

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.010

淮河流域河流水环境可恢复性评价

肖洋, 张翔, 周秋红, 朱才荣

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对水环境可持续利用中存在的水环境特征识别问题, 开展水环境可恢复性研究。基于水环境可恢复性的定义及水环境可恢复性评价指标体系, 选取其中12个指标, 采用淮河流域2000—2009年10年数据资料, 利用主成分分析法(PCA)得到影响淮河流域水环境可恢复性的主要成分和各年的综合主成分值随时间变化情况; 将水环境系统可恢复性分为弱、一般、强3个等级, 利用自组织映射(SOM)神经网络法对归一化的正向样本数据进行分析, 得到各年水环境系统可恢复性的强弱等级情况。结果表明, 由PCA法得到的结果与SOM神经网络法的结果相一致, 淮河流域从2000—2009年水环境可恢复性整体上呈现逐年增强的趋势, 同时表明PCA和SOM神经网络法对水环境可恢复性评价是可行的。

关键词: 水环境; 可恢复性; 主成分分析法; 自组织映射神经网络法; 淮河流域

中图分类号: TV11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2014)03-0050-06

Evaluation of river water environmental resilience in Huaihe River Basin

XIAO Yang, ZHANG Xiang, ZHOU QiuHong, ZHU Cairong

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to identify the characteristics of the water environment in the process of sustainable utilization of water resources, a study of water environmental resilience was carried out. Based on the definition and evaluation index system of water environmental resilience, 12 indices of the evaluation index system were selected, ten-year data of the Huaihe River Basin from 2000 to 2009 were collected, and principal component analysis (PCA) was used to obtain the main components influencing the water environmental resilience of the Huaihe River Basin and the yearly comprehensive principal component value varying with time. The water environmental resilience was classified into three levels: the weak, medium, and strong levels. Then, the self-organized mapping (SOM) neural network method was used to analyze the standard sample data, which were normalized in a descending or ascending order, and obtain the strength level of the water environmental resilience in each year. The results of the PCA agreed with those of the SOM neural network method. The evaluation results show that the water environmental resilience of the Huaihe River Basin increased yearly from 2000 to 2009, and the PCA and the SOM neural network method are reliable in evaluating the water environmental resilience.

Key words: water environment; resilience; principal component analysis; SOM neural network method; Huaihe River Basin

水环境的可恢复性及水域纳污能力的可持续性是当前水资源环境管理的研究前沿, 对最严格的水

资源管理中水功能区限制纳污红线的确立和水资源可持续利用的实现具有重要的参考意义。

基金项目: 国家自然科学基金(71073115, 51279143)

作者简介: 肖洋(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态水文学。E-mail: 380835474@qq.com

通信作者: 张翔, 教授。E-mail: zhangxiang@whu.edu.cn

可恢复性的概念首先被 Holling^[1] 从力学领域引入生态学领域,用来描绘系统承受压力或外界干扰后,恢复到原有状态的能力。随后很多学者开始将可恢复性的概念引入到社会问题的研究中, Timmerman^[2] 是最先讨论气候变化情况下社会系统可恢复性的专家之一,他把系统的可恢复性和脆弱性联系起来,把可恢复性定义为系统或系统一部分从遭受灾害事件的打击中恢复的能力^[3]; Adger^[4] 探索了社会系统与生态系统可恢复性之间的关系,在 Timmerman 研究成果的基础上将社会系统的可恢复性定义为人类社会系统抵抗外界对其基础设施的打击或扰动的能力及从中恢复的能力; Klein 等^[5] 以海岸带大城市为例,强调了可恢复性在社会系统灾害中的重要性。经过长期的研究,可恢复性的概念已被运用到水资源系统的可恢复性研究中。Ellen 等^[6] 对河流环境修复的相关理论与方法进行了研究; Giller 等^[7-8] 对目前河流管理中存在的问题进行了分析,并提出了成功修复河流环境的 5 个标准; Lake 等^[9] 认为河流环境的完全修复需要考虑生态系统的健康发展,提出运用生态系统的准则指导河流环境的修复工作; Lichter 等^[10] 进一步分析了生态系统功能退化与河流环境系统部分修复之间的关系。因此,水环境恶化现已成为世界关注的焦点问题。生态系统的修复可以通过生态技术或生态工程对退化或消失的湿地进行修复或重建,再现被干扰前的结构和功能,以及相关的物理、化学和生物学特性,使其发挥应有的作用^[11]。类似于生态系统,恶化了的水环境也是可以恢复的:①通过水的自然大循环进行净化、恢复;②基于水的可再生性,污染物的物理、化学、生物化学反应产物不断被溶解、稀释,使得水体不断得到净化^[12]。根据对国内外水环境可恢复性机理研究的总结,周秋红等^[13] 提出了水环境可恢复性的定义,即水环境受到人类活动和自然过程的干扰时,能够通过自我调节和人工干预恢复到一个较为自然状态的能力,维系水环境系统动态稳定状态;并且构建了水环境可恢复性评价指标体系。综上所述,虽然国内外对水环境可恢复性机理做出了大量研究并给出了水环境可恢复性的科学定义,但是对水环境可恢复性研究仍缺乏科学的评价方法。

