

# 面向可持续城市生态系统管理的资源环境 承载力评价方法与实践应用 ——以烟台市为例

王静<sup>1</sup>, 袁昕怡<sup>1</sup>, 陈晔<sup>1</sup>, 方莹<sup>1</sup>, 翟天林<sup>1</sup>, 宋子秋<sup>2</sup>

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 烟台市自然资源与规划局土地利用规划站, 烟台 264003)

**摘要:** 全面科学的资源环境承载力评价是国土空间规划编制的前提。面向可持续生态系统管理视角, 提出了由“潜在”和“现实”资源环境承载力构成的资源环境承载力评价框架和理论模型, 并以烟台为案例进行应用, 分析了“潜在”和“现实”资源环境承载指数的相互关系。结果表明: (1) 烟台市“潜在”资源环境承载指数总体偏高, “现实”资源环境承载指数总体中等, 各区(县)空间差异较大。(2) 水资源短缺与环境污染问题是未来影响烟台市可持续发展的瓶颈, 资源环境禀赋的限制和经济发展对城市生态系统服务弱供给区域影响较大, 对“潜在”资源环境承载指数的影响在城市边缘区域较大。(3) 所提出的评价逻辑框架和理论模型应用效果良好, 丰富和完善了资源环境承载力评价理论方法。

**关键词:** 资源环境承载力评价; 理论模型; “潜在”资源环境承载指数; “现实”资源环境承载指数; 相互关系; 烟台市

国土空间是自然资源和人类生产生活的载体, 是社会经济发展的重要生产要素<sup>[1]</sup>。新时代国土空间规划是国家空间发展的指南, 是各类开发保护建设活动的基本依据<sup>[2]</sup>。《中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》中提出, 要在资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价的基础上, 强化底线约束, 科学有序地统筹布局国土空间, 提高规划科学性和协调性<sup>[2]</sup>。全面科学的资源环境承载力评价是国土空间规划编制的重要基础和前提<sup>[3]</sup>。

有关资源环境承载力的研究雏形形成于19世纪末期至20世纪初期<sup>[4-6]</sup>, 1950年代前的研究侧重于对资源环境与种群之间关系的理论探讨和承载力基本内涵的研究, 并提出了初步测算方程<sup>[7,8]</sup>; 1960—1970年代的研究重点逐渐转移至人类经济活动和外界环境变化对生态系统的影响, 对承载力的理解由极限思想转为相对平衡<sup>[9,10]</sup>; 1990年代之后的研究由单要素的限制转变为多要素的集成探索研究, 更多关注人类活动对生态系统稳定性的影响<sup>[9]</sup>。随着研究深入, 承载力研究从最初的以生产为导向的研究演变到以生态系统保护为导向的研究, 从人口的承载力研究演变为资源承载力、环境承载力, 再演变为生态承载力与资源环境综合承载力等研究<sup>[11-14]</sup>, 资源环境承载力的概念与内涵更具有系统性和综合性<sup>[15]</sup>。从1798年Malthus<sup>[16]</sup>首次提出承载力的思想到现在, 承载力评价方法经历了从

收稿日期: 2020-02-28; 修订日期: 2020-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100801)

作者简介: 王静(1966-), 女, 浙江天台人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地资源可持续利用与生态系统管理。E-mail: wjing0162@126.com

定性到定性定量相结合、从单一到综合、从静态到动态的演变趋势<sup>[17]</sup>，大多数研究集中于单因子的资源或环境承载力研究<sup>[18-22]</sup>。针对资源或环境承载力评价模型，多数研究也基于区域资源环境承载力各要素的加权求和，表征区域资源环境承载力的相对状态<sup>[23,24]</sup>，并且利用模型和现代信息技术方法测度资源环境承载力研究也取得一定成果<sup>[25-28]</sup>。

纵观承载力概念的演变与评价方法的发展历程，过往的研究已取得丰富成果，对当今国土空间规划视角下的资源环境承载力评价具有重要参考价值。但目前的资源环境承载力评价侧重于区域资源环境承载力各要素的综合指数计算，考虑要素之间的相互关系和区域生态系统整体性及其人类活动影响的研究有待深入；针对资源环境承载力认知和理论模型及其时空尺度的关系研究仍较薄弱<sup>[29,30]</sup>，有关资源环境承载力的动态性特性和不同时空尺度的资源环境承载力相互联系研究是未来研究重点。面向可持续城市生态系统管理，从城市人地关系系统、自然生态系统、人类社会系统等多维度认知城市资源环境承载能力，着眼于对人类活动及其经济社会发展的支持能力，从人口和经济社会发展的角度研究资源环境承载力成为重点<sup>[29-32]</sup>。本文面向未来构建科学适度有序的城市国土空间布局，基于资源环境承载力对人类活动和经济社会发展支持能力，提出城市资源环境承载力评价的逻辑框架和理论模型，系统认知城市“潜在”和“现实”资源环境承载力，为科学测度区域资源环境能力提供理论方法。

烟台市是山东半岛重要节点型城市，介于京津冀和长江三角洲两大经济区之间，作为沿海主要枢纽港口，在环渤海经济圈具有举足轻重的地位。近年来，随着烟台市城镇化进程加快，对国土空间重构需求不断提升。本文以烟台市为研究案例，开展资源环境承载力评价，应用和检验所提出的资源环境承载力评价理论模型和逻辑框架；并基于水资源和环境容量预测城市未来可承载的人口、用地和产业规模，探索城市未来发展潜力，以为烟台市未来国土空间规划的编制与实施提供依据与方向。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 资源环境承载力评价逻辑框架与理论模型构建

承载力是指一个承载物（载体）容纳承载对象的能力<sup>[33,34]</sup>。在一定地理空间范围内，资源环境承载的对象是社会发育过程的组合，包括人口、经济活动和社会政策<sup>[29,30]</sup>。借鉴相关研究，本文认为资源环境承载力所表征的是一个区域对人类活动及其经济社会发展的支持能力，即能够承载工业化和城镇化发展的最大能力，是资源环境本底对人类活动及其经济社会发展的最大“容量”。生态系统与环境限制越小，资源利用潜力越大，这一“容量”阈值越大。国土空间规划的重要成果即降低人类活动与自然生态系统之间的冲突，城市作为一定地理空间的自然—社会—经济复合生态系统，资源环境承载力评价的重点是刻画城市国土空间承载人类活动及其经济社会发展的能力，两个主体即作为“载体”的生态系统（国土空间）和作为“承载对象”的人类活动及其经济社会发展水平。因此，面向可持续城市生态系统管理的资源环境承载力评价的逻辑框架与理论模型如图1。

