

基于云模型的太湖流域农村水环境承载力动态变化特征分析——以太湖流域镇江区域为例^{*1}

许玲燕¹ 杜建国¹ 刘高峰²

(1. 江苏大学管理学院, 江苏 镇江 212013;

2. 河海大学企业管理学院, 江苏 常州 213022)

【摘要】:农村水环境承载力的定量估算及其动态变化特征研究有助于了解农村地区水资源供需平衡和水环境质量状况,为新农村建设规划和水环境可持续发展提供科学依据。本文以太湖流域镇江区域为研究对象,结合云模型改进模糊综合评价法,构建农村水环境承载力的PSR分析框架和评估指标体系,并结合雷达图、云模型发生器分析其动态变化特征及影响因素。结果表明:云模型能够较好地表征农村水环境承载力的变化特征;农村水环境承载力对太湖流域镇江区域的工农业废水排放、供水总量和治水投入的要求更高;2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力基本保持稳中上升的趋势,但总体处于弱承载状态,且丹阳>丹徒>润州>京口。

【关键词】:云模型;农村水环境承载力;动态特征;太湖流域镇江区域

【中图分类号】:X82 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)03-0445-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201703015

近十多年来,我国新农村建设取得了显著成效,但随着农业产业化、城乡一体化进程加快,资源消耗、环境恶化已成为农村经济发

¹ 收稿日期:2016-08-01; 修回日期:2016-11-16

基金项目:江苏省教育厅人文社会科学研究基金(2016SJB630091) [Humanities and Social Sciences Research Foundation of Educational Department in Jiangsu (No. 2016SJB630091)]; 江苏省博士后基金项目(1501074C) [Postdoctoral Science Foundation of Jiangsu Province (No. 1501074C)]; 国家自然科学基金面上项目(71471076) [National Natural Science General Foundation of China (No. 71471076)]; 国家自然科学基金国际合作项目(71411140250) [National Natural Science International Cooperation and Exchanges Foundation of China (No. 71411140250)]; 国家自然科学基金青年项目(71303074) [National Natural Science Young Foundation of China (No. 71303074)]; 江苏大学高级人才启动项目(14JDG103) [Senior Talent Project of Jiangsu University (No. 14JDG103)]

作者简介:许玲燕(1984~),女,博士研究生,主要研究方向为水资源与水环境管理。

E-mail:xulingyan333@163.com

展和生态文明建设的重要瓶颈,其中突出表现为农村水少水脏的矛盾加剧,农业污染物排放量大、农村生活污染加剧、畜禽养殖污染严重以及工业、城市污染向农村转移等问题相互交织。太湖作为我国重要的水源地之一,也是国家确定的“三河三湖”水污染防治重点流域之一,在太湖流域地区经济取得显著成绩的同时,用水需求与水质污染矛盾突出,或将限制太湖流域地区的经济增长。根据《太湖流域省界水体水资源质量状况通报(2016年6月)》的数据显示,太湖流域省界河流34个监测断面,仅有26.5%的断面水质达到或优于III类水标准,其余断面水质均受到不同程度污染。研究发现,在太湖流域主要污染物氨氮、总磷中,农业面源污染贡献率分别为34%~52%和17%~54%^[1],可见农业源排放已从数量规模上成为太湖流域的主要污染源,这和太湖流域地区农村经济的飞速发展,工业生产、农业种植以及农村居民的用水需求、排水方式息息相关,同时也与我国多年来将环保重点放在大中城市、忽视农村水环境治理的一系列政策制度有关。因此,为了实现美丽乡村、促进农村“人-水-经济”和谐发展,党中央做出了一系列重大决策和行动,如“十三五”规划中提出要坚持城乡环境治理并重、加大农业面源污染防治力度,2017年中央“一号文件”也强调加快农业环境突出问题治理。基于此背景,本文提出以提高“农村水环境承载力”为主要抓手,以太湖流域江苏省镇江区域为研究对象,分析近年来经济发展稳定增长且新农村建设取得显著成绩、但农村产业布局和水环境问题凸出的太湖流域江苏省镇江区域农村水环境现状及存在的问题,以问题为导向,为解决太湖流域农村水环境治理的重点问题提供决策依据。

本文在崔凤军^[2]、夏军^[3]、严子奇和夏军等^[4]学者对水环境承载力概念界定的基础上,结合李贵宝^[5]界定的农村水环境定义,认为本文的研究对象“农村水环境承载力”是指一定的自然条件和特定的经济社会发展背景下,农村水环境对该地区经济社会发展和人们生活需求的支持能力,它是衡量农村地区“人-水-经济”系统和谐发展的一个重要指标。

