

doi: 10.12029/gc20180602

殷志强, 李瑞敏, 李小磊, 孟晖, 刘琼, 杨楠, 王轶, 仝晓霞, 李春燕, 高萌萌. 2018. 地质资源环境承载能力研究进展与发展方向[J]. 中国地质, 45(6):1103-1115.

Yin Zhiqiang, Li Ruimin, Li Xiaolei, Meng Hui, Liu Qiong, Yang Nan, Wang Yi, Tong Xiaoxia, Li Chunyan, Gao Mengmeng. 2018. Research progress and future development directions of geo-resources and environment carrying capacity[J]. *Geology in China*, 45(6): 1103-1115 (in Chinese with English abstract).

## 地质资源环境承载能力研究进展与发展方向

殷志强 李瑞敏 李小磊 孟晖 刘琼 杨楠 王轶 仝晓霞 李春燕 高萌萌

(中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:**资源环境承载能力研究从起步到现在经历了理论到实践,单要素到综合评价的发展历程,现已成为我国国土空间规划的刚性约束条件。本研究在对国内外资源环境承载能力发展历史研究的基础上,划分了承载能力主要发展的3个主要阶段,即萌芽奠基阶段、应用探索阶段和蓬勃发展阶段;详细讨论了地质环境、地下水资源和矿产资源等地质资源环境承载能力的发展现状及评价、预警指标体系研究进展;最后从基础理论、技术方法、情景模拟和实践应用等四个层次指出了未来资源环境承载能力研究的发展方向,认为建立全国资源环境承载能力动态监测预警机制是支撑国土空间规划和用途管制的有效手段。

**关键词:**资源;环境;承载能力;研究进展;发展方向

中图分类号:X141 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)06-1103-13

## Research progress and future development directions of geo-resources and environment carrying capacity

YIN Zhiqiang, LI Ruimin, LI Xiaolei, MENG Hui, LIU Qiong, YANG Nan, WANG Yi,  
TONG Xiaoxia, LI Chunyan, GAO Mengmeng

(China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing, 100081, China)

**Abstract:** The research on resources and environment carrying capacity is the result of the coupling of resource carrying capacity and environmental carrying capacity. From the beginning to the present, it has experienced the development process from theory to practice and from single factor to comprehensive evaluation, and now has become the rigid constraint on China's land and space planning. On the basis of the historical research on the development of resources and environmental carrying capacity in China and abroad, the authors divide the carrying capability into three main stages, i.e., sprout foundation stage, application exploration stage, and booming development stage. Secondly, the authors discuss the development status and indicator system research progress of geological environment, underground water resources, and mineral resources carrying capacity, and put forward carrying capacity coordination theory of resource and environment. Thirdly, the authors point out that the basic theory, technical methods, scenario

收稿日期: 2018-07-29; 改回日期: 2018-10-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160328)资助。

作者简介: 殷志强, 男, 1980年生, 博士, 高级工程师, 主要从事第四纪地质环境演变研究; E-mail: yinzq@mail.cigem.gov.cn。

通讯作者: 李瑞敏, 女, 1964年生; 博士, 教授级高级工程师, 主要从事资源环境承载能力研究工作; E-mail: lirm@mail.cigem.gov.cn。

simulation and practical application are the detailed directions of China's resources and environmental carrying capacity research aspects in future. Finally, it is believed that the establishment of a nationwide dynamic monitoring and early warning mechanism for resource and environmental carrying capacity is an effective means to support the land and space planning and its usage control in China.

**Key words:** resource; environment; carrying capacity; research progress; development direction

**About the first author:** YIN Zhiqiang, male, born in 1980, senior engineer, majors in Quaternary geology, mainly engages in research on Quaternary geology environment evolution; E-mail: yinzq@mail.cigem.gov.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Project(No. DD20160328).

## 1 引 言

资源环境承载力(Carrying Capacity)研究经过了百年的发展,现已成为衡量区域可持续发展的重要判据(封志明等,2017)。近年来,由于资源耗竭和环境恶化等原因,人口-资源-环境-发展(P-R-E-D)和资源-环境-经济-社会(R-E-E-S)四位一体的资源环境承载力研究(安忠海等,2016)成为地理学、地质学、资源学、生态学、环境经济学等交叉学科领域需要解决的重大科学和政策问题,越来越受到重视,指导了区域规划和灾后重建规划编制,如资源环境承载能力评价结果为汶川、玉树、芦山、鲁甸等地震区灾后重建规划提供了重要的科学基础(樊杰等,2009;樊杰,2010,2014;樊杰等,2014),雄安新区规划明确要求以资源环境承载能力评价为前提(河北雄安新区规划纲要,2018)。资源环境承载能力评价结果正成为区域人口与经济规模和发展方式与速度的刚性约束,对国土空间规划、主体功能区划、三区三线划定等具有重大意义。

然而资源环境承载力研究仍未形成一套完整的理论(封志明等,2017),全国-区域-省级-县(市)尺度的评价方法体系尚未建立,评价结果仍以定性为主,且研究结果与实践应用还有一定距离。2013年党的十八届三中全会明确提出“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”;2017年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于建立资源环境承载能力监测预警长效机制的若干意见》,推动实现资源环境承载能力监测预警规范化、常态化、制度化。2018年自然资源部成立后,国土空间规划体系重构需要地质资源环境承载能力评价结果作为支撑,那么,资源承载能力评价的主要发展阶段有哪些?评价和预警指标体系研究进展如

何?未来制约资源环境承载能力发展的瓶颈是什么?如何建立资源环境承载能力动态监测预警平台?本研究将对上述问题进行深入分析,以期更好地促进资源环境承载能力研究的标准化、规范化、实用化和业务化发展。

## 2 资源环境承载能力研究进展

### 2.1 资源环境承载能力研究历史

1798年马尔萨斯发表的《论人口原理》一书(Maltus,1798),提出了资源有限并影响人口增长的理论,被认为是承载力概念的最初起源;此后Verhulst(1838)提出了著名的逻辑斯蒂方程,Park(1921)和Hawden(1922)陆续将承载力概念扩展到人类生态学领域,强调资源环境的容纳能力对人口的限制性作用。20世纪60年代,承载力概念得到了进一步的拓展,开始关注全球环境变化和人类活动对生态环境的影响(程国栋,2002)。20世纪70—90年代,世界粮农组织(FAO)和联合国教科文组织(UNESCO)提出了一系列承载力定义和量化方法(FAO,1982;UNESCO & FAO,1985);Arrow(1995)在SCIENCE发表“Economic growth, carrying capacity, and the environment”一文,引发了资源、环境承载能力研究的热潮。进入20世纪,Running(2012)提出了可供人类利用的各种资源会在未来数十年达到“生态边界”。

20世纪后期,随着全球范围内的人口、资源与环境问题的愈发严峻,承载力的研究重点开始转向环境对人类经济和社会活动的限制,用来说明生态环境系统和社会经济系统之间的相互影响和制约关系。承载力在人口、环境规划和管理、畜牧系统管理、农业、旅游、自然资源管理、森林管理以及城市规划等领域都得到了广泛的应用,被赋予了更加丰富的内涵,产生了不同的承载力概念和相应理论,出

现了资源承载力(土地资源、水资源、矿产资源、森林资源、旅游资源等)、环境承载力(水环境、大气环境、土壤环境等)、生态承载力等概念,也开展了基于不同地域类型的资源环境承载力研究,如刘晓丽等(2008)研究了城市群的资源环境承载力,指出了城市群资源环境承载力研究的主要趋势和方向。

