

DOI: 10.5846/stxb202112173582

贺桂珍, 陈春赐, 赵翔. 中、美喀斯特景观管理对比研究. 生态学报, 2023, 43(3): 910-924.

He G Z, Chen C C, Zhao X. Karst landscape management in China and America through the comparative lens. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 910-924.

中、美喀斯特景观管理对比研究

贺桂珍^{1, 2, *}, 陈春赐^{1, 2}, 赵翔^{1, 2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:喀斯特景观具有重要的经济、战略、美学、生态和科考价值, 如何有效保护和管理复杂而脆弱的喀斯特景观生态系统逐渐成为国内外管理者和学者关注的议题。但国内在喀斯特景观管理的方法和体制等方面鲜有研究, 特别是面临日益增加的人类活动压力情况下, 开展中外喀斯特管理对比研究将为中国喀斯特可持续管理提供借鉴。采用历史分析、社会网络分析、比较研究等方法, 探究中国与美国喀斯特景观保护和管理的历史进程、管理机构参与和管理方法。结果表明中美政府对喀斯特和洞穴管理投入存在差异, 但目前区域协调管理方面还都欠缺。管理过程都经历了从初步探索到不断成熟的阶段, 关注的重点和议题在不断演进, 从最初的喀斯特水文地质问题拓展到生态系统综合管理, 从单一的环境问题到社会、经济、生态问题。所采用的方法和模型在不断发展, 从利用传统的环境调查和监测方法发展到 GIS、激光雷达、分子生物学、环境 DNA 等最新技术。管理方式从自上而下行政命令方式到政府、社会团体、公众合作管理模式。目前, 鉴于喀斯特生态系统的复杂性和部门利益冲突, 直接出台喀斯特管理的法规还存在很大障碍。最后, 构建了一个可持续导向的喀斯特景观管理框架。本研究将管理者、研究者和公众 3 个维度进行连接, 为推动喀斯特景观可持续性治理提供决策支撑, 具有实用性和普遍意义。

关键词:喀斯特景观; 比较研究; 社会网络分析; 可持续性; 管理手段

Karst landscape management in China and America through the comparative lens

HE Guizhen^{1, 2, *}, CHEN Chunci^{1, 2}, ZHAO Xiang^{1, 2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China

Abstract: Chemical dissolution and physical processes shape karst landscapes with myriad surface and subsurface features, including caves, springs, and sinkholes that make them important geologically. The increased exploration and utilization of karst landscapes in the past century heightened awareness of their importance as natural resources for economic, strategic, aesthetic, ecological and scientific values. However, protection of the complex and fragile karst landscapes in the developing world faces significant physical obstacles and management challenges under increasing anthropogenic pressures at many levels. In this article, the evolution, institutions, and instruments of karst management were examined by using historical analysis, social network analysis, and comparative study in China and America. We found that the national efforts in the two countries were highly variable, and there was little regional integration. Karst and cave management in China and America have both gone through phases from initial less attention to more concerns. The focus and topics of management have transferred from karst hydrogeological issues to the integrated ecosystem problem, from single environmental issue to the

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0507501); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA20161004-4); 国家自然科学基金项目(41877529 和 U21A2041)

收稿日期: 2021-12-17; 网络出版日期: 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzhe@rcees.ac.cn

#本研究未含中国港澳台统计数据。

complex social, economic, and ecological issues. The study methods have been developing from the traditional environmental survey and monitoring methods to the emerging technologies such as GIS, LIDAR, molecular biology, and environmental DNA. The management mode has transformed from a top-down command and control approach to a cooperative management model among government, social groups, and the public. Karst landscape direct legislation was often inadequate and enforcement was usually constrained by karst complexity and conflicting priorities. Here, we presented a karst management framework that could be followed at the state and local level. Four specifically recommendations with high priority are proposed to streamline comprehensive management. Our study serves as a link between managers, researchers, and the public. The article will bring a practical generality through the comparative karst management and sustainable development in other countries.

Key Words: karst landscape; comparative study; social network analysis; sustainability; management instrument

喀斯特是陆地生命赖以生存的关键地带,岩石、水、土壤、空气、动植物和微生物等有机生命相互作用,共同塑造以山、水、洞为主的多种地表、地下形态瑰丽的喀斯特景观,拥有较高的经济、科学、教育、美学价值^[1-5]。据统计,喀斯特约占全球无冰陆地面积的 15.2%,尤其在中国西南部、美国中东部、中南欧等地集中分布^[6]。全球大约 11.8 亿人生活在喀斯特地区,喀斯特含水层为世界约 20%—25% 的人提供饮用水,世界上 50% 的石油、天然气储藏在碳酸盐岩地层中^[3, 7]。联合国教科文组织 90 多个世界遗产地和 70 多个全球地质公园全部或部分为喀斯特和洞穴,每年吸引数以亿计的游客,为当地带来数十亿美元的经济收入^[4, 8]。

19 世纪末以来,众多科学家和探险家等从地貌学、地质学、水文学、地理学、水文化学等多学科对喀斯特地貌的成因机制、生态问题、机理、过程等作了深入研究和详细分析^[4, 7, 9-15]。在 20 世纪 70 年代之前,各国政府并未意识到喀斯特管理的必要性,甚至喀斯特管理并非研究或行动的主题。1973 年 LeGrand 揭开了喀斯特环境与生态研究的序幕,随着喀斯特景观受到来自矿石开采、城市化、农业、旅游等愈来愈多的威胁,喀斯特生态系统及其保护成为许多国家政府关注的问题^[9, 16-23]。1997 年,世界自然保护联盟世界保护区委员会将喀斯特景观视为重要的保护目标区域,同时出台喀斯特保护区管理的框架和指南^[4, 24-26]。许多国家都出台相关法律、政策对喀斯特进行保护和管理。鉴于各国自然环境、喀斯特类型、受破坏程度、保护能力不同,导致各国在喀斯特景观保护目标、理念、措施、技术方法各异^[3, 27-33]。自 1987 年可持续发展概念提出以来,特别是 2015 年联合国 2030 年可持续发展议程提出 17 项全球可持续发展目标,喀斯特景观保护对地方可持续发展必将发挥重要作用,有学者从喀斯特对可持续发展作用、可持续战略、评估指标、发展模式等进行了探讨^[34-38]。

中美两国是世界上喀斯特资源十分丰富的国家,喀斯特作为一种具有景观功能、碳汇、供给和支持等多重生态功能的资源^[39-42],其管理涉及多个机构和多种维度,两国学者对此开展了长期研究^[43-48],但中国在喀斯特景观管理的方法和体制等方面鲜有报道。本文通过对中国和美国喀斯特景观保护和管理的历史进程全面阐述,对比分析两国喀斯特保护及管理的各自特色,总结共性的经验,为喀斯特景观资源可持续管理提供参考。

1 研究对象和方法

选取中国和美国作为两个代表性研究国家(表 1)^[1-2],基于以下原因:首先,两国的喀斯特景观面积分布广泛,中国和美国分别是喀斯特绝对面积最大和第三位国家^[1, 6];其次,两国是较早开展喀斯特研究、保护和管理工作的国家;最后,两国分别在亚洲、美洲,从地理上具有洲际代表性,特别是世界遗产地中喀斯特景观类型具有独特的美学和文化价值^[8]。

中国喀斯特地貌分布广、面积大,主要分布在碳酸盐岩出露地区,南方占绝对优势,其中以广西、贵州和云南东部所占的面积最大,是世界上最大的喀斯特区之一;西藏和北方一些地区也有分布,但比较分散且面积较

小。美国大陆喀斯特分布广泛,东部以碳酸盐岩(石灰岩)喀斯特为主,中部石膏喀斯特和盐喀斯特分布集中,而西部的火山岩喀斯特分布较广,天坑活动的热点在更易受影响的喀斯特地区。

表 1 中国和美国喀斯特概况
Table 1 Background and karst situation in China and America

类别 Category	中国 China	美国 America
人口(2019 年) Population	1397715000	328239523
喀斯特面积 Karst areas/km ²	3443000	1925800
占国土面积比例/% Proportion of karst area	36	20
喀斯特地貌特点 Characteristics of karst landscape	分布广、面积大、形态多样,各种喀斯特地貌类型齐全,典型的峰林、峰丛洼地、峡谷	50 个州都有分布,特别是中东部地区,形态多样,具有世界最长的洞穴,数量众多的温泉
已知洞穴数量/个 Number of known caves	据估算有 50 万个,中国洞穴数据库 1000 余个,开放旅游的洞穴 708	至 2020 年 67746 个,其中纳入国家管理的土地管理局 800 个,国家公园管理局 5000 多个,林业局 2000 余个*
喀斯特世界遗产数 Number of world heritage sites	8 个	4 个

* 美国洞穴数据来源: <https://www.nps.gov/subjects/caves/index.htm>; <https://www.caverbob.com/>; <https://www.blm.gov/programs/recreation/recreation-programs/caves-and-karst>

