

冰冻圈服务综合区划理论与方法

林浩曦^{1,2,3}, 黄金川^{1,2}, 效存德⁴, 漆潇潇¹, 陈云谦⁵

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 广州地理研究所, 广州 510070; 4. 北京师范大学
地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 5. 北京市十一学校, 北京 100039)

摘要: 冰冻圈是全球气候系统的主要圈层之一, 既具有不可替代的气候效应, 又维系着寒旱地区社会经济和自然生态系统良好运行, 而中国是中低纬度地区冰川、积雪、冻土发育程度最高的国家。长期以来, 针对冰冻圈“致害性”的研究众多, 而聚焦冰冻圈服务的“致利性”研究则相对滞后, 在此背景下着眼于人类福祉的冰冻圈服务识别与综合区划研究成为冰冻圈科学、人地系统可持续发展等的关键科学问题之一, 也是目前迫切需要开展的研究方向。首先, 确定以地域分异规律理论、人地关系地域系统理论、集合论和信息编码论等跨学科理论为研究基础; 尔后, 构建面向综合区划研究的冰冻圈服务分类体系, 先以供需均衡模型为核心进行单项服务重要性空间识别, 再以服务最大化模型为指导, 通过区位熵算法判定冰冻圈主导服务的空间分布; 最后, 以三维魔方展开法为核心制定冰冻圈服务综合区划方案, 将研究区划分多重空间层级、彼此独立完整、相互联系密切的冰冻圈服务单元。综上, 形成综合自然供给和人文需求因素且适应地区特色的冰冻圈服务空间识别与综合区划技术体系和方法流程, 为冰冻圈服务供给与社会经济发展需要架起一座桥梁, 是满足国家重大战略需求和合理利用冰冻圈服务的必由之路。

关键词: 理论; 方法; 服务; 综合区划; 冰冻圈

DOI: 10.11821/dlxb202003014

1 引言

冰冻圈是具有一定厚度且连续分布于地球表层的负温圈层, 作为固态水库存储了全球75%的淡水资源, 其主要组成要素为冰川、积雪和冻土^[1]。同时, 冰冻圈是仅次于大气圈的全球气候系统第二大圈层, 通过水分、能量和物质交换等复杂多向反馈作用, 与大气圈、水圈、岩石圈、生物圈等相互作用强烈, 在多时空尺度上对全球气候系统起着不可或缺的调节作用, 并对自然生态系统和社会经济系统施加重要影响^[2-3]。同时, 水、能、气等冰冻圈储存的海量资源对社会经济发展的重要作用不可替代, 更是高纬度、高海拔地区可持续发展的物质基础与支撑保障, 提供着至关重要的冰冻圈服务^[4]。概括而言, 冰冻圈服务是指冰冻圈要素通过耦合自然供给与人文需求为人类提供的各种产品、服务等, 涉及人类福祉与惠益。中国作为中低纬度地区冰冻圈要素发育程度最高的国

收稿日期: 2019-01-10; 修订日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41690145) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41690145]

作者简介: 林浩曦(1990-), 男, 广东中山人, 博士, 助理研究员, 主要从事城市地理与区域规划研究。

E-mail: linhx.14b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 黄金川(1973-), 男, 河南开封人, 博士, 副研究员, 主要从事城市地理与区域规划研究。

E-mail: huangjc@igsnrr.ac.cn

家,充沛的淡水资源、稳定的生态调节作用、独特的宗教与文化资源、冻土及雪冰重大工程服役等冰冻圈服务是维持干旱区绿洲生存发展和生态系统良好运行的重要保障,也是极区、高山及其毗邻区人口生存与发展的可靠依赖^[5]。但是,由于冰冻圈所处位置偏远及公众意识缺失等原因,冰冻圈服务长期以来并未得到足够的重视^[6]。随着社会经济的发展,冰冻圈服务的重要性日趋凸显,2016年习近平总书记提出“绿水青山是金山银山,冰天雪地也是金山银山”,更加强了各界对冰冻圈服务的重视。

尽管冰冻圈社会经济属性逐渐被人类广泛利用,但是对冰冻圈服务的类别划分、价值评估、综合区划等系统性的研究尚处于起步阶段^[6-7],已有研究更多是从冰冻圈过程、机理等自然属性以及冰冻圈灾害等“致害性”角度出发,如冰冻圈变化的脆弱性与影响的适应性研究^[8-9],以及冰川、积雪、冻土的类型、变化及分布区划,冰灾雪害风险性区划、工程服役风险性区划等^[10-13],但缺乏系统梳理冰冻圈对社会经济的正面影响,尚未充分形成从冰冻圈结构、特性、过程到冰冻圈功能、冰冻圈服务、人类收益、人类福祉的完整研究链条,导致冰冻圈自然科学研究与社会经济可持续发展之间存在隔阂,在应用层面对实践的指导性有限,亟需基于冰冻圈科学、人文地理学等相关研究基础建立健全冰冻圈服务的相关理论和方法体系。

冰冻圈科学是以构建学科体系为目标,围绕冰冻圈变化机理及其气候、水资源、生态效应与适应对策等开展研究,将冰冻圈相关研究纳入地球表层科学体系中,研究内容与手段融合了自然科学与人文社会科学,既联系地缘政治,为人类福祉与国家安全服务,又探寻出新的学科增长点和发展走向^[14]。探索冰冻圈这一特殊人地系统的自然与人文要素地域分异规律,揭示冰冻圈过程与服务之间的机理及其未来演变趋势,建立健全冰冻圈服务综合区划研究理论和方法体系,有助于占领冰冻圈科学理论的国际制高点,并架起冰冻圈服务供给与社会经济需求的桥梁,对特殊人地系统的可持续发展和区划研究产生重要的理论贡献。因此,必须加强跨学科融合交叉、集成多重手段和新技术开展冰冻圈多要素综合研究,从而深刻认识冰冻圈变化的影响,提出应对冰冻圈变化的适应对策^[15]。综合而言,如何科学认识冰冻圈服务的价值和意义?如何创新构建冰冻圈服务的自然供给与人文需求的区划理论和方法体系?如何有序进行冰冻圈单项服务重要性的空间识别以及主导服务的空间判别,从而制定冰冻圈服务综合区划方案?这些关键科学问题亟待解决并将研究成果付诸应用。

2 冰冻圈服务综合区划的重要意义

2.1 顺应冰冻圈科学发展需求,填补冰冻圈服务综合区划研究的空白

目前,冰冻圈服务的相关研究主要是从冰冻圈资源的自然供给角度出发,强调冰冻圈的自然灾害效应和生态效应,或单纯探讨冰冻圈的各类服务,而缺乏系统地将冰冻圈服务与社会经济需求相关联,使冰冻圈科学研究与社会经济可持续发展之间的“咬合度”不足。从学科发展的角度看,冰冻圈科学与人文社会科学之间的衔接既是学科发展的必然趋势,也是延伸其实践应用价值的必然要求^[5]。中国正面临着从冰冻圈基础科学研究向国家重大战略需求应用研究转变的历史机遇,及早开展冰冻圈—经济社会耦合的研究,有望成为中国冰冻圈研究与国际相同领域“过程并行”的潜在“隆起”区。

