

DOI: 10.5846/stxb201605040847

徐丽婷, 阳文静, 吴燕平, 游清徽, 黄琪, 徐羽, 王野乔. 基于植被完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价. 生态学报, 2017, 37(15): 5102-5110.

Xu L T, Yang W J, Wu Y P, You Q H, Huang Q, Xu Y, Wang Y Q. Assessing the ecological health of Poyang Lake wetland using a vegetation-based index of biotic integrity (V-IBI). Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5102-5110.

基于植被完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价

徐丽婷^{1,2}, 阳文静^{1,2,*}, 吴燕平^{1,2}, 游清徽³, 黄琪^{1,2}, 徐羽^{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, 南昌 330022

2 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

3 江西师范大学生命科学院, 南昌 330022

摘要: 基于鄱阳湖湿地 30 个采样点的植被调查数据, 利用植被完整性指数法 (V-IBI) 评价鄱阳湖湿地生态健康状况。通过分布范围分析、判别能力分析和相关性分析, 从 35 个候选生物参数中筛选出 6 个核心参数, 利用比值法对核心参数赋值并累加求得各采样点 V-IBI 分值, 以所有采样点 95% 分位数值为最佳期望值建立评价标准划分健康等级。结果显示: 鄱阳湖湿地生态健康状况总体较好, 30 个采样点中 6 个为非常健康 ($V-IBI \geq 5.01$), 7 个为健康 ($4.38 \leq V-IBI < 5.01$), 8 个为一般 ($3.74 \leq V-IBI < 4.38$), 7 个为差 ($3.10 \leq V-IBI < 3.74$), 2 个为极差 ($V-IBI < 3.10$), 呈现出西部优于东部, 北部优于南部的空间差异。V-IBI 与景观发展强度指数 (LDI) 和栖息地环境质量评价指数 (QHEI) 呈显著相关性, 表明 V-IBI 方法对鄱阳湖湿地生态健康状况评价结果合理有效, 可作为鄱阳湖湿地生态监测的重要手段。

关键词: 植被完整性指数; 健康评价; 鄱阳湖湿地

Assessing the ecological health of Poyang Lake wetland using a vegetation-based index of biotic integrity (V-IBI)

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

1 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

3 College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: Assessing the ecological status of wetlands can provide critical information for the governance and management of wetland ecosystems. The index of biotic integrity (IBI) is a comprehensive method for assessing the ecological health of wetlands. Initially developed in North America, this method has standardized protocols for implementation and practice. The quantitative assessment results are easy to understand and communicate among scientific communities and the general public. Vascular plants are quickly emerging as one of the important indicators of human-mediated disturbances, because they are immobile, and therefore, susceptible to physical, chemical, and biological changes of the surrounding environment. Poyang Lake is the largest freshwater lake in China. The Poyang Lake wetland is recognized as one of the most important wetlands in the world since it provides habitats for many unique species of wintering migratory birds and is of prominent ecological and economic importance to millions of people in the middle and lower Yangtze River basin. Poyang Lake wetland has been significantly altered by human activities, such as agriculture, fishing, and tourism. Currently, there is no indicator framework to determine the status and trends of conditions of the Poyang Lake wetland. In this study, we

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561097, 41471298); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心建设经费 (JXS-EW-00); 江西省教育厅研究生创新基金项目 (YC2015-S118); 江西省自然科学基金项目 (20142BAB213023, 20161BAB213076); 江西省教育厅基金项目 (150334)

收稿日期: 2016-05-04; **网络出版日期:** 2017-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangwenjing@jxnu.edu.cn

aimed to develop a vegetation-based IBI (V-IBI) to assess the ecological health of Poyang Lake wetland. Field surveys of 30 sampling sites were conducted in the autumn of 2015. We collected data including plant species compositions, abundance, water quality parameters, soil properties, and land use surrounding sampling sites. We tested 35 candidate metrics regarding the diversity, structure, and disturbance tolerance of plant communities for their discriminatory ability between reference sites and impaired sites. Six metrics were finally selected as the V-IBI metrics, i.e., numbers of invasive species, sensitive species, tolerant species, perennial species, species with both sexual and vegetative propagation, and percentage cover of *Phalaris arundinacea* L. Values of these metrics were scaled between 0 and 1. The V-IBI score of a sampling site was calculated as the sum of the scaled values of each individual metric. A 95% percentile of all V-IBI scores and quartiles of the scores below the 95% percentile were then used as cut-offs for rating categories. The results showed that 6 sites were rated as excellent ($V-IBI \geq 5.01$); 7 were good ($4.38 \leq V-IBI < 5.01$); 8 were fair ($3.74 \leq V-IBI < 4.38$); 7 were poor ($3.10 \leq V-IBI < 3.74$); and 2 were very poor ($V-IBI < 3.10$). Sampling sites rated as excellent and good were all located in western and northern sections, especially within the national and provincial nature reserves, whereas those rated as poor and very poor were mostly located in eastern and southern sections where wetland health was impaired by dense populations and intensive agricultural practices. Wetland areas where rivers discharged into Poyang Lake were generally rated as poor, suggesting that pollutants brought in by rivers had negative impacts on wetland health. The V-IBI was significantly correlated with the index of landscape development intensity (LDI) and qualitative habitat evaluation index (QHEI), indicating that V-IBI is plausible and reliable for assessing the ecological health of the Poyang Lake wetland.

