

生物完整性在时间尺度趋势分析中的偏差和校正研究——以松花江流域为例*

阴琨¹, 李中宇², 赵然², 王业耀¹, 金小伟^{1**}

(1: 中国环境监测总站, 北京 100012)

(2: 黑龙江省生态环境监测中心, 哈尔滨 150056)

摘要: 以松花江流域为对象, 利用 2012—2015 年底栖动物调查数据及生物完整性指数 (index of biotic integrity, *IBI*) 评价结果, 定量分析并阐释了 *IBI* (基于参照位点法) 在时间尺度趋势分析中产生的偏差和影响, 提出采用校正系数 r (r 表示参数赋分计算中, 比较年参数基础值相对初始年参数基础值的倍数) 及初始年数据对 *IBI* 结果进行校正的方法。研究表明, 正向参数 (干扰越大分值越低的参数) 参照组 2013—2015 比较年的值较初始年 (2012 年) 呈现不同程度升高, 反向参数 (干扰越大分值越高的参数) 受损组值呈现下降。同时, 正向参数和反向参数的 r 值分别分布在 1.1~4.9 和 0.7~0.8 之间, 参照组/受损组参数的 95th 年度间变化显著, 参数赋分环节的记分偏差不可忽略。在评价标准划分环节中, 最差及优良区域占比的差异达 10.0%~13.4%, 偏差对趋势分析的干扰显著。2012—2015 各年度 *IBI* 经校正后, 评价达良好—优状态的区域占比较校正前高 4.3%~13.3%, 评价为很差状态的区域占比较校正前低 6.7%~30.0%。完整性评价中关键环节产生的偏差可显著影响时间尺度趋势的分析和判定, 基于校正的评价方法可以初步解决完整性评价在趋势分析中产生的偏差干扰问题。

关键词: 生物完整性指数; 时间尺度; 趋势分析; 偏差校正; 松花江流域

On the generation and correction of deviation of biological integrity assessment for time-scale trend analysis: A case study of Songhua River Basin*

YIN Kun¹, LI Zhongyu², ZHAO Ran², WANG Yeyao¹ & JIN Xiaowei^{1**}

(1: China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, P.R.China)

(2: Ecological and Environmental Monitoring Centre of Heilongjiang Province, Harbin 150056, P.R.China)

Abstract: As a widely used evaluation method, index of biotic integrity (*IBI*) has been used in various water bodies to evaluate the state of aquatic organisms. However, some defects and limitations in the *IBI* method need to be studied and solved, such as the generation and interference of deviation in *IBI* assessment (based on the reference site method) for time-scale trend evaluation. In this study, Songhua River Basin was used to quantitatively analyze the deviation of *IBI* (based on reference site method) for time-scale trend evaluation, with the survey data of macrobenthos and evaluation results of *IBI* during 2012–2015. In addition, the method to correct the *IBI* results using correction coefficients r (r : during the course of metrics scoring, the multiples of metrics base value in comparative years to initial year) and data of initial year was proposed in this work. The results showed that the value of the positive metrics (decreasing response to increasing disturbance) of reference group from 2013 to 2015 were higher than those in the initial year (2012), while the reverse metrics (increasing response to increasing disturbance) of damaged group were lower. Meanwhile, r of positive metrics was mainly ranged from 1.1 to 4.9, while 0.7 to 0.8 for the reverse metrics. The metrics 95th of the reference group and the damaged group significantly changed in these years, with significant score deviation during the course of metrics scoring. Furthermore, during the course of evaluation criteria classification, the difference of the proportion of the worst and

* 2019-11-07 收稿; 2020-02-18 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (41977364)、北京市优秀人才培养资助项目和国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07302-001) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: jinxw@cnemc.cn.

the best regions was 10.0%–13.4%, the disturbance from deviation was also significant on trend analysis. The comparative analysis of *IBI* results showed that after calibration in each year from 2012 to 2015, the proportion of excellent and good areas was higher (4.3%–13.3%) than that before calibration, while the proportion of poor areas was lower (6.7%–30.0%) than that before calibration. The results after calibration were consistent with the changes of characteristic parameters of aquatic organisms; however, the non-calibration results showed some contradiction. In summary, the deviations from the key parts during *IBI* assessment can significantly affect the trend analysis and determination, the deviation interference in temporal trend analysis can be preliminarily solved by the correction method.

Keywords: Index of biotic integrity (*IBI*); time scale; trend analysis; deviation correction; Songhua River Basin

生物完整性指数(index of biotic integrity, *IBI*)评价方法,最初于1980s被Karr^[1]提出并应用于评价鱼类完整性中.由于*IBI*法适用性广、开放性很强,很快在更多的生物类群和更大的尺度上得到应用,更被美国和欧盟分别用于支撑清洁水法案(Clean Water Act, CWA)和水框架指令(Water Framework Directive, WFD)对于水环境的管控^[2].生物类群由最初的鱼类^[1]拓展到多种不同生物类群^[3],如大型底栖动物^[4]、藻类^[5]、浮游生物^[6]、水生维管植物^[7-8];并由单类群发展到多类群组合,如鱼类和藻类^[2].研究区域也由最初小尺度的溪流拓展到水系^[9]、流域^[10]、区域^[11-13]及国家范围^[14]等更大的空间尺度^[15-16].

