

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04021

赵银兵,倪忠云,欧阳渊,袁材栋,陈馨熠,王东,刘晶晶,刘洪,2022.生态地质环境承载力研究进展.沉积与特提斯地质,42(4):529-541. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04021

ZHAO Y B, NI Z Y, OUY Y, YUAN C D, CHEN X Y, WANG D, LIU J J, LIU H, 2022. Research progress of eco-geological environment carrying capacity. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4): 529-541. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04021

生态地质环境承载力研究进展

赵银兵^{1,2,4}, 倪忠云^{1,2*}, 欧阳渊³, 袁材栋⁵, 陈馨熠¹,
王东², 刘晶晶¹, 刘洪^{2,3}

(1. 成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 4. 河北省湿地生态与保护重点实验室(筹), 河北 衡水 053000; 5. 青海省环境地质勘查局地质环境调查院, 青海 西宁 810007)

摘要:生态地质环境从生态地质学和环境地质学发展而来,由地质环境、生态环境和社会经济环境三个子系统构成一个有机整体,它与环境类承载力结合形成生态地质环境承载力,表征环境能够承受的人类活动阈限。国内的生态地质环境承载力研究分为2000年以前的准备阶段、2000—2010年探索前进阶段、2011年至今的稳定发展阶段,国家重大方针政策实施和重大生态地质环境事件影响了承载力的研究方向。生态地质环境子系统和系统的承载力发展程度存在差异,生态环境承载力研究较多、地质环境承载力研究次之、社会经济环境承载力研究相对较少,系统承载力研究处于不断整合之中。已有研究在学科交叉融合、耦合机制、模拟预测模型集成和国家重大需求服务响应等方面存在不足。未来生态地质环境承载力研究应坚持系统观,统合子系统和系统两个尺度,从拓展学科纵深关联、深化多维耦合机制、发展集成模拟预测模型、面向国家与社会需求等方面将研究推向新高度。

关键词:生态地质环境;承载力;耦合机制;模型集成;情景模拟

中图分类号:X141

文献标识码:A

Research progress of eco-geological environment carrying capacity

ZHAO Yinbing^{1,2,4}, NI Zhongyun^{1,2*}, OUYANG Yuan³, YUAN Caidong⁵, CHEN Xinyi¹,
WANG Dong², LIU Jingjing¹, LIU Hong^{2,3}

(1. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 4. Key Laboratory of Wetland Ecology and Protection of Hebei Province (under preparation), Hengshui 053000, China; 5. Geological Environment Investigation Institute of Qinghai Environmental Geological Exploration Bureau, Xining 810007, China)

收稿日期: 2022-02-17; 改回日期: 2022-04-05 责任编辑: 郭秀梅 科学编辑: 白永健

作者简介: 赵银兵(1978—),男,副教授,从事生态地质环境、城市与区域生态、遥感与GIS应用研究。E-mail: zhaoyinbing06@cdut.cn

通讯作者: 倪忠云(1982—),女,讲师,从事生态环境遥感与GIS研究。E-mail: nizhongyun2012@mail.cdut.edu.cn

资助项目: 中国地质调查项目(DD20190542);四川省科学技术厅软科学项目(22RKX0490);四川省高等学校人文社会科学重点研究基地青藏高原及其东缘人文地理研究中心开放课题(RWDL2021-ZD002);河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)开放基金(hklk201902)

Abstract: Eco-geological environment is developed from ecological geology and environmental geology, and constitutes an organic whole by three subsystems of geological environment, ecological environment and social and economic environment. It is combined with the carrying capacity of environment to form the carrying capacity of eco-geological environment, which is used to characterize the threshold of human activities that can be tolerated. Domestic research on eco-geological environment carrying capacity can be divided into three stages: the preparation stage before 2000, the exploration stage from 2000 to 2010, and the stable development stage from 2011 to the present. The implementation of major national guidelines and policies and major eco-geological environmental events have affected the research direction of carrying capacity. There is a certain difference between the development degree of the carrying capacity of eco-geological environment subsystems and systems. There are more studies on the carrying capacity of ecological environment, followed by the carrying capacity of geological environment, and the carrying capacity of social and economic environment is the last. During the same period, research on the carrying capacity of system is in the process of continuous integration. Existing research has deficiencies in terms of interdisciplinary integration, coupling mechanism, integration of simulation and forecasting models, and response to major national demand services. In the future, the research on the carrying capacity of eco-geological environment should adhere to the system view, integrate the two scales of subsystem and system, and push the research to a new height from the aspects of expanding the in-depth correlation of disciplines, deepening the multi-dimensional coupling mechanism, developing integrated simulation and prediction model, and responding to the needs of the state and society.

Key words: eco-geological environment; carrying capacity; coupling mechanism; model integration; scenario simulation

0 引言

生态地质环境由起源于 20 世纪 30 年代的生态地质学 (Trofimov, 2001, 2013) 和起源于 20 世纪 60、70 年代的环境地质学 (哈承祐, 2006) 发展演变而来, 主要研究地质和环境的基本特征、功能和演变规律 (陈梦熊, 1995), 强调地质环境、生态环境和社会经济三者是一个统一的动力系统 (黄润秋, 2001)。部分研究将这个系统称为“地质生态环境”, 强调地质的基础作用 (史培军, 1997; 袁道先, 2004); 另有研究采用“生态地质环境”或“生态-地质环境”, 强调生态要素和人类活动对环境的影响 (Li et al., 2018; Yang et al., 2019)。随着生态地质环境概念应用加深, 它已被理解为地质环境、生态环境和社会经济环境构成的综合系统。

承载力理论起源于人口统计学、应用生态学和种群生物学等学科 (张林波等, 2009)。其中, 环境承载力研究可追溯至 20 世纪早期, Park and Burgess (1921) 指出承载力是在某一特定环境条件下, 某种个体存在数量的最高极限。Arrow et al. (1996) 在《Science》上发表“经济增长、承载力和环境”一文, 成为环境承载力研究的里程碑。在全球人口、资源和环境相关问题日益加剧的背景下, 各种单项及综

合环境承载力研究随之兴起 (Cooper and Dearing, 2019; Swiaqder et al., 2020)。国内的承载力研究从 20 世纪 90 年代前后开始兴起 (蒋伟, 1989; 肖炳成, 1990), 研究涵盖了生物种群 (陈成忠, 2007; 徐堇, 2019)、人口 (童玉芬, 2010)、资源 (刘佳骏等, 2011)、环境 (狄乾斌等, 2016)、生态 (曹智等, 2015)、经济 (韩帅帅等, 2017)、文化 (王娟娟等, 2015) 和社会 (卢小丽等, 2005) 等各种承载力类型, 逐渐从单要素承载力发展到多要素承载力, 从资源承载力延伸到资源环境协同承载力, 从局域承载力发展到区域综合承载力 (张茂省等, 2018; 黄贤金等, 2019)。生态地质环境承载力是在前述承载力的基础上发展而成, 是指在区域生态地质环境组成、结构和功能保持相对稳定的前提下, 针对特定科学技术、经济发展和社会管理水平, 面向特定评价目标确定的生态地质环境所能承受人类活动阈限。生态地质环境承载力的主体是生态地质环境; 客体是依附于主体的人类活动, 表现为人口数量, 人类活动强度、频率、效应等; 作用条件是指特定时间、区域、发展水平、保持主体的功能结构相对稳定; 同时承载力系统与资源禀赋、价值观念和技术手段等密切相关, 兼有综合性和动态性等特征 (徐勇等, 2017)。

随着“人类命运共同体”的提出、全球气候变化的国际应对、国民经济与社会快速发展,人们对生态地质环境的关注日益增加。通过调查、监测、评价、模拟和预测等技术方法研究不同时空尺度下的生态地质环境承载力,能够服务人类活动空间格局和过程的优化与调整。梳理生态地质环境承载力研究进展,发现存在的问题,明晰发展趋势,有利于推进承载力研究可持续发展。

