

DOI: 10.5846/stxb201505060923

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): - - .

Song C Y, Hu H X, Huang H, Ren H X, Huang C. Assessing the health of rehabilitated reed wetland ecosystem in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - - .

黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统健康评价

宋创业¹, 胡慧霞², 黄欢², 任红旭^{2,*}, 黄 翀³

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

2. 中国科学院植物研究所北方资源植物重点实验室, 北京 100093

3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 101001

摘要: 研究目的是对黄河三角洲人工恢复芦苇湿地生态系统的健康状况进行评价。按照层次分析法的思想, 从环境、植物群落和植物生理生化特征等 3 个方面构建评价指标体系。在专家意见的基础上, 确定各个指标的权重, 计算生态系统健康指数。通过与自然芦苇湿地对比, 对人工恢复芦苇湿地的健康状况进行评价。结果显示: 人工恢复芦苇湿地的土壤有机质、全氮和全盐含量、群落盖度、密度和地上生物量等指标显著低于自然芦苇湿地, 地表水电导率、叶片的 APX、DHAR、MDHAR 等酶的活性显著高于自然芦苇湿地, 其生态系统健康指数低于自然芦苇湿地。这说明在短时间内, 人工恢复芦苇湿地和自然芦苇湿地还存在一定差距。恢复时间对生态系统健康评价有重要影响, 长时间尺度上监测数据的积累是全面、深入了解生态系统、评价生态系统健康状况所必需的。

关键词: 指标权重; 层次分析法; 生态系统健康指数

Assessing the health of rehabilitated reed wetland ecosystem in the Yellow River Delta

SONG Chuangye¹, HU Huixia², HUANG Huan², REN Hongxu^{2,*}, HUANG Chong³

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Key Laboratory of Plant Resources, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

3 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101001, China

Abstract: The Yellow River Delta is a typical estuary wetland in Eastern China. In recent years, extensive agricultural and petroleum exploitation caused severe damage to the natural wetland ecosystem in the Yellow River Delta. To restore the wetland ecosystem, large areas of rehabilitated reed wetland were constructed in this region. However, few studies have investigated the effect of ecological restoration and assessed the health status of rehabilitated reed wetland in the Yellow River Delta. The objective of this study was to establish an evaluation index system based on the analytic hierarchy process (AHP) and assess the health status of the rehabilitated reed wetland in the Yellow River Delta. According to the principles of the AHP, we built an evaluation index system based on the characteristics of habitat (pH and conductivity of surface water, soil salt content, soil organic matter content, and soil total nitrogen content), community structure (coverage, density, height, and aboveground biomass), and plant physiological and biochemical features (SOD, superoxide dismutase; APX, ascorbate peroxidase; CAT, catalase; GPX, guaiacol peroxidase; DHAR, dehydroascorbate reductase; MDHAR, monodehydroascorbate reductase). The original data of the evaluation indexes were normalized and converted into data matrix to calculate the weight of each evaluation index based on expert knowledge and the AHP principles. The weights

基金项目: 海洋公益项目(201305021, 201105020)和自然科学基金(41001363)资助

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-12-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hxren@ibcas.ac.cn

reflected the relative importance of the evaluation index. The weights and normalized evaluation index data were together used to calculate the ecosystem health index. The health status of rehabilitated wetland ecosystem was determined by a comparison between the rehabilitated and natural reed wetlands. From the result of the weight calculation, we found that aboveground biomass is the most important among the 15 evaluation indexes, followed by coverage, density, soil organic matter content, soil total nitrogen content, the activities of SOD, CAT, GPX, soil salt content, surface water conductivity, and pH value. Through the comparison between rehabilitated and natural reed wetlands, we found that the soil organic matter content, soil total nitrogen content, soil salt content, density, and aboveground biomass of the rehabilitated reed wetland were significantly lower than those of the natural reed wetland. However, the electrical conductivity of surface water and the activities of APX, DHAR, and MDHAR of the rehabilitated reed wetland were significantly higher than those of the natural reed wetland. Thus, the result of the synthetic evaluation showed that the ecosystem health index of the rehabilitated reed wetland is lower than that of the natural reed wetland. The results indicated that the health status of rehabilitated reed wetland could not reach that of a natural reed wetland within a short period. Because recovery time has important influences on ecosystem health, long-term monitoring data is necessary for improved understanding of ecosystem dynamics and assessment of ecosystem health.

Key Words: index weight; analytic hierarchy process; ecosystem health index

湿地是人类最重要的生存环境和自然界最富生物多样性的景观之一。随着人类对生态系统干扰强度不断增大,湿地生态系统正遭受着前所未有的冲击,数量和面积减少、生物多样性降低、水质恶化、富营养化等,已经威胁到人类自身的发展。湿地生态系统健康状况受到越来越多的关注。近年来,湿地生态系统健康评价已成为国内外的研究热点^[1-5]。

湿地生态系统健康评价的方法主要有指示物种法和指标体系法^[6]。指示物种法依据生态系统的关键种、特有种、指示种以及濒危种等的数量、生产力、结构和功能等指标来描述生态系统的健康状况^[6-7]。如 Scardi 等和 Yeom 等分别建立了以鱼类作为指示物种的湿地生态健康评价指标体系^[8-9]; Vassallo 等建立了以河口底栖生物群落为指示物种的海岸带湿地健康评价指标体系^[10]。Karr 和 Brousseau 等应用鱼类群的组成、分布、种多度以及关键种、敏感种、固有種和外来種的变化来评价水生生态系统^[11-12]。但是,仅依靠单一指标对生态系统健康进行评价有一定的片面性,指示物种的筛选标准不明确,而且指示物种的减少是否会对系统产生重要影响及其在生态系统中的作用均难以确定^[13]。因此,该方法难以全面、准确反映生态系统的健康状况^[14-16]。