*IBI*应用至今,也暴露出方法上的缺陷和限制因素,*IBI*区域特性明显,限制了评价结果在更大空间尺度的可比性^[17-18];更重要的是整个方法体系依赖参照状态的确立,而如何定义和确定参照状态还不能完全标准化,由此影响到评价指标建立和评价等级确立.目前,参照位点法仍是确定参照状态的主流方法之一^[9,19].考虑到参照点状态有可能随时间不断改善,则需要对参照位点水生态状况随时间发生的变化进行评估分析和校正.因此,进行不同时间尺度的分析时,参照状态的不一致会导致完整性评价结果不具直接可比性.对水生态环境稳定、变化潜力极小的区域,较短时间变化的影响可能微乎其微,并不显著.但现阶段,我国各大流域水体正经历着大规模的水污染治理过程,在全国各大流域处于全面污染防控和治理的作用下,水生态环境发生恢复性变化的速度和潜力都会非常显著,因此水体在相对更短的时间就会发生较为明显的变化.以“十二五”期间太湖和松花江流域水质变化为例,太湖流域总磷、总氮浓度分别降低了19.2%和32.5%;松花江流域Ⅲ类及以上水质断面比例上升了19.9%,水环境质量发生改善性变化的速度可观^[20].在水环境快速改善的作用下,水生生物的结构和组成也将随之发生相应的变化.同时基于水生生物构建的生物完整性指数最初建立的参照状态(参照位点法)在时间尺度上也将随之变化.在时间尺度的趋势分析中,每年基于变化的参照状态(参照位点)开展评价就必然会导致偏差的产生,这种偏差的大小,对趋势和年度间比较分析的影响程度,及是否可以修正,都会影响时间尺度数据的可比性和趋势分析的科学性.

本文以松花江“十二五”期间(2012–2015年)水生生物调查数据及生物完整性评价结果为例,通过年度间*IBI*评价结果的差异分析,定量阐释了基于参照位点法的*IBI*评价在趋势分析中产生的偏差和影响,并提出时间尺度趋势分析中*IBI*的校正方法.

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

松花江流域位于我国东北地区,流域面积约为56万km²,全长达2328 km.流域内气候整体上属于大陆性季风气候.流域年平均气温一般在3~5℃之间,有长达5个多月的冰封期^[21].从“十一五”至“十二五”流域松花江流域水环境呈现持续改善,Ⅰ~Ⅲ类水质断面比例逐年上升,2006–2010年占比在23.8%~47.6%之间,至2015年上升至65.1%^[20].

1.2 研究方法

于2012–2015年6–7月连续调查了松花江流域内黑龙江(S1和S2),松花江干流(S3、S4、S11、S12、S13、S14、S15、S28和S30),嫩江(S8、S10、S19、S20和S21),第二松花江(S9、S22、S24、S26和S27)以及支流牡丹江(S16和S29)、梧桐河(S5)、雅鲁河(S17和S18)、诺敏河(S6和S7)、饮马河(S25)、伊通河(S23)(S23位点2012年设在伊通河,由于未采集到底栖生物,2013–2015年调整到汤旺河),共30个采样点,调查河流和点位分布见图1.研究是基于同批采样人员在6–7月,以同样的采样方法在相同点位获取的生

公式计算:

$$r = V_{(C)} 95^{th} / V_{(B)} 95^{th} \quad (3)$$

式中, $V_{(C)} 95^{th}$ 为比较年参照点 (或受损点) 参数的 95^{th} , $V_{(B)} 95^{th}$ 为初始年参照点 (或受损点) 参数的 95^{th} .

2 结果

2.1 参数赋分中的偏差分析和校正

2013—2015 年参照样点的正向参数总分类单元数、EPT 分类单元数、EPT 密度、敏感种分类单元% 和敏感种密度的值均不同程度地高于初始年 (2012 年); 反向参数 *HBI* 则呈下降趋势 (表 1, 图 2), 表明流域水生

表 1 2013—2015 各年度 6 项参数的校正系数

Tab.1 Correction coefficients of six elements for each year from 2013 to 2015

年份	总分类单元数	EPT 分类单元数	EPT 密度	敏感种分类单元%	敏感种密度	<i>HBI</i>
2013	1.5	1.5	4.0	1.1	4.0	0.7
2014	1.7	1.8	1.7	0.8	1.7	0.8
2015	1.5	1.4	4.8	1.1	4.9	0.7

