

高家骥, 李雪铭, 张峰, 等. 南四湖湖泊湿地生态环境预警研究[J]. 地理科学, 2016, 36(8): 1219-1226. [Gao Jiaji, Li Xueming, Zhang Feng et al. Early Warning of Wetland Eco-environmental in Nansihu Lake. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(8): 1219-1226.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.08.013

## 南四湖湖泊湿地生态环境预警研究

高家骥<sup>1,2,3</sup>, 李雪铭<sup>2,3</sup>, 张峰<sup>4</sup>, 杨俊<sup>2,3,5</sup>, 席建超<sup>5</sup>

(1. 大连海洋大学应用技术学院, 辽宁 大连 116300; 2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029;  
3. 辽宁师范大学人居环境研究中心, 辽宁 大连 116029; 4. 东北师范大学环境学院, 吉林 长春 130024;  
5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 基于南四湖近30 a来多源遥感影像、土地利用、环境监测和实地调查数据, 选择1982年、1992年、2002年和2012年4个时间断面, 从湿地组织结构、整体功能和社会经济3个方面选取指标, 从无警、轻警、中警、重警和巨警5个级别划分警度, 采用多级模糊综合评价法进行警度评价, 并运用BP神经网络模型对未来10 a警度发展进行预测, 研究结果表明: ① 南四湖湿地生态环境现在处于重警状态, 农业化肥、农药污染和工业污染物排放是主要的警报来源; ② 近30 a来南四湖湿地整体生态环境处于不断恶化趋势, 社会经济指标恶化趋势明显, 未来10 a各项指标和整体预警度均呈下降趋势, 整体水平达到中警状态, 社会经济投入的增加是重要影响因子; ③ 近10 a环境恶化速度比前20 a有所减缓, 社会经济指标恶化速度较快, 人类活动的负向干扰仍大于正向干扰。

**关键词:** 预警; 湖泊湿地; 生态环境; 模糊综合评价; 南四湖

**中图分类号:** X43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2016)08-1219-08

湖泊湿地生态系统是一个自然-社会-经济复合系统, 其丰富的自然资源和强大的生态服务功能是人类社会发展的资源宝库。生态环境预警的目的在于及时发现生态系统恶化的区域以及恶化的趋势和速度, 实现区域的可持续发展。

在生态环境灾害频发的背景下, 国内外对生态环境预警的研究日益增多。国外对生态环境预警的研究开始于20世纪70年代中期, 大量的环境预警系统已经建立并且投入应用, 全球环境监测系统(GEMS)<sup>[1]</sup>、美国的洪水泛滥预警系统和AG-NET系统、英国的苏格兰资源利用研究所提出的ECCO模型以及罗马俱乐部对全球发展的预测研究等<sup>[2, 3]</sup>。中国学者对生态环境预警方面开展的研究时间较短, 但发展十分迅速。傅伯杰院士对生态环境预警的原理和方法进行了探讨, 并通过建立指标体系对中国各省区的生态环境状况进行排

序和预警研究<sup>[4]</sup>。陈国阶对生态环境预警评价的基本概念、原则与标准、预警类型以及数学表达式进行了阐述, 并将三峡库区的环境影响预警研究<sup>[5]</sup>。在理论逐渐建立的基础上, 随之开展了大量的实证研究和深入的理论研究。在研究内容上主要集中在生态环境<sup>[6-9]</sup>、生态安全<sup>[10-14]</sup>和生态承载力<sup>[15-17]</sup>预警方面; 在研究方法上, 从传统的层次分析法、主成分分析法、模糊综合评价法<sup>[18]</sup>逐步向变权-物元模型分析法<sup>[19]</sup>、模糊物元法<sup>[20]</sup>、BP神经网络法、遗传算法、元胞自动机等人工智能算法<sup>[13, 14, 21]</sup>发展, 结合GIS技术在预警系统中的应用<sup>[22, 23]</sup>, 进一步满足了预警分析动态性和预测性的要求; 在研究对象上, 既有对单一生态环境的研究<sup>[24]</sup>, 也有针对区域复合生态环境进行的综合预警研究<sup>[11, 25]</sup>。然而, 纵观现有的研究成果, 对中国内陆典型湖泊湿地进行的生态环境预警研究较为缺乏, 而湿地被誉为

**收稿日期:** 2015-07-13; **修订日期:** 2015-10-16

**基金项目:** 国家科技部支撑计划(2012BAC04B00)、国家自然科学基金项目(41671158)、教育部博士点基金项目(20132136110001)和辽宁省优秀人才支持计划(LR2013050)共同资助。[Foundation: Key Technology Research and Development Program (2012BAC04B00), National Natural Science Foundation of China (41671158), The Ministry of Education Doctoral Fund Project (20132136110001) and Excellent Talents in Liaoning Province (LR2013050).]

