

Ecosystem Health Assessment of Mangrove Wetland in Futian Based on Neural Network

Zhigang Qiu¹, Shenhui Lin², Xiaoxue Shen³, Huan Ding³

¹ZTE Instruments Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

²CCCC TDC Southern Communications Construction Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

³School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen Guangdong
Email: lirui2000@163.com

Received: Oct. 21st, 2019; accepted: Nov. 18th, 2019; published: Nov. 25th, 2019

Abstract

This study constructs a mapping relationship between environmental factors and ecosystem health indicators based on neural network models and a mangrove ecosystem health assessment method based on health degree (I) and deviation degree (b). Furthermore, health status of the Futian mangrove ecosystem in Shenzhen was assessed and predicted based on the diversity of benthic animals and the number of black-faced spoonbills (*Platalea minor*). The results showed that the value of grey correlation degree is greater than 0.9 between human activity indicators (noise and population) and the number of black-faced spoonbills, as well as water quality indicators (dissolved oxygen, total phosphorus, soluble phosphorus, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen, salinity, pH, total nitrogen, and conductivity) and the diversity of benthic animals. The simulation results of the bird population and benthic diversity based on the neural network model are consistent with the values and trends of field monitoring indicators. The number of black-faced spoonbills and their I values is expected to decline in the next few years, while the diversity of benthic animals and their I values will show an overall upward trend, indicating that the water environment health status of the area has been greatly improved, while the entire wetland ecosystem is still unhealthy. Deviation degree (b) fluctuations over time indicate that the stability of the ecosystem health in the area is weak, and mangrove management and protection need to be strengthened in the future.

Keywords

Neural Network, Mangrove, Health Assessment

基于神经网络的福田红树林生态系统健康评估

邱致刚¹, 林绅辉², 沈小雪³, 丁欢³

¹中兴仪器(深圳)有限公司, 广东 深圳

²中交天航南方交通建设有限公司, 广东 深圳

³北京大学深圳研究生院, 环境与能源学院, 广东 深圳

Email: liruli2000@163.com

收稿日期: 2019年10月21日; 录用日期: 2019年11月18日; 发布日期: 2019年11月25日

摘要

本研究构建了基于神经网络模型的环境因素与生态系统健康指标间的映射关系以及基于健康度(I)和偏离度(b)的红树林生态系统健康评价方法, 并以底栖动物多样性和黑脸琵鹭数量为指标对深圳福田红树林生态系统健康状况进行了评估与预测。结果表明: 人类活动指标(噪声和人口数量)与黑脸琵鹭数量, 以及水质指标(溶解氧、总磷、可溶性磷、硝态氮、氨态氮、盐度、pH、总氮和电导率)与底栖动物多样性间的灰色关联度均大于0.9; 基于神经网络的鸟类数量和底栖动物多样性的模拟结果与野外监测的数值和变化趋势一致。黑脸琵鹭的数量及其 I 值预计在未来几年会呈现下降的趋势, 而底栖动物多样性及其 I 值将整体呈上升趋势, 说明该区水环境健康状况有较大改善, 但整个湿地生态系统仍处于不健康状态。偏离度(b)随时间的波动较大, 说明该区生态系统健康状况的稳定性较弱, 在未来仍需加强红树林的管理和保护工作。

关键词

红树林, 神经网络, 健康评估

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红树林是分布在热带、亚热带海陆交错潮间带的湿地木本植物群落。红树林具有保护海堤、净化环境、维护生物多样性的多种生态功能, 在河口海岸生态系统中占有十分重要的地位[1]。长期以来, 由于人类对湿地功能的认识较晚, 重视不够, 目前世界范围内红树林面积以每年约 1.5% 的速度减少, 而且部分区域红树林的生态功能正在退化[2], 引起了严重的环境问题。

