

文章编号: 1000-5862(2017)01-0104-07

IBI 应用于湿地生态健康评价的研究进展

徐丽婷^{1 2} 阳文静^{1 2*} 游清徽³ 杨 涛^{1 2} 黄 琪^{1 2} 王野乔^{1 2*}

(1. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

2. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022; 3. 江西师范大学生命科学学院, 江西 南昌 330022.)

摘要: 综述了生物完整性指数(IBI) 指数的构建方法, 概述了 IBI 在不同湿地类型中及国内外的应用情况. IBI 在河流、溪流和湖泊湿地中应用最广泛, 采用最多的指示生物是无脊椎动物和鱼类, 主要用于评估人类活动、气候变化等对湿地生态健康的影响及湿地保护管理措施的成效. 提出今后须着重考虑对 IBI 构建方法的优化, 同时与遥感、地统计等其他技术手段相结合, 拓展 IBI 方法的空间适用范围, 使其成为不同尺度湿地生态监测的有效手段.

关键词: 湿地; 生态健康评价; 生物完整性指数(IBI); 指示生物; 人类活动干扰

中图分类号: X 171.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.01.20

0 引言

湿地是指陆地上常年或季节性积水和过湿的土地以及与其生长、栖息的生物种群构成的生态系统, 包括沼泽地、浅水湖泊、海岸滩涂、河流、溪流、水库和池塘等^[1]. 湿地具有涵养水源、调蓄洪峰、降解污染物等十分重要的生态功能, 被称为“地球之肾”^[2]. 当前, 湿地面临着面积减少、环境污染、生物多样性锐减等湿地生态系统健康受损的问题^[3]. 生态系统健康是指生态系统内部物质循环和能量流动未受到损害, 关键生态组分和有机组织被完整保存且缺乏疾病, 对长期或突发的自然或人为扰动能保持弹性和稳定性, 整体功能表现出多样性、复杂性和活动力^[4].

生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI) 是应用广泛的湿地健康评价方法之一, 也是北美湿地生态监测常用的方法^[2]. 生物完整性(biotic integrity) 是指未受损的、良好的状态, 具有维持平衡的、整合的、与其自然环境相适应的生物群落的能力. 生物群落在物种组成、多样性、功能组织上应与该地区未受干扰生境内的生物群落相类似^[5-6]. 美国学者

J. R. Karr 最早提出 IBI 的概念, 以鱼类作为指示生物构建 IBI 评价河流的健康状况^[5]. IBI 选取对人类干扰敏感、反映生物群落特征的参数, 每个参数根据其对于干扰的反应进行状态赋值, IBI 分值的大小反映生态系统偏离原始状态的程度及其生物群落的完整性^[7].

与基于土地利用和社会经济因素的湿地健康评价方法相比, IBI 方法评价结果较准确可靠、直观易懂, 便于非专业的政府管理人员和公众理解. 发展至今, IBI 已被广泛用于湿地生态系统的健康评价^[8]. 本文从 IBI 的概念、构建方法和国内外应用情况等 方面进行综述, 讨论当前 IBI 研究的进展、面临的局限以及研究展望, 探讨推进 IBI 方法在湿地生态健康评价中的应用和发展.

1 生物完整性指数的构建方法

IBI 的构建流程如图 1 所示. 在构建 IBI 时需考虑研究区域内的环境异质性. 当环境异质性较高时, 难以区分生物群落的差异是由于自然环境不同还是人为干扰的结果^[9]. 在这种情况下, 多数研究的做法是对湿地进行环境类型划分, 针对不同的环境类

收稿日期: 2016-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(41561097, 41471298), 江西省自然科学基金(20142BAB213023) 和江西省教育厅研究生创新基金(YC2015-S118) 资助项目.

通信作者: 王野乔(1956-) 男, 吉林长春人, 教授, 博士, 主要从事资源环境遥感制图与分析的研究. E-mail: ywang0559@126.com

阳文静(1983-) 女, 江西庐山人, 助理研究员, 博士, 主要从事湿地生态健康评价的研究. E-mail: wenjing0282@163.com

型构建其各自的 IBI 参数体系^[10-11].