**作者简介:** 高家骥(1981-), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士研究生, 讲师, 主要从事城市人居环境研究与城市公共艺术研究。E-mail: 18624287676@163.com

**通讯作者:** 李雪铭, 教授。E-mail: lixueming999@163.com

“地球之肾”,湖泊湿地在调节局地小气候、涵养水源、提供生物栖息地等方面发挥着重要作用,其生态环境健康状况也直接给区域自然-经济-社会系统的可持续发展带来影响,因此,对湖泊湿地进行生态环境预警研究,对可能发生的环境风险进行提前防范,对区域的健康、可持续发展具有重大现实意义。

南四湖湿地是中国华北地区最大的湖泊湿地,自然资源丰富。由于是陆生和水生生态系统的过渡地带<sup>[26]</sup>,近年来,受到人类活动的影响,周边的造纸、开矿、围湖养殖等不合理的资源开发对湿地生态系统造成很大破坏<sup>[27,28]</sup>,导致湖泊湿地生态服务功能降低、生物多样性减少<sup>[29]</sup>。南四湖作为南水北调东线工程中重要的调蓄湖泊,如何平衡开发与保护的关系,显得尤为重要。针对南四湖生态环境预警的研究仍未见报道,因此,本文基于模糊综合评价模型和BP神经网络对南四湖湿地生态系统进行预警研究,提出预警对策,对其实现可持续发展具有重大现实意义。

## 1 研究区域和研究方法

### 1.1 研究区域

南四湖(116°34'E~117°21'E, 34°27'N~35°20'N)位于山东省西南部的济宁市境内,呈北西—南东方向延伸,自北向南由南阳、独山、昭阳和微山4个湖泊连接而成,故称南四湖(图1)。湖区河网密布,最大湖水面积1 266 km<sup>2</sup>,集水总面积30 453 km<sup>2</sup>,湖泊平均水深1.46 m。南四湖湿地属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,湖内年平均气温14.2℃,沿湖陆地13.7℃,年降水量在750 mm左右<sup>[28]</sup>。南四湖湿地地区由于其适宜的气候条件和地形条件,陆生植被和水生生物群落多样,是山东省重要的生物宝库和鸟类栖息地,同时是南水北调东线工程的重要调蓄枢纽之一。近年来,随着人类活动负向扰动的加剧,南四湖水质逐年恶化,生物群落负向演替速度加快,富营养化、沼泽化问题严重,水旱灾害频发<sup>[29]</sup>,湿地生态系统健康面临巨大威胁。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据来源和预处理

遥感数据使用了资源一号02C分辨率2.36 m卫星数据、Landsat 7 ETM+、Landsat 5 TM和Landsat 2 MSS卫星数据,分别是2012年、2002年、1992

年和1982年的影像。土地利用数据包括济宁市2002年1:100 000和2012年1:10 000土地利用数据。环境数据来自济宁市水文局和环保局对南四湖湿地的监测资料以及课题组对南四湖的实地调查,其他的统计数据来自对应年份的《济宁市统计年鉴》<sup>[30]</sup>和《山东省统计年鉴》<sup>[31]</sup>。

在ENVI软件平台中,结合2012年、2002年土地利用数据对卫星遥感图像进行人机交互式解译,并根据外业调查结果对关键解译点进行校对,最终得出各年份南四湖湿地类型图(图2),作为预警评价中景观类指标计算的基础。

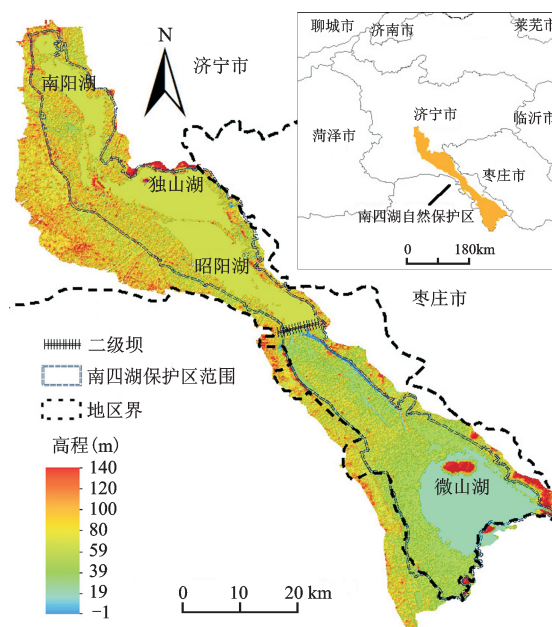


图1 研究区位置

Fig.1 The location of study area

#### 1.2.2 模糊综合评价模型

生态环境系统是一个复杂的巨系统,生态环境预警界限具备模糊性,系统内部产生的变化很难用精确的尺度来描述。故引入模糊综合评价的方法,它是在传统的评价模型的基础上,结合模糊数学原理和隶属函数的方法,实现定量和定性综合评价的过程。根据指标层次的不同,又分为单级模糊综合评价和多级模糊综合评价。基本步骤参见文献[28],不再赘述。