对红树林生态系统健康状况的评估是对其进行开发、管理和保护的前提。目前, 常用的湿地生态系统健康评价方法为指示物种法和指标体系法。李春榆等曾利用一种两栖动物——海蛙为指示物种, 对海南红树林进行了环境质量评价[3]。由于指示物种筛选的不确定性较多, 使得指标体系法应用更加广泛。曾祥云等采用遗传算法耦合模糊方法, 评价了海南东寨港湿地的生态系统健康[4]。尹艺洁等结合红树林景观特征, 采用层次分析法确定指标权重, 基于综合指数法评价了广西红树林的健康状况[5]。王树功等则基于 PSR 模型评价了珠江口淇澳岛红树林的健康状况[6]。尽管尝试很多, 但不同区域湿地生态系统评价在指标和模型选择、量化方法等方面差异较大, 且传统评价方法的主观性较强[3] [4] [5] [6]。

深圳福田红树林保护区是国内唯一的处于城市腹地的国家级自然保护区, 毗邻拉姆萨尔国际重要湿地——香港米浦红树林保护区[7] [8]。自 90 年代以来, 沿海地区工业化和城市化的快速发展对深圳沿海红树林湿地的生态环境造成了严重的影响, 如水环境污染、基围鱼塘生态功能退化、滨海河口河道硬质化等原

因, 导致湿地生态系统严重退化[9][10][11]。在福田红树林, 陈子月等曾基于 PSR 模型和熵权法构建了生态系统健康评价体系, 并结合灰色预测模型评价和预测了红树林生态系统的健康状况[12]。胡涛等则采用 PSR 模型和层次分析法来对福田红树林生态系统健康状况进行了评价[13]。二者均采用了指标体系法, 但在权重确定上存在差异。此外, 指标体系法对评价结果的等级划分多采用等间隔法, 评价结果的指示意义有限。因此, 本研究通过引入理想参照点, 构建了基于健康度(I)和偏离度(b)的红树林生态系统健康评价方法; 进一步地, 基于构建的评价方法, 结合福田红树林的监测数据, 筛选适宜的生物指标和环境指标, 采用神经网络分析法对深圳福田红树林生态系统健康状况进行了评估和预测。该方法可快速、客观地评估和预测红树林生态系统健康状况, 为红树林的保护和科学管理提供基础数据支持和保护指导。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

深圳福田红树林(22°30'~22°32'N, 113°56'~114°3'E)位于深圳湾东北部(图 1)。该区属亚热带海洋性季风气候, 年平均气温 22°C, 年平均降雨量 1926.8 mm, 年平均相对湿度 79%, 深圳湾内最大潮差为 2.8 m, 降雨集中在 5~9 月, 干湿季交替明显[14]。保护区生境可划分为红树林区、基围鱼塘、滩涂、河流和海域等, 包括核心区、缓冲区和实验区共约 368 hm²。红树林区主要呈现带状分布, 群落结构简单, 主要为小乔木和灌木, 除了以秋茄(*Kandelia obovata*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)等为主的 22 种红树植物群落外, 以及 55 种其它植物[15]。保护区内有 194 种鸟类, 包括黑脸琵鹭(*Platalea minor*)、白肩雕(*Aquila heliaca*)等在内的 23 种国家级珍稀濒危鸟类。底栖动物由甲壳动物、软体动物以及滩涂鱼等为主, 主要生活在红树林区和滩涂[16][17][18]。



Figure 1. Location map of the Futian mangrove reserve

图 1. 福田红树林保护区位置示意图

2.2. 研究方法

2.2.1. 数据来源

本研究中所使用的指标数据主要来源于统计年鉴和实地调查监测数据。2005~2014 年指示性物种的数量和多样性数据由内伶仃福田红树林鸟类保护区管理局以及世界自然基金会香港分会提供, 主要用于红树林生态系统健康评价及神经网络模型验证。水质数据来源为: 2005~2013 年的水质数据由福田保护区提供; 2014~2015 年为定期监测数据(保护区内四个固定监测点位), 包括基本理化性质(pH、盐度、浊度、电导率和溶解氧)、营养盐(总氮(TN)、总磷(TP)、可溶性磷、氨氮和硝氮)和污染(生化需氧量(BOD)和化学需氧量(COD))指标。噪声、人口和 GDP 数据来源于深圳统计年鉴(<http://www.szjt.gov.cn/xxgk/zfxgkml/tjsj/tjni/>), 主要用于神经网络模型输入变量的筛选及映射关系的建立。