Key Words: vegetation-based IBI (V-IBI); health assessment; Poyang Lake wetland

湿地是位于陆生生态系统和水生生态系统之间的过渡性地带,具有涵养水源、调蓄洪峰、降解污染物等重要生态功能^[1],被誉为世界上生物多样性最丰富、生态价值最高的生态系统之一^[2]。随着人类活动强度的加剧,湿地生态健康严重受损,甚至威胁到人类自身的健康与发展^[3-4]。湿地生态健康评价是湿地研究的热点之一,野外观测湿地生态指标成为探索湿地保护的重要途径^[5]。生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)在湿地生态健康评价中得到了广泛应用^[6],IBI的概念最早由美国学者提出,并以鱼类作为指示生物构建 IBI 体系,评价河流的健康状况^[7]。该方法基于高强度的野外调查和室内实验分析,花费大、耗时久、生物鉴定专业性要求较高,评价结果准确可靠,是北美湿地生态监测常用的方法之一,其应用已扩展到世界各地^[8]。发展至今,IBI 已被广泛应用于河流、湖泊、沼泽、海岸滩涂、池塘、水库等湿地的生态健康评价,指示生物类群也由鱼类扩展到底栖动物、着生藻类、维管植物、两栖动物和鸟类等^[9]。

植物是湿地生态系统中的生产者,对环境干扰较为敏感,能够综合反映多种环境污染^[10],且易于野外采集和分类鉴定,植被完整性指数(vegetation-based IBI, V-IBI)常用于湖泊和沼泽生态系统的健康评价中。Mack 等^[11]以入侵植物的分布和多度作为主要参数,评价俄亥俄州湖滨湿地的健康状况;Grabas 等^[12]对安大略湖沿岸湿地沉水植被群落进行 V-IBI 评价,结果表明城镇和村落附近湿地的植被完整性显著降低。我国利用 V-IBI 进行湿地生态健康评价尚不多见,仅白洋淀^[8]和梁子湖^[13]有相关研究报道。

鄱阳湖湿地自古以来受人类活动干扰强烈,近年来湿地退化趋势更加明显^[14]。有关其生态健康评价研究大多基于土地利用和经济发展数据^[15-16],尚未建立起更为有效的评价指标体系。本文以鄱阳湖湿地为对象,以植被为指示生物,构建鄱阳湖湿地 V-IBI 指标体系,评价其生态健康状况。并将 V-IBI 与景观发展强度指数(LDI)和栖息地环境质量评价指数(QHEI)进行对比分析,验证 V-IBI 对人类干扰的反应,以期对鄱阳湖湿地的生态健康监测提供可靠的方法和手段。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,位于长江中下游南岸,江西省北部,上承赣、抚、信、饶、修五河之水,下接长

江,属亚热带湿润性季风型气候,区域年降水量为 1350—1900 mm,湿地面积基本稳定在 3886 km²^[17]。鄱阳湖湿地的生态健康对于维系鄱阳湖流域甚至长江中下游的生态平衡具有重要意义^[18]。鄱阳湖周边人口繁盛、农业生产发达、渔业捕捞、湖底采砂等活动频繁,极大地增加了湿地退化的风险^[19]。

1.2 数据采集

本研究于 2015 年 9—10 月对鄱阳湖湿地 30 个采样点进行调查。现场记录采样点周边人类活动状况、土地利用状况以及植被信息等。植被调查采用样线调查和样方调查相结合的方法,该方法既能够较好地反映植物群落多样性随水位梯度的变化,又能减少耗时耗力^[20]。为控制水位的影响,参考北美大湖湿地植被调查方法^[21],根据鄱阳湖湿地植被分布状况,把湿地分为湿生植被区和水生植被区,垂直植被区设置 3 条间隔为 30 m 的重复样线,各区域沿样线等距离设置 5 个 1 m × 1 m 的样方,如遇水生植被区过窄(< 5 m),则沿垂直于样线的方向、以样线为中心设置 5 个样方(图 1)。