#### 1.2.3 BP神经网络

神经网络是一种以模拟神经系统而建立的非线性动力学模型,BP神经网络即误差反向传播神

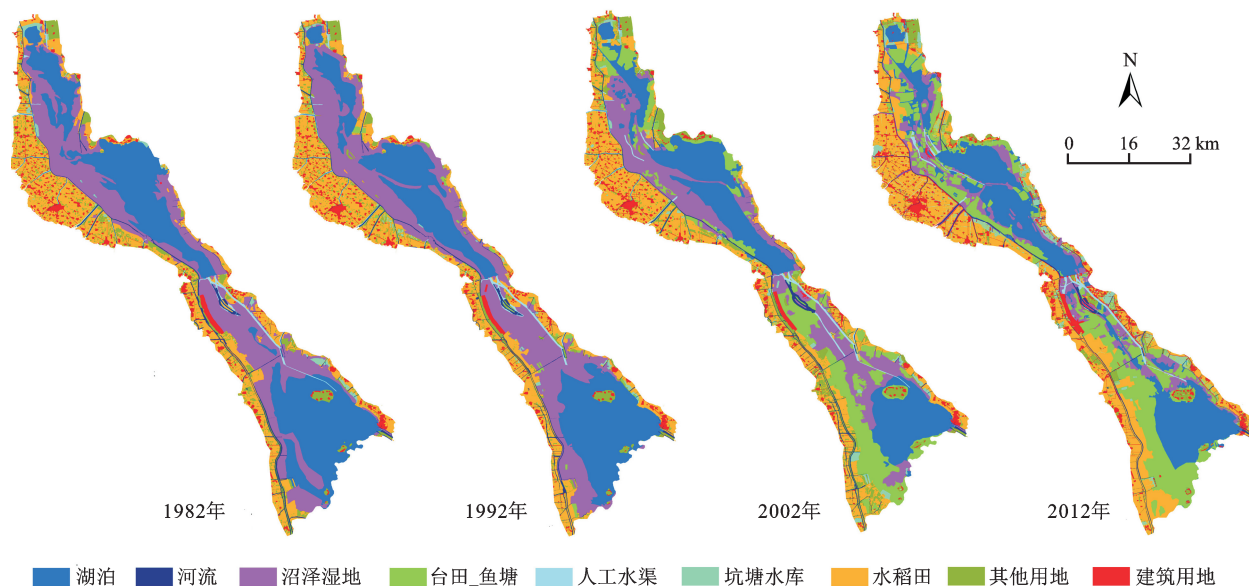


图2 1982~2012年南四湖湖泊湿地景观分类

Fig.2 Landscape classification map of Nansihu wetland in 1982-2012

经网络,具有高度自组织性、自学习性和自适应性的特点,在处理非线性问题中有着独特的优势,在预测问题研究中经实践证明比统计方法效果更为理想<sup>[32]</sup>,得到了广泛的应用<sup>[15]</sup>。BP神经网络模型包括输入层、隐藏层和输出层3个层次,每个层中由神经元作为基本数据处理单元,神经元之间有连线,表现形式为层次之间神经元的权重。通过样本输入的学习过程建立可靠的联系权重,然后即可作为预测的模型。

## 2 预警评价结果及分析

### 2.1 预警指标体系

预警指标体系建立的成功与否,是预警结果能否正确反映实际警情的关键所在。根据傅伯杰<sup>[3]</sup>、陈国阶<sup>[5]</sup>等人的研究结论,在选取预警指标因子的时候,应注重综合性、代表性、易得性、应用性和动态性的原则重点突出应用性和动态性。根据以上理论和指导原则,总结课题组对南四湖湿地生态系统健康和脆弱性评价的成果,对指标进行进一步筛选和整理,得到南四湖湿地生态环境预警指标体系。

### 2.2 警度和警限划分

警度和警限的划分是预警分析中的重要组成部分,警度是指警报的程度,通常用不同颜色的警灯来表示,这里分为5个级别,分别为无警、轻警、中警、重警和巨警,分别用绿灯、蓝灯、浅蓝灯、黄