在此模型中，城市资源环境承载力可分为“现实”与“潜在”资源环境承载力。城市“潜在”资源环境承载力由作为“载体”的城市生态系统支撑条件决定，由城市生态系统服务供给和生态系统生境风险来表征<sup>[4]</sup>；城市“现实”资源环境承载力由“潜在”资源环境承载力和城市自然条件本底对资源环境开发利用的限制性（如水资源短缺、地

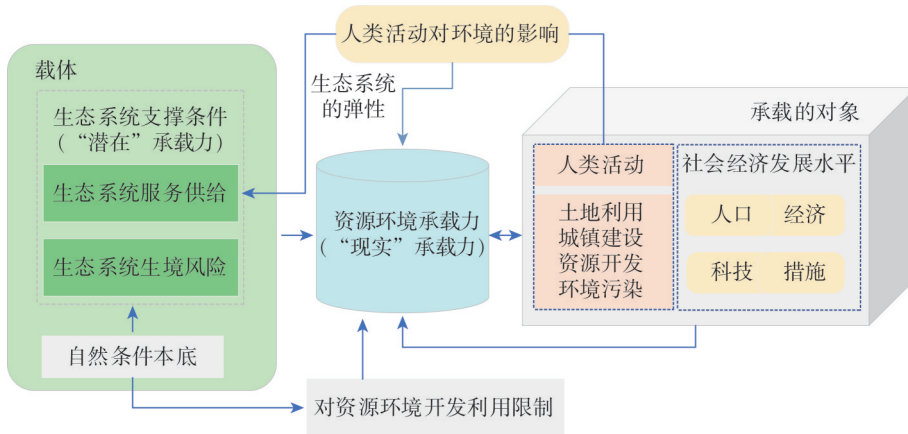


图1 资源环境承载力评价逻辑框架与理论模型

Fig. 1 Logical framework and theoretical model of resources-environment carrying capacity evaluation

质环境条件等)，以及作为“承载对象”的人类活动及其社会经济发展水平决定。在未来相当长一段时间，人类社会经济活动和资源开发利用对生态环境会产生重大影响，大气、水、土壤环境污染等影响已成为城市资源环境承载的“短板”要素，限制了城市“潜在”资源环境承载力。另外一方面，随着城市社会经济发展、科技水平提高和产业结构转型，假如以自然资源消耗为主转变为以IT产业为主，依靠周边区域提供生产产品，人类活动对环境影响的“短板”要素限制减少，其“现实”的资源环境承载力将发生变化。同时，城市资源环境承载力与一定的社会经济发展和科技水平，以及制度政策（如国土空间开发利用与生态系统保护修复制度和政策等）互为条件，并且再扩大区域间联系和开发程度，可增加本区域对人类活动及其社会经济活动的承载“容量”。

基于此，本文提出城市“现实”资源环境承载力评价的理论模型为：

$$RECC = \int (RECC_p, R, I, S, C, \sigma) \tag{1}$$

式中： $RECC$ 为“现实”资源环境承载力； $RECC_p$ 为“潜在”资源环境承载力，即城市生态系统本底的支撑条件； $R$ 为自然条件本底对资源环境开发利用的限制性因子，包括水资源短缺、地质环境限制、生态敏感性等； $I$ 为人类活动对大气、水、土壤等环境的影响因子； $S$ 为社会经济发展与科技水平因子，假设针对现状评价 $S=1$ ，针对未来科技进步情景 $S>1$ ； $C$ 为城市生态系统的对外联系与开放程度因子，若为封闭系统 $C=1$ ，若为开放系统 $C>1$ ； $\sigma$ 为影响资源环境承载力的不确定外在因素。

### 1.2 研究区概况

烟台市地处山东半岛东部，下辖4区7市1县（图2）。区内兼具暖温带大陆性季风气候和海洋性气候特征，地形复杂，地质灾害发

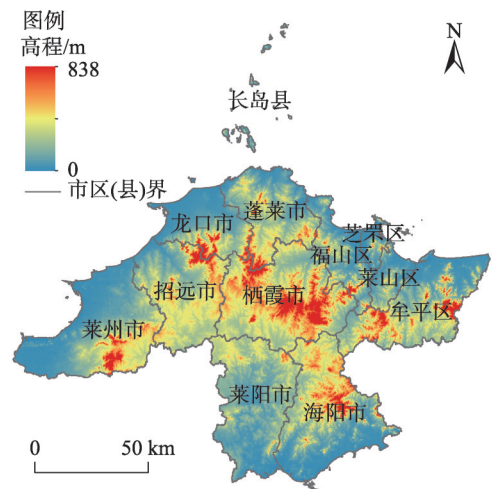


图2 研究区概况

Fig. 2 Location of the study area

生频率高。作为典型北方缺水城市,烟台市半数以上区(市、县)均处在严重缺水线以下。城市化进程的不断推进使得烟台市工业用地比例持续扩大,环境污染问题突出,对生态系统胁迫性增强。

### 1.3 数据来源

土地利用数据和农用地分等数据来源于烟台市自然资源与规划局;地质灾害数据来源于2017年烟台市地质灾害排查报告等成果;土壤地球化学状况等来源于中国地质调查局地质调查成果。植被覆盖度和植被指数运用Landsat 8遥感影像获取,净初级生产力来源于MODIS数据产品;利用InVEST模型中的碳储与吸收模型计算获得土壤碳蓄积量;基于RUSLE水土流失模型计算获得土壤侵蚀模数;水源涵养数据源于中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集产品;分区(市、县)GDP、人口、水资源量、供水用水量、环境污染数据等来源于《烟台市统计年鉴》和烟台市生态环境局及水文局统计报表。

