

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2016. 01. 004

基于风险的济南市水生态安全评价

陈 磊,吴悦菡,王 培,沈珍瑶

(北京师范大学环境学院,北京 100875)

摘要:为更准确全面地评价区域水生态安全,在传统的水生态安全评价方法的基础上引入了风险因素,探讨了基于风险的水生态安全的含义、特点和内容。以济南市为例,基于层次分析法,从风险、状态和响应 3 个方面建立了区域水生态安全评价指标体系,并结合综合指数法与模糊综合评判法的评价结果,最终给出各区域的安全状态。结果表明,济南市安全度居中,改变区域生态现状并采取有效措施控制其演变趋势,对区域水生态安全有重要意义,所提出的基于风险的水生态安全评价方法切实可行,可为其他区域水生态安全研究提供科学依据。

关键词:风险;水生态安全;安全评价;综合指数法;等级划分法;模糊综合评判法;优势因子;限制因子;济南市

中图分类号:X820. 4 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2016)01 - 0029 - 07

Risk-based safety assessment of water ecology in Jinan City

CHEN Lei, WU Yuehan, WANG Pei, SHEN Zhenyao

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To evaluate the water ecological safety at the regional scale, risk factors are introduced to improve the traditional evaluation method. The concept, characteristics and content of water security is also discussed. Jinan city was taken as the study case. Security evaluation index system of regional water ecological was established based on the Analytic Hierarchy Process from the aspects of risk, state and response. By coupling the evaluation results of quantitative comprehensive index method and qualitative fuzzy comprehensive method, the safety of each region were analyzed. The results showed that Jinan City faced medium security condition, and measures are suggested to control evolution trend and improve water ecological status. In sum, the new method is feasible and can provide a scientific basis for the safety evaluation of the regional water ecology.

Key words: risk; water ecological security; safety assessment; comprehensive index method; hierarchy classification method; fuzzy comprehensive method; dominant factor; limiting factor; Jinan City

随着全球对水安全问题的日益重视,水生态安全已成为关系人类经济、社会和环境可持续发展的重大问题^[1]。水生态系统安全是一个整合的新概念,目前国内外关于水生态安全的研究主要集中于概念提出及安全评价^[2]。从概念上看,国内流域水生态安全研究尚不成熟,相关理论仍处于探索阶段,尤其是概念界定上依然存在争议;从方法上看,国内对水生态安全的研究多集中在指标体系构建,具体方法包括模糊物元分析法、模糊优选模型法、水贫穷指数法等^[3],但受“压力-状态-响应”(PSR)模型的局限,少有从流域水环境整体角度出发,考虑多风险源和多胁迫因子及其整体相互关系的研究。虽有研究在考虑风险影响的基础上,应用三角模糊数原理开展区域水安全状况评价^[1],但未考虑各区域差异

基金项目:国家自然科学基金(51579011)

作者简介:陈磊(1982—),男,副教授,博士,主要从事流域非点源污染模拟与控制、城市降雨径流污染控制、流域综合管理等研究。E-mail: chenlei1982bnu@bnu.edu.cn

性及风险滞后性。针对这些局限性,笔者从广义范围内的生态安全范畴出发,结合水这一自然要素的特点和特殊性,对水生态安全从风险角度进行了重新定义;在此基础上,以济南市为典型城市案例,通过基于风险因素的水生态安全评价指标体系,探寻其区域水生态问题,旨在为我国大中城市水生态安全评价和分析提供参考。

1 研究方法

1.1 水生态安全评价及改进

风险是指遭受损失、损伤、毁坏的可能性,可以作为安全或者危险的一种定性或定量的度量^[4]。安全具有动态性,安全状态表现为一个动态过程。演变的发展在于是否存在和引发风险,因此,从风险角度定义的水生态安全应该是一个关于安全主体的存在风险与否、安全状态现况、安全演变趋势的函数。从概念上来看,水生态安全既包括水生态复合系统的现状安全状态,又表现为不存在不安全的演变趋势;从过程上来看,水生态安全包括风险的引发传递和响应控制两个交互的过程。“风险爆发-危害传递-响应控制”过程决定了水生态安全的演变,其中决策者可通过响应控制在很大程度上改善不安全演变趋势。可见风险贯穿于水生态安全的全过程,时时刻刻影响着水生态安全的状态和发展。因此,水生态安全因素分析必须包括风险因素分析,只有充分识别和消除最大可能风险,才能及时掌握水生态安全的演变趋势,有效控制其恶化。