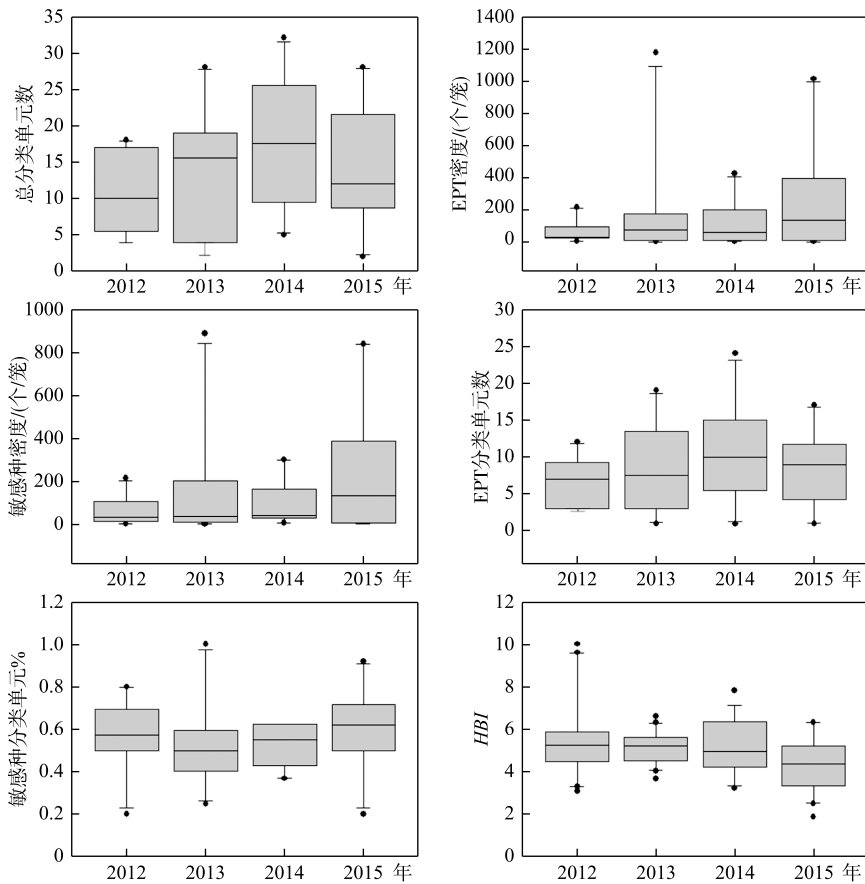


图 2 核心参数在 2012—2015 年的变化情况 (图中箱体为参数值 25^{th} 和 75^{th} 分位; 误差棒为参数值 10^{th} 和 90^{th} 分位)

Fig.2 Changes of core elements from 2012 to 2015

生物处于恢复性变化中. 以 25th~75th 的数值分布状况分析, 总分类单元数、EPT 分类单元数、EPT 密度和敏感种密度 4 项参数值增加更显著, 仅敏感种分类单元% 在 2013 和 2014 年略有降低; 反向参数 *HBI* 除 2014 年数值变化不明显, 其余年份均有下降. 表 1 中校正系数 *r* 的结果也指明, 除敏感种分类单元% 2014 年 *r* 为 0.8, 5 项正向参数在各年度的 *r* 均高于 1.0, 分布于 1.1~4.9 之间; 反向参数 *r* 均小于 1.0, 分布于 0.7~0.8 之间, 相较初始年, 各参数数值在年度间的变化明显, 表明 *IBI* 以当年基础值进行赋分在趋势分析中会产生显著的偏差. 参数基础值升高, 直接引起赋分后参数记分值的相对下降, 导致 *IBI* 总分的相对偏低, 这种偏差使得评价难以捕捉到生物状态改善的变化和程度. 参数赋分计算中, 公式应修正为: $V_i' = 10(V_i/V_R 95^{th})r$ (正向参数); $V_i' = 10(1 - (V_i/V_i 95^{th})r)$ (反向参数).

2.2 评价标准划分中的偏差分析和校正

以松花江流域 2013 年数据为例分析了 *IBI* 评价标准建立和划分环节中产生的偏差. 据表 2 数据可见,

表 2 2013 年评价标准校正前后 *IBI* 评价结果

Tab.2 *IBI* evaluation results before and after the calibration of evaluation standards in 2013

位点编号	2012 年		2013 年		
	<i>IBI</i> 分值	评价结果	<i>IBI</i> 分值 ¹⁾	评价结果 ²⁾	评价结果 ³⁾
S1	49.93	优	57.48	优	优
S2	36.76	优	32.64	一般	良好
S3	38.76	优	152.90	优	优
S4	14.38	一般	23.81	一般	一般
S5	39.93	优	69.11	优	优
S6	28.57	良	32.66	一般	良好
S7	32.17	良	24.16	一般	一般
S8	17.59	较差	17.92	较差	较差
S9	42.83	优	53.90	优	优
S10	22.43	一般	11.41	很差	较差
S11	19.64	一般	26.89	一般	一般
S12	22.13	一般	26.42	一般	一般
S13	57.72	优	59.60	优	优
S14	15.26	较差	10.32	很差	较差
S15	18.37	较差	16.20	较差	较差
S16	5.87	很差	4.54	很差	很差
S17	21.56	较差	15.23	较差	较差
S18	21.38	一般	23.96	较差	一般
S19	24.18	一般	11.90	很差	较差
S20	20.04	一般	17.86	较差	较差
S21	17.53	较差	15.21	较差	较差
S22	14.64	较差	10.73	很差	较差
S23	0.00	很差	18.41	较差	较差
S24	4.84	很差	16.23	较差	较差
S25	10.44	较差	15.64	较差	较差
S26	4.99	很差	18.00	较差	较差
S27	8.68	很差	29.42	一般	良好
S28	10.05	较差	25.02	较差	一般
S29	12.63	较差	16.87	较差	较差
S30	29.65	良	22.15	较差	一般

1) 赋分校正后的结果; 2) 以 2013 当年数据建立标准评价得到的 *IBI* 结果(校正前); 3) 以 2012 初始年数据建立标准评价得到的 *IBI* 结果(校正后).