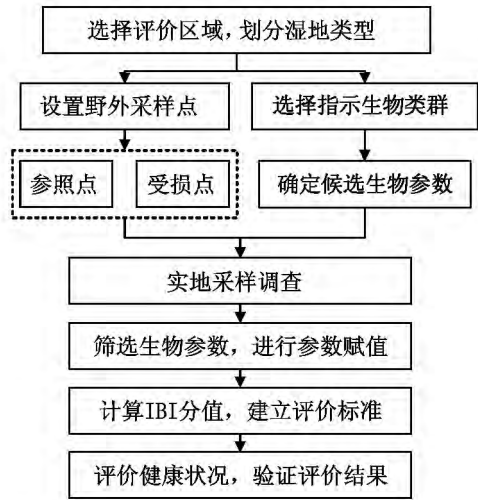


图 1 生物完整性指数(IBI) 构建流程图

IBI 常用指示生物有无脊椎动物、鱼类、浮游藻类、维管植物、鸟类和两栖类, 每种指示生物适合的湿地类型及对环境变化的敏感度有差异(见表 1) . 在选择指示生物时, 既要考虑湿地本身的环境、生物

区系特点, 又要考虑人类活动干扰状况以及不同生物对干扰反应的差异性. 许多研究同时选取 2 种或 2 种以上的指示生物, 以便更全面反映湿地的健康状况^[12].

野外调查的采样点分为参照点和受损点. 理论上, 参照点是湿地中未受干扰或受干扰极少的区域, 而很多湿地难以找到这样的区域. 在实际操作中, 常常把湿地中干扰最小的区域作为参照点. 参照点的选择直接影响到 IBI 参数的筛选, 因此采用何种标准确定参照点十分重要^[13], 常用的有物理、水质、生物、土地利用、人类活动等方面的评判指标(见表 2) . 有些研究只采用其中的 1 项指标^[14], 大多数研究则是综合利用多项指标. 目前应用最广的是干扰程度最小系统法(least minimally disturbed condition , LDC) , 该方法利用栖息地特征、植被、水质、周边人类活动等多项指标来确定参照点^[15]. 受损点是受人类干扰明显的采样点, 其反映不同的人类活动干扰类型和强度^[16].

表 1 IBI 常用的生物类群及特点比较

生物类群	优点	缺点	适用湿地类型	运用现状
鱼类	位于食物链较顶端, 对水质变化灵敏, 具有重要的经济价值	迁移能力较强	河流、湖泊、海湾、水库	运用最早、最广泛的指示生物之一
无脊椎动物	生命周期较短, 直接生活在水体、底泥中, 迁移能力弱, 可灵敏反映水体、土壤的环境变化	种类繁多, 分类系统复杂, 分类鉴定困难	河流、湖泊、海岸	运用最广泛的指示生物之一
浮游藻类	生命周期短, 对环境变化反应迅速, 地域分异明显, 易于采集	个体微小, 分类系统复杂, 鉴定困难, 且对光照、水体营养等局域环境过于敏感	河流、湖泊、沼泽、海岸、水库	运用广泛的指示生物之一
维管植物	直观, 易于采集和分类鉴定, 能够综合反映多种环境污染	有些湿地物种耐受性强, 难以指示湿地环境的细微变化	湖泊、沼泽	国外运用较广, 我国只有少数研究
两栖类	对湿地生境依赖度高, 对环境变化较敏感	生境隐蔽, 许多物种在夜间活动, 野外调查较困难	湖泊、河流、沼泽、水库	运用较少, 常结合其他指示生物使用
鸟类	明星物种, 受人喜爱和关注	迁移能力很强, 能主动逃避不利环境	湖泊、沼泽	运用较少, 常结合其他指示生物使用

表 2 参照点选择的常用指标

指标类型	常用指标	评价方法
物理指标	底质结构、栖息地复杂性、速度与深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况	现场观测
水质指标	浊度、电导率、总磷、总氮、溶解氧、铵态氮、硝态氮、pH 值等主要水质参数	水质监测
生物指标	植物多样性、植被覆盖度	现场观测
土地利用	农田、建设用地、森林、草地的面积比例	遥感解译
人类活动	航运、养殖、娱乐码头、挖砂、采矿、放牧等	现场观测

野外调查记录湿地的生物群落特征、水体、土壤的环境特征及湿地周边的人类活动干扰状况. 基于参照点和受损点之间生物群落的差异筛选出 IBI 评价体系的参数, 其反映在不同干扰条件下生物群落在群落组成、结构、耐受性营养级组成和摄食习性等方面的变化^[17]. IBI 参数赋值的方法有多种(见表 3) , 主要差别在于划分记分区间方式的不同. 采样点的所有参数赋分值之和即为该采样点的 IBI 值, IBI 值越大表示湿地的健康状态越好.

