

基于模糊聚类分析的天津市生态环境承载力评价

王锦^{1,2} 郝晋珉^{1,2*} 陈爱琪^{1,2} 王楠^{1,2}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院,北京 100193;

2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室,北京 100193)

摘要 为定量研究天津市生态环境承载力状况,有效利用自然资源、促进可持续发展,基于其生态环境现状以及社会经济发展特点,依据 P-S-R 模型构建生态环境承载力评价指标体系和分级标准,按照主客观相结合的赋权方法,通过模糊聚类分析对天津市 2000—2014 年的生态环境承载力水平及变化趋势进行深入研究。结果表明:天津市生态环境承载力隶属度值呈上升趋势,承载力等级从超载状态上升到可承载状态。其中,压力层、响应层生态环境承载力等级稳步上升,分别在 2009 和 2010 年达到可承载状态;状态层生态环境承载力等级呈波浪式变动,虽发展趋势不容乐观,但也有所好转,这说明在社会经济发展过程中,资源消耗过度、环境污染和生态破坏等问题是制约生态环境承载力进一步提高的主要因素。

关键词 生态环境承载力; 模糊聚类分析; P-S-R 模型

中图分类号 X24

文章编号 1007-4333(2018)10-0112-10

文献标志码 A

Evaluation of ecological environment carrying capacity in Tianjin based on fuzzy cluster analysis

WANG Jin^{1,2}, HAO Jinmin^{1,2*}, CHEN Aiqi^{1,2}, WANG Nan^{1,2}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control of Ministry of Natural and Resources, Beijing 100193, China)

Abstract To quantitatively study the carrying capacity of ecological environment in Tianjin, make effective use of natural resources and promote sustainable development, based on the current situation of ecological environment and the characteristics of social and economic development, a evaluation index system and grading standards of ecological environment carrying capacity according to P-S-R model is constructed in this study. A combination of subjective and objective weighting method and fuzzy cluster analysis are adopted to investigate the ecological environment carrying capacity in Tianjin level from 2000 to 2014 years and provide scientific basis for the construction of ecological environment in Tianjin. The results show that: The membership value of ecological environment carrying capacity in Tianjin is on the rise, and the carrying capacity level rises from the overloaded state to the bearing state; The pressure and response level of ecological environment carrying capacity increased steadily, and reached the bearing state in 2009 and 2010 respectively; The level of ecological environment carrying capacity of the state layer is fluctuating. The development trend is not optimistic. The problems of over-consumption of resources, environmental pollution and ecological destruction are the main factors that restrict the further carrying capacity of ecological environment. The research results provide reasonable suggestions for the future development of Tianjin and references for the research on the carrying capacity of ecological environment in other regions.

Keywords ecological environment carrying capacity; fuzzy cluster analysis; P-S-R model

收稿日期: 2017-12-01

基金项目: 国家科技支撑基金项目(2015BAD06B01)

第一作者: 王锦, 硕士研究生, E-mail: wangjinbm@163.com

通讯作者: 郝晋珉, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用规划、土地评价、土壤改良与利用、区域治理与可持续发展研究, E-mail: jmhao@cau.edu.cn

良好的生态环境是人类社会生存发展的重要前提^[1]。随着我国社会经济持续高速发展,大量自然资源被消耗,生态环境遭到破坏,现存的生态环境系统究竟能够承受人类活动多大程度的压力,已经成为我国社会经济能否可持续发展亟待解决的重大课题。生态环境是环境的重要组成部分,也是承载力研究的热点^[2-4]。国内外学者对生态环境承载力的研究主要通过状态空间评价模型^[5-7]、多指标综合评价法^[8-9]、生态足迹法^[10-14],以及其他多种评价模型方法^[15-17]进行研究。但是,生态环境承载力是一个动态变化的过程,大多数研究只是反映某一时间点的静态生态环境承载力水平,不能反映研究区生态环境状况随时间变化的连续性。目前,关于天津市生态环境承载力指标体系建设及分析方面所做的工作较少,所以对天津生态环境承载力的研究具有较高的实用价值和现实意义。

基于此,本研究尝试将模糊聚类的数学方法引入生态环境承载力研究中,结合生态环境现状以及社会经济发展特点,依据 P-S-R 模型构建一套符合研究区的生态环境承载力评价指标体系和分级标准,分析其生态环境承载力水平及变化趋势,旨在对天津市未来的发展提供合理建议,也为其他地区生态环境承载力的研究提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

天津市总面积 119.19 万 hm^2 ,位于 $38^{\circ}34' \sim 40^{\circ}15' \text{N}$, $116^{\circ}43' \sim 118^{\circ}04' \text{E}$,是我国四大直辖市之一,位于华北平原东北部,海河流域下游,地跨河海两岸,东临渤海,北依燕山,西靠首都北京,地理位置优越,区位优势明显。天津市是北京市通往东北、华北地区铁路的交通咽喉,是中国北部地区的重要交通枢纽,是拱卫京畿的要地和门户,保障天津市社会经济发展的同时并确保生态环境状况良好是其工作的重中之重。