灯和红灯来表示,警界限是不同报警程度的界限划分。通过对南四湖当地湿地生态系统的地理环境条件和历史水平的考察,结合相关研究,具体的界限标准划分如表1。

### 2.3 预警评价结果

根据上述1982年南四湖湖泊湿地生态环境模糊评价指标的隶属度矩阵,首先进行一级综合评价,对各准则层的指标权重集 $A$ 和对应的隶属度评价矩阵 $R$ 进行模糊合成运算,即 $B=A \cdot R$ ,选用的是加权求和的方法:

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \quad (1)$$

式中, $b_j$ 是评判结果 $B$ 中的元素, $a_i$ 是第 $i$ 个指标的权重值, $r_{ij}$ 表示第 $i$ 个指标在各准则层的隶属度。运算结果如下:

$$B_1 = A_1 \times R_1 = (0.418, 0.175, 0.139, 0.057, 0.211)$$

$$B_2 = A_2 \times R_2 = (0.143, 0.219, 0.413, 0.225, 0.000)$$

$$B_3 = A_3 \times R_3 = (0.450, 0.148, 0.242, 0.073, 0.087)$$

$$B = A \times R = A \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = (0.337, 0.180, 0.266, 0.118, 0.098)$$

(2)

$$W = B \times V^T = 0.708$$

综合评价结果表明,1982年南四湖湖泊湿地在0.337的程度上属于无警状态,在0.180的程度



表1 南四湖生态环境预警指标量化标准、警度和警灯

Table 1 The alert limits standard, alert degrees and alert lights of Nansihu Lake

指标	定级标准				
警度	无警	轻警	中警	重警	巨警
警灯	绿灯	浅蓝灯	蓝灯	黄灯	红灯
斑块丰富度	[8, 10]	[6, 8]	[4, 6]	[2, 4]	[0, 2]
平均斑块面积	[600, 800]	[500, 600]	[350, 500]	[200, 350]	[0, 200]
归一化植被指数	[4, 8]	[3, 4]	[2, 3]	[1, 2]	[0, 1]
动物种类数	[1000, 1250]	[750, 1000]	[500, 750]	[250, 500]	[0, 250]
植物种类数	[750, 1000]	[500, 750]	[250, 500]	[100, 250]	[0,100]
弹性度指数	[0.8, 1.0]	[0.6, 0.8]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.4]	[0, 0.2]
湿地自然灾害致灾面积	[0, 10]	[10, 30]	[30, 50]	[50, 70]	[70, 100]
景观多样性指数	[0.8, 1]	[0.6, 0.8]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.4]	[0, 0.2]
富营养化指数	[0, 30]	[30, 50]	[50, 60]	[60, 70]	[70, 100]
人类干扰指数	[0, 0.2]	[0.2, 0.4]	[0.4, 0.6]	[0.6, 0.8]	[0.8, 1.0]
GDP年增长率	[10, 12.5]	[8.5, 10]	[7, 8.5]	[5, 7]	[3, 7]
污水处理能力	[90, 100]	[80, 90]	[50, 80]	[20, 50]	[0, 20]
化肥施用强度	[0, 200]	[200, 300]	[300, 400]	[400,600]	[600, 800]
农药使用强度	[0, 4]	[4, 8]	[8, 12]	[12, 16]	[16, 20]
万元GDP COD 排放强度	[0, 1.5]	[1.5, 2.25]	[2.25, 3.0]	[3.0, 5.0]	[5.0, 7.0]

上属于轻警状态,在0.266的程度上属于中警状态,0.118的程度属于重警状态,0.098的程度属于巨警状态。根据最大隶属度的原则,可以判断其处于无警状态。

根据同样方法,计算出各个年份的各个准则层以及综合评价结果、预警度以及所处的警度状态(表2~5)。

表2 1982年南四湖湖泊湿地预警评价结果

Table 2 The results of ecological early warning in Nansihu Lake wetland in 1982

指标层	警度评语					评价结果
	无警	轻警	中警	重警	巨警	
组织结构	0.418	0.175	0.139	0.057	0.211	无警
整体功能	0.143	0.219	0.413	0.225	0.000	中警
社会经济	0.450	0.148	0.242	0.073	0.087	无警
综合	0.337	0.180	0.266	0.118	0.098	无警

2.4 BP神经网络预测

用BP神经网络进行预测,首先是建立训练模型,将1982年、1992年和2002年的数据作为检测数据输入,将1992年、2002年和2012年的数据作为输出的结果,进行学习训练,直到由模型输出的2012年各指标数据和实际数据的拟合误差和总体拟合误差达到精度要求时,停止训练,此时的神经