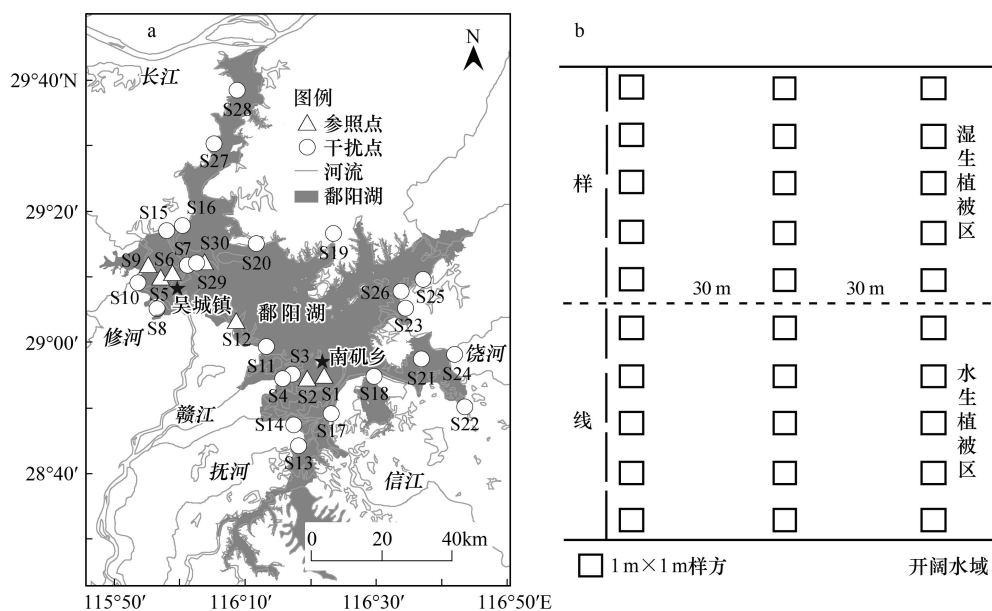


图 1 鄱阳湖湿地采样点分布图(a)和植被调查样线和样方布局示意图(b)

Fig.1 Locations of sampling sites (a) and layout of transects and quadrats for vegetation surveys in Poyang Lake wetland (b)

在采样点的开阔水域利用便携式多参数水质仪(YSI6600)现场测定水体温度(T)、浊度(Tur)、溶解氧(DO)、电导率($Cond$)、pH 值和叶绿素 a($Chl\ a$)等水体理化指标。并采集 3 份 250 mL 的水样,用冷藏保温箱保存后带回实验室,参照《水和废水监测方法》(第 4 版)的标准^[22],测定可溶性总氮(DTN)、可溶性总磷(DTP)、氨态氮(NH_4^+-N)、硝态氮($NO_3^- -N$)、亚硝态氮($NO_2^- -N$)和碱度(Alk)等指标。

1.3 数据分析和处理

1.3.1 参照点的选择

参照点指未受人类活动干扰或受干扰极小的采样点,代表湿地最原始、最自然的状态;受损点指受不同程度人类活动干扰的采样点。设置参照点可以为评价湿地受损及其生物群落改变程度提供基准。由于鄱阳湖几乎不存在未受人类干扰的区域,本研究参照其它湿地参照点的选择标准^[23-24],结合鄱阳湖湿地的实际情况,从土地利用、水质状况、栖息地环境质量和人类活动干扰等 4 个方面设定参照点(表 1)。

1.3.2 参数指标体系的构建

参阅相关文献^[8, 11, 13, 25],结合鄱阳湖湿地的植被特征选择了分属物种丰富度和组成、群落结构、植被丰度、物种耐受性、群落多样性等 5 种类型,共 35 个指标用于构建鄱阳湖湿地 V-IBI 体系(表 2)。

表 1 参照点的选择标准

Table 1 Selection criteria for reference sites

指标 Index	参照点选择标准 Reference point selection criteria
土地利用状况 Land use	500 m 内无农业用地、居民点、公路及堤坝
水质状况 Water quality	DTP < 0.02 mg/L, DTN < 1.2 mg/L, NH ₄ ⁺ -N < 0.4 mg/L, DO > 4.5 mg/L, Cond < 120 μs/cm
QHEI	QHEI > 60
人类活动干扰 Human disturbance	无人类活动或极少人类活动

候选参数依次进行以下筛选,(1)分布范围分析:比较参数数值变化范围,以及在 25%分位数、中位数和 75%分位数的数值特征,剔除参数分布范围过窄的指标^[26]。(2)判别能力分析:利用箱体图判别参数数值在参照点和受损点的 25%—75%分位数范围内(即箱体 IQ)的重叠情况,IQ ≥ 2 的参数通过判别能力分析^[27]。(3)相关性分析:对参数进行相关性分析,|r| > 0.75 的参数被认为信息重叠度高^[27],根据其反映植物群落对干扰的响应状况以及在已有研究中的应用情况选择其一。

表 2 构建 V-IBI 指标体系的候选生物参数及其对干扰的反应

Table 2 Candidate metrics for V-IBI and their expected response to disturbance

参数类型 Metrics type	序号 Number	参数 Metrics	对干扰的响应 Responses to disturbance	序号 Number	参数 Metrics	对干扰的响应 Responses to disturbance
物种丰富度和组成 Species richness and composition	M1	总物种数	下降	M2	沉水植物种数	下降
	M3	浮叶植物种数	下降	M4	挺水植物种数	下降
	M5	单子叶植物种数	上升	M6	双子叶植物种数	下降
	M7	苔草属植物种数	下降	M8	藤本植物种数	上升
	M9	莎草科植物种数	下降	M10	禾本科植物种数	上升
	M11	一年生植物种数	上升	M12	多年生植物种数	下降
群落结构 Community structure	M13	本地种数	下降	M14	入侵种数	上升
	M15	苔草属植物百分比	下降	M16	藨草百分比	上升
	M17	莎草科物种百分比	下降	M18	禾本科植物百分比	上升
	M19	一年生植物百分比	上升	M20	多年生植物百分比	下降
	M21	本地物种百分比	下降	M22	入侵种百分比	上升
	M23	兼性繁殖种百分比	下降			
植被丰度 Vegetation abundance	M24	苔草属植物盖度	下降	M25	藨草盖度	上升
	M26	莎草科植物盖度	下降	M27	禾本科植物盖度	上升
	M28	一年生植物盖度	上升	M29	多年生植物盖度	下降
	M30	本地种盖度	下降	M31	入侵种盖度	上升
物种耐受性 Species tolerance	M32	耐受种数	上升	M33	敏感种数	下降
群落多样性 Community diversity	M34	香农多样性指数	下降	M35	均匀度指数	下降