1 总体进展

生态地质环境承载力系统是地质环境、生态环境、社会经济环境三个子系统承载力的集成,子系统与系统承载力研究可分为三个阶段:2000 年以前的准备阶段、2000—2010 年探索前进阶段、2011 年至今的稳定发展阶段,该过程与国家重大方针政策制定实施存在高度耦合性,同时又表现出不同研究领域差异(图 1)。下文将从概念内涵、研究面向对象、研究区域、研究方法模型、评价指标体系、存在问题和发展趋势等方面进行介绍。

1.1 地质环境子系统承载力

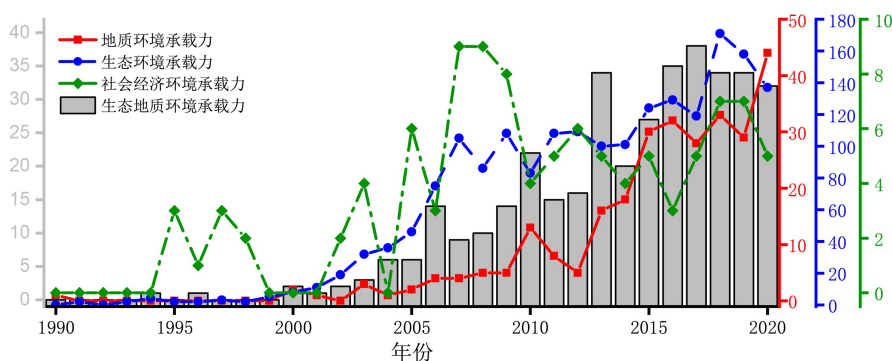
地质环境是指以岩石圈为主,通过与大气、生物和水圈的相互作用形成并演化的人类生产与生活的周围岩土介质,主要包括岩土物质组成、结构、特性、赋存状态、边界条件和运动特征等各种功能(王思敬,1997)。地质环境承载力是指地质环境条件对人类社会活动发展的支持能力(张茂省等,2018)。地质环境承载力研究在国内起始于 20 世纪 90 年代,发展划分为自主理论探索(20 世纪 90 年代)、实践运用与理论深化(2000—2010 年)、“3S”技术与大数据综合评价(2011 年至今)三个阶段(王

念秦等,2019),并在第三个阶段融入到国土资源环境监测预警和国土空间规划等实践中(丁月清等,2019)。

地质环境承载力研究主要服务于地质、矿山、城市和自然资源管理等部门和领域,产生各种子类的地质环境承载力,例如城市地质环境承载力(肖炳成,1990;杜蕾等,2018),矿山地质环境承载力(补建伟等,2016),脆弱区地质环境承载力(赵银兵等,2010),与国家的基础地质、工程地质、水文地质、环境地质和生态地质等调查工作紧密相关。研究区主要涵盖行政区域、矿山(区)、城市(群)、流域和图幅等不同的空间尺度。现有的地质环境承载力评价指标体系主要涵盖地形地貌、地质构造、地震活动、地质建造、水文地质、环境地质等类别(表 1),兼顾了气候、土地利用和植被等生态环境指标,以及人口、GDP、建筑、道路、产业和地质环境治理等社会经济环境指标。地质环境和生态环境指标多采用状态类指标,其中的环境地质指标,如地质灾害等主要采用压力类指标,社会经济指标则兼有状态、压力和响应等多重属性。研究使用的方法模型主要有层次分析法、模糊综合评价法、综合指数法、熵权法、专家打分法、隶属函数法、变异系数法、系统动力学(System Dynamics, SD)模型和机器学习法等。

1.2 生态环境子系统承载力

生态环境的概念于 20 世纪 80 年代在国内出现。以生物作为主体,生态环境指对生物生长、发育、生殖、行为和分布产生影响的各环境因子的综合;以人类作为主体,生态环境强调对人类生存和发展产生影响的自然因子的综合(王孟本,2003)。



纵坐标单位:文献数量(篇);来源:中国知网总库;主题检索:“地质环境承载力”、“生态环境承载力”、“社会经济环境承载力”、“生态 AND 地质 AND 环境 AND 承载力”;文献时间 1990—2020 年。

图 1 四种承载力的中文文献数量变化

Fig. 1 Changes in the number of Chinese literatures with four categories of carrying capacity

虽然学术界对生态环境概念存有不同见解,但它已经更多地演化为“生态+环境”的语义模式,并为大众接受和使用(巩固,2019)。生态环境承载力是指在某一时期某一地区,在维持生态环境系统的组成、结构和功能不发生退化而处于良性循环发展的条件下,系统能承受的人类活动阈值(朱嘉伟等,

2017)。生态环境承载力研究在国内始于20世纪90年代中期(宋强等,1996),理论探索阶段持续到2006年前后。中国政府于2007年首次提出生态文明建设理念,2012年将生态文明和可持续发展的理念引入社会经济发展规划,对生态环境承载力研究产生了重要的推进作用。

表1 地质环境承载力评价指标体系涉及要素

Table 1 Evaluation index system of geological environment carrying capacity

指标类别	指标
地形地貌	高程、坡度、坡向、坡形、坡位、切割度、起伏度、粗糙度等
地质构造	类型、距离、密度、活动性、稳定性等
地震活动	地震动峰值加速度、地震动反应谱特征周期、地震烈度、地震空间密度、地震发生频率等
地质建造	类型、组合、结构、稳定性、承载率等
水文地质	水系距离、水体密度、水量、水质、地下水开采深度、地下水开采率等
环境地质	地质灾害类型、密度、频率、易发性、易损性、危险性、风险性等,土壤质量等

生态环境承载力研究主要服务自然资源、生态环境、水利、农业、林业、旅游、城乡规划和海洋等部门。研究区包括各级行政区、流域、海域、矿区和景区等空间尺度。现有的生态环境承载力评价指标体系包括了大气环境、水环境、植物环境、土地环境、土壤环境、人居环境、综合环境和环境治理等指标类别(表2),兼顾了能源、矿产、水和土地等自然资源,以及GDP、电力-能源-水-土地消耗、产业、人口、恩格尔系数等社会经济环境指标,部分研究纳入了地形地貌、地质构造、工程岩组、地质灾害类型及危害等地质环境指标。生态环境承载力研究方法模型在生态地质环境系统中最成熟,可以参照魏晓旭等(2019)的三类划分:指标体系综合评价法,包括生态足迹模型(张志强等,2001)、状态空间法(毛汉英等,2001)和供需平衡法(田海兰等,2020),以及固定模型(王秦等,2020)等,如PSR模

型(王奎峰等,2014)、DSR模型(郭巨海等,2015)、DPSIR模型(郑晶等,2017)和DPSIRM模型(郭倩等,2017)等,其中固定模型是构建指标体系的主要依据(李剑等,2021);产品周期综合评价法,包括能值理论方法(张芳怡等,2006)和生命周期方法(Piccinno et al., 2017)等;综合评价法,包括自然植被净第一性生产力评价法(Qin et al., 2010)、系统动力学模型(王俭等,2009)、“3S技术”综合分析方法(朱晓丽等,2011)和情景模拟法(宁佳等,2014)等。

1.3 社会经济环境子系统承载力

社会经济环境是由人引起的社会因素或环境的总和,以及影响个人或群体或社区的物质和社会经济因素的总和。经济承载力是基于可持续发展原则,某一区域在特定资源条件与环境容量下,经济系统充分发展所能承载的最大经济规模(狄乾斌

表2 生态环境承载力评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of ecological environment carrying capacity

指标类别	指标
大气环境	气温、降水,PM2.5/PM10含量、SO ₂ 排放量、NO ₂ 排放量,空气质量达标率等
水环境	COD排放量、氨氮排放量、生活污水排放量、工业废水排放量,污水处理率、功能达标率等
植物环境	森林/林地/草地覆盖率,植被覆盖率,绿化覆盖率等
土地环境	水土流失率、土地沙化与盐渍化面积(占比),农药及化肥使用量等
土壤环境	土壤侵蚀强度、模数,土壤污染强度等
人居环境	人均道路面积、人均建设用地面积、人均绿地面积,噪声强度等
综合环境	生态系统状态、功能、指数、质量,生物多样性,生物丰度,生态环境事件(频率)等
环境治理	工业固体废弃物综合利用率、生活垃圾无害化处理率、自然保护区面积和占比、水土流失治理率、矿山治理率、环境基础设施投资及占比、环保投入占比等