表3 1992年南四湖湖泊湿地预警评价结果

Table 3 The results of ecological early warning in Nansihu Lake wetland in 1992

指标层	警度评语					评价结果
	无警	轻警	中警	重警	巨警	
组织结构	0.170	0.498	0.107	0.151	0.074	轻警
整体功能	0.171	0.116	0.154	0.538	0.021	重警
社会经济	0.333	0.107	0.224	0.079	0.170	无警
综合	0.226	0.237	0.163	0.255	0.089	重警

表4 2002年南四湖湖泊湿地预警评价结果

Table 4 The results of ecological early warning in Nansihu Lake wetland in 2002

指标层	警度评语					评价结果
	无警	轻警	中警	重警	巨警	
组织结构	0.154	0.041	0.074	0.477	0.254	重警
整体功能	0.059	0.081	0.183	0.251	0.426	巨警
社会经济	0.061	0.160	0.307	0.174	0.297	中警
综合	0.091	0.095	0.190	0.298	0.326	巨警

网络模型就可用来预测。在本研究建立的BP神经网络中,包括一个输入层,一个隐藏层和一个输出层,其中输入层包括15个节点,代表着15个指标;隐藏层中的节点数根据经验公式得出,以及考虑本研究的实际情况,设置为5;输出层的节点数

表5 2012年南四湖湖泊湿地预警评价结果

指标层	警度评语					评价结果
	无警	轻警	中警	重警	巨警	
组织结构	0.174	0.052	0.356	0.323	0.095	中警
整体功能	0.079	0.055	0.309	0.551	0.006	重警
社会经济	0.043	0.105	0.035	0.390	0.427	巨警
综合	0.098	0.071	0.231	0.422	0.179	重警

也是15,代表指标的数量。预测时将1992年,2002年和2012年的实测数据作为输入数据,输出的是2002年,2012年和2022年的指标数据。

将预测得到的数据按照模糊综合评价的方法进行评价,得到的结果如表6所示。

表6 2022年南四湖湖泊湿地预警预测结果

指标层	警度评语					评价结果
	无警	轻警	中警	重警	巨警	
组织结构	0.176	0.179	0.397	0.184	0.063	中警
整体功能	0.034	0.062	0.368	0.291	0.245	中警
社会经济	0.133	0.015	0.161	0.389	0.302	重警
综合	0.114	0.084	0.307	0.290	0.205	中警

2.5 结果分析

2.5.1 现状不良程度预警

以2012年作为南四湖湖泊湿地生态环境的现状年份,根据最大隶属度原则判断其整体状况处于重警状态,具体分析3个准则层,社会经济类指标现状不容乐观,最大隶属度为0.427,处于巨警状态;整体功能类指标处于重警状态,最大隶属度为0.551;组织结构类指标稍好,有0.356的隶属度处于中警状态。从具体的指标层隶属度矩阵分析来看,驱动南四湖湿地生态环境恶化的因子主要是农业生产中使用过量的化肥、农药,以及工业生产中排放的废水对湖泊的面源污染。通过相关文献对南四湖湿地近年来自然水域变化和生态脆弱性的研究结果来分析,自1982年以来,南四湖自然水域年均减少量为17.63 km<sup>2</sup>,且其减少的水域主要转换为了耕地和其他农用地,湿地自然水域的减少势必对湿地的功能产生影响,而耕地和农用地的增加也说明了人为干扰对系统的负向影响增

加,这也造成了南四湖湿地大部分地区处于脆弱地区<sup>[31]</sup>。除此之外,人类活动的干扰造成的植被的减少也大大超过了南四湖湿地生态环境的承载能力,必须引起重视。

2.5.2 恶化趋势预警

计算出4个年份中各个准则层的预警度,可以得到近30 a来南四湖湿地生态环境预警度的变化趋势图(图3)。通过对图3的分析可以看出,南四湖湿地在这个时期的预警度呈现波动变化趋势,但总体趋势是上升的,即由20世纪80年代的中警状态到90年代的重警,再到21世纪初短期达到了巨警状态,然后回到重警状态。从整体上来看,南四湖生态环境处于严重恶化进程之中。特别是2002年由于严重的旱灾导致湖泊干涸,从而造成预警度的急剧上升,另一方面也反映出了南四湖湿地生态环境变得非常脆弱,从而降低了抵御风险的能力,导致湿地的退化,通过对未来10 a的预测,从图中可看出这种恶化趋势逐步得到了控制,趋于缓和,已经达到了中警状态,仍需继续加以足够的重视。

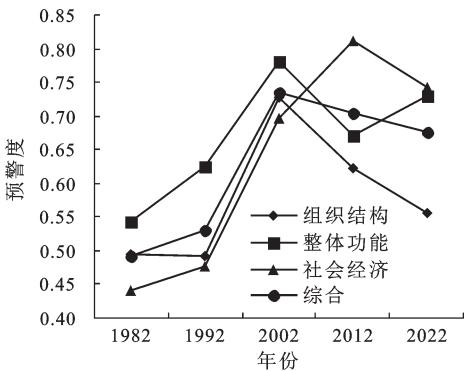


图3 近30 a来南四湖湿地生态环境预警度变化趋势  
Fig.3 The ecological environment early warning degree change trend graph in recent 30 years