目前常用的水环境承载力评价方法主要有指标体系评价方法、多目标模型^[6, 7]和单目标最优化方法^[8, 9]、投影寻踪法^[10]、系统动力学^[11, 12]以及遥感影像法^[13]等方法。其中指标体系评价方法是目前应用较为广泛的一种量化模式,主要有向量模法^[14, 15]、模糊综合评价法^[16, 17]和主成分分析法^[18, 19]等。本文考虑到太湖流域农村水环境承载力是一个复杂巨系统,影响因素众多且具有模糊性和随机性特点,提出在应用模糊综合评价方法的基础上,结合云的概念,将太湖流域农村水环境承载力视为一个模糊系统,基于常用的环境质量评价模型—“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response,简称PSR)模型将其影响因素多级逐层分解,构建太湖流域农村水环境承载力评价指标体系,运用云模型改进确定各指标因子权值和隶属度过程中的随机性,对太湖流域农村水环境承载力进行多级模糊综合评价,并在此基础上结合云模型发生器和雷达图对其动态变化特征进行分析。

1 研究区域概况

镇江市共有河流64条,总长700余km,全市河网密度为0.18 km/km²,水域(不含长江)面积占13.7%,境内地形复杂,沿江蜿蜒伸展的宁镇山脉与贯穿南北的茅山山脉形成“丁”字形分水岭,将全市划分为三大水系:秦淮河水系、长江水系和太湖湖西水系,其中太湖湖西水系面积占全市面积的44.2%。

表 1 太湖流域镇江区域河流所属行政区概况

Tab.1 Administrative Area of Taihu Lake Basin in Zhenjiang

所在地区	河流	水质监测站点	水质目标
京口区	京杭运河	三岔河、谏壁桥	IV
丹徒区	京杭运河	辛丰镇	III
	通济河	宝埝桥、后亭桥、紫阳桥	III
丹阳市	京杭运河	王家桥、练湖砖瓦厂、宝塔湾、人民桥、吕城	III
	丹金溧漕河	前滕庄、黄埝桥	III
	简牍河	立新桥	III
	九曲河	林家闸、翻水站、访仙桥	III
	战备河	东岗桥	III
	鹤溪河	蒋士镇	III

镇江市东部属太湖湖西水系,流域面积 1 590km²。京杭运河是本市湖西水系的纽带,东西向有鹤溪河、战备河等,南北向有九曲河、丹金溧漕河、通济河、简牍河,这 7 条主要河流上共布设 19 个水质监测断面。1949 年后,经过多年建设,上述诸河均已相互联通,交织成网,共同承担该地区的引水排洪和通航任务。目前太湖流域镇江区域河流所属的行政区概况见表 1,考虑到 2014 年 5 月江苏省政府发文同意将镇江市京口区、润州区纳入省太湖流域综合治理范围(苏政复〔2014〕64 号),因而本文将润州区也纳入太湖流域镇江区域为研究对象。

2 数据来源与研究方法

2.1 指标体系构建及数据来源

根据定义可知,太湖流域镇江区域农村水环境承载力是一个复杂的“人-水-经济”系统,其大小状况受到工农业生产以及农村居民生活等用水、排水行为的压力约束,在此条件下农村水资源供水量和水质状况有一个状态值,据此农村水环境在一定范围内进行自我调节、社会在水量供需、水质控制方面进行水环境治理响应。这一系统作用过程可以采用经典的环境质量评价模型—PSR 模型表征,如图 1 所示。

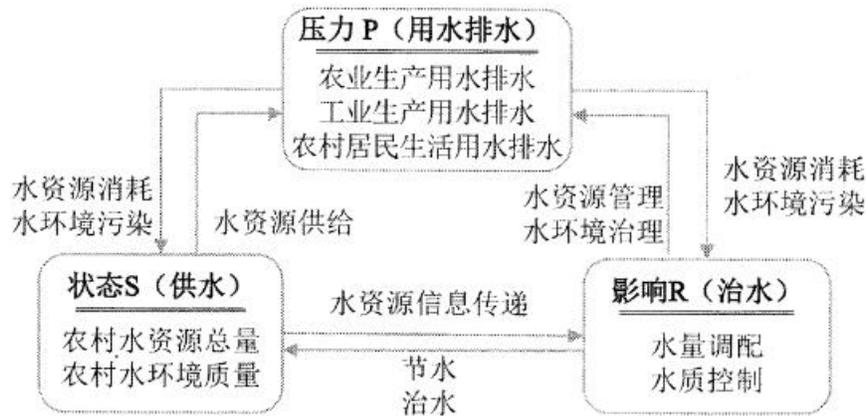


图 1 农村水环境承载力的PSR分析框架

Fig.1 The PSR Analysis Framework of Rural Water Environment Carrying Capacity

通过对上述 PSR 模型的逻辑因果关系分析, 本文将从“压力—状态—响应”的三个模块出发, 根据太湖流域镇江区域农村水环境现状和区域社会经济发展水平, 参照相关文献^[20,21], 构建太湖流域镇江区域农村水环境承载力评估指标体系, 见表 2。

