

全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点 和技术方法进展

樊 杰^{1,2,3}, 周 侃^{1,2}, 王亚飞^{1,2}

(1. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院地理科学与
资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要:本文探讨了资源环境承载能力预警机制的设计基点, 阐释了资源环境承载能力、承载能力评价和预警的基本概念, 创建了资源环境承载能力预警的理论模型, 并制定了2016版全国资源环境承载能力预警的技术流程、评价体系、集成方法与类型划分等技术要点, 为全国资源环境承载能力预警全面试行提供技术参考。研究表明: 增长极限论是资源环境承载能力预警的理论基础; 以县级行政区为评价单元的资源环境承载能力预警, 分别开展陆域评价和海域评价, 二者均包括基础评价和专项评价两部分, 基础评价采用统一指标体系对所有县级行政区进行全覆盖评价, 专项评价根据主体功能区规划选取特征指标对优化开发、重点开发和限制开发区域进行评价; 采取“短板效应”原理确定资源环境超载、临界超载和不超载3种类型, 结合资源环境耗损过程评价划分红色(极重警)、橙色(重警)、黄色(中警)、蓝色(轻警)和绿色(无警)5个预警等级, 通过陆海统筹校验确定资源环境承载能力“三类五级”评价方案。

关键词:资源环境承载能力; 预警; 技术流程; 评价体系; 主体功能区

1 资源环境承载能力预警机制的设计 基点

2016年9月26日, 国家发改委、中国科学院等13部委联合下发“关于印发《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》的通知”(发改规划[2016]2043号), 要求各地和有关部门参照执行, 2017年6月底之前完成相关评价工作。至此, 资源环境承载能力预警技术方法的研究进入全面试行阶段。

作为全面深化改革和生态文明建设的一项创新性工作, 承载力监测预警机制的建立, 对提升政府社会治理能力、转变经济发展方式、优化国土空间开发格局具有重大意义。中国正在迈向生态文明时代, 生态文明的最大特征, 是政府决策、企业作

为和个人行动都能够比较自觉的“善待自然”。是否或多程度上造成资源损耗、环境污染、生态破坏, 将成为人类发展中一个重要的考量依据。从工业文明向生态文明过渡阶段, 除了加强学习和转变认识、建立生态文明理念之外, 另外一项重要的工作是, 通过制度建设推动工业文明向生态文明的转型。简单地说, 首先是从制度安排上要明确生态文明建设的目标、指向, 使各项事业在向生态文明时代转型发展中有依据; 其次, 就是要做这样的制度安排, 凡是有利于生态文明建设的思想和行动能够得到激励、褒奖, 而有损生态文明建设的行为和想法将被惩戒; 第三, 我们毕竟处于工业文明阶段, 还面临着开放和全球化的竞争压力, 对生态文明制度建设的代价与效果应该合理估算, 在制度设计上

收稿日期: 2017-01; 修订日期: 2017-03。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630644); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-021) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41630644; Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences, No. KFJ-STZ-ZDTP-021]。

作者简介: 樊杰(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展问题研究, E-mail: fanj@igsnnr.ac.cn。

引用格式: 樊杰, 周侃, 王亚飞. 2017. 全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J]. 地理科学进展, 36(3): 266-276. [Fan J, Zhou K, Wang Y F. 2017. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016)[J]. Progress in Geography, 36(3): 266-276. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.03.001]

不能使人感觉到生态文明建设是抑制经济发展、抑制工业化和城市化速度的制度安排,而应该是更加有利于现代化进程和可持续发展的制度设计。

正是基于这样的制度设计思路,或者说是设计基点,资源环境承载能力预警机制,首先是建立在促进国家和地方的可持续发展目标基础上的,其中,实现主体功能区布局、建立合理的国土空间开发保护制度、转变以资源环境为代价换取经济增长的方式,是承载能力预警目标体系中的主要内容。第二,承载力预警作为区域发展政策调整的依据,突出的表现为对超载区域的约束性、限制性政策体系的设计方面。事实上,承载力预警同生态文明体制改革总体方案中的其他绩效问责制度导向是一致的,如生态文明考核制度、自然资源资产负债表编制制度、领导干部离任资源环境审计和终生追究制度等。第三,承载能力预警的科学报告如何转变为政策报告,超载的地区和行业是否就要限制,超载到什么程度才限制等,还要综合考量社会经济综合发展系统的运行稳定性和持续性。总之,资源环境承载能力预警是中国现代化建设中一项战略制度设计,对中国建设美丽家园具有重大意义。如果有朝一日,资源环境承载能力预警结果是中国每个地方都不超载、都不临界超载,那将标志着中国真正步入可持续发展的轨道,那将是生态文明建设最辉煌的成就。

2 承载能力预警研究的基点:基本概念阐释

尽管资源环境承载能力评价自2008年汶川灾后重建以来,多次被作为国家重大规划的基础性工作,对空间性规划的总体布局、土地利用和空间管制发挥基础性作用;尽管资源环境承载能力预警工作自2014年开展以来已得到政府部门的广泛认可,并产生着越来越大的社会影响,但依然存在着认识上的误区。比如,笔者被多次问到:过去说中国只能养活 x 亿人,现在早就超过这个人口规模了,资源环境承载力约束什么了?!有人问:高山陡坡依然有居民点分布,怎么能说承载力小就不适宜人居?!也还被问:深圳当年是个小渔村才住多少人,今天的深圳住多少人,承载力不具有刚性约束力,等等。提问的人甚至给出这样的结论:资源环境承载是个伪科学命题。当然,还有人对承载能力预警