2.2.2. 评价方法

基于 Shannon-Wiener 多样性指数(见公式 1) [19] [20]及灰色关联法筛选适宜的指示生物指标和环境指标; 结合已有时间序列的实测数据, 利用神经网络算法[21]建立时间序列与实测数据之间的映射关系, 并进行相应指标的变化趋势预测。

$$H = -\sum_{i=1}^s P_i \cdot \ln P_i \quad (\text{公式 1})$$

式中, S 为所选指示性物种指标个数, P_i 为第 i 种指示性物种生物量占总生物量的比例。

除单因子预警评估外, 基于多指标的分析结果, 在健康距离法[22]的基础上提出偏离度评价的概念, 用以综合评价生态系统健康状况。在此, 我们将偏离度定义为: 两个或两个以上评价生态系统的评价比值(即健康度, I)偏离基值的程度, 记为 b 。计算公式如下:

$$I = \frac{o}{w} \quad (\text{公式 2})$$

$$b = \sum_i |I_j - 1| \quad (\text{公式 3})$$

式中, I 为健康度, o 表示待评估红树林的生物指标测量数值, w 表示理想参照点的生物指标测量数值, I_j 为相应生物指标的评价比值, j 为生物指标的数量。香港米浦红树林与深圳福田红树林位置相近, 受人为干扰较少, 生态环境良好, 因此将其选定为理想参照点, 其相应的生物指标数值为理想健康值。

2.2.3. 评价标准

健康度 I 值的评价标准详见表 1。偏离度(b 值)越大表明生态系统结构越不稳定, 外界压力对红树林生态系统影响越大。

Table 1. The grade and meaning of ecosystem health assessment

表 1. 生态系统健康评价的等级与含义

I 值	等级	生态系统健康状况
$I \geq 1, \rightarrow 1$	健康	自然状态良好, 生态系统功能较强
$0 \leq I < 1$	不健康	自然状态改变, 生态系统功能退化

3. 结果与分析

3.1. 指示物种的选取

选取指示物种或种群的数量或物种多样性指标作为生态系统健康状况的表征指标[23] [24]。本研究选取鸟类和底栖动物为指示性物种, 主要是基于以下原因: 底栖动物作为水生环境的重要组成部分, 对保持整个水生生态系统的稳定和遏制富营养化具有重要作用[25] [26]。深圳湾是大量冬候鸟的停歇地和越冬地, 红树植物凋落物可为滩涂上的底栖动物提供食物和能量来源; 同时, 底栖动物也是湿地鸟类的主要食物来源; 底栖动物和鸟类通过食物网相互联系, 都是红树林生态系统的重要生物物种。考虑到数据的可获取性, 鸟类以黑脸琵鹭的数量作为表征指标[16] [27]。

3.2. 影响因子的确定

基于灰色关联法[28] [29] [30]对影响健康状况表征指标的环境因子进行关联性分析和排序, 筛选出关联度 0.9 以上的环境因子, 并以此作为神经网络模型建模的输入变量。具体如下:

3.2.1. 影响黑脸琵鹭数量的环境因子

城市化与人类活动可能对红树林湿地鸟类产生深刻影响[31] [32]。因此,选取可反映城市化水平的噪声、人口和 GDP 水平作为主要影响因子,分析其与黑脸琵鹭数量之间的关系。基于灰色关联法计算黑脸琵鹭数量与噪声、人口、GDP 水平之间的关联度(图 2),发现噪声和人口数量与黑脸琵鹭数量的灰色关联度较大,因此在建模时采用这两个指标作为神经网络模型的输入变量。