1.2 数据来源

生态环境承载力评价指标数据来源于《天津市统计年鉴》^[18]、《中国统计年鉴》^[19]和《中国环境年鉴》^[20],有些指标可以直接引用统计年鉴上的数据,有些指标需要根据其物理意义进行量化处理。

2 生态环境承载力评价方法

2.1 生态环境承载力概念及含义

不同学者对生态环境承载力概念的界定有所不

同^[2-4,15,21]。综合不同学者观点,本研究认为生态环境可承载状态是指在某一地区内,人类社会、经济发展等各项活动对生态环境造成的压力小于生态环境系统本身可承受的最大能力,基于此状况才能确保该生态环境系统的组成、结构以及功能的完整和稳定,并且处于良性的循环发展状态。根据 P-S-R 模型(压力层-状态层-响应层)的概念,生态环境承载力状况的评价主要包括 3 个层面:一是人类活动和社会经济发展对资源环境带来的压力;二是现存生态环境系统的自我承载水平;三是为保护生态环境而采取的措施所见的成效。其中:

1) 压力层表征社会经济发展过程中的人为因素、自然因素给生态环境造成的负面影响,主要考虑区域生态环境面临的压力和资源消耗量对环境承载力的消极影响,反映生态环境系统外在压力的大小,逆指标数值越大,表示生态环境系统所受压力越大,反之则表示生态环境系统所受压力较小;

2) 状态层表征研究区域社会经济发展中资源环境现状,对现实状况进行分析,数值的大小反映了承载对象生态环境质量的高低,正指标数值越高,表示生态环境系统的承载力水平越高;

3) 响应层表征相关部门、社会组织为促进资源、环境、生态和谐发展所做出的反映,指标数值越高,表示生态环境系统修复能力越强;

综上所述,区域内生态环境承载能力高低主要取决于以下方面:压力层反映生态环境系统受人类活动的影响程度,状态层反映区域现实承载力水平的高低,响应层反映促进生态环境系统向好发展的能力。3 个层次相互关联,层层递进,因此,可以较好反映区域的生态环境承载力水平。

2.2 评价指标体系构建

本研究旨在评价天津市的生态环境承载力,因此将生态环境承载力作为目标层。依据前文中对生态环境承载力的定义,将其概括为 3 个层次:压力层、状态层、响应层,并将这 3 个层次作为评价指标体系的准则层。

构建合理的生态环境评价指标体系是生态环境承载力评价的前提和基础^[22-23]。压力层,人类活动对生态环境施加的压力,通过研究发现,人口密度、能源消耗量、污染物排放量基本上代表了生态环境系统的压力层状态,人口密度关系到土地资源的承载能力,能源消耗量关系到资源的承载能力,污染物排放量直接影响生态环境质量,因此选择人口密度、

万元 GDP 能耗、万元 GDP 的 COD 排放强度、SO₂ 排放强度、废水排放量、工业固体废物产生量等 7 个方面作为指标层;状态层,人类活动和社会经济发展使生态环境发生一定的变化,环境现状、绿化水平可直观反映出生态环境质量和社会经济发展中存在的问题,因此选取人均水资源量、绿化面积等 5 个方面作为指标层;响应层,人类社会为恢复生态环境系统或防止环境退化所采取的措施^[22],社会进步、

经济发展、环境治理、环保措施会给生态环境承载力带来积极的能动效应,因此选取污水处理率、工业废水排放达标率、环保投入等 5 个方面作为指标层。根据压力、状态、响应 3 个层次建立指标体系对生态环境承载力进行评价具有较强的应用性。所选取的指标涉及社会、经济、资源、环境等各个方面,针对性强、层次清晰、可较全面综合反映天津市生态环境承载力状况(表 1)。

表 1 天津市生态环境承载力评价指标体系

Table 1 Ecological and environmental carrying capacity evaluation index system of Tianjin

目标层 Target level	准则层 Guidelines layer	指标层 Indicator layer	指标层说明 Indicator layer meaning
生态环境承载力	压力层	人口密度	人口数/总面积,人/km ²
		人均 GDP	GDP 总和/总人口,元
		万元 GDP 能耗	标准煤消费量/万元 GDP,t/万元
		万元 GDP 的 COD 排放强度	COD 排放量/万元 GDP,kg/万元
		万元 GDP 的 SO ₂ 排放强度	SO ₂ 排放量/万元 GDP,kg/万元
		废水排放量	废水排放总量,10 ⁴ t
		工业固体废物产生量	工业固体废物总量,10 ⁴ t
	状态层	人均水资源量	水资源总量/总人口,m ³ /人
		人均公园绿地面积	公园绿地总面积/总人口/,m ² /人
		人均拥有道路面积	道路总面积/总人口/,m ² /人
		平均气温	每年平均气温,℃
		耕地面积比重	耕地面积/总面积,%
	响应层	污水处理率	可处理污水量/总污水量,%
		工业固体废物综合利用率	可利用固体废物量/总固体废物量,%
		工业废水排放达标率	排放达标废水量/排放的总废水量,%
森林覆盖率		森林面积/总面积,%	
		环保投入占 GDP 比值	环保投入/GDP 产值,%