本文获取数据信息来源包括文献数据、法律政策文本、官方网站,而分析方法包括历史分析、内容分析、比较研究、Gephi 社会网络分析。历史分析法是运用发展、变化的观点分析客观事物和社会现象的方法,此处通过对喀斯特管理状况进行追溯,了解其发生、发展演化的全过程。内容分析通过对喀斯特管理文献选择、分类、统计,对内容进行客观、系统和定量描述的研究方法。比较研究法就是对不同国家喀斯特管理相似性或相异程度的研究与判断的方法。社会网络分析将喀斯特管理不同主体的属性抽象为节点,并用连接来展示不同机构之间的关系,通过量化以节点和连接为组件的网络结构指数,从而能够在统一的框架下寻找复杂管理系统的共性^[49]。

2 喀斯特景观资源管理的演化及管理重点

美国的喀斯特保护始于 19 世纪洞穴的开发与保护,中国喀斯特景观资源保护开展较晚,但近十余年国家非常重视,并发展出不同的喀斯特保护和治理模式。

2.1 中国喀斯特管理演进

中国的喀斯特管理历经 50 余年的科学准备阶段后,逐步关注景观资源问题,并历经分散治理、专项治理、一体化治理 3 个阶段(表 2)。关注重点从早期的岩溶风景资源调查、岩溶地下水资源-水污染发展到石漠化综合治理、喀斯特生态系统保护,目前喀斯特景观资源的保育和一体化管理是各界关注的重点。管理的方法正从早期的工程技术措施,2000 年之后的技术-行政手段结合,目前向可持续综合治理转变,新的管理方式和方法正不断涌现。国家级治理项目也从最初的分散、小型工程建设发展到大型、专项的喀斯特石漠化治理。

相较于欧美,直到 20 世纪上半叶中国的一些地理学家和地质学家才关注现代喀斯特问题,目前在中国知网数据库中查到的第一篇关于喀斯特地貌的文献 1936 年发表在《地质论评》上^[50],此后还有少数工作涉及喀斯特成因和洞穴学。1949 年后,喀斯特研究工作逐步展开,主要是理论探索和科学调查。直到 1980 年,有关喀斯特的研究主要集中在喀斯特地貌学论述、区域喀斯特发育规律研究、水文地质结构及成因、地质探测和绘图、喀斯特洞穴开发等^[51]。期间于 1961 年、1966 年、1979 年分别在广西南宁、桂林、贵州贵阳召开全国喀斯特研究会议,就喀斯特地形地貌分类、水文地质调查、(水利水电建设、铁道、矿产资源开发、建筑)水工设计实际问题、探测技术方法等展开讨论,这为后续的喀斯特管理提供了科学理论指导。

1981—2000 年为喀斯特景观分散治理阶段。进入 1980 年代,喀斯特景观资源保护开始受到关注^[52],喀

斯特区水资源,特别是地下水资源管理和水污染问题是研究的重点,越来越多研究涉及喀斯特地貌和地质,城乡建设、水利建设、矿产资源开发中的喀斯特环境问题,喀斯特植被资源、风景资源等问题。喀斯特洞穴的研究主要集中在洞穴景观形成机理,景观旅游价值评价,旅游洞穴类型划分,旅游活动对喀斯特洞穴环境影响,喀斯特洞穴景观保护等方面^[53]。中国学者袁道先在 1989—1993 年最早提出喀斯特岩漠化/石漠化问题并得到国际学界的公认^[54—55]。1994 年 10 月,中国科学院地学部曾向国务院呈送《关于西南岩溶石山地区持续发展与科技脱贫咨询建议的报告》,喀斯特环境研究逐步拓展成为一门隶属于地球表层科学、多学科交汇的大科学,在消除贫困、区域变化、人地关系、减灾防灾、区域开发的理论和实践方面发挥重要作用^[56]。

表 2 中国喀斯特不同管理阶段及相关信息

Table 2 Stages and related issues of karst management in China

时间 Period	管理阶段 Stage	关注重点 Focus	管理方法 Management approach	国家级治理项目 National project
1936—1980	科学准备阶段	地貌学、喀斯特发育规律、喀斯特区水文、地质工程	学术研究、地质调查、工程设计	水土保持小流域试点治理、三小水利工程
1981—2000	分散治理	岩溶风景资源调查、岩溶地下水资源、地下水污染、水土流失、石漠化	行业治理、保护区管理,自然保护区相关法律法规、许可证、环境影响评价	岩溶水资源预测管理、长江流域治理和防护林、珠江流域治理和防护林;农业综合开发
2001—2017	专项治理	岩溶地下水资源管理、喀斯特生态恢复、石漠化综合治理与生态建设、自然保护区管理、世界遗产地保护	环境及资源保护等法律和行政手段、五年规划和专项规划、石漠化分区、集体林权制度改革、保护区(地)管理、自然遗产地保护、税收和补贴等经济手段,自然修复措施	三次全国石漠化监测、长江防护林、珠江防护林、坡改梯、天然林资源保护,退耕还林、石漠化综合治理试点工程,国土整治
2018—	综合及一体化治理	景观资源保护及可持续性管理、生态/植被修复与重建、贫困治理、适应性管理、生态文明建设、石漠化综合治理	“山水林田湖草沙”生态保护和修复的系统综合治理、绿色发展、公众参与、国家公园、保护地管理、生态旅游、绩效考核和定期评估制度	国家可持续发展议程创新示范区、全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)、岩溶区石漠化综合治理工程

21 世纪以来,中国进入喀斯特专项治理阶段,逐步开展石漠化综合治理。喀斯特研究不但深入到岩溶动力学、生态学、全球变化研究领域,而且迅速扩展到喀斯特地区资源开发与环境治理的各个方面。喀斯特景观与洞穴这一学科领域在岩溶景观与洞穴基础研究,洞穴调查探测研究,岩溶景观与洞穴开发及运营管理,洞穴环境与景观保护修复,洞穴生物洞查研究,岩溶景观与洞穴文化,其它岩溶地质及景观旅游研究等七大方面取得较大进展^[57]。喀斯特旅游资源体系构建、生态旅游、地质遗迹和地质公园建设运营、生态系统服务价值评估、自然遗产保护等受到关注^[58]。中国政府和澳大利亚政府 2001 年启动喀斯特环境恢复项目,在广西忻城 9 个贫困乡(镇)建立一个以社区为基础的可持续性示范模式(2001—2005 年)。2002 年 3—4 月,中国科学院学部组织院士与专家发布了《关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议》的咨询报告^[59]。2004—2005 年、2011—2012 年、2016—2017 年,原国家林业局组织开展了三次全国岩溶地区石漠化监测工作。2007 年,党的十七大报告提出,加强荒漠化石漠化治理,促进生态修复。同年,由中国云南石林喀斯特、贵州荔波喀斯特、重庆武隆喀斯特共同组成的“中国南方喀斯特一期”在第 31 届世界遗产大会上被评选为世界自然遗产并入选《世界遗产名录》。世界自然遗产带来荣誉的同时也带来更多的责任,石漠化与生态修复成为这一时期的研究和管理重点。2008 年,国家发改委等六部委联合出台《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015 年)》,2008—2010 年组织实施了 100 个县“石漠化综合治理试点”工程,后来扩大到 8 个省区市 451 个县。党的十八大,明确提出“要实施重大生态修复工程,推进荒漠化、石漠化、水土流失综合治理”,为继续推进石漠化治理提供了行动指南。2016 年批复了《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》,重点对长江经济带、滇桂黔等区域的 200 个石漠化县实施综合治理。国务院有关部门高度重视石漠化治理工作,曾四次召开石漠化综合治理工程省部际联席会议。相关各省(市、区)及市县级人民政府均成立了石漠化综合

治理工程领导小组,形成了以发展改革部门负责工程建设综合协调和管理,林业、农业、水利等部门各负其责的工作机制。

2018 年之后,中国的喀斯特管理进入一体化管理阶段。党的十八大以来,习近平总书记提出“山水林田湖草是生命共同体”的论断,十九大报告中提到,要“统筹山水林田湖草系统治理”。2016 以来,财政部、原国土资源部、原环境保护部在全国 24 个省(自治区、直辖市)共安排 25 个山水林田湖草生态保护修复工程试点,2020 年 6 月 11 日,国家发展改革委、自然资源部正式印发《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》,其中南方丘陵山地带的喀斯特保护为 7 大区域生态保护和修复工程之一。在 2016 年国务院印发的《中国落实 2030 年可持续发展议程创新示范区建设方案》指导下,2018 年以来先后批复桂林、深圳、临沧市等建设国家可持续发展议程创新示范区,特别是桂林以景观资源可持续利用为主题,聚焦喀斯特石漠化地区生态修复和环境保护等问题。喀斯特治理的关注重点包括景观资源保护及可持续性管理、生态/植被修复与重建、生态安全格局构建、贫困治理和生态文明建设等不同方面,治理方式采取自上而下的政府治理与自下而上的公众参与及依法治理相结合的阶段,治理路径从“输血式”治理方式转向“造血式”治理方式^[29,60—62]。将石漠化防治纳入地方国民经济和社会发展规划,逐级建立健全地方政府行政领导任期目标责任制,依法对脆弱的岩溶生态系统及现有林草植被实行严格保护,统筹山水林田湖草系统治理。同时,要妥善处理经济发展与生态保护的关系,促进消除贫困,消除饥饿,良好健康与福祉,陆地生物等多个联合国可持续发展目标的实现。