表 3 IBI 参数的赋值方法

赋值方法	计算方法
1、3、5 赋值法	所有样点目标参数的原始数值从小到大排列等分成 3 组 负参数: 最小值组记 5 分, 中间值组记 3 分, 最大值组记 1 分 正参数: 最小值组记 1 分, 中间值组记 3 分, 最大值组记 5 分
3 分法	参照点目标参数原始数值的四分位数构成 3 个区间(0 ~ 25% , 25% ~ 75% , 75% ~ 100%) 负参数: 分别记 6、3、0 分 正参数: 分别记 0、3、6 分
4 分法	负参数: 以所有样点目标参数的 95% 分位数值为最佳期望值 , 低于此值的分布范围 4 等分 , 从大到小依次记 6、4、2、0 分 正参数: 以所有样点目标参数的 5% 分位数值为最佳期望值 , 高于此值的分布范围 4 等分 , 从大到小依次记 0、2、4、6 分
比值法	负参数: 以所有样点目标参数的 95% 分位数值为最佳期望值 , 参数赋值 = 实际值 / 最佳期望值 正参数: 以所有样点目标参数的 5% 分位数值为最佳期望值 , 参数赋值 = (最大值 - 实际值) / (最大值 - 最佳期望值) 参数分值范围介于 0 ~ 1 之间 , 大于 1 的记为 1 分
连续赋值法	负参数: 参数赋值 = (实际值 / 最大值) × 10 正参数: 参数赋值 = (1 - 实际值 / 95% 分位数值) / 10 参数分值范围介于 0 ~ 10 之间 , 小于 0 的记为 0 分
自然断点分级法	利用自然断点分级法将所有样点目标参数的原始数值分成 3 组 负参数: 最小值组记 5 分, 中间值组记 3 分, 最大值组记 0 分 正参数: 最小值组记 0 分, 中间值组为 3 分, 最大值组记 5 分

注: 负参数是指数值随干扰增强而降低的参数, 正参数是指数值随干扰增强而增加的参数。

2 生物完整性指数的应用

通过 ISI Web of Science、ScienceDirect、cnki、维普等数据库收集了 1981 年至今有关 IBI 的文献发现, IBI 在河流、溪流、湖泊、沼泽、海岸滩涂、池塘水库等典型湿地生态系统均有应用研究, 其中河流湿地远多于其它湿地类型。无脊椎动物和鱼类是常用的指示生物, 我国较少见鸟类和两栖类 IBI 的评价研究。IBI 在国外有较广泛应用, 在国内有相对较少的应用。本文选取典型的研究介绍 IBI 在各类湿地生态系统及国内外的应用情况。

2.1 河流

河流是联接陆地与湖泊、海洋的纽带, 在生物圈物质循环中起重要作用。然而, 河流也常常作为交通运输、生活、工业废物排放的通道, 受到的干扰和污染较严重, 其生态健康尤其引人关注^[18], IBI 最早应用于河流生态系统的健康评价。

许多研究利用 IBI 来评价人类活动对河流生物群落完整性的影响, 进而反映河流生态系统的健康状况。由于河流水具有持续流动性, 水中溶解氧充足, 无脊椎动物和鱼类的多样性高, 这 2 类生物尤其

适合作为 IBI 的指示生物。如 J. M. Diamond 等^[19]发现弗吉尼亚州 Clinch 和 Powell 流域煤矿开采区的鱼类完整性指数(fish-based index of biotic integrity, F-IBI) 分值最低(健康状况最差), F-IBI 分值与矿区、农田和城市面积呈负相关, 与森林、牧场面积呈正相关。D. Genito 等^[20]研究美国宾夕法尼亚中部河流无脊椎动物完整性与土地利用方式之间的关系, 发现当采样点上游农业用地面积超过 40% 时, 无脊椎动物完整性指数(macroinvertebrate-based index of biotic integrity, M-IBI) ①明显下降, 群落中敏感物种急剧减少。大型维管植物难以在持续扰动的环境中生长, 一般不作为河流和溪流的指示生物, 但也有利用植被完整性指数(vegetation-based index of biotic integrity, V-IBI) 评价河流源头生境质量的研究案例^[21]。