2.3 评价模型

模糊物元模型^[24-25]就是对于给定的事物 M ,它关于特征 x 的量值为 y ,按照有序三元组合 $R = (M, c, x)$ 作为描述事物的基本物元。如果事物 M 有 m 个特征, $c_1, c_2 \dots c_m$ 和相应的模糊量值 $x_1, x_2 \dots x_m$,称 R 为 n 维模糊物元,记为 $R = (M, c, c_m,)$,而 n 个事物的 m 维模糊物元组合在一起,便构成 n 个

事物的 m 维复合模糊物元 R_m ,记为

$$R_m = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_n \\ C_1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ C_2 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_m & X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: M_n 为 n 个事物, $n = 1, 2, 3 \dots n$, c_m 为第 m 项

特征, $m = 1, 2, 3 \dots m, X_{mm}$ 为第 n 个事物的第 m 项特征对应的模糊量值。

$V = \{v_1, v_2 \dots v_n\}$ 为生态环境承载力等级集合, 用矩阵 R 来表示评价指标集合和生态环境承载力等级集合之间的模糊关系:

设 $U = \{u_1, u_1 \dots u_m\}$ 为选取评价指标集合,

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{12} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, 3, 4$ 表示生态环境承载力等级指数; $j=1, 2, 3 \dots 17$ 表示评价指标个数。

生态环境承载力各个等级的隶属度值, 将所选指标分为正向指标和逆向指标两类。

根据隶属函数计算所选取的评价指标对应的生

	当 $j = 1$ 时	正指标	逆指标
$r_{ij} =$	1	$u_i \geq v_i$	$u_i \leq v_i$
{	$\frac{u_i - v_{i2}}{v_{i1} - v_{i2}}$	$v_{i2} < u_i \leq v_{i1}$	$v_{i1} < u_i \leq v_{i2}$
}	0	$u_i \leq v_{i2}$	$v_i \geq v_{i2}$

(3)

	当 $j = 2, 3$ 时	正指标	逆指标
$r_{ij} =$	0	$u_i \geq v_i, (j-1), u_i \leq v_i, (j+1)$	$u_i \leq v_i, (j-1), u_i \geq v_i, (j+1)$
{	$\frac{u_i - v_i, (j-1)}{v_{ij} - v_i, (j-1)}$	$v_{ij} < u_i \leq v_i, (j-1)$	$v_i, (j-1) < u_i \leq v_{ij}$
}	$\frac{u_i - v_i, (j+1)}{v_{ij} - v_i, (j+1)}$	$v_i, (j+1) < u_i \leq v_{ij}$	$v_{ij} \leq u_i < v_i, (j+1)$

(4)

	当 $j = 4$ 时	正指标	逆指标
$r_{ij} =$	0	$u_i \geq v_{i3}$	$u_i \leq v_{i3}$
{	$\frac{u_i - v_{i3}}{v_{i4} - v_{i3}}$	$v_{i4} < u_i \leq v_{i3}$	$v_{i3} < u_i \leq v_{i4}$
}	1	$u_i \leq v_{i4}$	$u_i \geq v_{i4}$

(5)

式中: r_{ij} , 对应指标 u_i 被确定为 v_j 的隶属度值, 即在 V 上的隶属度值, 计算隶属度值 r_{ij} , 从而求得隶属度矩阵。

单纯依靠生态环境承载力模糊隶属度值难以全面衡量其等级变化, 各级的承载力状态评判较为复杂。因此, 本研究基于前文中生态环境承载力的概念, 结合天津市实际情况, 通过查阅文献, 专家咨询分析和参考相关规程^{①②}、《生态环境状况评价技术规范 HJ192—2015》^[29], 以及借鉴朱嘉伟等^[2]最终确定划分 4 个等级表示生态环境承载力水平, 分别为 I 级可承载、II 级基本可承载、III 级轻度可承载、IV 级超载(表 2)。

由于生态环境承载能力的阈值、人类活动对生态环境施加压力的大小, 以及生态环境承载力的变化程度均是难以以确定的量值计算的, 因此本研究选用模糊数学方法, 求取天津市生态环境承载压力, 即通过对影响某事物各因素的综合考虑, 对该事物的优劣做出科学评价, 考虑与被评价事物相关的各因素, 从而对其所做的综合评价^[22, 26-27]。

根据分级标准和数据计算结果对生态环境承载力进行综合评价。

2.4 评价分级标准

确定生态环境承载力分级标准是其评价的关键,

① 天津生态市建设规划纲要. 天津: 天津市环境保护局, 2007.