2.2 美国洞穴和喀斯特管理演进

美国的喀斯特管理始于洞穴保护,而洞穴保护最初主要来自于公民而不是政府。1850 年以前,欧洲的探险者开始在北美土地上寻找洞穴,1850 年代至第二次世界大战期间越来越多洞穴被发现和居住,1950 年后进入现代洞穴探险阶段^[63]。喀斯特和洞穴管理先后经历了洞穴保护(1930—1960 年)、分散的洞穴资源管理和喀斯特水文研究(1961—1987 年)、喀斯特和洞穴法制化管理(1988—2005 年)、喀斯特生态系统和洞穴综合管理(2006—2015 年)、喀斯特生态系统可持续管理(2016 年开始)5 个主要阶段(表 3)。

表 3 美国喀斯特不同管理阶段及相关信息

Table 3 Stages and related issues of karst management in America

时间 Period	管理阶段 Stage	关注重点 Focus	管理方法 Management approach	重要治理项目 Key national project
1930—1960	洞穴开发与保护	洞穴探险、地质构造、水文、洞穴开发工程	私人探险和调查、地质调查、工程设计	国家公园管理局洞穴保护项目
1961—1987	分散洞穴管理和喀斯特保护	洞穴开发、喀斯特地质水文学、地表和地下相互作用、含水层及地下水污染、洞穴动物、游客管理	水、资源、考古、土地等相关法律法规、脆弱性评估、环境教育、许可证、环境影响评价、工程治理	林业局飓风流域土地管理、水源储蓄水项目、猛犸洞国家公园地下水追踪和洞穴测绘
1988—2005	法制化管理	洞穴资源管理、喀斯特地质和水文、地下水评估、有毒物质/空气研究、生物资源和生物学、古气候、洞穴生态调查与管理	洞穴保护法、环境及资源保护等法律和行政手段、监测、规划、许可证、地理信息技术、生态系统评价、公众环境教育	国家公园喀斯特管理、流域土地管理、国家级洞穴和岩溶计划、
2006—2015	喀斯特生态系统和洞穴综合管理	喀斯特地质过程和地质特性管理、洞穴生态系统生态学、蝙蝠白鼻综合症、洞穴旅游经济学	场地保护规划、土地规划和管理、生态学清单和监测、遗传生物学技术	国家公园管理局洞穴生态学清单和监测框架、蝙蝠白鼻综合症治理
2016—至今	喀斯特生态系统可持续管理	喀斯特和洞穴生物多样性和濒危物种管理、自然遗产资源保护评价、白鼻综合症防控、景观尺度协作管理、私人土地上的洞穴和岩溶资源	激光雷达岩溶地貌测绘技术、洞穴保护多层次方法、二氧化碳高分辨率测定、环境 DNA 检测、跨学科的 K-框架管理、公司伙伴关系、风险管理	阿肯色州布法罗河流域尺度的地下水污染管控、巴特勒山谷项目、洞穴工程的外部影响、穿越阿巴拉契亚喀斯特的能源项目

20 世纪 30 年代,美国公众开始参与对一些洞穴的展示性开发,同时开启了对洞穴保护的关注。1930 年

在新墨西哥州建立了卡尔斯巴德洞窟国家公园,有 80 多个石灰岩洞,为地质学家研究地质构造进程提供了完整的信息。1940 至 1950 年代,国家公园管理局在肯塔基州着手开展洞穴保护。1960 年左右,至少有 11 个州出版了有关洞穴的书籍,从而吸引人们对洞穴的关注。这时期,除了少数地方政府,私人团体和公众对洞穴探险和开发抱有强烈的热情,特别是 1951 年成立的大自然保护协会,一直致力于在全球保护具有重要生态价值的洞穴。

1960 年代开始,公众对环境问题愈加关注,参与到洞穴保护的行动中。政府颁布一系列相关法律和政策开始保护洞穴和洞穴资源,涉及考古遗址、濒危物种、饮用水保护、地下水和含水层保护、有毒废物等^[32,47-48]。1966 年,弗吉尼亚州在全美第一个通过了州级《洞穴保护法》。一些重要项目开始关注实际的洞穴和喀斯特管理,包括洞穴教育与洞穴动物调查,喀斯特地质和水文学,特别是重要洞穴和泉水相关的补给区划定和脆弱性评估。1965 年,美国林业局选取 23 个典型流域,其中位于密苏里州中南部的飓风溪是典型的喀斯特流域,主要研究地下水污染问题和喀斯特管理。在 1960 年代末和 70 年代初,美国林业局研究喀斯特地区垃圾填埋问题、美国土地管理局实施水源地蓄水项目并关注大型天坑坍塌。国家公园管理局 1970 年代初在新墨西哥州的卡尔斯巴德岩洞窟国家公园聘请专门的洞穴专家参与管理,猛犸洞国家公园的地下水追踪工作与非常详细的洞穴勘探和测绘结合,从而使猛犸洞成为洞穴保护和喀斯特管理的试验场。这时期对喀斯特含水层及地下水污染问题的研究是关注的重点^[64]。1975 年,美国第一次全国洞穴管理研讨会在新墨西哥州举行,其中 31% 的论文是关于游客管理的。当时的洞穴管理主要是管理人,而不是洞穴。1979 年成立了洞穴和喀斯特研究中心(Center for Cave and Karst Studies)^[3]。到 20 世纪 80 年代,人类活动对天坑的影响、岩溶水文学、地面沉降和修复、水污染、洪水灾害、垃圾等问题愈发受到重视,美国举办了多次岩溶管理会议。该时期也是洞穴知识普及和环境教育活动高涨的时期,非政府组织、研究机构、私人纷纷开发学习、旅游相结合的培训项目。

1988 年,《联邦洞穴资源保护法》的颁布标志着美国喀斯特洞穴管理步入法制轨道,国家公园管理局、国家林业局、国家土地管理局等都在自己的职责范围内对洞穴进行调查和管理,通过制定洞穴管理计划保护洞穴及其相关的自然系统,如矿物沉积、植物和动物群落^[23]。这一阶段的调查涉及长期而非短期管理问题,关注的议题越来越广泛,喀斯特地区可供水源和区域土地利用研究非常普遍,石漠化问题开始受到关注。采用的方法包括监测、规划、许可证、地理信息技术等。联邦管理机构同过支持研讨会等与研究人员、保护组织和个人建立公私伙伴关系,通过购买土地、恢复项目、修缮洞穴等活动以保护洞穴。国家公园管理局最初建立了七个专门保护洞穴的国家公园:卡尔斯巴德岩洞、宝石洞、猛犸洞、俄勒冈山洞、拉塞尔洞、蒂姆帕诺戈斯洞和风洞,至 2001 年,据统计 384 个国家公园中至少有 100 个有洞穴和喀斯特^[65]。1995 年 10 月在地质资源处内设立了国家级洞穴和岩溶计划协调员职位,为喀斯特管理提供技术援助,并从国家角度解决各种问题和需求。1997 年,美国全国喀斯特和洞穴管理研讨会召开,重点是阿拉斯加和不列颠哥伦比亚省的岩溶管理,到 1999 年,改为全国洞穴和喀斯特管理研讨会。此后,关注的议题愈加广泛,除了一直关注的喀斯特地质和水文、地下水评估、有毒物质/空气研究、岩溶区管理、特定洞穴管理,拓展到生物资源和生物学、古气候、洞穴生态调查、监测与管理,并且采用新兴的 GIS/制图技术进行大尺度的生态系统展示和评价、岩溶和公众教育、洞穴监测及旅游等^[48,66]。美国第 105 届国会于 1998 年通过《国家洞穴和喀斯特研究法》,同年 10 月授权成立国家洞穴和喀斯特研究所,隶属于国家公园管理局,旨在通过促进研究,进一步推进洞穴学科学,加强公众教育,并促进环境友好的洞穴和喀斯特管理^[3]。

2006 年开始步入喀斯特与洞穴生态系统综合管理,主要通过美国内政部和农业部等负责。内政部下属的国家公园管理局发布了《管理政策》(Management Policies 2006),在地质资源管理和荒野资源管理部分包括对喀斯特地质过程的保护和洞穴地质特征管理。2005 年以来,专家对洞穴动物和生态学的关注增加。2006—2009 年,蝙蝠白鼻综合症在美国各州大面积爆发,至少导致 100 万只蝙蝠死去,被认为是北美有史以来最惨重的野生动物衰退事件,尽管美国鱼类与野生动物管理局采取了控制措施,但蝙蝠白鼻综合症对洞穴和地面生态系统的影响研究仍关注较少。2008—2013 年,国家公园管理局制定了洞穴生态学清单和监测框

架,列出监测的4个区域:陆地洞穴生态系统、水生洞穴生态系统、植物和微生物,并给出规范的监测流程。洞穴生态系统生态学的研究尺度包括洞穴鱼的种群动态、洞穴溪流食物网的营养动态、洞穴生物多样性的生态区域比较,以及州级范围内的洞穴数据库。大自然保护协会作为世界上最大的私人自然保护区管理者通过场地保护规划来有效保护喀斯特景观和洞穴资源。洞穴旅游可带来可观的经济效益,洞穴信息调查、集中和标准化、洞穴旅游经济学也得到多方的关注。