等, 2015)。Daily 和 Ehrlich(1992)指出社会承载力是在社会有限资源条件下所支持人口的最大数量。孔伟等(2017)将社会承载力定义为在特定区域背景下,整个人类社会系统能够支撑可持续发展目标要求、满足人类正常生活需要,以及保证社会经济协调运转所能够承担的最大人口负荷。社会经济环境承载力是某一区域在资源条件和环境容量约束下社会经济系统所能承载最大经济与社会活动规模的能力。

社会经济环境承载力研究主要服务于国民经济与社会发展规划、自然资源管理、国土空间规划管理、生态环境影响评价、公共管理与社会服务等

方向。研究区主要涉及市域、省域、城市(群)、流域和全国等空间尺度,县域及其他更小尺度研究较少。现有的社会经济环境承载力评价指标体系与各地统计数据可获取性密切相关,继承了生态环境承载力的构建模式,融合了资源和环境、国民经济、人口、就业和工资、财政和物价、生活和保障、公共服务、科技研发、城市发展和政策与管理等指标类别(表3)。研究方法模型主要为 PSR 模型、层次分析法、主成分分析法、模糊综合评价法、回归分析法、熵权法、频度分析法、能值分析法、场强模型、系统动力学模型、多目标动态规划法和情景模拟法等(高传昌等, 2009; 董俊丽等, 2012)。

表 3 社会经济环境承载力评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of socioeconomic environment carrying capacity

指标类别	指标
资源和环境	气温、降水量、平均相对湿度、日照时数,植被覆盖率,矿产与能源产量和构成,自然灾害(频率)及损失,“三废”排放率及处理利用率,环境污染治理投资等
国民经济	地区 GDP 及增长率、GDP 构成及分项增长率、人均 GDP、GDP 密度,固定资产投资增长率,施工和投产项目数量,建设施工和竣工房屋建筑面积,商品房销售及待售数量等
人口	年末常住人口、城镇化率、性别比、出生率、死亡率、自然增长率、人口密度,老龄化人口占比,犯罪率、离婚率等
就业和工资	总体就业率、分三次产业就业人员构成、失业率,平均工资等
财政和物价	地方一般公共预算收入、支出、城乡人均消费差、居民消费价格指数、商品零售价格总指数、农村居民消费价格指数、工业生产者出厂价格指数等
生活和保障	人均收支、人均主要食品消费量、恩格尔系数、人均住房面积、社会保险参保率、最低生活标准、低保人员救济率等
公共服务	铁路密度、公路密度,客运总量、货运总量,公共交通线网密度,骨干道路网覆盖率,信息技术基础设施水平;商业服务设施数量、密度、服务半径;各类学校数量、密度、服务半径、在校学生数、教师数量,人均受教育年限;文化服务设施的数量、密度、服务半径,人均文化消费支出及占收入的比例;医疗设施数量、密度、服务半径,医师和护士数量等
科技研发	科技研发投入占 GDP 比例、科技人员拥有量、专利或发明申请及批准量等
城市发展	交通区位条件、建成区面积,人均绿地面积、人均道路面积、人均供水量、人均供电量、人均燃气消耗量、人均电讯设施量,汽车拥有量,城市市容环境卫生质量,基础设施建设投入费用占比,特色人文景观和历史风貌区面积及占比等
政策与管理	个体经济决策自由度、市场发育程度、吸引投资数量、金融控制力、科技转化能力、政府规划能力、政府服务能力、突发事件应变与管理能力等

1.4 生态地质环境系统承载力

生态地质环境承载力研究主要面向地质、自然资源、生态环境和国土空间(城乡)规划等部门和领域,与环境地质和生态地质调查、国土空间规划、生态修复和保护等专项工作联系密切。研究区主要涉及市域、流域、省域、县域、矿区和城镇等尺度,沿海地区、生态地质关键区(脆弱区、过渡带)的研究程度较高。研究在国内大致划分为理论探索阶段(20 世纪 90 年代)、理论与应用深化阶段(2000—2010 年)、综合评价阶段(2011 年至今)三个阶段,尤其在 2008 年及之后发展较快,与同期的汶川地

震、玉树地震和灾后重建对生态地质环境承载力评价高度重视有关。国务院部署资源环境承载能力评价作为 5·12 汶川地震灾后恢复重建规划的工作依据(樊杰等, 2017),推动了生态地质环境承载力研究进程。

现有的生态地质环境承载力评价指标体系对地质环境承载力指标(包括地形地貌、地质构造、地震活动、地质建造、水文地质和环境地质等)有较好地继承,同时吸收了生态环境评价指标体系中的大气环境、水环境、植物环境、土地环境、土壤环境和人居环境等主要指标,以及社会经济环境评价指标

体系中的国民经济、人口、基础设施等主要指标。研究方法模型主要包括“3S 技术”综合分析方法(倪忠云, 2011)、层次分析法(汪宙峰等, 2016)、综合指数法(王蕾等, 2018)、模糊综合评价法(何政伟等, 2011)和 TOPSIS 分析法(张琛等, 2020)等, 这些方法具有数据收集、处理和分析方便等优点, 但缺乏对数据(指标)间关系及耦合过程的充分刻画; 基于生态地质环境系统耦合机制, 且集成程度更高的 PSR 模型、灰色系统模型、系统动力学模型和多目标模型等应用和研究相对不足(赵东升等, 2019)。

总的来看, 国家社会需求、学科发展基础、数据可获得性和方法模型成熟度等影响了生态地质环境子系统和系统承载力研究程度与关注热点差异。得益于大量监测平台、多源数据、相对成熟的评价模型和方法, 生态环境承载力研究的数量最多; 受地质因素作用时间和强度效应、数据较难量化等影响, 地质环境承载力研究数量次之; 社会经济要素众多而空间栅格化数据产品较少, 导致数据表达和精度受到影响, 社会经济环境承载力研究数量相对较少; 生态地质环境承载力需要统合子系统和系统两个尺度关系, 涉及要素数据和方法模型更加复杂, 因此系统承载力研究正处于不断整合发展之中。

2 存在问题

2.1 依托学科理论众多, 学科交叉融合不足

生态地质环境承载力的内涵与外延决定了研究的学科交叉融合性, 已有研究在明晰承载力的构成要素、基本特征和影响因素的基础上, 对承载力机理涉及的承载体、承载对象、承载模式和承载限值等方面各有侧重(周景阳等, 2021)。对承载“容量”、“阈值”和“能力”等承载力类型以及人口、用地和产业等人类活动强度表征的承载力水平还缺乏较为有效的划定标准。研究涉及的理论包括可持续发展理论、地质灾害风险理论、盖娅假说、增长极限理论、耗散结构理论、生态环境灾变理论和生态系统健康理论等(张林波等, 2009), 但在理论创新与新理论发展方面相对滞后。自承载力概念被提出以来, 其研究范围逐渐由生态科学、资源科学、环境科学延伸至生态经济学、地球系统科学、物理学、数学和遥感技术等多门类学科, 承载力研究应用领域从最初单纯的生物种群增长规律研究, 逐渐覆盖到可持续发展目标下如何维持人类活动与环境之

间动态交互过程的综合研究(李剑等, 2021)。生态地质环境子系统承载力和系统承载力研究主要集中在环境科学与资源利用、宏观经济管理与可持续发展、资源科学、农业经济、水利学、管理学、城乡规划及人居环境和农业基础科学等, 与地质学、生态学、地理学和社会学融合不够, 地质学与生态学相关理论对生态地质环境承载力研究的引导作用不足, 社会科学相关理论在揭示社会经济环境承载力机制方面的应用更待提高, 交叉学科在生态地质环境承载力研究方面的提升空间巨大。