2.2 强化对价值日益凸显的冰冻圈服务的空间分异性、复杂多样性和特色性的科学认识

冰冻圈服务的价值日益凸显,需要对其地域分异性、复杂多样性和特色性有充分的科学认识,从理论建构的角度有助于丰富人地关系地域系统理论、拓宽冰冻圈科学的理

论视野、探索学科交叉研究的理论意义、实现研究方法上的扩展意义,从实践需求的角度对正确识别冰冻圈服务空间分布特点、促进寒旱地区社会经济可持续发展、加强脆弱区域生态修复与环境保护具有重要的科学与战略意义,从而为多情景优化各种要素的数量配比和空间配置提供科学依据,有利于实现人口资源环境均衡发展及社会经济生态效益统一协调。

2.3 规避风险、合理利用冰冻圈服务的必由之路

只有在冰冻圈保持一定规模,冰冻圈服务才可充分发挥作用。从开发利用的角度看,冰冻圈生态敏感度高,大规模的持续开发建设会大大增加生态环境保护压力,导致地区差距扩大、资源环境约束趋于极限、冻土显著退化引发冻融灾害等相关环境地质灾害等问题^[16]。随着气候变暖及人类活动扰动加剧,全球冰冻圈萎缩乃至局地消亡趋势显著,冰冻圈服务在大环境的变化下兼具增进与损耗等过程,其与社会经济发展之间的供需关系亟待理顺,从冰冻圈服务的盛衰演变、丧失阈值等角度来制定冰冻圈服务综合区划,避免不合理利用导致生态环境破坏、冰冻圈要素加速消亡等严重后果,更显紧迫性与重要性^[17-18]。

2.4 满足共建“一带一路”、冬奥会筹办、生态文明建设等国家重大战略需求

国际国内迅猛增长的需求为冰冻圈科学与人文社会科学交叉融合、理论夯实与实践应用提供了千载难逢的机遇。从开发与保护的角度看,如何应对全球增温背景下的冰冻圈退缩现象,进而深入探讨冰雪水资源利用、寒区生态环境稳定、工程建设和设施安全等重要问题成为关键。从战略意义的角度看,如何促进冰冻圈服务受益地区和灾害频发地区之间的权利共享和责任共担,增加中国在国际谈判中的主动性与话语权亟需破题。诸多问题的解决期待着冰冻圈科学研究在综合集成研究层面上有所突破^[19-20],进而为共建“一带一路”、冬奥会筹办、区域协调发展、生态文明建设等提供科学决策支撑。

3 冰冻圈服务综合区划的理论基础

3.1 区划属性

分区分类是地理学的主要研究范式之一^[21]。分类是寻找要素的类型与属性的潜在逻辑,根据不同逻辑归纳出不同类别,本质上是代数语言的运用,科学性尤为显著;分区则是寻找空间分布的潜在逻辑,根据不同逻辑归纳出不同分区,本质上是几何语言的运用,内含由先验知识建构的概念。但分区与分类难免存在一定的冲突,需要提出各种原则和运用各种方法减少冲突,符合应用需求。郑度按区划中演绎方法使用与否,将区划分为类型区划和区域区划^[22]。黄秉维认为区域区划的每一单位在地域上是相邻的,具有空间不可重复性,而类型区划的每一单位允许相互隔离,空间上可以重复,二者的差异主要在于是否遵循空间共轭性^[23]。冰冻圈服务综合区划是以冰冻圈资源禀赋要素的地域分异规律为本底,以社会经济发展需要为导向,以资源环境承载力、生态保护红线等为约束,立足现实性分异和潜在性分异的冰冻圈服务时空异质性规律,识别冰冻圈服务空间分布格局并制定冰冻圈服务综合区划方案。因此,与全国主体功能区划、全国生态功能区划类似,冰冻圈服务综合区划属于类型区划,区划单元具有空间可重复性和隔离性。

与地理学综合性和区域性的内核相适应,区划及其相关研究一直是地理学研究的核心工作和重点领域。综合区划是从多视角切入研究地表现象,探讨多尺度地域单元的发育演化、空间分异、层级联系、相互关系等,不仅是揭示地表现象的相似性与差异性的基本路径与有效方法,也是对过程和类型研究的归纳和综合^[24]。综合区划应针对多尺度

下人类—自然耦合效应的特征、结构、过程、格局等,将人文与自然要素同时纳入指标体系。与此对应,冰冻圈服务综合区划应具有三大特点:① 综合性,地域单元的空间组织和合理划分,离不开通过各种技术手段和划分方法对各类自然、人文要素的空间分布格局综合为多因素影响和制约下形成的地域功能空间分布格局,将自然—人文复合系统视作有机联系的整体探究其内在机理。② 集成性,充分集成社会经济与生态环境的多源异构数据是真实反映地球表层各类活动的基础;充分集成已有的区划成果或博采各家所长优化各类冰冻圈服务的评价结果,是明晰要素的组合方式、组合结构和相互作用的依据;充分集成代数、几何、概率等科学语言,并将其应用于地理学的分区分类实践,有助于解释地理现象的内在机理并提高综合区划的科学性。③ 应用性,不局限于以描述现象、识别要素空间分异格局为主要目标的传统区划路径,综合区划在其基础上更为注重内在机理解释和优化调控建议,进而指导要素空间分布更为有序、合理、高效^[25-26]。同时,根源于自然界的等级性和复杂性,冰冻圈服务及其综合区划研究涉及空间、时间和利益相关者等尺度:空间尺度是指地理现象涉及的空间范围、空间层级等,包括局地、区域和全球等尺度;时间尺度是指地理现象涉及的时间与时段,包括短期、中期、长期等;由于冰冻圈服务主要指向人类福祉,为谁服务、服务什么、如何服务等涉及到个人、家庭、企业、地方及国家政府等利益相关者尺度。

3.2 理论支撑

3.2.1 地域分异规律理论为摸清冰冻圈服务空间分布提供理论基石 地域分异规律是指地理对象在某确定方向上保持相对一致性或相似性,但在另一确定方向上表现出差异性的规律。自然要素与人文要素在地表空间的分布相互联系、相互影响,共同作用于地域分异^[27],包括作为区划系统高级单元划分依据的地带性规律(纬度、经度和垂直地带性等)和作为低级单元划分依据的非地带性规律(地方性、隐域性和微域性分异等)^[28],是综合区划的基本理论基础和主要依据^[29]。从冰冻圈资源的自然供给及其影响范围出发,综合考虑冰冻圈服务间的协同与权衡关系,探索冰冻圈特殊人地系统的自然与人文要素地域分异规律,有助于科学探索区域发育演化进程、确定区域资源环境承载状态、指引区域发展政策制定等,具有重要的科学价值和实践意义。