我国有较多的河流 IBI 生态健康评价应用^[22-25], 并尝试不断完善 IBI 构建的方法。王备新等^[26]构建我国河流的 IBI, 以底栖无脊椎动物为指示生物, 评价安徽黄山地区祁门县大北河和阊江河的生态系统完整性, 并对 3 分法、4 分法和比值法 3 种参数赋值方法进行对比, 研究显示比值法最优。渠晓东等^[13]认为参照点的筛选是提高 IBI 评价可靠

①也有部分研究将 macroinvertebrate-based index of biotic integrity(M-IBI) 写作 benthic macroinvertebrate-based index of biotic integrity(B-IBI), 本文为区分 bird-based index of biotic integrity(B-IBI) 统一改为 M-IBI。

性的关键,将水质状况和栖息地质量同时作为参照点筛选的标准较为合适。以上研究都集中在小面积的河流流域,当研究区域较大时,则需要考虑区域内的环境异质性。如 Huang Qi 等^[27]在构建太湖流域的 M-IBI 时,考虑到该地区人类干扰和自然环境的空间差异较大,将太湖流域划分成西部丘陵和东部平原地区,分别构建其各自的 M-IBI 评价体系。

2.2 湖泊湿地

湖泊湿地具有丰富的生物资源和强大的生态环境功能。近年来,人们大规模开发利用湖泊湿地资源,造成了湖泊湿地的严重退化^[28]。

IBI 是许多湖泊湿地生态监测的常规方法。加拿大阿尔伯塔省在全省的湖泊湿地设置了上千个监测样点,每年采集湿地水体环境、植物和无脊椎动物的多样性数据,利用 IBI 评估生境和物种的未受干扰程度^[29]。R. Moncayo-Estrada 等^[30]对墨西哥查帕拉湖的鱼类连续开展了 40 年的调查,发现 F-IBI 值呈持续下降的趋势,为生态系统健康状况的恶化提供了有力证据。M. L. Petesse 等^[31]利用 F-IBI 对 2004—2007 年亚马逊河流域泛滥平原区湖泊的生态健康进行评价,研究发现 F-IBI 能够很好地区分出参照点和受损点,并且具有显著的季节和时间差异,与亚马逊河的水文节律相吻合。美国和加拿大的科学家每年对大湖(Great Lakes)湿地生物(植物、底栖无脊椎动物、鱼类、两栖类和鸟类)进行野外调查,分别构建 5 个类群的 IBI 评价湿地生态系统健康的现状和变化趋势^[32]。尽管有学者认为,鸟类迁移能力强,对环境变化的指示作用要弱于其他生物^[31],但由于鸟类是“明星物种”^[34],许多研究利用鸟类完整性指数(bird-based index of biotic integrity, B-IBI)评估人类活动和湿地环境变化对鸟类的影响。如 L. A. Smith 等^[35]调查加拿大安大略省南部湖滨湿地的鸟类多样性,发现城市附近宅种呈增加趋势, B-IBI 分值显著低于僻远的乡村地区。

国内 IBI 应用于湖泊湿地的生态健康评价方兴未艾。蔡琨等^[15]采用干扰程度最小系统法筛选参照点,按非湖心区和湖心区 2 个生态区分别构建太湖的 M-IBI,研究表明 2010—2012 年太湖生态健康总体上呈现逐步提升的趋势。陈展等^[36]构建了白洋淀的 V-IBI,认为植物具有直观、易于野外调查和分类鉴定等优点,适合作为湖泊湿地生态健康的指示生物^[37]。陆健刚等^[38]利用 GIS 对鄱阳湖 IBI 评价结果进行空间插值,结果表明在 IBI 评价结果的基础上

基于 GIS 平台选取适宜的插值方法能够提高评价结果的精度。

2.3 海岸湿地

海岸湿地处于陆地生态系统和海洋生态系统的交错过渡地带,在保护海岸线和防止堤岸土壤侵蚀方面有重要作用,且海岸湿地受人类活动干扰较严重^[39]。

海岸湿地受到物理、化学和生物等多种因素的强烈影响,它是生态多样性较高的生态边缘区,且常用的指示生物(无脊椎动物和浮游藻类)对土壤、光照等局域环境十分敏感,因此在构建海岸湿地的 IBI 时,必须着重考虑湿地环境和生物群落的时空异质性。如 S. B. Weisberg 等^[40]在构建美国切萨皮克湾 M-IBI 时,考虑海岸湿地土壤基质和盐度的差异进行生境类型划分,构建每个生境类型各自的 IBI 评价体系。R. V. Lacouture 等^[41]则考虑不同季节浮游藻类群落的差异,分别构建切萨皮克湾春季和夏季的藻类完整性指数(phytoplankton-based index of biotic integrity, P-IBI),分析河口营养和光照条件对浮游植物群落的影响。蔡立哲^[42]运用分季度采样的方式来体现无脊椎动物群落的季节性差异,再基于所有季度的调查数据构建厦门港和深圳湾的 M-IBI。