指标体系法则根据生态系统的特征及其服务功能建立指标体系,对生态系统健康状况进行定量评价。如 Parker 建立考虑栖息地大小、植被覆盖率、生境多样性和植物组成的湿地健康评价指标体系,对栖息地的状态进行评价^[17]; Spencer 等建立了考虑土壤、边缘植物、水生植物和水质 4 个方面的指标体系,对澳大利亚东南部的 Wurray-Darling 盆地内永久性漫滩湿地健康状况进行评估^[18]; Xu 等建立了包括结构、功能和系统级的湖泊生态健康评价指标体系,对湖泊生态系统健康进行评价^[19]; Andree 和 Steve 等在加州旧金山海湾的湿地生态和适应性评价中考虑了野生动物、优势植被、生物栖息地状态、水文、周围土地利用等 5 个方面的因素^[20]; 赵彦伟等提出了包括含水量、水质、水生生物、物理结构与河岸带 5 大要素的指标体系及其 5 级评价标准,对宁波市河流湿地进行生态系统健康评价^[21]。

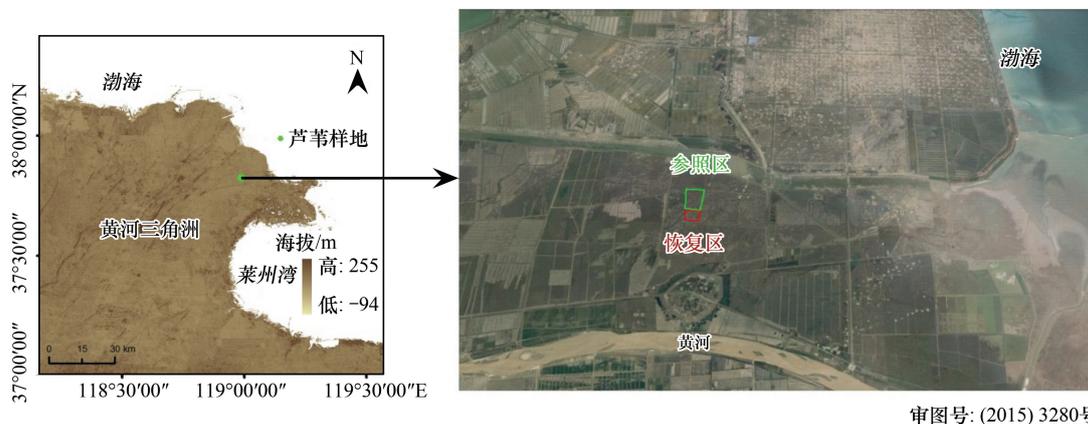
综上所述,湿地生态系统健康评价指标体系通常包括环境、生物群落和生态系统功能等方面的指标。环境指标通常包括土壤有机质、氮和磷含量,土壤含水量、水质等^[22-23]; 生物群落学指标包括群落盖度、物种多样性和建群种高度等^[4,23]; 生态系统功能指标包括植被生产力、固氮和水质净化等^[24-26]。另外,社会经济指标逐步被纳入生态系统健康评价研究中,如人口密度、污水处理达标率、化肥农药利用率等^[26]。然而,在众多的生态系统健康评价研究中,鲜有涉及到植物生理生化等表征植物本身状态的指标,如超氧化物歧化酶

(superoxide dismutase, SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)、愈创木酚过氧化物酶(guaiacol peroxidase, GPX)过氧化氢酶(catalase, CAT)、脱氢抗坏血酸还原酶(dehydroascorbate reductase, DHAR)、单脱氢抗坏血酸还原酶(monodehydroascorbate reductase, MDHAR)等。这些酶活力的高低与植物的衰老、对逆境的适应等密切相关,对植物健康有较好的指示作用^[27]。因此,在生态系统健康评价研究中,应引入植物生理生化指标,以构建更为合理的评价指标体系,实现对生态系统健康准确、全面的评价。

黄河三角洲位于山东省东北部,渤海湾南岸,莱州湾西侧,是我国暖温带最完整、最广阔的典型河口湿地生态系统。随着当地工、农业的发展,湿地生态系统受到严重的干扰和破坏,发生了大规模的退化。近年来,为了保护湿地生态系统,环保和海洋等部门在黄河三角洲进行了较大规模的湿地人工重建与恢复工作。然而,恢复与重建的效果如何、恢复的湿地生态系统是否处于健康状态却未有研究。因此,本研究以黄河三角洲人工恢复与重建的芦苇湿地为研究对象,综合考虑环境、生物群落学和植物生理生化指标,并通过与自然芦苇湿地(参照系统)对比,对其健康状态进行综合评估。

1 研究区概况

黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸,主体分布于山东省东营市和滨州市境内,即 $117^{\circ}31'—119^{\circ}18'E$ 和 $36^{\circ}55'—38^{\circ}16'N$ (图 1)。地势总体平缓,岗阶地、河成高地、低洼地、河滩地、平地以及滩涂地等为其主要地貌类型^[28]。黄河三角洲属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均日照时数为 2590—2830 h,年平均气温 $11.7^{\circ}C—12.8^{\circ}C$,无霜期 206 d, $\geq 10^{\circ}C$ 的积温约 $4300^{\circ}C$,年平均降水量 530—630 mm,70%集中在夏季,年均蒸发量 1900—2400 mm。黄河三角洲属暖温带落叶阔叶林区,区内无地带性植被类型,植被分布主要受土壤含盐量、潜水水位与矿化度、地貌类型以及人类活动的影响。怪柳(*Tamarix chinensis*)灌丛、芦苇(*Phragmites australis*)草甸、翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)群落是该区主要的自然植被类型。