本文以淮河流域为例,利用主成分分析(principal component analysis, PCA)法和自组织映射(self-organized mapping, SOM)神经网络法开展水环境可恢复性评价工作,对水环境可恢复性评价研究进行初步探索,最终为水环境治理工作提供参考信息。

1 水环境可恢复性评价指标体系与方法

1.1 评价指标体系

水环境可恢复性机理主要体现在水量的可再生性、水质的可恢复性与可控性、水生态系统的自适应能力和水环境治理与管理政策等方面,水环境系统的水文情势与水动力条件越多变,水生态系统组成越复杂,其可恢复性就愈高;相反若系统组成结构单一,功能简单,那么水环境系统的可恢复性就弱。然而水环境可恢复性很难用一两个指标来评价,因此水环境恢复性评价指标体系的建立对于水环境可恢复性评价工作是十分有用的。

水环境可恢复性评价指标体系的建立主要基于水资源量、纳污能力、自净能力以及环境治理水平 4 个方面,其中水资源量主要包括人均地表水资源量(m^3)、人均过境水资源量(m^3)、地表水年径流模数($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$)等指标;纳污能力主要涵盖了地表水主要污染物质量浓度(mg/L)、底泥主要污染物质量浓度(mg/L)、GDP 的主要污染物排放强度($\text{kg}/\text{万元}$)等指标;自净能力涉及水温($^{\circ}\text{C}$)、河流流速脉动强度、河流纵向连续性等指标;环境治理水平主要与湿地面积占土地面积百分率($\%$)、工业废水处理率($\%$)、城市生活污水处理率($\%$)等指标有关,详细内容请参见文献[13]。

1.2 评价方法

水环境的可持续发展是水资源可持续利用、社会进步、经济发展与环境支持 4 个方面保持高度和谐的过程,为了全面反映水环境可恢复性各个方面的影响因素,水环境可恢复性评价需要采用多指标综合评价的方法。根据确定权重方法的不同,国内外关于系统评价的方法主要有主观赋权法和客观赋权法。为客观反映水环境可恢复性评价指标体系中各指标对水环境可恢复性的影响,且由于客观赋权法中的 PCA 能客观地给出指标权重值,确定影响综合评价的主要指标,并得到综合评价值;SOM 神经网络法在分类指导下根据相似程度对每一年的指标数据进行分类,确定水环境可恢复性的阶段变化情况,并验证 PCA 评价结果的合理性,因此,本文采用 PCA 与 SOM 神经网络法相结合的客观赋权法对水环境可恢复性进行评价。

1.2.1 主成分分析(PCA)法

PCA 法是一种能够有效降低变量维数,并已得到广泛应用的分析方法,其主要原理^[14]是:假设观测了 p 个指标,分别为 x_1, x_2, \dots, x_p , 取这些指标的线性组合即 $y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_px_p$ 做主成分的表达式,由数学知识可知,每一个主成分所提取的信