表 2 太湖流域镇江区域农村水环境承载力评估指标体系

Tab.2 The Index System of Rural Water Environmental Carrying Capacity of Taihu Lake Basin in Zhenjiang

指标类型	代码	指标名称	代码	指标变量	代码	影响效应	
压力	X1	农业生产用水排水	Y1	农业灌溉平均用水量(m ³ /亩)	Z1	-	
				农作物平均农药施用量(kg/亩)	Z2	-	
				农作物平均化肥施用量(kg/亩)	Z3	-	
		工业生产用水排水	Y2	万元工业增加值用水量(m ³ /万元)	工业用水重复率(%)	Z4	-
					万元工业增加值的工业废水排放量(t/万元)	Z5	+
					农村人均生活用水量(t)	Z6	-
					农村人均生活污水排放量(t)	Z7	-
状态	X2	农村水资源供给量	Y4	水资源总量(亿m ³)	Z8	-	
				自来水普及率(%)	Z9	+	
		农村水环境质量	Y5	太湖流域重点监测断面水质现状	节水灌溉比例(%)	Z10	+
					农业灌溉有效利用系数	Z11	+
					工业耗水率(%)	Z12	+
					工业废水处理率(%)	Z13	+
					生活污水处理率(%)	Z14	-
响应	X3	水质控制	Y7	工业废水处理率(%)	Z15	+	
				生活污水处理率(%)	Z16	+	
				农田水利建设投入额占GDP比重(%)	Z17	+	
				农村水环境污染治理投资额占GDP比重(%)	Z18	+	
				疏浚县乡河道长度(km)	Z19	+	

注: +表示正效应, 其指标值越大承载力越大; -表示负效应, 其指标值越小承载力越大; 1亩=1/15hm²。

表 2 中的指标变量计算, 其数据主要来源于: 2011~2015 年期间的《江苏统计年鉴》、《镇江统计年鉴》、《镇江市水资源公报》、《镇江市环境状况公报》以及京口区、润州区、丹徒区和丹阳市《国民经济和社会发展统计公报》。为使各指标之间具有可比性, 本文采用向量模法^[22]将各指标值进行标准化处理。

2.2 研究方法

云模型是李德毅院士于1995年在概率论和模糊数学的基础上提出的一种定性与定量相互转换模型,通过期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)3个数字特征将事物的不确定性3个方面—模糊性、随机性和离散性表征出来,并实现了不确定性语言和定量数值见的自然转换^[23]。本文采用沈进昌等^[24]提出基于云模型改进的多级模糊综合评价模型,考虑太湖流域镇江区域农村水环境承载力评价指标体系的模糊性,同时也能较好地处理评价系统的随机性和离散性,从而在不确定性条件下,可合理地以太湖流域镇江区域农村水环境承载力的综合评价。

基于云模型的太湖流域镇江区域农村水环境承载力多级模糊综合评价模型,主要包括评语级云模型、权系数云模型标度以及综合评价系统云模型三个方面,每一个云模型都可以用数字特征(Ex, En, He)进行表征,其中,期望(Ex)反映云滴的重心,分别表示农村水环境承载力等级、指标因子权重和隶属度的中心值;熵(En)描述云滴的模糊性和随机性,分别表示农村水环境承载力等级、指标因子权重和隶属度的可能取值范围,一般地,En越大,模糊性和随机性越大;超熵(He)用于描述云的厚度,主要表示云滴的离散程度,分别表示农村水环境承载力等级、指标因子权重和隶属度偏离中心值的程度,一般地,He越大,云滴离散度越大,云的“厚度”越大,随机性越大。

(1) 评语云模型

根据实地调研和专家访谈,设定太湖流域镇江区域农村水环境承载力的评语级由低、中、高3个等级构成,分别对应的评价范围[0, 0.4)、[0.4, 0.7)和[0.7, 1]。对于评语的左边界[0, 0.4),本文采用半降正态云模型计算,如式(1);对于[0.4, 0.7)采用完整的正态云模型表述,如式(2);而对于评语的右边界采用半升正态云模型表述,其计算过程如式(3)。

$$\begin{cases} Ex_1 = (0 + 0.4)/2 = 0.2 \\ Ex_1 - \sqrt{\ln 8}En_1 = 0 \Rightarrow En_1 = 0.14 \\ \text{令 } He = 0.02 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Ex_2 = (0.4 + 0.7)/2 = 0.65 \\ Ex_2 - \sqrt{\ln 8}En_2 = 0.4 \Rightarrow En_2 = 0.17 \\ \text{令 } He = 0.02 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Ex_3 = 1 \\ En_3 = En_2 = 0.17 \\ \text{令 } He = 0.02 \end{cases} \quad (3)$$

基于云模型的综合评价系统太湖流域镇江区域农村水环境承载力评价体系中共有4个评价单元(京口,润州,丹徒,丹阳),19个评价因子,假设评价因子的权重系数为 $A=[a_1, a_2, \dots, a_{19}]$,每个评价单元的综合评价矩阵为 $R=[r_1, r_2, \dots, r_{19}]^T$ 。

