

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.005

# 基于可持续能力和协调状态的水资源系统 评价方法探讨

郑德凤,张雨,魏秋蕊,孙才志

(辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁大连 116029)

**摘要:**基于可持续理论、系统协调理论内涵,从区域资源条件、生态环境、水资源开发利用水平及经济社会现状要素相互耦合、共同支撑水资源系统的角度,应用压力-状态-响应模型(PSR模型)构建了区域水资源系统综合评价指标体系,借鉴前人研究成果提出了水资源系统可持续度、协调度概念及其定量表征方法,在此基础上提出水资源系统综合评价方法,并结合有关数据对2003—2013年辽宁省水资源安全形势演进态势进行实证分析。结果表明:①研究时段内辽宁省水资源系统可持续度呈整体上升趋势,自然因素导致资源子系统可持续度变化不稳定,其余3个子系统可持续度基本呈现逐年提升态势;②研究时段内辽宁省水资源系统协调度波动变化,是资源条件、生态环境、开发利用水平和经济社会发展因素的耦合导致子系统之间的协调关系不稳定;③在研究时段内辽宁省水资源系统安全等级逐渐提高,安全态势趋于好转。未来,有关部门应在加大自然资源和生态环境保护力度、提高水资源开发利用水平和促进区域经济社会发展的基础上,努力探索区域水资源系统协调发展和统一管理的新思路和新方法,将水资源纳入区域可持续发展进行综合管理和优化配置,以期实现区域水资源系统和谐、可持续的发展目标。

**关键词:**水资源系统;可持续能力;协调状态;综合评价;系统安全;辽宁省

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)03-0024-09

## Study of method for evaluation of water resources system based on sustainability and coordinated condition

ZHENG Defeng, ZHANG Yu, WEI Qiurui, SUN Caizhi

(School of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Based on the implications of sustainable development and the system coordination theories, and from the perspectives of regional resources, the ecological environment, the level of water resources development and utilization, and economic-social development coupling of joint support for the water resources system, we used the pressure-state-response (PSR) model to establish a comprehensive evaluation index system for regional water resources. With reference to previous studies, we put forward the concepts of the sustainable degree and coordinated degree of regional water resources systems and a method for quantitative characterization. On this basis, we propose a comprehensive evaluation method for water resources systems. We carried out an empirical analysis of the security of water resources in Liaoning Province during the period from 2003 to 2013 according to related data. The results are as follows: (1) During the study period, the sustainable degree of the water resources system in Liaoning Province exhibited a rising trend on the whole. The sustainable degree of the resources sub-system showed an unsteady change due to natural factors, and those of the other three sub-systems showed an increasing trend year by year. (2) The coordinated degree of the water resources system of Liaoning Province fluctuated during the study period. The regional resources, ecological environment, level of water resources development and utilization, and economic-social development coupling led to an unstable coordinated relation between the sub-systems. (3) The

基金项目:辽宁省教育厅人文社会科学研究基地项目(ZJ2014034);辽宁省社科联辽宁经济社会发展立项课题(2016slktzixxjc-11);教育部人文社会科学研究规划基金(14YJAZH112)

作者简介:郑德凤(1970—),女,副教授,博士,主要从事水资源评价与管理、资源与环境经济研究。E-mail: defengzheng@lnnu.edu.cn

security level of the water resources system of Liaoning Province increased gradually during the study period, and the security state improved as well. In the future, relevant departments should strengthen the protection of natural resources and the eco-environment, improve the level of water resources exploitation and utilization, and promote regional economic and social development. Besides, exploring new thoughts and methods for coordinated development and unified management of water resources, and involving water resources in regional sustainable development for comprehensive management and optimizing allocation may help to achieve the goal of coordinated and sustainable development of the regional water resources system.

**Key words:** water resources system; sustainability; coordinated condition; comprehensive evaluation; system security; Liaoning Province

可持续发展的核心问题是满足人的需求,实现自然资源的可持续利用<sup>[1]</sup>。作为自然资源的重要组成部分,水资源的可持续利用问题一直是相关学科领域聚焦的热点<sup>[2]</sup>。受水资源禀赋和经济社会发展的阶段性特征影响,中国局部地区面临的水资源问题日益突出,水资源问题与能源问题、环境问题并列成为制约经济社会可持续发展的瓶颈<sup>[3]</sup>。为此,国内众多学者围绕水资源的可持续开发和利用开展了大量研究。在理论研究层面,关伟等<sup>[4-5]</sup>借鉴系统科学中的耦合概念,将水资源与经济社会的耦合理论应用到区域发展评价体系之中;李翠梅等<sup>[6]</sup>提出水资源可持续发展公众化概念,用评价公众化水平来反映水资源可持续发展程度;陈宁等<sup>[7]</sup>把水资源开发利用、社会与经济可持续发展和可持续发展能力结合起来,界定了水资源可持续发展概念,并建立评价指标体系。在宏观决策层面,姚荣等<sup>[8]</sup>基于区域水资源总量、可供水量、需水量和可利用量的数量关系,应用水资源承载力、供水能力等评价了区域水资源可持续利用水平;刘恒等<sup>[9-13]</sup>从区域水资源禀赋、经济社会发展阶段、水资源开发利用水平、科技文化发展水平的非均衡视角,基于水资源可持续管理理念分析了水资源可持续利用概念的内涵及影响因素,提出针对水资源的攻击性、社会需求和环境协调统一性,建立因地制宜的水资源可持续评价指标体系。在研究方法层面,国内学者应用层次分析、集对分析、FAHP-PP、水足迹、模糊物元模型、可变模糊理论、神经网络模型、差值模型和主成分分析<sup>[14-22]</sup>等方法开展了广泛研究,丰富了水资源可持续利用的评价方法。