### 1.4 研究方法

基于本文提出的资源环境承载力评价逻辑框架和理论模型,烟台案例区资源环境承载力评价思路由自然条件与资源环境禀赋分析—“潜在”资源环境承载力指数测算—限制因子识别—人类活动影响评估—“现实”资源环境承载力指数测算—人口、用地与产业承载规模预测等构成。

#### 1.4.1 资源环境承载指数测算

烟台市“潜在”资源环境承载指数( $RECC_p$ )依据陆域生态系统生境风险( $ER_c$ )、海岸带生态系统生境风险( $ER_m$ )和生态系统服务供给( $ES$ )测算。参考课题组研究成果<sup>[35,36]</sup>,选择评价单元为100 m×100 m栅格单元,利用InVEST模型计算获得 $ER_c$ 和 $ER_m$ 指数;通过计算水源涵养、水土保持、碳固定和产品提供四个类型生态系统服务供给,利用多指标加权计算获得 $ES$ 指数,指标的权重由层次分析方法计算确定。不同类型生态系统服务计算指标体系如表1。

表1 水源涵养、水土保持、碳固定和产品提供生态系统服务测算指标体系

Table 1 Ecosystem service measurement index system

目标层	准则层	指标层	权重
生态系统服务供给( $ES$ )	水源涵养	水源涵养	0.20
		水土保持	土壤有机质含量
	碳固定	土壤侵蚀模数	0.09
		植被指数(NDVI)	0.06
		植被覆盖度	0.06
		土壤碳蓄积量	0.10
	产品提供	净初级生产力(NPP)	0.10
		优质耕地比例	0.12
		林地比例	0.09

烟台“潜在”资源环境承载指数( $RECC_p$ )计算公式如下:

$$RECC_p = \sqrt[3]{ES \times ER_c \times ER_m} \quad (2)$$

式中: $ES$ 为生态系统服务供给指数; $ER_c$ 为陆域生态系统生境风险指数; $ER_m$ 为海岸带生态系统生境风险指数。计算前对各项数据进行标准化处理, $ES$ 从低到高标准化至1~4之间, $ER_c$ 和 $ER_m$ 从高到低标准化至1~4之间。

烟台市淡水资源匮乏,环境污染问题较为突出,地形条件复杂,地质灾害易发多发。通过分析烟台市国土空间开发、利用和保护所存在的主要问题,以烟台资源环境禀赋为基础,参考课题组研究成果<sup>[35,37]</sup>,烟台资源环境开发利用的限制性因子为淡水资源短缺和地质环境的影响,人类活动对烟台环境影响的“短板”因子为大气、水、土壤环境污染的影响。资源环境开发利用限制性评价指标体系见表2。

表2 资源环境禀赋限制性和人类活动对环境影响的限制性指数测算指标

Table 2 Measurement index of limiting factors of resources-environment endowment and impact of human activities on the environment

目标层	准则层	指标名称
资源环境禀赋 限制性指数 ( $R$ )	水资源限制性	人均水资源占有量、地下水资源量、多年平均降水量
	地质灾害限制性	地质灾害易发程度
人类活动对环境影响的 限制性指数 ( $I$ )	大气环境限制性	单位GDP的大气SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、PM <sub>10</sub> 环境容量
	水环境限制性	单位GDP的水体COD、氨氮环境容量
	土壤环境限制性	土壤地球化学环境质量

综合考虑烟台市城市生态系统服务供给和生态系统风险等支撑条件，以及资源环境禀赋的限制性和人类活动对环境影响的限制性，由式(1)测算烟台资源环境承载指数( $RECC$ )，表征资源环境承载空间分布的相对状态。本文针对现状社会经济发展与科技水平进行评价，假定烟台城市生态系统为封闭系统，“现实”资源环境承载指数( $RECC$ )具体计算公式如下：

$$RECC = RECC_p \times \sqrt[n]{R \times I} \quad (3)$$

式中： $R$ 为资源环境禀赋限制性指数； $I$ 为人类活动对环境影响的限制性指数； $R$ 和 $I$ 分别由表2中对应准则层各指标等权重计算得到，并进行标准化处理； $n$ 为“现实”资源环境承载指数影响因子的个数(个)。

在此基础上，设置城市社会经济发展不同情景，基于水资源和环境容量对其未来可承载的人口、用地和产业规模做出预测。

#### 1.4.2 “潜在”与“现实”承载指数耦合度量

分析 $RECC_p$ 和 $RECC$ 的空间差异与耦合程度，可定量测度资源环境禀赋的限制性和人类活动影响对 $RECC$ 的影响程度。从理论上，假设 $RECC_p$ 和 $RECC$ 为1:1线性平衡关系，参照Bradford<sup>[38]</sup>和D'Amato<sup>[39]</sup>提出的均方根误差(RMSE)量化生态系统服务权衡关系，将 $RECC_p$ 和 $RECC$ 的耦合程度表示为点到1:1直线的距离，距离越大两者之间耦合程度越低，表明资源环境禀赋的限制性和人类活动影响对 $RECC$ 的影响越大。权衡系数计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (DF_i - \overline{DF})^2} \quad (4)$$

式中： $DF_i$ 为第 $i$ 承载指数分值(标准化之后的值)； $\overline{DF}$ 为承载指数 $RECC_p$ 和 $RECC$ 的数学期望，在1:1线上； $n=2$ 。

#### 1.4.3 不同情景基于水资源供给和环境容量的人口规模预测

##### (1) 水资源承载人口规模预测

烟台市自然条件与资源禀赋对资源开发的主要限制性因子为水资源短缺，本文设置社会经济发展的不同情景，以居民生活用水量 and 人均日生活用水量测算烟台市水资源的人口承载规模，并用烟台“现实”资源环境承载指数进行修正。烟台市多年平均淡水资源利用率为45%，以此计算烟台市淡水可利用量；再结合远期南水北调工程、再生水利用量、海水淡化量等，可获得烟台市可供水资源总量。各产业用水量、居民生活用水量、生态用水量共同构成满足城市社会经济发展等基本需求的水资源量。假设到2035年