在基于云模型的模糊综合评价中,采用云模型替代隶属函数计算相应的权重系数和评价矩阵,对此可以理解为:每个权系数都有一定的模糊性和随机性。为避免专家意见法等主观影响指标因子权重,本文在参考文献^[20]的基础上采用变异系数法来客观确定评价指

标因子的权重, 然后根据文献[23]提出的逆向云发生器模型(见式(4))计算指标因子的云模型标度, 见式(5)。

$$\left\{ \begin{array}{l} Ex = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \\ He = \sqrt{S^2 - En^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - En^2} \end{array} \right. \quad (4)$$

权系数矩阵为:

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_{19}] = \begin{bmatrix} Ex_{a_1}, En_{a_1}, He_{a_1} \\ Ex_{a_2}, En_{a_2}, He_{a_2} \\ \dots \\ Ex_{a_{19}}, En_{a_{19}}, He_{a_{19}} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

对于综合评判矩阵, 专家根据评语级云模型, 对每个指标因子做出判断, 然后将统计样本利用逆向云模型(见式(4))转换成参数(Ex, En, He), 形成综合评判矩阵, 见式(6)。

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_{19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ex_1, En_1, He_1 \\ Ex_2, En_2, He_2 \\ \dots \\ Ex_{19}, En_{19}, He_{19} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B = A \circ R &= \begin{bmatrix} Ex_{a_1}, En_{a_1}, He_{a_1} \\ Ex_{a_2}, En_{a_2}, He_{a_2} \\ \dots \\ Ex_{a_{19}}, En_{a_{19}}, He_{a_{19}} \end{bmatrix}^T \circ \begin{bmatrix} Ex_1, En_1, He_1 \\ Ex_2, En_2, He_2 \\ \dots \\ Ex_{19}, En_{19}, He_{19} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Ex_{a_1}Ex_1 + Ex_{a_2}Ex_2 + \dots + Ex_{a_{19}}Ex_{19} \\ \sqrt{\left(Ex_{a_1}Ex_1 \sqrt{\left(\frac{En_{a_1}}{Ex_{a_1}} \right)^2 + \left(\frac{En_1}{Ex_1} \right)^2} \right)^2 + \left(Ex_{a_2}Ex_2 \sqrt{\left(\frac{En_{a_2}}{Ex_{a_2}} \right)^2 + \left(\frac{En_2}{Ex_2} \right)^2} \right)^2 + \dots + \left(Ex_{a_{19}}Ex_{19} \sqrt{\left(\frac{En_{a_{19}}}{Ex_{a_{19}}} \right)^2 + \left(\frac{En_{19}}{Ex_{19}}} \right)^2} \right)^2} \\ \sqrt{\left(Ex_{a_1}Ex_1 \sqrt{\left(\frac{He_{a_1}}{Ex_{a_1}} \right)^2 + \left(\frac{He_1}{Ex_1} \right)^2} \right)^2 + \left(Ex_{a_2}Ex_2 \sqrt{\left(\frac{He_{a_2}}{Ex_{a_2}} \right)^2 + \left(\frac{He_2}{Ex_2} \right)^2} \right)^2 + \dots + \left(Ex_{a_{19}}Ex_{19} \sqrt{\left(\frac{He_{a_{19}}}{Ex_{a_{19}}} \right)^2 + \left(\frac{He_{19}}{Ex_{19}}} \right)^2} \right)^2} \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_{19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ex_1, En_1, He_1 \\ Ex_2, En_2, He_2 \\ \dots \\ Ex_{19}, En_{19}, He_{19} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

最终得到式(8),将式中的 Ex 与评语云模型的各期望值相比较,最接近的评语即为评价结果。对于同一级的评价结果,可根据 Ex 的大小进行排序, Ex_i 越大,说明承载力越大;若两者 Ex 相同,则 En 越小(稳定性越好),承载力排名越好;若 Ex, En 均相同,则 He 越小(随机性越小),承载力排名越好。

3 结果分析

3.1 压力—用水排水指标动态变化特征分析

计算太湖流域镇江区域农村水环境承载力体系中的各指标类型值,有助于分析各项指标对太湖流域镇江区域农村水环境承载力的影响力,探究其变化的主要原因和规律。在上述模型基础上,计算太湖流域镇江区域农村水环境承载力体系中压力—用水排水的指标值和各项指标的影响力,如图2所示。由图2(a)可知,2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力的压力—用水排水指标值稳中有增,但增幅有限;总体水平上看,丹阳市>丹徒区>京口区>润州区,这与丹阳市农业人口多、农业现代化水平高、工业企业发展速度快带来的用需水量大相关;从图2(b)的影响力上看,万元工业增加值的工业废水排放量 Z_6 、农作物平均农药施用量 Z_2 、农作物平均化肥施用量 Z_3 是太湖流域镇江区域农村水环境承载力体系的压力—用水排水指标变化的主要影响因素。