与常规的水生态安全评价内容不同的是,基于风险的水生态安全评价内容除了包括水生态系统结构评价、功能评价外,还包括系统风险防控和修复能力评价。根据安全理论,引入风险因素后的水生态安全评价应具有如下特点:①警示性。风险是水生态安全状态演变的可能性,风险分析应能够进行水生态安全的趋势预警;②动态性。考虑风险种类及其发生概率的变化,引入风险因素进行评价,相关评价指数代表了水生态安全演变和不确定性;③空间差异性。某区域的空间风险不仅来源于区域自身,还应来源于周围相邻区域,常规的评价并未考虑此影响;④人为操作性。根据评价结果分析,若存在的风险尚未影响水生态安全,可及时采用预防措施,避免风险的引发和传递;若存在的风险具有一定发生概率且会影响水生态安全,应立即采取应急预案,将风险可能会造成的危害和损失降到最低。

1.2 评价方法

水生态安全评价内容主要包括评价复合水生态系统是否安全和如何维持其安全,常用的评价模式

为暴露响应分析模式和综合指数评价模式。笔者根据各方法特点,选取模糊综合评判法及综合指数法分别对水生态安全系统进行评价,并将评价结果一一对应,建立耦合关系。首先,采用侧重于现状评价的综合指数法和侧重于风险评价的等级划分法分别进行评价,并将两种结果对比验证,再通过模糊综合评判法对评价结果进行补充。通过以上方法,得到基于风险的区域水生态的总体状况和安全水平(图1)。

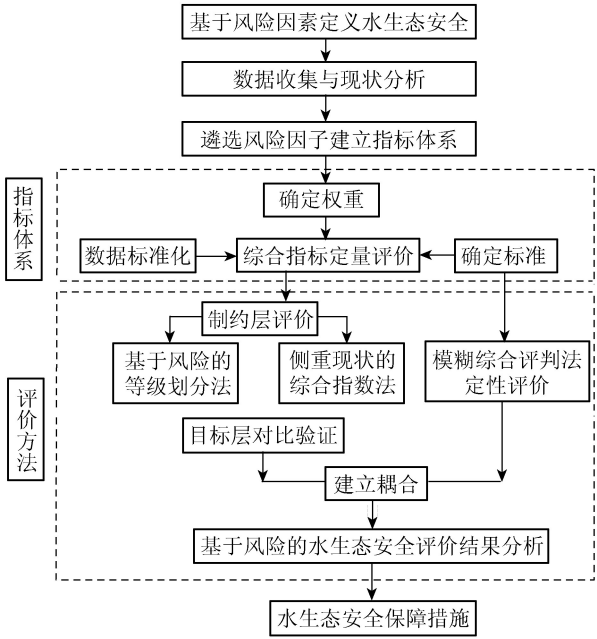


图1 基于风险的水生态安全评价流程

1.2.1 数据收集与风险因子遴选

要充分掌握生态环境系统的安全和完整性,需从不同角度同时选取多个指标。从研究区域的地形气候情况、水资源特点及现存生态环境问题出发,分析主要存在的风险因子(常规风险因子和具有“一票否决制”的特殊因子)。收集降水量、流量、水位、水质等各类数据,并根据客观性、代表性、简洁性、可操作性的原则对指标进行遴选。在此基础上,根据野外考察和调研资料选取出最有代表性和最有影响力的因子;对选出的风险因子进行自相关分析,去除研究时间内无明显变化的指标;根据专家打分情况汇总,选用排名较高的指标。

1.2.2 风险-现状综合评价指标体系构建

1.2.2.1 确定权重

首先,根据评价对象各组成部分之间的相互关系,采用层次分析法进一步将流域水生态安全分为目标层、准则层(制约层)、要素层及指标层4个层次,每个层次分别选择反映其主要特征的要素作为评价指标。结合流域实际情况,列出综合判断矩阵,计算出不同层次的各指标的权重。

然后,为验证层次总排序计算结果的可靠性进

行一致性检验。文献表明,当 $CR = CI/RI < 0.1$ 时,可认为权重的计算结果可接受^[5]。

1.2.2.2 评价标准确定及数据标准化

生态安全评价研究的关键环节是建立科学的评价标准与指标体系^[6]。在评价过程中,评价标准主要应用于模糊综合评判时,作为专家评判打分的参考比较;评价结果分析时,用于优势因子、限制因子的遴选,将各指标数据与标准值进行比较。为了综合评价,在对不同量纲指标的初始数据进行标准化处理时,将所有的指标数值统一量纲,使指标的数值越大,反映出的水生态安全性越高。