2.4 沼泽湿地

沼泽湿地是最主要的湿地类型之一,但关于沼泽湿地的 IBI 生态健康评价研究却很少。J. J. Mack 等^[43]构建美国俄亥俄州内陆沼泽湿地的 V-IBI,认为植物是沼泽湿地良好的指示生物。与以往研究不同的是, T. P. Simon 等^[12]基于密歇根南部沼泽湿地的水生无脊椎动物、鱼类、两栖类的群落数据构建出一个复合生物的 IBI,认为比基于单个生物的 IBI 更能全面反映湿地的生态状况。

我国仅在三江平原有沼泽湿地的 IBI 评价研究。刘曼红^[44]开展松花江呼兰河口湿地鱼类和底栖无脊椎动物的完整性研究,利用 3 分法和比值法对 IBI 参数赋值,发现 2 种方法的结果一致,这表明呼兰河口湿地处于一般到亚健康的状态,人工筑坝和采砂是导致生物完整性降低的主要因素。

2.5 水库

水库常作为农业灌溉、饮用水的水源,其生态健康状况与人们的生活息息相关。目前对水库的环境监测主要在水质监测方面,IBI 的水库生态健康研究较少。E. Clews 等^[45]以底栖类作为指示生物建立

新加坡水库的生态监测指标体系,认为耐受种/敏感种的数量或比例是该体系中最核心的参数. M. L. Petesse 等^[46]考虑旱雨季的差异构建巴西圣保罗 Barra Bonita 水库的 F-IBI,并将 F-IBI 与生境质量指数(habitat quality index)进行对比,认为 2 者的评价结果较一致. 朱迪等^[47]建立浙江省大中型水库的 F-IBI 评价体系,发现 F-IBI 评价结果与水库的水质分级大致相同,这表明 IBI 应用于水库健康评价具有较高的可靠性.

3 讨论与展望

IBI 广泛用于不同湿地类型的生态健康评价,评估人类活动和环境变化对湿地生物群落和生态系统的影响. 在 IBI 构建过程中,须针对不同的湿地类型选择合适的指示生物,同时考虑生物和环境的时空异质性,制定相应的野外数据采集方案,还需基于多年的观测数据对 IBI 进行验证和修订,以提高 IBI 评价的准确度和可靠性,使其能够适用于长期的湿地生态监测.

当前,IBI 研究面临的问题之一是 IBI 构建方法的不一致性. IBI 构建过程有很多步骤和环节(见图 1),每个环节都有多种方法可选择(见表 2 和表 3),采用何种方法最终影响 IBI 评价体系的组成及采样点的 IBI 评分. 大多数研究在方法选择上主观性较大,很少对方法进行严格的筛选和论证. 如国内的研究一般采用 3 分法和比值法对 IBI 参数赋值,而北美的研究更多采用 1、3、5 赋值法和自然断点法. 同样,关于参照点的选择没有统一的标准,在应该考虑哪些环境因素方面专家意见不一致,这导致 IBI 评价结果可比性降低^[48]. 因此,未来的研究还需着重考虑对 IBI 构建过程及方法进化验证、优化.

现有的 IBI 研究多数是在小范围地区开展,针对不同的区域筛选各自的 IBI 参数体系. 当将 IBI 应用于较大尺度(如整个流域、省级甚至全国)的湿地生态监测时,建立相对统一的 IBI 评价体系显得尤为必要. 有学者提出,在构建 IBI 时,尽量选取反映生物群落功能、而不涉及具体生物(如某个物种)的参数有助于提高 IBI 的空间适应性^[49]. 此外,IBI 是基于采样点的数据构建和计算的,如何将其评价结果推广到整个研究区域是未来的研究重点. 比较可行的方案是建立 IBI 与研究区域内关键环境因子之间的联系,将回归模型和空间插值法相结合对非采

样点区域的 IBI 值进行预测^[38],实现整个研究区域的生态健康评价.