随着研究的深入,承载力被发展为承载能力。资源环境承载力的理论与方法研究主要集中在资源环境承载力的内涵、评价方法及其对区域、城市资源环境承载力的评价等方面(高湘昀等,2012)。其中,单要素资源环境承载能力向着时间和空间两个维度深化拓展,多要素资源环境综合承载能力向着广度延伸和交互性拓展方面发展(吕一河等,2018)。分析资源环境承载能力发展脉络发现,资源环境承载能力概念的发展、理论的提出等都是对社会发展中出现的资源、环境问题变化与反应的结果,资源环境承载能力的研究是在资源承载力和环境承载力研究的基础上发展起来的综合性成果。如中国80年代为了解决粮食问题主要开展了土地资源承载力和水资源承载力研究;进入90年代逐渐认识了环境和生态的重要性,开展了环境承载力和

生态承载力研究;2008年汶川特大地震后,重点为地震灾后重建规划编制而开展了土地适宜性、水土资源保障能力等研究(樊杰等,2009)。

### 2.2 资源环境承载能力发展的主要阶段

综合前人研究成果(张林波等,2009),从资源环境承载力研究的历史演化来看,其主要可分为萌芽奠基、应用探索和蓬勃发展等三个阶段(图1):

第一阶段:萌芽奠基阶段,时间尺度大概从1798年到1960年。承载力起源的奠基石或里程碑是Malthus (1798)的人口学理论(An essay on the principle of population)和Verhulst et al.(1838)提出的逻辑斯蒂克增长曲线,这一阶段主要研究人口统计学、应用生态学和种群生物学,研究的基本特点是以非人类生物种群增长规律的理论探讨为主,没有更多考虑自然资源和环境的约束。

第二阶段:应用探索阶段,时间尺度大概从1960年到2008年。这一时期是在全球资源环境危机背景下,承载力开始应用于解决人类经济社会面临的急迫的资源环境问题,根据研究对象、研究内容、应用领域派生出了很多分支,且注重研究资源和环境两个层面承载能力(容量),如开始研究土地

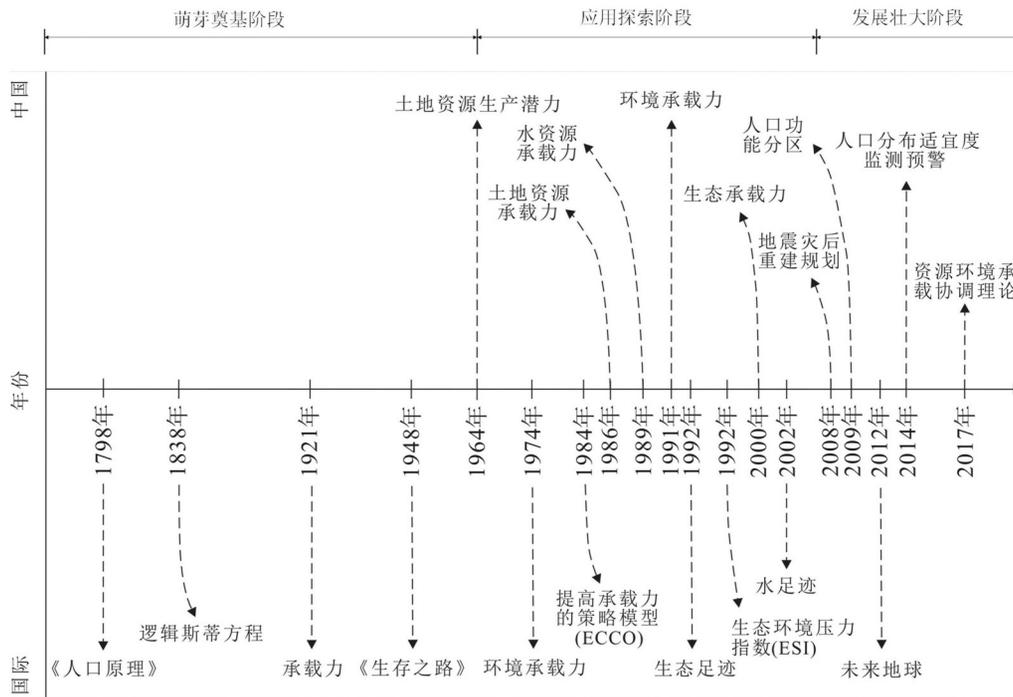


图1 国内外资源环境承载能力研究的重要事件(据封志明等,2017,有改动)

Fig.1 Milestones of study of resources and environment carrying capacity in China and abroad in 1798–2017(modified after Feng Zhiming et al., 2017)

承载力、水资源承载力、生态承载力等。其中20世纪90年代之前,土地资源承载力占主导;20世纪90年代后期,环境承载力和水资源承载力成为研究的主流;进入21世纪以后,生态承载力、城市综合承载力、旅游交通承载力、资源环境承载力等逐步兴起,越来越多的学者开始研究资源环境综合承载能力的理论和方法,并将其应用于土地、矿产、能源、环保等各个领域。如阿·德芒戎(1993)从区域地理学的角度,探讨了欧洲的人口过剩与自然社会条件和多种环境问题;高吉喜(2001, 2018)开展了生态承载力的理论、方法探索,提出了“生态供体-生态受体双耦合”“生态格局-过程-功能三位一体”和“生态承载力与区域发展相适宜”三大区域生态保护核心理论。

第三阶段:蓬勃发展阶段,时间尺度从2008年以来。2008年汶川地震是资源环境承载力应用研究的转折点,此后陆续开展了玉树、芦山、鲁甸等多次地震区的土地适宜性和水土安全保障研究,为震后重建规划提供技术支撑;随着国家对规划中人口和经济调控的加强,资源环境承载力研究发挥越来越重要的作用,更加注重资源环境系统与人口社会经济系统的协调发展。

现阶段的资源环境承载力(Resource Environmental Carrying Capacity),是指在自然生态环境不受危害并维系良好的生态系统前提下,一定地域空间的资源禀赋和环境容量所能承载的人口与经济规模,其与技术手段、社会选择和价值观念等密切相关,具有非线性、综合性与系统性等特征。由于研究者的目的与角度不同,给出的概念也有所不同,一定程度上导致了资源环境承载力评价落地的可操作性较差,也不易于量化,这也是目前没有能够形成公认的资源环境承载力量化方法的重要原因之一。

### 2.3 地质资源环境承载力研究进展

资源环境承载力是包括资源、环境要素的综合承载能力。承载体、承载对象和承载率是资源环境承载力研究的三个基本要素。作为区域发展规划方面的限制性概念,资源环境承载力的研究主题首先是自然资源,而与自然资源环境承载力密切的是地下水资源、矿产资源和地质环境等地质要素,这里将系统回顾地质环境、地下水资源和矿

产资源等地质资源环境的承载能力研究进展。

#### 2.3.1 地质环境承载力研究进展

20世纪70年代,随着经济快速发展和城市化进程的加速,传统的单要素资源环境承载力研究已难以解决社会发展所遇到的新问题(封志明等, 2017),于是综合性的资源环境承载力研究逐渐成为科学研究的前沿方向。尤其是1972年罗马俱乐部发表的《增长的极限》引起了人们对资源环境承载能力的强烈关注(Meadows, 1972)。中国将资源环境多要素耦合进行资源环境承载力研究始于20世纪90年代,这一时期多数从可持续性发展的角度,以“自然-经济-社会”协调发展为目标,研究区域主要以生态脆弱地区、城市地区以及流域等为主(王家骥等, 2000;代富强等, 2012;周侃等, 2015),研究对象主要为地下水资源、油气资源、地质环境等单因子的本底、状态承载力耦合后的综合承载能力。