2016年开始,洞穴与喀斯特生态系统可持续管理也逐渐兴盛。虽然方法和技术的进步为喀斯特保护工作者提供了更多选择,但许多问题仍然与50年前讨论的问题相似,而喀斯特与洞穴的保护管理需要更长远的战略和可行的技术。生物学家、洞穴探险者、自然资源保护主义者、洞穴学家在阿肯色州布法罗河流域尺度的地下水污染管控、降水-滴水-溪流流量之间的水文联系、洞穴空气二氧化碳的高分辨率测定、洞穴和喀斯特资源清单调查、综合生物多样性清单、自然遗产资源保护评价、生物监测和气候数据的长期分析、白鼻综合症影响评价和防控策略、景观陆地喀斯特生态系统天坑的生物多样性热点、使用百万兆字节(TB)级激光雷达数据集开展洞穴系统的高分辨率模拟、以激光雷达衍生的高程模型和图像作为岩溶地貌测绘和管理的工具等方面进行更深入的探讨^[63]。喀斯特和洞穴生物多样性和濒危物种管理也在引进分子系统发育学新技术,如DNA快速测序技术、序列分析技术^[67]。与传统的调查方法相补充,利用环境DNA检测和监测地下水生物可以收集稀有和受威胁地下水生物分布数据,为未来的研究提供基础,并辅助保护和管理决策。在喀斯特管理方面,塔姆岭溪洞穴通过增强地表和地下栖息地及其相应物种的景观尺度协作管理策略为喀斯特管理提供了新的范例。大自然协会田纳西分会实施了基于生态学的洞穴和喀斯特森林管理,开展最佳管理实践、地质特征的分级管理等措施保护喀斯特景观。广义的和跨学科的K-框架是一种喀斯特含水层保护和管理新方法^[22]。除了公共土地,私人土地上的洞穴和喀斯特资源管理愈加受到关注,公司伙伴关系正被广泛采用。

3 喀斯特景观资源管理机构和方法

美国喀斯特和洞穴管理已纳入联邦政府和一些州政府的职责范围,并分散在内政部、环境署、农业部等相关部门,采取的方法也与环境保护、土地、资源、国家公园、世界自然遗产地保护等密切相关。在中国,喀斯特管理成为政府的正式行动基本是进入21世纪的事情,自然资源部是最主要的管理机构,其它机构还包括生态环境部、文化和旅游部、水利部等。

3.1 中国和美国喀斯特管理机构

中美两国喀斯特和洞穴管理的机构类型主要涉及立法、行政、社会团体三大类,尽管具体的机构名称和部门有所不同。中国目前没有喀斯特和洞穴的专门立法,但有关的规划、资源、环境等方面的立法机构主要为国家级、省级和社区的市级,国家级立法机关为全国人民代表大会及其常务委员会,下设的环境与资源保护委员会和法律委员会负责具体事项(图1)。根据《中华人民共和国立法法》第七十二条,省、自治区、直辖市的人民代表大会及其常务委员会根据本行政区域的具体情况和实际需要,可以制定相关的地方性法规,设区的市人民代表大会及其常务委员会可以对城乡建设与管理、环境保护、历史文化保护等方面的事项制定地方性法规。国务院为中国的最高行政管理机构,下属的部委机构,如自然资源部、生态环境部、水利部、农业部等都担负喀斯特和洞穴保护的部分职能,负责贯彻执行法律,实施项目和管理。省级相关机构负责本行政区域内喀斯特和洞穴保护和管理的工作。喀斯特和洞穴相关学术和社会团体主要有国际非政府组织驻中国分支机构、全国性和地方性地质、考古、地理、自然资源保护学会等,主要通过与政府、企业合作实施自然保护项目、开展国内外学术交流、普及喀斯特和洞穴科学知识等社会公益活动促进喀斯特和洞穴保护管理。网络分析结果显示国家层面上至少有76个节点,涉及的机构包括国家机关、科研机构、大学、新闻、非政府组织,国务院是执行的最高行政机构,自然资源部、生态环境部、文化和旅游部、水利部、农业农村部发挥着重要作用(图2)。

美国喀斯特和洞穴的立法机构主要为国家级和州级,美国国会是最髙立法机关,包括参议院、众议院以及国会内部职能部门(图3)。美国各州议会有立法权,对联邦政府没有规定的任何内容制定州法,可根据本州

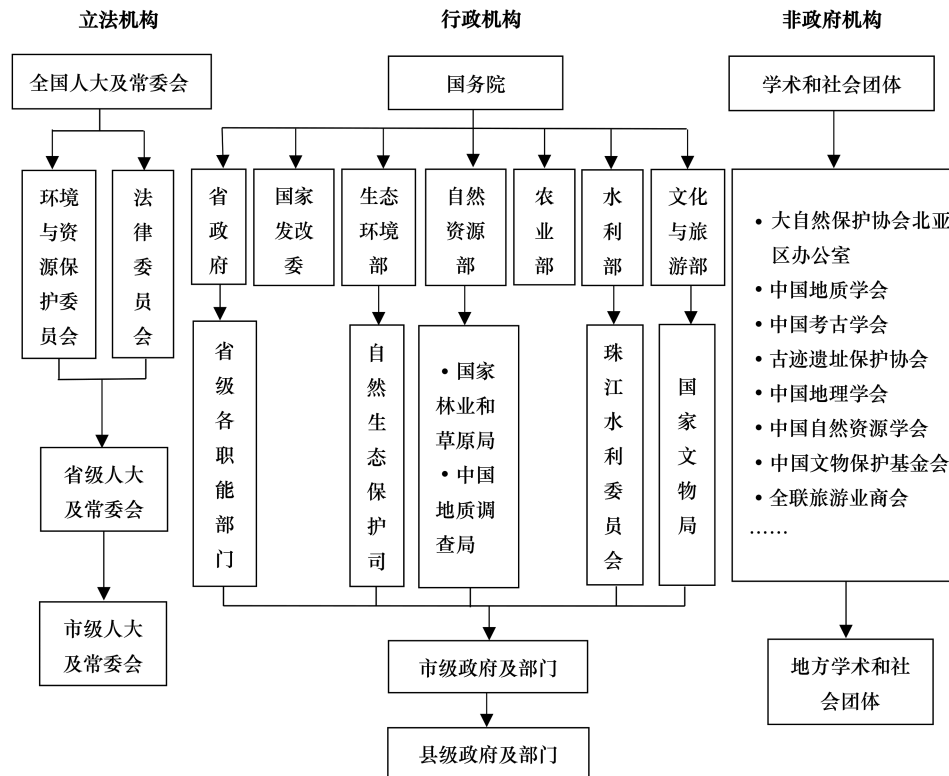


图 1 中国喀斯特和洞穴管理主要机构和分支

Fig.1 Institutions and branches of karst and cave management in China

状况制定出台喀斯特和洞穴保护法。如在《国家历史保护法》指导原则基础上,大多数州根据本州历史遗产状况制定了州历史保护法,市(郡)地方政府在州法律框架下也制定了城市保护法规,目前全美共有 2000 多个城市出台了地方保护条例。联邦政府为国家最高行政管理机构,总统为最高行政长官,有 15 个部和多个独立行政机构,负责贯彻执行法律,提供各种政府管理服务。内政部、环境署、农业部等都担负着喀斯特和洞穴保护的部分职能,特别是内政部负责管理公共土地和矿产、国家公园和野生动物保护区、濒危物种保护和其他环境保护工作,并维护联邦对印第安部落和阿拉斯加土著人的信托责任,下属的国家公园管理局、土地管理局、地质调查局等在洞穴和喀斯特管理中发挥重要作用(图 3)。网络分析显示,美国国家层面喀斯特管理的节点至少有 90 个,涵盖联邦各部、独立机构、非政府组织、大学,企业并未纳入,可以看出,美国内政部和农业部及其所属的国家公园管理局、土地管理局为最重要的管理节点,国家洞穴和喀斯特研究所、喀斯特水研究所在洞穴和喀斯特调查、研究、保护和管理中发挥着重要的作用(图 4)。

利用 Gephi 软件制作,图中节点和连线是相对大小,不代表具体数值,节点越大代表该机构越重要国家公园管理局负责自然资源管理,其中就包括地质资源、水资源、生物资源等,这都与喀斯特景观有密切关系。地质资源管理是管理的重点,主要包括地质过程和地质特征。地质过程包括但不限于侵蚀和沉积、冰蚀、岩溶发育、海岸线变迁、地震和火山活动等,保护重点主要是海岸线和喀斯特岩溶。对喀斯特地形,重点保持其水质、泉流、排水方式以及洞穴的内在完整性。地质特征管理包括岩石、土壤和矿物,地热系统中的间歇泉和温泉,洞穴和岩溶系统,侵蚀景观中的峡谷和拱石,沉积景观中的沙丘、冰碛和梯田,艺术性或罕见的露头岩石和岩层等,重点为古生物资源、洞穴、地热和水热资源、土壤资源等 4 类。国家公园管理局建立了完整的自然资源管理体系和程序,包括制定管理规划、公布资源信息、开展自然资源影响评估、恢复自然生态系统、建立自然资源损害赔偿制度等,同时建立并严格执行自然资源开发利用“申请-审核-评估-许可”制度^[68]。美国农业部下设的林业局管理着超过 78 万平方公里公共土地上的洞穴、岩溶系统和相关资源,这些资源的管理遵循