3.2.2 人地关系地域系统理论为研究冰冻圈资源要素与社会经济相互耦合作用提供理论基石 地理学着重研究地球表层人与自然的相互作用与影响反馈^[30-31]。自然生态和社会经济两个系统按照一定规律彼此联系、相互作用,构成具有庞杂的、精妙的内在结构和功能体系的人地关系地域巨系统,具有耗散性和混沌性,是一个开放的、动态的、交互作用强烈的系统。冰冻圈服务有机耦合自然供给与人类需求,人地系统在冰冻圈这一特殊地域中互相联系并作用形成的动态演进结构,从时空演化、组织序变、协同效应、功能互补等方面去认识和寻求冰冻圈地区人地关系的整体协调、平衡有序及优化调控,进而趋利避害,适应冰冻圈变化的影响,成为可持续发展的关键问题,为有效地进行区域开发和管理提供了理论依据。

3.2.3 资源环境承载力理论为评估冰冻圈服务利用的承载能力提供理论基石 资源环境承载力是指在一定的时空范围内,在保证资源开发利用合理有序和生态环境状态可持续的前提下,各种尺度区域的资源环境状态对社会经济活动的承载能力^[32]。资源环境承载力理论为科学测度社会经济活动与资源环境相互关系提供有力依据,从而探讨资源环境支撑与社会经济发展的耦合关系和演化格局^[33]。冰冻圈地区资源环境是当地人民赖以生存和发展的重要支撑,人类对冰冻圈服务的开发和利用始终要维持在可持续发展的阈值之内,不能以破坏资源与环境为发展代价,而要谋求经济、社会和环境效益相统一。

3.2.4 集合论和信息编码理论为制定冰冻圈服务综合区划方案提供理论基石 随着定量方法在综合区划中的应用越来越普及, 跨学科、跨领域的理论也源源不断地为综合区划的理论基础提供新支持。定量地看, 综合区划就是地理空间区划的集合, 区划系统、区划单元的相互关系等均需借助集合论进行逻辑、层级、关系等推演。因此, 集合论成为综合区划的重要数学基础。从信息学的角度看, 信息编码理论为精确标记和归并离散区划单元提供系统和成熟的解决方案, 可以赋予任一区划单元唯一的标记符号, 并通过编码转换方法综合分析区划系统的层级体系, 成为综合区划的重要理论基础之一。

3.3 分类体系

冰冻圈功能侧重于自然属性, 是冰冻圈自身环境特性和冰冻圈独特的结构和过程综合作用的结果, 也是冰冻圈服务的前提、基础和物质保障。冰冻圈功能包括能量流动、物质循环、水源涵养、重压承载、冷能储存与释放、地表侵蚀或固结等。冰冻圈服务由冰冻圈功能产生, 是基于人类的物质和精神需要、利用和偏好, 直接或间接从冰冻圈获取的各种满足人类福祉的惠益, 即有助于提高人类生存及生活品质的所有冰冻圈资源、产品和福利^[4], 其定义可扩展为水圈、大气圈、生物圈、人类圈从冰冻圈获得的各种惠益过程^[4]。冰冻圈功能作为冰冻圈对社会经济可施加服务的基础, 是冰冻圈自身环境特性和冰冻圈独特的结构和过程综合作用的结果, 而冰冻圈服务为冰冻圈与社会经济系统之间搭起了桥梁。从冰冻圈功能到冰冻圈服务不但是研究视角的变化, 也是供给方到消费方的转变, 还是自然生态系统到自然生态与社会经济复合系统的跨界传导, 随着社会经济发展和技术水平提高, 从功能到服务的类型和数量将越来越多; 从冰冻圈服务到惠益凝结了人类技术、资金和劳动, 受到人类偏好和价值判断的影响; 从惠益到价值则涉及人类的支付意愿 (图1)。

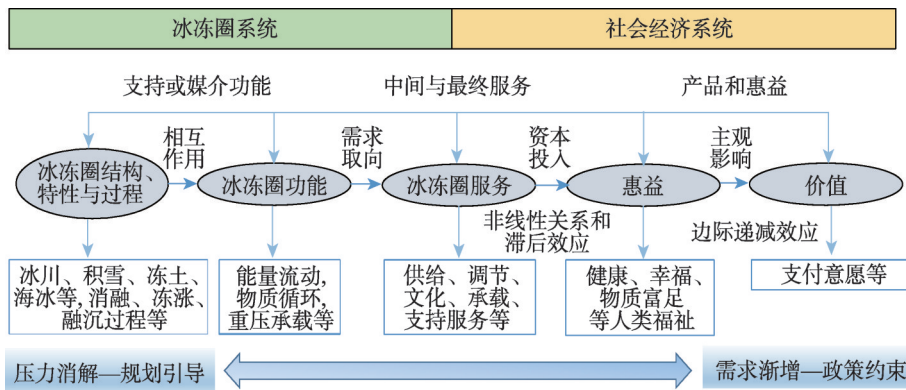


图1 冰冻圈服务的级联框架体系

Fig. 1 Cascade framework of cryospheric services

从冰冻圈服务形成的途径来看, 主要包括: ① 冰冻圈为人类直接提供产品或服务, 如供给服务 (水资源、冷能、冰雪等)、承载服务 (特殊交通通道、基础设施承载等) 和文化服务 (美学、灵感、宗教信仰、科普教育、休闲旅游等); ② 冰冻圈通过与其他圈层的相互作用, 为人类提供各类调节服务 (气候、水文、生态调节等); ③ 冰冻圈通过支撑或主导特殊环境的形成, 为人类提供各类支持服务 (生境、资源、地缘政治环境等)。需要特别指明的是, 承载服务是指陆地或海洋表层冰冻圈为天然冷冻固态介质, 可为人类迁徙、跨河道 (湖泊) 行进等特殊活动以及人们所需的物质运输 (航运、海运、漕运等) 和工程建设与运营提供重力支撑, 全球气候不断暖化为北极航道的开通创造良

好的自然条件便是典型案例；支持服务是人类从冰冻圈支撑或主导下形成的特殊环境中获得惠益，包括高寒地区生境维持、天然气水合物和风能形成、地缘政治和军事活动的特殊环境支持等。

为科学系统构建面向中国冰冻圈服务综合区划的分类体系，本文以人地关系地域系统理论等为指导，从冰冻圈自身资源禀赋特点出发，从土地利用功能、生态系统服务功能、景观生态功能以及冰冻圈独特的社会经济服务综合的视角^[35-37]，充分了解冰冻圈服务从供给到消费的过程，全面考虑冰冻圈对人类福祉的所有贡献（潜在的、间接的、最终的），坚持区别中间过程与终端服务，做到不重复分类，客观反映实际贡献，尤其着重国内冰冻圈服务发展现状、是否可量化评价、数据来源是否可行等，最终形成的冰冻圈服务分类体系共包括3大类、15亚类、33小类，具体如表1所示。