由于资源环境承载力是一个多要素耦合的变量,并随时空变化而表现出较大差异(邓伟等, 2010),因此,在地质环境领域,人们常借用承载力的概念来描述区域系统对外部环境变化以及人类活动的最大承受可能(阈值),反映人类社会经济活动与自然环境相互关系程度的科学量度(邓伟等, 2010),常用的研究方法主要有指标体系法、状态空间法、系统模型法等(洪阳等, 1998)。如邓伟等(2010)研究了山区的资源环境承载力,将资源、环境综合起来整体考虑,探究其支撑经济社会可持续发展的匹配关系与变化;马震等(2017)和姜月华等(2017)分别以中国重大战略区的京津冀和长江经济带为研究对象,分析了京津冀地区、长江经济带等国土资源环境条件与重大地质问题。张茂省等(2018)开展了基于风险的地质环境承载力评价,提出了基于风险的地质环境容许承载力和极限承载力概念,将承载力状态判别为安全承载、容许超载和不可接受超载3个等级,其对于地质灾害红线划定有重要参考价值。孟晖等(2018)对中国地质环境承载能力的本底试评价结果显示,地质环境承载力本底等级高的区域面积占国土面积的11.26%、较高区域面积占国土面积的19.84%、中等区域面积占国土面积的20.95%、较低区域面积占国土面积的10.90%、低区域面积占国土面积的37.04%。其中本

底等级为低和较低的区域主要分布在第二级地势阶梯的塔里木盆地、柴达木盆地、川滇山地、云贵高原、秦巴山地、陇南山地、太行山区、江南丘陵区、大兴安岭北部等地区,以及第一级地势阶梯的青藏高原大部(图2)。由此可见,地质环境承载能力研究取得了一定成就,但对不通尺度的承载能力评价方法尚未统一。

### 2.3.2 地下水资源承载能力研究进展

水资源是社会可持续发展的重要因子。前人通常用“可持续利用水量”、“水资源的生态限度”、“水资源系统的极限”或者“水资源紧缺程度”等来表述。国外研究者主要从可利用水资源量的角度来论述水资源承载力(O'Reilly, 1986; Daily et al, 1992; Cohen, 1995; Seidl et al, 1999; Saveriades, 2000),评价指标如水压力指数(Water Stress Index)(Falkenmark et al., 1989)、水资源紧缺指数(Water Scarcity Index)、生态可持续利用水资源量(Ecologically Sustainable Water Resource)(Richter et al., 2003; Bernhardt et al., 2006)等。需要指出的是,不论是将水资源作为承载力研究的限制性要

素,还是作为可持续发展的研究因子,国外研究者都把包括地下水在内的水资源作为一个整体来看待,没有区分地表水和地下水。

地下水资源作为水资源的重要组成部分,其承载力研究是在中国水资源承载力研究基础上发展起来的。国内最早关于水资源承载力的研究是20世纪80年代末开展的新疆水资源及其承载力开发战略对策研究,将水资源承载力定义为社会经济可利用水资源量,即在满足维护生态环境用水要求后,水资源所能支撑的工农业最大产值和人口数量。施雅风(1992)提出了水资源承载力的定义和研究思路,这与当时国际上将水资源作为区域承载力的限制性要素的主流研究思路基本一致。与国外研究类似,20世纪90年代以前,中国水资源承载力研究也没有区分地表水和地下水等类型,但到了20世纪90年代后期,随着我国地下水供水比重不断升高,区域地下水过量开采引发的生态环境问题突出,在关中盆地(邢旭光等,2013)、三江平原(闵泰善等,2012)、华北平原(张光辉等,2013;刘敏等,2014)以及贵州岩溶地区(周涛等,2016)开始重视

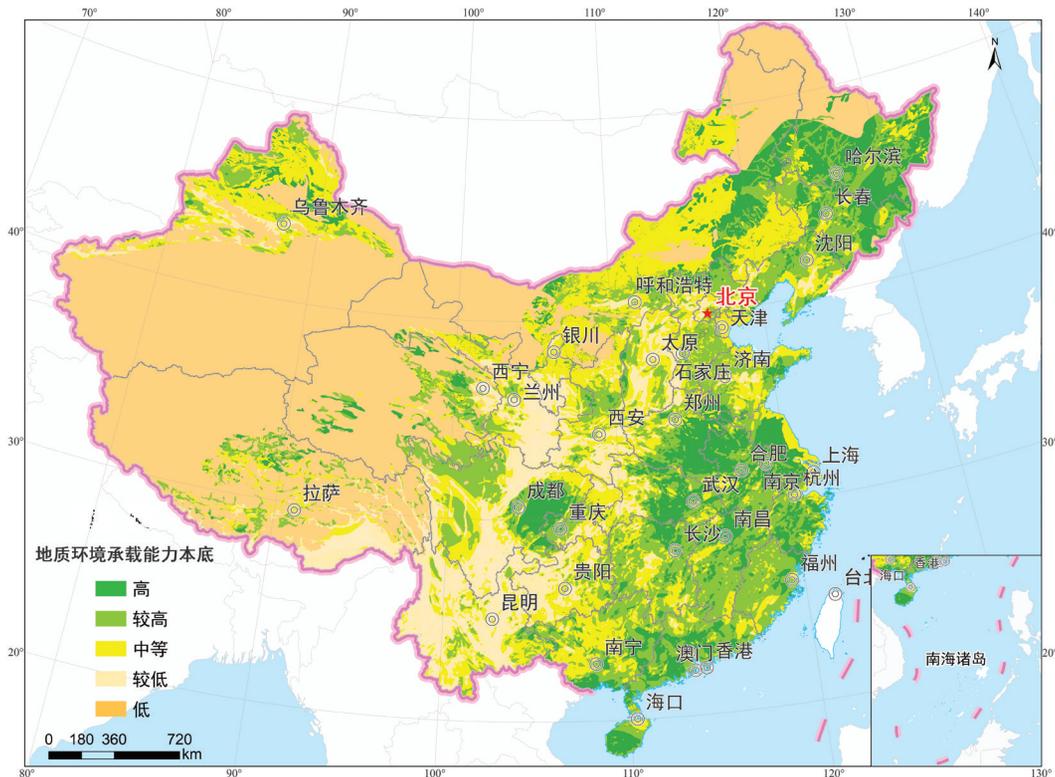


图2 全国地质环境承载能力本底试评价图(据孟晖等,2018)

Fig.2 Background experimental evaluation map on national geological environment carrying capacity(after Meng Hui, et al., 2018)

地下水资源承载力研究。

在中国近30年的研究历程中,水资源承载力在基本内涵、概念、研究方法上都取得重要进展。随着地球系统科学、数学、物理等交叉学科的发展,水资源承载力的研究逐步由单一指标、静态分析走向系统多目标、动态综合分析。目前,主要的研究方法有综合指标法、多目标情景分析法和系统动力学模拟法等。其中综合指标法一般是通过建立评价指标体系对水资源承载能力各关键因子分别进行评判,再通过主成分分析法(许朗等,2011;任玉忠等,2012;王春娟,2012)、模糊综合评价法(王荣晶等,2009;贺中华等,2010)、物元分析法(田静宜等,2013)、集对分析法(何俊仕,2011)等综合评价方法,将各指标评价结果综合起来,得出一个比较全面的评价结果。这种方法的关键是要建立科学、量化的评价指标体系,寻求各指标关键阈值并建立分级标准,再综合运用数学、物理等手段处理,得出实际承载能力的大小。多目标情景分析法是先规划能够反映承载力的人口、资源、社会经济、生态环境等若干目标,列出目标约束条件,通过建立多目标模型,直接求解出满意的结果。朱一中等(2004)、杨琳琳(2016)等在研究中国西北地区水资源承载力时都采用了该方法,该方法的难点在于正确建立目标模型和函数。系统动力学模型法是研究人员较多采用的一种方法,它是把社会经济、资源环境在内的大量复杂因子作为一个整体,先分析系统内部的元素和系统结构,通过建立数学模型、设计系统流图、建立状态方程对水资源承载力进行动态计算。该方法的难点在于系统结构复杂、参数或变量众多,使用时对数据需求量很大。冯海燕等(2006)、何仁伟等(2011)在研究不同地区水资源承载力时都采用了这种方法。李瑞敏等(2017,2018)、王轶等(2018)对我国地下水资源承载能力本底评价结果显示,承载本底较高的地区主要分布在黄淮海平原、江汉洞庭平原、长江下游平原、松辽平原、三江平原、成都平原、汾渭盆地、岭南地区、雷琼地区等,地下水可开采资源量为3767亿 $m^3$ (郝爱兵等,2018)(图3)。