烟台市各项用水比例保持不变,以历年各项用水平均比例反映2035年用水比例。设置人均日生活用水量基准水平和高、低水平三种情景,预测2035年烟台市各区(市、县)水资源的人口承载规模。基准水平和高、低水平三种情景分别拟定为2015—2018年烟台市各区(市、县)人均日生活用水量的平均值、最低值和最高值。

## (2) 环境容量承载人口规模预测

人类活动导致大气、水、土壤环境污染,目前及未来较长一段时间将长期影响和决定着区域资源环境承载能力。由环境影响控制方程式(5)可知一定环境容量下所能承载的人口规模有限<sup>[40]</sup>,本文基于环境容量对烟台市的人口规模进行预测:

$$P = I / (A \times T) \quad (5)$$

式中:  $P$  为人口规模(人);  $I$  为环境影响(污染物环境容量)(t);  $A$  为人均GDP(万元/人);  $T$  为单位GDP所产生的环境影响(t/万元)。其中污染物环境容量包括大气环境容量( $EC_a$ )和水环境容量( $EC_w$ ),计算方法如下:

$$EC_a = \sum W \times (C_i - C_{i0}) \times M_i / \sqrt{M} \quad (6)$$

$$EC_w = \sum Q_i \times (C_i - C_{i0}) + \sum k C_i Q_i \quad (7)$$

式中:  $W$  为区域总量控制系数,山东省为4.34;  $C_i$  为污染物第  $i$  功能区的目标浓度( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $C_{i0}$  为污染物第  $i$  功能区的背景浓度( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $M_i$  为第  $i$  功能区面积( $\text{m}^2$ );  $M$  为总量控制面积( $\text{m}^2$ );  $Q_i$  为第  $i$  功能区的可利用地表水资源量( $\text{m}^3$ );  $k$  为污染物综合降解系数。

根据烟台市历年人均GDP与污染物排放量变化规律,利用趋势外推法进行推断,设置2035年烟台市人均GDP约增长至现状的1.8倍,单位GDP产生的环境影响约减少至现状的0.4倍;根据短板理论,取每个县区基于各污染物环境容量的人口规模预测值中的最小值,为该区(市、县)环境容量所能承载的人口规模。比较水资源和环境容量的人口承载规模,根据短板理论取较低值作为烟台市综合可承载人口规模。

### 1.4.4 基于人口规模的城市建设用地与经济产出规模预测

城市人口规模直接关系到城市建设用地规模。依据《山东省建设用地控制标准(2019年版)》,按Ⅱ类气候区所采用的人均城市建设用地规模最大取值作为2035年烟台市人均城市建设用地规模,综合上述水资源和环境容量可承载人口,估算烟台市2035年可承载城市建设用地规模。由2009—2017年烟台市各产业人均生产总值,采用趋势外推法预测2035年烟台市人均生产总值和各产业占比,基于上述水资源和环境容量综合可承载人口,预测烟台市2035年可承载的经济规模。

## 2 结果分析

### 2.1 资源环境承载状况分析

城市生态系统的自然本底状况决定了城市的资源环境承载能力。烟台市海岸带和陆地生态系统生境风险评价结果表明(图3),烟台市主要海域生态系统生境风险均较低,累计风险较高和高的地区仅有247  $\text{km}^2$ 和22  $\text{km}^2$ ;陆地生态系统因人类活动的影响,其累计生境风险高于海域生态系统,高风险区域集中分布在芝罘区和莱州市西部等城市建设用地集中区域。烟台市生态系统服务供给评估结果表明(图4),烟台市生态系统服务供给整体水平良好,部分区域仍待提高,低值区与陆地生境风险高值区较为相似,呈现出



分分布在栖霞市、海阳市、莱阳市和牟平区。 $RECC_p$ 低和较低区域比例远高于 $RECC_p$ 该部分的比例,说明资源环境禀赋限制与人类活动影响对资源环境承载力产生了较大压力。

## 2.2 “潜在”承载指数与“现实”承载指数耦合的区域差异

烟台市 $RECC_p$ 和 $RECC$ 耦合的空间差异如图7所示。 $RECC_p$ 和 $RECC$ 耦合程度较好的乡(镇)比例为25.00%,广泛分布于栖霞市、海阳市和牟平区北部等资源环境禀赋限制性和人类活动对环境影响较低的地区,权衡系数均低于0.08。耦合程度较差的区域即权衡系数高值区占45.73%,主要分布在莱州市、龙口市、福山区西南部、芝罘区南部和招远市北部等地区的中心城区周边区域,同时也是资源环境禀赋高限制及人类活动影响高限制区域的周边区域,在一定程度上表明人类活动对 $RECC_p$ 影响程度在城市边缘及其周边区域较大。因此,在城市边缘及其周边区域进行国土开发时,应严格落实生态保护红线对其底线控制,注重资源节约利用和有效控制人类活动的负面影响。

各乡(镇) $RECC_p$ 和 $RECC$ 为幂指数的关系(图8), $R^2$ 为0.68。 $RECC_p$ 和 $RECC$ 数据点在1:1直线(红色虚线)或偏向 $RECC$ 的乡(镇)占10.37%,大部分数据点更偏向于 $RECC_p$ ,说明大部分乡(镇) $RECC$ 值低于 $RECC_p$ 值,资源环境禀赋的限制性和人类活动对环境影响的限制性对 $RECC$ 产生负面影响。当 $RECC_p$ 较小时,数据点距离1:1直线较远,说明资源环境禀赋的限制和人类活动对弱供给生态系统影响高于强供给生态系统。在未来的城市开发进程中,承载力偏低和弱生态系统供给的区域应加强资源保护与生态功能修复。随着社会经济发展和科技水平进步,城市生态系统对外联系和依存程度将较大幅度提高, $RECC$ 与 $RECC_p$ 的差异将逐渐减少, $RECC$ 可能高于 $RECC_p$ ,城市资源环境承载力将进一步提升,开放系统的城市资源环境承载力评价有待深化。