表1 冰冻圈服务分类体系

Tab. 1 The classification system for cryosphere services

服务大类	服务亚类	服务小类
基础生态服务	气候调节	温度调节，湿度调节
	气体调节	碳氧平衡调节，净化调节
	径流补给	水调节，水供应，干扰调节
	生物多样性维持	低温微生物生态环境供给，高寒区植物生态环境供给，生物控制，避难场所，种质资源保存
	水源涵养	滞洪蓄洪，调节径流，净化水质，水土保持
	土壤形成	形成土壤，侵蚀控制和沉积物保持
	生态用水供给	植物用水，动物用水，维护无机环境的生物地理环境平衡所需的水分
初级生产服务	农业用水供给	春灌
	牧业用水供给	
人文发展服务	清洁能源	电力供给，天然气水合物供给
	城镇生活用水供给	
	工业用水供给	
	冰雪游赏	生态旅游，冰雪运动，冰雪探险娱乐活动，冰雪科考
	社会文化	美学观赏与游憩服务，科学研究与环境教育，宗教精神与文化结构
	工程服役	维持建筑物安全运营，保证公路、铁路输油管道等线性工程稳定

基础生态服务是指冰冻圈为提供水源、生境等惠及人类生存的服务，是自然系统独特的且历经长时间人类活动的影响、改造、甚至破坏之后，仍然被保存的、不可代替的原始自然服务，是社会经济发展的“保障阀”和“稳定器”，主要包括气候调节、气体调节、径流补给、生物多样性维持、水源涵养、土壤形成、生态用水供给、原料生产等。初级生产服务是指人类对自然系统能动的改造和利用，但是仍然对自然系统有较强依赖，是社会经济发展的“催化剂”，主要包括农业用水供给、牧业用水供给服务等。人文发展服务是指人类通过初级生产服务得到基本生存保障之后，进一步摆脱土地类型约束，追求更丰富的享受与更进阶的满足感，是人类最主要的财富创造来源，主要包括清洁能源、城镇用水供给、工业用水供给、冰雪游赏、社会文化、工程服役等。

值得注意的是，除了冰川、积雪、冻土各自主导下形成的典型冰冻圈服务之外，不同冰冻圈要素的相互耦合作用也影响着冰冻圈服务的过程与效应，本文将范围广、变率大的积雪与季节冻土的耦合作用对冰冻圈服务的影响作单独讨论。一方面，积雪通过其

较高的反照率和较低的热传导影响季节冻土土壤冻融陆—气间垂直能量传输过程，对季节冻土有明显的保温作用，基于此，产生了如下显著影响：① 持续存在的积雪使季节性冻土在冬末融化，为土壤微生物创造了可以长时间保持活性的环境条件，而秋季较早的积雪覆盖可以有效地避免土壤温度过低对微生物的伤害，生态调节服务明显；② 积雪覆盖影响下的冻融过程是土壤温度、近地面气温季节变化的“缓冲器”，气候调节服务明显。另一方面，广泛分布于中海拔山区的季节冻土的解冻时间对山区水文影响显著，春季融雪水产流与季节性冻土区雪盖厚度、冻结条件及渗透能力等联系密切，由于冻土的存在减少了融雪水下渗，融雪水会在地表产生径流排出，尤其对春季融雪性洪峰的推迟和提前起到关键影响，对水资源供给服务影响明显。

3.4 概念模型

3.4.1 供需均衡模型 冰冻圈服务的发育与壮大受到自身资源禀赋、生态环境要素与社会经济要素的协同作用，而社会经济因素的关键地位及其与其他要素的相互作用对于冰冻圈地区的深远影响越发占据主导地位^[38]。供给和需求是服务存在的先决条件，本文的供给是指冰冻圈为人类供应产品与服务，需求是指人类对冰冻圈产品与服务的耗费与利用，供给侧与需求侧促使冰冻圈服务实现自然生态系统与社会经济系统之间的相互作用。借鉴 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs 模型和 Artificial Intelligence for Ecosystem Services 模型，前者遵循“供给 (Supply) — 服务 (Service) — 价值 (Value)”主线，“供给”经过服务对象的使用转变为“服务”，服务的“价值”可通过构建社会经济指标体系表示；后者以“供给 (Supply) — 需求 (Demand) — 汇 (Sink)”为概念框架，“汇”是在供给与需求的空间流动过程中对传递介质起削弱作用的统称^[39] (图2)。通过对供给与需求之间关系的研究，有助于识别冰冻圈服务的供给区域并评估供给潜力，明晰冰冻圈服务的需求特点和空间分布格局，以探索冰冻圈服务对社会经济发展的约束作用，有利于满足不断增长的社会经济需求和在全球气候变化下更好地保护冰冻圈资源^[40-41]。

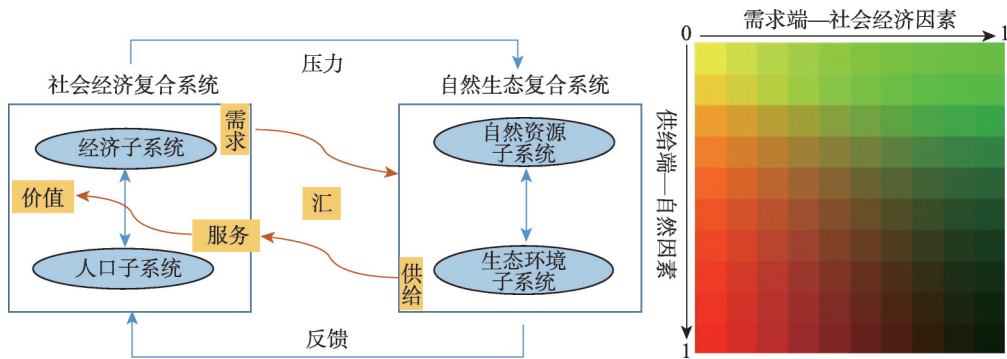


图2 自然生态系统与社会经济系统间供需关系示意图

Fig. 2 The supply-demand relationship between natural ecosystem and socio-economic system

构建冰冻圈服务供需均衡分析模型，是冰冻圈单项服务重要性评价的重要基础。以供需均衡分析模型为核心，对冰冻圈不同区域各类服务重要性进行评估，形成单项服务重要性空间分布图。 V_{ij} 表示*i*区域的*j*服务的重要性， S_{ij} 表示*i*区域*j*服务的供给能力， D_{ij} 表示*i*区域*j*服务的需求强度，其计算公式如下：

$$V_{ij} = F(S_{ij}, D_{ij}) = (S_{ij})^\alpha \times (D_{ij})^\beta \times (S_{ij}/D_{ij})^\gamma \quad (1)$$