### 2.3.3 矿产资源承载能力研究进展

目前关于矿产资源承载能力研究的学者较少,仅有徐强(1996)、王玉平(1998)和魏景明(2006)等

较少学者开展了此方面研究工作。徐强(1996)是较早对矿产资源承载能力开展研究的学者,其认为矿产资源承载力是指在可预见的时期内,在保证正常社会文化准则的物质生活条件下,矿产资源以直接或间接的方式持续供养的人口数量,并针对区域矿产资源承载力的概念、内涵及特征等进行了探讨;王玉平(1998)构建了矿产资源承载力的评价指标体系及计算模型,建立了矿产资源人口承载力分析的指标体系,并对现有资源和预测资源的人口承载力进行了定量计算和分析;王安建等(2002)开展了矿产资源与国家经济发展研究,深入剖析了不同发展水平和不同发展阶段国家经济发展与矿产资源消费的相关关系,用“S”型预测模型对我国的金属矿产资源进行了预测;魏景明(2006)采用多级模糊综合评判方法对黑龙江省主要矿产资源的承载力、竞争力和可持续力进行了评价。段海燕(2009)开展了我国矿产资源循环利用研究,建议大力发展矿产资源循环利用,保障矿产资源可持续性利用,提高矿山资源的承载能力。分析前人研究成果,目前对传统能源资源的承载能力研究较多,但对煤层气、页岩气等新能源的承载能力较少。

### 2.4 资源环境承载能力指标体系研究进展

指标体系是进行资源环境承载能力评价的关键,进行全国资源环境综合区划方法和全国不同类型区资源环境承载能力综合评价均应以评价指标体系为依据。目前全国层面与人类生产生活最为密切,研究领域最为广泛的资源环境要素包括土地资源、水资源、矿产资源、海洋资源、地质环境、生态环境、水环境和气候环境等8类。资源环境承载能力评价选取的指标不仅与承载本底(地质资源背景)有关,也与人类的经济活动有关,这些都给资源环境承载力研究带来了一定困难。目前,对资源环境承载力的科学性和普遍性的量化研究仍未有突破性进展。

#### 2.4.1 评价指标体系研究进展

目前,资源环境综合承载能力研究中指标体系包含内容较为广泛。根据承载对象的不同,研究者从经济、社会、环境和资源条件等方面进行不同目标层或要素层的设定。例如,针对大型煤矿矿区,吴良兴(2009)以综合评价法为手段,通过分析研究区的资源环境现状,构建矿区资源环境承载力评价指标

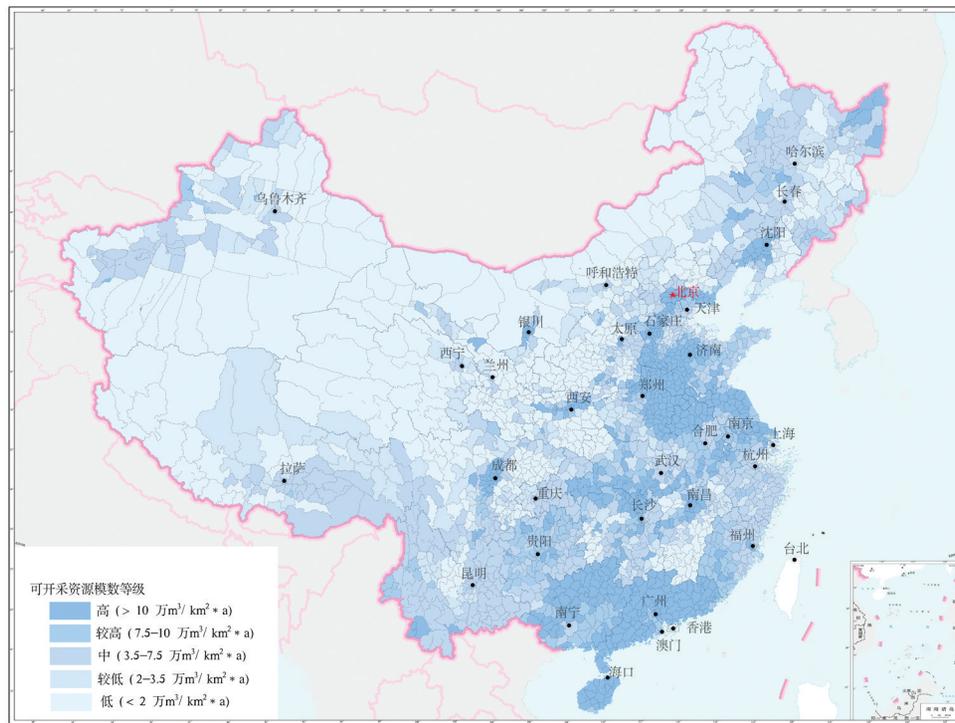


图3 全国地下水资源承载能力本底评价图(据李瑞敏等,2017,2018;王轶等,2018)

Fig.3 Background evaluation map of national groundwater resources carrying capacity  
(after Li Ruimin et al., 2017, 2018; Wang Yi et al., 2018)

体系,包括矿产资源、水资源、土地资源、林业资源、旅游资源、大气环境、水环境、土壤环境8个方面;并选取了储采比、人均煤炭资源占有量、人均耕地面积占有量、森林覆盖率、单位面积年客流量、CO<sub>2</sub>年排放总量、COD排放总量、工业固废处置利用率等20个主要评价指标,评价其资源环境承载力水平。姚治华等(2010)基于地质环境承载力的概念,从资源、环境、调节和社会经济四个方面构建了地质环境承载力评价指标体系,借助基于熵值—AHP的集对分析模型评价了大庆市地质环境承载力。针对近海环境,有学者在中国转型发展迅速的环渤海地区的13个城市,选取水资源、大气、地表水和近海环境四大要素,通过整合的综合指数来定量表征资源环境承载力。这些研究,体现了资源环境承载力评价指标体系的综合性、区域性特征。尤其是在进行灾后重建资源环境承载力评价时,选取了具有区域典型性的评价指标,将通适性指标和特征性指标相结合,固定性指标和流动性指标相结合(樊杰,2013)。

针对不同资源类型的资源环境承载力评价指标体系,前人亦开展了大量研究工作。李瑞敏等

(2011)针对中国地质环境工作现状,借鉴国际地质指标工作组最新的成果和经验,对地质指标的定义、内涵进行了修订和拓展,创建了包括调查指标体系(影响指标、状态指标、后果指标)和监测指标体系(压力指标、状态指标、响应指标)的地质指标体系框架,并建立了从面向单一地质环境问题的地质指标体系的构建思路 and 实际范例,为地质指标的创建、完善和应用指明了方向。王祎萍等(2011)建立了影响—状态—结果(CSR)的海岸线变迁的调查指标体系;王轶等(2011)从分析草地退化的各种影响因素及其对演化过程的控制作用构建了草地退化地质指标体系;王奎峰等(2014)研究了山东半岛生态环境承载力评价指标体系;李瑞敏等(2016)研究建立了地质资源环境承载能力评价指标体系,包括承载本底评价指标和承载状态评价指标,评价要素包括矿产资源、地下水资源、地质环境等;李亚民等(2018)从限制性与安全性角度出发,构建了地质环境承载力评价指标体系。