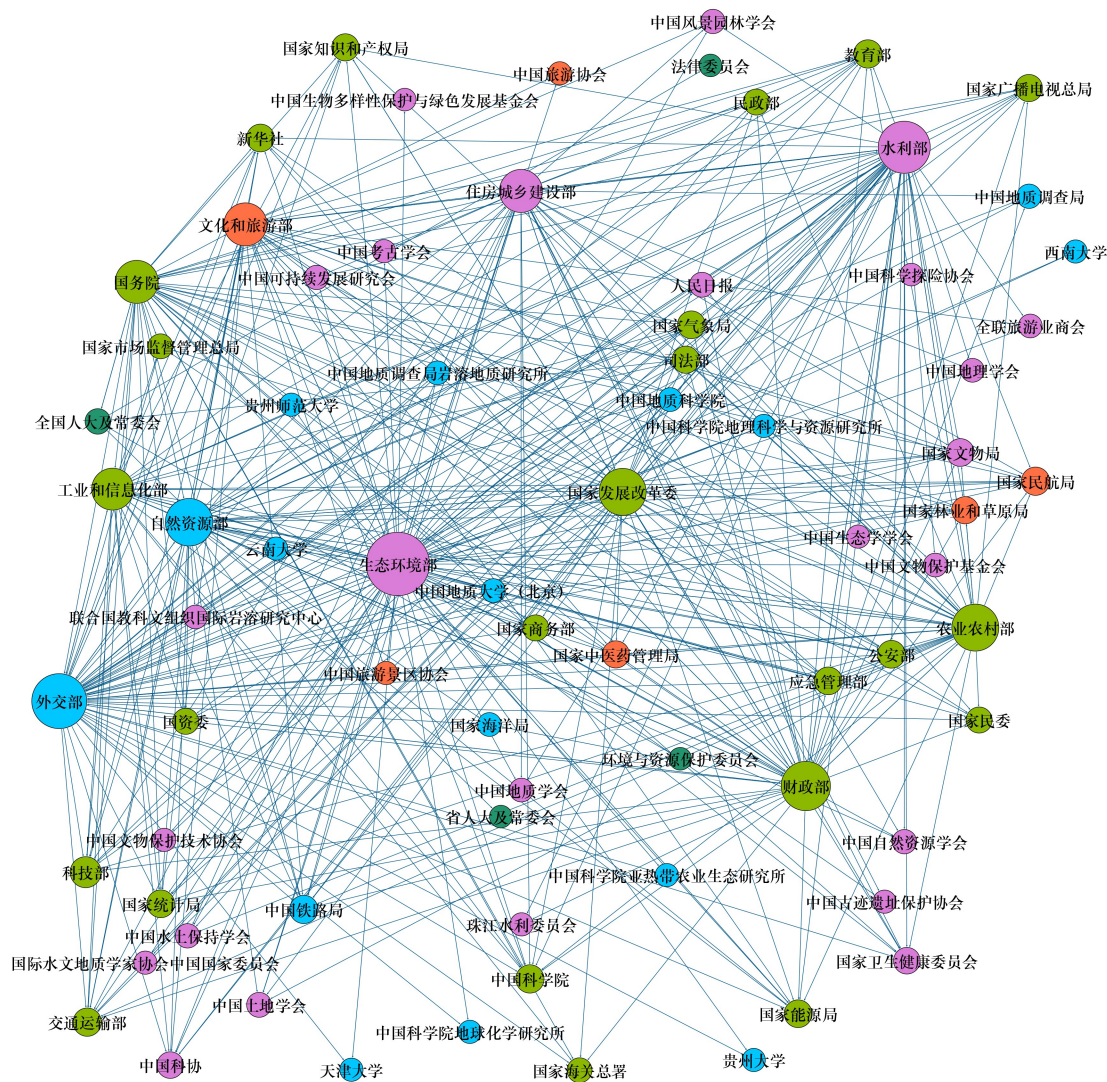


图 2 中国喀斯特和洞穴管理机构网络

Fig.2 Institutional network of karst and cave management in China

利用 Gephi 软件制作,图中节点和连线是相对大小,不代表具体数值,节点越大代表该机构越重要

1988 年《联邦洞穴资源保护法》和其他联邦法律规定的,并以《联邦法规》和林业局《森林服务手册》(The Forest Service Manual, FSM)为指导。在过去的半个世纪里,随着公众对喀斯特保护的支持增多,相应成立了更多非政府保护组织和学术团体。大自然保护协会现在是美国最大的私人洞穴所有者,在美国至少有 113 个以洞穴生态系统为中心的保护地。各地的土地保护协会在保护喀斯特土地方面是最成功的。考古学会、州级保护协会和各种地方洞穴保护协会业已收购或保护了许多洞穴。美国地质学会、美国地理学家协会、国家地理学会都在喀斯特和洞穴的研究、知识普及、教育等方面发挥了重要作用。

3.2 中国和美国喀斯特及洞穴法律和管理工具

喀斯特地区的环境问题多种多样,包括地方、区域和全球问题,涉及农药和有毒物质、危险和固体废物处置、水质和水量、城市和农村空气污染、资源利用和管理、土壤侵蚀和稳定性、水生和陆生生态系统退化、海洋污染、生物多样性丧失和气候变化。中美两国都没有统一和专门的喀斯特法规和管理工具,喀斯特管理分散在国家与地方制定的相关法律法规和政策中。根据汇总分析,中国相关的法律数量有 42 部,而美国相关的有 99 部,主要包括间接相关和直接相关的两大类,直接相关法律涉及自然资源、环境保护、文物古迹、洞穴保护

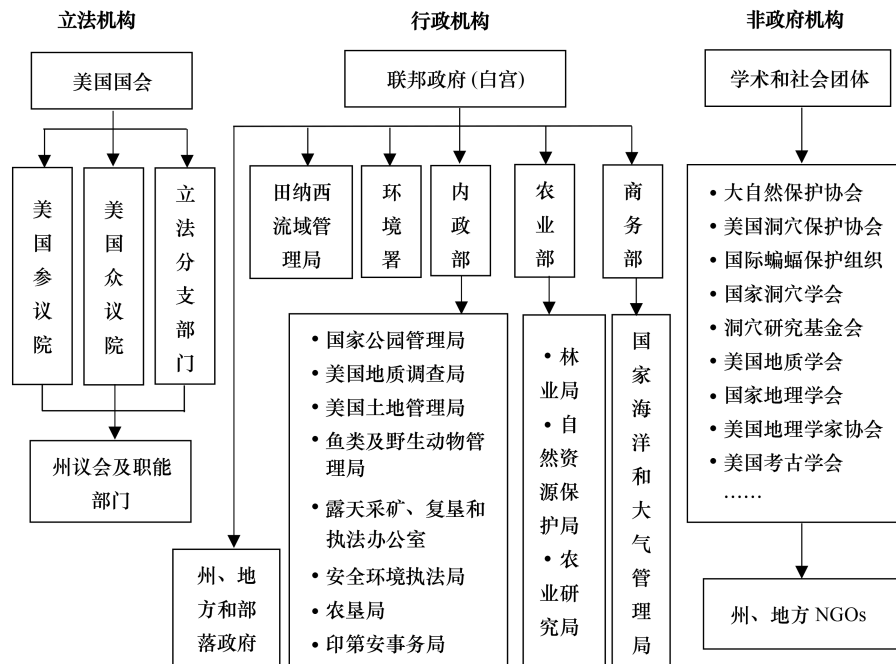


图3 美国喀斯特和洞穴管理主要机构和分支

Fig.3 Institutions and branches of karst and cave management in America

等九大类相关法律(图5),最重要的是自然资源类和环境保护类,自然资源管理类法律包括地质矿产资源、水资源、土地、生物资源等。间接相关法律包括综合法、程序法、信息自由等方面,其中美国有9部,而中国有5部。

中国目前还没有针对喀斯特和洞穴保护的专门法律。喀斯特管理必须遵循的间接的综合法(如《宪法》)和程序法(如《立法法》)共有5部。最直接相关的是1982年颁布的《文物保护法》,另外2部行政法规为《地质遗迹保护管理规定》和《古生物化石保护条例》。资源类法律共有17部,其次是环境保护类,共有10部。不同于美国,中国没有专门针对国家公园和洞穴保护的专门法律,目前国务院行政法规《风景名胜区条例》、《自然保护区条例》的个别条款涉及到部分内容。其它海洋类、灾害类、气象类法律数量不多。