式中：系数 α 、 β 、 γ 的确定需要根据回归分析确定，服务重要性的分级阈值则需要根据实

际研究采用经验判定法、曲线突变法、最大类间方差法等进行综合确定。

3.4.2 服务最大化模型 冰冻圈同时具有多项服务，其整体效益的最大化是冰冻圈服务空间分布格局形成与优化的根本动力之一，因此不同冰冻圈服务的重要性评价以及主导服务的判定是冰冻圈服务综合区划的重要组成部分。对于给定的区域 (R) 在一定时间段 (t)，可持续发展的冰冻圈服务地理分布格局 (U) 应追求基础生态服务 u_{eco} 、初级生产服务 u_{pro} 、人文发展服务 u_{dev} 的最大化总体效益 ($\max E$)，涵盖了经济、社会和生态效益，其计算公式为：

$$\begin{aligned} \max E &= F(U, t) \\ U &= \int f_U(R, u) dR \\ u &= f_U(u_{eco}, u_{pro}, u_{dev}) \end{aligned} \quad (2)$$

人类对冰冻圈服务的利用，不仅会考虑各类服务是否产生了最大效益，还会考虑其所产生的最大效益是否大于其他服务组合所能产生的最大效益。对于第一个条件的满足，是考量某种冰冻圈服务在特定地域所能发挥的效益；对于第二个条件的满足，是针对较大地域系统中不同冰冻圈服务的权衡。具体而言，对于每一个地域单元，每种冰冻圈服务均会产生一定效益 E_i ，而 ε 表示该地域单元内不同冰冻圈服务组合之后造成的系统效应，也就是服务之间的相互作用所产生的效益，因此系统的总体效益 E 为：

$$E = \sum E_i + \varepsilon \quad (3)$$

式中：为实现总体效益最大化，正向条件需满足 $E_i \rightarrow \max$ ，即各项服务效益最大化，同时 $\varepsilon \rightarrow \max$ ，即服务空间结构最优化；约束条件包括冰冻圈服务承载力和冰冻圈服务实施代价。综上所述，冰冻圈人地系统的综合发展状态是由经济发展、社会保障、生态保护等共同组成，基于冰冻圈服务视角下其空间均衡是指冰冻圈服务的人均供给与人均需求趋于平衡，且不超越该地域单元的资源环境承载力和可承受的实施代价，实现冰冻圈服务空间发展有序化，使得冰冻圈服务可持续地发挥作用。

4 冰冻圈服务综合区划的方法研究

4.1 区划原则

合理而实用的区划原则是制定区划方案的关键^[42]，结合冰冻圈自然特性，强调冰冻圈服务发生、发展、成因与联系，提出冰冻圈服务综合区划原则如下：① 发生学原则，冰冻圈形成发育和人类生存息息相关，冰冻圈服务的协同和权衡关系既是历史发展的产物，也将继续影响全球气候变化；② 等级性原则，不同区划层级揭示的区域差异必须一致或者有先后、主次等逻辑关系，从而形成真实反映冰冻圈服务地域分异规律的区划等级系统；③ 尺度融合原则，以流域分区、行政区划、栅格斑块为主要尺度单元，以城镇分布等点要素、河流等线要素、高寒草地等面要素为跨尺度单元，实现不同空间单元的尺度融合；④ 相对一致性原则，任一冰冻圈服务区划单元，均要求区内相似性尽可能大，区际差异性尽可能大，并按照取大去小的思路将零碎的区域适当就近合并，充分体现地域分异的规律性和整体性；⑤ 综合性与主导性原则，全面考虑影响冰冻圈服务地域分异的要素，抓住导致地域分异的主导因素，以期区划成果科学有效。

4.2 区划技术流程

首先，挖掘冰冻圈服务研究的理论根基，界定冰冻圈服务的概念内涵，综合构建冰冻圈服务分类体系。其次，以供需均衡模型与服务最大化模型为理论指导，采用多源异

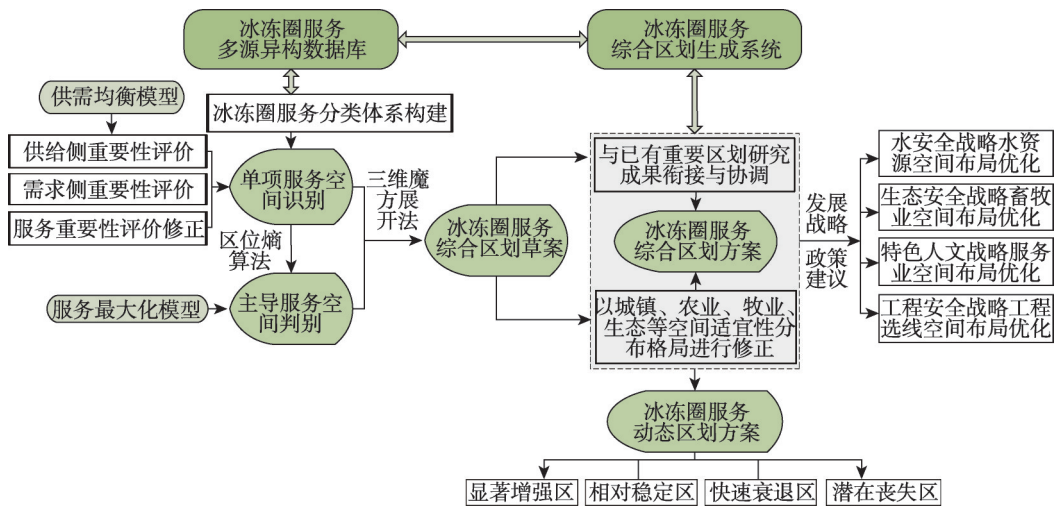


图3 冰冻圈服务综合区划技术流程图

Fig. 3 The technical flowchart of the comprehensive regionalization of cryosphere services

构数据融合和多方法模型集成的方式，通过冰冻圈单项服务重要性空间识别和主导服务空间判别，共同识别出冰冻圈服务空间分布格局。进而，以地域分异规律为基础，以冰冻圈的服务供给要素和社会经济需求要素为依据，按照综合性、主导性与完整性等指导思想，制定冰冻圈服务综合区划方案，将全国划分为多重空间层级、彼此独立完整、相互联系密切的冰冻圈服务单元。最终，提出冰冻圈服务分区提升对策及优化配置建议。由此，形成规范的冰冻圈服务空间识别与综合区划技术体系和方法流程（图3）。