#### 2.4.2 监测预警指标体系研究进展

樊杰等(2017)分析了全国资源环境承载能力

预警(2016版)的基点,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,并结合资源环境耗损过程评价划分了5个预警等级(红色-极重警、橙色-重警、黄色-中警、蓝色-轻警和绿色-无警);同时将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。李瑞敏等(2016)提出了根据资源环境承载能力评价结果和演化趋势建立资源环境承载能力监测预警的技术思路,将预警级别划分为蓝色、黄色、橙色、红色等4个预警等级。叶有华等(2017)在小尺度的资源环境承载力预警评价中,从区级和街道级两个层次构建了资源环境承载力预警评价指标体系。

### 3 资源环境承载能力研究存在的问题及未来方向

当前,国内外资源环境承载能力研究取得了丰硕的成果。然而,由于自然资源与环境、经济社会发展的交互作用非常复杂,具有时间动态性和空间分异性,而且同时受到跨尺度因素的影响,使得资源环境承载能力的研究在理论基础、调控机理和估算方法等多个方面仍然面临着严峻挑战,急需攻关突破。

#### 3.1 存在的主要问题

(1)资源环境承载能力研究发展历史较短,统一的理论基础和方法体系尚未完全成形,资源环境承载能力科学评价指标体系尚不完善;资源环境承载能力评价关键指标的阈值选取和综合评价量纲难以统一;

(2)单要素承载力是综合承载能力研究的前提,综合承载能力是对单要素承载力的系统集成,目前综合承载能力评价很难进行精细量化深入研究;

(3)资源环境承载能力监测预警应用支撑平台尚未建立,评价结果与国土空间规划、三区三线落地等实践应用有较大距离。

#### 3.2 未来研究方向

资源环境承载能力未来的研究应在基础理论、技术方法、情景模拟和实践应用等4个层次开展研

究工作。主要方向包括资源环境承载能力时空差异及成因机制研究、全球变化对生态脆弱区资源环境承载能力影响研究、资源环境承载能力动态评价理论与技术方法研究(分区分级的边界、模型、指标、阈值)、全国和区域尺度(重点流域、重要经济圈或城市群、典型地区)资源环境承载能力监测预警及调控提升研究以及县市尺度资源环境承载能力细致性评价示范等。

#### 3.2.1 完善资源环境承载能力评价理论基础体系

资源环境承载能力是可持续发展研究的一个新领域,其研究涉及到人口、资源与环境经济学,统计学,现代系统科学等知识理论和方法应用。前人虽对资源环境承载能力评价指标体系进行了大量研究,但多数以定性为主,在资源环境承载能力定量评价指标体系研究不深入,尚未形成一套不同区域、不同尺度、不同类型的综合评价指标体系和权重确定方法。因此通过定量方法,建立一套完备的资源环境承载能力综合评价指标体系,提高资源环境承载能力评价的科学性,是需要深入攻关的课题。

#### 3.2.2 突破资源环境承载能力综合评价技术方法瓶颈

定量化研究资源环境承载力已成为未来发展趋势,因资源环境承载能力评价的阈值界定与关键参数率定,资源环境承载能力定量评价与综合计量是资源环境承载能力研究由分类走向综合、静态走向动态、定性走向定量的关键技术方法所在(杨光梅,2009),应深入探索资源环境承载能力定量研究的技术和方法,在定量评价的关键技术方法方面有待创新。

#### 3.2.3 开展未来发展情景模拟与资源环境压力和调控提升研究

充分应用新技术观测和监测手段,基于卫星与无人机遥感、定位观测及历史文献资料,从历史、现实、未来三个维度,开展资源环境承载力的时空特征分析,加强区域未来发展的前景和可持续发展考虑,对区域承载力的动态变化进行过程分析和发展趋势预测,发挥现代计算机技术、RS和GIS强大的数据处理和空间分析功能,对资源环境-社会经济复杂系统进行动态模拟、优化分析和预测预警,开展模拟未来发展情景与资源环境压力和调控提升研究,确定不同区域的区位优势和灾害风险,根据资源环境承载能力评价结果在人口和产业规模上进行调控,通过资源环境承载能力模拟评价结果优

化存量资源环境,扩大优质增量供给,倒逼资源供给侧结构性改革。

### 3.2.4 资源环境承载能力评价结果与实践应用紧密结合

开阔地球系统科学的宏观视野,将地球系统中的岩石圈、水圈、生物圈、大气圈等作为一个整体进行考虑,将土地、矿产、海洋、生物等资源全部纳入评价范围,做好城乡、陆海、地上地下等资源的承载能力协同评价,完成三区(城镇、生态、农业)和三线(生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界)落地。此外,目前亟待形成分区域、分类型、分尺度的资源环境承载力评价标准与技术规范,研发资源环境承载能力动态评价与监测预警平台,并在国家重大战略区、生态文明示范区开展示范推广。

就我国的地质资源环境承载能力研究而言,国土空间规划、用途管制与监测预警是其切入点和落脚点。其中,单要素的可利用数量和利用效率评价是进行国土空间规划的信息基础,将资源环境承载能力评价视作一个开放系统,依据国家发展战略,在国家内部合理布置承载对象落地,找到不同地区不同发展情景(Scenarios)下的自然平衡线(Natural balance line),建立全国地质资源环境承载能力动态监测预警机制,是支撑国土空间规划和用途管制的有效手段(图4)。

## 4 结 论

本研究在对国内外资源环境承载能力文献分析和实践工作的基础上,总结了资源环境承载能力的发展阶段,分析了地质环境、地下水资源和矿产

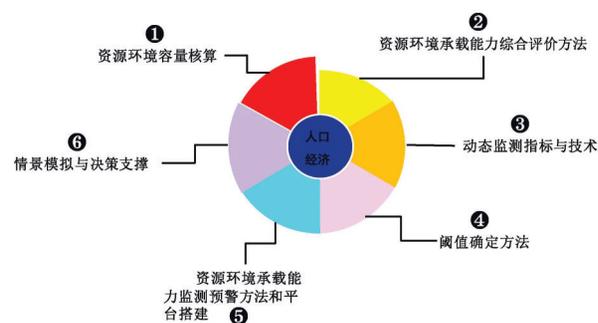


图4 全国地质资源环境承载能力动态监测预警思路  
Fig.4 National framework of dynamic monitoring and early warning on geo-resources and environment carrying capacity

资源等地质资源环境承载能力国内外研究进展,指出了存在的问题和未来资源环境承载能力发展方向,主要取得了以下结论:

(1)国内外资源环境承载能力研究经历了萌芽奠基、应用探索和蓬勃发展等3个主要发展阶段,各个阶段的出发点和落脚点与当时的经济社会发展密切相关。

(2)中国的地质环境、地下水资源和矿产资源等地质资源环境承载力评价和预警指标体系研究取得了较大进展,但基于县市尺度的细致性评价技术指南尚未形成,监测预警平台尚未建立。

(3)从基础理论、技术方法、情景模拟和实践应用等4个层面提出了未来资源环境承载能力的发展方向,认为以承载对象为前提的资源环境承载能力评价是国土空间规划和用途管制落地的有效途径。

## References

Albert Demangeon. Human Geography Problems[M]. Translated by Ge Yide. Beijing: Commercial Press, 1993.