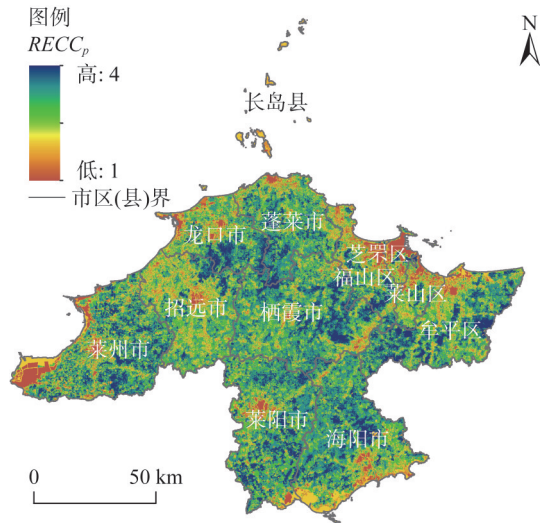


图5 烟台市“潜在”资源环境承载指数( $RECC_p$ )分布

Fig. 5 Spatial distribution of  $RECC_p$  in Yantai

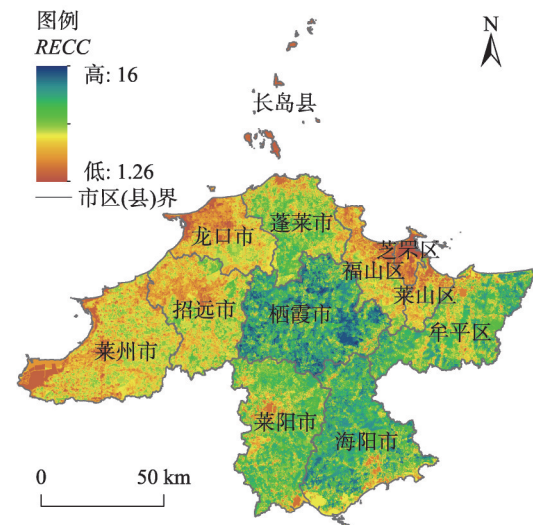


图6 烟台市“现实”资源环境承载指数( $RECC$ )空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of  $RECC$  in Yantai



表3 烟台市各区(市、县)资源环境承载指数空间分布

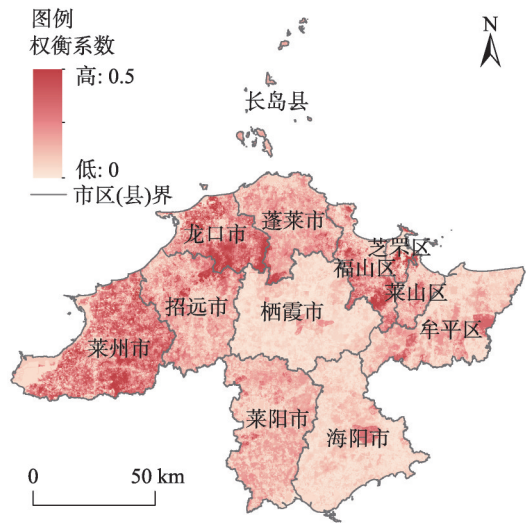
Table 3 Spatial distribution of resources-environment carrying index of each district in Yantai (%)

区 (市、县)	低承载指数占比		较低承载指数占比		较高承载指数占比		高承载指数占比		权衡系数
	$RECC_p$	$RECC$	$RECC_p$	$RECC$	$RECC_p$	$RECC$	$RECC_p$	$RECC$	
芝罘区	0.63	1.07	0.31	0.22	0.18	0	0.18	0	0.16
福山区	1.13	1.86	1.33	2.47	1.06	0.81	1.61	0	0.18
牟平区	0.86	0.67	2.53	2.50	2.75	4.53	4.83	3.27	0.11
莱山区	0.53	0.76	0.79	1.16	0.56	0.45	0.49	0	0.14
龙口市	0.88	2.26	1.54	3.64	1.56	0.60	2.52	0	0.24
莱阳市	0.88	0.73	2.09	2.59	3.75	7.12	5.77	2.05	0.13
招远市	1.12	2.19	3.51	5.72	3.09	2.43	2.62	0	0.16
栖霞市	0.76	0.12	2.95	1.14	4.09	3.93	6.77	9.38	0.05
长岛县	0.17	0.42	0.26	0	0	0	0	0	0.14
莱州市	2.00	3.83	2.99	8.15	3.38	1.94	5.55	0	0.22
蓬莱市	0.66	0.70	1.69	2.95	2.26	4.00	3.59	0.56	0.15
海阳市	1.11	0.38	2.90	2.25	3.61	5.44	6.17	5.72	0.06
烟台市	10.74	14.98	22.89	32.79	26.26	31.26	40.11	20.98	0.13

### 2.3 人口、产业与用地承载规模预测

烟台市在2035年水资源和环境容量可承载人口规模的预测结果见表4。到2035年,基准情景下烟台市水资源可承载人口925万人,高水平情景可达到1047.3万人,低水平情景可承载人口仅827.1万人。与烟台市各区(市、县)现状人口比较,2035年三种情景下芝罘区与莱山区等主城中心区现状全部超载。因此,烟台市亟待科学合理利用水资源,设置人均水资源总量和各产业用水量规划控制指标,实行总量控制和定额管理相结合的制度及节约用水鼓励型政策,提高水资源利用效率,同时深度挖掘水利工程节水调水潜力,以提高水资源的人口承载力。

2035年烟台市环境容量可承载的人口规模为835万人,与低水平情景下基于水资源供给的人口承载规模基本一致。由于目前长岛县、龙口市、招远市、莱州市环境污染问题较严重,2035年可承载人口预测值低于现状人口规模。未来需优化能源消费结构与布局,全面实施排污许可管理,控制污染物排放,建立健全污染物排放监督监测体系,减少单位GDP产生的环境影响。随着科技水平提高和节水高效,综合高水平情景下水资源可承载人口规模和环境容量可承载人口规模预测结果,根据短板理论,2035年烟台市可承载人口规模为835万人,与现状相比可增加人口规模为126万人。

图7 烟台市  $RECC_p$  和  $RECC$  耦合的空间差异Fig. 7 Spatial difference of  $RECC_p$  and  $RECC$  coupling in Yantai