2.2 耦合关系统计较多, 耦合机制研究不足

生态地质环境耦合作用可以通过物质、能量和信息的运动表征(图2)(胡宝清等, 2001)。对大尺度耦合机制刻画主要基于空间关联, 采用承载力数理统计学的方法实现; 对小尺度承载力耦合机制量化研究, 主要通过物质的作用过程观测、检验和数理分析实现。地质环境与生态环境子系统承载力的耦合机制研究主要揭示环境要素中的水、大气、土壤和植被之间的作用关系(肖春蕾等, 2021; 兰恒星等, 2022)。小尺度研究主要通过元素的迁移、富集和污染等刻画(杜尧等, 2017), 大尺度研究主要通过数理统计实现(王滨等, 2013; 黄建军, 2015)。地质环境与社会经济环境子系统的耦合机制研究以地质空间格局和功能为切入点, 揭示人类生产建设活动与地质资源环境(灾害)之间的耦合关系(杨建锋, 2008; 宿星等, 2012; 曾卫等, 2018; 田丛珊等, 2019)。生态环境与社会经济环境子系统的耦合机制研究主要揭示社会经济活动与生态压力和生态服务功能等的作用机理, 多采用大尺度的数理统计的研究方法。生态环境承载力对人与自然耦合协调度产生重要影响, 造成不同人口规模、经济规模、社会发展水平区域协调度差异(刘晏冰等, 2021)。城市群尺度的生态与社会经济子系统耦合机制研究成果较多, 主要涉及京津冀、长三角和珠三角城市群(方创琳等, 2016; Wan et al., 2020; Liu et al., 2021)。

现有耦合机制研究主要以大尺度的生态和社会经济子系统之间耦合关系研究为主, 但对子系统之间的不同时空和功能的耦合机制研究较少。耦合研究模型主要包括耦合度模型、耦合协调度模型、剪刀差模型、灰色关联分析模型、地理探测器模型、地理加权回归模型、随机森林模型和神经网络模型等(吴连霞等, 2015; 官冬杰等, 2017; Chen et

al., 2019; Shi et al., 2020), 其中耦合协调度模型较为成熟(杨盼盼等, 2020; 苗俊霞等, 2021), 但是不同方法模型的集成和改进研究较少。

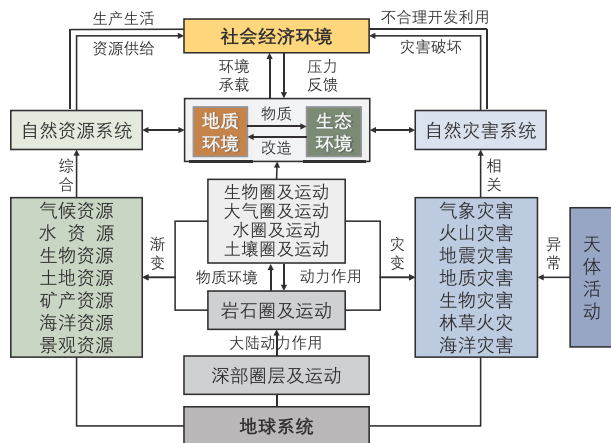


图2 生态地质环境系统耦合关系图(据胡宝清, 2001 修改)

Fig. 2 Coupling relationship of eco-geological environment system

2.3 模拟情景设置多样, 模拟预测模型集成不足

生态地质环境承载力模拟预测基于环境本底认知和情景预设, 结合监测和评价结果, 诊断和预判环境可持续发展状态, 为生态地质环境管理和调控提供依据。地质环境承载力模拟预测主要研究地震、地质灾害、地下水超采等关键地质要素发生变化所引发的环境效应; 生态环境承载力模拟预测主要研究气候、地表覆被及其他自然资源环境因素变化情景下的环境效应; 社会经济环境承载力模拟预测主要研究不同资源与能源供给情景下的人口、产业、城镇和经济活动规模等响应及其环境效应; 生态地质环境承载力模拟预测需合成三个子系统的模拟预测结果。已有承载力模拟预测的方法模型主要包括情景分析法、多目标决策方法、多目标规划模型、系统动力学模型、CLUE/CLUE-S 模型、元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 模型、智能体 (Agent-Based Model, ABM) 模型、人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 模型和贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN) 模型等。

系统动力学模型用于模拟和预测不同条件下系统关键变量状态, 但模型结构固定性导致难以刻画不确定性因素的影响, 模拟对象偏向宏观系统, 对小尺度区域或栅格系统处理效果欠佳(翟羽佳等, 2015)。CLUE/CLUE-S 模型基于经验统计的局部均衡分析, 用于模拟多尺度土地利用空间分配, 但对社会经济因子的空间化影响刻画不足(蔡玉

梅, 2004; 唐华俊等, 2009; Anputhas et al., 2016)。CA 模型由空间、元胞、邻域和转化规则四个要素组成, 通过局部简单的规则改变元胞状态产生宏观的土地利用变化结果, 但模型受到空间异质性问题影响较大(赵莉等, 2016; 岳东霞等, 2019)。ABM 模型通过加入多个 Agent, 将行为和决策等因素纳入到土地利用变化的驱动机制之中, 可反映复杂自适应系统的演化过程, 但受到空间均质假设的限制(Ralha et al., 2013; Zhou et al., 2020)。ANN 模型(王俭等, 2007)和 BN 模型(黎斌等, 2018)等人工智能技术发展可在一定程度上解决模拟过程的自组织、自适应、自学习等问题, 但是面临因果推理和处理不确定性问题的影响。

承载力模拟预测的情景设置多样性导致指标体系构建难度增大、普适性降低; 空间化和非空间化信息转换与集成困难, 导致承载力模拟预测的空间表达不足; 模拟预测方法集成难度大, 导致多情景综合模拟难度较大; 承载力模拟预测容易局限于要素或者子系统, 导致忽略综合系统的结构与功能特征, 同时对模拟预测承载力的多维效应重视不够。

2.4 基础调查工作较多, 服务国家重大需求不够

生态地质环境承载力研究多与环境地质和生态地质等调查与评价工作结合, 成果具有较强的基础性和公益性。中国从 1994 年起开展 1:5 万生态地质调查工作(王长生等, 1997), 之后在国土资源大调查中, 将基础地质、矿山地质、农业地质、城市地质和水工环地质等纳入生态地质环境综合调查, 从地质调查角度明确了生态地质环境的内涵和功能。山东、新疆、广西、云南、贵州、四川和西藏等省区及主要流域都开展了面向生态地质环境系统和要素的调查、评价和预测(王顺祥, 2001; 王世杰, 2003; 王立勇等, 2005; 周爱国等, 2007)。大型工程和大型(超大型)矿产资源富集区及资源耗竭性城市也陆续开展了生态地质环境和承载力评价工作(董和金, 2000; 方鸿琪等, 2002; 孙书勤等, 2010)。自 2008 年汶川地震以来, 涵盖生态地质环境的资源环境承载力调查、评价与研究在国土空间规划与管控方面更加受到重视(樊杰等, 2008)。自 2009 年以来, 环渤海、长三角、珠三角、海峡西岸、北部湾和长吉图等六个重要经济区和长江中游、中原、关中和成渝等中西部四个重要城市群完成了生态地质环境调查, 开展了资源环境承载力评价。从 2019 年开始, 中国地质调查局在西南和西北等地启动了面向国土空间开发规划与保护等多目标的生

态地质调查和承载力评价工作。

虽然生态地质环境子系统及系统承载力调查与研究层面的成果在不同尺度响应了国家需求(刘洪等, 2021; 聂洪峰等, 2021; 欧阳渊等, 2021; 肖春蕾等, 2021; 张腾蛟等, 2021), 但是仍然难以满足国民经济和社会发展日益增长的需求, 尤其是对全球、国家、重要流域、关键地区、热点地区的地质灾害防治、生态环境保护与修复、国土空间规划等战略需求的支撑力度不够。已有的生态地质环境系统承载力及动态承载力研究结果较少, 不能针对生态地质环境保护形成完整的对策, 容易导致研究与应用的脱节, 制约承载力研究的应用效果(Xue et al., 2017)。

3 发展趋势

3.1 夯实基础理论研究, 拓展学科纵深关联

在应对全球气候变化, 追求“碳达峰”与“碳中和”等生态地质环境可持续发展的大背景下, 从学科交叉融合、承载力概念发展、指标体系集成、承载机制识别等方面加强理论研究。承载力具有空间异质性、尺度性和相对极限性、相对性和不确定性、开放性和多样性、动态性等多种特征, 需要加强地质学、地理学、生态学、资源学、环境学、经济学、管理学和社会学在生态地质环境承载力研究中的学科交叉融合功能(图3)。