An Haizhong, Li Huajiao. 2016. Research framework of resources and environment carrying capacity [J]. Resource & Industries, 18(6): 21-26(in Chinese with English abstract).

Arrow K, Bolin B, Costanza R. 1995. Economic growth, carrying capacity, and the Environment[J]. Science, 268(5210):520.

Bernhardt E, Stuart E B, Hart D D. 2006. Perspective: The challenge of ecologically sustainable water management[J]. Water Policy, 8 (5):475-479.

Cheng Guodong. 2002. Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in Northwest of China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 24 (4):361-367 (in Chinese with English abstract).

Cohen J E. 1995. Population growth and Earth's human carrying capacity[J]. Science, 269: 341-346.

Dai Fuqiang, Lü Zhiqiang, Zhou Qigang. 2012. The scenario prediction of optimum population size under the constraint of ecological carrying capacity in Chongqing municipality[J]. Population & Economics, 5:80- 86(in Chinese with English abstract).

Daily G C, Ehrlich P R. 1992. Population, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity[J]. Bioscience, 42:761-771.

Deng Wei. 2010. Discussion on mountain area resource and environment carrying capacity[J]. Geographical Research, 29(6): 959-969(in Chinese with English abstract).

Duan Haiyan. 2009. Study on Recycling Utilization of Mineral Resources in China[D]. Jilin University.

Falkenmark M, Lundquist J, Widstrand C. 1989. Macro-scale water

- scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development[J]. *Natural Resource Forum*, 13:258–267.
- Fan Jie, Zhou Chenghu, Gu Xingfa. 2009. *Planning of Post-Disaster Reconstruction of Wenchuan: Resources and Environment Carrying Capacity Evaluation*[M]. Beijing: Science Press.
- Fan Jie. 2010. *Planning of Post-Disaster Reconstruction of Yushu: Resources and Environment Carrying Capacity Evaluation* [M]. Beijing: Science Press.
- Fan Jie. 2013. The strategy of major function oriented zoning and the optimization of territorial development patterns[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2:193–206 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jie. 2014. *Planning of Post-Disaster Reconstruction of Lushan: Resources and Environment Carrying Capacity Evaluation* [M]. Beijing: Science Press.
- Fan Jie, Wang Chuansheng, Tang Qing, Xu Yong, Chen Dong. 2014. Comprehensive geographic analysis and discussion on strategies for postearthquake recovery and reconstruction in Ludian, Yunnan Province[J]. *Progress in Geography*, 33(8):1011–1018 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. 2017. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (2016) [J]. *Progress in Geography*, 36(3):266–276 (in Chinese with English abstract).
- FAO. *Potential Population Supporting Capacities of Lands in Developing World* [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
- Feng Haiyan, Zhang Xin, Li Guangyong, Mu Naijun, Chen Jin. 2006. A system dynamic model and simulation for water resources carrying capacity in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 11(6):106–110(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, Pan Tao, Li Peng. 2017. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: from theory to practice [J]. *Resources Science*, 39(3):379–395 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jixi. 2001. *Theoretical Exploration of Sustainable Development—Theory, Method and Application of Ecological Carrying capacity*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- Gao Jixi. 2018. The exploration of essential theories about regional ecology (in Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 63: 693–700(in Chinese).
- Gao Xiangyun, An Haizhong, Liu Honghong. 2012. Views on China resources and environmental loading capacity[J]. *Resource & Industries*, 14(6):116–120 (in Chinese with English abstract).
- Hadwen I A S, Palmer L J. *Reindeer in Alaska*[M]. Washington: US Department of Agriculture, 1922.
- Hao Aibing, Li Ruimin. 2018. *China Geological Environment Map Series*[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- He Junshi. 2011. On the bearing capacity of water resources in the Liaoning region of the Liaohe River valley[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 13(4):403–407 (in Chinese with English abstract).
- He Renwei, Liu Shaoquan, Liu Yunwei. 2011. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in karst region of southwest China—a case study in Bijie region, Guizhou Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 31(11):1376–1382(in Chinese with English abstract).
- He Zhonghua, Liang Hong, Huang Fasu, Zhao Fang, Zhou Ying. 2010. Assessment of groundwater resources carrying capacity in Karst areas: Taking Guizhou Province as a case[J]. *Journal of China Hydrology*, 30(3):22–27(in Chinese with English abstract).
- Hong Yang, Ye Wenhui. 1998. Measurement and application of sustainable environmental carrying capacity[J]. *China Population, Resources and Environment*, 3:54–58(in Chinese with English abstract).
- Li Ruimin, Li Xiaolei. 2017. *National Geological Resources Environmental Carrying Capacity Evaluation, Monitoring and Early Warning Annual Report* [R]. China Institute of Geological Environment Monitoring.
- Li Ruimin, Li Xiaolei, Menghui, Yin Zhiqiang. 2018. Evaluation results of resources and environmental carrying capacity support land and resources management [J]. *China Geological Survey Results Bulletin*, 6.11.
- Li Ruimin, Ju Jianhua, Wang Yi, Wang Yiping, Cao Feng, Qin Xiaoqun, Shen Jianmei, Sun Ziyong, Wang Hongqi. 2011. Framework and design of the geo-indicator system for geo-environment problems[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(11): 1738–1743 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruimin, Meng Hui. 2016. *Technical Requirements for Land and Resources Environmental Carrying Capacity Evaluation (Trial) (Geological Section)*. Ministry of Land and Resources.
- Li Yamin, Yang Nan, Li Ruimin, Fu Xiaolin, Meng Hui. 2018. Research on quantitative evaluation method of carrying capacity based on coordination degree of geological environment-socioeconomic complex system[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(2):96–101 (in Chinese with English abstract).
- Liu Min, Nie Zhenlong, Wang Jinzhe, Wang Lifang. 2014. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater resources carrying capacity in north China Plain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 6:311–315(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoli. *Theory and Practice of Resources and Environment Carrying Capacity of City Clusters* [M]. Beijing: China Economic Press, 2013.
- Liu Xiaoli, Fang Chuanglin. 2008. Progress and prospect of study on carrying capacity of resource and environment of city clusters [J]. *Progress in Geography*, 27(5):35–42 (in Chinese with English abstract).
- Ly Yihe, Fu Wei, Li Ting, Liu Yuanxin. 2018. Progress and prospects