4.3 服务空间识别

4.3.1 单项服务空间识别 根据冰冻圈服务分类体系，从自然生态本底条件、冰冻圈资源要素禀赋、社会经济特征属性等入手，基于供给、需求、变化程度和适应能力等维度构建冰冻圈服务综合区划指标体系与数据库（表2）。根据每项冰冻圈服务的特性和评价需要，以及人类开发利用对于冰冻圈服务的依赖性程度，按照评价对象和研究尺度差异遴选供给端和需求端评价指标，分别对冰冻圈各类服务进行供给侧和需求侧的重要性评价，并以供需均衡模型为核心集成供需重要性评价结果，形成冰冻圈单项服务重要性空间识别结果，实现从供需关系的角度剥离出冰冻圈要素的贡献。同时，冰冻圈服务供给侧重要性受到资源环境承载能力的制约，供给与需求之间存在错配等问题，因此需要对冰冻圈服务供需评价结果进行修正，以城镇、农业、牧业、生态等空间适宜性分布格局为上位约束因子来修正、校验冰冻圈服务重要性的评价结果，使冰冻圈服务重要性空间识别既立足当地资源禀赋，又充分发挥自身效益，且不违背国家政策规划的发展与保护诉求。

4.3.2 主导服务空间判别 同一地域单元中，一般同时存在多种服务，即同一承载空间同时对多种冰冻圈服务适宜，但对于不同的冰冻圈服务而言其相对重要性不同，存在权衡与协同关系，需要进一步识别为服务指向更为清晰的空间。本文定义的冰冻圈主导服务是一定地域在更大的地域范围内，在冰冻圈核心区、作用区、影响区的自然资源和生态环境系统中，以及在人类生活与生产活动中的主导职能和作用。冰冻圈主导服务判定就是寻找出每一研究单元在整体冰冻圈服务空间分布格局中的主导服务，判定的主线是相

表2 冰冻圈服务综合区划指标体系

Tab. 2 The index system for comprehensive regionalization of cryosphere services

一级指标	二级指标	三级指标	
供给	冰川	冰川类型及其面积、体积、高度, 冰川反照率, 冰川融水补给量与补给比例, 冰川旅游景区数量及年均开放日数	
	积雪	积雪类型及其面积、密度, 积雪日数, 积雪反照率, 年累积积雪厚度, 雪水当量, 积雪融水补给量与补给比例, 滑雪运动场数量及年均开放日数	
	冻土	冻土类型及其面积, 多年冻土活动层厚度, 冻土年平均地温, 冻土稳定性与连续系数, 冻土年平均冻结深度, 冻土土壤含水量	
	地形	海拔高度, 坡度, 坡向, 地形起伏度	
	水资源	水资源总量, 人均水资源量, 水资源利用率	
	土地	土地利用结构, 垦殖指数, 人均耕地、草地、林地、荒地面积	
	交通	交通优势度	
需求	社会经济条件	地区生产总值, 人均地区生产总值, 三次产业结构, 年末牲畜存栏数, 城镇居民人口密度, 农村居民人口密度, 城镇化率	
	生物多样性需求	生物多样性评价, 国家级自然保护区边界(自然生态系统类和野生生物类)	
	生态用水	单位林地、草地需水量	
	经济用水	单位地区生产总值需水量, 单位牧业增加值需水量, 单位农业增加值需水量, 单位工业增加值需水量, 单位第三产业增加值需水量	
	城镇生活用水	城镇居民生活需水总量, 人均城镇居民生活需水量	
	变化程度	气象变化	气温变化率, 降水量变化率, 干燥度指数变化率
		冰川变化	冰川面积、体积、高度、反照率变化率, 冰川年均退缩率
积雪变化		积雪面积、密度、日数、反射率变化率, 年累积积雪厚度变化率	
冻土变化		冻土面积、年平均地温、冻结深度、土壤含水量变化率, 多年冻土活动层厚度变化率	
水资源供给变化		地表径流变化率, 冰川融水补给比例变化率, 积雪融水补给比例变化率	
生态变化		净初级生产力变化率, 植被退化率	
土地利用变化		城镇用地扩张量与变化率	
适应能力	生态适应能力	净初级生产力总量, 生态治理指数, 自然保护区面积占比	
	经济适应能力	地区生产总值增长率, 单位劳动力产出, 高耗水产业产值占工业总产值比重, 第三产业产值占地区生产总值比重, 城镇居民人均纯收入, 农牧居民人均纯收入	
	社会适应能力	人类发展指数, 信息通达指数, 受教育年限, 恩格尔系数, 公路网密度, 社会资本指数	
	制度适应能力	政策与决策能力, 资源配置管理水平	
	工程适应能力	水利工程投资比例, 渠系改造维护投资比例, 新建渠系投资比例, 山区水库人均库容量	

对重要性, 即不比较不同服务之间的绝对价值量等, 只比较他们的相对重要性, 而区位熵算法恰好可反映某一部门对某种要素利用的专门化程度, 以及某一区域要素在更大区域中的地位和作用。因此, 本文通过区位熵算法来衡量每个研究单元中不同服务的相对重要性, 即某研究单元中某冰冻圈服务的重要性与更大地域范围内该冰冻圈服务重要性的差距, 根据其大小判断主导服务的归属。每类冰冻圈服务的相对重要值 a_i 的计算公式为:

$$a_i = \frac{b_i / \sum_{i=1}^m b_i}{B_i / \sum_{i=1}^m B_i} \quad (4)$$

式中： b_i 为一定地域范围内某一冰冻圈服务的重要值； $\sum_{i=1}^m b_i$ 为一定地域范围内 m 种冰冻圈服务的重要值之和； B_i 为更大地域范围内某一冰冻圈服务的重要值； $\sum_{i=1}^m B_i$ 为更大地域范围内 m 种冰冻圈服务的重要值之和。相对重要值越高表示该冰冻圈服务越重要，如基础生态服务重要性较低的空间多为耕地、荒漠、建设用地等，对区域乃至全国的生态屏障意义均不大；初级生产服务重要性较低的空间则多为城镇、林地、水面、荒漠等不能进行农牧业的地区。

4.4 区划方案制定

冰冻圈服务综合区划核心思想是分区和分类，归并空间相邻、服务类型与特征一致的单元，将发生上统一、空间上邻近、内部一致性强且与外部差异显著的功能空间划分成不同等级单元，形成反映特定要素或功能分区、呈现地域分异规律的过程。基于单项服务重要性评价结果和主导服务判定结果，通过栅格归并模型使服务类型相同、空间邻近的栅格自动进行归并及分区边界识别，进而以三维魔方展开法为核心、专家经验判断与区划对比分析法为辅助来制定中国冰冻圈服务综合区划方案。