提出疑问。因此,有必要对我们开展资源环境承载能力、承载能力评价和预警等工作所理解的基本概念进行阐释。显然,基本概念形成共识是开展承载力评价和预警工作的共同基础。

2.1 资源环境承载能力:客观性与动态性

资源环境承载能力是由两个系统相互作用形成的。系统一是人类生活生产活动系统,称作人类主体;系统二是资源环境等自然界物质系统构成的自然客体。自然客体承载着人类主体,通常把自然客体叫做承载体,把人类主体叫做承载对象。正是由于承载体和承载对象之间的相互作用,形成了资源环境承载能力。通常,把系统二达到崩溃阈值时能够承载的系统一的最大规模体量值,称为系统二所具有的资源环境承载能力。该概念有两个重要的内涵,其一,系统一的性质不同,如系统一是乡村形态还是城镇格局,直接影响到承载能力的大小。也就是说,同样的自然客体因其承载的人类主体的性质差异而存在着承载能力的差异。当系统一设定后,不同区域的系统二就存在着可比的、具有差异的承载力取值了。进一步而言,对承载能力的科学认知应该针对不同的人类活动进行,由于人类活动无论是在产业结构或是空间结构等方面存在着一定的演化规律,因此,资源环境承载能力也是存在着随着系统一演变而发生变化的客观规律,不是无序的。其二,从成因学机理上说,系统一的生成与变化因性质不同而受系统二影响的程度、作用的因素等是不同的。如农业系统更多受光热水土等农业自然条件的影响,而城镇和工业系统受这类自然条件影响的程度就会偏弱,而地理区位和能源矿产分布等在早期工业化和城市化阶段作用程度就更为显著些。因此,开展资源环境承载能力评价很难存在统一的指标体系(或者将指标体系做得如此庞大,使其能够包容影响系统一形成演变的全部因素),采用差异化指标体系对承载能力进行科学认知不失为合理且具有效率的研究方法。

承载能力的客观性决定了科学研究的可能性与合理性,而承载能力的动态性又决定了承载能力研究的复杂性。承载能力的动态性主要表现在承载能力形成的整个过程中的方方面面都在发生变化,因为自然界是变化的,承载体表现为动态性;人类生产生活活动的内容、规模是变化的,承载对象也表现为更强烈的动态性;人类的技术进步和组织管理水平的进步,都将带来承载弹性的提升,这也

极大地影响到资源环境承载能力结果的变化。正是由于资源环境承载能力具备动态性的特征,增强资源环境承载能力不失为助推可持续发展的一条有效途径。例如:通过山水林田湖生态修复建设工程、防灾减灾举措、自然资源时空合理调配,提高自然客体的承载能力;通过对地区主体功能的改变、产业结构的调整、人居系统的优化等,扩大承载对象的规模体量;通过技术进步和管理进步,提高资源利用效率、降低环境污染强度,同样也能够起到放大承载能力的作用。总之,承载能力评价和预警的常态化设置,是承载能力动态变化属性使然,而调控承载能力又正是利用承载力动态属性、促进区域可持续发展政策和举措的科学方法。

正是由于承载弹性的作用,国际上对“增长的极限”持怀疑态度的学者认为,技术进步对资源环境约束极限有消除的能力。也就是说,如果技术进步使资源利用效率提高到能够使资源总消耗量不变甚至减少,人类发展就不可能触及“增长的极限”。理论上这种说法是成立的。但在发展的现实中,加速逼近增长极限的国家往往是发展中国家、甚至是欠发达国家,人口规模的快速增长和城市化工业化的加速推进,资源环境为代价成为不约而同的发展模式,人口经济与资源环境的矛盾加剧。这些国家往往是技术进步在发展动力中贡献率较低的国家,发展方式转型到技术进步驱动为主的模式还有着漫长的道路,因此,技术进步通常难以消除资源环境的极限约束。中国这些年主要自然资源消耗和环境污染排放的总体趋势也证明了这一点。这种观点给予我们重要的政策启迪是,在中国未来发展中,应加快实现资源环境为代价向科技创新驱动发展的转型,破解资源环境承载约束,实现科技进步支撑的可持续发展。

当然,资源环境承载能力是指一个封闭系统中的表达。而现实世界中,资源利用、环境污染、生态扰动都是在开放系统中进行的。因此,考虑系统边界、以及在系统边界中找出总量约束上限阈值,不失为客观准确认知资源环境承载能力的合理途径。或者,采用“足迹”和“虚拟”的研究方法,也是弥补开放系统和“流空间”中核算承载能力的替补手段。在承载能力预警中,开放和流动性给研究超载追因增加了很大的难度,从而进一步影响到调控政策设计的精准性。

2.2 承载能力研究:从评价到预警

我们面对的系统二——即自然客体因各自然

要素的功能差异和多样、也因研究这些自然要素的学科不同,赋予了自然客体同一个物质不同的属性。同样是水,具有水资源、水环境、水生态和水灾害等4大属性。人类发展的历史,本质上是对自然客体开发利用的历史。当过去“不生态文明”阶段,表现出资源低价值、环境和生态近乎无价值的特征,资源浪费和生态环境破坏就成为不生态文明时期的常态,其结果导致可持续发展、也就是资源环境成为人口经济增长的极限约束。可持续发展和生态文明就是要实现自然客体的资源属性最大化、生态和环境的正外部性最大化、生态环境负外部性和灾害属性最小化,简单地说,就是增强资源环境承载能力,使之确保人类社会的可持续发展。

因此,当人类开始关注可持续发展时,资源环境承载能力的概念和理论、方法及其应用就同时出现了。由于可持续发展理念被系统化提出是国外先于国内,相应的资源环境承载能力的研究也大体上是国外早于国内。纵观国内外研究资源环境承载能力的成果及应用实践,以往承载能力的研究主要聚焦于全球、国家和地区等不同尺度空间的资源环境能够承载多少人口或经济规模,多以单要素的评估为主,如土地资源承载能力(Cohen, 1995; Peters et al, 2009)、水资源承载能力(Falkenmark et al, 1998; Ofoezie, 2002; 王浩等, 2003)、环境承载能力或环境容量(Van Den Bergh, 1993; Esty et al, 2005)、生态可持续指数或生态足迹等(Rees, 1992; Singh et al, 2012)。对国家决策层面产生重要影响的量化研究,主要围绕“土地—粮食—人口”展开,诸如1977年联合国粮农组织(FAO) (Doorenbos et al, 1977)、1986年中国科学院自然综合考察委员会(陈百明, 1992)、1994年国家土地管理局(Li, 2001)的相关研究。这些研究的目标是解决土地资源承载能力的阈值问题,通过多少土地生产多少粮食、有多少粮食能够养活多少人,回答增长极限问题。也有地学工作者、特别是人文与经济地理学者在开展城乡与区域规划、社会经济发展研究等工作中,将承载能力评价作为一项基础性的工作,开展复杂综合研究(毛汉英等, 2001)。但总体上而言,对于复杂的区域发展状态,特别是与工业化和城市化以及生态安全相关联的可持续性问题,还大多缺乏对资源、环境、生态、灾害等多种自然属性的承载能力的综合考虑,还尚未根据城市化、农业和生态地区等不同地域类型而选择差异化的指标体系,更缺乏对承