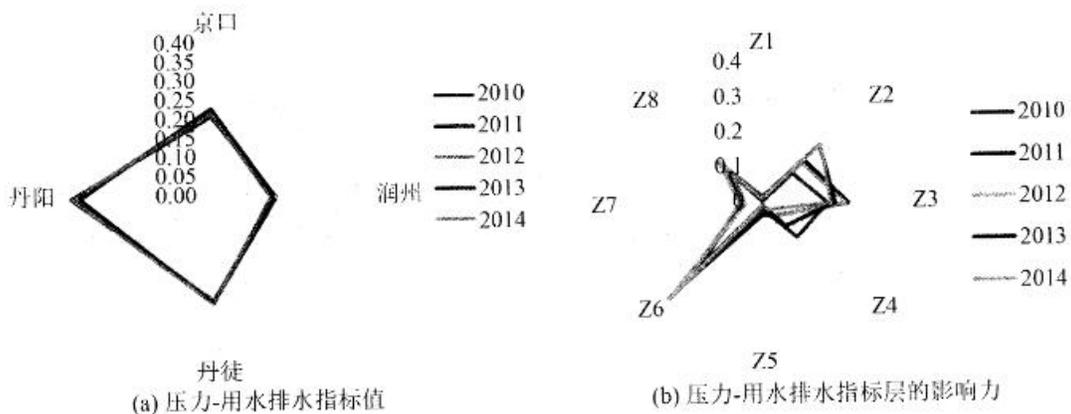


图2 2010~2014年压力-用水排水指标层动态变化分析

Fig.2 Dynamic Change Analysis of Pressure-water Drainage Index Layer During 2010-2014

3.2 状态—供水指标动态变化特征分析

计算太湖流域镇江区域农村水环境承载力体系中状态—供水的指标值和各项指标的影响力,如图3所示。由图3(a)可知,2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力的状态—供水指标值基本上处于平稳状态;总体水平上看,丹阳市>润州区>京口区>丹徒区,

这主要归因于太湖流域镇江区域的主要水系在丹阳地区；从图 3(b) 的影响力上看，水资源总量 Z_9 > 水质现状 Z_{11} > 自来水普及率 Z_{10} 。

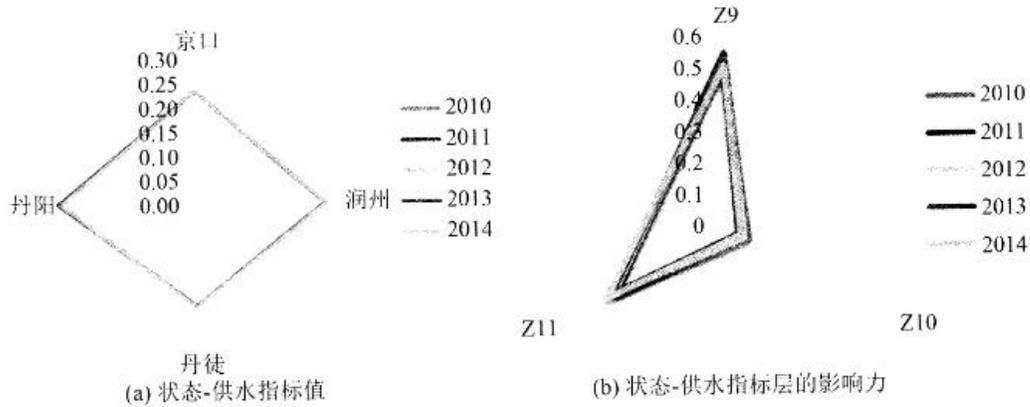


图 3 2010~2014年状态-供水指标层动态变化分析

Fig.3 Dynamic Change Analysis of State-water Supply Index Layer During 2010-2014

3.3 响应—治水指标动态变化特征分析

计算太湖流域镇江区域农村水环境承载力体系中响应—治水的指标值和各项指标的影响力，如图 4 所示。由图 4(a) 可知，2010~2014 年太湖流域镇江区域农村水环境承载力的状态—供水指标值基本上处于平稳状态；总体水平上看，润州区 > 丹徒区 > 京口区 > 丹阳市，这与润州区近年来大力推进水利投入、农田水利基础建设、农村生态文明建设密切相关；从图 4(b) 的影响力上看，疏浚县乡河道长度 Z_{19} 、农村水环境污染治理投资额占 GDP 比重 Z_{16} 和农田水利建设投入额占 GDP 比重 Z_{17} 是太湖流域镇江区域农村水环境承载力的响应—治水指标值变动的主要影响因素。