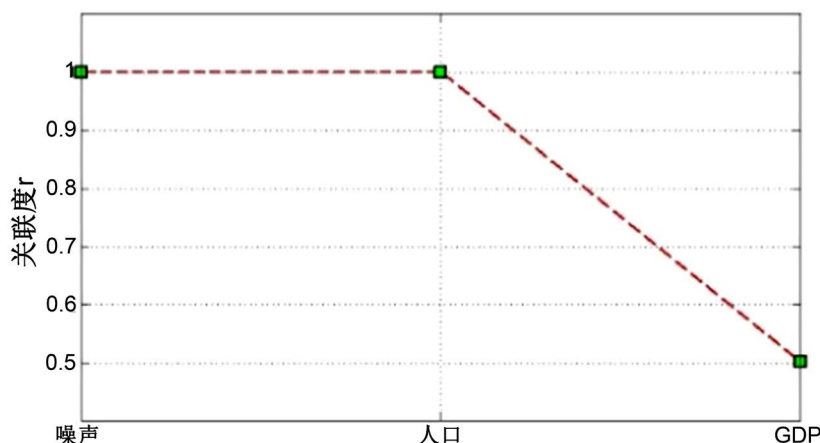


Figure 2. Grey correlation degree between urbanization level and black-faced spoonbill number
图 2. 城市化水平与黑脸琵鹭数量的灰色关联度

3.2.2. 影响底栖动物多样性的环境因子

水环境健康状况将直接影响底栖动物多样性[33] [34]。对主要的水质指标与生物多样性指数进行灰色关联度分析,发现除 BOD、COD 和浊度外,其他水质指标与底栖动物多样性的灰色关联度均在 0.9 以上(见图 3),因此选取这些指标作为模型的输入变量,底栖动物生物多样性指数作为模型的响应变量。

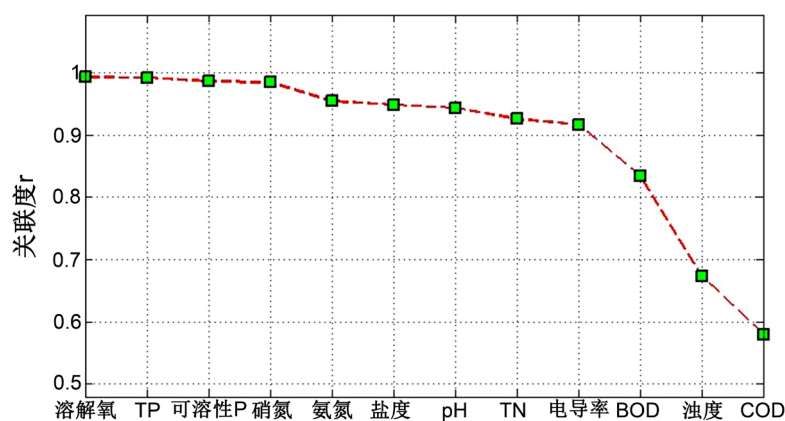


Figure 3. Grey correlation degree between water quality indicators and benthic diversity
图 3. 水质指标与底栖动物多样性的灰色关联度

3.3. 神经网络模型的建立与验证

基于上述步骤筛选的输入变量,利用神经网络算法建立相应影响因子与生态系统健康状况指示指标之间的映射关系,并用实测数据对映射关系进行合理性分析和验证,运行结果分别如图 4 和图 5 所示。基于人工神经网络模型得到的模拟结果与监测指标吻合性良好,特别是底栖动物多样性变化的模拟结果

与监测指标值基本一致，说明基于神经网络算法得到的映射关系可以很好地反映各项水质指标与底栖动物多样性之间的关系。同时，基于该方法可在一定程度上实现对监测数据缺失值的填补。