表3 2013年校正前后 *IBI* 评价结果比较
Tab.3 Comparisons of *IBI* evaluation results before and after the calibration in 2013

评价结果	2012年	2013年	
		校正前	校正后
优	16.7%	16.7%	16.7%
良好	13.3%	0.0%	10.0%
一般	23.3%	23.3%	23.3%
较差	30.0%	43.3%	46.7%
很差	16.7%	16.7%	3.3%

和一般的区域向相对更差的状态波动的迹象(如表2中S2、S6和S7位点). 流域水生态环境评估最关注的问题集中在: 状况最差区域的范围, 最差区域是否出现恢复迹象, 良好区域是否出现恶化. 但根据研究数据显示, 以上区域的偏差均达到10%以上. 虽然获取更准确的趋势变化需要基于更大时间跨度的持续性数据分析, 但以上结果仍足以表明评价环节产生的偏差会影响趋势的判定, 需要对评价环节进行校正, 以初始年数据建立统一的评价标准.

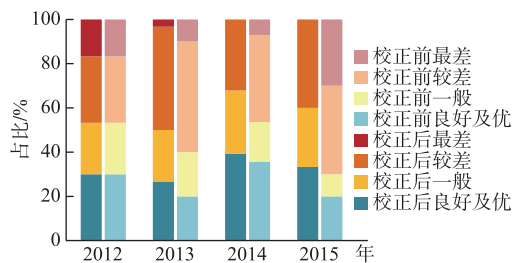


图3 2012—2015年各年度校正前后 *IBI* 为良好及优的结果比较

Fig.3 Comparisons of results of *IBI* before and after calibration in each year from 2012 to 2015

分析, 明确显示流域“十二五”期间的生物完整性呈现一定程度的恢复迹象, 2014年和2015年完整性达到良好及优的区域占比分别增加了9.3%和3.3%. 完整性很差的数据比较也呈现同样的结论, 校正前后区域占比差异为6.7%~30.0%. 以2013年和2015年数据为例, 校正前很差区域占比分别为10.0%和30.0%, 经校正后占比分别降至3.3%和0%. 2015年的值校正前后变化较大, 分析为2015年S3、S5、S11和S13几个位点生物参数变化幅度较大, EPT和敏感物种密度都明显增加, 拉升了当年参数赋分中参照位点95th和评价划分中所有位点 *IBI* 95th 分值所致. 根据2012—2015年所有位点的EPT密度和敏感种密度两项生物特征参数数据显示, 各年度EPT密度分别为46.9、101.9、70.2和574.3个/笼; 敏感种密度分别为29.7、67.0、75.4和317.9个/笼, 生物恢复趋势明显. 以校正前结果判定2015年水生态质量显著变差的结果与图2核心参数的实际变化冲突. 以上经校正后得出的结论与生物特征参数显示出的实际恢复性变化结果相符, 未校正所得结论与生物类群实际变化情况相悖. 综上所述, 以上比较结果指明赋分和评价两个环节会产生明显的偏差, 偏差很大程度上会直接影响趋势的分析判定, 以初始年数据为基础进行校正, 在完整性趋势分析中是必要的.

3 讨论

3.1 完整性评价在趋势分析中的应用

完整性评价早期阶段, 利用 *IBI* 表征生态系统状态和健康的研究多是集中在建立评价方法并开展单次

初始年(2012年)和2013年经参数赋分校正后所有位点 *IBI* 分值的95th 分别为46.73、64.83, 分值差异明显. 2013年松花江流域 *IBI* 评价结果, 以初始年和当年标准分别评价的生物完整性状况也呈现较大差异. 表3数据显示, 以初始年标准评价, 2013年有50%的位点生物完整性达到一般及以上, 仅3.3%为很差; 以2013年当年标准评价, 完整性达到一般及以上的位点占比仅为40.0%, 同时很差位点占比升高至16.7%. 以校正后结果进行趋势分析, 2013年生物完整性出现较明显的变化, 呈现状态很差的区域向较差转变的趋势; 以校正前结果判断则未显示一致趋势, 而呈现完整性良好

2.3 校正前后 *IBI* 评价结果比较

上文利用松花江2012—2015年 *IBI* 数据, 对参数赋分和评价标准划分两个环节产生的偏差进行了量化分析. 在此, 进一步比较了经参数赋分和评价标准校正前后 *IBI* 评价结果在趋势分析中的整体差异.