1.2.3 模糊综合评判法评价

水生态安全是一个复杂的、没有严格界限划分、很难用精确尺度来刻画的模糊现象,水生态安全复合系统具有“模糊性”和“多属性”的特征,因此水生态安全评价是一种多属性或多准则的评价问题。模糊综合评判法是一种运用模糊变换原理分析和评价模糊系统的分析评判方法,它以模糊推理为主,定性与定量相结合,准确与非准确相统一,适合于复杂多要素的水生态安全系统的综合性研究。

其具体评价步骤为:①设置指标体系。为保证评价的可比性,基于层次分析法和风险因素建立水生态安全评价体系;②确定评价集合。根据评价决策的实际需要,将评判等级标准分为“不安全”、“较不安全”、“一般”、“较安全”、“安全”5个等级(表1),即评价集合为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{不安全, 较不安全, 一般, 较安全, 安全}\}$,并依据水生态安全指标体系中的风险、状态和响应3方面对不同等级的水生态安全特征给予描述;③确定评价要素权重子集。采用1.2.2计算权重法中的层次分析法确定权重;④实施评判。根据评判对象的各种实际资料及数据,采用模糊数学和精确数学方法对各个评价指标进行估算,然后根据已确定的评价等级标准

表1 水生态安全等级判别标准^[8]

等级	复合水生态系统特征
不安全	生态环境受到严重破坏,生态系统结构残缺不全,服务功能几近崩溃,无响应措施或措施无效,面临的生态风险经常演变成生态灾害
较不安全	生态环境受到较大破坏,生态系统结构破坏较大,服务功能严重退化,面临风险较大,有一定响应措施但改善效果极差,受干扰后恢复困难,生态灾害较多
一般	生态环境受到一定破坏,生态系统结构有变化,服务功能已有退化但尚可维持基本功能,受生态风险干扰后易恶化,有响应措施亦可修复,生态灾害时有发生
较安全	生态环境较少受到破坏,生态系统结构尚完整,服务功能较为完善,一般干扰下可恢复,面临生态风险较小且响应措施能及时有效控制,生态灾害不大
安全	生态环境基本未受干扰破坏,生态系统结构完整,服务功能性强,系统恢复再生能力强,面临生态风险较小,且有较完善的响应控制措施,生态灾害少

(表1)依次对各个指标进行评价。分别得出各子集 $D_i(i=1,2,3)$ 中单要素的评价决策矩阵 $R_i(i=1,2,3)$,然后由各单要素的权重 A_i 和评价决策矩阵 R_i 经过合成运算即可得到要素层评价决策矩阵 C_i ,依次向上推,即可得到水生态安全的模糊综合评价结果 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)^{[7]}$ 。

1.2.4 综合指数法评价

1.2.4.1 侧重现状的综合指数评判法

通过下层指标归一化数值与各项指标的权重,进行对应的上层指数的评估数值计算,可以合并得到指标对应的上级指数的评估数值。

$$S = \sum_{i=1}^k \omega_i A_{k,i} \tag{1}$$

式中: S 为综合评价值; $A_{k,i}$ 为 $n \times m$ 阶矩阵, $k=1,2,\dots,n; i=1,2,\dots,m; n$ 为评价指标的个数; m 为评价单元的个数; ω_i 为指标权重。

显然可通过取不同的 k, i 值来计算不同评价单元各个评价层次的水安全综合指数^[9],如水生态安全、水生态响应、水生态风险、水生态状态等。

1.2.4.2 基于风险的等级划分法

为评价各区的水生态安全存在的风险和现状,将水生态风险和水生态现状分别划分为5级^[10]。设水生态现状指数为 S ,其中 S1 级、S2 级、S3 级、S4 级、S5 级分别代表水生态现状最安全、较安全、中等安全、较不安全、不安全;设水生态风险指数为 R ,其中 R1 级、R2 级、R3 级、R4 级、R5 级分别为风险最小、较小、中等、较大、最大。以此对研究区域进行具体划分。