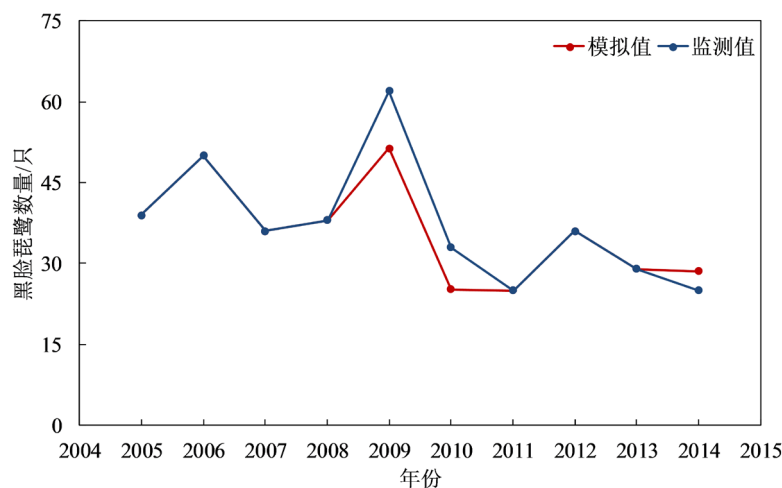


Figure 4. Simulation results of the change in the number of black-faced spoonbill in Futian mangrove from 2005 to 2014
图 4. 2005~2014 年福田红树林黑脸琵鹭数量变化的模拟结果

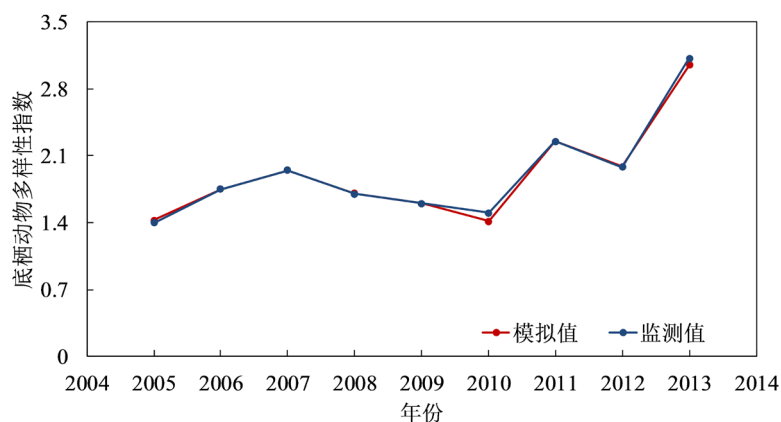


Figure 5. Simulation results of changes in benthic diversity in Futian mangrove from 2005 to 2013
图 5. 2005~2013 年福田红树林底栖动物多样性变化的模拟结果

3.4. 基于神经网络算法的时间变化趋势预测

根据已有时间序列的实测数据，利用已建立的时间序列与实测数据之间的映射关系，进行相应指标的变化趋势预测。对黑脸琵鹭数量和底栖动物多样性的变化趋势进行预测。运行结果如图 6 和图 7 所示。结果表明：黑脸琵鹭的数量在未来几年会呈现下降的趋势，自 2005 年以来，城市发展和人为活动对福田红树林产生了较为严重的扰动，广深高速公路的交通噪声极大地干扰了鸟类的栖息、觅食和繁殖。除此之外，硬质化的凤塘河口两岸，阻碍了陆地生态系统和河流生态系统的物质循环和能量流动，无法发挥河道生态系统的功能，为鸟类提供必要的生存环境[16]。从底栖动物生物多样性指数 H 值得趋势图可以看出，在未来的几年内，底栖动物多样性指数整体上呈现上升趋势。近年来，保护区管理局对福田红树林内的水体污染源进行了截流，修建了基于生态工艺的污水处理系统；同时，对基围鱼塘进行了生态功能提升，采用工程措施恢复了人工围垦所破坏的生境，增加了水动力交换，完善了鱼塘的生态功能，为底栖动物的繁衍和栖息提供了良好的生境[35]。

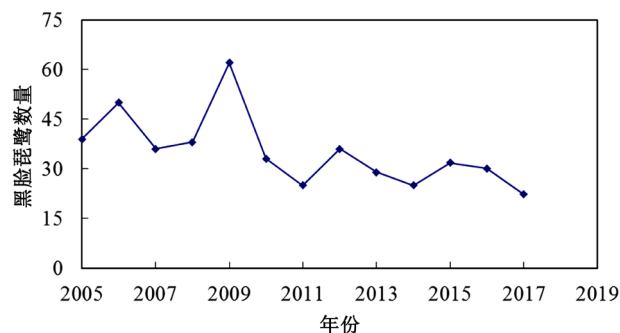


Figure 6. Prediction results of the number of black-faced spoonbill in Futian mangrove