审图号: (2015) 3280号

图 1 研究区地理位置及采样地分布

Fig.1 The location of study area and sampling plot

2 数据与方法

2.1 野外调查与采样

芦苇湿地恢复区与参照区:恢复区位于黄河北岸,距黄河约 3.5 千米,距海岸线约 10 千米(图 1)。恢复区之前为工程建设废弃地,土壤为潮土,地表残存稀疏的芦苇、怪柳等植物,生长季常有地表水覆盖。恢复区的芦苇湿地重建于 2011 年 4 月,恢复面积约 $1200 m^2$,采用人工移栽的方式在恢复区内种植芦苇。参照区位于恢复区的北侧,面积约 $3000 m^2$,为自然芦苇湿地,所受干扰较小。

野外调查与采样于 2013 年 8 月进行,对恢复区(人工恢复芦苇湿地, RG)和参照区(自然芦苇湿地, CK)分别进行调查与采样。随机设置芦苇群落样方 60 个($1m \times 1m$),恢复区和参照区各 30 个。调查芦苇群落的

盖度、高度以及株数等参数,并采集每个样方中芦苇的地上部分,带回实验室于 70 °C 烘至恒重,获取地上生物量。在每个样方中采用土钻法采集土壤样品(0—20cm),带回实验室进行各项理化指标测定。在每个样方周围采集地表水样品,水样采集使用 500ml 的塑料瓶,洗瓶内三次,然后采集水样,用于测定 pH 值和电导率。此外,分别在恢复区和参照区内采集芦苇新鲜叶片,置于液氮罐中保存,用于植物生理生化指标分析。

2.2 实验方法

水样测定指标:pH 值和电导率。

土壤测定理化指标:全氮、全盐和有机质含量。分析测试工作在中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室分析测试中心完成。全氮含量采用凯氏定氮法测定,有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,全盐含量采用残渣法测定。

植物生理生化指标测定:进行了超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、愈创木酚过氧化物酶(GPX)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)等酶活性的测定。SOD 活性的测定采用氮蓝四唑比色法^[29],APX 活性的测定参照 Nakano 和 Asada^[30]的方法,CAT 活性的测定参照 Knörzer 等^[31]的方法,GPX 活性的测定参照 Maehly 和 Chance^[32]的方法,MDHAR 活性的测定参照 Miyake 和 Asada^[33]的方法,DHAR 的测定参照 Dolton 等^[34]的方法。

2.3 评价模型的构建

2.3.1 参照系统的选择

对于湿地生态系统健康的评价,尚无一套成熟的指示生态系统健康的标准作为依据^[35],通常采用“被评价的生态系统”与“参照生态系统”进行对比,对生态系统的健康状况进行综合评价。理想的参照系统是位于长期稳定的地带性生境中、很少受干扰的自然生态系统。因此,本研究选择黄河三角洲国家级自然保护区内,位于人工恢复芦苇湿地附近的自然芦苇湿地作为参照系统,具体位置详见图 1。

2.3.2 评价指标体系

按照层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)的思想,将湿地生态系统健康评价分为 3 个层次(图 2)。第 1 层次是目标层,指湿地生态系统健康评价;第 2 层次是准则层,由环境特征、植物群落特征、植物生理生化特征等组成;第 3 层次是评价指标层,环境特征指标包括地表水的 pH 值和电导率,土壤有机质、全氮和全盐含量;植物群落指标包括密度、盖度、高度和地上生物量;植物生理生化指标包括 SOD、APX、CAT、GPX、DHAR、MDHAR 等 6 种酶的活性。

2.3.3 评价指标标准化

由于评价指标的量纲不同,相互之间没有可比性。因此,须对各个指标进行标准化处理。根据评价指标与生态系统健康之间的关系,评价指标被分为正向指标(值越大,生态系统健康程度越高)和负向指标(值越大,生态系统健康程度越低)两类。正向指标包括土壤有机质和全氮含量、群落密度、盖度、高度和地上生物量;负向指标包括地表水的 pH 值、电导率、土壤全盐含量以及 SOD、APX、CAT、GPX、DHAR、MDHAR 等酶的活性。

正向指标的标准化方法:

$$\chi_a = X_i / X_{max} \quad \chi_\alpha = X_i / X_{max}$$

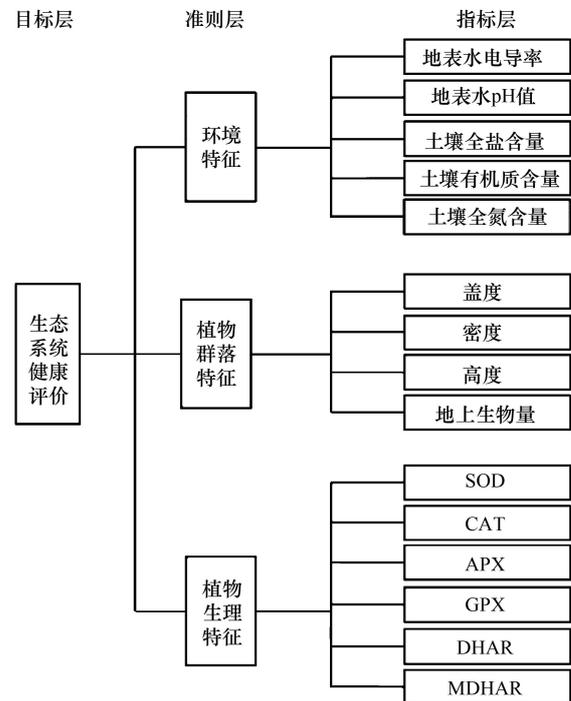


图 2 生态系统健康评价指标体系

Fig.2 Index system of ecosystem health assessment

式中, $X_{\alpha} X_a$ 为标准化以后的指标值, $X_i X_i$ 为所选指标值, X_{\max} 为同类指标中最大值。

负向指标的标准化方法:

$$X_{\alpha} = \frac{(X_{\max} - X_i)}{X_{\max}}$$

式中, $X_{\alpha} X_a$ 为标准化以后的指标值, $X_i X_i$ 为所选指标值, X_{\max} 为同类指标中最大值。

2.3.4 评价指标权重确定

本研究中评价指标的权重确定是建立在专家意见的基础上。咨询专家来自中科院植物所的植被与环境变化国家重点实验室、北方资源植物重点实验室等从事生态学、生理学、生物化学研究的科研人员,采用调查问卷的方式进行咨询,共发放调查问卷 20 份。基于调查问卷,获取各个层次指标的相对重要性数据,构建了准则层和指标层的权重判别矩阵,采用层次分析法(AHP)计算各个指标的权重。

层次分析法在评价指标权重计算中运用较广,其优点是既考虑了专家的意见,又有严密的统计学基础,计算结果可以较好地反映各个评价指标的重要性大小^[5,36]。判断矩阵一致性比例(CR)是层次分析法的关键,CR按照如下公式计算:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

式中, CI 为矩阵一致性指标, $CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}$, $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根, n 为矩阵阶数; RI 为矩阵随机一致性指标,可以查表获取不同阶数矩阵的随机一致性数值。当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵具有满意的一致性。具体计算过程可参见王薇^[37]、钟振宇等^[36]和马立广等^[38]发表的论文。

2.3.5 生态系统健康指数计算

生态系统健康指数采用以下公式计算:

$$EHI = \sum_{i=1}^n E_i W_i$$

式中, EHI 为生态系统健康指数, E_i 为第 i 个评价指标标准化后的值, W_i 为第 i 个评价指标的权重, n 为评价指标个数。

3 研究结果

3.1 自然芦苇湿地与人工恢复芦苇湿地对比

采用独立样本 T 检验的方法对人工恢复芦苇湿地与自然芦苇湿地的地表水的 pH 值、地表水电导率、土壤全盐、有机质和全氮含量、生物量、密度、高度、盖度、叶片的 SOD、APX、CAT、GPX、DHAR、MDHAR 等指标进行对比,结果如下:

在环境指标中,人工恢复芦苇湿地地表水的电导率显著高于自然芦苇湿地($P < 0.01$),但是 pH 值之间没有显著差异(图 3),土壤全盐、全氮和有机质的含量显著低于自然芦苇湿地($P < 0.01$)(图 4、5)。

在群落特征指标中,除了株高外,人工恢复芦苇群落的地上生物量、密度和盖度都显著低于自然芦苇群落($P < 0.01$)(图 6)。

在植物生理生化指标中,SOD、CAT、GPX 三种酶的活性在人工恢复芦苇和自然芦苇之间没有显著差异,人

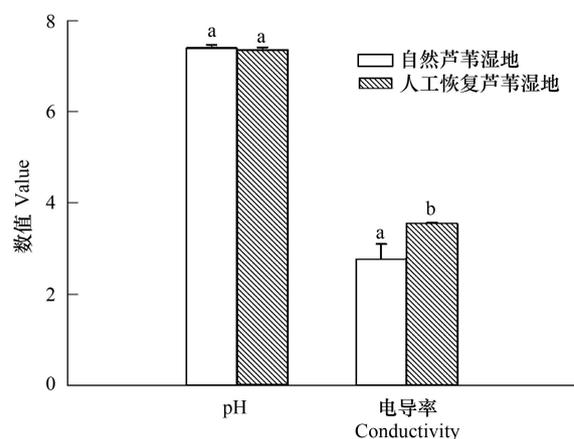


图 3 人工恢复芦苇湿地与自然芦苇湿地地表水 pH 值和电导率
Fig. 3 The pH value and conductivity of surface water of rehabilitated reed wetland and natural reed wetland
字母不同表示差异显著, $P < 0.01$

工恢复芦苇叶片的 APX、DHAR、MDHAR 三种酶的活性显著高于自然芦苇 ($P < 0.01$) (图 7)。

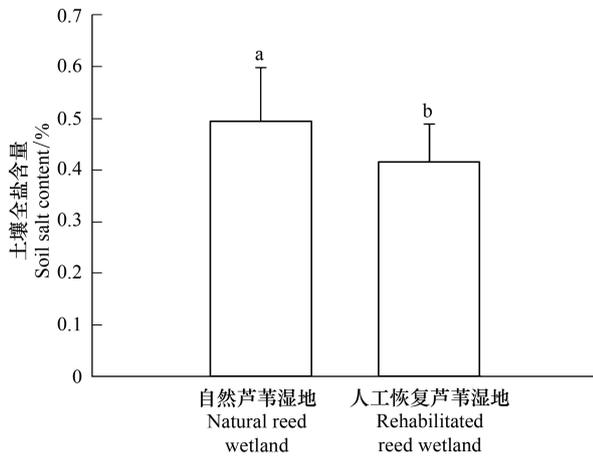


图 4 人工恢复芦苇湿地与自然芦苇湿地土壤全盐含量

Fig.4 Soil salt content of rehabilitated reed wetland and natural reed wetland

字母不同表示差异显著, $P < 0.01$

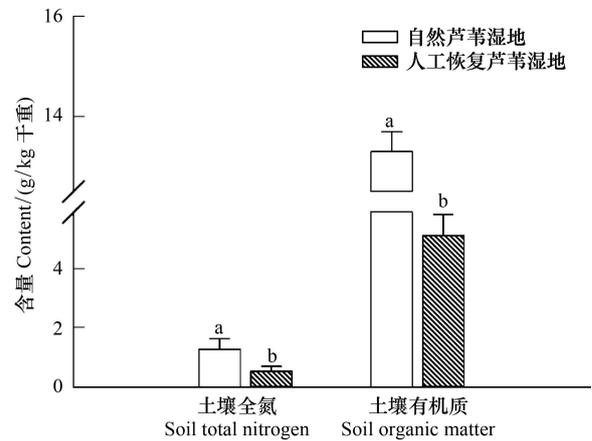


图 5 人工恢复芦苇湿地与自然芦苇湿地土壤全氮和有机质含量

Fig.5 Total soil nitrogen content and soil organic matter content of rehabilitated reed wetland and natural reed wetland