在20世纪60年代的环境运动促使美国联邦政府通过了一系列资源、环境、保护考古遗址和濒危物种等的法律,特别是《清洁水法》、《考古资源保护法》。在20世纪80年代和90年代,美国有两项专门的洞穴保护法律,第一部也是最重要的一部是1988年的《联邦洞穴资源保护法》,根据规定,内政部和农业部需记录“重要”洞穴,并在决策过程中考虑对它们的潜在不利影响。特别是土地管理局在公共土地上开发其他项目时,将考虑洞穴和对洞穴的影响,因为在这些土地上,资源保护只是与放牧、木材生产、石油和天然气开采相竞争的众多土地用途之一。对于以保存和保护资源为使命的国家公园管理局来说,该法律更有价值的方面是将洞穴位置和其他相关信息从《信息自由法》中豁免。第二部法律是1993年的《雷修古拉洞穴保护法》,这是专门为保护位于卡尔斯巴德洞穴国家公园内的一个洞穴而制定的,为防止邻近的石油和天然气开采活动影响,在公园边界外建立了一个洞穴保护区。对美国而言,国家公园相关的法律高达11部,国家公园管理局根据这些法律对洞穴和岩溶地区进行保护和养护,而且国家公园管理局2006年发布《管理政策》专门对洞穴和喀斯特保护进行规定。洞穴探险团体还推动各州制定法律,保护洞穴不受破坏行为的影响。目前,美国至少22个州有保护洞穴资源的法律。

尽管喀斯特管理问题纷繁复杂,在中美两国的采用的方法和实施也不尽相同,常用的管理手段包括法制、行政命令、经济、技术、信息教育及综合类(表4),主要是通过激励和强制两种方式,但采取强制手段进行

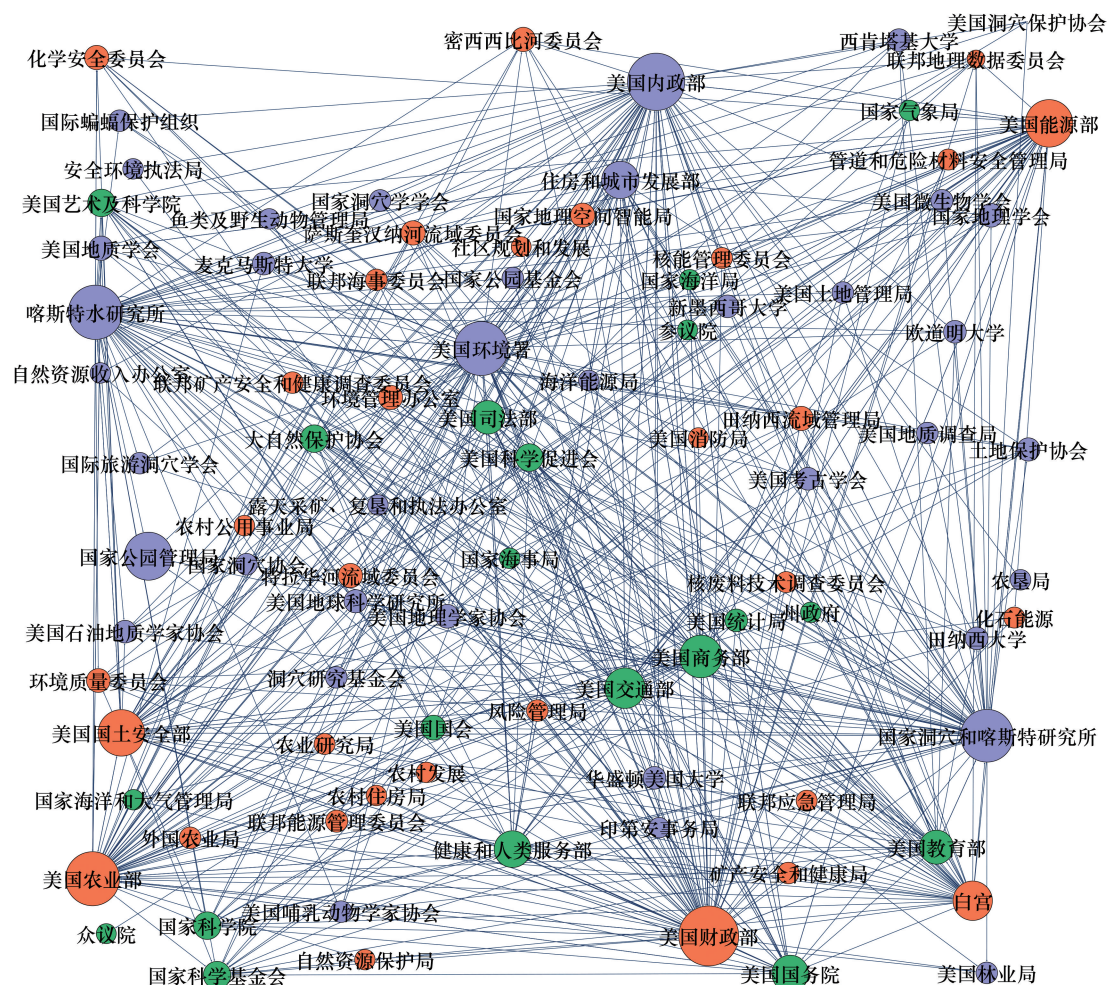


图 4 美国喀斯特和洞穴管理网络

Fig.4 Institutional network of karst and cave management in America

“堵”的时候,同时留有“疏”的渠道,使得疏堵结合。法制手段基本是国际法和国内法,国际法最直接的是1972年联合国教科文组织发布的《保护世界文化与自然遗产公约》、《防治荒漠化公约》,国内法包括国家和地方层面的法律。行政手段是两国主要的实施手段,涉及到行政规章和条例、规划和区划、财政、许可证等,喀斯特有关的法规和规划制定实施,主要通过土地、地上水资源、地下水、空气污染治理、地质矿产资源、森林、生物多样性等相关方面来进行。在美国,喀斯特与国家公园及土地管理关系密切,国家公园土地管理可用的手段通常为综合规划、土地开发权计划、分区条例、分户条例和雨水管理条例,但由于一般公众在很大程度上不了解喀斯特和与之相关的规划问题,地方政府通常以被动而非主动的方式管理岩溶问题^[69]。法律和行政控制对政府而言最大的好处就是直接、成本低,操作简单。但在实践中,其主要的局限是其稳定性有限和灵活性一般,因为政府可能受到政治利益或经济利益的驱动而合法

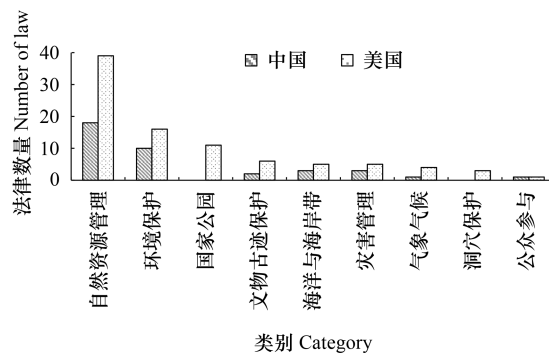


图 5 中国和美国喀斯特和洞穴管理国家级法律

Fig.5 National laws of karst and cave management in China and America

地改变法律和行政规划,这种情况在美国所谓的民主国家政府换届时经常发生。经济手段是近 30 年越来越受到关注的方法,美国在这方面远远走在中国的前面,环境税、环境损害责任保险、生态补偿、超级基金在美国已经广泛使用,这些手段最初尽管针对的管理对象并非是喀斯特生态系统,但对喀斯特保护和管理具有重要作用。技术手段是喀斯特管理的基础,对于科学了解喀斯特演化规律和解决喀斯特面临的问题具有重要的支撑作用,特别是现代化的信息技术、生物学技术等逐步用于喀斯特的管理。信息和教育手段成本低,但对公众的科学素养要求较高。综合方法管理效果较好,但技术要求有门槛、管理成本较高。

表 4 中国和美国喀斯特管理手段
Table 4 Instruments of karst management in China and America

类别 Categories	中国 China	美国 America
法制手段 Legal instrument	☆ 国际法、国际公约 ☆ 国家法律 ☆ 地方法律	☆ 国际法、国际公约 ☆ 联邦法律 ☆ 州级法律
行政手段 Administrative instrument	☆ 国务院行政规章、条例、政策 ☆ 部级行政部门战略、规章、条例 ☆ 省、市、县地方政府及部门规章 ☆ 国家和地方相关规划(土地、环境、石漠化治理、生态修复等) ☆ 执照、许可证(自然资源、排污) ☆ 财政政策、行政收费、罚款 ☆ 划定自然保护区、风景名胜區	☆ 总统行政命令 ☆ 行政部门和独立行政机构监管条例、政策 ☆ 州、市、县政府及部门规章 ☆ 州、市、县相关规划(土地、国家公园、流域、森林、农业、自然资源等) ☆ 许可证(国家公园特许使用、土地许可、自然资源、放牧)、执照 ☆ 财政、收费 ☆ 划定国家公园、自然保护区、旅游洞穴
经济手段 Economical instrument	☆ 资源税、环境税 ☆ 生态补偿 ☆ 环境污染责任保险 ☆ 土壤污染防治基金	☆ 开采税、固体废弃物处理税、二氧化硫税 ☆ 生态补偿,如湿地补偿 ☆ 环境损害责任保险 ☆ 超级基金
技术手段 Technical instrument	☆ 清单方法 ☆ 评价方法:资源评价(土地、水、生物、地质遗迹、风景名胜)、环境影响评价、社会影响评价、自然灾害评价、游客承载力评价 ☆ 监测和测绘技术,如 GIS,遥感 ☆ 标准:环境、水利、地质、旅游	☆ 清单方法(洞穴、地表资源、生物、文化) ☆ 评价方法:资源评价(土地、水、生物、洞穴、国家公园、文化资源)、基于地貌的环境影响评价、公民权益影响评估、灾害评估、干扰度评价、游客承载力评价 ☆ 环境监测技术、测绘技术,如 GIS,遥感 ☆ 标准:环境、土地、林业、生物、文化
信息和教育手段 Information & educational instrument	☆ 信息公开 ☆ 宣传、环境教育 ☆ 自愿和主动参与 ☆ 乡规民约	☆ 信息公开:喀斯特地貌数据库、 ☆ 宣传推广、环境教育 ☆ 自愿协议、自愿规划 ☆ 伙伴关系,喀斯特周边社区的互动模式
综合管理手段 Integrated instrument	☆ 山水林田湖草一体化管理 ☆ 跨区域协调 ☆ 最佳实践	☆ 综合生态系统管理 ☆ 生态-经济系统耦合 ☆ 可持续发展和可持续性科学