- of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment[J]. *Progress in Geography*, 37 (1): 130–136 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Geology in China*, 44(6): 1045–1061(in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xie Hailan, Lin Liangjun, Hu Qiuyun, Qian Yong, Zhang Surong, Wang Guiling, Li Jianguo, Tan Chengxuan, Guo Haipeng, Zhang Fucun, Zhao Changrong, Liu Hongwei. 2017. The environmental geological conditions of Land resources in the Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(5): 857–873(in Chinese with English abstract).
- Malthus T R. An essay on the principle of population[M]. London: St Paul's Church–Yard, 1798.
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J. The limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind [M]. New York: Universe Books, 1972.
- Meng Hui, Li Chunyan, Zhang Ruolin, Liu Ke. 2018. National geological environment carrying capacity evaluation provides the basis for national land planning [J]. *China Geological Survey Results Bulletin*, 6.12.
- Min Taishan, Guo Xinyu, Du Chong, Chen Zefeng. 2012. Application of fuzzy recognition model on groundwater resources carrying capacity evaluation[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2:33–37(in Chinese with English abstract).
- O'Reilly A M. 1986. Tourism carrying capacity: concept and issues[J]. *Tourism management*, 7(4):254–258.
- Park R F, Burgess E W. An Introduction to the Science of Sociology [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1921.
- Ren Yuzhong, Ye Fang, Gao Shudong, Jiang Daode, Tan Xude, Wang Yirui. 2012. Study on water resources carrying capacity in Weifang city based on principal component analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(5):312–316(in Chinese with English abstract).
- Richter B D, Mathews R, Harrison D L. 2003. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity[J]. *Ecological Applications*, 13(1):206–224.
- Running S W. Ecology. 2012. A measurable planetary boundary for the biosphere[J]. *Science*, 337(6101):1458–9.
- Saveriades A. 2000. Establishing the social tourism carrying capacity for the tourist resorts of the east coast of the Republic of Cyprus[J]. *Tourism Management*, 21(2):147–156.
- Seidl I, Tisdell C. A. 1999. Carrying capacity reconsidered: From Malthus' population theory to cultural carrying capacity[J]. *Ecological Economics*, 31(3):395–408.
- Shi Yafeng, Qu Yaoguang. The Carrying Capacity of Water Resources and its Reasonable Use of Urumqi River[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- Tian Jingyi, Wang Xinjun. 2013. Assessment of the carrying capacity of water resources in arid areas based on an entropy fuzzy matter element model—a case study in minqin County, Gansu Province[J]. *Journal of Fudan University(Natural Science)*, 52(1): 86–93(in Chinese with English abstract).
- Unesco & Fao. Carrying Capacity Assessment with a Pilot Study of Kenya: A resource Accounting Methodology for Exploring National Options for Sustainable Development [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
- Verhulst P F. 1838. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. Correspondance mathématique et physique publiée par A[J]. *Quetelet*, 10:113–121.
- Wang Anjian, Wang Gaoshang. Mineral Resources and National Economic Development [M]. Beijing: Seismological Press, 2002 (in Chinese).
- Wang Chunjuan, Feng Lihua, Lu Xiaoqiang. 2012. Principal components analysis of water resources carrying capacity in Erdos[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 23(1): 77–80(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiaji, Yao Xiaohong, Li Jingrong, Chang Hong, Wang Yuangao. 2000. Assessment of ecological carrying capacity of Heihe River Basin[J]. *Research of Environmental Science*, 13(2):44–48(in Chinese with English abstract).
- Wang Kuifeng, Li Na, Yu Xuefeng, Wang Yuelin, Liu Yang. 2014. The construction and application of the index system of eco–environmental carrying capacity in Shandong peninsula[J]. *Geology in China*, 41(3): 1018–1027(in Chinese with English abstract).
- Wang Rongjing, Zhang Yunfeng, Zhang Yonghua, Wu Yani. 2009. Study on the theory and evaluation method of large– scale irrigation district groundwater resources carrying capacity[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 30(3):4–8(in Chinese with English abstract).
- Wang Yi, Li Ruimin, Wang Yiping, Cao Feng, Xu Wei. 2011. Rangeland degradation geo– indicator system[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(11):1744–1751(in Chinese with English abstract).
- Wang Yi, Liu Qiong, Gao Mengmeng. 2018. National groundwater resources carrying capacity evaluation lays the foundation for monitoring and early warning mechanism [J]. *China Geological Survey Results Bulletin*, 6.13.
- Wang Yiping, Li Ruimin, Wang Yi, Cao Feng, Xu Wei. 2011. Geo–indicator system of coastline changes[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(11):1752–1756(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuping. 1998. Population carrying capacity of mineral resources[J]. *China Population Resources and Environment*, 3:19–

- 22(in Chinese with English abstract).
- Wu Liangxing. 2009. Research on Resource and Environmental Carrying Capacity of Large Coal Mining Areas[D]. Northwest University.
- Wei Jingming. 2006. Analysis on mineral resource carry capacity competitiveness and sustainable power in Heilongjiang province[J]. China Mining Magazine, 15(11):102–106(in Chinese with English abstract).
- Xing Xuguang, Shi Wenjuan, Zhang Yidan, Xie Jinyu. 2013. Assessment of groundwater resources carrying capacity in Xi'an city based on principal component analysis[J]. Journal of China Hydrology, 33(2):35–38(in Chinese with English abstract).
- Xu Qiqiang. 1996. An exploration of several problems about the analysis of regional mineral resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 11(2):135–141(in Chinese with English abstract).
- Xu Lang, Huang Ying, Liu Aijun. 2011. Study the carrying capacity of water resources in Jiangsu Province based on the principal component analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 20(12):1468–1474(in Chinese with English abstract).
- Yang Guangmei. 2009. Research on the stage characteristics and prospects of carrying capacity in China[J]. Science and Technology, 26:23–25(in Chinese with English abstract).
- Yang Linlin, Li Bo, Fu Qi. 2016. Scenario analysis of water resources carrying capacity in Xinjiang based on BP neural network model[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 52(2):216–222 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zhihua, Wang Hongqi, Hao Xuguang. 2010. Evaluation of Geological Environment Carrying Capacity Based on Set Pair Analysis: A Case Study in Daqing[C]. Beijing: Metallurgical Annual Meeting of the Metal Society.
- Ye Youhua, Han Zhou, Sun Fangfang, Zhang Yuan, Huang Tao, Chen Li, Li Xin. 2017. Early-warning for environmental and resource carrying capacity on small scale—a case study of Dapeng Peninsula, Guangdong[J]. Ecology and Environment Sciences, 26(8):1275–1283(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Liu Chunhua, Yan Mingjiang, Wang Jinzhe. 2013. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(1):1–10(in Chinese with English abstract).
- Zhang Linbo, Li Wenhua, Liu Xiaofu, Wang Wei. 2009. Carrying capacity: Origin, development and prospective[J]. Acta Ecologica Sinica, 29(2):878–888 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Wang Yao. 2018. Research on the evaluation of the carrying capacity of geological environment based on its risk level [J]. Geological Bulletin of China, 37(2/3):467–473(in Chinese with English abstract).
- Zhou Kan, Fan Jie. 2015. Characteristics and influence factors of resources and environment carrying capacity in underdeveloped areas of China[J]. Geographical Research, 34(1):39–52(in Chinese with English abstract).
- Zhou Tao, Liang Hong, Jiao Shulin, He Zhonghua, Sun Xiaoqiong. 2016. Assessment on groundwater resources carrying capacity in karst area based on component analysis and entropy[J]. Water Science and Engineering Technology, 4:16–19(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yizhong, Xia Jun, Wang Gangsheng. 2004. Assessment of Water Resources Carrying Capacity of Northwest China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 43(3):103–106 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 阿·德芒戎. 1993. 人文地理学问题[M]. 葛以德译. 北京: 商务印书馆.
- 安海忠, 李华姣. 2016. 资源环境承载力研究框架体系综述[J]. 资源与产业, 18(6):21–26.
- 程国栋. 2002. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土, 24(4):361–367.
- 代富强, 吕志强, 周启刚. 2012. 生态承载力约束下的重庆市适度人口规模情景预测[J]. 人口与经济, 5:80–86.
- 邓伟. 2010. 山区资源环境承载力研究现状与关键问题[J]. 地理研究, 29(6):959–969.
- 段海燕. 2009. 我国矿产资源循环利用研究[D]. 吉林大学.
- 樊杰, 周成虎, 顾行发. 2009. 国家汶川地域灾后重建规划资源环境承载力评价[M]. 北京: 科学出版社.
- 樊杰. 2010. 玉树地震灾后恢复重建资源环境承载力评价[M]. 北京: 科学出版社.
- 樊杰. 2013. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局[J]. 中国科学院院刊, 2:193–206.
- 樊杰. 2014. 芦山地震灾后恢复重建资源环境承载力评价[M]. 北京: 科学出版社.
- 樊杰, 王传胜, 汤青, 徐勇, 陈东. 2014. 鲁甸地震灾后重建的综合地理分析与对策研讨[J]. 地理科学进展, 33(8):1011–1018.
- 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.
- 冯海燕, 张昕, 李光永, 穆乃君, 陈瑾. 2006. 北京市水资源承载力系统动力学模拟[J]. 中国农业大学学报, 11(6):106–110.
- 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 潘韬, 李鹏. 2017. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 39(3):379–395.
- 高吉喜. 2001. 可持续发展理论探索: 生态承载力理论, 方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 高吉喜. 2018. 区域生态学核心理论探究[J]. 科学通报, 63: 693–700.
- 高湘鸣, 安海忠, 刘红红. 2012. 我国资源环境承载力的研究评述[J]. 资源与产业, 14(6):116–120.
- 郝爱兵, 李瑞敏. 2018. 中国地质环境图系[M]. 北京: 地质出版社.
- 洪阳, 叶文虎. 1998. 可持续环境承载力的度量及其应用[J]. 中国人口·资源与环境, 3:54–58.
- 何俊仕. 2011. 辽河流域辽宁区域水资源承载力分析[J]. 沈阳农业大