以往研究多侧重于水资源可持续概念内涵与外延的阐述、可持续利用评价方法及评价指标体系的构建等,而从系统论的角度对水资源可持续发展阶段的划分及其演变规律、相关方法论的研究稍显滞后。鉴于此,笔者拟从水资源受区域资源条件、生态环境、开发利用水平及经济社会发展要素构成的复合系统支撑的视角,借鉴压力(pressure)-状态(state)-响应(response)模型(PSR模型),构建区域

水资源系统评价指标体系,在此基础上,应用主成分分析法、加权函数法及离差系数法,将可持续与协调发展内涵纳入系统安全概念,提出水资源系统的综合评价方法,并结合有关数据,以辽宁省水资源系统综合评价为例进行实证分析,以期丰富水资源的可持续评价工作提供参考和借鉴。

## 1 研究方法

### 1.1 基于可持续能力和协调状态的水资源系统内涵界定

作为一种宝贵资源,水所具有的自然属性、经济属性和社会属性,使其功能更加多元化。水资源作为一种与人类发展联系紧密的自然资源,其循环、利用与发展,除了受到资源本身和所处生态环境状况的影响外,必然还受到人类活动的影响,人类经济、社会和科技的发展在一定程度上改变了水资源的发展状况。杜朝阳等<sup>[23]</sup>提出可持续水资源系统概念,将可持续水资源系统定义为以水资源系统为核心和纽带,把社会系统、经济系统、生态环境系统联成一体,彼此相互依赖、相互作用,并在时间和空间上能够持续演变的复杂系统。借鉴上述定义,笔者从一个地区资源条件、生态环境、开发利用水平及经济社会发展要素相互耦合、共同支撑水资源发展的视角,将水资源系统定义为由若干子系统构成的区域水资源系统。据此定义,水资源系统具有如下特点:系统运转的动力是水资源,核心是人类利用,生态环境和开发利用水平、经济社会要素分别为水资源系统的自然基础和社会基础。水资源系统是一个多目标、多层次的非线性开放系统,内部机制越复杂的系统可持续性(稳定性)和协调性越好,系统的主体是系统自身的可持续能力及子系统之间的协调能力。

### 1.2 水资源系统可持续能力的评价与表征方法

#### 1.2.1 水资源系统可持续能力的评价指标体系

自然资源的可持续利用实质是谋求资源永续利用、环境保护与经济增长、社会发展的协调一致<sup>[7]</sup>。根据对水资源系统内涵的界定,将区域水资源系统可持续能力评价分为自然资源条件(资源子系统)、

生态环境状况(生态环境子系统)、水资源开发利用水平(开发利用子系统)和经济社会发展(经济社会子系统)4个方面。参考和借鉴有关领域的研究成果<sup>[9,23-28]</sup>,基于PSR模型,考虑数据可得性,筛选出25项评价指标构建区域水资源系统可持续能力的

评价指标体系(表1)。表1中,正向、负向指标分别指对于水资源可持续利用来说越大越优和越小越优的指标,适中型指标则是数值需控制在一定范围内的指标。

表1 水资源系统可持续能力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标内涵解释	
水资源系统综合评价	资源子系统	人均水资源占有量(m <sup>3</sup> )	人均水资源占有量越高,系统可持续能力越高	正向
		单位面积土地资源占有量(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	单位面积土地资源占有量越高,系统可持续能力越高	正向
		地表水资源量(亿m <sup>3</sup> )	地表水资源量越高,水资源的供给能力越高	正向
		地下水水资源量(亿m <sup>3</sup> )	地下水水资源量越高,水资源的供给能力越高	正向
		年均降水量(mm)	年降水量越高,水资源丰裕程度越高,系统可持续能力越高	正向
		水网密度(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	单位国土面积内的水资源总量越高,水资源系统越可持续	正向
	生态环境子系统	森林覆盖率(%)	植被覆盖率越高,越有利于水土保持及水源涵养,系统越可持续	正向
		耕地指数(%)	耕地指数越小,农业灌溉用水比重越低,系统可持续能力越高	负向
		水体COD质量浓度(mg/L)	水体中COD质量浓度越高,水环境质量越差,系统可持续能力越低	负向
		污水处理率(%)	污水处理率越高,水环境质量越好,系统可持续能力越高	正向
		万元GDP污水排放量(t)	污水排放强度越高,水环境质量越差,系统可持续能力越低	负向
		生态环境用水总量(亿m <sup>3</sup> )	生态环境用水量越高,水资源循环条件越好,系统可持续能力越高	正向
	开发利用子系统	水利科研经费投资(万元)	经费投资越高,节水能力和用水效率越高,系统可持续能力越高	正向
		吨粮需水量(m <sup>3</sup> )	吨粮需水量越少,农业用水越节约,系统可持续能力越高	负向
		生产用水综合定额(m <sup>3</sup> /万元)	单位产值生产用水标准越低,越有利于系统可持续能力提高	负向
		城镇居民生活日用水定额(L/人)	城镇居民生活日用水标准越低,越有利于系统可持续能力提高	负向
		地表水开发利用程度(%)	适度的地表水开发有利于平衡自然环境需水与人类需水	适中
		地下水开发利用程度(%)	适度的地下水开发有利于平衡自然环境需水与人类需水	适中
	经济社会子系统	人均GDP(元)	地区富裕程度越高,水利工程及设施越完善,系统越可持续	正向
		地区生产总值增长率(%)	地区经济增长速度越高,水利工程投资保证率越高,越可持续	正向
		第二产业比重(%)	产业结构越合理,越有利于水资源供需平衡,系统越可持续	适中
		第三产业增加值(亿元)	第三产业增加值越高,水资源效率越高,越有利于系统可持续	正向
		城乡居民恩格尔系数	居民生活越富裕,越利于系统可持续能力的提高	正向
		人口受教育程度	人口受教育程度越高,节水意识越强,系统可持续能力越高	正向
		城镇化率(%)	适度的城乡人口比例有利于水资源供需平衡	适中