② 生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿). 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2007.

表2 天津市生态环境承载力评价指标分级标准

Table 2 Ecological and environmental carrying capacity evaluation index grading standard of Tianjin

目标层 Target level	准则层 Guidelines layer	指标层 Indicator layer		评价指标分级标准 Evaluation criteria grading standards				
		指标 Index	属性 Attributes	I	II	III	IV	
生态 环境 承载力	压力层	人口密度,人/km ²	负	800	900	1 100	1 200	
		人均 GDP,元	正	80 000	60 000	40 000	20 000	
		万元 GDP 标准煤消耗量/,t/万元	负	0.4	0.5	0.6	0.7	
		万元 GDP 的 COD 排放强度,kg/万元	负	2.0	3.5	5	6.5	
		万元 GDP 的 SO ₂ 排放强度,kg/万元	负	2	4	6	8	
		废水排放量,10 ⁴ t	负	20 000	40 000	60 000	80 000	
	状态层	工业固体废物产生量,10 ⁴ t	负	500	800	1 300	1 600	
		人均水资源量,m ³ /人	正	150	120	90	60	
		人均公园绿地面积,m ² /人	正	10.5	8.5	7.0	6.0	
		人均拥有道路面积,m ² /人	正	14	13	12	11	
		平均气温,℃	负	12.0	12.3	12.6	12.9	
		耕地面积比重,%	正	40.7	39.7	38.7	37.7	
		响应层	污水处理率,%	正	90	80	60	40
			工业固体废物综合利用率,%	正	99	98	97	96
			工业废水排放达标率,%	正	99	98	97	96
森林覆盖率,%	正		9.9	8.9	7.9	6.9		
		环保投入占 GDP 比值,%	正	0.6	0.5	0.4	0.3	

3 结果与分析

3.1 指标权重及模糊矩阵

为准确计算承载力水平,本研究选用层次分析法确定各项指标权重,层次分析法是将定性分析与定量分析相结合来解决多目标复杂问题的分析方法,判断各衡量目标能否实现的标准,并合理给出每个决策方案的标准权重数^[27],该方法既能保证不同指标之间相对重要程度的差异性,又能保证权重结果的客观性,使评价结果更具科学性。以2014年天津市生态环境承载力各项指标为例,得到准则层及各层指标权重,确定模糊关系矩阵,计算各指标隶属度值(表3)。

1)准则层权重:[0.303 1,0.343 2,0.353 3];

2)各指标权重:[0.043 9,0.239 3,0.370 9,0.119 3,0.119 3,0.043 9,0.043 9,0.403 3,0.173 4,0.064 7,0.091 3,0.240 1,0.211 1,0.082 2,0.120 4,0.3111,0.288 9]

3)模糊关系矩阵:

0	0	0	1
1	0	0	0
1	0	0	0
1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	0	1
0	0	0	1
0	0.728	0.272	0
0.615	0.385	0	0
0	0	0.494	0.506
0	0	0	1
0	0	0	1
1	0	0	0
0.910	0.090	0	0
1	0	0	0
0.970	0.030	0	0
1	0	0	0

从 2014 年天津生态环境承载力等级综合评定结果来看,生态环境承载力处于超载状态的概率是 16.49%,处于轻度可承载状态的概率是 4.86%,处于基本可承载状态的概率是 13.31%,处于可承载状态的概率是 63.78%,按照最大隶属度原则,天津市 2014 年生态环境承载力处于可承载状态。

3.2 模糊评价结果

按照以上步骤得到天津市 2000—2014 年压力层、状态层、响应层、生态环境承载力隶属度值及等级水平(表 4)。

表 3 天津市 2014 年生态环境承载力隶属度值
Table 3 Ecological environment carrying capacity membership value of Tianjin in 2014

指标 Index	隶属度值 Membership value			
	I	II	III	IV
压力指标	0.848 7	0	0	0.131 8
状态指标	0.106 6	0.360 3	0.141 7	0.364 1
响应指标	0.973 3	0.026 7	0	0
综合指标	0.637 8	0.133 1	0.048 6	0.164 9

表 4 天津市 2000—2014 年隶属度值及生态环境承载力等级

Table 4 Membership value and ecological environment capacity level of Tianjin in 2000 to 2014