字母不同表示差异显著, $P < 0.01$

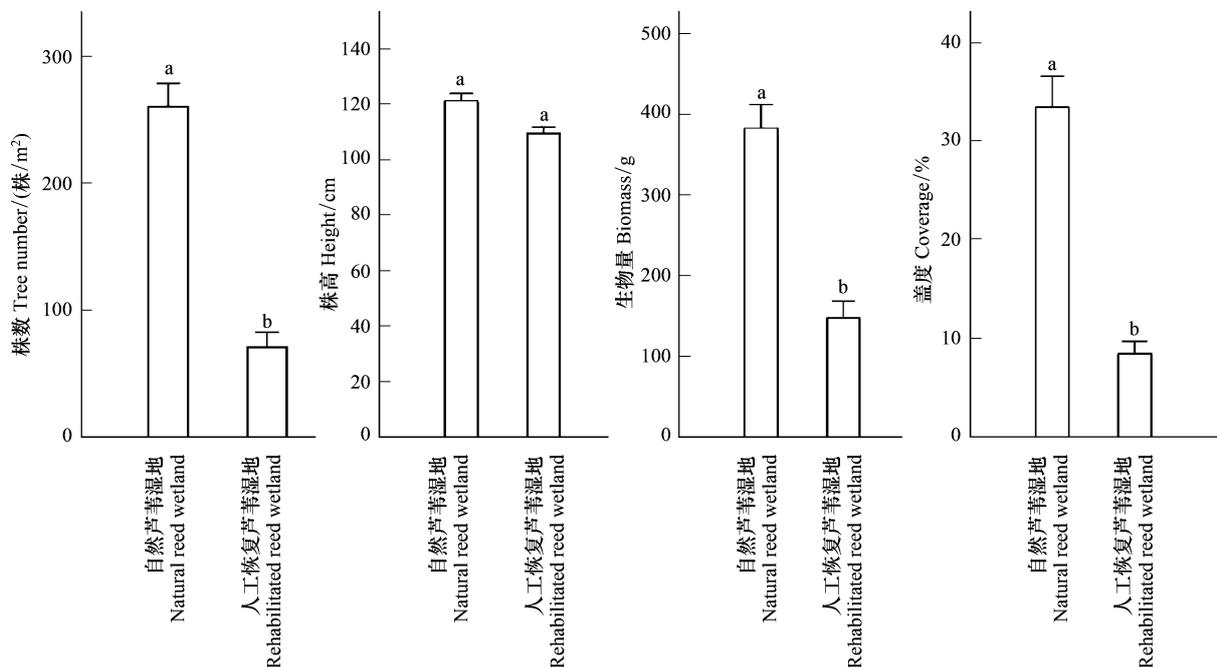


图 6 人工恢复芦苇群落与自然芦苇群落特征

Fig.6 Community characteristics of rehabilitated reed wetland and natural reed wetland

字母不同表示差异显著, $P < 0.01$

3.2 指标权重计算结果

在准则层和各评价指标的权重判别矩阵的基础上,计算准则层和各个评价指标的权重值,并通过一致性检验,进一步计算得到各评价因子归一化权重值(表 1)。在 15 个评价指标中,地上生物量的权重最大,盖度和密度次之,之后是土壤有机质、全氮含量、SOD、CAT、GPX,土壤全盐含量、地表水电导率、pH 等评价指标的权重相对较小。