1.3.3 V-IBI 分值计算与评价标准的建立

应用比值法统一参数量纲,对数值随干扰增强而减小的参数,以 95%分位数作为最佳期望值(无干扰或干扰极少状态下的值),参数赋值为:实际值 / 最佳期望值;对数值随干扰增强而增大的参数,以 5%分位数作为最佳期望值,参数赋值为:(最大值-实际值)/(最大值-最佳期望值),参数值介于 0—1 之间,大于 1 的记为 1。所有参数之和为该采样点的 V-IBI 分值。

以所有采样点 V-IBI 分值的 95%分位数作为最佳值,高于该值的为健康状态,将低于该值的分布范围 4 等分,由此划分出健康、亚健康、一般、差和极差 5 个健康等级标准,据此评价湿地健康状况。

1.3.4 人类活动干扰强度

IBI 参数能够定量反映人类活动干扰与湿地生态健康之间的关系,为验证 V-IBI 与人类活动干扰强度的关系,利用 LDI 和 QHEI 两种方法构建人类活动干扰强度,评估采样点的生境质量状况。

利用 2013 年 Landsat TM 影像解译得到鄱阳湖湿地土地利用类型数据,根据研究需要分为水域、林地、草地、耕地、交通用地、农村居民点和城镇用地 7 类。参照 Brown^[28] 和 Mack^[29] 的 LDI 评价体系 and 鄱阳湖区域土地利用能耗情况^[30],确定各类土地的 LDI 系数:水域、林地、草地 = 1;耕地 = 4.54;交通用地 = 7.81;农村居民点 = 8.66;城镇用地 = 9.42。采样点 1 km 缓冲区范围内各土地利用类型面积占总面积百分比与对应的 LDI 系数乘积之和即为该采样点的 LDI 指数。借鉴美国 EPA 快速生物评价手册中的记录与评价方法,参考 Barbour^[31] 提出的 QHEI 评价指标体系,结合鄱阳湖湿地生态评价已有研究^[6],采用栖境复杂性、水质状况、土地利用结构、人类活动强度、植被多样性等 5 项指标计算栖息地生境质量,每项指标最高 20 分,共 100 分,各项指标得分和为对应采样点的 QHEI 分值。

2 研究结果

本研究共调查到鄱阳湖湿地植物 35 科 67 属 75 种,以典型湿生植物为主,尤其是苔草属、蓼属和藨草属植物。不少采样点出现中生植物和旱生植物,甚至有采样点出现入侵植物。

2.1 参照点

根据表 1 筛选出 7 个参照点(图 1),其中 S1 和 S2 位于“鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区”内,S5、S6、S9 和 S30 位于“江西鄱阳湖国家级自然保护区”内,S12 位于鄱阳湖西汉,三面环水。这 7 个采样点周边人类活动相对较少,周边土地利用类型以自然湿地为主,无明显污染源。

2.2 V-IBI 参数

通过各参数分布范围特点发现,M7、M8 和 M9 在 25%—75%分位数数值均为零;M21 的数值分布范围为 0.88—1;M22 在 25%—75%分位数数值范围为 0—0.01;M31 在 25%—75%分位数数值范围为 0—0.04;这 6 个参数数值随着干扰变化的可变动范围非常窄,予以剔除。剩余 29 个参数进入判别能力分析。

根据箱体图的判别标准,M2、M14、M16、M19、M23、M29、M32 和 M33 等 8 个参数 $IQ \geq 2$ (图 2),可进入相关性分析,其余参数予以剔除。

相关性分析如表 3 所示,M2 和 M33 高度相关($r=0.95, P<0.01$),M33 反映的敏感种是干扰存在与否的重要指征^[32],而 M2 反应的一些沉水植物对水污染耐受性较好^[33],对生境变化的指示更弱,因此保留 M33。M19 与 M23 显著相关($r=-0.75, P<0.01$),鄱阳湖湿地植物多是兼性繁殖,即既可有性繁殖又可营养繁殖,反映了鄱阳湖湿地植物重要的竞争繁殖策略,因此保留 M23。M14、M16 和 M29 与其他参数均无显著相关,予以保留。最终由入侵种数(M14)、藨草百分比(M16)、兼性繁殖种百分比(M23)、多年生植物盖度(M29)、耐受种数(M32)和敏感种数(M33)6 个核心参数构建鄱阳湖湿地 V-IBI 指标体系。

表 3 8 个候选参数的 Pearson 相关性检验

Table 3 The correlation coefficient between eight candidate biological metrics

参数 Metrics	M2	M14	M16	M19	M23	M29	M32
M14	-0.13	1.00					
M16	-0.31	-0.19	1.00				
M19	0.31	0.11	-0.10	1.00			
M23	-0.41 *	-0.26	0.27	-0.75 **	1.00		
M29	0.38 *	-0.06	-0.07	-0.46 **	0.16	1.00	
M32	-0.32	0.50 **	-0.18	0.42 *	-0.670 **	0.00	1.00
M33	0.95 **	-0.07	-0.33	-0.28	0.35	0.40 *	-0.23

** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关

2.3 V-IBI 分值与健康评价

鄱阳湖湿地 V-IBI 分值介于 2.46—5.74 之间,平均值为 4.31,最高值在吉山岛(S30),最低值在程家池(S14)。V-IBI 指标体系的评价标准见表 4,所有采样点中,6 个为非常健康,7 个为健康,8 个为一般,7 个为

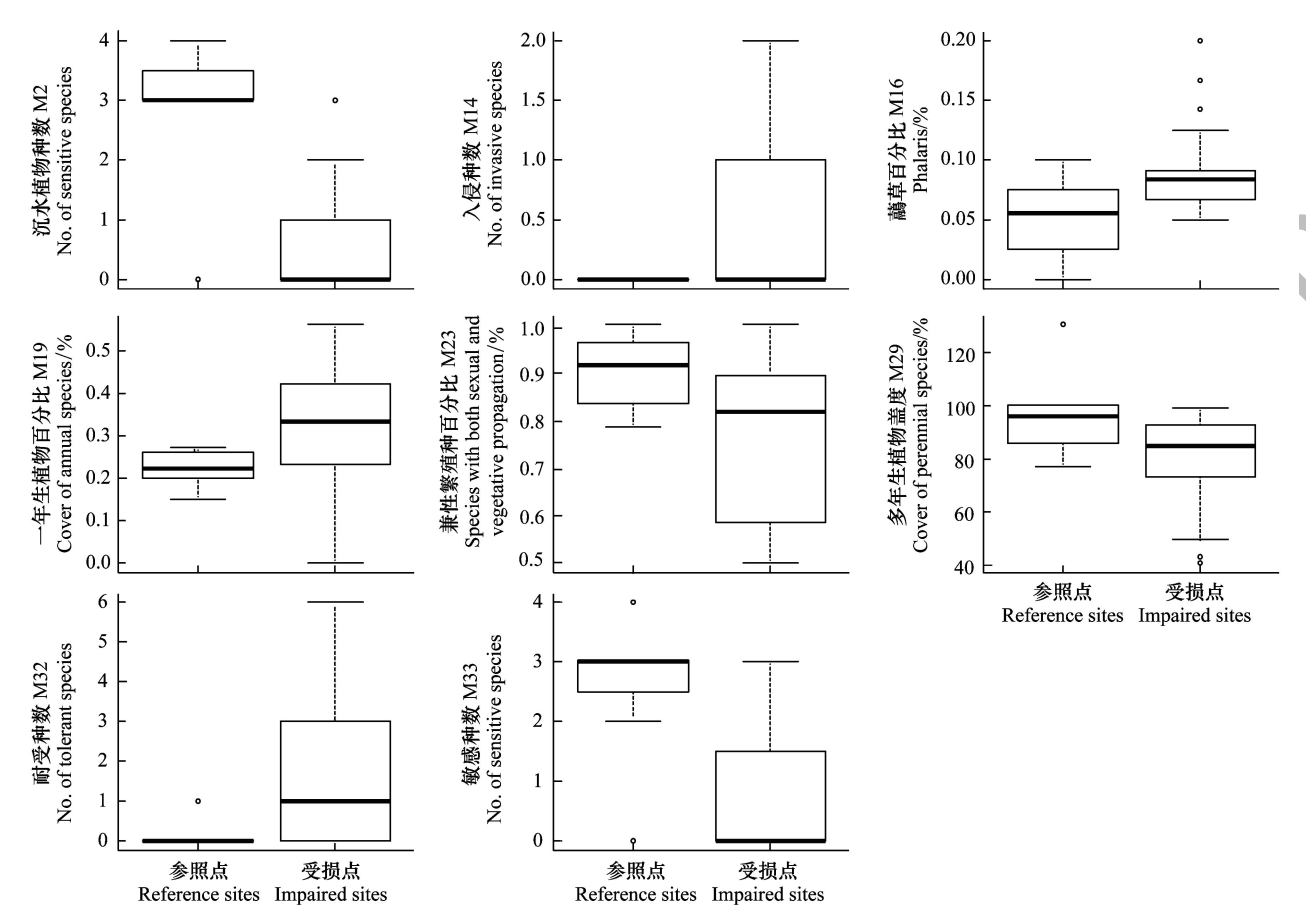


图 2 $IQ \geq 2$ 的 8 个候选生物参数在参照点和受损点的箱线图

Fig.2 Box-plots of eight candidate metrics with $IQ \geq 2$ between reference and impaired sites

差,2 个为极差。鄱阳湖湿地生态健康状况在空间分布上呈现出西部优于东部、北部优于南部的格局。V-IBI 分值的箱体图表明 V-IBI 指标体系对鄱阳湖湿地生态健康评价具有高判别能力($IQ = 3$),能够显著判别参照点和受损点的健康状况(图 3)。

表 4 鄱阳湖湿地 V-IBI 指标体系评价标准

Table 4 Rating categories of Poyang Lake wetland health conditions based on V-IBI scores				
非常健康 Excellent	健康 Good	一般 Fair	差 Poor	极差 Very poor
≥ 5.01	4.38—5.01	3.74—4.38	3.10—3.74	<3.10