图 6. 福田红树林黑脸琵鹭数量的预测结果

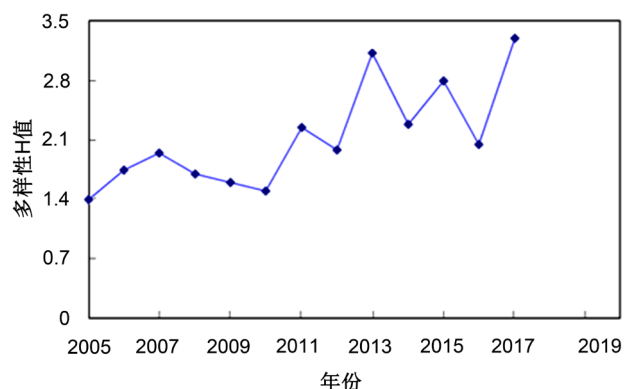


Figure 7. Prediction results of benthic diversity index (H) in Futian mangrove

图 7. 福田红树林底栖动物多样性指数(H)的预测结果

3.5. 基于生物快速评估法的红树林生态系统健康评估

基于预测结果,分析了水鸟和底栖动物多样性的 I 值,结果如图 8 所示。从 2005 年开始,水鸟 I 值呈上升趋势,说明深圳福田红树林生态系统健康状况有改善。2009 年之后,水鸟 I 值总体呈下降的趋势,可能是由于该区域的城市化水平快速提升、高层建筑物涌现、环境质量恶化和游人活动急剧增加。由于该区的发展在较长一段时间内还会有很强的势头,预计水鸟 I 值还会出现下降的情况。底栖动物多样性受潮位线、水质等影响,波动较大。结合两者的 I 值可以看出,从 2005 年到 2007 年期间逐步稳定并趋近于 1,说明生态系统健康状况呈变好趋势;从 2008 年到 2010 年又逐渐远离 1 说明生态系统健康状况变差;从 2010 年到 2012 年逐步稳定在 1 附近说明这段时间生态系统健康状况稳定;从 2013 年到 2015 年又开始波动说明生态系统健康状况再次变差。2016 年和 2017 年,水鸟的 I 值呈现减小的趋势,底栖动物的 I 值呈现增大的趋势。两种指示性生物指标对环境因子的变化具有不同的反应,这可以说明福田红树林保护区内水环境健康状况有了很大的改善,而整体上红树林生态系统仍然处于不健康状态。相对于香港红树林,福田红树林内仍存在较多的人为干扰。

进一步地,基于偏离度公式计算多因子评价结果(见图 9)。偏离度随着时间变化的波动较大,在 2007 年、2012 年和 2015 年附近出现极小值,表示这些年份福田红树林生态系统健康状况良好。而 2009 年、2013 年的偏离度都比较大,说明生态系统健康状况发展了较大的波动。本研究的预测结果与胡涛等[13]的研究结果一致,虽然人为保护力度在加大,但从整体上看,未来偏离度呈现增大的趋势。这可能是由于前期对红树林保护区不合理开发及利用导致红树林生态系统结构功能发生了部分变化,稳定性变差,导致其抵抗外界压力的能力降低。