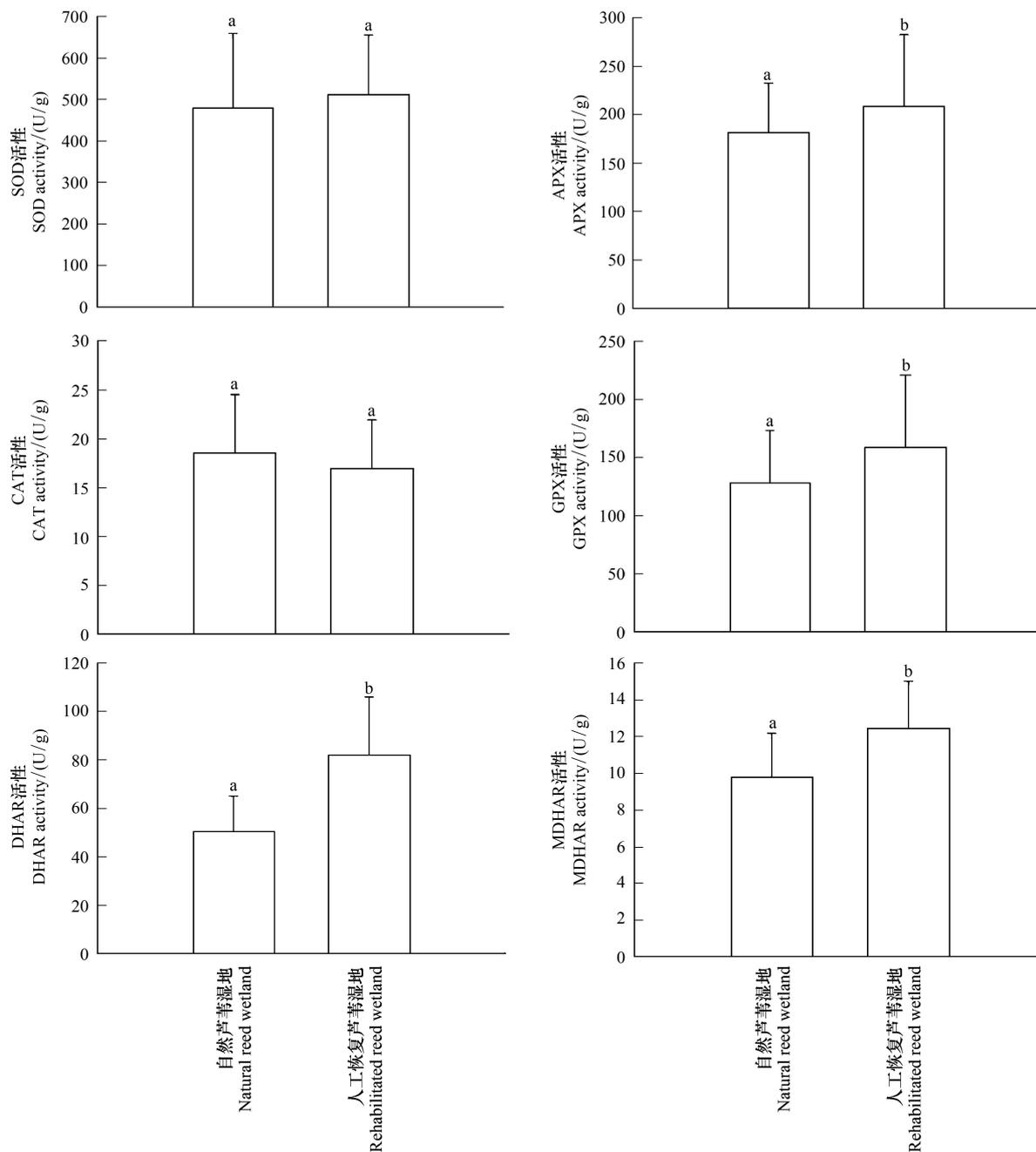


图7 人工恢复芦苇与自然芦苇叶片中 SOD、APX、CAT、GPX、DHAR、MDHAR 酶活性

Fig.7 The activities of SOD、APX、CAT、GPX、DHAR、MDHAR in the leaves of rehabilitated reed and natural reed

字母不同表示差异显著, $P < 0.01$

3.3 健康指数计算结果

基于表 1 中各个评价指标的归一化权重值,按照 2.3.5 中的生态系统健康指数公式计算,人工恢复芦苇湿地的健康指数为 0.28,自然芦苇湿地的健康指数为 0.47(图 8)。

4 讨论

湿地生态系统健康评价中存在两大基本问题:一是生态系统健康的标准,即什么样的生态系统是健康的,什么样的生态系统是不健康的,需要建立一套区别健康和病态生态系统的严格标准^[39];二是评价指标体系的问题,全面、准确地评价生态系统健康状况需要哪些指标^[4-5]。对于生态系统的健康标准,众多学者展开了研

究^[11-12,16,18]。然而,由于生态系统健康本身的复杂性,且不同生态系统内部的结构与过程差异较大,因此难以建立统一的生态系统健康标准^[40]。目前,很多研究均采用被评价生态系统与参照生态系统对比的方式进行生态系统健康程度的判断。本研究采用与参照系统对比的方法,对人工恢复芦苇湿地的健康状况进行评价。参照系统为处于保护区中的自然芦苇湿地,与人工恢复芦苇湿地相比,其群落盖度、密度和地上生物量较高,土壤有机质和全氮含量较高,地表水电导率较低,生境质量相对较高,环境对植物的胁迫程度低,所以植物叶片中 APX、DHAR、MDHAR 三种酶的活性较低。另外,在野外调查时发现,自然芦苇湿地中出现了香蒲 (*Typha orientalis*)、球穗莎草 (*Cyperus globosus*)、拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*) 等伴生植物,而在人工恢复芦苇湿地中,少有伴生物种出现。因此,自然芦苇湿地的生境、群落结构和功能、植物理化特征以及生物多样性等方面均要优于人工恢复芦苇群落,其健康指数亦高于人工恢复芦苇湿地。

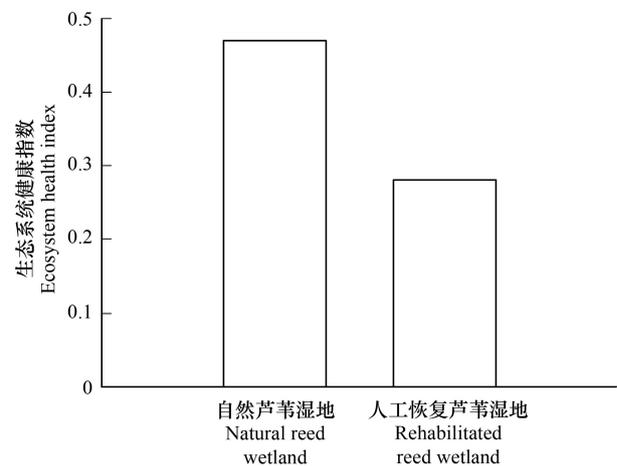


图8 人工恢复芦苇湿地与自然芦苇湿地生态系统健康指数

Fig.8 Ecosystem health index of rehabilitated reed wetland and natural reed wetland

表1 芦苇湿地生态系统健康评价指标归一化权重

Table 1 Normalized weights of indexes of reed wetland ecosystem health assessment