图3呈现的各年度 *IBI* 比较结果显示, 其中评价达良好及优的数据显示校正前后区域占比的差异达到4.3%~13.3%. 校正前2013年和2015年良好及优的区域占比仅为20.0%, 校正后分别为26.7%和33.3%. 以校正前结果进行趋势分析, 流域“十二五”期间的生物完整性并未出现可见的改善, 而呈现较为明显的下降, 与2012年相比, 2015年完整性达到良好及优的区域占比降低了10.0%; 以校正后结果进行分析,

评价,随着方法应用发展至今,利用 *IBI* 开展水生态环境或生物完整性长时间跨度和趋势变化的研究越来越受到关注,其中更多是鱼类完整性的研究^[28-32],也有学者利用浮游生物开展研究^[6,33]。分析趋势变化中,因各研究区的具体情况相异,研究者应用不同的方式建立参照状态,确定参数赋分和评价标准划分规则。基础数据充足的区域,研究常利用历史调查资料和早期研究数据建立参照状态^[30,32];采用非连续赋分法^[34]对各参数进行赋分;以 Karr^[1] 早期应用于鱼类完整性的等分法,将 *IBI* 最小到最大值的分布范围等分(4~6 个等级)建立评价标准,分析研究区中长期尺度下完整性的变化趋势。对于缺少历史数据的区域,学者采用现场调查法或参照位点法建立参照状态,取各年参数数值分布的最优值作为参照状态,同样采用非连续赋分法和等分法进行参数赋分和评价标准划分^[6,28,33]。基于参照状态法的完整性评价,由于赋分和评价标准的绝对性,趋势分析中可以避免偏差的产生,但目前各个国家都存在不同程度历史数据不足的情况,以历史调查资料和早期研究数据确定参照状态并依据参照状态划定参数期望值和赋分范围是完整性指数方法发展面临的现实阻碍。对于如中国一样生物和生境等历史性数据相对匮乏的国家,难以应用以上方法建立参照状态并开展趋势分析,更多的研究还需要基于现有调查结果,基于参照位点法开展评价,这种方法也是目前应用较广泛的方法。

3.2 完整性评价在趋势分析中存在的问题

参数赋分环节, Karr^[1] 的非连续赋分方法仍被部分学者用于完整性分析。非连续赋分法基于绝对概念建立,其依据位点参数相对参照状态值的偏离程度划分评价等级(3 级划分,赋分 1、3、5 分),绝对的赋分方式不会产生类似参照位点 95th (分值会随参照位点年度参数值的变化而变化)相对赋分方法所产生的偏差,但间断赋分法被很多学者认为主观性强,参数赋分受主观因素影响,同时敏感性和识别力较连续赋分方法低。美国环境保护署(US EPA)于 2016 年重新修正了参数记分方法,修改原非连续赋分法,采用连续赋分法进行完整性评价^[26]。目前,非连续赋分法仍然在完整性研究中被学者持续使用,但此方法正在被连续赋分方法取代。0~10 连续赋分的参数记分方法具有更高的灵敏性和分辨力,正向参数记分基于参照组的 95th 分值赋分,反向参数基于受损组 95th 分值赋分,赋分基于的 95th 分值是参数记分的基础。连续赋分法实现了对参数更精确的赋分,可更有效地区分参数值间的差异^[25,35]。但当记分建立于调查可得的位点数据,而位点的生物状况发生改善性(或衰退性)的变化,在进行时间纵向趋势分析时,以上变化将体现为年度间赋分基础值的改变,随之直接影响参数记分在年度间的可比性及 *IBI* 值的可比性,即使评价是基于同样的位点和同样的核心参数,这种影响仍不可避免。由于 *IBI* 整个方法都建立在相对概念的基础上,为确保评价结果的可比性,在参数赋分环节,校正偏差是非常必要的。

评价标准建立环节,除早期基于非连续赋分法的评价标准等分法,基于参照点和所有位点分值分布(25th 和 95th)的评价标准建立方法也被广泛应用于完整性评价^[27,36]。评价标准的划分多基于当年参照点/所有位点 *IBI* 分值分布,即参照点 25th 或所有位点 95th 确定。这种方法相对早期非连续赋分——最高分等分的方式更科学、客观,也更依赖参照状态的确定。因为这种评分划分基于相对分值(即以当年调查点位 *IBI* 值),当点位水生态状况随时间发生变化,进行时间纵向趋势分析时,评价标准同样会由于相对分值的变化而产生改变。*IBI* 各项参数记分和评价标准的变化(如生态改善引起各位点参数值升高),会导致年度记分基础发生不同程度的变化,这些变化在一定程度上会掩盖流域内水生生物变化的趋势和程度。综上所述,当利用参照位点法进行 *IBI* 评价时,需要对各年份的参数记分和评价标准划分环节产生的偏差进行修正,以初始年为基础,对各年度数据进行校准,以消除因记分基础改变对趋势分析产生的干扰。

完整性评价理想的状态是实现基于历史数据法确定参照状态进行完整性分析,在不考虑自然因素引起的变异因素干扰下,可以无需偏差校正直接开展趋势分析,但此方法的局限性也非常明显,且难以解决。因此,历史数据不同程度的缺乏,使得参照位点法被更广泛地采用。然而,对水环境压力及水生态都处于恢复性变化的水体基于参照位点法开展完整性评价分析,利用初期参照点的数据持续进行评价显然不合理,因为基于相对干扰较大(较后续年份)的参照位点建立的评价方法,会对结果产生过高评价。针对年度的完整性分析,利用当年参照点的调查数据建立评价更为科学、客观。然而,如上文所述,开展时间纵向趋势分析时就必须对参数赋分和标准划分环节产生的偏差进行校正。

3.3 完整性评价在趋势分析中偏差的校正

完整性评价的原理是以建立的参照状态(参照状态下各参数的分值)作为基准,以受损位点参数分值与

参照状态的偏离度(分值差异)建立评价标准进行评价. 当建立的参照状态(基于历史数据)参数值是固定值,即不在时间尺度产生变化时,参数赋分计算和标准建立中就不存在变量,如 Zhu 等^[30]在长江流域的鱼类 IBI 年际变化研究所述方法,直接以早期长江流域鱼类的历史数据建立参照状态和确定评价标准,此类研究方法中完整性评价不存在时间尺度上的偏差,无需校正. 反之,当建立的参照状态(基于参照位点法)的参数值不可避免会随时间发生变化时,此类评价中参数赋分计算就存在变量,在变量作用下,完整性评价将产生偏差,类似方法在黄河^[28]、辽河^[37]、松花江^[38]、太湖^[39]、淮河^[10]中都被采用.