结合组织结构、整体功能和社会经济这3方面的指标变化来分析,发现组织结构指标的变化趋势与综合变化趋势具有极高的一致性,从而也说明了湿地组织结构是湿地生态环境状况的直接体现。整体功能指标在前20 a一直处于恶化的趋势,近10 a来,随着人工湿地工程的投入建设,使得湿地功能在逐步地提升,但仍未达到1982年的较好水平,在后10 a的预测中随着南水北调调水的补给,造成南四湖需水量的改变,将对湿地的生

物结构带来较大影响,故呈进一步恶化趋势。社会经济的外部指标近30 a来一直处于恶化趋势,主要是由于当地在对经济发展的需求过程中,忽视了生态环境的建设,打破了湿地系统自然生境演替的平衡,加速了湿地生态系统负向演替的速度。虽然投入了一批硬件设施进行治污排污,提高了处理污染的能力,也取得了一定的效果(综合预警度有下降趋势),但是,生态环境的修复并非短时间内一蹴而就,随着对农业化肥、农药的使用量和工业COD的控制,在未来10 a的预测中,该指标会逐渐向好的趋势发展。

### 2.5.3 恶化速度预警分析

恶化速度预警是建立在恶化趋势分析基础之上的,对于呈现恶化趋势的指标进行恶化速度预警分析,对于趋向好的方向发展的指标则不予考虑。若都以1982年的指标值为背景值来看,各个亚类指标和整体状态都有不同程度的恶化,以2012年为现状值计算出各个指标层的恶化速度,分别为组织结构0.004 3度/a,整体功能0.004 2度/a,社会经济0.012 4度/a,综合0.007 0度/a。其中,在20世纪80、90年代,是南四湖湿地整体功能退化的一个加速阶段,达到了0.012度/a,与此同时,组织结构指标和社会经济指标的恶化速度也分别达到了0.012度/a和0.013度/a,说明这一时期的过度开发资源给南四湖湿地造成了破坏性的影响。很显然,社会经济指标在恶化速度方面仍然是最需要进行关注的一个方面。

## 3 结论

通过对南四湖湿地生态环境近30 a来的遥感、土地利用以及环境监测和实地考察数据的整理分析,运用模糊综合评价法,对其进行预警评价,结果表明:

1) 南四湖湿地生态环境现状整体警度评价结果为重警,各子指标系统方面:社会经济类指标处于巨警状态,整体功能类指标处于重警状态,组织结构类指标处于中警状态。生态环境并不理想,其中来自外部人类活动干扰的影响较大,主要是工农业生产活动带来的面源污染。

2) 近30 a来,南四湖湿地生态环境整体呈现恶化趋势。2002年由于自然降水稀少而造成严重灾情,警度达到最高的巨警级别。分项指标中,组织结构指标与综合趋势变化保持一致;整体功能

指标前20 a恶化,近10 a呈现良好发展趋势;社会经济指标始终恶化。使用BP神经网络模型对未来10 a南四湖湿地生态环境的预测结果表明,到2022年预警度将向良好趋势发展,总体水平达到中警状态。

3) 前20 a各项指标和整体状况的恶化速度均大于近10 a,社会经济指标始终保持较高的恶化速度,虽然警情得以控制并有向好的方向发展的趋势,但是仍然不能忽视人类活动的负向干扰作用。

## 4 讨论

南水北调工程的通水对南四湖湿地的自然条件将会产生很大的改变,然而,从研究的结果来看,人类的社会经济发展对自然条件的破坏程度才是南四湖湿地生态环境演变的决定性因素,驱动着生态环境的进一步恶化。该研究方法可在今后类似的研究中加以推广应用。另外,由于受到数据来源的限制,本研究所做的动态变化时间尺度是10 a,而且缺少空间上的分异性研究。随着实时监测技术在湖泊管理中的应用和监测网点的加密,在下一步的工作中将会进行更加精确的实时监控、预警研究。为保障南四湖湖泊湿地的生态环境健康发展和南水北调工程的正常运行提供更加有力的支撑。