载弹性的充分论证、未能将发展方式及技术进步决定的资源消耗和环境污染趋势纳入其中。因此,在对区域发展的可持续性进行识别和理解方面,解释力度还不够强,从而导致资源环境承载能力研究成果难以支撑政府可持续发展的决策和规划,当然,在过去发展阶段政府决策对资源环境的不重视也是导致资源环境承载能力研究滞后的另一方面原因。资源环境承载能力研究在中国乃至全球范围内都长期没有能够成为研究热点和前沿 (Graymore et al, 2010; 樊杰, 周侃, 孙威等, 2013)。2008年汶川特大地震发生后,国务院部署资源环境承载能力评价作为恢复重建规划的一项基础性工作,评价结果作为重建规划和重建工作的依据。至此,资源环境承载能力从满足国家重大战略需求出发,开发综合集成评价技术,评价结果被国家规划直接采纳。而后,承载能力评价被多个重大规划和决策所采用,承载能力的研究也引起越来越多学者的关注,成为综合地理学研究的一个热点命题,也在建构中国特色的可持续性科学中居于基础地位。可以说,汶川灾后重建承载力评价与应用,在资源环境多因素综合集成研究方面、在作为国家规划一项基础性工作并被国家规划采纳应用方面、在对中国可持续发展相关领域决策的影响程度和对学科开展承载能力研究的带动性方面,是具有显著贡献的。中国知网的学术期刊检索数据分析显示,2006年之后,资源环境承载能力研究文章发表数量大幅提高(图1),文章主题的分布结构也表明,单要素或专业领域研究的比重依然较大。

资源环境承载能力评价被应用于全国主体功能区规划、全国国土规划、全国城镇体系规划等一

系列重大空间布局规划中,也被全国和各省十三五规划确定发展战略和目标时作为考虑的一个重要维度,在市县三规合一、以及最近发布的关于省级空间规划试点方案中,资源环境承载能力评价都被作为一项基础工作。事实上,一个区域的承载能力,除了系统二提供的承载能力之外,其他发展条件如能源供给、运输条件等基础设施条件也对一个区域发展体量和功能有着重要的制约作用,已经形成的国土空间开发基础也是进一步发展的前置条件。为了充分表达区域的综合承载能力,在支撑空间规划的基础工作研究中,提出了国土空间开发适宜性评价,就是将资源环境开发利用现状和潜力、社会经济发展基础和基础设施条件等做进一步综合。2017年初,习近平总书记在视察崇礼冬季奥运场地建设讲话中,提出要“注重空间承载能力,……。做到科学谋划,合理配置要素”,这里空间承载能力就是在资源环境承载能力之上的更进一步综合的概念。

资源环境承载能力监测预警是承载能力研究的新领域。“预警”一词多是指在灾害或灾难以及其他需要提防的危险发生之前,根据以往总结的规律或观测得到的可能性前兆,发出紧急信号,报告危险情况,以避免危害在不知情或准备不足的情况下发生,从而最大程度地减轻危害及损失的行为。在灾害预警、突发事件预警、大风预警等表达中,预警的对象分别就是灾害、突发事件和大风等。按照这一规则,资源环境承载能力预警应该是对承载力各构成要素及其组合的变化规律的预言预判,对未来可能出现的承载力危险进行报告、以避免或缩小因承载力临界超载或超载带来的损失。但从政策制定的需求,根据承载力状态的变化诊断发展存在的问题、及时调整限制性和约束性政策、以实现未来可持续发展的目标,更为迫切和重要。因此,资源环境承载能力预警的对象不是资源环境承载能力,而是利用资源环境承载状态同可持续发展状态存在良好耦合性的特点,通过监测和评价各地区资源环境超载状况,诊断和预判各地区可持续发展状态,为制定差异化、可操作的限制性措施提供依据。

3 预警理论模型的基点:增长极限

随着支撑人口和经济增长、工业化和城镇化的土地资源、水资源、矿产和能源等资源的开发规模持续加大,以及环境污染不断加重和生态服务功能

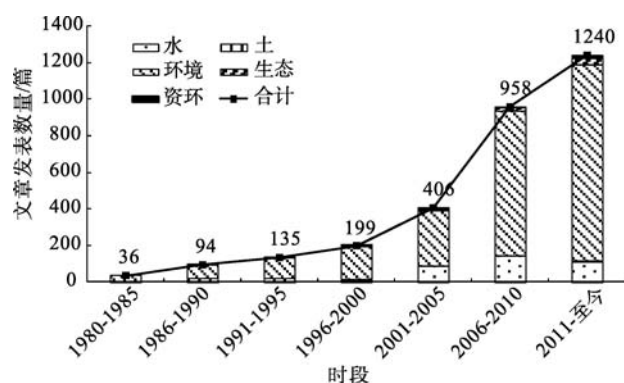


图1 1980年以来中国知网各类承载能力研究的发文量统计

Fig.1 The number of published papers on the topic of carrying capacity in CNKI since 1980

持续减弱,资源上限、环境底线和生态安全已经成为制约中国区域可持续发展的关键(夏军等, 2011; Bai et al, 2014; 陆大道, 2015)。目前,中国正处在转变以资源环境为代价换取增长的重要时期,若持续过去牺牲资源环境的发展方式,必将突破资源环境极限而难以维系(Meadows et al, 1972; Liu, 2010; Zhang et al, 2012)。面对紧迫的现实需求,国家积极探索对资源环境超载区域实行预警制度,研究建立有针对性的激励约束机制,引导各地按照资源环境承载能力谋划经济社会发展。党的十八届三中全会通过的《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》明确指出,“建立资源环境承载能力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”,通过推进资源环境承载能力监测预警的规范化、制度化,增强社会经济发展与国土空间开发过程中的资源环境约束,有效促进人口、经济 and 资源环境相协调。因此,党中央的决策是合理的,符合科学逻辑的。