息量可用其方差来度量:方差越大,表示该主成分包含的信息越多。由于各组合的系数不同,可以得到很多不同的综合指标,其中反映原始指标变量变动最大的那个综合指标被称为第1主成分,记为 y_1 ;其次为第2主成分,记为 y_2 ;其余依次类推;第 k 个综合指标即为第 k 个主成分,记为 y_k 。则主成分表达式为

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p \\ y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p \\ \vdots \\ y_k = a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \cdots + a_{kp}x_p \end{cases} \quad (1)$$

且有: $\text{var}(y_1) > \text{var}(y_2) > \cdots > \text{var}(y_k)$

式中: $(a_{11}, a_{12}, \cdots, a_{1p})^T$ 分别为指标变量相关阵的 p 个特征根对应的特征向量。

由此可见,PCA的原理就是在保证数据信息丢失最小的情况下,由少数几个具有代表意义的新变量代替原始变量,它们反映了研究对象的特征^[15]。

由式(1)设有 n 个样本和 p 项指标,可得数据矩阵 X 如下:

$$X = (x_{ij})_{n \times p} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第 $i(i=1, 2, \cdots, n)$ 个样本的第 $j(j=1, 2, \cdots, p)$ 个指标值。

PCA的具体计算步骤参见文献[16],在此不再赘述。

1.2.2 自组织映射(SOM)神经网络法

SOM神经网络法是一类无导师学习的竞争型神经网络模型,这类模型不需要提供教师信息,就可以对未知样本进行学习或者模拟,并且对自身的网络结构进行适当调整。

SOM神经网络法的基本思想是网络竞争层的各个神经元通过竞争来获得对输入样本的响应机会。在竞争层中,最后仅有一个神经元竞争获胜,以获胜神经元为中心固定半径的领域称为优胜邻域,该神经元就代表着当前输入样本的聚类模式;然后调整权值。在SOM神经网络学习方法中,不仅获胜的神经元要调整权值,而且也要对优胜领域内的所有神经元的权值按照其距离获胜神经元的远近做出不同程度的调整。具体的算法步骤参见文献[17]。

2 实例研究

2.1 淮河流域概况

淮河流域是我国7大流域中水污染问题比较严重的地区之一,尽管国家在“九五”、“十五”、“十一五”期间采取了相应的综合治理措施,水污染恶

化的趋势得到有效控制,但是水污染形势仍十分严峻。2009年淮河流域水资源公报显示,截至2009年末,淮河流域各省废污水年排放量为73.40亿t,主要污染物COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的入河排放量分别为55.08万t和6.99万t,与2008年相比较,分别增加了2.46万t和0.36万t。对照淮河流域水功能区限制排污总量目标,2009年淮河流域COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 入河排放量分别超标0.44倍和1.63倍。全年49个水质监测断面中Ⅲ~劣Ⅴ类各类水质所占的比例分别为:Ⅲ类20.4%、Ⅳ类26.5%、Ⅴ类14.3%、劣Ⅴ类30.6%。流域内部分水功能区水质超标,影响了供水水质的安全,已经成为流域内社会经济可持续发展的制约因素。因此,开展淮河流域水环境可恢复性评价将会对淮河纳污能力可持续利用和最严格水资源管理具有重要指导意义。

2.2 数据资料

为了充分反映淮河流域水环境系统的可恢复性水平以及变化趋势,主要选取淮河流域2000—2009年10年数据资料,考虑到资料的有限性,采用水环境可恢复性评价指标体系中的12个指标:年降雨量 x_1 、产水系数 x_2 、水资源开发利用 x_3 、万元GDP主要废水排放量 x_4 、劣Ⅴ类水质所占比例 x_5 、功能区水质达标率 x_6 、农业化肥施用强度 x_7 、人均GDP x_8 、城镇化水平 x_9 、工业废水达标率 x_{10} 、水土流失治理率 x_{11} 、环保投资占GDP比例 x_{12} ;其中 x_1, x_2, x_3 考虑了水量的可再生情况, x_4 描述了人类生活与工业生产对水体环境的污染状况, x_5, x_6 用来表征河流与水系的健康状况, x_7 用于衡量非点源污染对水环境造成的负面影响程度, x_8, x_9 用于表征人类活动对水环境的破坏程度, x_{10}, x_{11} 反映一个区域对水污染的处理能力, x_{12} 反映一个地区对环境治理投入的大小;并且 $x_1, x_2, x_6, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ 为有利于水环境恢复的正向指标。