注:人口受教育程度=受小学教育人数×3+受中等教育人数×6+受普通高等教育人数×10。

### 1.2.2 水资源系统可持续能力的表征方法

如表1所示,区域水资源系统的可持续能力受到自然资源条件、生态环境状况、开发利用水平和经济社会发展的支撑与制约。为此,借鉴度量可持续发展的相关指标,引入可持续度作为表征区域水资源系统及其子系统可持续能力的指标,模型如下:

$$D = \sum_{i=1}^n R_i W_i \quad (1)$$

式中: $R_i$ 为支撑区域水资源系统的第*i*个子系统的可持续度( $i=1, 2, 3, 4$ ),分别对应资源、生态环境、开发利用、经济社会4个子系统,即第*i*个子系统下各项指标支撑该子系统可持续发展的能力; $W_i$ 为第*i*个子系统的权重; $D$ 为区域水资源系统可持续度,表征由各个子系统支撑的水资源系统整体可持续能力,其值越大,表示水资源可持续能力越强,反之越小。

鉴于有关水资源和经济状况各项数据之间不可避免地存在一定相关性,为减少指标相关性的影响,引入主成分分析法,通过降维技术把多个变量化成

少数几个不相关的主成分,同时保留原始变量的绝大部分信息,因此子系统的可持续度数值用主成分分析分别在4个子系统的评价指标中(表1)提取主成分,计算主成分得分获取子系统的可持续度,其值越大,表明该子系统可持续能力越强,该子系统支撑系统整体可持续的贡献越大,反之,则贡献越小。

为使评价结果更直观且便于比较,参考相关研究成果<sup>[29-30]</sup>,基于水资源可持续度概念,提出水资源系统或子系统的可持续能力等级划分标准(表2)。表2中,从上向下依次表示水资源系统(子系统的)可持续能力越来越高,对应水资源系统的可持续状态越来越好(从I~V级依次记得分 $Z_d=1, 2, \dots, 5$ ,用于进行水资源系统综合评价)。

表2 区域水资源系统可持续能力等级划分标准

可持续度 $D$	可持续等级	可持续能力	$Z_d$
(0, 0.2]	I级	强不可持续	1
(0.2, 0.4]	II级	弱不可持续	2
(0.4, 0.6]	III级	临界状态	3
(0.6, 0.8]	IV级	弱可持续	4
(0.8, 1]	V级	强可持续	5

### 1.3 水资源系统的协调能力评价与表征方法

水资源系统由自然资源条件、生态环境状况、开发利用水平和经济社会要素等4方面构成,只有4个子系统协调发展、齐头并进,才能使得水资源系统稳健、可持续地发展,从而实现区域水资源的永续利用。参考文献[31],笔者用水资源系统协调度来评价各子系统之间的协调关系,评价模型如下:

$$C = 1 - S/M \quad (2)$$

式中: $S$ 为4个子系统可持续度的标准差; $M$ 为4个子系统可持续度的平均值; $C$ 为水资源系统协调度。

$C$ 值越大,表明各子系统之间越均衡、系统整体发展越协调;反之,表明各子系统间发展越不均衡,水资源系统整体发展趋于不协调状态。同样,基于评价结果的可视性和便于比较,将水资源系统协调度进行等级划分,分为5个等级(表3),分别记得分 $Z_c = 1, 2, \dots, 5$ 。

表3 区域水资源系统协调状态的等级划分标准

协调度 $C$	协调等级	协调状态	$Z_c$
(0, 0.2]	I级	不协调	1
(0.2, 0.4]	II级	较不协调	2
(0.4, 0.6]	III级	临界状态	3
(0.6, 0.8]	IV级	比较协调	4
(0.8, 1]	V级	协调	5

### 1.4 区域水资源系统的综合评价方法

当前人类发展面临的重大需求之一,是实现区域水资源的安全、高效和持续利用,而进行水资源综合管理的基础,是通过水资源系统综合评价了解区域水资源的现状。为此,从区域水资源系统安全的高度,将水资源系统的可持续度及协调度整合为水资源系统安全指标,据此进行综合评价;水资源系统的可持续能力是实现区域水资源永续利用的前提和基础,足够的资源量、良好的生态环境状况、较高的科技与经济社会发展水平才能支撑起整个水资源系统的可持续发展,缺少任何因素或因素条件不够,水资源系统的可持续发展都无从谈起;而系统的协调能力是区域水资源永续利用的根本保障,水资源供需平衡、经济社会发展与自然条件相匹配才能保证水资源系统发展是长远的、可持续的。只有同时具有良好的可持续能力和协调状况,区域水资源系统才可能处于安全状态。水资源系统的综合评价流程见图1。

若水资源系统的可持续度低于临界可持续度,即可持续等级处于I级和II级(得分 $Z_d < 3$ ),则表明水资源系统可持续能力不足,区域的资源条件、生态环境状况、水资源开发利用水平和经济社会发展水平不足以支撑水资源系统发展需要,将之界定为系统不安全状态。只有水资源系统的可持续能力达