当前,按照以县级行政区为基本单元进行预警的应用需求,开展资源环境承载能力的监测预警应当以区域可持续发展理论为基础,把握系统一(人类主体)与系统二(自然客体)不断交互与耦合下的“压力—状态—响应”过程,通过资源供给、环境容量、生态安全限值等资源环境约束上限以及人口经济合理规模等关键阈值与参数划分超载类型,采用资源消耗与利用效率、环境损害与效益、生态系统扰动与破坏的变化趋势实施可持续性预警,将单项指标与复合指标互为补充、静态分析与动态测度有机融合、总量控制与区域配置相互协调,科学预警区域资源环境超载状态,揭示区域超载问题根源。

因此,预警的理论基础就是可持续发展的增长极限理论。“增长的极限”指出人口经济增长、资源环境的开发利用都存在“极限”,超过这一“极限”将产生资源短缺、环境污染等一系列问题,进而导致社会经济健康发展难以持续,这已形成共识(Meadows, et al, 1972; Meadows et al, 2004)。其中,“极限”可以认为是资源环境承载能力的超载阈值。经济社会发展不与资源环境承载能力相协调,其发展的结果必然导致“超载”,因此,采取资源环境承载状态评估来表征区域发展的可持续性,是进行监测预警的逻辑起点。

在此基础上,提出资源环境承载能力预警的理

论模型:

$$\begin{cases} \Psi = f(X, Y) \\ Z = F(\Psi, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ψ 表示为资源环境承载状态, X 表示承载体——“资源环境”, Y 为承载对象——承载人口和经济的某一地域, f 表示 X 与 Y 两者匹配关系的函数,根据其具有可持续性预警价值的拐点(临界超载和超载)可将 Ψ 划分为超载、临界超载和不超载3种类型(图2); Z 表示预警程度, F 表示 Ψ 随时间 t 变化的函数,根据 Ψ 的变化趋势可进一步划分为极重警、重警、中警、轻警和无警等类型。

X 是综合自然条件的代名词,是土地资源、水资源和环境等资源环境要素的综合表达,单项要素及组合状态决定了 Ψ 的取值,公式为:

$$\begin{aligned} \Psi = f[C(x_1, x_2, \dots, x_n), Y] = & f_1(x_1, Y) \cup f_2(x_2, Y) \cup \dots \\ & \cup f_n(x_n, Y) \cup f_{12}(x_1 \cap x_2, \\ & Y) \cup \dots \cup f_{1n}(x_1 \cap x_n, Y) \cup \dots \\ & \cup f_{n-1,n}(x_{n-1} \cap x_n, Y) \\ & \dots \dots \dots \\ & \cup f_{1 \rightarrow n}(x_1 \cap x_2 \dots \cap x_n, Y) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 分别代表土地资源、水资源、环境、生态等要素, C 表示不同要素的组合函数, f_{ij} 表示要素 i 和 j 组合的承载能力。

Y 通常因区域不同而异,不同地区人口和经济集聚能力差异较大,可按主体功能划分不同类型区(樊杰, 2007, 2015),则 Ψ 又可以表达为:

$$\begin{aligned} \Psi = f[X, U(y_1, y_2, \dots, y_n)] = & f'[C(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n)] \\ = & f'_1(x_1, y_1) \cup \dots \cup f'_2(x_1, y_n) \cup \dots \\ & \cup f'_2(x_{n-1}, y_1) \cup \dots \cup f'_n(x_n, y_n) \end{aligned} \quad (3)$$

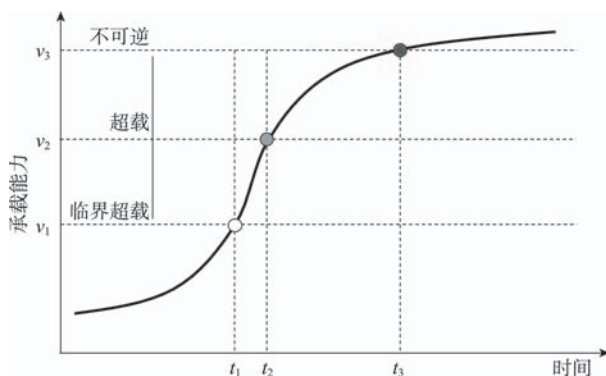


图2 资源环境承载能力监测预警及内涵
(根据樊杰等, 2015 改绘)

Fig.2 Monitoring and early-warning of resource and environmental carrying capacity (modified from Fan et al, 2015)

式中: y_1, y_2, \dots, y_n 分别代表城市化地区、农产品主产区、重点生态功能区等不同类型主体功能区, 函数 U 表示不同主体功能区的并集。

由公式(2)-(3)可知, 确定 Ψ 的取值既要通过对承载对象产生普遍作用的基础资源环境要素 x_i (如土地、水和环境) 出发, 又要考虑表征不同承载对象 y_n 可持续发展影响具有特殊作用的资源环境要素 (x_i)。前者是对整体区域的基础评价, 后者是针对整体区域内不同类型主体功能区的专项评价, 通过两者的综合集成得到资源环境承载状态。当某些要素承载能力难以衡量时, 则转换为该要素的质量评价。

由于 Ψ 取决于单项要素及组合状态, 综合集成的方案并不唯一, 且不同要素超载状态对应不同的阈值, 阈值具有模糊不确定性, 考虑到区域资源环境超载后的治理成本和恢复能力, 采用以基础性评价为主、专项评价为辅的集成方法作为主体脉络, 将资源环境超载状态定义为单项要素的超载以及多项组合要素的临界超载。在此基础上, 进一步研

究一定时期内 Ψ 的变化趋势, 将资源环境继续恶化的超载区域作为可持续性预警的重点区域。

4 预警技术流程的变化

4.1 总体技术路线

资源环境承载能力预警的技术流程始终是: 以县级行政区为评价单元, 开展陆域评价和海域评价, 确定超载类型, 划分预警等级, 全面反映国土空间资源环境承载能力状况, 并分析超载成因、预研对策措施建议。经过两年的修订、完善, 在2014年版的资源环境承载能力预警的总体技术流程基础上, 形成2016年版技术路线(图3):