2.4 V-IBI 与干扰强度的相关性

相关性分析表明 V-IBI、LDI 和 QHEI 三者均显著相关,V-IBI 与 LDI 呈显著负相关($r = -0.4, P < 0.05$),V-IBI 与 QHEI 呈显著正相关($r = 0.63, P < 0.01$),QHEI 与 LDI 呈显著负相关($r = -0.4, P < 0.01$)。LDI 分值越低,土地利用类型中接近自然状态的土地类型比例越大,湿地健康状况越好,V-IBI 和 QHEI 分值较高;反之,开发强度大的土地类型比例越大,湿地健康状况越差,V-IBI 和 QHEI 分值较低。QHEI 得分较高的采样点 LDI 分值相对较低,土地利用开发强度较小,湿地健康状态较好,反之湿地健康状态较差。且参照点和受损点之间差异显著(图 4)。

3 讨论

本研究选取了 6 个在参照点和受损点具有显著差异的植物群落特征参数构建 V-IBI 体系,反映了鄱阳湖

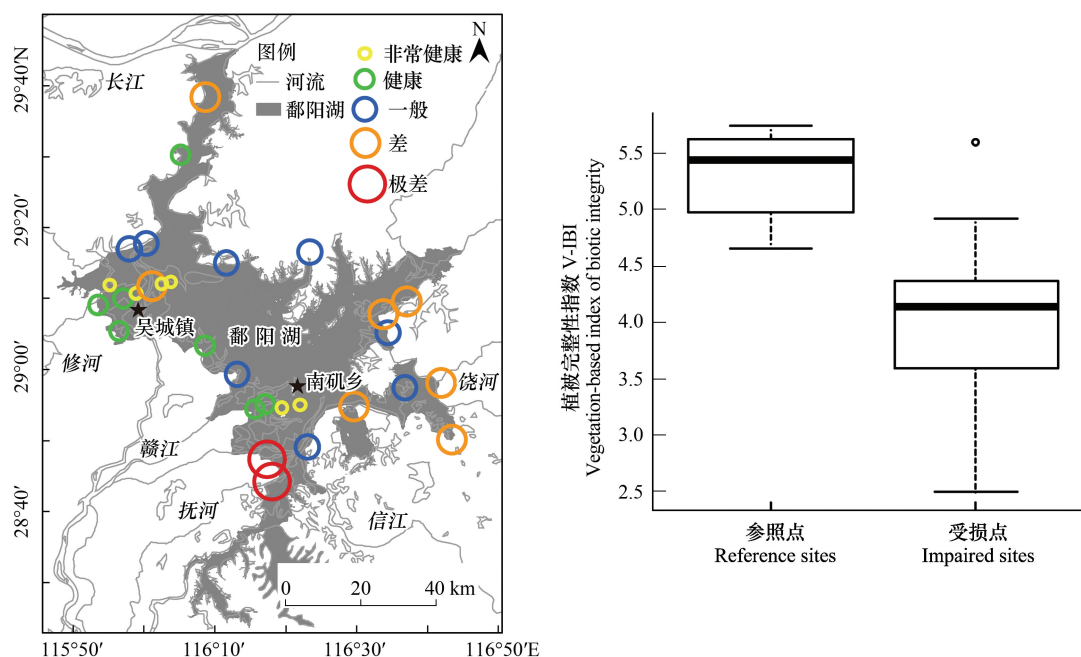


图3 鄱阳湖湿地 V-IBI 指数评价结果

Fig.3 The ecological health of Poyang Lake wetland assessed using V-IBI

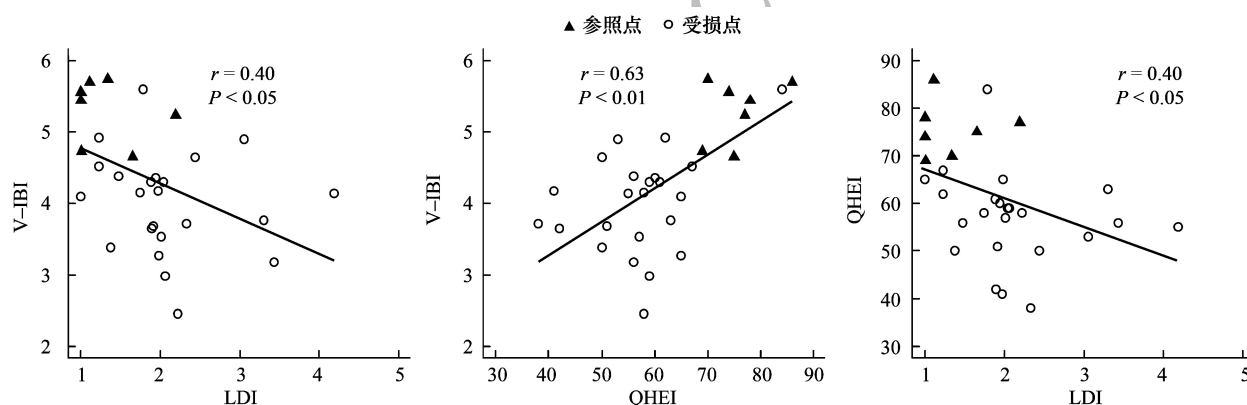


图4 V-IBI 与 LDI 和 QHEI 的散点图

Fig.4 Pairwise scatter plots of V-IBI, QHEI and LDI

湿地植被对非自然干扰的响应。入侵植物的出现是湿地受干扰的重要指征,指示湿地水体、土壤环境发生较大的改变^[21]。所有采样点中有 5 处出现了入侵植物,说明鄱阳湖湿地面临着较高的入侵风险,未来还需加强对入侵植物的监测。藨草 (*Phalaris arundinacea* L.) 是鄱阳湖湿地的优势种之一,藨草的抗干扰能力较强,当干扰存在时,藨草的多度增加。鄱阳湖湿地以多年生兼性繁殖植物为主,这与鄱阳湖湿地水位季节性变化显著有关,多年生兼性繁殖植物的根茎能够耐受长时间的水淹,营养体又能够在水位下降时迅速萌发新叶,比仅以种子繁殖的植物更具优势。当湿地受干扰较强时,一年生植物、对干扰耐受性强的先锋物种或非典型湿地物种增多,而对干扰敏感的物种减少。除 M16 外的 5 个参数均广泛被其他湿地采用^[8, 11-13],表明本研究构建的 V-IBI 体系既体现了植物群落对人类活动干扰的普遍反应,又反映了鄱阳湖湿地植被自身的特点。

本研究中 6 个评价结果为非常健康的采样点均位于“鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区”和“江西鄱阳湖国家级自然保护区”的核心区内,这些采样点周边人类活动干扰较少。7 个健康的采样点中,5 个位于保护区的边缘区域,周边有少量的水产养殖、旅游观光活动;另外 2 个采样点 (S12、S27) 周边以湿地草滩或次生林