1.2.5 建立耦合关系并分析结果

水生态安全的状态和发展趋势受风险和响应的耦合影响,不同安全现状在不同的风险威胁下安全性不同。将水生态状态和水生态响应评价结果定义为现状指数,水生态风险评价结果定义为风险指数。在两者之间建立耦合关系,其结果定义为基于风险的水生态安全等级。将模糊评判法中的评判子集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{不安全, 较不安全, 一般, 较安全, 安全}\}$ 与综合指数法中划分的等级一一对应,将水生态安全动态评价结果划分为9级,即Ⅰ级、Ⅱ级为安全,Ⅲ级、Ⅳ级为较安全,Ⅴ级、Ⅵ级为一般,Ⅶ级、Ⅷ级为较不安全,Ⅸ级为不安全,如表2所示。在水生态安全现状评价和风险评价基础上求得综合安全性,体现了生态安全在不确定性因素影响下的动态演变过程和演变趋势,可以为生态安全响应预警提供判断、决策依据。

表 2 水生态安全动态评价级别

状态响应级别	风险级别				
	R1 级 (最小)	R2 级 (较小)	R3 级 (中等)	R4 级 (较大)	R5 级 (最大)
S1 级(最安全)	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
S2 级(较安全)	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级
S3 级(中等安全)	III 级	IV 级	V 级	VI 级	VII 级
S4 级(较不安全)	IV 级	V 级	VI 级	VII 级	VIII 级
S5 级(不安全)	V 级	VI 级	VII 级	VIII 级	IX 级

2 济南市水生态安全研究

2.1 研究区概况及数据来源

济南市地处中纬度内陆区(图 2),鲁中山地的北缘与山前倾斜平原的交接带,地势南高北低,变化显著,绝对标高在 500~700 m,其市区位于低山丘陵与平原的交接地带。济南市水资源有以下几个特点:①水资源补给年内、年际变化大,年内降水量不足;②水资源地域分布不均;③水资源结构以地下水为主,泉水为济南水资源的特色;④人均水资源占有量少;⑤用水效益较高,但当地水资源开发利用结构不合理,地下水资源开发过度,黄河客水和当地地表水利用不足。济南市是一座融泉、湖、河、地下水为一体的供水城市,市域共有河流 50 余条,分属黄河、小清河、海河三大流域,地下水种类繁多且资源丰富。济南市丰富的水资源背景及七大区域的空间分异性使之涵盖多种水生态风险因子,因此将济南市选作典型城市进行研究。

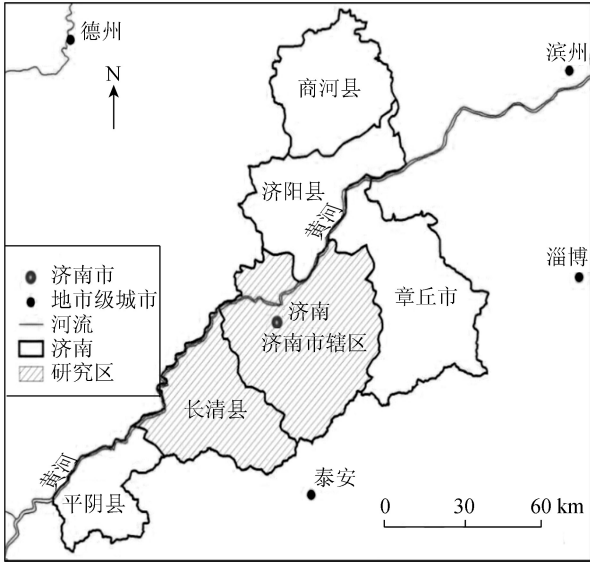


图 2 研究区位置

文中统计数据,如人均水资源量、年降水量、植被覆盖率、城市人均绿地面积、工业用水重复率、环保投资占 GDP 比重等,主要来源于《济南 2005 年统计年鉴》《2005 年济南市水资源公报》、济南市水质评价报告、环境质量公告及各区统计年鉴;概率统计

数据,如洪涝灾害比例、旱灾比例等,采用华北、东北近 500 年旱涝史料中济南部分、山东省洪涝灾害记录经整理计算而得;景观类指数,如景观破碎度、景观多样性指数,由遥感解译获得。

2.2 权重确定

依据基于风险的水生态安全内容及层次分析法,结合济南市水生态安全现状及其地下水、地表水和泉水的水域特色,列出综合判断矩阵,计算不同层次各指标的权重,构筑基于风险的济南市水生态安全评价指标体系(表 3)。经计算 $CR = CI/RI = 0.021\ 363/0.303\ 156 = 0.070\ 469 < 0.1$,可见各层指标的权重取值较为合理。