目标层 Object layer	准则层 Criterion layer	准则层权重 Weight of criterion layer	评价指标 Evaluation index	指标权重 Weight of evaluation index	归一化指标权重 Normalized weight of evaluation index
芦苇湿地生态系统健康评价 Health assessment of reed wetland ecosystem	环境特征	0.198	土壤有机质含量	0.305	0.060
			土壤全氮含量	0.305	0.060
			土壤全盐含量	0.163	0.032
			地表水电导率	0.121	0.024
			地表水 pH 值	0.106	0.021
	植物群落特征	0.491	高度	0.122	0.060
			密度	0.172	0.084
			盖度	0.282	0.138
			地上生物量	0.423	0.208
			植物生理 生化特征	0.312	SOD
	CAT	0.183			0.057
	GPX	0.183			0.057
	APX	0.125			0.039
	DHAR	0.125			0.039
				MDHAR	0.125

但是,需要注意的是生态系统健康评价的对象是一个复杂且结构又相对松散的系统,即便是在较小的地理单元中也存在处于不同演替阶段的生态系统,相互之间存在较大的差异。因此,参照系统的选择必须建立在对生态系统演替过程充分认识的基础之上。只有这样,评价结果才能较为客观地反映生态系统的健康状况。本研究所选择的参照系统位于自然保护区中,干扰较少,处于较为稳定的演替阶段,可以较好地反映健康芦苇湿地的特征。所以,对比结果可以较为客观地反映人工恢复芦苇湿地的健康状况。

在湿地生态系统健康评价研究中,根据研究目的,评价指标选择的侧重点有所不同。总体来说,评价指

标主要包括化学和生物群落指标,如地表水的 pH 值和电导率、铵态氮和硝态氮含量、土壤有机质、氮、磷和钾等元素含量,植物群落盖度、物种多样性指数、生物量,以及浮游植物和底栖动物数量等指标^[41-43]。另外,除了生态系统本身的结构和功能指标,社会经济指标和人类健康指标逐渐被纳入生态系统健康评价指标体系^[24]。然而,鲜有研究引入植物生理生化指标进行生态系统健康评价。本研究引入 SOD、GPX、APX 等六种酶的活性作为生理生化指标进行生态系统健康评价。研究表明,自然芦苇叶片中 APX、DHAR 和 MDHAR 等酶的活性显著低于人工恢复芦苇($P<0.01$)。出现这种差异的原因在于人工恢复芦苇湿地建成时间较短,受外界干扰较大,生境质量低于自然芦苇湿地。因此,在人工恢复芦苇叶片中产生了较多活性氧、自由基等,这进一步刺激了植物体内 APX、DHAR 和 MDHAR 等酶活性的升高,导致人工恢复芦苇叶片中酶的活性高于自然芦苇。所以,植物体中酶的活性可以较好地反映生态系统的健康状况。

另外,生态系统是一个不断演化的动态系统,只有对生态系统进行长期的观测与研究,才能全面、深入了解生态系统。研究表明,破坏的生态系统在经过较长时间修复以后,其生态系统的结构、功能同样可以达到或者接近自然生态系统的水平。如王慧亮等对洪湖开展了基于生态健康的恢复效果评价,评价结果表明,经过 5 年的恢复,洪湖湿地的植被覆盖度、物种多样性以及物质生产功能都得到了明显的改善^[44]。因此,长期监测数据的积累是生态系统健康评价的关键,长时间序列数据的缺乏会制约生态系统健康评价研究^[7,37,40]。在本研究中,人工恢复芦苇湿地建立于 2011 年,恢复时间较短,处于生态系统演化的初级阶段,因此,需要对人工恢复芦苇湿地进行长期的监测与评估,这样才能全面、准确评价人工恢复的效果。

5 结论

本研究以黄河三角洲人工恢复芦苇湿地为研究对象,基于层次分析法思想,构建了生态系统健康评价指标体系,计算了各个评价指标的权重,对人工恢复芦苇湿地的健康状况进行了评价。评价结果显示人工恢复芦苇湿地的健康指数低于自然芦苇湿地。这说明在短时间内,人工恢复芦苇湿地的健康状况与自然芦苇湿地还存在一定的差距。恢复时间对生态系统健康状况有重要影响,长时间尺度上监测数据的积累是全面、深入了解生态系统、评价生态系统健康状况所必需的。

参考文献 (References):

- [1] 何厚军,刘学工,韩琳,陈亮. 基于遥感图像的湿地生态系统健康评价. 测绘工程, 2011, 20(5): 45-48.
- [2] 张哲,潘英姿,陈晨,王维,刘军会,刘孝富,赵兴征. 基于 GIS 的洞庭湖区生态系统健康评价. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 36-43.
- [3] 黄艺,舒中亚. 基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价—以滇池流域为例. 环境科学, 2013, 34(8): 3010-3018.
- [4] Frashure K M, Bowen R E, Chen R F. An integrative management protocol for connecting human priorities with ecosystem health in the Neponset river estuary. *Ocean & Coastal Management*, 2012, 69: 255-264.
- [5] Van Niekerk L, Adams J B, Bate G C, Forbes A T, Forbes N T, Huizinga P, Lamberth S J, MacKay C F, Petersen C, Taljaard S, Weerts S P, Whitfield A K, Wooldridge T H. Country-wide assessment of estuary health; an approach for integrating pressures and ecosystem response in a data limited environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 130: 239-251.
- [6] 杨斌,隋鹏,陈源泉,高旺盛. 生态系统健康评价研究进展. 中国农学通报, 2010, 26(21): 291-296.
- [7] Cardoso I, Fonseca L C D, Cabral H N. Ecological quality assessment of small estuaries from the Portuguese coast based on benthic macroinvertebrate assemblages indices. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(6): 1136-1142.
- [8] Scardi M, Cataudella S, Dato P D, Fresi E, Tancioni L. An expert system based on fish assemblages for evaluating the ecological quality of streams and rivers. *Ecological Informatics*, 2008, 3(1): 55-63.
- [9] Yeom D H, Adams S M. Assessing effects of stress across levels of biological organization using an aquatic ecosystem health index. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 67(2): 286-295.
- [10] Vassallo P, Fabiano M, Vezzulli L, Sandulli R, Marques J C, Jørgensen S E. Assessing the health of coastal marine ecosystems: a holistic approach based on sediment micro and meio-benthic measures. *Ecological Indicators*, 2006, 6(3): 525-542.
- [11] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(9): 1521-1531.
- [12] Brousseau C M, Randall R G, Hoyle J A, Minns C K. Fish community indices of ecosystem health: how does the Bay of Quinte compare to other