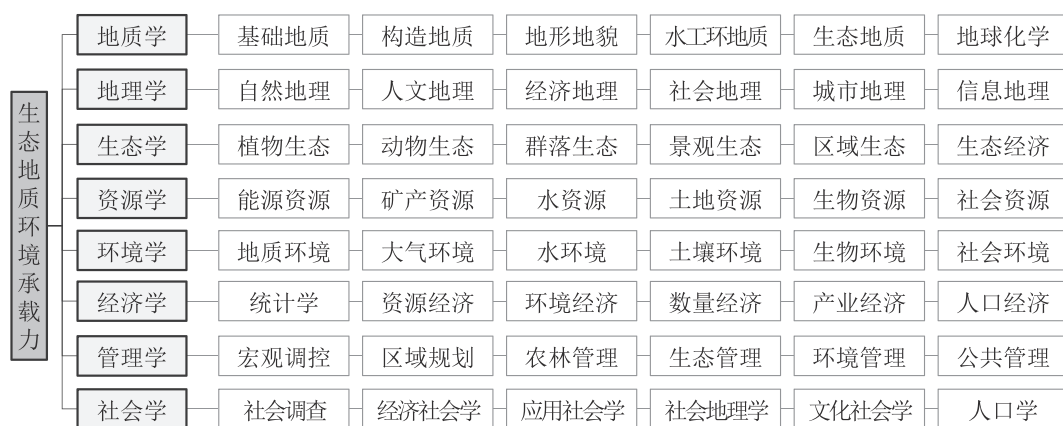


图3 生态地质环境承载力研究的学科融合体系

Fig. 3 Disciplinary integration system of ecological geological environment carrying capacity research

进行理论集成与创新, 强化人类命运共同体理论(曹小曙, 2019)、人地耦合系统理论、地球系统理论(毕思文, 2003)、地质多样性理论、人类世理论(陈发虎等, 2021)、生态系统复杂理论(张林波等, 2009)、系统工程等理论(王秦等, 2020)和国土空间价值均衡理论(曹小曙, 2019)等的引导作用。融合资源环境承载力研究成果, 从承载主体、客体、关系和阈值等方面进一步发展生态地质环境承载力概念。面向指标体系的科学性、综合性、区域性、系统性和动态性本质, 从子系统和系统两个层次集成和更新, 形成具有普适性与推广性的指标体系(张兴等, 2017)。构建多尺度、多层次的生态地质环境承载力数学表达与特征测度模型, 集成评价、模拟、预测方法体系(李新等, 2021)。研究不同资源与环境要素间的综合效应、承载力变化过程与驱动机制, 研究不同目标、不同区域、不同关键要素条件下资源环境承载力的安全“阈值”(徐勇等, 2017)。加

强承载力支撑系统、动力源、动力形式、动力机制、承载力系统内在规律和反馈机制、承载力空间区划等理论研究(李东序等, 2008), 加强生态地质环境承载力的自我协调和恢复过程研究(薛倩等, 2017)。

3.2 深化多维耦合机制, 融合耦合方法模型

生态地质环境承载力的耦合机制研究是承载力研究的重点与难点, 认识地质多样性、生态多样性和社会经济多样性导致的承载力复杂性本质, 加强多维耦合机制研究(图4): 其一, 在耦合时间维度, 区分要素、子系统、系统等不同层次在时间维度的同步性、异步性、周期性、动态性和趋势性, 兼顾承载力历史及人类活动作为地质营力作用的影响(刘学等, 2014); 其二, 在耦合空间维度, 识别耦合作用在空间维度的尺度性(全球、国家、区域、地方和社区等)、重合性、邻接性、错位性, 区分“三生”空间的冲突与协同博弈, 辨明原位/局地、近程和远程

等耦合差异;其三,在耦合属性维度,建立耦合作用或过程的关联准则,刻画耦合层次、类型、强度、频率和效应等关键信息。耦合机制的量化研究、监测和检验可以参考地球关键带研究范式(杨建锋等, 2014; 朱永官等, 2015),重点揭示地质过程、水文过程、农牧过程、生态过程与区域社会发展过程等交互耦合作用,为承载力模拟预测提供机理支持。

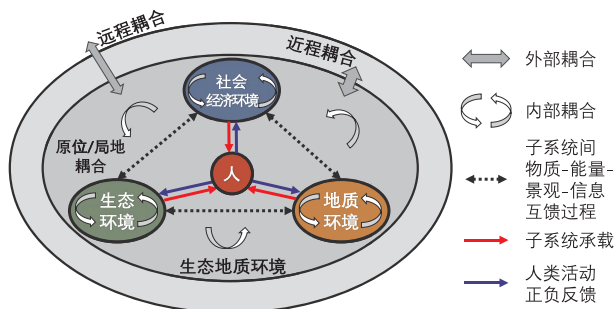


图4 生态地质环境承载力系统耦合机制示意图

Fig.4 Schematic diagram of coupling action of eco-geological environment carrying capacity system

发展耦合协调度模型、相对发展度模型等统计模型,从时空维度定量研究人类活动强度与资源环境承载力的耦合协调发展关系及交互耦合程度(刘文斌等, 2020)。研究耦合协调度模型、剪刀差模型、灰色关联分析模型、地理集中度指数模型、地理探测器模型、地理加权回归模型、地理和时间加权回归模型、随机森林模型、神经网络模型等空间和非空间耦合模型之间的融合途径。

3.3 明晰模拟预测关键,重点发展集成模型

按照承载力模拟预测框架(图5),在七个方面进行提升。在数据集成方面,构建生态地质环境承载力时序数据,加强空间数据和非空间数据融合,建立数据信息挖掘准则,寻找多源异构数据集成途径(陈发虎等, 2021)。在耦合规则构建方面,参考压力-状态-响应(PSR)等经典模型,识别承载力系统的耦合机制,基于物质、能量、景观和信息等交互作用过程,构建耦合关系的数学关联模型。在情景设置方面,研究气候、地表覆被、资源、自然灾害、经济、大气环境、水环境及固体废弃物环境容量等关键要素的独立情景、组合情景或综合情景的设置及影响(牛方曲等, 2019; 刘焱序等, 2021)。在情景模拟方面,充分发挥系统动力学(SD)模型适合于模拟真实世界非线性变化过程,可用于模拟和预测不同条件下系统关键变量状态的优势,研发以“系统

动力学(SD)+”模型为代表的综合集成动态模拟技术(顾朝林等, 2016; 崔学刚等, 2019),集成SD+GIS提升模拟的空间表达(Wan et al., 2017),集成SD+CLUE-S模拟社会经济发展情景下的环境变化(He et al., 2019),集成SD+CA提升对承载力变化的成因解析(Liu et al., 2017),集成SD+ABM解决模拟中的要素空间异质性与适应性(Nava Guerrero et al., 2016)。情景模拟结果主要与资源环境承载力底线与社会经济发展需求上限进行比对(刘焱序, 2021)。在模拟精度校验方面,研究系统内部要素自检-互检、历史数据检验和经验数据检验等校验方法。在情景预测方面,针对预测结果,加强预测承载情景的效应分析,加强干扰情景的影响分析,例如生态地质环境事件(地震、特大地质灾害、气象灾害、生态灾害、公共卫生事件和重大经济发展事件等)发生的概率、位置、强度和风险。在决策调控方面,从技术、人类活动和外部因素等维度研究生态地质环境承载力调控策略,优化承载力空间格局(Kang et al., 2010; 傅伯杰等, 2015)。

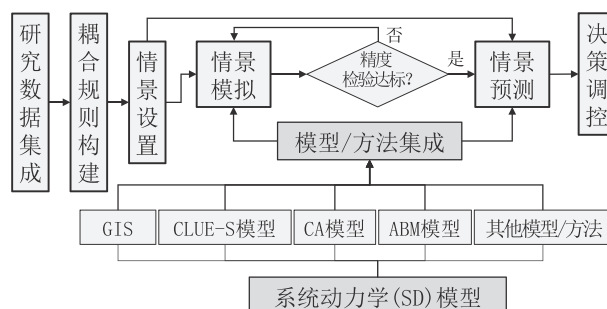


图5 生态地质环境承载力模拟预测框架

Fig.5 Simulation and prediction framework of eco-geological environment carrying capacity