2035年烟台市城市建设用地可承载规模为8.77万hm<sup>2</sup> (图9), 相较现状增加2.36万hm<sup>2</sup>。大部分地区可增长规模超过25.00%, 而芝罘区、莱山区和长岛县城市建设用地承载规模与现状相比有所减少, 与其资源环境承载能力较低有关, 需严格控制上述城区新增建设用地规模, 在推进城镇化建设时应合理控制阶段性城市建设用地规模的扩张水平, 避免城市扩张速度过快带来的负面影响, 同时提高建设用地集约利用水平和效率, 促进闲置地与空闲地的高效利用, 推进地下空间立体开发和城镇低效用地再开发。2035年烟台市总产值将达15422亿元 (表5), 其中第一产业产值规模可扩张程度较低, 为2017年产值的1.4倍, 第三产业产值可扩张至2.5倍。在未来的国土开发利用中, 需注意调整优化城乡用地结构, 引导人口、产业有序集聚, 增加对第三产业的投资, 提升第三产业发展的整体水平。同时, 大力提高建设用地的生态效率, 将生态系统保护与修复提到首位, 确保城市生态系统可持续发展。

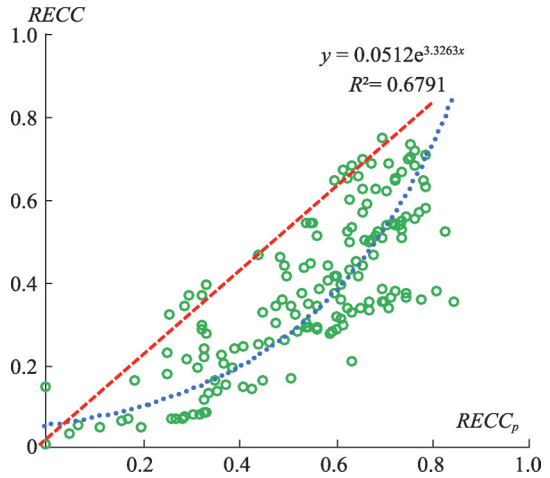


图8 烟台市各乡(镇) RECC<sub>p</sub>和RECC相互关系示意

Fig. 8 The relationship between RECC<sub>p</sub> and RECC in each town of Yantai

表4 烟台市2035年可承载人口规模预测结果

Table 4 The population that Yantai can carry in 2035

(万人)

区(市、县)	现状人口规模	水资源可承载人口规模			环境容量可承载人口规模	综合可承载人口规模	人口可增长规模
		低水平	基准值	高水平			
芝罘区	85	50	61	73	92	73	-11
福山区	70	65	83	105	85	85	15
牟平区	47	52	56	60	67	60	13
莱山区	36	27	29	31	48	31	-5
龙口市	70	109	119	130	62	62	-8
莱阳市	88	133	179	241	89	89	1
莱州市	89	110	111	112	89	89	0
蓬莱市	42	46	47	48	50	48	6
招远市	57	83	85	86	55	55	-2
栖霞市	58	57	58	58	100	58	0
海阳市	63	92	95	98	95	95	32
长岛县	4	3	4	4	3	3	-2

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文面向可持续城市生态系统管理视角, 提出了城市“潜在”和“现实”资源环境承载指数及其评价的逻辑框架和理论模型, 并以烟台市为案例, 提出了由自然条件与资

源环境禀赋分析—“潜在”资源环境承载指数测算—限制因子识别—人类活动影响评估—“现实”资源环境承载指数测算—人口、用地与产业承载规模预测等构成的评价流程。

烟台市“潜在”资源环境承载指数总体偏高，受资源环境禀赋限制性和人类活动对环境的影响，烟台市“现实”资源环境承载指数总体中等，各区（市、县）差异较大，承载指数较低的区域占土地总面积的47.76%。基于水资源供给和环境容量的人口承载预测，2035年烟台市可承载人口规模与现状相比可增长126万人，可承载的城市建设用地规模可增长2.36万 $\text{hm}^2$ ，可承载的产业规模可增长1.97倍。

水资源短缺与环境污染问题是未来影响烟台市城市生态系统可持续发展的瓶颈，资源环境禀赋的限制和人类活动对弱生态系统服务供给区域的影响高于强生态系统供给区域，人类活动对“潜在”资源环境承载力的影响程度在城市边缘区域较大，需大力提高城市周边区域生态效率。

### 3.2 讨论

本文以城市生态系统禀赋为基础，提出的资源环境承载力评价逻辑框架和理论模型，界定了“载体”与“承载对象”的差异，刻画了国土空间承载人类活动及其社会经济能力，提出了“潜在”和“现实”资源环境承载指数，不仅考虑了一定的社会经济和技术条件下在保持生态系统健康及生产力和恢复力前提下的最大能力，同时考虑了自然条件对生态系统生产力的影响以及人类活动对生态系统的影响，而且还考虑其与周边系统的区域联系及其开放性，丰富和发展了资源环境承载力评价的理论方法。资源环境承载力评价与国土空间开发适宜性评价（简称“双评价”）具有内在的逻辑关系，资源环境承载力评价中的限制性评价和未来人口、产业与用地承载规模预测，可为国土空间开发适宜性评价提供底线约束，未来城市建设开发空间确定需统筹考虑“双评价”的结果；同时，“双评价”从不同维度揭示资源环境禀赋的优势与短板，明确国土空间开发潜力，为国土空间规划编制提供更坚实的依据和参考<sup>[3]</sup>。

资源环境承载力与一定的社会经济发展和科技水平以及制度政策互为条件，“潜在”资源环境承载力和“现实”资源环境承载力也是存在相互联系和相互影响，城镇化和工业化水平提高导致自然资源稀缺性增强，人类活动对环境压力增大，也激励人类提高科技水平，增加资本和技术投入，保护和修复自然生态系统，实施产业调整和技术措施，