4 喀斯特景观资源综合管理框架

喀斯特景观是具有多样化价值的生态资源,一方面受到自然灾害、气候变化的影响,另一方面资源存量跟人类开发之间的冲突伴随着开发强度的不断增加也愈发激烈,在经济、文化、自然、政治多种因素的影响下,可持续管理面临的挑战在中美两国都不可忽视,亟需科学的可持续管理方法和模式(图 6)。

(1) 可持续发展目标与喀斯特生态系统及外部的社会、经济、政治、文化系统耦合。喀斯特生态系统与大气圈、水圈、地圈、生物圈、岩石圈密切相关,喀斯特生态系统是复杂的地表-地下二元系统,既包括地上的山、水、林、田、湖,也包括地下的洞、泉、石、生物、微生物系统,各种自然系统的特殊性、脆弱性、复杂性对喀斯特生态系统的综合管理提出更高要求。喀斯特系统所在地的经济发展、社会状况、政治制度和传统文化所组成的外部系统既是喀斯特生态系统管理的前提,又是喀斯特得以持续存在而为人类社会所利用的独特价值所在。尤其是中国南方喀斯特地区生活着大量少数民族居民,喀斯特管理过程中应关注少数民族风俗与文化、生态

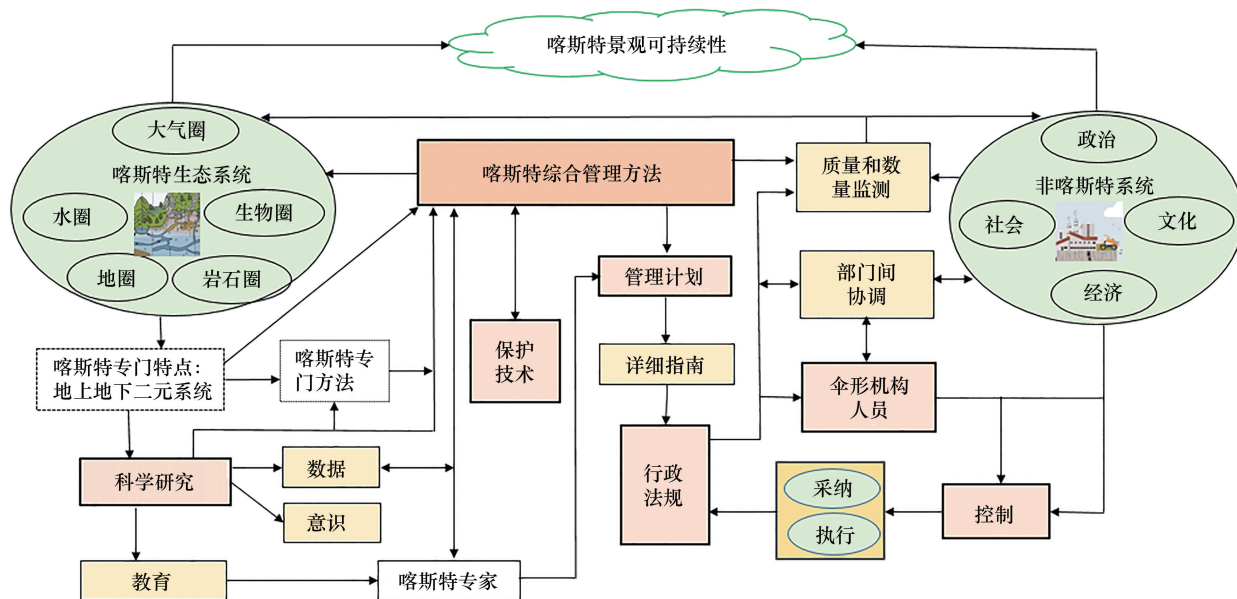


图6 喀斯特综合管理框架

Fig.6 Integrated karst management framework

伦理。而将可持续发展目标与喀斯特内外部系统协同管理也是达至喀斯特可持续性的重要方式。

(2) 整合法律、技术、经济等各种不同的手段并形成合力。传统的法律和行政手段需要改进适应现代喀斯特系统的特点,管理计划制定要充分与目前已有部门的中长期规划相衔接,并兼顾现实的管理成效。在长期规划的指引下,要制定可具操作性的实施指南,为管理部门提供依据。法律法规制定、实施效果进行长期的数量和质量监测,随时发现问题,加以改进,最终促进喀斯特生态系统与外部系统的一体化管理。

(3) 利用新兴的大数据、人工智能、生物技术。近年来,随着信息技术的飞速发展,遥感技术、无人机技术等已应用于喀斯特生态系统的变化及演化动态,基因测序、环境 DNA 技术等也用于地下微生物系统的研究,而在可能影响洞穴和岩溶地区项目的决策过程中,也已经开始使用更准确、长时间序列的科学数据。新兴技术应用既能拓展喀斯特研究的深度,也能提高喀斯特管理的效率,为喀斯特生态系统的可持续管理提供技术支持。

(4) 喀斯特自然、服务“流”与跨部门、跨团体管理方式相协调。喀斯特生态系统及其外部系统都在不断演变的过程中,喀斯特生态系统承载的物质流、能量流、信息流、服务流的性质、结构在不断演变,与之相关的利益相关方在不断变动、不同团体的利益诉求也不断变化,需要考虑自然和社会系统的动态“流”特性,兼顾喀斯特生态系统保护与生态服务提升和民生改善有机结合,最终达到喀斯特景观资源的社会化共同治理。

参考文献 (References):

- [1] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成. 现代岩溶学. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 韦跃龙, 陈伟海, 黄保健, 覃建雄. 中国岩溶旅游资源空间格局. 桂林工学院学报, 2008, 28(4): 473-483.
- [3] van Beynen P E. Karst Management. Dordrecht: Springer, 2011.
- [4] Williams P. World Heritage Caves and Karst: A Thematic Study. Gland, Switzerland: IUCN, 2008.
- [5] Goldscheider N. A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in Karst terrains. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(4): 1241-1249.
- [6] Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, Bakalowicz M, Broda S, Drew D, Hartmann J, Jiang G H, Moosdorf N, Stevanovic Z, Veni G. Global distribution of carbonate rocks and Karst water resources. Hydrogeology Journal, 2020, 28(5): 1661-1677.
- [7] Ford D, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [8] UNESCO. World heritage list. Available at <https://whc.unesco.org/en/list/>