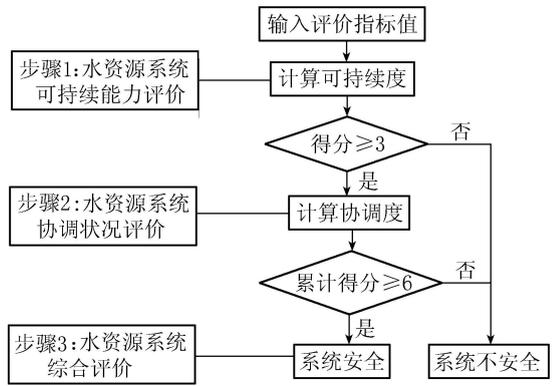


图1 水资源系统综合评价流程图

到中等及以上水平才具备安全基础,进而需要对系统的协调状况进行判断;若系统协调度在临界状态之下(即协调度与可持续度的累积得分低于6),同样将系统界定为不安全状态;只有综合得分及格(累积得分 $\geq 6$ )才能将系统评价为安全状态。为增强综合评价结果的可操作性,将评价结果进一步细化:将水资源系统安全等级划分为5级,设定综合得分 $Z$ 的范围在1~10之间( $Z = Z_d + Z_c$ )。划分标准见表4。

表4 水资源系统综合评价等级划分标准

综合得分 $Z$	综合评价等级	综合评价状态
[1, 6)	I级	不安全
[6, 7)	II级	临界安全
[7, 8)	III级	比较安全
[8, 9)	IV级	安全
[9, 10]	V级	极安全

## 2 实证分析

### 2.1 研究区概况和数据来源

辽宁省土地面积14.8万 $\text{km}^2$ ,辽西、辽东两侧为山地丘陵,中部为辽河平原。辽宁地处欧亚大陆东岸中纬度地区,属于温带大陆性季风气候,多年平均降水量为600~1000mm,雨量时空分布不均,年均水资源总量约为286.7亿 $\text{m}^3$ 。辽宁水系(主要由辽河、浑河、太子河、大小凌河、绕阳河及鸭绿江组成)流量年际年内分配不均,水资源安全形势不容乐观。辽宁省是我国发展潜力较大的商品粮基地,是农业大省,对水资源需求较大。同时作为中国重要的老工业基地,辽宁省工业门类较为齐全,但水资源供需矛盾十分突出。辽宁也是我国较早实行对外开放的沿海省份之一,第二产业和第三产业比较发达,对水资源需求较高。有鉴于此,笔者基于前述水资源系统综合评价方法对2003—2013年辽宁省水资源系统的演进态势进行综合评价。

有关数据来源说明如下:原始数据主要取自相关年份中国统计出版社的辽宁省统计年鉴、辽宁省

环境状况公报<sup>[32]</sup>、辽宁省水资源公报<sup>[33]</sup>和辽宁省国民经济与社会发展统计公报<sup>[34]</sup>等,缺失数据应用线性插值法计算得出。

## 2.2 辽宁省水资源系统可持续能力评价与分析

### 2.2.1 子系统可持续能力计算结果分析

依据主成分分析法及有关数据,计算 2003—2013 年辽宁省水资源系统 4 个子系统的可持续度(图 2),结果表明在整个研究时段内,资源子系统的可持续度波动变化较大,生态环境、开发利用和经济社会 3 个子系统的可持续度变化波动不大。

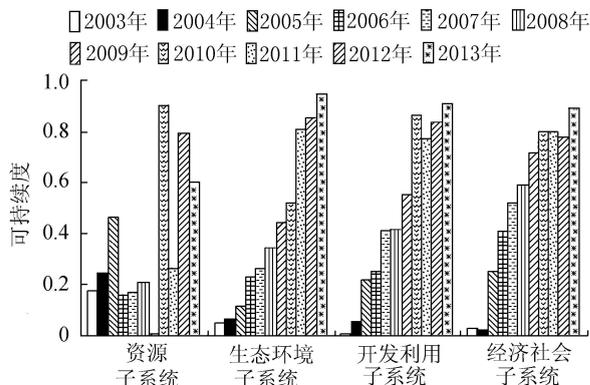


图 2 2003—2013 年辽宁省水资源系统各子系统可持续度对比

资源子系统可持续度主要受区域气候条件的随机变化影响,在 2005、2009、2010、2012 和 2013 年都呈现明显波动;2009 年自然资源条件可持续度明显低于其他时段,主要受该年降水量较少的影响,2009 年辽宁省经历了干旱少雨的天气,降水量也比其他年份少,因而对地表水和地下水水量等造成严重影响,导致 2009 年自然资源条件可持续度偏低;而 2005、2010、2012 和 2013 年自然资源条件可持续度偏高,是因为该时段内降水量明显多于其他年份,尤其是在 2010 年和 2012 年降水量分别达到 966 mm 和 866 mm,水资源总量较大;2003—2004 年、2006—2008 年和 2011 年属于辽宁省年均降水量正常年份,资源子系统可持续度较为一致。为体现年均降水量对资源子系统可持续性的影响,制作辽宁省年均降水量与资源子系统可持续度的关系图,见图 3。图 3 显示辽宁省 2003—2013 年资源子系统可持续度与年均降水量有较大关系,呈现相似波动趋势,说明年均降水量对区域资源条件有较大影响。兼顾其他指标的影响,资源子系统可持续度的波动较年均降水量的波动有所加重。由此可见,资源子系统可持续度受区域自然条件影响较大,辽宁省水资源条件先天并无优势,因此,相关部门在水资源规划管理上的努力尤其重要。