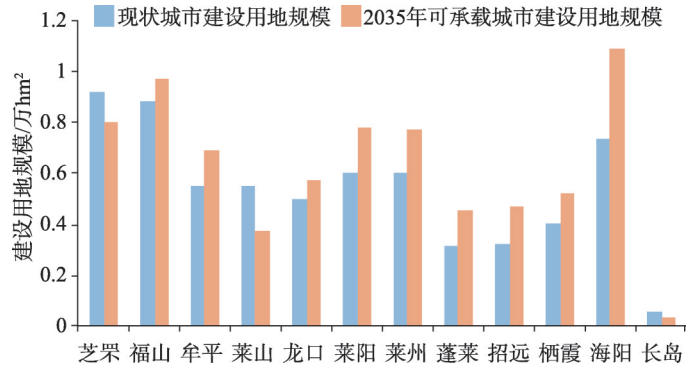


图9 2035年烟台市各区（市、县）城市建设用地承载规模预测结果  
Fig. 9 The scale of urban land that can be carried by each district of Yantai in 2035

表5 2035年烟台市可承载产业规模预测结果

Table 5 The industrial output that Yantai can carry in 2035 (亿元)

	现状产业规模	2035年可承载产业规模	变化
总产值	7339	15422	1.97
第一产业产值	480	720	1.41
第二产业产值	3674	5927	1.54
第三产业产值	3185	8774	2.52

同时扩大区域间联系和开发程度,以此增加城市对人类活动及其社会经济发展的承载“容量”。因此,科学认知“开放系统”与“封闭系统”和“动态”与“静态”的资源环境承载力,探讨不同空间尺度资源环境承载力的相互关系与差异,辨析“现状”与“未来”的资源环境承载力评价思路,从时间、空间维度科学认知资源环境承载力尤为重要,有关资源环境承载力评价时空尺度与相互关系及其动态性问题有待进一步深化研究。此外,城市生态系统的内在联系是复杂多样的,在预测未来人口、用地和产业规模时,需深入探索资源环境利用和社会经济系统的有机联系,预测结果可反映城市未来发展潜力,其准确性有待在漫长的发展历程中逐步检验。

### 参考文献(References):

- [1] 林坚,吴宇翔,吴佳雨,等.论空间规划体系的构建:兼析空间规划、国土空间用途管制与自然资源监管的关系.城市规划,2018,42(5):9-17. [LIN J, WU Y X, WU J Y, et al. Construction of the spatial planning system: With discussions on the relationship between spatial planning, territorial spatial regulation, and natural resources supervision. *City Planning Review*, 2018, 42(5): 9-17.]
- [2] 中央人民政府门户网站.中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content\\_5394187.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm), 2019-05-23. [Chinese government website. Several opinions of the state council of China on establishing the territorial spatial planning system and supervising its implementation. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content\\_5394187.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm), 2019-05-23.]
- [3] 郝庆,邓玲,封志明.国土空间规划中的承载力反思:概念,理论与实践.自然资源学报,2019,34(10):2073-2086. [HAO Q, DENG L, FENG Z M. Carrying capacity reconsidered in spatial planning: Concepts, methods and applications. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2073-2086.]
- [4] THOMSON G M. Acclimatization in New Zealand. *Science*, 1886, 8(197): 426-430.
- [5] PFAUNDLER L. Die weltwirtschaft im lichte der physik. *Deutsche Revue*, 1902, 22(2): 171-182.
- [6] USDA. Yearbook of the United States Department of Agriculture 1906. Washington: Government Printing Office, 1907: 765.
- [7] HADWEN I A S, PALMER L J. Reindeer in Alaska. Washington: US Department of Agriculture, 1922, 1089: 1-70.
- [8] ERRINGTON P L. Vulnerability of bob-white populations to predation. *Ecology*, 1934, 15(2): 110-127.
- [9] ROME A. The limits to growth: A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind. *Nature*, 2015, 527(7579): 443-445.
- [10] GILLAND B, HIGGINS G M, KASSAM A H, et al. Potential population supporting capacities of lands in the developing world: Land, food and people. *Population and Development Review*, 1984, 10(4): 733.
- [11] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Science*, 1995, 268(5210): 520-521.
- [12] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying capacity reconsidered: From Malthus' population theory to cultural carrying capacity. *Ecological Economics*, 1999, 31(3): 395-408.
- [13] MARTIRE S, CASTELLANI V, SALA S. Carrying capacity assessment of forest resources: Enhancing environmental sustainability in energy production at local scale. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 94: 11-20.
- [14] CORBAU C, BENEDETTO G, CONGIATU P P, et al. Tourism analysis at Asinara Island (Italy): Carrying capacity and web evaluations in two pocket beaches. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 169: 27-36.
- [15] 封志明,李鹏.承载力概念的源起与发展:基于资源环境视角的讨论.自然资源学报,2018,33(9):1475-1489. [FENG Z M, LI P. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(9): 1475-1489.]
- [16] MALTHUS T R. *An Essay on the Principle of Population*. London: Pickering, 1798: 7-10.
- [17] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践.资源科学,2017,39(3):379-395. [FENG Z M, YANG Y Z, YAN H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: From theory to practice. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [18] ZHOU Y, ZHOU J. Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity con-