年份 Year	压力层 Pressure layer		状态层 Status layer		响应层 Response layer		生态环境承载力 Ecological environment carrying capacity	
	隶属度值	对应状态	隶属度值	对应状态	隶属度值	对应状态	隶属度值	对应状态
2000	0.85	超载	0.85	超载	0.75	超载	0.82	超载
2001	0.73	超载	0.59	超载	0.65	超载	0.66	超载
2002	0.68	超载	0.57	超载	0.70	超载	0.65	超载
2003	0.56	超载	0.42	基本可载	0.65	超载	0.42	超载
2004	0.73	超载	0.59	超载	0.65	超载	0.66	超载
2005	0.43	轻度可载	0.35	基本可载	0.62	轻度可载	0.45	轻度可载
2006	0.48	轻度可载	0.43	轻度可载	0.55	轻度可载	0.49	轻度可载
2007	0.48	轻度可载	0.39	超载	0.58	轻度可载	0.47	轻度可载
2008	0.52	基本可载	0.47	可承载	0.49	轻度可载	0.26	轻度可载
2009	0.51	基本可载	0.48	基本可载	0.59	可承载	0.39	基本可载
2010	0.36	可承载	0.56	超载	0.68	可承载	0.36	可承载
2011	0.73	可承载	0.39	超载	0.74	可承载	0.54	可承载
2012	0.85	可承载	0.64	可承载	0.76	可承载	0.75	可承载
2013	0.85	可承载	0.37	超载	0.96	可承载	0.66	可承载
2014	0.85	可承载	0.36	超载	0.97	可承载	0.64	可承载

通过计算得出,天津市 2000—2004 年的生态环境承载力为 IV 级,处于超载状态,但承载力水平稳中有升;2005—2008 年的生态环境承载力为 III 级,处于轻度可承载状态;2009 年的生态环境承载力为 II 级,处于基本可承载状态;2010—2014 年的生态

环境承载力为 I 级,处于可承载状态。15 年间,天津市生态环境承载力水平总体呈上升趋势,逐步由 IV 级向 I 级转变,且每级中隶属度值越来越高,接近于 1,截止到 2014 年承载力水平为 I 级,处于可承载状态。

3.3 生态环境承载力变化及因素分析

依据表 4 的计算结果,以年份为横坐标,以压力

层、状态层、响应层和生态环境承载力等级为纵坐标,绘制动态变化趋势图(图 1 和 2)。

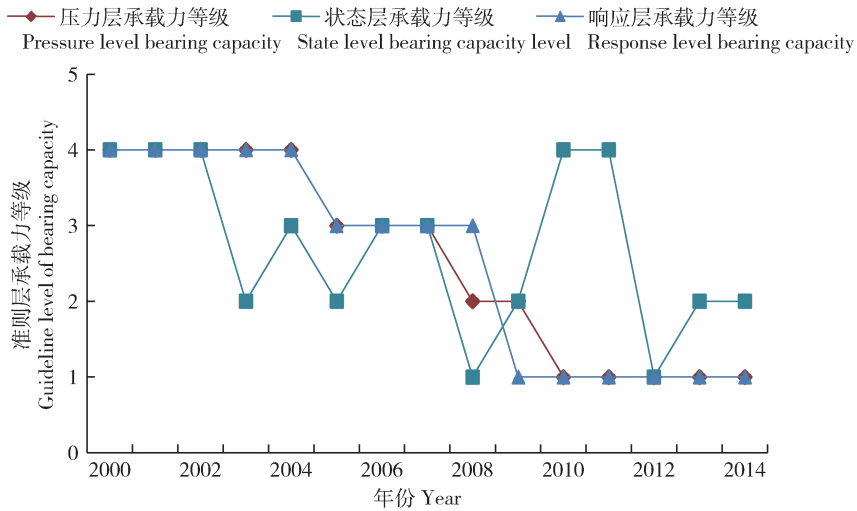


图 1 天津市 2000—2014 年准则层生态环境承载力等级动态趋势图

Fig. 1 Change trend of ecological environment carrying capacity of the guideline of Tianjin in 2000 to 2014

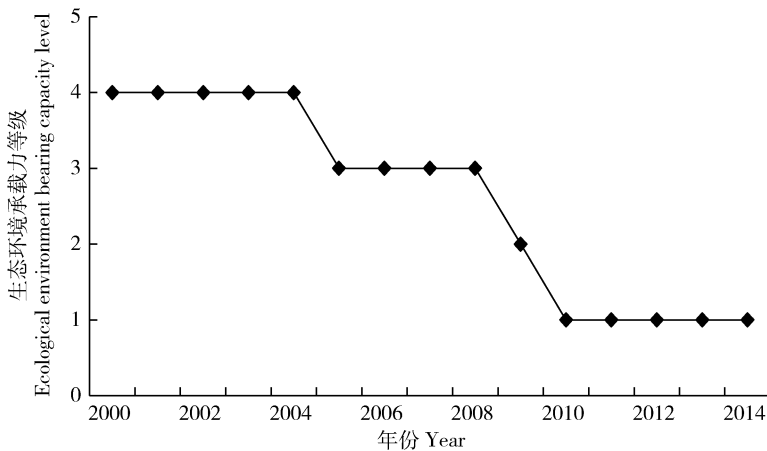


图 2 天津市 2000—2014 年生态环境承载力等级动态趋势图

Fig. 2 Change trend of ecological environment carrying capacity of Tianjin in 2000 to 2014