为使评价取得合理的结果,首先将样本数据中的逆指标取倒数使得整个样本数据正向化,使得指标数据越大,水环境可恢复性越强;并按以下方法将正向化数据进行标准化、归一化处理,然后对淮河流域水环境可恢复性驱动因素进行分析。

对于正向化指标,按式(3)进行标准化处理:

$$Z = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (3)$$

式中: Z 为某项指标的评价标准值; x_i 为某单项指标的原始值; \bar{x} 为这一组指标的平均值; S 为该组指标的均方差。

对于负向化指标,按式(4)进行归一化处理:

$$v(x_i) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中: $v(x_i)$ 为指标的标准化值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别为该指标的最大值与最小值。

2.3 评价结果

2.3.1 PCA 评价结果

根据 PCA 的原理及计算步骤,利用 SPSS 软件的因子分析工具对标准化数据资料进行分析,得到流域水环境可恢复性评价的 3 个主成分:第 1 主成分 F_1 ,水环境恢复能力贡献率为 51.06%,主要反映了 x_4 、 x_5 、 x_8 、 x_{10} 等指标信息;第 2 主成分 F_2 水环境恢复能力贡献率为 25.96%,主要反映了 x_1 、 x_2 、 x_3 等指标信息;第 3 主成分 F_3 水环境恢复能力贡献率为 10.59%,主要反映了 x_6 的变化情况。

利用因子分析得到的主成分负荷矩阵,除以主成分相对应的特征值开平方就可以得到 3 个主成分各指标所对应的系数 C_1 、 C_2 、 C_3 (表 1),将上述系数与标准化的数据指标相乘求和即为各主成分表达式。

表 1 评价指标体系主成分系数

指标	C_1	C_2	C_3
x_1	-0.151	0.513	-0.134
x_2	-0.088	0.509	-0.131
x_3	-0.204	0.480	-0.128
x_4	0.380	0.088	-0.218
x_5	0.393	0.026	-0.108
x_6	-0.001	0.229	0.780
x_7	-0.366	-0.215	-0.070
x_8	0.373	0.176	-0.180
x_9	-0.375	-0.119	0.083
x_{10}	0.263	0.197	0.472
x_{11}	0.255	0.013	-0.055
x_{12}	-0.285	0.236	-0.106

以每个主成分所对应的特征值所占总特征值之和的比例作为权重计算,得到主成分分析综合表达式:

$$F = \frac{\lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \lambda_3 F_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (5)$$

由因子分析工具得到 $\lambda_1 = 6.128$, $\lambda_2 = 3.115$, $\lambda_3 = 1.261$, $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 10.504$, 则得主成分综合表达式为

$$F = \frac{6.128 F_1 + 3.115 F_2 + 1.261 F_3}{10.504} \quad (6)$$

根据主成分综合表达式即可计算综合主成分值,并按综合主成分值进行排序,即可对淮河流域各年进行综合评价比较,结果见表 2。

由表 2 得到图 1 和图 2。从图 1 和图 2 中可以看出淮河流域水环境主要影响因子的变化情况。

第 1 主成分 F_1 包含了 51.06% 的贡献率,是可

表 2 淮河流域 2000—2009 年水环境可恢复性主成分和综合主成分分值及排名

年份	F_1		F_2		F_3		F	
	分值	排名	分值	排名	分值	排名	分值	排名
2000	-3.541	10	-0.653	7	-1.562	10	-2.446	10
2001	-0.809	7	-2.788	10	0.333	3	-1.259	8
2002	-1.358	8	-2.130	9	-0.208	6	-1.449	9
2003	-3.315	9	3.022	1	-0.163	5	-1.056	7
2004	-0.187	5	-0.942	8	1.894	2	-0.162	6
2005	-0.613	6	1.667	2	2.000	1	0.377	5
2006	0.987	4	-0.063	5	0.197	4	0.581	4
2007	1.241	3	1.200	3	-1.102	9	0.948	3
2008	2.896	2	0.557	4	-0.560	7	1.787	2
2009	4.263	1	-0.077	6	-0.617	8	2.390	1