总体而言,未来的 IBI 研究还需在方法上不断改进和优化,规范采样方法,统一参照点选择标准,减少参数筛选及 IBI 评分过程的主观因素影响,同时与遥感、地统计等多种技术手段相结合,弥补 IBI 方法本身存在的不足,提高其空间适用范围,使其成为不同尺度湿地生态监测的可靠手段,为湿地管理和保护提供科学依据.

4 参考文献

- [1] 殷书柏,吕宪国. 湿地边界确定研究进展 [J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 41-48.
- [2] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 47-51.
- [3] 韩大勇,杨永兴,杨杨,等. 湿地退化研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1293-1307.
- [4] Keiter R B. Ecosystems and the law: toward an integrated approach [J]. Ecological Applications, 1998, 8(2): 332-341.
- [5] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [6] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish [M]. 2nd ed. Washington D C: U S Environmental Protection Agency Office of Water, 1999.
- [7] 吴燕平, 阳文静. 湿地生物多样性监测的指标体系和实施方法: 以北师大湖湿地为例 [J]. 生物多样性, 2015, 23(4): 527-535.
- [8] 陈展, 尚鹤, 姚斌. 美国湿地健康评价方法 [J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5015-5022.
- [9] Yang Wenjing, Ma Keping, Kreft H. Geographical sampling bias in a large distributional database and its effects on species richness-environment models [J]. Journal of Biogeography, 2013, 40(8): 1415-1426.
- [10] Uzarski D G, Burton T M, Cooper M J, et al. Fish habitat use within and across wetland classes in coastal wetlands of the five great lakes: development of a fish-based index of biotic integrity [J]. Journal of Great Lakes Research, 2005, 31: 171-187.
- [11] 蔡琨, 秦春燕, 李继影, 等. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价: 以 2012 年冬季太湖为例 [J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1431-1441.
- [12] Simon T P, Jankowski R, Morris C. Modification of an in-

- dex of biotic integrity for assessing vernal ponds and small palustrine wetlands using fish, crayfish and amphibian assemblages along southern Lake Michigan [J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, 3(3): 407-418.
- [13] 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 [J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- [14] 汪星, 郑丙辉, 李黎, 等. 基于底栖动物完整性指数的洞庭湖典型断面的水质评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(9): 1799-1807.
- [15] 蔡琨, 张杰, 徐兆安, 等. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康 [J]. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 74-82.
- [16] Danz N P, Regal R R, Niemi G J, et al. Environmentally stratified sampling design for the development of great lakes environmental indicators [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 102(1): 41-65.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Diamond J M, Bressler D W, Sereiss V B. Assessing relationships between human land uses and the decline of native mussels, fish, and macroinvertebrates in the Clinch and Powell River watershed, USA [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(6): 1147-1155.
- [20] Genito D, Gburek W J, Sharpley A N. Response of stream macroinvertebrates to agricultural land cover in a small watershed [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(1): 109-119.
- [21] Miller S J, Wardrop D H, Mahaney W M, et al. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania [J]. *Ecological Indicators*, 2006, 6(2): 290-312.
- [22] 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 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 919-927.
- [23] 郑海涛. 怒江中上游鱼类生物完整性评价 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [24] 陈宏文, 张萌, 刘足根, 等. 赣江流域淡水生态系统完整性与健康状态的鱼类 F-IBI 值评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1098-1107.
- [25] 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.
- [26] 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 [J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [27] Huang Qi, Gao Junfeng, Cai Yongjiu, et al. Development and application of benthic macroinvertebrate-based multi-metric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48(1): 649-659.
- [28] 卢松, 陆林, 凌善金, 等. 人类活动对安庆沿江湖泊湿地影响的初步研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(1): 65-71.
- [29] Alberta Biodiversity Monitoring Institute. Estimating species and habitat intactness at the regional scale biodiversity intactness for species (20029) [EB/OL]. (2012-12-04) [2016-09-02]. <http://abmi.ca/home.html>.
- [30] Moncayo-Estrade R, Lyons J, Escalera-Gallardo C, et al. Long-term change in the biotic integrity of a shallow tropical lake: a decadal analysis of the lake Chapala fish community [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2012, 28(1): 92-104.
- [31] Petess M L, Siqueira-Souza F K, Freitas C Ed C, et al. Selection of reference lakes and adaptation of a fish multimetric index of biotic integrity to six amazon floodplain lakes [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 535-544.
- [32] Albert D A, Minc L D. Plants as regional indicators of great lakes coastal wetland health [J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2004, 7(2): 233-247.
- [33] Scholefield P, Firbank L, Butler S, et al. Modelling the European farmland bird indicator in response to forecast land-use change in Europe [J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(1): 46-51.
- [34] 张丹, 张军, 欧阳盼, 等. 南昌市常见鸟类对环境中 Cu, Pb, Cd 重金属污染物的指示作用研究 [J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(3): 319-323.
- [35] Smith L A, Chow-Fraser P. Impacts of adjacent land use and isolation on marsh bird communities [J]. *Environmental Management*, 2010, 45(5): 1040-1051.
- [36] 陈展, 林波, 尚鹤, 等. 适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法 [J]. *生态学报*, 2012, 32(21): 6619-6627.
- [37] 周雪玲, 熊建秋, 简敏菲, 等. 乐安河-鄱阳湖湿地优势水生植物对重金属污染物的富集作用 [J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(2): 210-215.
- [38] 陆健刚, 钟雯, 吴海真, 等. GIS 在 B-IBI 法评价鄱阳湖水生态系统健康性中的应用 [J]. *环境工程学院*, 2016, 10(3): 1553-1559.
- [39] 赵焕庭, 王丽荣. 中国海岸湿地的类型 [J]. *海洋通报*, 2000, 19(6): 72-82.
- [40] Weisberg S B, Ranasinghe J A, Dauer D M, et al. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay [J]. *Estuaries*, 1997, 20(1): 149-158.
- [41] Lacouture R V, Johnson J M, Buchanan C, et al. Phyto-