(1) 分别开展陆域评价和海域评价。陆域评价和海域评价均包括基础评价和专项评价两部分。基础评价采用统一指标体系, 对所有县级行政单元进行全覆盖评价。专项评价分别根据《全国主体功能区规划》和《全国海洋主体功能区规划》, 对优化开发、重点开发和限制开发区域进行评价。在确定

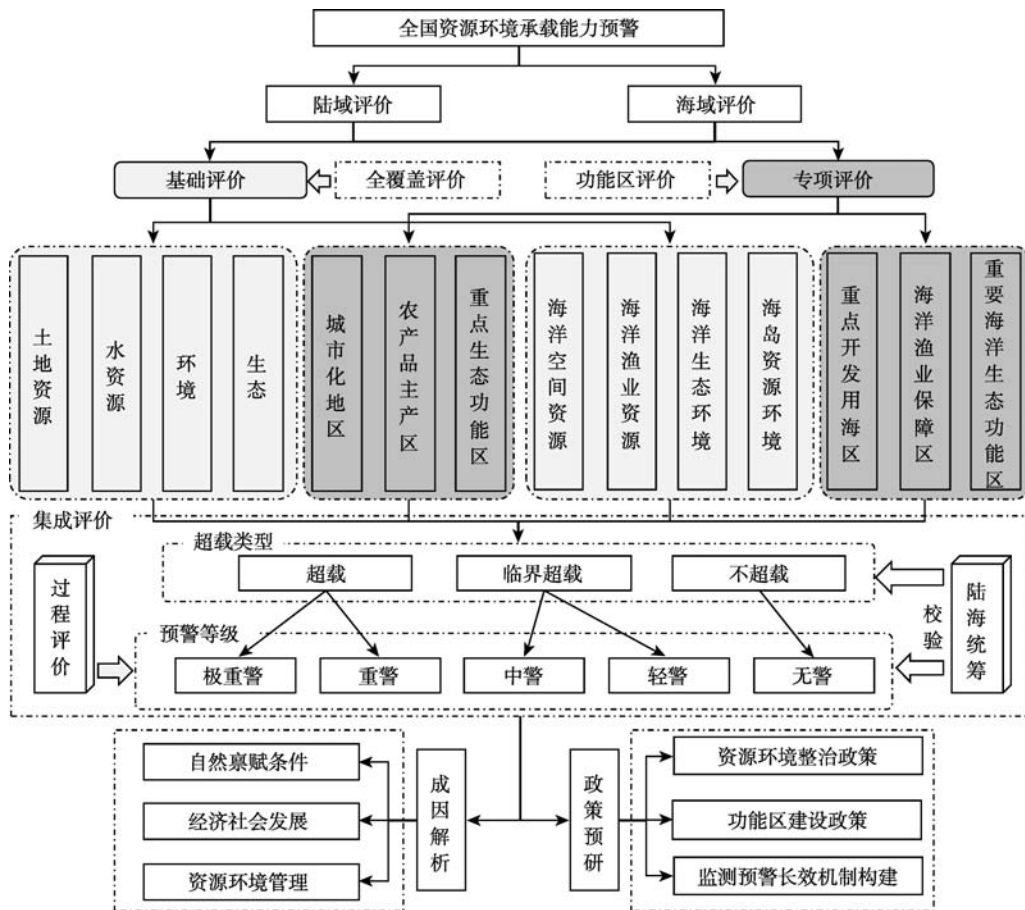


图3 资源环境承载能力预警(2016版)技术路线图

Fig.3 The overall technical flowchart of early-warning of resource and environmental carrying capacity (V 2016)

评价指标的关键阈值时,主要通过对标理论值的偏离程度(如土地资源评价、牧业地区评价)、对标国家质量标准值的偏离程度(如环境评价)、对标国家管理控制量的偏离程度(如水资源评价)、以及对比历史时期变化幅度或速率(如种植业地区评价、重点生态功能区评价)4种技术途径实现,通过关键阈值将各项指标的评价结果分为3级,分级时应体现与资源环境超载、临界超载和不超载类型的对应关系。

(2) 分别确定陆域和海域超载类型。根据陆域评价和海域评价结果,采取“短板效应”原理,将陆域、海域基础评价与专项评价中任意一个指标超载、两个及以上指标临界超载的组合确定为超载类型,将任意一个指标临界超载的确定为临界超载类型,其余为不超载类型。

(3) 分别确定陆域和海域预警等级。针对超载类型开展过程评价,根据资源环境耗损加剧与趋缓程度,进一步确定陆域和海域的预警等级。其中,超载区域分为红色和橙色两个预警等级,临界超载分为黄色和蓝色两个预警等级,不超载为无警(用绿色表示)。

(4) 统筹陆域和海域超载类型和预警等级。将海岸线开发强度、海洋环境承载状况和海洋生态承载状况3个指标的评价结果,分别与陆域沿海县(市、区)基础评价中的土地资源、环境和生态评价的结果进行复合,调整对应指标的评价值,实现同一行政区内陆域和海域超载类型和预警等级的衔接协调。

(5) 进行超载成因解析与政策预研。识别和定量评价超载关键因子及其作用程度,解析不同预警等级区域资源环境超载原因。从资源环境整治、功能区建设和监测预警长效机制构建3个方面进行政策预研,为制定超载区域限制性政策提供依据。

4.2 2016版与2014版相比的主要变化

与2014版资源环境承载能力预警的技术流程相比(樊杰等, 2015),2016版的变化主要包括以下方面:

(1) 评价体系方面:尽管2014版和2016版均包括了陆域评价和海域评价,但在2014版中,海域和陆域评价采取了不同的技术路线,海域评价中未区分基础评价、专项评价,且无过程评价。2016版规范了陆域和海域评价,都按照基础评价、专项评价、过程评价3部分内容设计评价技术路线。

(2) 评价指标方面:陆域基础评价中,2014版生

态类评价为植被盖度指数变动度,2016版生态类指标为生态系统健康度;陆域专项评价中,2014版城市化地区特征指标为灰霾污染程度,2016版城市化地区特征指标为水气环境黑灰指数;2014版重点生态功能区特征指标为生态环境质量变化状态,2016版重点生态功能区特征指标为生态系统功能指数;海域专项评价中,2016版针对不同海洋功能区新增了围填海强度指数、渔业资源密度指数、生态系统变化指数等特征指标。