3.3.1 压力层生态环境承载力

从变化趋势图 1 看,2000—2004 年压力层承载力处于超载状态,2005—2009 年承载力呈上升趋势,由轻度可承载状态向基本可承载状态转变,2010 年承载力达到 I 级,至今一直处于可承载状态。

从指标层面分析,1)近年来,天津市万元 GDP 能耗,万元 GDP 的 COD 排放量、SO₂ 排放量都在减少,万元 GDP 能耗降幅达到 57.75%,万元 GDP 的 COD 排放强度、SO₂ 排放强度,降幅分别达 82.20%、85.85%,能源消耗量及污染物排放量均有不同程度下降;虽然,2014 年废水排放量、工业固体废物产生

量相比 2000 年有不程度的增加,但生态环境承载力等级没有大幅下降的主要原因是实施了节能减排、生态环境治理措施;2)产业结构不断优化,相比 2000 年,2014 年的第三产业占 GDP 比重达到 49.3%,产业结构逐渐由“一二三”发展阶段向“三二一”发展阶段转变,说明产业结构越来越合理化,在一定程度上缓解了经济发展对压力层指标的依赖程度;3)生态环境的不可持续发展、过度破坏问题逐渐被重视,全民的环境保护意识增强,资源消耗型、外延扩张型的经济增长趋势得到有效遏制,这些变化都有利于减少人类活动对资源环境造成的负荷,因

此压力层的生态环境承载力呈上升趋势。

3.3.2 状态层生态环境承载力

从变化趋势图 1 看,2000—2014 年状态层承载力等级呈波浪式变化,先升后降,近 2 年又略有下降趋势,发展趋势不容乐观,2000—2008 年承载力呈波动上升趋势,2009—2011 年承载力有所下降,尤其是 2010 年下降趋势明显,2012 年有所回升,2013—2014 年又略有下降。

从指标层分析,影响 2010 年状态层承载力下降程度较大的原因主要是全年降水量、水资源总量、地表水资源量、地下水资源量,以及人均水资源量等指标均有所下降,其中水资源总量、人均水资源量相比 2009 年降幅分别达 39.63%、44.16%,2011 年之后丰富的降水量使水资源总量以及地表水、地下水量得到补给,状态层承载力等级呈现回升趋势。2013 年状态层承载力等级又略有下降。由于天津市是一个工业城市,15 年间第二产业占 GDP 比重一直处于较高水平,第二产业的能源消耗量占能源消耗总量的 72.8%,重工业的总产值占整个工业总产值的比重达 79.1%。这种产业结构资源消耗量大,引起环境污染和生态破坏,给生态环境系统带来较大压力,因此有下降趋势。总体来看,天津市 2000—2014 年状态层的承载力等级呈上升趋势,但中间过程有较大波动,说明其生态环境系统的稳定性较差,其中,水资源供需矛盾和产业结构调整是社会发展、生态环境保护的重要影响因素。

3.3.3 响应层生态环境承载力

从变化趋势图 1 看,2000—2004 年响应层生态环境承载力处于超载状态,2005—2008 年承载力处于轻度可承载状态,2009 年承载力达到 I 级,至今一直处于可承载状态。

天津市社会经济的良好发展为生态环境的修复提供了充足支持,其明确提出加快推进生态文明建设,处理废水、废气、废渣及环保投入力度不断加大,2000—2014 年污水处理率、工业固体废物综合利用率、工业废水排放达标率、森林覆盖率、环保投入占 GDP 比值均有不同程度的增加,其中工业废水排放达标率在 95% 以上,污水处理率达到 90%,在环保投入方面,天津市 2014 年资金投入比 2000 年增加 10 倍,这些指标的变化说明生态环境的保护越来越被重视。总体来看,天津市 2000—2014 年响应层承载力等级呈上升趋势,为生态环境系统提供了有力支撑。

3.3.4 生态环境承载力

从变化趋势图 2 看,2000—2004 年的生态环境承载力为 IV 级,处于超载状态;2005—2009 年的生态环境承载力呈上升趋势,由轻度可承载状态向基本可承载状态转变;2010—2014 年的生态环境承载力为 I 级,处于可承载状态,综合图 1 和 2 可看出,压力层、响应层的承载力等级变化趋势与生态环境承载力等级变化趋势大体相同,与生态环境承载力等级变化趋势有较强的相关性。

2000—2004 年是“十五”计划时期,天津市坚持“发展是硬道理”,保持国民经济的持续快速发展,缺乏生态环境保护意识,因此该时段的生态环境承载力一直处于超载状态;“十一五”“十二五”规划时期,天津市明确提出要努力构建集约型、节约型、生态型发展模式,大力加强生态文明建设,在资源、环境、经济和社会发展方面采取了多项措施,注重生态环境系统响应层承载力的提升,并努力降低社会发展给生态环境系统带来的压力,成效显著。

