研究, 2013, **26**(5): 494—501]
- [10] Ding S, Zhang Y, Qu X D, *et al.* Influence on the spatial distribution of fish in Taizi River Basin by environmental factors at multiple scales [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2272—2280 [丁森, 张远, 渠晓东, 等. 影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析. 环境科学, 2012, **33**(7): 2272—2280]
- [11] Pei X J, Niu C J, Gao X, *et al.* The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(21): 5736—5746 [裴雪娇, 牛翠娟, 高欣, 等. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康. 生态学报, 2010, **30**(21): 5736—5746]
- [12] Yin X W, Zhang Y, Qu X D, *et al.* Community structure and biological integrity of periphyton in Hunhe River water system of Liaoning Province, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(10): 2732—2740 [殷旭旺, 张远, 渠晓东, 等. 浑河水系着生藻类的群落结构与生物完整性. 应用生态学报, 2011, **22**(10): 2732—2740]
- [13] Wu W, Xu Z X, Yin X W, *et al.* Fish community structure and the effect of environmental factors in the Wei River basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(5): 1298—1308 [武玮, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 渭河流域鱼类群落结构特征及其受环境因子的影响分析. 环境科学学报, 2014, **34**(5): 1298—1308]
- [14] Song M J, Deng H T, Zhu F Y, *et al.* Seasonal dynamics of macroinvertebrates community structure in Daning river after a 175 m depth of impoundment in the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 1046—1053 [宋明江, 邓华堂, 朱峰跃, 等. 三峡水库175 m蓄水后大宁河底栖动物群落结构季节动态. 水生生物学报, 2015, **39**(5): 1046—1053]
- [15] Xie Y H. *Freshwater Fishes in Northeast Region of China* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press. 2007, 1—460 [解玉浩. 东北地区淡水鱼类. 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 2007, 1—460]
- [16] Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 928—936 [郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 928—936]
- [17] Lepš L, Šmilauer P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO* [M]. New York: Cambridge University Press. 2003, 184—198
- [18] Qu X D, Liu Z G, Zhang Y. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(15): 4661—4672 [渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数. 生态学报, 2012, **32**(15): 4661—4672]
- [19] Huang L L, Wu Z Q, Jiang K, *et al.* Development and application of IBI based on fish to assess the river's health in the East Tiaoxi River [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(7): 1280—1289 [黄亮亮, 吴志强, 蒋科, 等. 东苕溪鱼类生物完整性评价河流健康体系的构建与应用. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1280—1289]
- [20] Zhang H, Ding S, Zhang Y, *et al.* Assessment of the fish index of biotic integrity and its relationship with environmental factors in the Xiliao River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 829—839 [张浩, 丁森, 张远, 等. 西辽河流域鱼类生物完整性指数评价及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 829—839]
- [21] Wang B X, Yang L F, Hu B J, *et al.* A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6): 1481—1490 [王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数B-IBI评价溪流健康. 生态学报, 2005, **25**(6): 1481—1490]
- [22] Zhang H L, Sun L N, Luo Q, *et al.* Seasonal variation and sources of pollutants in surface water of Hunhe River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(1): 119—125 [张宏龄, 孙丽娜, 罗庆, 等. 浑河流域水体污染的季节性变化及来源. 生态学杂志, 2011, **30**(1): 119—125]
- [23] Shi Y Q, Tong J, Han T X. Hydrobios diversity in Mid and Upper Stream of Hun River and its protection [J]. *Environmental Protection Science*, 2002, **28**(110): 7—9 [史玉强, 童君, 韩天雪. 浑河中、上游水生生物多样性及其保护. 环境保护科学, 2002, **28**(110): 7—9]
- [24] Yu H C, Xian W W. The environment effect on fish assemblage structure in waters adjacent to the Changjiang (Yangtze) River estuary (1998—2001) [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, **27**(3): 443—456
- [25] Sun S S. The research of the temporal pattern of fish assemblage in coastal Jingjiang section of the Yangtze River over last decade [D]. Thesis for Master of Science. Shanghai Ocean University, Shanghai. 2013 [孙莎莎. 最近10年长江靖江沿岸鱼类群聚特征的时间格局研究. 硕士学位论文, 上海海洋大学, 上海. 2013]
- [26] Liu B, Zhang Y, Qu X D, *et al.* Community structure and diversity of fishes in the Liao River Nature Reserve [J]. *Freshwater Fisheries*, 2013, **43**(3): 49—53 [刘斌, 张远, 渠晓东, 等. 辽河干流自然保护区鱼类群落结构及其多样性变化. 淡水渔业, 2013, **43**(3): 49—53]

- [27] Gao X, Zhang Y, Ding S, *et al.* Response of fish communities to environmental changes in an agriculturally dominated watershed (Liao River Basin) in northeastern China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 130—141
- [28] Yan Y Z, Zhan Y J, Chu L, *et al.* Effects of stream size and spatial position on stream-dwelling fish assemblages [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(5): 1022—1030 [严云志, 占姚军, 储玲, 等. 溪流大小及其空间位置对鱼类群落结构的影响. 水生生物学报, 2010, 34(5): 1022—1030]
- [29] Amisah S, Cowx I G. Response of the fish populations of the River Don in South Yorkshire to water quality and habitats improvements [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 108(2): 191—199
- [30] Teels B M, Mazanti L E, Rewa C A. Using an IBI to assess effectiveness of mitigation measures to replace loss of a wetland-stream ecosystems. *Wetlands*, 2004, 24(2): 375—384
- [31] Zhu D, Chang J. Annual variations of biotic integrity in the upper Yangtze River using an adapted index of biotic integrity (IBI) [J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 564—572

VARIATION OF FISH COMMUNITY STRUCTURE AND WATER SYSTEM CONDITIONS FROM 2010 TO 2014 IN HUN RIVER OF LIAONING PROVINCE, NORTHEAST PART OF CHINA

LIU Wei^{1,2}, ZHANG Yuan^{1,2}, GAO Xin^{1,2}, JIA Xiao-Bo^{1,2}, MA Shu-Qin^{1,2} and LIU Si-Si^{1,2}

(1. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012, China)

Abstract: To understand the structure variation of fish assemblage of Hun River Basin in Liaoning Province of North-east China, 46 sampling sites were investigated in 2010 and 2014. A total of 32 species and 15039 fish, belonging to 9 families and 6 orders, and 41 species and 10483 fish, belonging to 10 families and 6 orders, were identified in 2010 and 2014, respectively. The Mann-Whitney U test supported a significant increase in fish assemblage parameters like the number of fish species, Shannon-Wiener index, proportion of benthic species, proportion of herbivores individuals and proportion of carnivores individuals. Canonical correspondence analysis showed that in 2010, flow rate, conductivity, river rank and calcium ion were the primary environmental factors affecting fish assemblage, while in 2014, conductivity, river rank and ammonia significantly affect fish assemblage. The score of F-IBI were 48.76 ± 24.82 and 50.41 ± 17.35 in 2010 and 2014 respectively. By contrast in 2014, the health condition slightly increased and the sampling sites of ‘very poor’, ‘poor’, ‘good’ and ‘excellent’ decreased by 4, 1, 1 and 3 sites than those in 2010, respectively. Meanwhile, the sampling sites of ‘moderate’ increased by 9 sites than those in 2010.

Key words: Fish assemblage; Community structure; Biotic integrity index; Hun River Basin