3.4 面向国家社会需求,推动科研应用对接

进一步提升地质环境在生态地质环境承载力研究中的基础作用,结合国家在地质工作方面的主要目标,提升对地球系统的认知水平;将水资源与水循环调查评价成果应用到生态环境子系统承载力评价中,服务水资源科学管理;提升生态地质调查成果向承载力评价成果转换能力,支撑国家生态安全保障;结合自然资源综合调查监测成果,形成资源环境综合承载力评价成果,服务自然资源的保护和合理利用;结合地质灾害风险调查与监测预警情景在承载力模拟预测中的特殊作用,提升地质灾害防治能力。

依托国内外数据平台,通过集成方法和模型,在青藏高原、黄土高原、西南山地、东部酸壤地区、高寒冷凉地区、城市群与大都市区、河口海岸带和重点流域等典型生态地质环境区(陈发虎等, 2021)开展研究工作,推进承载力评价工作的标准化、系统化与数字化转变,对接承载力实用化与业务化等需求(徐勇等, 2017)。在科研机构和自然资源、地质、生态环境、气象、地理测绘、统计、城乡规划等政府部门的共同推进下,借助地理大数据、人工智能、泛在地理信息服务和物联网等技术(李新等, 2021),提高数据和知识的集成水平,逐步建成适合科学研究及应用、管理和服务的生态地质环境及承载力数据共享平台。

全面对接国民经济和社会发展。关注泛第三极生态地质环境及承载力变化及应对机制,加强环中国南海的生态地质环境及承载力评价与动态变化监测,优先从社会经济环境承载力角度出发,提升“一带一路”生态地质环境承载力研究水平,服务国家发展环境安全需求(曹小曙, 2019)。从生态地质环境系统耦合机制出发,跟踪和调控碳的源-流-汇过程,服务“双碳”目标(方精云, 2021)。根据生态地质环境承载力格局指导国土资源与环境调查工作布局,深化生态地质环境承载力动态评价及承载阈限的适用性研究,应用时序生态地质环境承载力数据服务国家重大区划与规划、国情分析与区域可持续发展、新型城镇化与城市群建设、乡村振兴、“美丽中国”建设、生态环境保护(脆弱带生态修复、“两屏三带”、“三线一单”)(曲修齐等, 2019)和防灾减灾等重大需求(葛全胜等, 2020)。

4 结论

通过对国内外研究文献整理与分析的研究方法,本文梳理国内生态地质环境发展的总体进展、存在问题和发展趋势,得到三个方面的主要认识:(1)受国家社会需求、学科发展基础、数据可获取性和方法模型成熟程度影响,生态地质环境子系统承载力发展程度高于系统承载力,三个子系统承载力研究中生态环境最多、地质环境次之、社会经济环境较少,系统承载力不断整合提升,由此形成2000年以前(准备)、2000—2010年(探索前进)、2011年至今(稳定发展)三个阶段。(2)已有研究在理论探索和实践应用方面取得了重要的进展,同时在学科交叉融合、耦合机制、模拟预测模型集成、国家重大

需求服务等方面存在较大的提升空间。(3)结合已有研究进展及存在的问题,建议未来的生态地质环境承载力研究从拓展学科纵深关联、深化多维耦合机制、重点发展集成模拟预测模型、积极对接国家与社会需求四个方面进行提升。同时,生态地质环境及其承载力研究应坚持系统观,统合子系统和系统两个尺度,推进研究的纵深发展。

参考文献(References):

- Anputhas M, Janmaat J A, Nichol C F, et al., 2016. Modelling spatial association in pattern based land use simulation models[J]. *Journal of Environmental Management*, 181:465–476.
- Arrow K, Bolin B, Costanza R, et al., 1996. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. *Science*, 268:520–521.
- Chen Y, Zhao L, 2019. Exploring the relation between the industrial structure and the eco-environment based on an integrated approach: A case study of Beijing, China[J]. *Ecological Indicators*, 103(2): 83–93.
- Cooper G S, Dearing J A, 2019. Modelling future safe and just operating spaces in regional social-ecological systems[J]. *Science of the Total Environment*, 651(2):2105–2117.
- Daily G C, Ehrlich P R, 1992. Population, sustainability, and earth's carrying capacity[J]. *BioScience*, 42(10):761–771.
- He X, Mai X, Shen G, 2019. Delineation of urban growth boundaries with SD and CLUE-s Models under Multi-Scenarios in Chengdu Metropolitan Area[J]. *Sustainability*, 11(21):5919.
- Kang P, Xu L, 2010. The urban ecological regulation based on ecological carrying capacity[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2:1692–1700.
- Li W, Liu S, Pei Y, et al., 2018. Zoning for eco-geological environment before mining in Yushenfu mining area, northern Shaanxi, China [J]. *Environmental monitoring and assessment*, 190:61910.
- Liu D, Zheng X, Zhang C, et al., 2017. A new temporal-spatial dynamics method of simulating land-use change [J]. *Ecological Modelling*, 350:1–10.
- Liu K, Qiao Y, Shi T, et al., 2021. Study on coupling coordination and spatiotemporal heterogeneity between economic development and ecological environment of cities along the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7):1–15.
- Nava Guerrero G D C, Schwarz P, Slinger J H, 2016. A recent overview of the integration of system dynamics and agent-based modelling and simulation: Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society, Delft, Netherlands [C].
- Park R, Burgess E, 1921. Introduction to the science of sociology[M]. Chicago: University of Chicago Press.
- Piccinno F, Hirschier R, Seeger S, et al., 2017. Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: application of the life cycle assessment scale-up

- framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 174:283–295.
- Qin S, Zhong G, Wang J, 2010. The Influence of climate patterns on grassland NPP and the study on livestock carrying capacity in Naqu [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 24:159–164.
- Ralha C G, Abreu C G, Coelho C G C, et al., 2013. A multi-agent model system for land-use change simulation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 42:30–46.
- Shi T, Yang S, Zhang W, et al., 2020. Coupling coordination degree measurement and spatiotemporal heterogeneity between economic development and ecological environment -Empirical evidence from tropical and subtropical regions of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 244:118739.
- Świąder M, Lin D, Szebrański S, et al., 2020. The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment: A new approach for European cities [J]. *Environmental Science & Policy*, 105:56–74.
- Trofimov V T, 2013. Current state, tasks, and problems of the further development of ecological geology [J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 68(3):155–164.
- Trofimov V T, 2001. Ecology a novel branch of geological sciences [J]. *Earth Science Frontiers*, 1(8):27–35.
- Wan J, Zhang L, Yan J, et al., 2020. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of coupled coordination between Urbanization and eco-environment: A case study of 13 Urban Agglomerations in China [J]. *Sustainability*, 12:882121.
- Wan L, Zhang Y, Qi S, et al., 2017. A study of regional sustainable development based on GIS/RS and SD model - Case of Hadaqi industrial corridor [J]. *Journal of Cleaner Production*, 142(S12):654–662.
- Xue Q, Song W, Zhang Y, et al., 2017. Research Progress in Ecological Carrying Capacity: Implications, Assessment Methods and Current Focus [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 8(5):514–525.
- Yang Z, Li W, Li X, et al., 2019. Assessment of eco-geo-environment quality using multivariate data: A case study in a coal mining area of Western China [J]. *Ecological Indicators*, 107:105651.
- Zhou X, Zheng B, Khu S. Simulation platform of human-environment systems for water environment carrying capacity research [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250:119577.
- 毕思文, 2003. 地球系统科学导论 [M]. 北京: 科学出版社.
- 补建伟, 孙自永, 周爱国, 等, 2016. 我国矿山地质环境承载力研究现状 [J]. *中国矿业*, 25(1):61–68.
- 蔡玉梅, 刘彦随, 宇振荣, 等, 2004. 土地利用变化空间模拟的进展——CLUE-S 模型及其应用 [J]. *地理科学进展*, 23(4):63–71.
- 曹小曙, 2019. 基于人地耦合系统的国土空间重塑 [J]. *自然资源学报*, 34(10):2051–2059.
- 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等, 2015. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用 [J]. *自然资源学报*, 30(1):1–11.
- 曾卫, 杨春, 周瀚韬, 2018. 地质生态环境与城市化关联性研究——以重庆市为例 [J]. *山地学报*, 36(5):679–692.
- 陈成忠, 林振山, 2007. 中国人均生态足迹与生物承载力变化的 EMD 分析及情景预测 [J]. *生态学报*, 27(12):5291–5299.
- 陈发虎, 吴绍洪, 刘鸿雁, 等, 2021. 自然地理学学科体系与发展战略要点 [J]. *地理学报*, 76(9):2074–2082.
- 陈梦熊, 1995. 环境地质科学的基本理论与发展前景 [J]. *工程地质学报*, 13(3):31–34.
- 崔学刚, 方创琳, 刘海猛, 等, 2019. 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展 [J]. *地理学报*, 74(6):1079–1096.
- 狄乾斌, 韩帅帅, 韩增林, 2016. 中国地级以上城市经济承载力的空间格局 [J]. *地理研究*, 35(2):337–352.
- 狄乾斌, 韩帅帅, 2015. 城市经济承载力的综合评价及其时空差异研究——以我国 15 个副省级城市为例 [J]. *经济地理*, 35(9):57–64.
- 丁月清, 杨建华, 洪增林, 等, 2019. 面向“三区三线”划定的城市群资源环境承载力评价方法研究——以关中平原城市群评价为例 [J]. *西北地质*, 52(3):223–230.
- 董和金, 2000. 关于城市生态地质环境研究 [J]. *中国地质*, 27(5):33–35.
- 董俊丽, 任栋, 2012. 基于经济文化强省建设目标的山东经济社会承载力研究 [J]. *东岳论丛*, 33(5):158–161.
- 杜蕾, 谢婉丽, 2018. 城市地质环境承载力研究进展及展望 [J]. *防灾科技学院学报*, 20(2):15–20.
- 杜尧, 马腾, 邓娅敏, 等, 2017. 潜流带水文—生物地球化学: 原理、方法及其生态意义 [J]. *地球科学*, 42(5):661–673.
- 樊杰, 陶岸君, 陈田, 等, 2008. 资源环境承载能力评价在汶川地震灾后恢复重建规划中的基础性作用 [J]. *中国科学院院刊*, 23(5):387–392.
- 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.
- 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等, 2016. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径 [J]. *地理学报*, 71(4):531–550.
- 方鸿琪, 杨阔中, 2002. 城市工程地质环境与防灾规划 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 13(1):3–6.
- 方精云, 2021. 碳中和的生态学透视 [J]. *植物生态学报*, 45(11):1–4.
- 傅伯杰, 冷疏影, 宋长青, 2015. 新时期地理学的特征与任务 [J]. *地理科学*, 35(8):939–945.
- 高传昌, 谢虹, 2009. 基于多目标动态规划的郑州水资源承载力研究 [J]. *人民黄河*, 31(4):55–56.
- 葛全胜, 刘卫东, 孙鸿烈, 等, 2020. 地理科学与资源科学的国家智库建设 [J]. *地理学报*, 75(12):2655–2668.
- 巩固, 2019. “生态环境”宪法概念解析 [J]. *吉首大学学报(社会科学版)*, 40(5):70–80.
- 顾朝林, 张悦, 翟炜, 等, 2016. 城市与区域定量研究进展 [J]. *地理科学进展*, 35(12):1433–1446.
- 官冬杰, 谭静, 张梦婕, 等, 2017. 重庆市人口与经济发展空间耦合分布研究 [J]. *人文地理*, 32(2):122–128.
- 郭巨海, 陆彦, 侯庆志, 等, 2015. 滩涂资源承载力指标及评价方法研究 [J]. *人民黄河*, 37(6):63–66.
- 郭倩, 汪嘉杨, 张碧, 2017. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综

- 合评价[J]. 自然资源学报, 32(3): 484-493.
- 哈承祐, 2006. 环境地质研究进展与展望[J]. 地质通报, 22(11): 1247-1256.
- 韩帅帅, 狄乾斌, 2017. 产业结构变动对城市经济承载力增长的贡献——以辽宁省14个城市为例[J]. 地域研究与开发, 36(4): 37-42+48.
- 何政伟, 刘峻杉, 赵银兵, 等, 2011. 西部矿产资源开发的地质生态环境承载力理论与方法探讨[J]. 地球与环境, 39(2): 237-241.
- 胡宝清, 刘顺生, 张洪恩, 等, 2001. 长江流域地质—生态环境的演化机制及综合自然灾害区划[J]. 自然灾害学报, 10(3): 13-19.
- 黄建军, 2015. 生态环境与地质构造的耦合关系研究[J]. 地球环境学报, 6(4): 231-237.
- 黄润秋, 2001. 生态环境地质的基本特点与技术支撑[J]. 中国地质, 28(11): 20-24.
- 黄贤金, 宋娅娅, 2019. 基于共轭角力机制的区域资源环境综合承载力评价模型[J]. 自然资源学报, 34(10): 2103-2112.
- 蒋伟, 1989. 生态系统的人口承载力理论初探[J]. 生态学杂志, 8(1): 31-35.
- 孔伟, 魏红磊, 任亮, 等, 2017. 城市社会承载力评价及提升策略研究——以张家口市为例[J]. 河北北方学院学报(社会科学版), 33(1): 53-56.
- 兰恒星, 彭建兵, 祝艳波, 等, 2022. 黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 52(2): 199-221.
- 黎斌, 何建华, 屈赛, 等, 2018. 基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法[J]. 生态学报, 38(3): 800-811.
- 李东序, 赵富强, 2008. 城市综合承载力结构模型与耦合机制研究[J]. 城市发展研究, 15(6): 37-42.
- 李剑, 金小燕, 王伦澈, 等, 2021. 我国资源环境承载力研究的进展与展望[J]. 矿产与地质, 35(2): 322-329.
- 李新, 袁林旺, 裴韬, 等, 2021. 信息地理学学科体系与发展战略要点[J]. 地理学报, 76(9): 2094-2103.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等, 2021. 新构造活动的生态地质环境效应讨论——以扬子西缘宜昌市为例[J]. 中国地质调查, 8(6): 63-77.
- 刘佳骏, 董锁成, 李泽红, 2011. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 26(2): 258-269.
- 刘文斌, 徐伟铭, 王杏锋, 等, 2020. 区域国土开发强度与资源环境承载力时空耦合关系[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 41(4): 525-533.
- 刘学, 张志强, 郑军卫, 等, 2014. 关于人类世问题研究的讨论[J]. 地球科学进展, 29(5): 640-649.
- 刘晏冰, 韩宝龙, 刘晶茹, 等, 2021. 我国城市人与自然耦合系统的协调度[J]. 生态学报, 41(14): 5578-5585.
- 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 等, 2021. 旱区人地耦合系统水-粮食-生态关联研究述评[J]. 地理研究, 40(2): 541-555.
- 卢小丽, 武春友, 于海峰, 2005. 旅游社会承载力的量测及管理研究[J]. 南开管理评论, 8(1): 75-77.
- 毛汉英, 余丹林, 2001. 环渤海地区区域承载力研究[J]. 地理学报, 56(3): 363-371.
- 苗俊霞, 郑续, 孙萍萍, 等, 2021. 黄土高原县域资源环境承载力及耦合协调性评价——以陕西省延川县为例[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 57(2): 94-100.
- 倪忠云, 2011. 西藏曲水—桑日地区生态地质环境承载力研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 等, 2021. 生态地质研究进展与展望[J]. 中国地质调查, 8(6): 1-8.
- 宁佳, 刘纪远, 邵全琴, 等, 2014. 中国西部地区环境承载力多情景模拟分析[J]. 中国人口·资源与环境, 24(11): 136-146.
- 牛方曲, 孙东琪, 2019. 资源环境承载力与中国经济发展可持续性模拟[J]. 地理学报, 74(12): 2604-2613.
- 欧阳渊, 张景华, 刘洪, 等, 2021. 基于地质建造的西南山区成土母质分类方案——以大凉山地区为例[J]. 中国地质调查, 8(6): 50-62.
- 曲修齐, 刘森, 李春林, 等, 2019. 生态承载力评估方法研究进展[J]. 气象与环境学报, 35(4): 113-119.
- 史培军, 1997. 人地系统动力学研究的现状与展望[J]. 地学前缘, 4(1-2): 205-215.
- 宋强, 张磊, 陈晓, 1996. 珠江三角洲经济区城市生态环境承载力研究[J]. 生态科学, 15(2): 104-106.
- 孙书勤, 黄润秋, 2010. 遂宁城市地质灾害危险性评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(2): 174-180.
- 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等, 2009. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报, 64(4): 456-468.
- 田丛珊, 方一平, 2019. 地质灾害胁迫下的社会经济恢复力评估及其提升策略——以都江堰市为例[J]. 自然灾害学报, 28(6): 127-136.
- 田海兰, 程林, 刘西汉, 等, 2020. 基于供需平衡法的河北省海域承载力测算[J]. 海洋湖沼通报, 42(3): 95-104.
- 童玉芬, 2010. 北京市水资源人口承载力的动态模拟与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 20(9): 42-47.
- 汪宙峰, 张廷山, 王蕾, 等, 2016. 都汶公路沿线生态地质环境承载力综合评价[J]. 测绘科学, 41(7): 77-81.
- 王滨, 张发旺, 陈立, 等, 2013. 黑龙江地区水土资源经济系统耦合协调评价研究[J]. 水土保持通报, 33(2): 276-280.
- 王俭, 李雪亮, 李法云, 等, 2009. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测[J]. 应用生态学报, 20(9): 2233-2240.
- 王俭, 孙铁珩, 李培军, 等, 2007. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 26(1): 139-144.
- 王娟娟, 惠盛隆, 2015. 藏区牧民定居点文化承载力与文化适应力协同度测算[J]. 统计与决策, (12): 98-101.
- 王奎峰, 李娜, 于学峰, 等, 2014. 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, 34(8): 2133-2139.
- 王蕾, 鲁小丫, 胡云华, 等, 2018. 都汶公路沿线地质生态环境承载力评价[J]. 测绘科学, 43(2): 51-57.
- 王立勇, 杨文, 孙永泉, 等, 2005. 试论三江平原生态地质环境保护的对策[J]. 环境科学与管理, 30(1): 45-49.
- 王孟本, 2003. “生态环境”概念的起源与内涵[J]. 生态学报, (9): 1910-1914.
- 王念秦, 李仁伟, 蒲凯超, 等, 2019. 中国地质环境承载力评价研究进