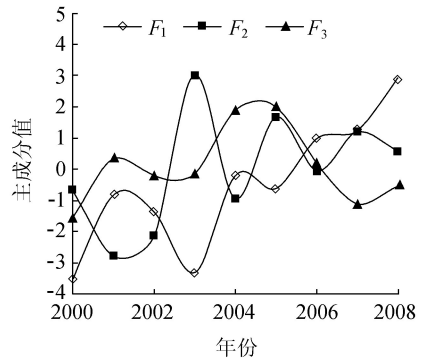


图 1 淮河流域水环境可恢复性主成分因子得分

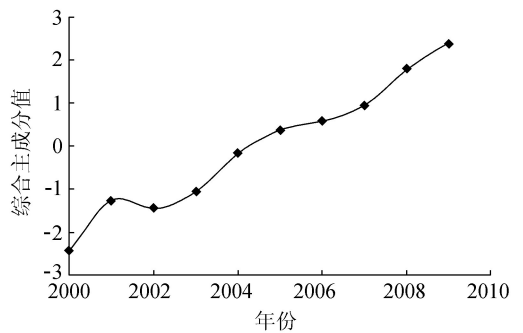


图 2 淮河流域水环境可恢复性变化趋势

以控制其他因素变化的主控因素。由图 1 可以看出, F_1 在 2000—2005 年的得分较低, 2006—2009 年得分较高。从构成 F_1 的两个主要指标——劣 V 类水质所占比例与万元 GDP 主要废水排放量来看, 2000—2005 年水质因素对水环境可恢复性的影响尤为显著, 淮河流域水污染的严重性已经对水环境的可恢复性造成严重的影响; 2006—2009 年, 随着主要入河污染物排放量的削减, 污染源工业排放基本达标, 淮河流域水质污染得到有效控制。

第 2 主成分 F_2 包含了 25.96% 的贡献率, 其影响因子主要是年降水量、产水系数与水资源开发利用率。图 1 中第 2 主成分的变化趋势基本与 2000—2009 年淮河流域水资源量的变化情况一致。

第 3 主成分 F_3 仅包含了 10.59% 的贡献率, 其

变化情况基本反映了淮河流域水功能区的达标情况;2000—2005年淮河流域水功能区水质达标率有所上升;但自2006—2009年水功能区水质达标率有下降的趋势,因此淮河流域在今后的水环境治理过程中需加强对水功能区水质的管理。

图2中曲线表示2000—2009年综合主成分值的变化情况;淮河流域的水环境恢复能力总体呈上升趋势,其中2001年相对于总体发展趋势得分偏高,主要原因在于2001年万元GDP废水排放总量、耕地平均农业化肥使用强度都较低,而且水功能区达标率较高。尽管2001年和2002年水环境可恢复性水平有所波动,但不影响总体的变化趋势。

2.3.2 SOM神经网络法评价结果

根据淮河流域水环境系统可恢复性影响因子对水环境系统可恢复性的影响程度,将水环境系统可恢复性分为3个等级(表3),即可恢复性 $V = \{I, II, III\}$ 。

表3 淮河流域水环境可恢复性评价等级

级别	可恢复性级别	水环境可恢复性情况
I	弱	水资源开发利用程度高,水体中污染物总量已超过水环境容量,水体功能不能正常发挥,资源接近耗竭,不能维持水环境的可持续利用
II	一般	水体污染程度比较严重,但水体功能基本能正常发挥,自我恢复能力中等
III	强	水资源开发利用潜力较大,水体污染程度较轻,水环境纳污能力较强,基本能维持水环境的可持续利用