- strained by GDP-PM<sub>2.5</sub>. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 637-652.
- [19] REN C, GUO P, LI M, et al. An innovative method for water resources carrying capacity research-Metabolic theory of regional water resources. *Journal of Environmental Management*, 2016, 167: 139-146.
- [20] MERIEM N A A, EWA B A. Algiers carrying capacity with respect to per capita domestic water use. *Sustainable Cities and Society*, 2014, 13: 1-11.
- [21] 游广永, 邹长新, 刘冬, 等. 上海市青浦区资源环境承载力与合理人口容量评价. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(s2): 406-409. [YOU G Y, ZOU C X, LIU D, et al. Evaluations on ecological carrying capacity and rational population capacity in Qingpu district, Shanghai city. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(s2): 406-409.]
- [22] 卢青, 胡守庚, 叶菁, 等. 县域资源环境承载力评价研究: 以湖北省团风县为例. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(1): 103-109. [LU Q, HU S G, YE J, et al. Study on evaluation of county resources and environment carrying capacity: A case study of Tuanfeng county in Hubei province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(1): 103-109.]
- [23] 牛方曲, 封志明, 刘慧. 资源环境承载力综合评价方法在西藏产业结构调整中的应用. *地理学报*, 2019, 74(8): 1563-1575. [NIU F Q, FENG Z M, LIU H. Evaluation of resources environmental carrying capacity and its application in industrial restructuring in Tibet, China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1563-1575.]
- [24] 韩鹏, 李涛. 资源环境承载力综合评价方法研究: 以中原经济区为例. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(s1): 88-101. [HAN P, LI T. Integrated method for the assessment of carrying capacity of environment and resources: A case study in CPER of China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(s1): 88-101.]
- [25] 黄贤金, 宋娅娅. 基于共轭角力机制的区域资源环境综合承载力评价模型. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2103-2112. [HUANG X J, SONG Y Y. Evaluation model of regional resource and environment comprehensive carrying capacity based on the conjugationwrestling mechanism. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2103-2112.]
- [26] 黄秋森, 赵岩, 许新宜, 等. 基于弹簧模型的资源环境承载力评价及应用: 以内蒙古自治区陈巴尔虎旗为例. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 173-184. [HUANG Q S, ZHAO Y, XU X Y, et al. Evaluation of resources and environmental carrying capacity based on spring model: Taking Chen Barag Banner in Inner Mongolia as an example. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 173-184.]
- [27] 王亮, 刘慧. 基于PS-DR-DP理论模型的区域资源环境承载力综合评价. *地理学报*, 2019, 74(2): 340-352. [WANG L, LIU H. The comprehensive evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on PS-DR-DP theoretical model. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(2): 340-352.]
- [28] 雷勋平, 邱广华. 基于熵权TOPSIS模型的区域资源环境承载力评价实证研究. *环境科学学报*, 2016, 36(1): 314-323. [LEI X P, QIU G H. Empirical study about the carrying capacity evaluation of regional resources and environment based on entropy-weight TOPSIS model. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1): 314-323.]
- [29] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 等. 生态承载力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410. [ZHAO D S, GUO C Y, ZHENG D, et al. Review of ecological carrying capacity. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 399-410.]
- [30] MA P P, YE G Q, PENG X, et al. Development of an index system for evaluation of ecological carrying capacity of marine ecosystems. *Ocean and Coastal Management*, 2017, 144: 23-30.
- [31] 盖美, 聂晨, 柯丽娜. 环渤海地区经济—资源—环境系统承载力及协调发展. *经济地理*, 2018, 38(7): 163-172. [GAI M, NIE C, KE L N. Carrying capacity and coordinated development of ERE system in the coastal area of Bohai Sea. *Economic Geography*, 2018, 38(7): 163-172.]
- [32] 刘凯, 任建兰, 张理娟, 等. 人地关系视角下城镇化的资源环境承载力响应: 以山东省为例. *经济地理*, 2016, 36(9): 77-84. [LIU K, REN J L, ZHANG L J, et al. Urbanization's resource environmental bearing capacity response from Man-Land relationship perspective: Take Shandong province as an example. *Economic Geography*, 2016, 36(9): 77-84.]
- [33] ABERNETHY V D. Carrying capacity: The tradition and policy implications of limits. *Ethics in Science and Environmental Politics*, 2001: 9-18, Doi: 10.3354/ese001009.
- [34] HARALDSSON H V, OLAFSDOTTIR R. A novel modelling approach for evaluating the preindustrial natural carrying capacity of human population in Iceland. *Science of the Total Environment*, 2006, 372(1): 109-119.
- [35] 王静, 李泽慧, 宋子秋, 等. 走向可持续城市生态系统管理的国土空间规划方法与实践: 以烟台市为例. *中国土地科学*, 2019, 33(9): 9-18. [WANG J, LI Z H, SONG Z Q, et al. Method and application of territorial spatial planning to-

- wards sustainable urban ecosystem management: A case study of Yantai city. *China Land Science*, 2019, 33(9): 9-18.]
- [36] 方莹, 王静, 黄隆杨, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别: 以烟台市为例. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 190-203. [FANG Y, WANG J, HUANG L Y, et al. Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: A case study of Yantai city. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 190-203.]
- [37] 王静, 翟天林, 赵晓东, 等. 面向可持续城市生态系统管理的国土空间开发适宜性评价: 以烟台市为例. *生态学报*, 2020, 40(11): 3634-3645. [WANG J, ZHAI T L, ZHAO X D, et al. Land development suitability evaluation for sustainable urban ecosystem management: Taking Yantai as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3634-3645.]
- [38] BRADFORD J B, D'AMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [39] LU N, FU B, JIN T, et al. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [40] 钟兴菊, 龙少波. 环境影响的IPAT模型再认识. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(3): 61-68. [ZHONG X J, LONG S B. Rethinking the environmental impact of the IPAT model. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(3): 61-68.]

## Evaluation method and application for resources-environment carrying capacity towards sustainable urban ecosystem management: A case study of Yantai city

WANG Jing<sup>1</sup>, YUAN Xin-yi<sup>1</sup>, CHEN Ye<sup>1</sup>, FANG Ying<sup>1</sup>, ZHAI Tian-lin<sup>1</sup>, SONG Zi-qiu<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Land Use Planning Station, Yantai Natural Resources and Planning Bureau, Yantai 264003, Shandong, China)

**Abstract:** Scientific cognition and evaluation on resources-environment carrying capacity is the basis and prerequisite for territorial spatial planning. From the perspective of sustainable urban ecosystem management, the evaluation framework and theoretical model for resources-environment carrying capacity and indices of "potential" ( $RECC_p$ ) and "realistic" ( $RECC$ ) resources-environment carrying capacity were proposed. Taking Yantai city as an example, we use the trade-off coefficient method to discuss the relationship between  $RECC_p$  and  $RECC$ . Results showed that the  $RECC_p$  was overall high while  $RECC$  was medium in Yantai city. There were significant regional differences between districts (counties). The shortage of water resources and environmental pollution were bottlenecks that would restrict the sustainable development of urban ecosystem in the future. The impacts of human activities on  $RECC$  in areas with low supply of ecosystem services were more obvious than those in areas with high supply. The impacts of human activities on  $RECC_p$  were significant in urban fringe areas. This research could enrich the theoretical methods for evaluation of resources-environment carrying capacity and provide decision-making support for land use optimization.

**Keywords:** evaluation for resources-environment carrying capacity; theoretical model; "potential" resources and environment carrying index; "realistic" resources and environment carrying index; interrelation; Yantai city