(3) 集成方法方面:2014版为等权重方式进行等级组合集成,2016版采用短板效应原理对单项评价结果进行集成。

(4) 过程评价融入方面:2014版海域过程评价未纳入集成评价体系,2016版海、陆均采用过程评价对超载类型进行预警等级划分。

(5) 海陆统筹方面:2016版将海岸线开发强度、海洋环境承载状况和海洋生态承载状况评价结果,分别与陆域沿海县(市、区)基础评价中的土地资源、环境和生态评价的结果进行统筹校验,并对沿海县(市、区)陆域和海域的预警进行等级校验。2014版仅对海岸线开发强度评价结果同陆域土地资源评价结果进行校验。

5 2016版评价体系

5.1 陆域评价

陆域评价分为基础评价和专项评价两部分,前者包括土地资源、水资源、环境和生态4项要素,后者包括城市化地区、农产品主产区和重点生态功能区3类特征指标(表1)。

5.1.1 基础评价

陆域基础评价对所有县级行政单元进行全覆

表1 资源环境承载能力预警中陆域评价的内容与指标设置
Tab.1 Indicator system of monitoring and early-warning of terrestrial resource and environmental carrying capacity

评价体系		评价要素	评价内容
陆域 评价	基础 评价	土地资源	土地资源压力指数
		水资源	水资源开发利用量
		环境	污染物浓度超标指数
		生态	生态系统健康度
	专项 评价	城市化地区	水气环境黑灰指数
		农产品主产区:种植业地区	耕地质量变化指数
		农产品主产区:牧业地区	草原草畜平衡指数
		重点生态功能区	生态系统功能指数

盖评价。评价内容包括:①土地资源评价。采用土地资源压力指数,表征土地资源条件对人口集聚、工业化和城镇化发展的支撑能力,通过现状建设开发程度与适宜建设开发程度的偏离程度进行评价。②水资源评价。采用水资源开发利用量(包括用水总量和地下水供水量),表征水资源可支撑经济社会发展的最大负荷,通过对比用水总量、地下水供水量与实行最严格水资源管理制度确立的水资源开发利用控制指标,并考虑地下水超采情况进行评价。③环境评价。采用污染物浓度超标指数,表征区域环境系统对经济社会活动产生的各类污染物的承受与自净能力,通过主要污染物年均浓度监测值与国家现行环境质量的对比值进行评价。④生态评价。采用生态系统健康度,表征社会经济活动压力下生态系统的健康状况,通过发生水土流失、土地沙化、盐渍化和石漠化等生态退化的土地面积比例进行评价。

5.1.2 专项评价

陆域专项评价根据《全国主体功能区规划》,分别对优化开发区域、重点开发区域、农产品主产区和重点生态功能区的县级行政单元,选取有针对性的要素指标开展评价。评价内容包括:①城市化地区评价。采用水气环境黑灰指数为特征指标,由城市黑臭水体污染程度和PM2.5超标情况集成获得,并结合优化开发区域和重点开发区域,对城市水体和大气环境的不同要求设定差异化阈值。②农产品主产区评价。按照种植业地区和牧业地区分别开展评价,前者采用耕地质量变化指数为特征指标,通过有机质、全氮、有效磷、速效钾、缓效钾和pH值6项指标的等级变化进行评价;后者采用草原草畜平衡指数为特征指标,通过草原实际载畜量与合理载畜量的差值比率进行评价。③重点生态功能区评价。按照水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性维护等不同重点生态功能区类型,分别采用水源涵养指数、水土流失指数、土地沙化指数、栖息地质量指数为特征指标,评价生态系统功能等级。

5.2 海域评价

海域评价亦可分为基础评价和专项评价两部分,前者包括海洋空间资源、海洋渔业资源、海洋生态环境和海岛资源环境4项要素,后者包括重点开发用海区、海洋渔业保障区、重要海洋生态功能区3类特征指标(表2)。

5.2.1 基础评价

海域基础评价采用统一指标体系对所辖海域进行全覆盖评价,评价内容包括:①海洋空间资源评价。通过岸线开发强度、海域开发强度评价,反映海岸线和近岸海域空间开发状况。②海洋渔业资源评价。通过渔业资源综合承载指数评价,表征近岸海洋渔业资源的承载状况。③海洋生态环境评价。通过海洋功能区水质达标率以及浮游动物和大型底栖动物的生物量、生物密度的变化评价,反映海洋环境承载状况和海洋生态承载状况。④通过无居民海岛开发强度和无居民海岛生态状况评价,表征无居民海岛资源环境承载状况。

5.2.2 专项评价

海域专项评价根据《全国海洋主体功能区规划》划定的重点开发、限制开发和禁止开发的海域,选取有针对性的要素指标开展评价。鉴于现阶段省级海洋主体功能区规划尚未编制完成,暂时采用海洋功能区划确定的海洋功能区域作为评价对象。评价内容包括:①重点开发用海区评价。采用围填海强度指数为特征指标,评价海洋功能区内重点开发建设用海区的围填海规模和强度。②海洋渔业保障区评价。采用渔业资源密度指数为特征指标,评价以提供海洋水产品为主要功能的海洋渔业保障区的渔业资源状况。③重要海洋生态功能区评价。采用生态系统变化指数为特征指标,评价维护海洋生物多样性、保护典型海洋生态系统具有重要作用的海域的生态系统变化情况。

5.3 集成评价

5.3.1 超载类型划分

在陆域评价与海域评价基础上,采取“短板效应”进行综合集成,将评价指标中任意1个超载或2

表2 资源环境承载能力预警中海域评价的内容与指标设置
Tab.2 Indicator system of monitoring and early-warning of marine resource and environmental carrying capacity

评价体系		评价要素	评价内容
海域评价	基础评价	海洋空间资源	岸线开发强度 海域开发强度
		海洋渔业资源	渔业资源综合承载指数
		海洋生态环境	海洋环境承载状况 海洋生态承载状况
		海岛资源环境	无居民海岛开发强度 无居民海岛生态状况
			围填海强度指数
专项评价		重点开发用海区	渔业资源密度指数
		海洋渔业保障区	生态系统变化指数
		重要海洋生态功能区	