生态环境子系统、开发利用子系统和经济社会子

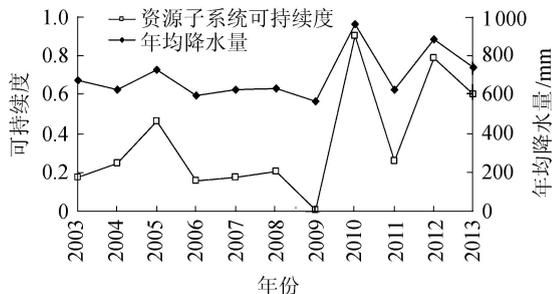


图 3 2003—2013 年辽宁省资源子系统可持续度与年均降水量对比

系统的可持续度总体上呈现随时间而增加的趋势,体现了随着科技水平和经济社会的进步,人们对生态环境保护的意识越来越好,生态环境保护能力和力度都有所提高,对水资源的开发利用水平也起到促进作用,如污水处理率逐年提高,居民生活用水综合定额和生产用水综合定额随人们节水意识的增强和节水设施的完善而逐渐减少,水资源利用效率提高,相应的子系统可持续度基本呈现随时间而增加的态势。

### 2.2.2 水资源系统可持续能力结果分析

依据式(1)及有关数据计算 4 个子系统的权重,分别计算其主观权重和客观权重,然后再加权平均。主观权重由层次分析法得出,向量为  $w_1 = [0.195, 0.138, 0.391, 0.276]^T$ ,客观权重由主成分分析方法提取的成分得分系数得出,向量为  $w_2 = [0.206, 0.215, 0.292, 0.287]^T$ ,据此得出综合权重向量为  $W = [0.201, 0.177, 0.341, 0.282]^T$ 。利用表 2 的标准进行等级划分和阶段评价,得出 2003—2013 年辽宁省水资源系统可持续能力的评价结果,见图 4。

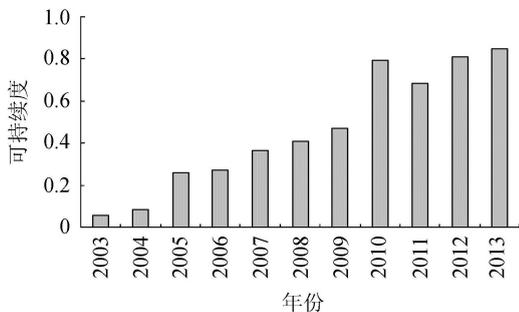


图 4 2003—2013 年辽宁省水资源系统可持续度变化趋势

图 4 显示,2003—2013 年辽宁省水资源系统可持续能力整体呈增强趋势,除 2010 年为突出点外,2003—2010 年和 2011—2013 年可持续度都持续上升。对比各子系统可持续度的变化趋势(图 2),可知研究时段内辽宁省水资源系统可持续能力整体增强,短期波动的主要贡献因素来自生态环境子系统、开发利用子系统、经济社会子系统,负面因素主要来自资源子系统可持续度的波动变化;2010 年研究区

降水量陡增至 966 mm,达到 11 年来的最大值,使资源子系统的贡献超过研究时段内其他子系统的正面贡献。结合数据资料发现,2012 年辽宁省降水量也处于较高水平,因此资源子系统的可持续度也比较高,但同时也受到开发利用子系统中水利科研经费减少的影响。

2003—2013 年辽宁省水资源系统可持续能力的级别及其状态表现为:2003—2004 处于 I 级、强不可持续状态;2005—2007 年处于 II 级、弱不可持续状态;2008—2009 年处于 III 级、临界可持续状态;2010—2011 年处于 IV 级、弱可持续状态;2012—2013 年处于 V 级、强可持续状态。

### 2.3 辽宁省水资源系统协调状态分析

2003—2013 年辽宁省水资源系统各个子系统可持续度见图 5。从图 5 可以看出:同一年内各个子系统状态参差不齐、差别较大,并未呈现共同发展、齐头并进的态势,因此有必要对各个子系统的协调状况进行评价。利用式(2)及有关数据计算 2003—2013 年辽宁省水资源系统各子系统的协调度,结合表 3 对 2003—2013 年辽宁省水资源系统协调度进行对比,结果见图 6。

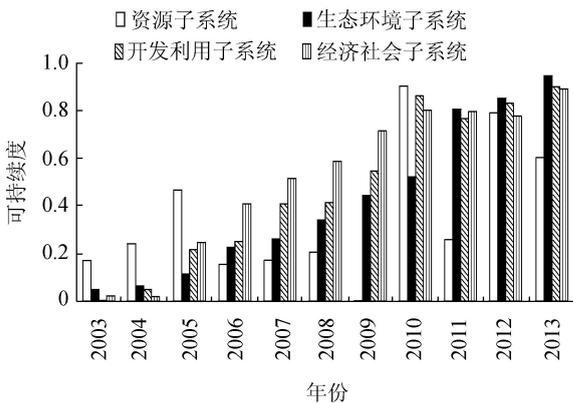


图 5 2003—2013 年辽宁省水资源系统各子系统可持续度对比

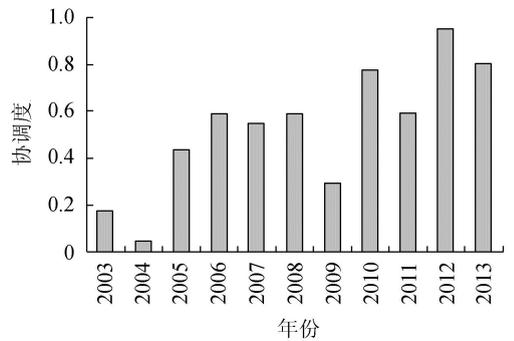


图 6 2003—2013 年辽宁省水资源系统协调度对比

与水资源可持续能力级别及可持续状态的“短期波动、长期增强”态势不同,辽宁省水资源系统协调状态与级别整体呈无序状态,具体可划分为 4 种情况:2003—2004 年各子系统可持续度较低,并且差别较大,整体处于 I 级、不协调状态;2009 年各子系统可持续度有所提高,但资源子系统与其他 3 个子系统相比,差距较大,处于 II 级、较不协调状态;而 2005—2008 年各子系统的可持续度均在 0.2 之上,并且 4 个子系统之间的差距较小,系统处于 III 级、临界协调状态,2011 年资源子系统可持续度落后于其他 3 个子系统可持续度较多,因此系统也处于 III 级、临界协调状态;2010 年各子系统差距较小,系统处于 IV 级、比较协调状态;2012—2013 年各子系统可持续度高,子系统之间协调度的差距也小,相互契合、协调有度,系统处于 V 级、协调状态。