本文提出校正系数 r 进行以上偏差校正的方法, r 可量化表征 IBI 各参数以当年基础值进行赋分在趋势分析中产生的偏差大小. 本文研究数据显示,2015 年 5 项正向参数的 r 值均高于 1.0,分布于 1.1~4.9 之间;反向参数 r 值为 0.7,参数值呈现不同程度的偏差($r=1.0$ 表示无偏差),这也表明以底栖动物各特征参数(总分类单元数,EPT 丰度和 EPT 分类单元数,敏感种丰度和分类单元%)直接分析,生物呈现明显正向变化,但未经校正时 IBI 未能显示一致的结果. 校正前,2015 年优良位点仅为 20.0%(比初始年低 10.0%),最差位点达 30.0%(比初始年高 13.3%),反向变化的结果与特征参数值的正向变化相悖;经 r 和标准校正后,2015 年优良位点达 33.3%(比初始年高 3.3%),最差位点为 0%(比初始年低 16.7%),IBI 结果与特征参数的变化趋势相吻合,验证了校正方法的可行性. 与本研究中参数赋分及标准建立原则一致的 IBI 研究方法,同样可利用校正方法进行分析,如采用最佳期望值^[29]、比值法^[28]、参照状态 95th^[38]等基于参照状态分值分布进行参数归一化赋分的 IBI 评价,可利用校正系数对计算中的变量(参照状态分值)进行校正;基于参照点 25th^[39]和所有位点 95th^[28,38]法建立评价标准的 IBI 也可以初始年数据进行评价标准的校正分析. 综上所述,基于校正的评价方法可以初步解决 IBI 评价(基于参照位点法)应用于趋势分析时所产生的偏差干扰问题. 但是,本文提出的校正系数法也存在一定的缺陷,未考虑和排除由于自然因素变化产生的偏差,进行长时间跨度的评价时,这些偏差将连同本研究捕捉的干扰类偏差一同被校正系数校正.

3.4 完整性评价的展望

流域生态完整性评价中参照状态的确定是必要前提^[40],在完整性评价应用于跟踪长期趋势变化的研究中,除了本研究关注的偏差因素和校正,缺少对参照条件自然变化的评估和校正也一直受到学者们的关注. 在没有人为干扰变化的区域,受到自然气候变异性干扰,IBI 分值仍然会产生变化,这类干扰阻碍了利用完整性研究人为干扰的发展和影响^[41],特别是在长期趋势分析中,如何有效区分人为和自然因素的影响^[42],去除非人为因素在 IBI 分值中产生的偏差,尚有待方法学的系统研究.

基于参照位点法的完整性评价,除了趋势分析中偏差的影响,还存在对结果过高评估的问题. 目前,学者多依据现有调查数据的高分值分布建立并设置参照状态参数分值,参照状态的高分表示在调查区域可以获得的最高得分^[43]. 调查区域的最优状态与理论的参照状态通常是存在差距的,因此当参照状态是基于受到一定程度干扰的位点数据所建立,评价就存在过高评估^[28,43]. 这是一个回避不了的问题,而且目前开展的很多相关研究都在一定程度上存在这样的情况,如长江^[30]、黄河^[28]、辽河^[37]、松花江^[38]、太湖^[39]、淮河^[10]等,建议在评价时对研究区开展完整性最优区域的状态和保护目标间匹配度的评估分析,基于评估分析结果对评价标准和结果进行调整,降低和修正过高评价.

完整性评价方法应用至今,由于方法本身的开放性得到广泛应用,但也因而产生难以标准化的方法缺陷,参照状态的确定、参数赋分、评价标准划分等环节的标准,在方法学上仍然有待研究. 对于如何从方法学上解决完整性分析在长期趋势分析中因各种因素产生的偏差仍是值得关注的研究方向.

4 结论

1) 利用 IBI(基于参照位点法)进行趋势分析,参数赋分和评价标准划分环节会产生不可忽略的偏差,开展时间纵向趋势研究时必须对参数赋分和评价标准环节的偏差进行校正.

2) 总分类单元数、EPT 分类单元数、EPT 密度等 5 项正向参数的 r 主要分布在 1.1~4.9 之间;反向参数 HBI 的 r 分布在 0.7~0.8 之间,参数赋分基础值(参照组/受损组参数的 95th) 在年际间变化显著. 评价标准划分环节的影响表现为评估结果在最差区域和优良区域占比的差异,差异达到 10.0%~13.4%,偏差对评价结果产生明显的干扰.