为主,但可见渔业捕捞的船只。8个评价为一般的采样点位于农场、牧场、采沙场或村庄的附近,其中S20位于都昌县城郊,受城市排污影响较大。7个评价为差的采样点除S7和S28以外均位于鄱阳湖的南面和东面,S7和S24分别位于赣江北支和乐安河的入湖口,受河流中污染物影响较大^[34]。S28位于九江市姑塘工业区附近,其余采样点附近均有堤坝、农田分布或水产养殖等活动。2个评价为极差的采样点分别位于赣江南支和信江的入湖口,周边人口密集,土地利用以耕地为主。总体而言,鄱阳湖湿地的生态健康状况与人类活动干扰的强度密切相关,呈现出北部优于南部、西部优于东部的空间分布格局,与以往关于鄱阳湖生态健康状况及水质污染的研究结果较一致^[6, 35]。五河入湖口附近湿地的健康状况总体较差,可能由于五河携带了大量的污染物,导致湿地环境的改变和退化^[36]。

LDI、QHEI和IBI对鄱阳湖湿地的生态健康评价表明三者能够相互验证。但对于一些采样点,三者的评价结果不完全一致。例如,S5和S39在1 km范围内耕地占较大比重,LDI和QHEI评分较低,但V-IBI分值较高,这是由于采样点与耕地间存在水域或山地的阻隔,削弱了农业活动对湿地的影响。与QHEI、LDI相比较,IBI更直接地反映了人类活动对湿地环境及生物群落特征的影响。

本研究结合鄱阳湖地区水位变化和气候特点选择在秋季采样,秋季退水之后,湿地植物生长旺盛,此时的植物群落能够较灵敏地指示湿地环境的变化^[37]。另外,秋季许多植物处于开花结果的时期,植物的分类鉴定相对容易。鄱阳湖的植被分布格局主要受水位的影响,春、秋两季处于平水期,水文条件以及植物群落的组成和结构相似^[38]。因此,本研究的采样能代表鄱阳湖湿地生长旺季植被的主要特征。

鄱阳湖湿地面积广、类型多,且在水文节律影响下植被群落组成年际差异显著,未来应考虑将多种指示生物相结合,如将植被完整性指数与底栖动物完整性指数相结合,更加全面地评价湿地健康状况。并开展多年度研究,利用长时间序列数据进行验证和修订,使其适用于长期的湿地生态健康监测。此外,应结合GIS等技术在空间上将采样点数据推广到整个湿地的生态健康评价中,并结合水质数据、土地利用数据和社会经济数据等揭示其影响因素,从时间尺度、空间效应及驱动机制等多方面探究湿地生态健康。

4 结论

(1)本研究首次构建鄱阳湖湿地的V-IBI指标体系,包括6个对干扰敏感的植物群落特征参数,为鄱阳湖湿地生态健康评价和生态监测提供了重要的手段;

(2)评价结果显示,鄱阳湖湿地健康状况总体良好,呈现出北部优于南部、西部优于东部的空间差异。生态健康状况良好的湿地分布在远离人类活动的区域,如自然保护区内。生态健康状况较差的湿地多分布在耕地、居民点、水产养殖场区、堤坝和河流入湖口附近;

(3)V-IBI分值与LDI、QHEI间存在显著的相关性,表明V-IBI指标体系的评价结果较为准确可靠,能够较客观地反映湿地的生境质量及景观格局偏离自然的程度。

参考文献(References):