### 2.4 辽宁省水资源系统综合评价结果分析

按照辽宁省各年份水资源系统可持续能力得分  $Z_d$  与协调能力得分  $Z_c$ ,计算水资源系统综合得分  $Z$ ,应用图 1 所示流程计算辽宁省水资源系统的综合评分,再依据表 4 所示的综合评价等级和状态划分标准,得到 2003—2013 年辽宁省水资源系统的综合评价结果(表 5)。

表 5 2003—2013 年辽宁省水资源系统综合评价结果

年份	可持续能力评价			协调能力评价			综合评价结果		
	等级	状态	得分 $Z_d$	等级	状态	得分 $Z_c$	得分 $Z$	等级	状态
2003	I 级	强不可持续	1	—	—	—	1	I 级	不安全
2004	I 级	强不可持续	1	—	—	—	1	I 级	不安全
2005	II 级	弱不可持续	2	—	—	—	2	I 级	不安全
2006	II 级	弱不可持续	2	—	—	—	2	I 级	不安全
2007	II 级	弱不可持续	2	—	—	—	2	I 级	不安全
2008	III 级	临界状态	3	III 级	临界协调	3	6	II 级	临界安全
2009	III 级	临界状态	3	II 级	比较不协调	2	5	I 级	不安全
2010	IV 级	弱可持续	4	IV 级	比较协调	4	8	IV 级	安全
2011	IV 级	弱可持续	4	III 级	临界协调	3	7	III 级	较安全
2012	V 级	强可持续	5	V 级	协调	5	10	V 级	极安全
2013	V 级	强可持续	5	V 级	协调	5	10	V 级	极安全

注:表中“—”表示水资源系统可持续度过低,无需计算其协调能力。

表5显示:由于2003—2007年辽宁省水资源系统可持续度均低于中等水平,在一定程度上约束了经济社会发展,因此处于I级,不安全状态;2009年辽宁省水资源系统可持续度达到临界状态,但是协调状态处于比较不协调,综合评价得分低于6分,同样处于I级,不安全状态。2008—2013年辽宁省水资源系统可持续度处于或高于中等水平,系统可持续能力提高,结合系统协调度的评价得分,综合评价结果为:2008年辽宁省水资源系统综合评价等级为II级,处于临界安全状态;2011年为III级、比较安全状态;2010年为IV级、安全状态;2012—2013年为V级,极安全状态。整体来看,辽宁省水资源系统安全级别逐渐提高,2009年出现波动,主要是协调度低于相邻年份。由此可见,子系统之间的相互协调对整个水资源系统状态亦有重要影响。

### 3 结论与讨论

水资源系统由区域自然资源、生态环境、经济社会发展等诸多要素相互耦合构成,同时受到人类开发利用水平的综合影响,其内部机制越复杂、系统越稳定。水资源系统综合状态受系统可持续能力和系统协调能力的共同影响。本文从区域资源条件、生态环境状况、水资源开发利用水平和经济社会发展与水资源相辅相成的角度,界定了水资源系统概念,并基于可持续理论及系统协调理论,提出了区域水资源系统综合评价方法,通过对2003—2013年辽宁省水资源系统综合评价进行实证分析,得到以下几点结论:

a. 研究时段内辽宁省水资源系统可持续度总体呈增强趋势,2010年受年内降水因素影响,系统可持续能力突出增高;其他时段水资源系统协调度呈无序状态,2005—2008年及2010—2013年两个时段的系统协调状态较好,其余年份系统整体不协调;研究时段内辽宁省水资源系统安全态势趋于好转,近年来综合评价等级提高。

b. 近年来辽宁省水资源开发、利用与用水保障工作绩效明显,但有关部门应更加注重水资源系统的协调状态,以水资源的永续利用为目标,结合本地区的实际情况,因地制宜地确定水资源综合管理方案,逐步增强水资源系统的可持续能力及协调能力,因为只有各子系统良性互动,才能促使水资源系统稳定。

水资源系统是一个开放的复杂系统,系统状态受人类活动与自然状况的双重影响。加强流域生态环境的保护力度、提高水资源开发利用水平、促进经济社会健康稳定发展,能够在一定程度上弥补区域