3) 经校正后, *IBI* 评价达良好—优状态的区域占比较校正前高 4.3%~13.3%, 评价为很差状态的区域占比较校正前低 6.7%~30.0%, 校正后结果与生物特征参数实际恢复性变化相符, 未校正的结果存在相悖情况。

4) 以校正系数和初始年数据对完整性评价关键环节中的偏差进行修正。基于校正的评价方法可以初步解决将完整性评价应用于趋势分析所产生的偏差干扰问题。

致谢:衷心感谢黑龙江省生态环境监测中心及相关各市生态环境监测中心、吉林省生态环境监测中心及相关各市生态环境监测中心、内蒙古自治区呼伦贝尔生态环境监测站在基础调查数据方面的支持和帮助!

5 参考文献

- [1] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 1981, **6**(6): 21-27.
- [2] Ruaro R, Gubiana ÉA. A scientometric assessment of 30 years of the index of biotic integrity in aquatic ecosystems-applications and main flaws. *Ecological Indicators*, 2013, **29**: 105-110. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.12.016.
- [3] Wang YY, Yin K, Yang Q *et al.* Research and application progress of assessment for river water ecosystem quality. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(4): 1-9. [王业耀, 阴琨, 杨琦等. 河流水生态环境质量评价方法研究与应用进展. 中国环境监测, 2014, **30**(4): 1-9.]
- [4] Klemm DJ, Blocksom KA, Fulk FA *et al.* Development and evaluation of a macroinvertebrate biotic integrity index (MBII) for regionally assessing mid-Atlantic Highlands streams. *Environmental Management*, 2003, **31**(5): 656-669. DOI: 10.1007/s00267-002-2945-7.
- [5] Cao Y, Hawkins CP, Olson J *et al.* Modeling natural environmental gradients improves the accuracy and precision of diatom-based indicators. *Journal of the North American Benthological Society*, 2007, **26**(3): 566-585. DOI: 10.1899/06-078.1.
- [6] Kane DD, Gordon SI, Munawar M *et al.* The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(6): 1234-1247. DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.03.014.
- [7] Feio MJ, Aguiar FC, Almeida SFP *et al.* AQUAFLOA: A predictive model based on diatoms and macrophytes for streams water quality assessment. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 586-598. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.01.016.
- [8] Beck MW, Hatch LK, Vondracek B *et al.* Development of a macrophyte-based index of biotic integrity for Minnesota lakes. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(5): 968-979. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.02.006.
- [9] Cao YX, Zhang J, Cai DS *et al.* Lijiang River health assessment using a benthos index of biotic integrity for invertebrate. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(2): 13-17, 23. [曹艳霞, 张杰, 蔡德所等. 应用底栖无脊椎动物完整性指数评价漓江水系健康状况. 水资源保护, 2010, **26**(2): 13-17, 23.]
- [10] Zhang Y, Hu J, Wan Y *et al.* Eco-health assessment of Huaihe river system based on benthic-index of biotic integrity. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(3): 300-305. [张颖, 胡金, 万云等. 基于底栖动物完整性指数 B-IBI 的淮河流域水系生态健康评价. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(3): 300-305.]
- [11] McCormick FH, Hughes RM, Kaufmann PR *et al.* Development of an index of biotic integrity for the mid-Atlantic highlands region. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2001, **130**(5): 857-877.
- [12] Paulsen S, Stoddard J, Holdsworth S *et al.* eds. Wadeable streams assessment: A collaborative survey of the Nation's streams. Washington: Environmental Protection Agency, 2006.
- [13] Weigel BM, Dimick JJ. Development, validation, and application of a macroinvertebrate-based Index of Biotic Integrity for nonwadeable rivers of Wisconsin. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, **30**(3): 665-679. DOI: 10.1899/10-161.1.
- [14] Jun YC, Won DH, Lee SH *et al.* A multimetric benthic macroinvertebrate index for the assessment of stream biotic integrity in Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, **9**(10): 3599-3628. DOI: 10.3390/ijerph9103599.
- [15] Yin K, Wang YY. Research on assessment system of national river basin water eco-environmental quality. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(1): 1-8. [阴琨, 王业耀. 水生态环境质量评价体系研究. 中国环境监测, 2018, **34**(1): 1-8.]
- [16] Chen K, Chen QW, Yu HY *et al.* Methods and prospects of index of biological integrity used for China river ecological