采用matlab7.0神经网络工具箱中提供的SOM网络进行输入样本的分类,用newsom函数进行设计,将归一化到[0,1]区间的正向化样本数据作为SOM网络的输入向量,确定网络的输入模式为

$$P_k = (P_1^k, P_2^k, \dots, P_n^k) \quad (7)$$

式中: k 为样本数, $k = 1, 2, \dots, 10$; n 为指标数, $n = 12$ 。

首先利用newsom函数建立一个SOM网络,代码如下:

$$\text{new} = \text{newsom}(\min \max(\mathbf{P}), D) \quad (8)$$

式中: \mathbf{P} 为输入向量; $\min \max(\mathbf{P})$ 为输入向量的最大值与最小值; D 为创建网络竞争层的网络结构,网络结构可以根据所需要的分类结果调整。

利用train训练函数和sim仿真函数对SOM网络进行训练并仿真。SOM网络的训练步数对于网络的性能有很大的影响,本文首先将网络的训练步数设置为100、200、300、500、1000,分别观察网络的分类性能。程序运行后发现,当运行步数达到500时,分类的结果趋于稳定,故选定训练步数为500步。然后,对网络结构即竞争层网络维数进行调整,观察不同的网络维数对神经元的分类数的影响,结

果见表4。

表4 淮河流域水环境可恢复性SOM网络聚类结果

网络维数	分类数	样本序列号
[1,1]	1	{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}
[2,1]	2	{1,2,3,4,5}, {6,7,8,9,10}
[3,1]	3	{1,2,3,4}, {5,6,7}, {8,9,10}
[4,1]	4	{1,4}, {2,3,5}, {6,7}, {8,9,10}
[5,1]	5	{1,4}, {2,3}, {5}, {6,7}, {8,9,10}
[6,1]	6	{1,2,3}, {4}, {5,6}, {7}, {8}, {9,10}
[7,1]	7	{1,4}, {2,3}, {5}, {6}, {7}, {8}, {9,10}
[8,1]	8	{1}, {2,3}, {4}, {5}, {6}, {7,8}, {9}, {10}
[9,1]	8	{1}, {2,3}, {4}, {5}, {6}, {7}, {8}, {9,10}
[10,1]	8	{1}, {2,3}, {4}, {5}, {6}, {7}, {8}, {9,10}

由表4可知,当竞争层网络维数较小时,随着网络维数的增加,分类数也相应增加。当网络维数增加到[8,1]以后,网络维数不再增加,而是出现了平稳性;与此同时,SOM网络的权值改变也不明显,对输入样本的灵敏度降低,故SOM网络对淮河流域2000—2009年水环境可恢复性的最大聚类数为8。根据表3的评价等级数,本文选取聚类数为3,故竞争层网络维数选为[3,1]。

选择网络维数为[3,1],分类数为3,最大的训练步数为500,对淮河流域2000—2009年水环境可恢复性进行自组织聚类评价,输出结果为

$$y = [1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 3] \quad (9)$$

由此可见,2000—2004年的水环境可恢复性属于I类,2005、2006年属于II类,2007—2009年属于III类。

本文运用PCA法对淮河流域水环境可恢复性驱动因素进行了分析,求得淮河流域水环境可恢复性主成分综合得分值,进而得到综合主成分得分值随时间的变化情况,即图2。从图2可见,淮河流域水环境可恢复性大概分为3个阶段,2000—2004年,淮河流域水环境可恢复性较弱,2005—2006年淮河流域水环境可恢复性一般,2007—2009年淮河流域水环境可恢复性较强,这正好与SOM神经网络法分类的结果一致。

3 结论与讨论

本文运用PCA法和SOM神经网络法,对淮河流域水环境可恢复性变化趋势和分类评价进行研究,在研究的过程中得出如下结论:

a. 利用PCA法对淮河流域的水环境恢复性进行评价,发现淮河流域2009年水环境可恢复性最高,2000年最低;揭示了淮河流域的水质状况逐渐好转、水资源量呈现逐年增加、水环境恢复性逐年增强的趋势,并与实际相符;但从2006年开始水功能区的水质达标率有所下降,在今后的治理工作中需