水资源禀赋的先天不足。通过人为手段改善区域水资源系统的可持续能力及系统协调能力,可满足人类生存和发展的需求。笔者借鉴前人研究成果,从系统协调理论与可持续理论相结合的视角确定水资源综合评价方案,评价结果在某种程度上具有可视性、可操作性,便于在不同时空尺度推广应用。需要指出的是,限于原始数据的可得性,并基于评价结果的可靠性,笔者仅从4个方面、25个指标探讨11年内的辽宁省水资源系统演进态势。今后有必要延长时间序列,并从空间角度对综合评价方案进行实证分析和改进,以期进一步提高评价过程的科学性,增强评价结果的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 中国发展的可持续性状态与趋势:一个基于自然资源基础的评价[J]. 资源科学, 2008, 30(9): 1349-1355. (XIE Gaodi, ZHEN Lin, LU Chunxia, et al. Sustainability status and trends of China's development: an assessment based on the natural resources base[J]. Resources Science, 2008, 30(9): 1349-1355. (in Chinese))
- [2] 程乖梅,何士华. 水资源可持续利用评价方法研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(1): 52-56. (CHENG Guaimei, HE Shihua. Progress on evaluating methods for sustainable utilization of water resources[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2006, 17(1): 52-56. (in Chinese))
- [3] 王浩. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352-358. (WANG Hao. Sustainable utilization of China's water resources[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 352-358. (in Chinese))
- [4] 关伟. 区域水资源与经济社会耦合系统可持续发展的量化分析[J]. 地理研究, 2007, 16(4): 685-692. (GUAN Wei. The data analysis of regional water resources and economic society coupling system sustainable development[J]. Geographical Research, 2007, 16(4): 685-692. (in Chinese))
- [5] 盖美,赵晓梅,田成诗. 辽宁沿海经济带水资源-社会经济可持续发展研究[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1225-1235. (GAI Mei, ZHAO Xiaomei, TIAN Chengshi. A study on sustainable development of water resources and social economy in Liaoning Coastal Economic Belt[J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1225-1235. (in Chinese))
- [6] 李翠梅,王建华,王浩,等. 城市水资源可持续发展公众化评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 1-6. (LI Cuimei, WANG Jianhua, WANG Hao, et al. Study on public evaluation of urban water resources sustainable development[J]. Journal of Water Resources & Water

- Engineering,2011,22(4):1-6. (in Chinese))
- [ 7 ] 陈宁,张彦军. 水资源可持续发展的概念、内涵及指标体系[J]. 地域研究与开发,1998,17(4):37-39. (CHEN Ning, ZHANG Yanjun. Concept, connotations and index system of water resources sustainable development [J]. Areal Research and Development, 1998, 17(4):37-39. (in Chinese))
- [ 8 ] 姚荣,唐德善,张娜. 区域水资源可持续发展评价模型的建立与应用[J]. 水电能源科学,2004,22(1):16-19. (YAO Rong, TANG Deshan ZHANG Na. Establishment and application of sustainable development evaluation model for regional water resources [J]. Water Resources and Power,2004,22(1):16-19. (in Chinese))
- [ 9 ] 刘恒,耿雷华,陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展,2003,14(3):265-270. (LIU Heng, GENG Leihua, CHEN Xiaoyan. Indicators for evaluating sustainable utilization of regional water resources [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3):265-270. (in Chinese))
- [10] 夏军,王中根,穆宏强. 可持续水资源管理评价指标体系研究[J]. 长江职工大学学报,2000,17(2):1-6. (XIA Jun, WANG Zhonggen, MU Hongqiang. Study on evaluation index system of sustainable water resources management [J]. Journal of Changjiang Vocational University,2000,17(2):1-6. (in Chinese))
- [11] 卞建民,杨建强. 水资源可持续利用评价的指标体系研究[J]. 水土保持通报,2000,20(4):43-45. (BIAN Jianmin, YANG Jianqiang. Comprehensive evaluation index system and application of sustainable utilization of water resources [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2000,20(4):43-45. (in Chinese))
- [12] 孙才志,孙炳双,林旭,等. 区域水资源开发模式评价指标体系研究:以松嫩盆地为例[J]. 长春科技大学学报,2001,31(1):46-49. (SUN Caizhi, SUN Bingshuang, LIN Xu, et al. Research on the evaluation index system for determining regional water resources' s development pattern; take Songnen Basin as an example [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(1):46-49. (in Chinese))
- [13] 周丰,郭怀成,刘永,等. 湿润区湖泊流域水资源可持续发展评价方法[J]. 自然资源学报,2007,22(2):290-301. (ZHOU Feng, GUO Huaicheng, LIU Yong, et al. Assessment method of sustainable water resources development of wet lake basin [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2):290-301. (in Chinese))
- [14] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报,2007,26(4):22-28. (JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4):22-28. (in Chinese))
- [15] 黎枫,陈亚宁,李卫红,等. 基于熵权的集对分析法在水资源可持续利用评价中的应用:以塔里木河三源流地区为例[J]. 冰川冻土,2010,32(4):723-730. (LI Feng, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. The application of set pair analysis based on entropy weight o evaluation of sustainable water resources utilization; a case study in the Three Sources of Tarim River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4):723-730. (in Chinese))
- [16] 戴天晟,孙绍荣,赵文会,等. 区域水资源可持续利用评价的 FAHP-PP 模型[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(5):421-426. (DAI Tiansheng, SUN Shaorong, ZHAO Wenhui, et al. Evaluation of the sustainability of water resources system based on FAHP-PP model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(5):421-426. (in Chinese))
- [17] 周玲玲,王琳,余静. 基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系:以即墨市为例[J]. 资源科学,2014,36(5):913-921. (ZHOU Lingling, WANG Lin, YU Jing. Assessment system of water resources sustainable utilization based on water footprint theory; a case study of Jimo [J]. Resources Science, 2014, 36(5):913-921. (in Chinese))
- [18] 潘峰,梁川,王志良,等. 模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用[J]. 水科学进展,2003,14(3):271-275. (PAN Feng, LIANG Chuan, WANG Zhiliang, et al. Fuzzy matter-element model for evaluating sustainable utilization of regional water resources [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3):271-275. (in Chinese))
- [19] 陈守煜,柴春岭. 区域水资源可持续利用评价的模糊可变评价方法[J]. 水利水电科技进展,2007,27(5):1-5. (CHEN Shouyu, CHAI Chunling. Fuzzy variable assessment method for sustainable utilization of regional water resources [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(5):1-5. (in Chinese))
- [20] 楼文高,刘遂庆. 区域水资源可持续利用评价的神经网络方法[J]. 农业系统科学与综合研究,2004,20(20):113-119. (LOU Wengao, LIU Suiqing. On assessment of sustainable development level of regional water resource using artificial neural networks. [J] System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2004, 20(20):113-119. (in Chinese))
- [21] 金菊良,丁晶,魏一鸣,等. 区域水资源可持续利用系统评价的差值模型[J]. 自然资源学报,2002,17(5):610-615. (JIN Juliang, DING Jing, WEI Yiming, et al. An interpolation evaluation model for regional water resources sustainable utilization system [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(5):610-615. (in Chinese))
- [22] 麻荣永,郑二伟,王魁,等. 基于主成分分析法的广西水资源可持续利用综合评价[J]. 广西大学学报(自然科学