- [9] LeGrand H E. Hydrological and ecological problems of Karst regions. *Science*, 1973, 179(4076): 859-864.
- [10] Parise M, Gabrovsek F, Kaufmann G, Ravbar N. Recent advances in Karst research: from theory to fieldwork and applications. Geological Society, London, Special Publications, 2018, 466(1): 1-24.
- [11] Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, Tan Q, Luo G J, Cao Y, Deng Y H, Li Q, Li C J, Wu L H, Wang J F, Chen F, Xi H P, Ran C, Liu M. Limitations of soil moisture and formation rate on vegetation growth in Karst areas. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151209.
- [12] Peng X D, Wang X D, Dai Q H, Ding G J, Li C L. Soil structure and nutrient contents in underground fissures in a rock-mantled slope in the Karst rocky desertification area. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 79(1): 1-11.
- [13] Zhang X M, Yue Y M, Tong X W, Wang K L, Qi X K, Deng C X, Brandt M. Eco-engineering controls vegetation trends in southwest China Karst. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145160.
- [14] Cao J H, Yuan D X, Tong L Q, Mallik A, Yang H, Huang F. An overview of Karst ecosystem in southwest China: current state and future management. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(4): 247-256.
- [15] Jurkovšek B, Biolchi S, Furlani S, Kolar-Jurkovšek T, Zini L C, Jež J, Tunis G, Bavec M, Cucchi F. Geology of the classical Karst region (SW Slovenia-NE Italy). *Journal of Maps*, 2016, 12(sup1): 352-362.
- [16] Baker A, Genty D. Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing surface land use and increased cave tourism. *Journal of Environmental Management*, 1998, 53(2): 165-175.
- [17] Kovacic G, Nataša Ravbar N X. Extreme hydrological events in Karst areas of Slovenia, the case of the Unica River Basin. *Geodinamica Acta*, 2010, 23(1/2/3): 89-100.
- [18] Brinkmann R, Parise M. Karst environments: problems, management, human impacts, and sustainability: an introduction to the special issue. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2012, 74(2): 135-136.
- [19] He G Z, Zhao X, Yu M Z. Exploring the multiple disturbances of Karst landscape in Guilin World Heritage Site, China. *CATENA*, 2021, 203: 105349.
- [20] Duval M. Tourism and preservation policies in Karst areas: comparison between the škocjan caves (Slovenia) and the ardèche gorge (France). *Acta Carsologica*, 2007, 35(2/3): 23-35.
- [21] Gutiérrez F, Parise M, de Waele J, Jourde H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in Karst. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 61-88.
- [22] Kosić Ficco K, Sasowsky I D. An interdisciplinary framework for the protection of Karst aquifers. *Environmental Science & Policy*, 2018, 89: 41-48.
- [23] LaMoreaux P E, Powell W J, LeGrand H E. Environmental and legal aspects of Karst areas. *Environmental Geology*, 1997, 29(1/2): 23-36.
- [24] Watson J, Hamilton-Smith E, Gillieson D, Kiernan K. Guidelines for cave and Karst protection. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 1997
- [25] Crofts R, Gordon J E, Brilha J, Gray M, Gunn J, Larwood J, Santucci V, Tormey D, Worboys G L. Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 31. Gland, Switzerland: IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2020.
- [26] Vermeulen J, Whitten T. Biodiversity and cultural property in the management of limestone resources. Washington, D.C.: The World Bank, 1999.
- [27] 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 雷廷武, 李德军, 宋同清. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究. *生态学报*, 2016, 36(22): 7098-7102.
- [28] 霍斯佳, 孙克勤. 中国南方喀斯特地质遗产的可持续发展研究. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(S2): 216-220.
- [29] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [30] Turpaud P, Zini L C, Ravbar N, Cucchi F, Petrič M, Urbanc J. Development of a protocol for the Karst water source protection zoning: application to the classical Karst region (NE Italy and SW Slovenia). *Water Resources Management*, 2018, 32(6): 1953-1968.
- [31] Angulo B, Morales T, Uriarte J A, Antigüedad I. Implementing a comprehensive approach for evaluating significance and disturbance in protected Karst areas to guide management strategies. *Journal of Environmental Management*, 2013, 130: 386-396.
- [32] Land L, Veni G, Joop D. Evaluation of cave and karst programs and issues at US National Parks. National Cave and Karst Research Institute Report of Investigation 4, Carlsbad, New Mexico, 2013.
- [33] Ravbar N, Šebela S. The effectiveness of protection policies and legislative framework with special regard to Karst landscapes: insights from Slovenia. *Environmental Science & Policy*, 2015, 51: 106-116.
- [34] van Beynen P, Brinkmann R, van Beynen K. A sustainability index for Karst environments. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2012, 74(2): 221-234.
- [35] Ribeiro D, Zorn M. Sustainability and Slovenian Karst landscapes: evaluation of a low Karst plain. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1655.
- [36] Marinović V, Stevanović Z. Karst groundwater quantity assessment and sustainability: the approach appropriate for river basin management plans. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(12): 1-10.
- [37] Li S L, Liu C Q, Chen J N, Wang S J. Karst ecosystem and environment: Characteristics, evolution processes, and sustainable development.

- Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 306: 107173.
- [38] 阮玉龙, 连宾, 安艳玲, 唐源, 王世杰, 尹祚莹. 喀斯特地区生态环境保护与可持续发展. 地球与环境, 2013, 41(4): 388-397.
- [39] 梁晓县. 环江喀斯特地区自然生态旅游景观价值提升研究. 创新创业理论与实践, 2020, 3(9): 169-171.
- [40] Gong S H, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Wu L H, Chen F, Qian Q H, Xiao J Y, Zeng C. Response of the weathering carbon sink in terrestrial rocks to climate variables and ecological restoration in China. Science of the Total Environment, 2021, 750: 141525.
- [41] Wang Z J, Guo X L, Kuang Y, Chen Q L, Luo M M, Zhou H. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in a heterogeneous Karst water system in Hubei Province, Central China. Applied Geochemistry, 2022, 136: 105165.
- [42] Lu Z X, Wang P, Ou H B, Wei S X, Wu L C, Jiang Y, Wang R J, Liu X S, Wang Z H, Chen L J, Liu Z M. Effects of different vegetation restoration on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities in degraded Karst landscapes in southwest China. Forest Ecology and Management, 2022, 508: 120002.
- [43] 王克林, 陈洪松, 曾馥平, 岳跃民, 张伟, 付智勇. 生态学研究支撑喀斯特区域生态环境治理与科技扶贫. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 213-222.
- [44] 王向阳. 促进武隆中国南方喀斯特世界自然遗产保护管理的财政政策研究. 经济研究参考, 2010(37): 48-51, 64.
- [45] 赵翔, 贺桂珍. 基于 CiteSpace 的驱动力-压力-状态-影响-响应分析框架研究进展. 生态学报, 2021, 41(16): 6692-6705.
- [46] Harley G L, Polk J S, North L A, Reeder P P. Application of a cave inventory system to stimulate development of management strategies: the case of west-central Florida, USA. Journal of Environmental Management, 2011, 92(10): 2547-2557.
- [47] Ek D A. Caves and karst of the National Park Service. In: Proceedings of the 2001 National Cave and Karst Management Symposium, 2001: 16-32.
- [48] Foster D G. Cave management in the United States: an overview of significant trends and accomplishments. In: Rea G T (ed.) Proceedings of the 1999 national cave and karst management symposium, Southeastern Cave Conservancy, Chattanooga, 1999.
- [49] Bastian M, Heymann S, Jacomy M. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. International AAAI Conference on Weblogs and Social Media, 2009.
- [50] 高振西. 喀斯特地形论略. 地质论评, 1936(4): 437-450, 526.
- [51] 沈玉昌. 三十年来我国地貌学研究的进展. 地理学报, 1980, 35(1): 1-13.
- [52] 杨汉奎. 岩溶风景资源简介. 环保科技, 1981(2): 20-27.
- [53] 杨晓霞, 向旭, 袁道先, 黎健斌. 喀斯特洞穴旅游研究综述. 中国岩溶, 2007, 26(4): 369-377.
- [54] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [55] 袁道先. 中国岩溶学. 北京: 地质出版社, 1994.
- [56] 杨汉奎. 喀斯特环境学研究纲要. 贵州科学, 1992, 10(2): 1-7.
- [57] 陈伟海, 朱德浩, 张远海. 从近十年洞穴会议论文分析岩溶景观 & 洞穴学科现状及趋势. 全国洞穴学术会议, 中国地质学会洞穴专业委员会, 2014.
- [58] 肖时珍, 熊康宁. 喀斯特旅游资源体系构建研究——以贵州为例. 桂林旅游高等专科学校学报, 2006(3): 269-272.
- [59] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. 地球科学进展, 2003, 18(4): 489-492.
- [60] 邵超峰. 桂林景观资源可持续利用面临的挑战和对策. 可持续发展经济导刊, 2020(7): 41-43.
- [61] 邹细霞, 陈海旭, 陈燕英, 熊康宁, 樊云龙. 喀斯特石漠化产生的必要条件及其治理足迹. 地球科学前沿: 汉斯, 2019(11): 1154-1166.
- [62] 王权, 唐芳, 李阳兵, 黄娟, 白雪飘. 岩溶地区景观格局演变及其生态安全的时空分异——以贵州省东北部槽谷为例. 生态学报, 2021, 41(18): 7273-7291.
- [63] Brick G A, Alexander Jr. E C (eds.). Caves and Karst of the Upper Midwest, USA. Springer, Cham, 2021, 23-35.
- [64] Vineyard J D. The concept of a government catalyst in the planning and management of water resources in karst regions. In: Yerjevich V (ed.) Karst hydrology and water resources 2. Ft. Collins: Water Resources Publications, 1976, 829-840.
- [65] Ek D A. Caves and karst of the National Park Service. In: Proceedings of the 2001 National Cave and Karst Management Symposium, 2001, 16-32.
- [66] Stitt Robert R. 1997 Karst and Cave Management Symposium Proceedings. Bellingham, Washington; Chilliwack and Vancouver Island, BC, Canada, October 7-10, 1997.
- [67] Orndorff W D, Lewis J J, Kosi Ficco K, Weberg M H, Orndorff Z W. 2019 National Cave and Karst Management Symposium Proceedings, 7-11 October 2019, Bristol, Virginia. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, USA, 2020.
- [68] 周戡, 王丽, 李想, 张多, 刘天科, 林进, 刘鹏. 美国国家公园自然资源管理: 原则、问题及启示. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2020, 19(4): 46-54.
- [69] Richardson Jr J J. Local land use regulation of Karst in the United States. Ninth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. September 6-10, 2003, Huntsville, Alabama, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2003: 492-501.