4 结论与建议

4.1 结论

1) 本研究依据生态环境承载力的内涵,构建评价指标体系,通过模糊聚类法,定量分析了天津市 2000—2014 年的生态环境承载力水平及动态变化趋势。综合来看,天津市 2000—2004 年的生态环境承载力为 IV 级,处于超载状态;2005—2009 年的生态环境承载力呈上升趋势,由轻度可承载状态向基本可承载状态转变;2010—2014 年的生态环境承载力为 I 级,处于可承载状态,生态环境承载力不断提高,各层次协调度不断增强,为区域可持续发展奠定了坚实基础。

2) 天津市作为工业城市和资源型缺水城市,依赖能源和水资源消耗的发展模式,会引起资源、环境、生态之间的矛盾。其早前的生态环境质量较差,结构不协调。近年来,天津市生态环境的恢复力、环保措施、服务功能较差等状况已经有所缓解,但是距离完全可承载状态仍有很大距离。因此,应严格控制生态环保红线,加强生态文明建设,充分发挥经济效益、资源效益和生态效益,建立起良性循环的生态经济环境系统,从而促进社会经济的可持续健康发展。

4.2 建议

目前,天津市的生态环境可以承载人类经济活

动带来的压力,但随着京津冀协同发展,“一基地三区”、滨海新区及重点项目建设的进一步推进,资源开发强度大、生态环境系统弱、环境容量小等问题都将是重大挑战。结合目标层和准则层承载状况对比分析,总结目前存在的主要问题:

1) 经济发展中,资源、能源消耗量大,产业结构有待优化;

2) 水资源不足,是制约经济发展的重要因素;

3) 资源开发后生态环境破坏严重,自我修复能力降低。

基于此,提出针对天津市存在问题的对策和建议:

1) 合理调整产业结构,发展循环经济,加快转变经济发展方式,推进产业结构优化升级,降低能源、水、土地消耗强度,提高清洁能源使用比例,推进新能源、可再生能源发展,支持节能低碳产业,;

2) 全面促进节约水资源,推动水资源利用方式的根本转变,加强水源地保护与用水总量管理,建设节水型社会;

3) 采取严格的生态环境保护措施,实施整体预防和治理,加大生态环境治理和修复力度,逐步恢复污染的生态系统服务和纳污功能,提高天津市生态环境整体承载力水平。

参考文献 References

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The ecological environment conditions and construction of an ecological civilization in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6328-6335 (in Chinese)
- [2] 朱嘉伟, 谢晓彤, 李心慧. 生态环境承载力评价研究: 以河南省为例[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 1-9
Zhu J W, Xie X T, Li X H. A solution to the problem of ecological environmental carrying capacity evaluation: A case study of Henan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 1-9 (in Chinese)
- [3] 高鹭, 张宏业. 生态承载力的国内外研究进展[J]. 中国人口、资源与环境, 2007(2): 19-26
Gao L, Zhang H Y. Progress in research of ecological carrying capacity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 17(2): 19-26 (in Chinese)
- [4] 顾康康. 生态承载力的概念及其研究方法[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 389-396
Gu K K. Concepts and assessment methods of ecological carrying capacity[J]. *Ecological and Environmental Sciences*,

- 2012, 21(2): 389-396 (in Chinese)
- [5] 熊建新, 陈端吕, 谢雪梅. 基于状态空间法的洞庭湖区生态承载力综合评价研究[J]. 经济地理, 2012, 32(11): 138-142
Xiong J X, Chen D L, Xie X M. Comprehensive evaluation on ecological carrying capacity based on state-space techniques in Dongting Lake Region[J]. *Ecological Geography*, 2012, 32(11): 138-142 (in Chinese)
- [6] 狄乾斌, 张洁, 吴佳璐. 基于生态系统健康的辽宁省海洋生态承载力评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 256-264
Di Q B, Zhang J, Wu J L. Assessment of marine ecological carrying capacity in Liaoning Province based on the ecosystem health[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 256-264 (in Chinese)
- [7] 谭映宇, 张平, 刘容子, 周磊. 渤海内主要海湾资源和生态环境承载力比较研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(12): 7-12
Tan Y Y, Zhang P, Liu R Z, Zhou L. Comparative study on the carrying capacity of marine resources, ecology and environment in three bays of Bohai Sea[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(12): 7-12 (in Chinese)
- [8] 郭娜, 王伯铎, 崔晨, 张秋菊. 榆林市生态环境承载力评价分析[J]. 中国人口、资源与环境, 2011, 21(3): 104-107
Guo N, Wang B D, Cui C, Zhang Q J. Evaluation and analysis on the ecological environment carrying capacity in Yulin City[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(3): 104-107 (in Chinese)
- [9] 金悦, 陆兆华, 檀菲菲, 张萌, 张红玉. 典型资源型城市生态承载力评价: 以唐山市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4852-4859
Jin Y, Lu Z H, Tan F F, Zhang M, Zhang H Y. Assessment of ecological carrying capacity on the typical resources-based cities: A case study of Tangshan City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4852-4859 (in Chinese)
- [10] 许月卿. 基于生态足迹的北京市土地生态承载力评价[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 37-42
Xu Y Q. Evaluation of ecological carrying capacity based on ecological footprint model in Beijing[J]. *Resources Sciences*, 2007, 29(5): 37-42 (in Chinese)
- [11] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, Galli A, Ercin A E, Weinzzettl J, Steen-Olsen K. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 1-8
- [12] Weinzzettl J, Steen-Olsen K, Hertwich E G, Borucke M, Galli A. Ecological footprint of nations: Comparison of process analysis, and standard and hybrid multiregional input-output analysis[J]. *Ecologica Economics*, 2014, 101: 115-126
- [13] Moore J, Kissinger M, Rees W E. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver [J]. *Journal of EnvironmentL Managemen*, 2013, 124: 51-61
- [14] Galli A, Weinzzettl J, Cranston G, Ercin E. A Footprint