表 3 水生态安全评价指标体系

目标层	制约层	要素层	指标层
水生态安全综合指数 A	水生态风险 B ₁	自然界风险 C ₁	{ 洪涝所占比例 D ₁ 旱灾所占比例 D ₂
		人类活动风险 C ₂	{ 水土流失面积率 D ₃ 地下水开采模数 D ₄ 景观破碎度指数 D ₅
	水生态状态 B ₂	水质 C ₃	{ 饮用水源达标率 D ₆ 工业废水排放强度 D ₇ 生活污水排放强度 D ₈ 地表水体氨氮质量浓度 D ₉ 地表水体 COD 质量浓度 D ₁₀
		水量 C ₄	{ 人均水资源量 D ₁₁ 年降水量 D ₁₂ 地下水年平均下降量 D ₁₃ 泉群喷涌率 D ₁₄ 防洪标准 D ₁₅
		生态 C ₅	{ 城市人均绿地面积 D ₁₆ 植被覆盖率 D ₁₇ 景观多样性指数 D ₁₈
	水生态响应 B ₃	状态改善 C ₆	{ 工业废水排放达标率 D ₁₉ 水土流失治理率 D ₂₀
		利用效率 C ₇	工业用水重复率 D ₂₁

2.3 评价方法

2.3.1 模糊综合评判法定性评价

利用模糊科学的模糊综合评判法,分别得到济南市风险—现状综合评价指标体系要素层诸要素的评判决策矩阵,与权重向量合成运算,得到制约层的综合评判结果为

$$B_1 = [19/74\ 5/16\ 20/77\ 5/52\ 1/26]$$
$$B_2 = [1/3\ 5/19\ 11/56\ 8/59\ 5/88]$$
$$B_3 = [1/15\ 5/59\ 2/23\ 3/38\ 1/31]$$

与制约层权重向量合成运算,得到 2005 年济南市的水生态安全评判结果: $A = \bar{A} \cdot R = (0.254\ 9, 0.222\ 2, 0.272\ 7, 0.104\ 7, 0.042\ 6)$ 与评判等级对应。上述结果表明,济南市水生态安全呈一般状况。

3.3.2 综合指数及等级划分法定量评价

利用综合指数法进行评价,得出 2005 年济南市及各区水生态安全综合指数计算结果,以图表显示(图 3)。

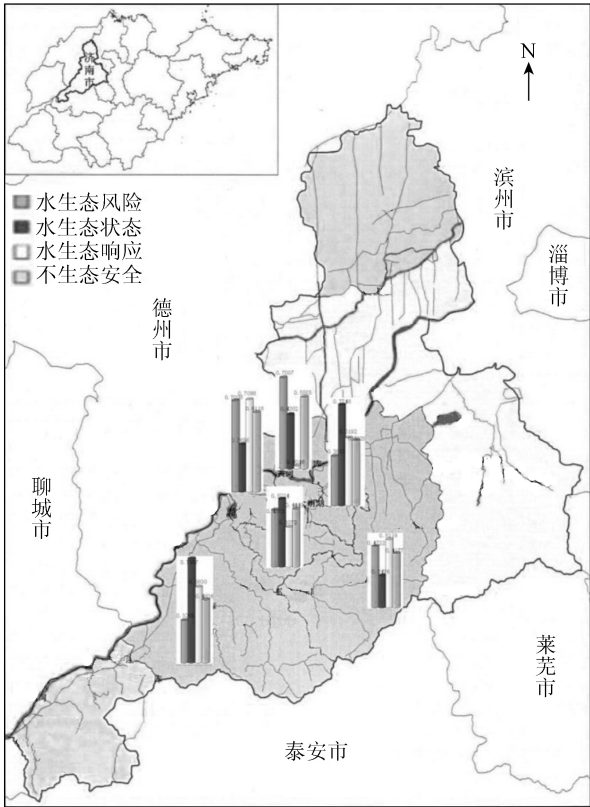


图3 济南市及各区水生态安全综合指数

由图3可见,天桥区面临的水生态风险最小,历下区风险最大。长清区水生态状态最好,历下区次之,历城区最差。天桥区的水生态响应最差,槐荫区最好。整体来看,槐荫区水生态安全状况最好;天桥区、历下区、济南市、长清区接近且都在0.45~0.60之间,安全状态中等;市中区、历城区都低于0.45,安全性较差。