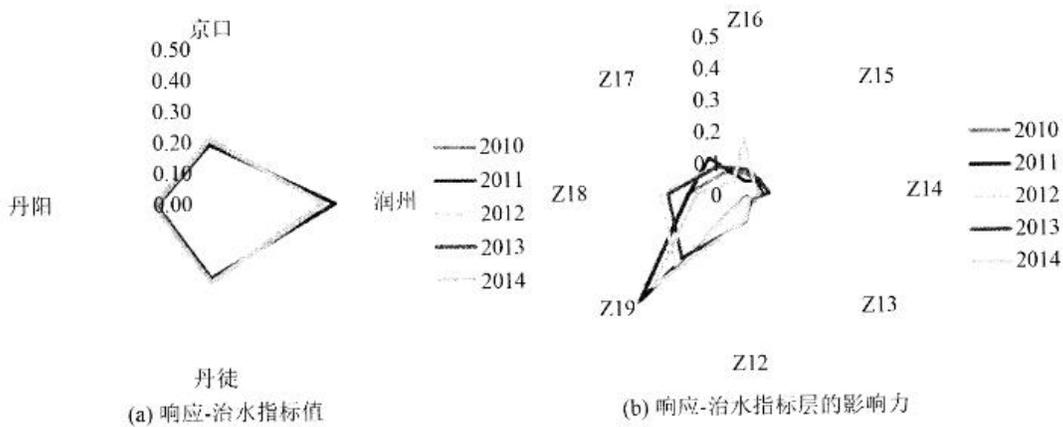


图 4 2010~2014年响应-治水指标层动态变化

Fig.4 Dynamic Change Analysis of Response - water Treatment Index Layer During 2010-2014

3.4 农村水环境承载力动态变化特征分析

在上述各指标层动态变化分析的基础上,计算太湖流域镇江区域农村水环境承载力的综合评价价值,见表3。根据云模型结果的排序规则可知,2010~2013年太湖流域镇江区域农村水环境承载力评价价值总体呈现逐年提高的趋势,至2014年有些回落,这和2014年太湖流域镇江区域地区经济发展进入新常态息息相关;但整体上而言,2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力评价价值总体水平一直较低,处于评语级的低水平段[0, 0.4]之间,归根结底除了太湖流域镇江区域的整体经济发展水平较太湖流域地区总体偏低以外,还与该地区的工业企业布局规划、农村产业结构相关;就各地区的评价价值比较而言,丹阳>丹徒>润州>京口,这主要归因于丹阳地区的经济总量和工业发展状况整体较优于其他地区,尤其京口区主要的工业企业以化工为主,污水排放量大,因而农村水环境承载压力较高于其他地区;从各评价价值看,Ex最终对太湖流域镇江区域农村水环境承载力的等级排序起到了主导作用,En、He均很小,表明2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力的稳定性较好、波动较小。

表3 2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力综合评价价值

Tab.3 Evaluation Value of Water Environmental Carrying Capacity of Taihu Lake Basin in Zhenjiang During 2010-2014

地区	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
京口	(0.200, 0.105, 0.005)	(0.204, 0.105, 0.005)	(0.217, 0.104, 0.004)	(0.223, 0.105, 0.004)	(0.207, 0.105, 0.005)
润州	(0.246, 0.112, 0.007)	(0.248, 0.113, 0.008)	(0.222, 0.106, 0.006)	(0.216, 0.104, 0.006)	(0.235, 0.111, 0.007)
丹徒	(0.250, 0.116, 0.008)	(0.248, 0.116, 0.009)	(0.251, 0.113, 0.006)	(0.255, 0.112, 0.006)	(0.254, 0.116, 0.008)
丹阳	(0.263, 0.122, 0.009)	(0.257, 0.122, 0.009)	(0.276, 0.120, 0.006)	(0.273, 0.120, 0.006)	(0.268, 0.122, 0.008)

将以上评价结果采用正向云发生器来表现,并通过Matlab仿真显示,见图5。由此可以更清晰地看出2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力总体上处于稳中上升的状态,各评价价值稳定性较好,波动小,且以2014年为例,太湖流域镇江区域农村水环境承载力呈现丹阳>丹徒>润州>京口的状态(见图6)。