## 参考文献(References):

- [1] Munn R E. Global Environmental Monitoring System (GEMS): Action Plan for Phase I[M]. SCOPE Secretariat, 1973.
- [2] De Soyza A G, Whitford W G, Herrick J E et al. Early warning indicators of desertification: examples of tests in the Chihuahuan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39(2): 101-112.
- [3] 傅伯杰. 区域生态环境预警的原理与方法[J]. 资源开发与保护, 1991, 7(3):138-141. [Fu Bojie. Principles and methodology of early warning on regional ecological and environmental issues. Resources Development and Conservation, 1991, 7(3): 138-141.]
- [4] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4):436-439. [Fu Bojie. Early warning theory on regional eco- environmental issues and its application. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(4):436-439.]
- [5] 陈国阶. 对环境预警的探讨[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(5):1-4. [Chen Guojie. An approach on environmental warning. Chongqing Environmental Science, 1996, 18(5):1-4.]
- [6] Guttal V, ayaprakash C. Changing skewness: an early warning signal of regime shifts in ecosystems[J]. Ecology Letters, 2008,



- 11(5):450-460.
- [7] Hackett B, Comerma E, Daniel P et al. Marine pollution monitoring and prediction[J]. *Oceanography*, 2009, 22: 168-175.
- [8] Dakos V, Scheffer M, Van Nes E H et al. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(38): 14308-14312.
- [9] Drake J M, Griffen B D. Early warning signals of extinction in deteriorating environments[J]. *Nature*, 2010, 467(7314): 456-459.
- [10] 王耕, 吴伟. 区域生态安全预警指数——以辽河流域为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3535-3542. [Wang Geng, Wu Wei. Research on region ecological security early warning index: a case of Liaohe River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3535-3542.]
- [11] 周彬, 钟林生, 陈田, 等. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1854-1862. [Zhou Bin, Zhong Linsheng, Cehn Tian et al. Ecological security early-warning in Zhoushan Islands based on variable weight model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1854-1862.]
- [12] 易武英, 苏维词, 周文龙, 等. 基于元胞自动机模型的贵阳市花溪区生态安全预警模拟研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(3): 369-375. [Yi Wuying, Su Weici, Zhou Wenlong et al. An ecological security early warning simulation city based on the CA Model in Huaxi District of Guiyang City, China. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2015, 32(3): 369-375.]
- [13] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于RBF的湖南省土地生态安全动态预警[J]. *地理学报*, 2012(10): 1411-1422. [Xu Mei, Zhu Xiang, Liu Chunla. Early-warning of land ecological security in Hunan Province based on RBF. *Acta Geographica Sinica*, 2012(10): 1411-1422.]
- [14] 郑荣宝, 刘毅华, 董玉祥. 广州市土地安全预警系统与RBF评估模型的构建[J]. *地理科学*, 2007, 27(6): 774-778. [Zheng Rongbao, Liu Yihua, Dong Yuxiang. Establishment and assessment of early warning system of land safely based on Radica Basis Function Model in Guangzhou City. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6): 774-778.]
- [15] 董成森, 陈端吕, 董明辉, 等. 武陵源风景区生态承载力预警[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4766-4776. [Dong Chengsen, Chen Duanlv, Dong Minghui et al. Forecasting system for ecological carrying capacity of Wulingyuan Scenic Spot based on ANN. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4766-4776.]
- [16] 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 基于ANN的洞庭湖区生态承载力预警研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(2): 102-107. [Xiong Jianxin, Chen Duanlv, Peng Baofa et al. Study on forecasting system for ecological carrying capacity of Dongting lake region based on ANN. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(2): 102-107.]
- [17] 卢亚灵, 颜磊, 许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(2): 303-308. [Lu Yaling, Yan Lei, Xu Xuegong. Ecological vulnerability assessment and spatial auto-correlation analysis over the Bohai Rim Region. *Resources Science*, 2010, 32(2): 303-308.]
- [18] 赵艳萍. 农田生态安全预警研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007. [Zhao Yanping. Study on Farmland Ecological Security Early-Warning. Hefei: Anhui Agricultural University.]
- [19] 赵宏波, 马延吉. 基于变权-物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究——以吉林省为例[J]. *生态学报*, 2014, (16): 4720-4733. [Zhao Hongbo, Ma Yanji. Study on early-warning model based on variable weight-matter element analysis for ecological security in old industrial bases: a case study of Jilin Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, (16): 4720-4733.]
- [20] 符娟林, 乔标. 基于模糊物元的城市化生态预警模型及应用[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 990-995. [Fu Juanlin, Qiao Biao. Ecological Early-warning Model and Its Application in the Process of Urbanization Based on Fuzzy Matter Element Theory. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 990-995.]
- [21] 黄佳聪, 高俊峰. 智能算法及其在环境预警中的应用[J]. *环境监控与预警*, 2010, 2(3): 5-8. [Huang Jiacong, Gao Junfeng. Application of Intelligent Algorithm in Environmental Early Forewarning Warning. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, 2(3): 5-8.]
- [22] 王耕, 吴伟. 基于GIS的辽河流域水安全预警系统设计[J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(2): 175-179. [Wang Geng, Wu Wei. Design of an early warning system of water security for Liaohe River based on GIS. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(2): 175-179.]
- [23] Hamre T, Krasemann H, Groom S, et al. Interoperable web GIS services for marine pollution monitoring and forecasting[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2009, 13(1): 1-13.
- [24] Alfieri L, Salamon P, Pappenberger F et al. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, 21: 35-49.
- [25] 许学工. 黄河三角洲生态环境的评估和预警研究[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 461-468. [Xu Xuegong. Study on evaluation and pre-warning of ecological environment in the yellow river delta. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 461-468.]
- [26] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J]. *生态学报*, 1989, 9(2): 97-105. [Niu Wenyuan. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ecotone. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(2): 97-105.]
- [27] 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于SWAT模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2): 236-242. [Li Shuang, Zhang Zulu, Sun Yuanyuan. Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(2): 236-242.]
- [28] 沈吉, 张祖陆, 杨丽原, 等. 南四湖——环境与资源研究[M]. 北京: 地震出版社, 2008. [Shen Ji, Zhang Zulu, Yang Liyuan et al. *Nansihulakes——environmental and resource studies*. Beijing: Seismological Press, 2008.]
- [29] 许吉仁, 董雾红. 1987~2010年南四湖湿地景观格局变化及