个以上临界超载,确定为超载类型;任意1个临界超载,确定为临界超载类型;其余为不超载类型。然后,将海岸线开发强度、海洋环境承载状况和海洋生态承载状况3个指标的评价结果,分别与对应的陆域沿海区县基础评价中的土地资源、环境和生态评价的结果进行复合,调整沿海区县对应指标的评价值,统筹陆域和海域超载类型。陆海统筹方法包括:①选取岸线开发强度指标,同所属陆域沿海区县的土地资源压力指数进行复合,将该县实际土地资源压力等级取值为陆域评价的土地资源压力与海域评价的岸线开发强度之间的最高级。②通过对不符合水质要求的海洋功能区主要陆源污染物进行核算与分解,对入海污染物贡献程度高的区县,同陆域环境污染物浓度超标指数进行复合,将该县陆域评价的污染物超标指数等级上调一级。③同所属陆域沿海区县的生态系统健康度进行复合,将该县实际生态评价等级取值为陆域评价的生态系统健康度与海域评价的海洋生态承载状况之间的最高级。

5.3.2 预警等级划分

分别开展陆域、海域的过程评价,根据陆域、海域资源环境耗损指数,对超载类型进一步划分5级预警区(图4)。将资源环境耗损加剧的超载区域定为红色预警区(极重警),资源环境耗损趋缓的超载区域定为橙色预警区(重警);资源环境耗损加剧的临界超载区域定为黄色预警区(中警),资源环境耗损趋缓的临界超载区域定为蓝色预警区(轻重警);不超载的区域为绿色无警区(无警)。对于沿海县(市、区),进行陆域和海域预警等级校验,将资源环境耗损等级取值为陆域、海域资源环境耗损指数之间的最高级,并以此调整沿海县(市、区)的预警等级,实现同一行政区内陆域和海域预警等级的衔接协调。

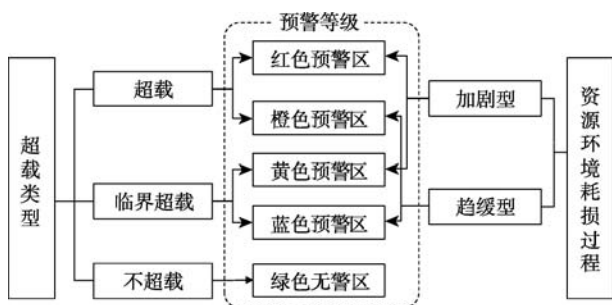


图4 资源环境超载类型与预警等级的对应关系
Fig.4 Correspondence between overloading types and early-warning levels

6 成因解析及政策预研

6.1 超载成因解析

采用多因素叠加分析法,刻画陆域水土资源组合超载、陆域水资源与环境组合超载、海域生态环境组合超载等若干不同要素的组合超载状态,识别超载关键因素及其作用程度。采用因果链分析原理,从自然禀赋条件、经济社会发展、资源环境管理等维度阐释超载成因,自然禀赋条件维度反映资源环境的自然本底状况,经济社会发展维度包括经济社会发展方式、规模、结构、速度等,资源环境管理类成因包括资源环境管理与政策管理的水平、方式、范围、强度等。

6.2 政策预研

针对超载成因,从财政、投融资、产业、土地、人口、环境等方面,预研资源环境整治和功能区建设政策措施,并按照预警等级探索不同管控强度的差异化限制性措施,引导和约束各地严格按照资源环境承载能力谋划发展。如在陆域超载地区,从制定严格限制建设用地增长、实行最严格的水资源管理制度、联控共治水体和大气环境污染、系统修复治理自然生态等方面的整治政策措施;在限制开发区域中的超载地区,严控因非主体功能开发活动而产生的资源环境超载,预研产业准入负面清单管理、生态保护红线管控、生态补偿机制等方面的具体举措。同时,围绕监测预警长效机制建设,制定资源环境监测体系完善方案,预研资源环境超载预警提醒和追责制度,并将部门定期和不定期督查、公众参与和监督作为长效机制的重要组成部分。

7 结论与讨论

建立资源环境承载能力监测预警机制,是全面深化改革的一项创新性工作,是生态文明建设和实现可持续发展的重要政策工具,对提升政府社会治理能力、转变经济发展方式、优化国土空间开发格局具有重大意义(陆大道等, 2012; 樊杰, 周侃, 陈东, 2013)。2016版资源环境承载能力预警技术流程与评价体系以县级行政区为评价单元,构建了陆域评价和海域评价系列,并通过集成评价确定超载类型和预警等级,在现有监测能力和数据基础上,形成了全面反映国土空间自然资源上限、环境容量极限和生态服务功能量底线的总体技术方案。

面向国家生态文明体制改革的重大需求,未来,仍需加强资源环境承载能力理论、方法与应用研究。一方面,需要进一步完善评价体系,将各类禁止开发区域的扰动程度而提取的“一票否决”预警指标、有关部门划定的各类红线管控指标、以及灾害类指标等有机地纳入整体评价过程;另一方面,需要突破一系列科学难题和关键技术,如水土资源合理开发强度阈值测算、区域环境容量评估、海域污染物的陆域溯源与追因、承载力构成要素之间的相互依存关系和尺度转换特征、短板效应集成方法的改进与优化以及基于人口或经济规模的承载力量值表征技术等,最终满足从理论方法、监测网络、关键技术到应用接口建立全系列科技支撑,实现定期监测、定期评估、定期预警,为各级各类空间规划编制、区域政策制定提供依据,并在地方生态文明考核、政府绩效考核和干部终身追究制度、自然资源资产核算和绿色国民经济核算等方面发挥基础性作用。

致谢:参加本项目研究的人员还有张文忠、李丽娟、徐勇、陈田、王传胜、李九一、余建辉、周道静等,文中成果也有他们的贡献,在此致以衷心的感谢!

参考文献(References)

陈百明. 1992. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究 [M]. 北京: 中国人民大学出版社. [Chen B M. 1992. Zhongguo tudi ziyuan shengchan nengli ji renkou chengzailiang yanjiu[M]. Beijing, China: China Renmin University Press.]

樊杰. 2007. 我国主体功能区划的科学基础[J]. 地理学报, 62(4): 339-350. [Fan J. 2007. The scientific foundation of major function oriented zoning in China[J]. Acta Geographica Sinica, 62(4): 339-350.]