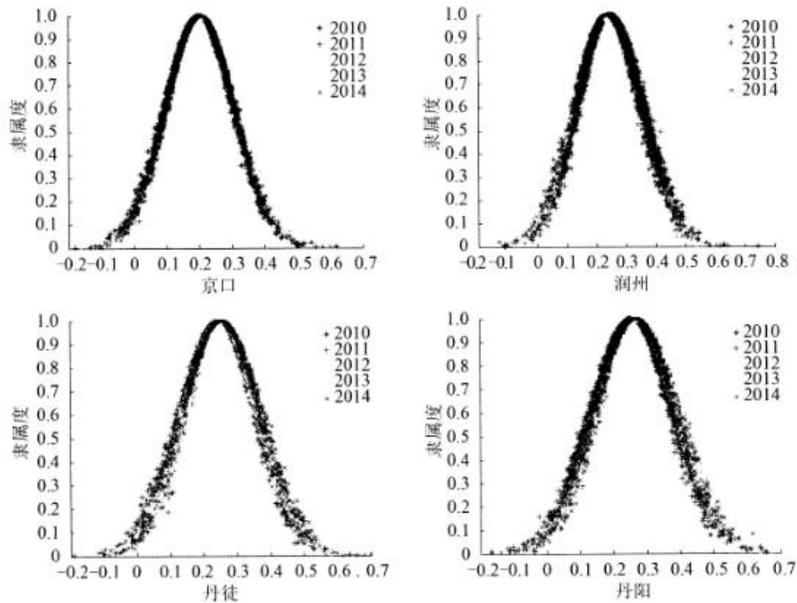


图5 2010~2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力评价云模型

Fig.5 Cloud Model of Rural Water Environmental Carrying Capacity Evaluation of Taihu Lake in Zhenjiang During 2010-2014

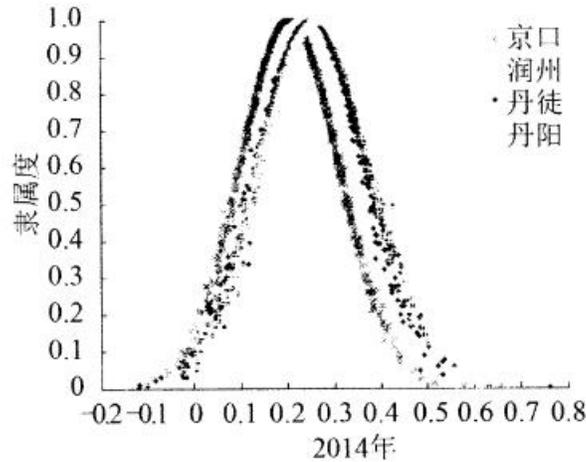


图 6 2014年太湖流域镇江区域农村水环境承载力评价云模型

Fig.6 Cloud Model of Rural Water Environmental Carrying Capacity Evaluation of Taihu Lake in Zhenjiang in 2014

4 结论与建议

基于云模型对太湖流域镇江区域农村水环境承载力计算, 得到以下结论和建议:

(1) 通过云模型改进太湖流域镇江区域农村水环境承载力多级模糊评价, 计算太湖流域镇江区域农村水环境承载力体系中压力-用水排水、状态-供水、响应-治水的指标值及其影响力发现: 万元工业增加值的工业废水排放量、农作物平均农药施用量和农作物平均化肥施用量是压力-用水排水指标变化的主要影响因素; 影响状态-供水指标变化优先顺序是水资源总量>水质现状>自来水普及率; 而疏浚县乡河道长度、农村水环境污染治理投资额占 GDP 比重和农田水利建设投入额占 GDP 比重是响应-治水指标值变动的主因。可见, 农村水环境承载力对太湖流域镇江区域的工农业废水排放、供水总量和治水投入的要求更高, 农村水环境将是制约太湖流域镇江区域经济社会发展、生态建设的关键因素。

(2) 2010~2014 年太湖流域镇江区域农村水环境承载力总体处于稳中上升的趋势, 且丹阳>丹徒>润州> 京口, 但是随着经济发展进入新常态, 2014 年承载力均变小, 且 2010~2014 年总体水平处于弱承载状态, 需要及时调整农村经济产业结构、合理规划地区工业发展布局、加强农村水环境治理行动, 避免农村水资源需求日益增加的同时水环境压力增大, 为农村社会经济发展和生态文明建设打下坚实基础。

参考文献:

[1] 闫丽珍, 石敏俊, 王 磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 99 - 107.

【YAN L Z, SHI M J, WANG L. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu Basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(1): 99 - 107.】

[2] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58 - 62.

【CUI F J. The carrying capacity of municipal water environment and its case study[J]. Journal of Natural Resources, 1998, 13(1): 58 - 62.】

[3] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262 - 269.

【XIA J, ZHU Y Z. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262 - 269.】

[4] 严子奇, 夏军, 左其亭, 等. 淮河流域水环境承载能力计算系统的构建[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1150 - 1157.

【YAN Z Q, XIA J, ZUO Q T, et al. Computing system construction of water environment carrying capacity in Huaihe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(7): 1150 - 1157.】

[5] 李贵宝, 周怀东, 王东胜. 我国农村水环境及其恶化成因[J]. 中国水利, 2003(14): 47 - 48, 60.

【LI G B, ZHOU H D, WANG D S. Water environment condition in rural areas and causes of its worsening[J]. China Water Resources, 2003(14): 47 - 48, 60.】

[6] 赵卫, 刘景双, 苏伟, 等. 辽宁省辽河流域水环境承载力的多目标规划研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1): 73 - 77.

【ZHAO W, LIU J S, SU W, et al. Studies on multi-objective programming of water environmental carrying capacity (WECC) in Liaohe Watershed[J]. China Environmental Science, 2008, 28(1): 73 - 77.】

[7] 石建屏, 李 新. 滇池流域水环境承载力及其动态变化特征研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1777 - 1784.