要予以重视。

b. 利用 SOM 神经网络法对淮河流域水环境可恢复性进行评价,将 2000—2009 年的水环境恢复性分为 3 个阶段:2000—2004 年水环境可恢复性处于较低水平,2005 年与 2006 年水环境可恢复性一般,2007—2009 年水环境可恢复性较强,水环境可恢复性整体上逐年增强,与 PCA 分析得到的结论一致。

c. 通过 PCA 和 SOM 神经网络法的综合论证,说明淮河的治理工作具有成效,并与实际相符;也说明 PCA 和 SOM 神经网络法对水环境可恢复性评价是可行的。

水环境可恢复性是水环境状态的特征之一,准确评价水环境可恢复性是水环境可持续利用的基础。影响河流水环境可恢复性的因素众多,包括水文、水动力因素,以及水污染治理与管理措施等。在今后的研究中将进一步采用更全面的评价指标和数据资料,并在水环境可恢复性评价的基础上,建立水环境可持续利用的管理模型。

参考文献:

[1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):1-23.

[2] TIMMERMAN P. Vulnerability, the resilience and collapse of society: a review of models and possible climatic applications [M]. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.

[3] 刘婧,史培军,葛怡,等. 灾害恢复力研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 211-218. (LIU Jing, SHI Peijun, GE Yi. The review of disaster resilience research [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(2): 211-218. (in Chinese))

[4] ADGER W N. Social and ecological resilience: are they related? [J]. Progress in Human Geography, 2000, 24(3):347-364.

[5] KLEIN R J T, SMITH M J, GOOSEN H, et al. Resilience and vulnerability: coastal dynamics or Dutch Dikes [J]. The Geographical Journal, 1998, 164(3): 259-268.

[6] ELLEN W, PAUL L A, BRIAN B, et al. River restoration [J]. Water Resources Research, 2005, 41(10): 1-12.

[7] GILLER P S. River restoration: seeking ecological standards [J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(2): 201-207.

[8] PALMER M A, BERNHARDT E S, ALLEN J D, et al. Standards for ecologically successful river restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(2): 208-217.

[9] LAKE P S, BOND N, REICH P. Linking ecological theory with stream restoration [J]. Freshwater Biology, 2007, 52

(4):597-615.

[10] LICHTER J, CARON H, PASAKARNIS T S, et al. The ecological collapse and partial recovery of a freshwater tidal ecosystem [J]. Northeastern Naturalist, 2006, 13(2): 153-178.

[11] 王亮. 湿地生态系统恢复研究综述 [J]. 环境科学与管理, 2008, 33(8): 152-156. (WANG Liang. A review on wetland ecosystem restoration [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(8): 152-156. (in Chinese))

[12] 张杰. 我国水环境恢复与水环境学科 [J]. 北京工业大学学报, 2002, 28(2): 178-183. (ZHANG Jie. Water environmental recovery and subject in China [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2002, 28(2): 178-183. (in Chinese))

[13] 周秋红, 张翔, 穆宏强, 等. 水环境可恢复性定义及其评价指标初步研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 35-37. (ZHOU Qiu hong, ZHANG Xiang, MU Hong qiang. A preliminary study on the definition of water environmental resilience and its assessment index [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 35-37. (in Chinese))

[14] 何晓群. 现代统计分析方法与应用 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2003.

[15] 郑敏, 李陇堂, 王燕华. 主成分分析法用于可持续发展综合评价中的探讨: 以河南省为例 [J]. 商丘师范学院学报, 2009, 25(6): 110-114. (ZHENG Min, LI Long tang, WANG Yan hua. Study and discussion of the principal component analysis in sustainable development [J]. Journal of Shangqiu Teachers College, 2009, 25(6): 110-114. (in Chinese))

[16] 雷钦礼. 经济管理多元统计分析 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002.

[17] 陈祥光, 裴旭东. 人工神经网络技术及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

(收稿日期: 2013-10-12 编辑: 徐娟)