等级划分法的结果为:槐荫区水生态安全状况为Ⅳ级,天桥区、历下区、济南市、长清区为Ⅴ级、Ⅵ级,市中区、历城区为Ⅶ级、Ⅷ级(表4)。整体来看,综合指数法与等级划分法的评价结果较为接近,各区的水生态安全排序也较为一致。可以看出,唯有济南市和长清区水生态安全的数值大小与安全等级不一致,主要在于两种方法的侧重有所不同:等级划分法更侧重于风险的影响,把状态和响应合为一类;而综合指数法中虽然风险的权重较大,但其侧重于风险、状态和响应的独立性,更突出响应的作用。

表4 两种方法评价结果对比

区域	水生态安全	
	综合指数法结果	等级划分法结果
槐荫区	0.6118	Ⅳ级
天桥区	0.5505	Ⅴ级
历下区	0.5029	Ⅴ级
长清区	0.4836	Ⅴ级
市中区	0.4449	Ⅶ级
历城区	0.4177	Ⅷ级
济南市	0.4897	Ⅵ级

2.3.3 综合评判结果

分析得出考虑风险因素的济南市及6区的水生态现状安全程度,见表5。

表5 济南市及各区水生态安全等级

区域	水生态安全	
	级别	评判结果
槐荫区	Ⅳ级	较安全
天桥区	Ⅴ级	一般
历下区	Ⅴ级	一般
长清区	Ⅴ级	一般
市中区	Ⅶ级	较不安全
历城区	Ⅷ级	较不安全
济南市	Ⅵ级	一般

各区水生态安全评判结果与综合指数计算分析结果基本一致,槐荫区状态最佳;历下区、天桥区、济南市、长清区次之,状态一般;市中区、历城区接近,处于较不安全状态。由此也验证了耦合关系建立较为合理。

2.4 济南市水生态安全总体评价

由于无泉水断流的“一票否决制”因素的影响,济南市水生态安全状态没有恶化,但在控制风险、改善状态上还存在一定的问题。从各区来看,槐荫区水生态状态较安全,天桥区、长清区、历下区一般;市中区、历城区水生态状态较不安全;济南市存在着水资源量不足,化肥农药不合理使用等水生态安全问题,主要原因有工业结构和产业布局不合理,城市环境保护基础设施建设较薄弱及城市生态建设和保护相对滞后等(图4)。

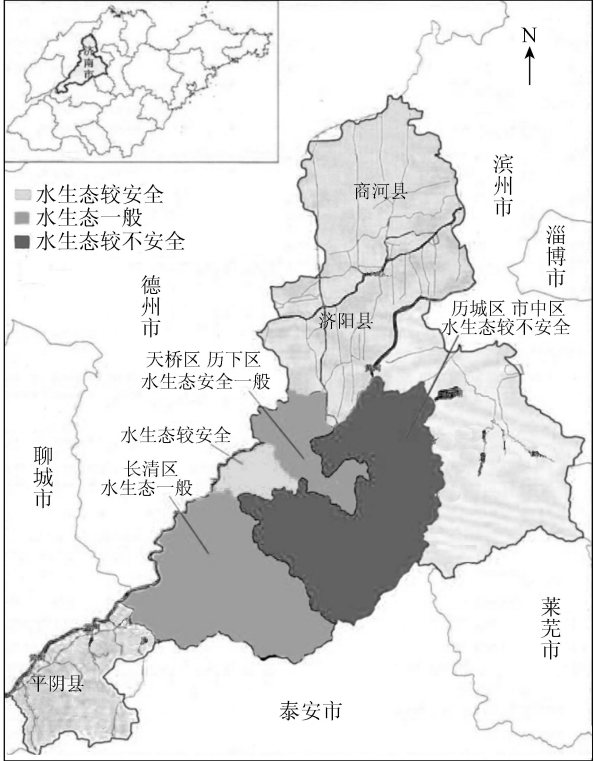


图4 水生态安全结果分区

2.5 济南市水生态安全趋势分析

在此基础上,对2002年、2005年、2007年和2010年的水生态安全状态进行趋势分析,结果见图5。可见,济南市水生态状态逐年改善,响应措施力度和效果也逐年加大,由此有效地控制了风险的引发和传递,水生态安全呈良性发展,且具有安全的演变趋势,其中2005年和2007年在状态和响应措施上差距不是很大,但在面临的风险上有很大差距,说明2007年对水生态风险有了明显的控制,同时也说明水生态安全的发展或演变不是瞬间演变的结果,具有显著的动态性和一定的滞后性。总体来看,2002—2007年间济南市的水生态风险逐年加大,且增大幅度明显增大,2007—2010年间,风险的增长幅度减小,主要原因在于前期响应措施作用的见效。