【SHI J P, LI X. Water environment carrying capacity in Dianchi Lake basin and its dynamic variation characteristics[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(7): 1777 - 1784.】

[8] 刘树锋, 陈俊合. 基于神经网络理论的水资源承载力研究[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 99 - 105.

【LIU S F, CHEN J H. Water resources carrying capacity based on the theory of ANN[J]. Resources Science, 2007, 29(1): 99 - 105.】

[9] 秦克丽. 区域水环境承载力评价模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 86 - 89.

【QIN K L. Evaluation model of regional water environment carrying capacity based on RAG-PPE[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 86 - 89. 】

[10] 王顺久, 杨志峰, 丁 晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 104 - 110.

【WANG S J, YANG Z F, DING J. Projection pursuit method of comprehensive evaluation on groundwater resources carrying capacity in Guanzhong plain[J]. Resources Science, 2004, 26(6): 104 - 110. 】

[11] 范英英, 刘 永, 郭怀成, 等. 北京市水资源政策对水资源承载力的影响研究[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 113 - 119.

【FAN Y Y, LIU Y, GUO H C, et al. The effects of water resources policies on water resources carrying capacity in Beijing City[J]. Resources Science, 2005, 27(5): 113 - 119. 】

[12] 焦露慧, 吴 巍, 周孝德, 等. 资源性缺水地区流域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015(6): 77 - 82.

【JIAO L H, WU W, ZHOU X D, et al. Evaluation model and application of water environmental carrying capacity in basins short of water resources[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015(6): 77 - 82. 】

[13] 姜大川, 肖伟华, 范晨媛, 等. 武汉城市圈水资源及水环境承载力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 761 - 768.

【JIANG D C, XIAO W H, FAN C Y, et al. Research on water resources and water environment carrying capacities of Wuhan City Circle[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(5): 761 - 768. 】

[14] 耿雅妮. 基于向量模法的西安市水环境承载力研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 168 - 172.

【GENG Y N. Water environmental carrying capacity in Xi' an city based on vector norm method[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 168 - 172. 】

[15] 来雪慧, 王小文, 徐杰峰, 等. 基于向量模法的陕南地区水环境承载力评价[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 56 - 59, 78.

【LAI X H, WANG X W, XU J F, et al. Evaluation of water environment carrying capacity in southern Shaanxi Province based on vector norm method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 56 - 59, 78. 】

[16] 李磊, 贾磊, 赵晓雪, 等. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 456 - 460.

【LI L, JIA L, ZHAO X X, et al. Application of the AHP and entropy weight method in evaluation on city water

environmental carrying capacity[J]. Resource and environment in Yangtze River Basin, 2014, 23(4): 456 - 460.】

[17] 马红娟, 史西专, 刘万里. 基于熵权法和多层次分析法的水环境模糊综合评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2015(6): 154 - 164.

【MA H J, SHI X Z, LIU W L. Research on fuzzy comprehensive evaluation of water environment based on entropy method and fuzzy analytic hierarchy process method[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015(6): 154 - 164.】

[18] 张妍, 尚金城, 于相毅. 主成分-聚类复合模型在水环境管理中的应用——以松花江吉林段为例[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 592 - 595.

【ZHANG Y, SHANG J C, YU X Y. Application of principal component-cluster analysis complex model to water environment management: case study in Songhua River in Jilin section as an example[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 592 - 595.】

[19] 童纪新, 顾希. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015(1): 122 - 125.

【TONG J X, GU X. Study on water resources carrying capacity in Nanjing based on principal component analysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015(1): 122 - 125.】

[20] 崔兴齐, 孙文超, 鱼京善, 等. 河南省近十年水环境承载力动态变化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 359 - 362.

【CUI X Q, SUN W C, YU J S, et al. Research on dynamic change of water environment carrying capacity in Henan province during last ten years[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(S2): 359 - 362.】

[21] 陈海涛. 太湖流域近 20 年水环境承载力动态评价[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(12): 2186 - 2192.

【CHEN H T. Dynamic assessment on water environmental carrying capacity in Taihu Lake Watershed in past 20 years[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(12): 2186 - 2192.】

[22] 邢有凯, 余红, 肖杨, 等. 基于向量模法的北京市水环境承载力评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(4): 1 - 3, 9.

【XING Y K, YU H, XIAO Y, et al. Water environmental carrying capacity evaluation in Beijing City with vector norm method[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(4): 1 - 3, 9.】

[23] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15 - 20.

【LI D Y, MENG H J, SHI X M. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15 - 20.】

[24] 沈进昌, 杜树新, 罗 祎, 等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学, 2012, 26(6): 115 - 123.

【SHEN J C, DU S X, LUO Y, et al. Method and application research on fuzzy comprehensive evaluation based on cloud model[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2012, 26(6): 115 - 123.】