- 其驱动力研究[J]. 湿地科学, 2013,11(4):438-445. [Xu Jiren, Dong Jihong. Landscape pattern change and its driving force of Nansihu Wetlands during 1987-2010. *Wetland Science*, 2013,11(4):438-445.]
- [30] 济宁市统计局,国家统计局济宁调查队. 济宁市统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,1982,1992,2002,2012.[Bureau of statistics of Jining City, Jining investigation team of national bureau of statistics. *Jining statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press,1982,1992,2002,2012.]
- [31] 山东省统计局,国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,1982,1992,2002,2012. [Bureau of statistics of Shandong Province, Shandong investigation team of national bureau of statistics. *Shandong statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press,1982,1992,2002,2012.]

## Early Warning of Wetland Eco-environmental in Nansihu Lake

Gao Jiaji<sup>1,2,3</sup>, Li Xueming<sup>2,3</sup>, Zhang Feng<sup>4</sup>, Yang Jun<sup>2,3,5</sup>, Xi Jianchao<sup>5</sup>

(1. *Applied Technology College of Dalian Ocean University, Dalian 116300, Liaoning, China*; 2. *School of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China*; 3. *The research center of human settlements, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China*; 4. *School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, Jilin, China*; 5. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** Currently, as most lake areas in China are under high interference of intensifying human activities, lake ecosystem has been severely damaged and causing serious deterioration of human habitat. As lake wetland eco-environmental early warning is the key to achieve lake monitoring, environmental management and ecological restoration and it is the further work which is based on ecosystem vulnerability and health assessment as well, a research of eco-environmental early warning on Nansihu Lake, China is done in this article. In this study, remote sensing data, land use and environment monitor data in 1982, 1992, 2002 and 2012 were chosen as data base. Then, an index system combine of organization structure, whole function and social economic environment was established. Every index was divided in five grades which include non-alert, light alert, middle alert, heavy alert and giant alert. The fuzzy synthetically judgment model was used as assessment. To predict the state of eco-environmental early warning in 2022, the back propagation algorithm neural network method is used. The model's learning samples are results statistics in 1982, 1992 and 2002 and the testing sample is statistics in 2012. The testing results show that the accuracy meets the requirement and it can be used to make prediction of the early warning state in 2022. The conclusions were as follows: 1) As chemical fertilizer and pesticide issue in agriculture activities and industrial emission were over the environmental capacity. Nansihu wetland was in heavy alert state in 2012. In each under grades indicators system, organization structure indicators system was in middle alert state, whole function indicators system was in heavy alert state and social economic indicators system was in huge alert state; 2) As the little natural precipitation in 2002, the whole wetland has been deteriorating while the social economic environment indexes were getting even worse during the 1980s-2000s. The overall early warning state achieved huge alert state in 2002. In the coming 10 years, either indexes or the whole warning state is getting better because of the increasing investment in ecological restoration. 3) The degradation rate of nearly 10 years was slower than it of earlier 20 years while the social economic environment indexes always keep a high speed, which can be explained by the negative disturbance human beings activities. This research is significant to the environment management of Nansihu wetland and the result can provide scientific reference for lake management and regional sustainable development.

**Key words:** warning; lake wetland; eco-environment; fuzzy synthetically judgment model; Nansihu Lake