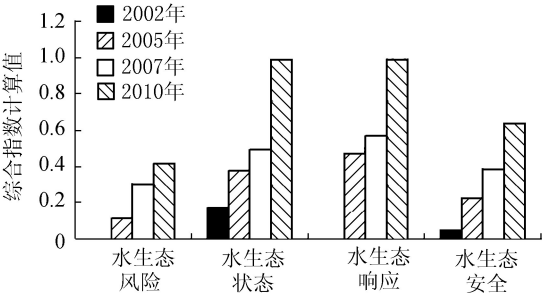


图5 济南市水生态安全趋势评价结果对比

3 结 语

从风险角度出发,明晰水生态安全的概念、内容及特点,定义基于风险的水生态安全,探讨其运行机理和评价模式。从方法学上,在常规的生态安全定义和“压力-状态-响应”评价框架的基础上引入风险因素,建立了基于风险的水生态安全评价指标体系,综合考虑了水生态复合系统安全现状及其演变趋势,在水生态现状指数和水生态响应风险指数的基础上构建了水生态安全等级。案例研究结果表明,本文提出的基于风险的水生态安全评价方法切实可行,可为我国其他大中城市水生态安全评价和分析提供参考。

参考文献:

[1] 李如忠,金菊良,洪天求. 基于风险因素的区域水安全评价模糊模型研究[J]. 中国管理科学,2006 (14): 584-589. (LI Ruzhong, JIN Juliang, HONG Tianqiu. On fuzzy model for regional water security assessment considering risk factors [J]. Chinese Journal of Management Science, 2006 (14): 584-589. (in Chinese))

[2] 张晓岚,刘昌明,赵长森. 改进生态位理论用于水生态安全优先调控[J]. 环境科学研究,2014, 27 (10):

1103-1109. (ZHANG Xiaolan, LIU Changming, ZHAO Changsen. Study on priority regulation for water ecological security based on Niche theory [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27 (10): 1103-1109. (in Chinese))

[3] 张晓岚,刘昌明,门宝辉,等. 漳卫南运河流域水生态安全指标体系构建及评价[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2013, 49 (6): 626-630. (ZHANG Xiaolan, LIU Changming, MEN Baohui, et al. Establishing indicator system and evaluating ecological security in Zhangweinan River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49 (6): 626-630. (in Chinese))

[4] 张思锋,刘晗梦. 生态风险评价方法述评[J]. 生态学报,2010, 30 (10): 2735-2744. (ZHANG Sifeng, LIU Hanmeng. Review of ecological risk assessment methods [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (10): 2735-2744. (in Chinese))

[5] 李文华,郭均鹏. AHP 中判断矩阵的区间权重及其一致性检验[J]. 系统工程方法应用,2004, 13 (6): 530-532, 542. (LI Wenhua, GUO Junpeng. Interval weights and consistency check of judgment matrix in the analytic hierarchy process [J]. Systems Engineering-Theory Methodology Applications, 2004, 13 (6): 530-532, 542. (in Chinese))

[6] 王根绪,程国栋,钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题[J]. 应用生态学报,2003, 14 (9): 1151-1156. (WANG Genxu, CHENG Guodong, QIAN Ju. Several problems in ecological security assessment research [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (9): 1151-1156. (in Chinese))

[7] 朱雷,陈威. 模糊综合指数法在水质评价中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2001, 23 (8): 61-65. (ZHU Lei, CHEN Wei. Fuzzy complex index in water quality assessment of municipalities [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23 (8): 61-65. (in Chinese))

[8] 魏冉. 辽宁省辽河流域水生态功能三级区水生态安全评价[D]. 沈阳: 辽宁大学,2013.

[9] 李录娟,邹胜章. 综合指数法和模糊综合法在地下水质量评价中的对比:以遵义市为例[J]. 中国岩溶,2014, 33 (1): 22-30. (LI Lujuan, ZOU Shengzhang. Comparison of comprehensive index method and fuzzy comprehensive method in the evaluation of groundwater quality: a case study in Zunyi City [J]. Carsologica Sinica, 2014 (1): 22-30. (in Chinese))

[10] 钟秀,马腾,刘林,等. 地下水饮用水源地污染源风险等级评价方法研究[J]. 安全与环境工程,2014, 21 (2): 104-108. (ZHONG Xiu, MA Teng, LIU Lin, et al. Method research on the risk level evaluation of contamination source for drinking groundwater wellhead [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21 (2): 104-108. (in Chinese))