- Family extended MRIO model to support Europe's transition to a One Planet Economy [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461: 813-818
- [15] 杨志峰, 隋欣. 基于生态系统健康的生态承载力评价[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 586-594
Yang Z F, Sui X. Assessment of the ecological carrying capacity based on the ecosystem health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(5): 586-594 (in Chinese)
- [16] 徐琳瑜, 杨志峰, 李巍. 城市生态系统承载力理论与评价方法[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 771-777
Xu L Y, Yang Z F, Li W. Theory and evaluation of urban ecosystem carrying capacity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 771-777 (in Chinese)
- [17] Feng L H, Huang C F. A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources [J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(5): 621-633
- [18] 天津市统计局. 天津市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
Tianjin Bureau of Statistics. *Tianjin Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)
- [20] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境年鉴社
China Environment Yearbook Editorial Board. *China Environment Yearbook* [M]. Beijing: China Environment Yearbook Press (in Chinese)
- [21] 黄青, 任志远. 论生态承载力与生态安全[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 11-17
Huang Q, Ren Z Y. Ecological carrying capacity and ecological security[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(2): 11-17 (in Chinese)
- [22] 王奎峰, 李娜, 于学峰, 王岳林, 刘洋. 基于 P-S-R 概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究: 以山东半岛为例[J]. 环境科学学报, 2014, 34(08): 2133-2139
Wang K F, Li N, Yu X F, Wang Y L, Liu Y. Eco-environmental carrying capacity evaluation index system based on the concept of P-S-R model: A case study in Shandong Peninsula [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(8): 2133-2139 (in Chinese)
- [23] 殷培杰, 杜世勇, 白志鹏. 2008 年山东省 17 城市生态承载力分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2048-2057
Yin P J, Du S Y, Bai Z P. Analysis and evaluation of the ecological carrying capacity of 17 cities in Shandong Province in 2008[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 2048-2057 (in Chinese)
- [24] 郭彦龙, 卫海燕, 顾蔚, 张海龙. 基于模糊物元模型的桃儿七潜在地理分布研究[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 770-778
Guo Y L, Wei H Y, Gu W, Zhang H L. Potential distributions of *Sinopodophyllum hexandrum* based on fuzzy matter element model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 770-778 (in Chinese)
- [25] 周洁, 姚萍, 黄贤金, 陈志刚. 基于模糊物元模型的南京市失地农民可持续生计评价[J]. 中国土地科学, 2013, 27(11): 72-79
Zhou J, Yao P, Huang X J, Chen Z G. Sustainable livelihoods evaluation of land-lost farmers based on fuzzy matter-element model: A case study of Nanjing[J]. *China Land Sciences*, 2013, 27(11): 72-79 (in Chinese)
- [26] 王奎峰, 李娜, 于学峰, 王岳林, 刘洋. 山东半岛生态环境承载力评价指标体系构建及应用研究[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 1018-1027
Guo Q F, Li N, Yu X F, Wang Y L, Liu Y. The construction and application of the index system of eco-environmental carrying capacity in Shandong Peninsula [J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 1018-1027 (in Chinese)
- [27] 向欣, 罗煜, 程红胜, 沈玉君, 王延昌, 张玉华. 基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 205-212
Xiang X, Luo Y, Cheng H S, Shen Y J, Wang Y C, Zhang Y H. Biogas engineering technology screening based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18): 205-212 (in Chinese)
- [29] HJ192—2015. 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015
HJ192—2015. Technical criterion for ecosystem status evaluation[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2015 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华