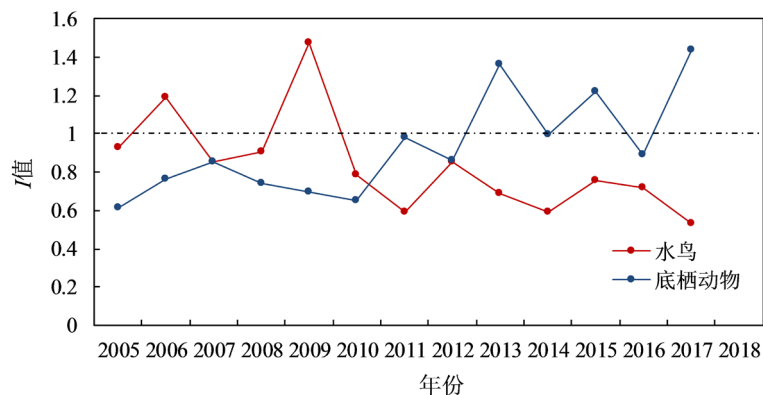


Figure 8. Health level (I) of waterfowl and benthic animals in Futian mangrove from 2005 to 2017

图 8. 2005~2017 年福田红树林水鸟和底栖动物的健康度(I)

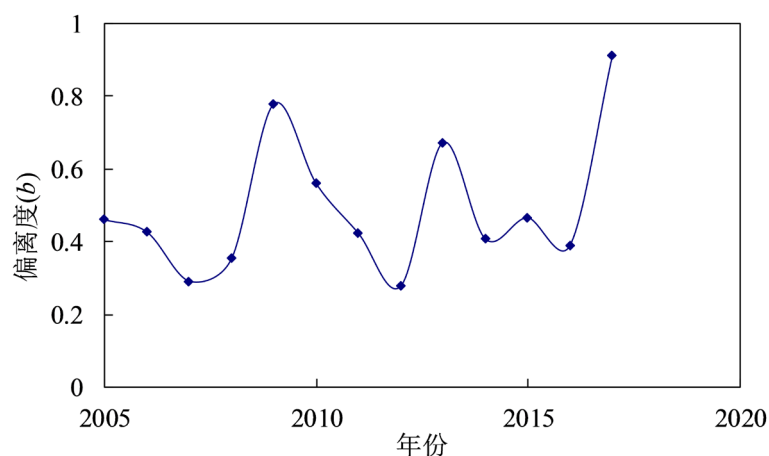


Figure 9. Deviation level (b) of waterfowl and benthic animals in Futian mangrove from 2005 to 2017

图 9. 2005~2017 年福田红树林水鸟和底栖动物的偏离度(b)

4. 结论

本研究基于神经网络模型和基于健康度(I)和偏离度(b)的生物快速评估法,以底栖动物多样性和黑脸琵鹭数量为指标对深圳福田红树林生态系统健康状况进行了评估与预测。环境影响因子与生态系统健康状况指示指标间有较好的映射关系,说明神经网络模型可较好的模拟与预测福田红树林生态系统健康状况指示指标。进一步地,基于生物快速评估法的结果表明,该区水环境健康状况有较大改善,但整个湿地生态系统仍处于不健康状态,且生态系统健康状况的稳定性较弱,在未来仍需加强红树林的管理和保护工作。

参考文献

- [1] 林鹏,傅勤. 中国红树林环境生态及经济利用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [2] Bayen, S. (2012) Occurrence, Bioavailability and Toxic Effects of Trace Metals and Organic Contaminants in Mangrove Ecosystems: A Review. *Environment International*, **48**, 84-101. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.07.008>
- [3] 李春榆, 黄国超, 洪云彩, 等. 以海蛙作为红树林环境监测指示物种的初步研究(英文)[J]. 农业科学与技术(英文版), 2012, 13(2): 434-438.
- [4] 曾祥云. 海南东寨港红树林湿地水生生态系统健康评价研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [5] 尹艺洁, 刘世梁, 成方妍, 等. 基于景观特征的广西典型红树林湿地生态系统健康评价[J]. 安全与环境学报,