- 展[J]. 环境科学与技术, 42(1): 150–155.
- 王秦, 李伟, 2020. 区域资源环境承载力评价研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 29(7): 1487–1498.
- 王秦, 张艳, 杨永芳, 2020. 雄安新区资源环境承载力评价指标体系研究[J]. 环境科学与技术, 43(5): 203–212.
- 王世杰, 2003. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(2): 120–126.
- 王顺祥, 2001. 贵州新一轮国土资源大调查的思考[J]. 中国岩溶, 20(2): 39–42.
- 王思敬, 1997. 论人类工程活动与地质环境的相互作用及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 8(1): 20–27.
- 王长生, 王大可, 1997. 试论 1:5 万生态地质调查[J]. 中国区域地质, 16(1): 56–59.
- 魏晓旭, 颜长珍, 2019. 生态承载力评价方法研究进展[J]. 地球环境学报, 10(5): 441–452.
- 吴连霞, 赵媛, 马定国, 等, 2015. 江西省人口与经济发展时空耦合研究[J]. 地理科学, 35(6): 742–748.
- 肖炳成, 1990. 试论城市地质环境承载力[J]. 中国地质, 17(1): 19–21.
- 肖春蕾, 聂洪峰, 刘建宇, 等, 2021. 生态-地质作用模式: 诠释表生地质过程与生态特征的耦合[J]. 中国地质调查, 8(6): 9–24.
- 宿星, 王得楷, 张连科, 等, 2012. 甘肃省地质灾害与社会经济脱钩关系初探[J]. 中国水土保持, (1): 24–26.
- 徐堇, 彭璧玉, 2019. 种群密度与环境承载力对组织种群灭绝的影响[J]. 科研管理, 40(3): 143–152.
- 徐勇, 张雪飞, 周侃, 等, 2017. 资源环境承载能力预警的超载成因分析方法及应用[J]. 地理科学进展, 36(3): 277–285.
- 薛倩, 宋伟, 张镔锂, 等, 2017. 生态承载力研究进展: 内涵、评估方法与热点领域(英文)[J]. Journal of Resources and Ecology, 8(5): 514–525.
- 杨建锋, 张翠光, 2014. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. 水文地质工程地质, 41(3): 98–104.
- 杨建锋, 2008. 我国地质环境与社会经济的物质流分析[J]. 自然资源学报, 23(4): 553–559.
- 杨盼盼, 王念秦, 郭有金, 等, 2020. 城镇化与地质环境耦合协调时空演化分析——以临潼区为例[J]. 科学技术与工程, 20(9): 3790–3797.
- 袁道先, 2004. 评《地质生态环境与可持续发展——中国西南及邻近岩溶地区发展途径》[J]. 水资源保护, (2): 63.
- 岳东霞, 杨超, 江宝骅, 等, 2019. 基于 CA – Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. 生态学报, 39(6): 1993–2003.
- 翟羽佳, 王丽婧, 郑丙辉, 等, 2015. 基于系统仿真模拟的三峡库区生态承载力分区动态评价[J]. 环境科学研究, 28(4): 559–567.
- 张琛, 汪宙峰, 汪裕峻, 等, 2020. 基于 TOPSIS 和热点分析的都汶公路沿线地质生态环境承载力评价[J]. 冰川冻土, 42(2): 704–715.
- 张芳怡, 濮励杰, 张健, 2006. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例[J]. 自然资源学报, (4): 653–660.
- 张林波, 李文华, 刘孝富, 等, 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评价[J]. 地质通报, 37(Z1): 467–475.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等, 2021. 不同地质建造类型的生态环境功能特征——以西昌地区为例[J]. 中国地质调查, 8(6): 35–49.
- 张兴, 桂梅, 2017. 资源环境承载力评价指标体系研究[J]. 中国土地, (8): 18–20.
- 张引, 杨庆媛, 闵婕, 2016. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析[J]. 地理学报, 71(5): 817–828.
- 张志强, 徐中民, 程国栋, 等, 2001. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹[J]. 地理学报, 56(5): 598–609.
- 赵东升, 郭彩赞, 郑度, 等, 2019. 生态承载力研究进展[J]. 生态学报, 39(2): 399–410.
- 赵莉, 杨俊, 李闯, 等, 2016. 地理元胞自动机模型研究进展[J]. 地理科学, 36(8): 1190–1196.
- 赵银兵, 何政伟, 倪忠云, 等, 2010. 矿产资源开发的生态地质环境风险研究——以甘孜州东部为例[J]. 地球与环境, 38(2): 207–213.
- 郑晶, 于浩, 黄森慰, 2017. 基于 DPSIR – TOPSIS 模型的福建省生态环境承载力评价及障碍因素研究[J]. 环境科学学报, 37(11): 4391–4398.
- 周爱国, 孙自永, 马瑞, 2007. 干旱区地质生态学导论[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 周景阳, 常莎莎, 李振功, 2021. 国内外城市承载力研究进展[J]. 国土资源情报, (6): 31–38.
- 朱嘉伟, 谢晓彤, 李心慧, 2017. 生态环境承载力评价研究——以河南省为例[J]. 生态学报, 37(21): 7039–7047.
- 朱晓丽, 李文龙, 薛中正, 等, 2011. 基于 3S 技术的甘南州生态健康与生态承载力耦合[J]. 草业科学, 28(6): 939–945.
- 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等, 2015. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 70(12): 1859–1869.