- coastal sites in Lake Ontario? *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2011, 14(1): 75-84.
- [13] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与进展. *生态学报*, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [14] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [15] 戴全厚, 刘国彬, 田均良, 薛箴, 翟胜, 王国梁. 侵蚀环境小流域生态经济系统健康定量评价. *生态学报*, 2006, 26(7): 2219-2228.
- [16] Chiu G S, Wu M A, Lu L. Model-based assessment of estuary ecosystem health using the latent health factor index, with application to the Richibucto estuary. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65697.
- [17] Paker K, Head L, Chisholm L A, Feneley N. A conceptual model of ecological connectivity in the shellharbour local government area, New South Wales, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 86(1): 47-59.
- [18] Spencer C, Robertson A I, Curtis A. Development and testing of a rapid appraisal wetland condition index in south-eastern Australia. *Journal of Environmental Management*, 1998, 54(2): 143-159.
- [19] Xu F L, Tao S, Dawson R W, Li P G, Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Water Research*, 2001, 35(13): 3157-3167.
- [20] Breaux A, Cochrane S, Evens J, Martindale M, Pavlik B, Suer L, Benner D. Wetland ecological and compliance assessments in the San Francisco Bay Region, California, USA. *Journal of Environmental Management*, 2005, 74(3): 217-237.
- [21] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探. *水科学进展*, 2005, 16(3): 349-355.
- [22] Ferreira J G. Development of an estuarine quality index based on key physical and biogeochemical features. *Ocean & Coastal Management*, 2000, 43(1): 99-122.
- [23] 肖云丽, 温仲明, 李锐, 魏振荣. 黄土高原丘陵沟壑区草地植物群落健康动态评价. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1087-1092.
- [24] Pantus F J, Dennison W C. Quantifying and evaluating ecosystem health: a case study from Moreton Bay, Australia. *Environmental Management*, 2005, 36(5): 757-771.
- [25] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价. *资源科学*, 2009, 31(9): 1535-1544.
- [26] 刘存东, 何太蓉, 苏维词. 基于模糊 AHP 的长寿湖生态系统健康评价. *水生态学杂志*, 2009, 2(6): 57-61.
- [27] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [28] 许学工. 黄河三角洲土地结构分析. *地理学报*, 1997, 52(1): 18-26.
- [29] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术. 北京: 高等教育出版社. 2000.
- [30] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [31] Knörzer O C, Lederer B, Durner J, Böger P. Antioxidative defense activation in soybean cells. *Physiologia Plantarum*, 1999, 107(3): 294-302.
- [32] Maehly A C, Chance B. The assay of catalases and peroxidases. *Methods of Biochemical Analysis*, 1954, 1: 357-424.
- [33] Miyake C, Asada K. Thylakoid-bound ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts and photoreduction of its primary oxidation product monodehydroascorbate radicals in thylakoids. *Plant and Cell Physiology*, 1992, 33(5): 541-553.
- [34] Dalton D A, Russell S A, Hanus F J, Pascoe G A, Evans H J. Enzymatic reactions of ascorbate and glutathione that prevent peroxide damage in soybean root nodules. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1986, 83(11): 3811-3815.
- [35] 曾勇, 沈根祥, 黄沈发, 王敏. 上海城市生态系统健康评价. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 208-212.
- [36] 钟振宇, 柴立元, 刘益贵, 陈灿. 基于层次分析法的洞庭湖生态安全评估. *中国环境科学*, 2010, 30(S): 41-45.
- [37] 王薇, 陈为峰, 李其光, 王昕, 马海燕. 黄河三角洲湿地生态系统健康评价指标体系. *水资源保护*, 2012, 28(1): 13-16.
- [38] 马立广, 曹彦荣, 李新通. 基于层次分析法的拉市海高原湿地生态系统健康评估. *地球信息科学学报*, 2011, 13(2): 234-239.
- [39] Rapport D J, Gaudet C I, Calow P. Evaluating and monitoring the health of large-scale ecosystem // *Global Environment Change: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*. Springer, 1993, 28: 5-39.
- [40] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, Zhan W, Chen Y D, Tao S. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecological Modelling*, 2004, 173(4): 355-370.
- [41] Bandeira S O, Macamo C C F, Kairo J G, Amade F, Jiddawi N, Paula J. Evaluation of mangrove structure and condition in two trans-boundary areas in the Western Indian Ocean. *Marine and Freshwater Ecosystem*, 2009, 19(S1): 46-55.
- [42] Borja A, Tunberg B G. Assessing benthic health in stressed subtropical estuaries, eastern Florida, USA using AMBI and M-AMBI. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 295-303.
- [43] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 郝君宜, 张颖, 赵珊珊, 胡维平, 陶澍. 湖泊生态系统健康定量评价方法. *生态学报*, 2005, 25(6): 1466-1474.
- [44] 王慧亮, 王学雷, 莫明浩, 王晓艳. 基于生态健康的洪湖湿地恢复评价. *武汉大学学报: 理学版*, 2010, 56(5): 557-563.