樊杰. 2015. 中国主体功能区划方案[J]. 地理学报, 70(2): 186-201. [Fan J. 2015. Draft of major function oriented zoning of China[J]. Acta Geographica Sinica, 70(2): 186-201.]

樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 2015. 全国资源环境承载能力监测预警(2016版)学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 35(1): 1-10. [Fan J, Wang Y F, Tang Q, et al. 2015. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V 2014)[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(1): 1-10.]

樊杰, 周侃, 陈东. 2013. 生态文明建设中优化国土空间开发格局的经济地理学研究创新与应用实践[J]. 经济地理, 33(1): 1-8. [Fan J, Zhou K, Chen D. 2013. Innovation and practice of economic geography for optimizing spatial de-

velopment pattern in construction of ecological civilization [J]. Economic Geography, 33(1): 1-8.]

樊杰, 周侃, 孙威, 等. 2013. 人文—经济地理学在生态文明建设中的学科价值与学术创新[J]. 地理科学进展, 32(2): 147-160. [Fan J, Zhou K, Sun W, et al. 2013. Scientific values and research innovations of Human-economic Geography in construction of ecological civilization[J]. Progress in Geography, 32(2): 147-160.]

陆大道. 2015. 中速增长: 中国经济的可持续发展[J]. 地理科学, 35(10): 1207-1219. [Lu D D. 2015. Moderate-speed growth: Sustainable development of China's economy[J]. Scientia Geographica Sinica, 35(10): 1207-1219.]

陆大道, 樊杰. 2012. 区域可持续发展研究的兴起与作用[J]. 中国科学院院刊, 27(3): 290-300, 319. [Lu D D, Fan J. 2012. The rise and effects of regional sustainable development studies in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 27(3): 290-300, 319.]

毛汉英, 余丹林. 2001. 区域承载力定量研究方法探讨[J]. 地球科学进展, 16(4): 549-555. [Mao H Y, Yu D L. 2001. A study on the quantitative research of regional carrying capacity[J]. Advance in Earth Sciences, 16(4): 549-555.]

王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 2003. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社. [Wang H, Chen M J, Qin D Y, et al. 2003. Xibei diqu shuiziyuan heli peizhi he chengzai nengli yanjiu[M]. Zhengzhou, China: The Yellow River Water Conservancy Press.]

夏军, 刘春蓉, 任国玉. 2011. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 26(1): 1-12. [Xia J, Liu C Z, Ren G Y. 2011. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. Advances in Earth Science, 26(1): 1-12.]

Bai X M, Shi P J, Liu Y S. 2014. Society: Realizing China's urban dream[J]. Nature, 509: 158-160.

Cohen J E. 1995. How many people can the earth support[J]. The Science, 35(6): 18-23.

Doorenbos J, Pruitt W O. 1977. Crop water requirement: Food and agriculture organization of the United Nations[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome, Italy: FAO.

Esty D C, Levy M, Srebotnjak T, et al. 2005. 2005 Environmental sustainability index: Benchmarking national environmental stewardship[M]. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy: 47-60.

Falkenmark M, Lundqvist J. 1998. Towards water security: Political determination and human adaptation crucial[J]. Natural Resources Forum, 22(1): 37-51.

Graymore M L M, Sipe N G, Rickson R E. 2010. Sustaining human carrying capacity: A tool for regional sustainability assessment[J]. Ecological Economics, 69(3): 459-468.

Li W H. 2001. Agro-ecological farming systems in China[M]. New York, NY: The Parthenon Publishing Group.

- Liu J G. 2010. China's road to sustainability[J]. *Science*, 328: 50.
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. 1972. The limits to growth: A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind[M]. New York, NY: Universe Books: 208.
- Meadows D H, Randers J, Meadows D L. 2004. Limits to growth: The 30-year update[M]. 3rd ed. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing.
- Ofoezie I E. 2002. Human health and sustainable water resources development in Nigeria: Schistosomiasis in artificial lakes[J]. *Natural Resources Forum*, 26(2): 150-160.
- Peters C J, Bills N L, Lembo A J, et al. 2009. Mapping potential food sheds in New York State: A spatial model for evaluating the capacity to localize food production[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(1): 72-84.
- Rees W E. 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 4(2): 121-130.
- Singh R K, Murty H R, Gupta S K, et al. 2012. An overview of sustainability assessment methodologies[J]. *Ecological Indicators*, 15(1): 281-299.
- Van Den Bergh J C J M. 1993. A framework for modelling economy-environment-development relationships based on dynamic carrying capacity and sustainable development feedback[J]. *Environmental and Resource Economics*, 3(4): 395-412.
- Zhang Q, He K B, Huo H. 2012. Policy: Cleaning China's air [J]. *Nature*, 484: 161-162.

Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016)

FAN Jie^{1,2,3}, ZHOU Kan^{1,2}, WANG Yafei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article discusses the design basis of the early-warning system of resource and environmental carrying capacity, explains the basic concepts of resource and environmental carrying capacity and its evaluation and early-warning mechanism, and builds the theoretical model and develops key technical points of the early-warning of the national resource and environmental carrying capacity evaluation (2016 version), including technical process, evaluation system, integration methods, and classification approaches, which can provide an important technical reference for carrying out the early-warning of national resource and environmental carrying capacity overloading. This research shows that "the limits to growth" is the theoretical basis of the early-warning of resource and environmental carrying capacity. Based on the county-level administrative regions, this work carries out evaluation of terrestrial and marine resource and environmental carrying capacity respectively, both include basic and specific evaluations. The basic evaluation adopts unified basic indicators to conduct an overall regional evaluation; and the specific evaluation is conducted for different major functional zones, including optimized development zones, priority development zones, and restricted development zones, with corresponding characteristic indicators. Then the worst performing one of all indicators is used to classify the evaluated units, which separates the evaluated regions into resource and environmental overloading, critical overloading, and non-overloading areas. Combining with the evaluation results of resource and environmental consumption, five early-warning levels—red (extremely serious warning), orange (serious warning), yellow (medium-level warning), blue (slight warning), and green (no warning) are divided based on the classification results. Finally, the three carrying capacity types and five early-warning levels of resource and environmental are verified through the terrestrial-marine coordinated test.

Key words: resource and environmental carrying capacity; early-warning; technical process; evaluation system; major function oriented zone