- 学版), 2008, 33(1): 16-19. (MA Rongyong, ZHENG Erwei, WANG Kui, et al. Application of the main component analysis method in comprehensive evaluation of the water resources sustainable utilization in Guangxi Province [J]. Journal of Guangxi University (Natural Sciences), 2008, 33(1): 16-19. (in Chinese))
- [23] 杜朝阳, 钟华平, 于静洁. 可持续水资源系统机制研究 [J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 581-588. (DU Chaoyang, ZHONG Huaping, YU Jingjie. Mechanism of sustainable water resources system [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 581-588. (in Chinese))
- [24] 邓楚雄, 谢炳庚, 吴永兴, 等. 上海都市农业可持续发展的定量综合评价 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1577-1586. (DENG Chuxiong, XIE Binggeng, WU Yongxing, et al. The quantitative & comprehensive appraisal of urban agricultural sustainable development in Shanghai [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(9): 1577-1586. (in Chinese))
- [25] NUCSD. Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies [R]. New York: NUCSD Publication, 1995.
- [26] 刘兴元, 王玮. 藏北草地生态系统可持续发展能力评价 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1209-1220. (LIU Xingyuan, WANG Wei. Evaluation of rangeland ecosystem sustainability of the northern Tibetan region, China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1209-1220. (in Chinese))
- [27] 余丹林. 区域可持续发展评价指标体系的构建思路 [J]. 地理科学进展, 1998, 17(2): 84-89. (YU Danlin. Recognition and thoughts on constructing the index system of regional sustainable development [J]. Progress in Geography, 1998, 17(2): 84-89. (in Chinese))
- [28] 黄初龙, 章光新, 杨建峰. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究 [J]. 资源科学, 2006, 28(2): 34-40. (HUANG Chulong, ZHANG Guangxin, YANG Jianfeng. Indicators system for sustainability assessment of water resources use in China [J]. Resources Science, 2006, 28(2): 34-40. (in Chinese))
- [29] SAATY T L. The analytic hierarchy process, planning, priority setting, resource allocation [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [30] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Mobile Computing and Communications Review, 1948, 5(1): 3-55.
- [31] 刘晓洁, 沈镭. 资源节约型社会综合评价指标体系研究 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 382-391. (LIU Xiaojie, SHEN Lei. Indicators and comprehensive appraisal system for saving society [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 382-391. (in Chinese))
- [32] 辽宁省环境保护厅. 2003—2013 年辽宁省环境状况公报 [EB/OL]. [2014-05-26]. <http://www.lnepb.gov.cn/zfxxgk/hjzl/hjzlkqb/>.
- [33] 辽宁省水利厅. 2011-2013 年辽宁省水资源公报 [EB/OL]. [2014-05-26]. [http://www.dwr.ln.gov.cn/inverse01\\_121\\_1.htm](http://www.dwr.ln.gov.cn/inverse01_121_1.htm).
- [34] 辽宁省统计局. 2003-2013 年辽宁省国民经济与社会发展统计公报 [EB/OL]. [2014-05-26]. <http://www.ln.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/>.

(收稿日期: 2015-05-27 编辑: 彭桃英)

(上接第 23 页)

- [7] 刘淑芬, 郭永海. 区域地下水防污性能评价方法及其在河北平原的应用 [J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(1): 41-45. (LIU Shufen, GUO Yonghai. Evaluation method of groundwater vulnerability and its application in Hebei plain [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1996, 19(1): 41-45. (in Chinese))
- [8] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法: DRASTIC 指标体系 [J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(2): 4-9. (YANG Qing, LUAN Maotian. Evaluation method of groundwater vulnerability to pollution: DRASTIC index system [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(2): 4-9. (in Chinese))
- [9] 杨庆, 栾茂田, 周集体, 等. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用 [J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 684-688. (YANG Qing, LUAN Maotian, ZHOU Jiti, et al. Study of application of DRASTIC index to assessment of groundwater vulnerability to pollution of Dalian City [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(5): 684-688. (in Chinese))
- [10] 鄂建, 孙爱荣, 钟新永. DRASTIC 模型的缺陷与改进方法探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 103-106. (E Jian, SUN Airong, ZHONG Xinyong. Inadequacies of DRASTIC model and discussion of improvement [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(1): 103-106. (in Chinese))
- [11] SAATY T L, BENNETT J P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy [J]. Behavioral Science, 1977, 22: 237-245.
- [12] NAPOLITANO P, FABBRI A G. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS [M]. [S. l.]: Lahs Publications, 1996: 559-566.
- [13] LODWICK W A, MONSON W, SVOBODA L. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1990, 4(4): 413-428.

(收稿日期: 2015-04-01 编辑: 熊水斌)