所谓三维魔方，即通过区划对象的不同研究维度构建三维空间，适宜于对研究单元不同指标开展多维优势度集成评价^[43]。每一类指标对应一个维度，在相应维度上设定不同节点表示指标的属性值，从而形成三维空间 n 阶魔方 (n 代表属性节点个数)，不同维度间的节点可一一对接组合，形成 n 种对接组合模式，通过制订组合归类规则进行分区。本文基于栅格尺度冰冻圈单项服务重要性评价结果和主导服务判定结果，并依据不同的研究需要，在一级区划方案制定时将初级生产服务、人文发展服务、基础生态服务重要性分别对应三维魔方的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴，可以称为功能类型魔方 (图4)；同理，在三级区划方案制定时将主导影响要素类型、变化趋势类型、供需关系类型 (含水资源匮乏程度) 分别对应三维魔方的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴，可以称为特征类型魔方。

在冰冻圈服务综合区划方案制定中，需要在定量区划结果的基础上充分考虑专家经验以及全国主体功能区划、中国人文地理综合区划、中国生态功能区划等相关区划研究成果，结合行政区划和流域边界，在保证亚区边界不横跨一级大区的原则下修正划定边界，取大去小，合并破碎的斑块，调整、优化区划边界，即对结果进行合理的、小幅度的人为校正，避免分区的过度碎片化和不合理的区划单元出现，最终将研究区划分为多重空间层级、彼此独立完整、相互联系密切的冰冻圈服务单元，

从区划层级而言，根据冰冻圈的自然属性和所具有的主导服务类型，从引发冰冻圈服务差异的主导因素入手，将研究区划分为基础生态、初级生产、人文发展等冰冻圈服务大区；在服务大区的基础上，从引发冰冻圈服务差异的次级因素入手，根据冰冻圈亚

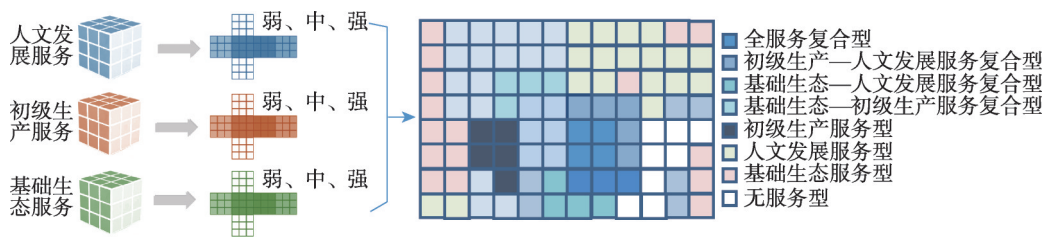


图4 三维魔方法区划过程示意图

Fig. 4 The regionalization process aided by the three-dimensional cube expansion method

类服务的空间分布差异,将研究区进一步细分为气候调节等冰冻圈服务亚区;在服务亚区的基础上,按照主导影响要素、供需关系类型、变化趋势类型三个共性特征角度进行跨尺度综合和归纳,形成冰冻圈服务小区。一级区划和二级区划共同着眼于研究冰冻圈服务多尺度分异规律,并且有着类似“主要矛盾”和“次要矛盾”的逻辑关系,三级区划则深入刻画冰冻圈服务的具体变化趋势与特征,展现出其现实性和潜在性地域分异规律。

5 结论与展望

纵观国际对于冰冻圈科学的研究仍以冰冻圈要素的自然供给、灾害效应等为主,但中国冰冻圈科学学者已深刻认识到冰冻圈科学的前沿已转向与社会经济的迫切需求相结合,从单一学科路线走向跨学科交叉互补研究。必须紧紧将冰冻圈相关研究置于地球表层系统科学的整体框架内考量,强调多学科交叉融合、多手段综合集成和新技术优先应用,开展冰冻圈多要素综合研究,深刻认识冰冻圈变化的影响,探索社会应对冰冻圈变化的适应对策。供给侧与需求侧的变化不断衍生出崭新的区划客体,也是促使区划方法、数据和手段不断创新的动力所在。随着全球气候的持续变暖,全球和区域尺度下冰冻圈服务的动态变化所造成的影响日益广泛而深远。本文提出的冰冻圈服务综合区划理论基础与方法体系如下:首先确定地域分异规律理论、人地关系地域系统理论、集合论和信息编码论等跨学科理论为基础,梳理空间识别与综合区划方法的研究进展;然后,构建面向综合区划研究的冰冻圈服务分类体系;进而,以供需均衡模型和服务最大化模型为指导,进行冰冻圈单项服务重要性空间识别和主导服务空间判别;最终,以三维魔方展开法为核心制定中国冰冻圈服务综合区划方案,将全国划分为多重空间层级、彼此独立完整、相互联系密切的冰冻圈服务单元。通过综合自然供给和人文需求因素且适应地区特色的冰冻圈服务空间识别与综合区划技术体系和方法流程,为冰冻圈区域可持续发展提供科技支撑服务,是促进冰冻圈科学与人文社会科学交叉融合、满足国家重大战略需求和合理利用冰冻圈服务的必由之路。

从研究内容和方向的角度看,时间概念在现有的区划研究中最易被忽略,大多数区划只针对一定时间段的平均状况开展。然而,气候变化和人类活动对冰冻圈要素及其相互关系产生明显影响^[44],基于时间序列平均数据反映长期状态的区划思路,在研究冰冻圈服务动态变化特征上的限制愈发明显^[45]。结合静态状态量与动态变化量,反映自然区域内要素的时变特征,多情景动态区划和人文自然要素耦合的区划将成为未来综合区划工作的主流^[42]。为实现冰冻圈服务动态情景区划,可考虑引用情景分析法(Scenario Analysis, SA)对现状和未来发展进行情景设定。基于对事实、假设和趋势分析,敏锐发现未来变化的趋势和避免偏高或偏低估计未来变化及其影响,从而形成不同的情景方案。

与此相对应,冰冻圈服务动态情景区划需要高精度、多尺度和长时序的数据支持。其中,气候变化情景数据可根据多领域间影响模型比较计划(The Inter-Sectoral Impact Model Inter-comparison Project, ISI-MIP)获取的经空间降尺度、偏差校正后的5套“典型浓度路径”(Representative Concentration Pathways, RCPs)情景下的全球气候模式(Global Climate Model, GCM)模拟结果,均来自于第五次耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5),结合不同共享社会经济路径(Shared Socio-economic Pathways, SSPs)下的人口、GDP、技术生产率、收入增长率以及社会发

展指标(如收入分配)等定量数据^[46-47],探讨1.5℃和2℃等不同温升阈值下气候系统的响应和冰冻圈服务的变化,遵循一致的方法制定不同情景下的冰冻圈服务综合区划方案,直观地演示、比较各种情景下的冰冻圈服务的空间分布变化情况,为经济调节措施、产业调整路径、生态保护措施等提供基础支撑^[48]。

展望未来,还应从如下方面深化冰冻圈服务综合区划的研究:

(1) 探索冰冻圈服务相容与互斥的空间组合问题。随着全球气温升高,冰冻圈各要素普遍退缩,冰冻圈服务整体上也表现出减弱趋势,如水资源供给服务在一定阈值范围内先增强、后不断减弱,其他大多数服务随气候变暖而持续减弱,表现出不同的变化轨迹。研究不同尺度下冰冻圈服务的协同和权衡关系,解决跨尺度转换的研究方法。