- 2017, 17(3): 1164-11770.
- [6] 王树功, 郑耀辉, 彭逸生, 等. 珠江口淇澳岛红树林湿地生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 391-398.
- [7] 但新球, 廖宝文, 吴照柏, 等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. 生态环境学报, 2016(7): 1237-1243.
- [8] 廖宝文, 张乔民. 中国红树林的分布、面积和树种组成[J]. 湿地科学, 2014(4): 435-440.
- [9] 师卫华, 赵润江, 于笑云. 深圳福田红树林面临的威胁及对策[J]. 现代农业科技, 2008(20): 92-94.
- [10] 刘莉娜, 陈里娥, 韦萍萍, 等. 深圳福田红树林自然保护区的生态问题及修复对策研究[J]. 海洋技术, 2013(2): 125-132.
- [11] 姜刘志, 李常诚, 杨道运, 等. 福田红树林自然保护区生态环境现状及保护对策研究[J]. 环境科学与管理, 2017(11): 152-155.
- [12] 陈子月, 卓子荣, 陈卓杰. 深圳红树林湿地系统健康评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(S1): 149-152.
- [13] 胡涛, 丑庆川, 徐华林, 等. 深圳湾福田红树林保护区生态系统健康评价[J]. 湿地科学与管理, 2015, 11(1): 16-20.
- [14] 王勇军, 咎启杰, 林鹏. 深圳福田红树林陆鸟类变迁及保护[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1999(1): 142-149.
- [15] 卢群, 曾小康, 石俊慧, 等. 深圳湾福田红树林群落演替[J]. 生态学报, 2014(16): 4662-4671.
- [16] 陈桂珠, 王勇军, 黄乔兰. 深圳福田红树林鸟类自然保护区生物多样性及其保护研究[J]. 生物多样性, 1997(2): 25-32.
- [17] 徐华林. 深圳湾水鸟生物多样性初步研究[J]. 野生动物, 2013, 34(5): 291-295.
- [18] 吴振斌, 贺锋, 付贵萍, 等. 深圳湾浮游生物和底栖动物现状调查研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(8): 58-64.
- [19] Shannon, C.E. and Weaver, W. (1963) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Champaign.
- [20] 王晶, 焦燕, 任一平, 等. Shannon-Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究[J]. 水产学报, 2015, 39(8): 1257-1263.
- [21] 张友海. 浅谈人工神经网络的学习算法[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(19): 218, 220.
- [22] 马艳琴, 杨红艳, 潘平奇. 灰色聚类关联分析法的改进及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(19): 166-172.
- [23] 杨斌, 隋鹏, 陈源泉, 等. 生态系统健康评价研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 21(26): 291-296.
- [24] 刘艳艳, 吴大放, 王朝晖. 湿地生态安全评价研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(1): 69-75.
- [25] 胡亚强, 丁敬敬, 黄勃, 等. 东寨港红树林夏季浮游动物的多样性[J]. 热带生物学报, 2016, 7(1): 23-29.
- [26] 马丽, 蔡立哲, 袁东星. 红树林区底栖动物污染生态学研究进展[J]. 台湾海峡, 2003, 22(1): 113-119.
- [27] 邹发生, 宋晓军, 陈康, 等. 海南东寨港红树林湿地鸟类多样性研究[J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 21-23.
- [28] 高卓, 何鑫, 胡祖芳, 等. 灰色预测模型在生态系统健康评价指标体系中的应用[J]. 东莞理工学院学报, 2017, 24(1): 1-4.
- [29] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [30] 向用彬, 梁川, 林源. 改进的灰色聚类方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014(S2): 7-12.
- [31] Chace, J.F. and Walsh, J.J. (2006) Urban Effects on Native Avifauna: A Review. *Landscape and Urban Planning*, **74**, 46-69. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.007>
- [32] Branoff, B.L. (2017) Quantifying the Influence of Urban Land Use on Mangrove Biology and Ecology: A Meta-Analysis. *Global Ecology and Biogeography*, **26**, 1339-1356. <https://doi.org/10.1111/geb.12638>
- [33] 余日清, 陈桂珠, 章金鸿, 等. 排放生活污水对红树林底栖动物群落季节变化的影响[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 18-21.
- [34] 罗文佳, 熊安安, 李鑫渲, 等. 深圳侨城湿地底栖动物对生态修复响应的研究[J]. 生物技术世界, 2014(8): 10.
- [35] 刘莉娜, 陈里娥, 韦萍萍, 等. 深圳福田红树林自然保护区的生态问题及修复对策研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(2): 125-132.