- health assessment. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1589-1600. [陈凯, 陈求稳, 于海燕等. 应用生物完整性指数评价我国河流的生态健康. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1589-1600.]
- [17] Moya N, Hughes RM, Domínguez E *et al.* Macroinvertebrate-based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(3): 840-847. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.10.012.
- [18] Pont D, Hughes RM, Whittier TR *et al.* A predictive index of biotic integrity model for aquatic-vertebrate assemblages of western US streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2009, **138**(2): 292-305. DOI: 10.1577/t07-277.1.
- [19] Fu L, Jiang Y, Liu Q *et al.* Eco-health assessment of Dongjiang river basin based on index of biotic integrity (B-IBI) of macroinvertebrates. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(8): 1502-1511. [付岚, 江源, 刘琦等. 基于大型底栖动物完整性指数 B-IBI 的东江流域水生态健康评价. 生态环境学报, 2018, **27**(8): 1502-1511.]
- [20] China Environmental State Bulle. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>. [中国环境状况公报]
- [21] Yu HB, Zhou QX eds. Ecological evolution and fish ecology of Songhua River Basin. Tianjin: Nankai University Press, 2013. [于宏兵, 周启星. 松花江流域生态演变与鱼类生态. 天津: 南开大学出版社, 2013.]
- [22] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD *et al.* eds. Rapid bio-assessment protocols for use in streams and Wadeable rivers: Periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, second edition. Washington DC: Environment Protection Agency; Office of Water, 1999.
- [23] Yin K. Assessment of river basin water ecosystem quality in Songhua River Basin [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015. [阴琨. 松花江流域水生态环境质量评价研究[学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.]
- [24] Barbour MT, Gerritsen J, Griffith GE *et al.* A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, **15**(2): 185-211. DOI: 10.2307/1467948.
- [25] Hill BH, Herlihy AT, Kaufmann PR *et al.* Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, **19**(1): 50-67. DOI: 10.2307/1468281.
- [26] Rankin ET, Jessup B. Recalibration of the Illinois fish IBI using a continuous scoring methodology. Midwest Biodiversity Institute and Tetra Tech, Inc., 2016.
- [27] Mebane CA, Maret TR, Hughes RM. An index of biological integrity (IBI) for Pacific Northwest rivers. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2003, **132**(2): 239-261.
- [28] Li TH, Huang XL, Jiang XH *et al.* Assessment of ecosystem health of the Yellow River with fish index of biotic integrity. *Hydrobiologia*, 2018, **814**(1): 31-43. DOI: 10.1007/s10750-015-2541-5.
- [29] Moncayo-Estrada R, Lyons J, Ramirez-Herrejon JP *et al.* Status and trends in biotic integrity in a sub-tropical river drainage: Analysis of the fish assemblage over a three decade period. *River Research and Applications*, 2015, **31**(7): 808-824. DOI: 10.1002/rra.2774.
- [30] Zhu D, Chang JB. Annual variations of biotic integrity in the upper Yangtze River using an adapted index of biotic integrity (IBI). *Ecological Indicators*, 2008, **8**(5): 564-572. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.07.004.
- [31] Kim JJ, Atique U, An KG. Long-term ecological health assessment of a restored urban stream based on chemical water quality, physical habitat conditions and biological integrity. *Water*, 2019, **11**(1): 114. DOI: 10.3390/w11010114.
- [32] Teels BM, Mazanti LE, Rewa CA. Using an IBI to assess effectiveness of mitigation measures to replace loss of a wetland-stream ecosystem. *Wetlands*, 2004, **24**(2): 375-384.
- [33] Kane DD, Ludsin SA, Briland RD *et al.* Ten+years gone: Continued degradation of offshore planktonic communities in US waters of Lake Erie's western and central basins (2003-2013). *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(3): 930-933. DOI: 10.1016/j.jglr.2015.06.002.
- [34] Karr JR, Fausch KD, Angermeier PL *et al.* Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale. Illinois: Illinois Natural History Survey, Special Publication 5, 1986.
- [35] Jia YT, Sui XY, Chen YF. Development of a fish-based index of biotic integrity for Wadeable streams in Southern China. *Environmental Management*, 2013, **52**(4): 995-1008. DOI: 10.1007/s00267-013-0129-2.
- [36] 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 Lake Sci*, 2015, **27**(5): 829-839. DOI: 10.18307/2015.0509. [张浩, 丁森, 张远等. 西辽河流域鱼类生物完整性指数评价及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 829-839.]

- [37] Zhang Y, Xu CB, Ma XP *et al.* Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 919-927. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2007.06.005. [张远, 徐成斌, 马溪平等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 919-927.]
- [38] Yin K, Li ZY, Zhao R *et al.* Study on assessment of water ecosystem quality in Songhua river basin. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(4): 26-34. [阴琨, 李中宇, 赵然等. 松花江流域水生态环境质量评价研究. 中国环境监测, 2015, **31**(4): 26-34.]
- [39] Chen Q, Xu DJ, Zhang X *et al.* A preliminary benthic index of biotic integrity (B-IBI) for bioassessment of the plain waterway network of Taihu basin. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(12): 1301-1308. [陈桥, 徐东炯, 张翔等. 太湖流域平原水网区底栖动物完整性健康评价. 环境科学研究, 2013, **26**(12): 1301-1308.]
- [40] Jin XW, Wang YY, Wang BX *et al.* Methods development for monitoring and assessment of ecological integrity of surface waters in China. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(1): 75-81. [金小伟, 王业耀, 王备新等. 我国流域水生态完整性评价方法构建. 中国环境监测, 2017, **33**(1): 75-81.]
- [41] Wilcox DA, Meeker JE, Hudson PL *et al.* Hydrologic variability and the application of index of biotic integrity metrics to wetlands: A great lakes evaluation. *Wetlands*, 2002, **22**(3): 588-615.
- [42] Euliss NHJr, Mushet DM. A multi-year comparison of IPCI scores for prairie pothole wetlands: Implications of temporal and spatial variation. *Wetlands*, 2011, **31**(4): 713-723. DOI: 10.1007/s13157-011-0187-2.
- [43] Shearer JS, Berry CRJr. Index of biotic integrity utility for the fishery of the James river of the Dakotas. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, **17**(4): 575-588. DOI: 10.1080/02705060.2002.9663935.