- [11] 韩宇平,阮平清. 区域水安全评价指标体系初步研究[J]. 环境科学,2003,23(2): 267-272. (HAN Yuping, RUAN Pingqing. Research on evaluation index system of water safety[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2003,23(2): 267-272. (in Chinese))
- [12] 李辉,魏德州. 环境影响评价的新领域-生态安全评价[J]. 安全与环境学报,2003,3(5): 68-70. (LI Hui, WEI Dezhou. Environmental impact assessment of new area-ecological security evaluation[J]. Journal of Safety and Environment,2003,3(5): 68-70. (in Chinese))
- [13] 张翔,夏军,贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. 资源科学,2005,27(3): 145-149. (ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shaofeng. Definition of water security and its assessment using water poverty index [J]. Resources Science,2005,27(3): 145-149. (in Chinese))
- [14] 樊彦芳. 区域水生态与水环境安全机制的研究[D]. 南京: 河海大学,2005.
- [15] 王雪梅,刘静玲,马牧源,等. 流域水生态风险评价及管理对策[J]. 环境科学学报,2002,309(2): 237-245. (WANG Xuemei, LIU Jingling, MA Muyuan, et al. Aquatic ecological risk assessment and management strategies in a watershed: an overview [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2002,309(2): 237-245. (in Chinese))
- [16] 毛小冬,倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报(自然科学版),2005,41(4): 646-654. (MAO Xiaodong, NI Jinren. Recent progress of ecological risk assessment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2005,41(4): 646-654. (in Chinese))
- [17] 李玉照,刘永,颜小品. 基于 DPSIP 模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2005,41(6): 971-981. (LI Yuzhao, LIU Yong, YAN Xiaopin. A DPSIP-based indicator system for ecological security assessment at the basin scale [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2005,41(6): 971-981. (in Chinese))
- [18] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I: 理论[J]. 生态学报,2002,22(7): 6-10. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands I: A theoretical framework[J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(7): 6-10. (in Chinese))
- [19] 左伟,周慧珍,王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤,2003(1): 2-7. (ZUO Wei, ZHOU Huizhen, WANG Qiao. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety[J]. Soils,2003(1): 2-7. (in Chinese))
- [20] 肖笃宁,陈文波,郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报,2002,13(3): 354-358. (XIAO Duning, CHEN Wenbo, GUO Fuliang. On the basic concepts and contents of ecological security [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(3): 354-358. (in Chinese))

(收稿日期:2015-10-08 编辑:彭桃英)

(上接第 28 页)

- [12] YANG W, YANG Z, QIN Y. An optimization approach for sustainable release of e-flows for lake restoration and preservation: model development and a case study of Baiyangdian Lake, China[J]. Ecological Modelling,2011,222(14):2448-2455.
- [13] MERRITT D M, SCOTT M L, LEROY P, et al. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds[J]. Freshwater Biology,2010,55(1):206-225.
- [14] TOMBOLINI I, CANEVA G, CANCELLIERI L, et al. Damming effects on upstream riparian and aquatic vegetation: the case study of Nazzano (Tiber River, central Italy)[J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems,2014,412:1-15.
- [15] VIVIAN LM, GODFREE R C, COLLOFF M J, et al. Wetland plant growth under contrasting water regimes associated with river regulation and drought: implications for environmental water management[J]. Plant Ecology,2014,215(9):997-1011.
- [16] ROLLS R J, ARTHINGTON A H. How do low magnitudes of hydrologic alteration impact riverine fish populations and assemblage characteristics? [J]. Ecological Indicators,2014,39:179-188.
- [17] HAGHIGHI A T, MARTTILA H, KLØVE B. Development of a new index to assess river regime impacts after dam construction[J]. Global and Planetary Change,2014,122: 186-196.
- [18] HAGHIGHI A T, KLØVE B. Development of a general river regime index (RRI) for intra-annual flow variation based on the unit river concept and flow variation end-points[J]. Journal of Hydrology,2013,503:169-177.
- [19] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research & Management,1998,14(4):329-340.
- [20] 冯瑞萍,常剑波,张晓敏,等. 长江干流关键点流量变化及其生态影响分析[J]. 环境科学与技术,2010,33(9): 57-62. (FENG Ruiping, CHANG Jianbo, ZHANG Xiaomin, et al. Discharge changes and ecosystem influence in critical sections of the Yangtze River mainstream [J]. Environmental Science & Technology,2010,33(9): 57-62. (in Chinese))
- [21] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.

(收稿日期:2015-09-30 编辑:徐 娟)