- plankton index of biotic integrity for Chesapeake Bay and its tidal tributaries [J]. *Estuaries and Coasts* ,2006 ,29 (4) : 598-616.
- [42] 蔡立哲. 河口港湾沉积环境质量的底栖生物评价新方法研究 [D]. 厦门: 厦门大学 2003.
- [43] Mack J J. Developing a wetland IBI with statewide application after multiple testing iterations [J]. *Ecological Indicators* 2007 7(4) : 864-881.
- [44] 刘曼红. 呼兰河口保护区及周边水域水生动物生态监测与健康评价 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学 2012.
- [45] Clews E ,Low E-w ,Belle C C ,et al. A pilot macroinvertebrate index of the water quality of Singapore's reservoirs [J]. *Ecological Indicators* 2014 38: 90-103.
- [46] Petesse M L ,Petrere M ,Spigolon R. Adaptation of the reservoir fish assemblage index(RFAI) for assessing the Barra Bonita Reservoir(São Paulo ,Brazil) [J]. *River Research and Applications* 2007 23(6) : 595-612.
- [47] 朱迪 陈锋 杨志 等. 基于鱼类生物完整性指数的水源地评价 [J]. *水生态学杂志* 2012 33(2) : 1-5.
- [48] Ruaro R ,Gubiani É A. A scientometric assessment of 30 years of the index of biotic integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws [J]. *Ecological Indicators* , 2013 29(6) : 105-110.
- [49] Cunico A M ,Allan J D ,Agostinho A A. Functional convergence of fish assemblages states [J]. *Ecological Indicators* 2011 11(5) : 1354-1359.

The Recent Advances in Applications of Index of Biotic Integrity on the Assessment of Wetland Ecological Health

XU Liting^{1,2} ,YANG Wenjing^{1,2*} ,YOU Qinghui³ ,YANG Tao^{1,2} ,HUANG Qi^{1,2} ,WANG Yeqiao^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research ,Ministry of Education ,Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China; 2. College of Geography and Environment ,Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China; 3. College of Life Sciences ,Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China)

Abstract: The concept of biotic integrity ,the procedures of developing an IBI and the application of IBIs in different wetland ecosystems are introduced. IBIs have been most widely applied to rivers ,streams and lakes for assessing the impacts of human activities and climate change on wetland ecological health. The most commonly used biological indicators include macroinvertebrates and fishes. It is found that there are large methodological differences in defining reference conditions in the choice of IBI metrics and metric scoring and that optimizing the methods for IBI development should be emphasized in future research. It is also suggested that combining IBI with other techniques such as remote sensing and geostatistics would largely expand the applicability of IBI on wetland ecological monitoring at different spatial scales.

Key words: wetland; ecological health assessment; index of biotic integrity(IBI) ; biological indicators; human disturbance

(责任编辑: 曾剑锋)