- [1] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展. 生态学报, 2001, 20(3): 31-36.
- [2] 赵魁义,何舜平,李伟. 中国湿地生物多样性研究. 中国科学院院刊, 2010, 25(6): 659-667.
- [3] 宋创业,胡慧霞,黄欢,任红旭,黄翀. 黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价. 生态学报, 2016, 36(9): 2705-2714.
- [4] 韩大勇,杨永兴,杨杨,李珂. 湿地退化研究进展. 生态学报, 2012, 32(4): 1293-1307.
- [5] 姜明,吕宪国,刘吉平,杨青. 湿地生态系统观测进展与展望. 地理科学进展, 2005, 24(5): 41-49.
- [6] 黄琪,高俊峰,张艳会,闫人华,王雁,蔡永久. 长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价. 生态学报, 2016, 36(1): 118-126.
- [7] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [8] 陈展,林波,尚鹤,李勇. 适应白洋淀湿地健康评价的IBI方法. 生态学报, 2012, 32(21): 6619-6627.
- [9] DeKeyser E S, Kirby D R, Ell M J. An index of plant community integrity: development of the methodology for assessing prairie wetland plant communities. Ecological Indicators, 2003, 3(2): 119-133.
- [10] Moore M J C, Langrehr H A, Angradi T R. A submersed macrophyte index of condition for the Upper Mississippi River. Ecological Indicators,

- 2012, 13(1): 196-205.
- [11] Mack J J, Avdis N H, Braig IV E C, Johnson D L. Application of a vegetation-based index of biotic integrity for Lake Erie coastal marshes in Ohio. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2008, 11(1): 91-104.
- [12] Grabas G P, Blukacz-Richards E A, Permanen S. Development of a submerged aquatic vegetation community index of biotic integrity for use in Lake Ontario coastal wetlands. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, 38(2): 243-250.
- [13] 谢楚芳, 舒潼, 刘毅, 任文彬, 蒋金辉, 杨劼. 以植被生物完整性评价梁子湖湖滨湿地生态系统健康. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1387-1394.
- [14] 黄金国, 郭志永. 鄱阳湖湿地生物多样性及其保护对策. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 305-306, 309-309.
- [15] 廖富强, 刘影, 叶慕亚, 郑林. 鄱阳湖典型湿地生态环境脆弱性评价及压力分析. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 133-137.
- [16] 周云凯, 白秀玲, 姜加虎. 近 17 年鄱阳湖区生态系统健康时空变化研究. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 1008-1017.
- [17] 谢冬明, 郑鹏, 邓红兵, 赵景柱, 樊哲文, 方豫. 鄱阳湖湿地水位变化的景观响应. *生态学报*, 2011, 31(5): 1269-1276.
- [18] 金斌松, 聂明, 李琴, 陈家宽, 周文斌. 鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(3): 268-275.
- [19] 刘桃菊, 陈美球. 鄱阳湖区湿地生态功能衰退分析及其恢复对策探讨. *生态学杂志*, 2001, 20(3): 74-77.
- [20] Vondracek B, Koch J D, Beck M W. A comparison of survey methods to evaluate macrophyte index of biotic integrity performance in Minnesota lakes. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 178-185.
- [21] 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: 以北美大湖湿地为例. *生物多样性*, 2015, 23(4): 527-535.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] Huang Q, Gao J F, Cai Y J, Yin H B, Gao Y N, Zhao J H, Liu L Z, Huang J C. Development and application of benthic macroinvertebrate-based multimetric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin, China. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 649-659.
- [24] 蔡琨, 张杰, 徐兆安, 吴东浩, 张咏, 王备新. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 74-82.
- [25] Simon T P, Stewart P M, Rothrock P E. Development of multimetric indices of biotic integrity for riverine and palustrine wetland plant communities along Southern Lake Michigan. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2001, 4(3): 293-309.
- [26] 杨柳, 李泳慧, 王俊才, 杨玉格, 丁振军. 基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价. *生态学报*, 2012, 32(11): 3313-3322.
- [27] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 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.
- [28] Brown M T, Vivas M B. Landscape development intensity index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 101(1): 289-309.
- [29] Mack J J. Landscape as a predictor of wetland condition: an evaluation of the Landscape Development Index (LDI) with a large reference wetland dataset from Ohio. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120(1): 221-241.
- [30] 罗志军, 史想松, 韩林捷, 聂玲玲. 鄱阳湖区土地利用变化的碳排放效应研究. *江西农业大学学报*, 2013, 35(5): 1074-1081.
- [31] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. 2nd ed. EPA 841-OB-99-002. Washington DC: US Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [32] 葛刚, 李恩香, 吴和平, 吴志强. 鄱阳湖国家级自然保护区的外来入侵植物调查. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 93-97.
- [33] 杨海龙, 叶居新. 江西省水生维管束植物群落与环境因子关系的初步研究. *生态学杂志*, 2001, 20(1): 45-47, 62-62.
- [34] 周雪玲, 熊建秋, 简敏菲, 陈朴青, 徐鹏飞, 李玲玉. 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. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(2): 210-215.
- [35] 朱琳, 赵英伟, 刘黎明. 鄱阳湖湿地生态系统功能评价及其利用保护对策. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 196-200.
- [36] 胡春华, 张培, 曾思苗, 周文斌. 鄱阳湖不同形态氮的时空分布特征. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(2): 213-217.
- [37] Kantrud H A, Newton W E. A test of vegetation-related indicators of wetland quality in the prairie pothole region. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1996, 5(3): 177-191.
- [38] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林, 陈伏生, 李述. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水位对其影响研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(6): 597-605.