- 学报(社会科学版), 13(4):403-407.
- 何仁伟,刘邵权,刘运伟. 2011.基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例[J]. 地理科学, 31(11):1376-1382.
- 贺中华,梁虹,黄法苏,赵芳,周盈. 2010.喀斯特地区地下水资源承载力综合评价研究——以贵州省为例[J]. 水文, 30(3):22-27.
- 姜月华,林良俊,陈立德,倪化勇,葛伟亚,成杭新,翟刚毅,王贵玲,班宜忠,李媛,雷明堂,谭成轩,苏晶文,周权平,张泰丽,李云,刘红樱,彭柯,王寒梅. 2017.长江经济带资源环境条件与重大地质问题[J]. 中国地质, 44(6):1045-1061.
- 李瑞敏,李小磊. 2017.全国地质资源环境承载能力评价与监测预警年度成果报告[R]. 中国地质环境监测院.
- 李瑞敏,李小磊,孟晖,殷志强. 2018.资源环境承载能力评价支撑服务国土空间规划管理[J]. 中国地质调查成果快讯,6.11.
- 李瑞敏,鞠建华,王轶,王祎萍,曹峰,覃小群,申建梅,孙自永,王红旗. 2011.地质环境问题的地质指标体系框架及其构建方法[J]. 地质通报, 30(11):1738-1743.
- 李瑞敏,孟晖. 2016.国土资源环境承载能力评价技术要求(试行)(地质部分). 国土资源部.
- 李亚民,杨楠,李瑞敏,付小林,孟晖. 2018.基于复合系统协调度的地质环境承载能力定量评价方法研究[J]. 水文地质工程地质, 45(2):96-101.
- 刘晓丽. 2013.城市群地区资源环境承载力理论与实践[M]. 北京:中国经济出版社.
- 刘晓丽,方创琳. 2008.城市群资源环境承载力研究进展及展望[J]. 地理科学进展, 27(5):35-42.
- 吕一河,傅微,李婷,刘源鑫. 2018.区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1):130-136.
- 刘敏,聂振龙,王金哲,汪丽芳. 2014.华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J]. 水土保持通报, 6:311-315.
- 闵泰善,郭新宇,杜崇,陈则峰. 2012.模糊识别模型在地下水资源承载力评价中的应用——以三江平原井灌区为例[J]. 黑龙江大学学报, 2:33-37.
- 马震,谢海澜,林良俊,胡秋韵,钱永,张素荣,王贵玲,李建国,谭成轩,郭海朋,张福存,赵长荣,刘宏伟. 2017.京津冀地区国土资源环境地质条件分析[J]. 中国地质, 44(5):857-873.
- 孟晖,李春燕,张若琳,刘可. 2018.全国地质环境承载能力评价为国土空间规划提供基础依据[J]. 中国地质调查成果快讯,6.12.
- 任玉忠,叶芳,高树东,姜道德,谭绪德,王依瑞. 2012.基于主成分分析的潍坊市水资源承载力评价研究[J]. 中国农学通报, 28(5):312-316.
- 施雅风,曲耀光. 1992.乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社.
- 田静宜,王新军. 2013.基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究——以甘肃民勤县为例[J]. 复旦学报:自然科学版, 52(1):86-93.
- 王安建,王高尚. 2002.矿产资源与国家经济发展[M]. 北京:地震出版社.
- 王春娟,冯利华,陆小强. 2012.鄂尔多斯市水资源承载力的主成分分析[J]. 水资源与水工程学报, 23(1):77-80.
- 王家骥,姚小红,李京荣,常虹,王渊高. 2000.黑河流域生态承载力估测[J]. 环境科学研究, 13(2):44-48.
- 王奎峰,李娜,于学峰,王岳林,刘洋. 2014.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, 41(3):1018-1027.
- 王荣晶,张运凤,张永华,吴亚妮. 2009.大型灌区地下水资源承载力评价指标体系及评价方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 30(3):4-8.
- 王轶,李瑞敏,王祎萍,曹峰,徐为. 2011.草地退化的地质指标体系[J]. 地质通报, 30(11):1744-1751.
- 王轶,刘琼,高萌萌. 2018.全国地下水资源承载能力评价为监测预警机制建设奠定基础[J]. 中国地质调查成果快讯,6.13
- 王祎萍,李瑞敏,王轶,曹峰,徐为. 2011.海岸线变化的地质指标体系[J]. 地质通报, 30(11):1752-1756.
- 王玉平. 1998.矿产资源人口承载力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 3:19-22.
- 魏景明. 2006.黑龙江矿产资源承载力竞争力及可持续力分析[J]. 中国矿业, 15(11):102-106.
- 吴良兴. 2009.大型煤矿矿区的资源环境承载力研究[D]. 西北大学.
- 邢旭光,史文娟,张译丹,谢金宇. 2013.基于主成分分析法的西安市地下水资源承载力评价[J]. 水文, 33(2):35-38.
- 徐强. 1996.区域矿产资源承载能力分析几个问题的探讨[J]. 自然资源学报, 11(2):135-141.
- 许朗,黄莺,刘爱军. 2011.基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境, 20(12):1468-1474.
- 杨光梅. 2009.我国承载力研究的阶段性特征及展望[J]. 科技创新导报, 26:23-25.
- 杨琳琳,李波,付奇. 2016.基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 52(2):216-222.
- 姚治华,王红旗,郝旭光. 2010.基于集对分析的地质环境承载力研究——以大庆市为例[C]. 北京:金属学会冶金年会.
- 叶有华,韩宙,孙芳芳,张原,黄涛,陈礼,李鑫. 2017.小尺度资源环境承载力预警评价研究——以大鹏半岛为例[J]. 生态环境学报, 26(8):1275-1283.
- 张光辉,费宇红,刘春华,严明疆,王金哲. 2013.华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 29(1):1-10.
- 张林波,李文华,刘孝富,王维. 2009.承载力理论的起源、发展与展望[J]. 生态学报, 29(2):878-888.
- 张茂省,王尧. 2018.基于风险的地质环境承载力理论与评价方法[J]. 地质通报, 37(2/3):467-473
- 周侃,樊杰. 2015.中国欠发达地区资源环境承载力特征与影响因素——以宁夏西海固地区和云南怒江州为例[J]. 地理研究, 34(1):39-52.
- 周涛,梁虹,焦树林,贺中华,孙小琼. 2016.基于主成分分析和熵的喀斯特地区地下水资源承载力评价[J]. 水科学与工程学报, 4:16-19.
- 朱一中,夏军,王纲胜. 2004.西北地区水资源承载力宏观多目标情景分析与评价[J]. 中山大学学报:自然科学版, 43(3):103-106.