(2) 建立健全冰冻圈服务价值评估体系。采用货币量化等方法系统评估不同主导要素影响区的各类服务价值,旨在联通冰冻圈服务与市场价值体系。

(3) 揭示冰冻圈服务长时段演化特征。通过长时段多源异构数据分析,揭示不同冰冻圈服务的空间规模和比例关系及其演化动态,凝练冰冻圈服务数量组合和空间布局的演化规律和变换法则。

(4) 以空间结构分析为抓手优化综合区划方案。基于服务最大化理论,对冰冻圈服务重要性评价和主导服务判定结果进行空间结构分析,从结构优化的角度调整综合区划方案。

(5) 挖掘冰冻圈服务定量作用机制。提炼并探究区域发展过程中影响冰冻圈服务发育演化、空间布局等的关键因素,建立冰冻圈服务影响要素及作用机制的综合分析框架,剖析冰冻圈服务的作用过程与机理。

(6) 基于气候变化和冰冻圈变化情景,按照多层次、多尺度、多类型、多效应、多情景的研究框架,模拟近、中、远期不同时间尺度以及不同政策导向下的冰冻圈服务发展演化,制定立足现状、面向未来(如2030年和2050年)的精细化冰冻圈服务动态情景区划。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution to Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Barry R, Gan T. The Global Cryosphere: Past, Present, and Future. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [3] Marshall S J. The Cryosphere. Princeton: Princeton University Press, 2011.
- [4] Qin D H, Ding Y J, Xiao C D, et al. Cryospheric science: Research framework and disciplinary system. National Science Review, 2018, 5(2): 255-268.
- [5] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 649-655. [秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望. 应用气象学报, 2006, 17(6): 649-655.]
- [6] Xiao C D, Wang S J, Qin D H. A preliminary study of cryosphere service function and value evaluation. Advances in Climate Change Research, 2015, 6(Suppl.1): 181-187.
- [7] Mukherji A, Sinisalo A, Nüsser M, et al. Contributions of the cryosphere to mountain communities in the Hindu Kush Himalaya: A review. Regional Environmental Change, 2019, 1-16. Doi.org/10.1007/s10113-019-01484-w.
- [8] Yang Jianping, Ding Yongjian, Fang Yiping, et al. Research frame of vulnerability and adaptation for the cryosphere and its changes. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 517-529. [杨建平, 丁永建, 方一平, 等. 冰冻圈及其变化的脆弱性与适应研究体系. 地球科学进展, 2015, 30(5): 517-529.]
- [9] He Y, Wu Y F, Liu Q F. Vulnerability assessment of areas affected by Chinese cryospheric changes in future climate change scenarios. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4784-4790.
- [10] Wang Chenghai, Wang Lanzhi, Cui Yang. Snow cover of China during the last 40 years: Spatial distribution and

- interannual variation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 301-310. [王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 301-310.]
- [11] Jin Huijun, Lv Lanzhi, He Ruixia, et al. A new aridity-based classification of permafrost zones on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1049-1057. [金会军, 吕兰芝, 何瑞霞, 等. 基于气候干燥度的青藏高原多年冻土区分类新方案. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1049-1057.]
- [12] Zhang Lijuan, Chen Hong, Liu Dong, et al. Study of space-time distribution and risk division of snowstorm in Heilongjiang Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(4): 721-728. [张丽娟, 陈红, 刘栋, 等. 黑龙江省暴雪时空分布特征与发生风险研究. *冰川冻土*, 2011, 33(4): 721-728.]
- [13] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [14] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. *The Cryospheric Science*. Beijing: Science Press, 2017. [秦大河, 姚檀栋, 丁永健, 等. *冰冻圈科学概论*. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [15] Hinzman L D, Bettez N D, Bolton W R, et al. Evidence and implications of recent climate change in terrestrial regions of the Arctic. *Climatic Change*, 2005, 72(3): 251-298.
- [16] Zhang Z Q, Wu Q B. Thermal hazards zonation and permafrost change over the Qinghai-Tibet Plateau. *Nature Hazards*, 2012, 61(2): 403-423.
- [17] Fountain A G, Campbell J L, Schuur E A G, et al. The disappearing cryosphere: Impacts and ecosystem responses to rapid cryosphere loss. *Bioscience*, 2012, 62(4): 405-415.
- [18] Hodson A, Brock B, Pearce D, et al. Cryospheric ecosystems: A synthesis of snowpack and glacial research. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(11): 110201.
- [19] Mach K, Mastrandrea M. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [20] Wang Shijin, Zhao Jingdong. Potential evaluation and spatial development strategies of glacier tourism in China. *Geographical Research*, 2011, 30(8): 1528-1542. [王世金, 赵井东. 中国冰川旅游发展潜力评价及其空间开发策略. *地理研究*, 2011, 30(8): 1528-1542.]
- [21] Song Changqing. On paradigms of geographical research. *Progress in Geography*, 2016, 35(1): 1-3. [宋长青. 地理学研究范式的思考. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 1-3.]
- [22] Zheng Du. A Study on the regionality and regional differentiation of geography. *Geographical Research*, 1998, 17(1): 4-9. [郑度. 关于地理学的区域性和地域分异研究. *地理研究*, 1998, 17(1): 4-9.]
- [23] Huang Bingwei. Preliminary draft of China's comprehensive physiographic regionalization. *Acta Geographica Sinica*, 1958, 24(4): 348-365. [黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. *地理学报*, 1958, 24(4): 348-365.]
- [24] Zheng Du, Ge Quansheng, Zhang Xueqin, et al. Regionalization in China: Retrospect and prospect. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 330-344. [郑度, 葛全胜, 张雪芹, 等. 中国区划工作的回顾与展望. *地理研究*, 2005, 24(3): 330-344.]
- [25] Fan Jie. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201. [樊杰. 中国主体功能区划方案. *地理学报*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [26] Fang C L, Ma H T, Wang J. A regional categorization for "New-Type Urbanization" in China. *PloS One*, 2015, 10(8): 1-20.
- [27] Fang Chuanglin, Liu Haimeng, Luo Kui, et al. Comprehensive regionalization of human geography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 179-196. [方创琳, 刘海猛, 罗奎, 等. 中国人文地理综合区划. *地理学报*, 2017, 72(2): 179-196.]
- [28] Zheng Du, Wu Shaohong, Yin Yunhe, et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1475-1483. [郑度. 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿. *地理学报*, 2016, 71(9): 1475-1483.]
- [29] Hartshorne R. *Perspective on the Nature of Geography*. Beijing: The Commercial Press, 1997.
- [30] Mao Hanying. Theories and methods of optimal control of human-earth system: Commemoration of 100th anniversary of Academician Wu Chuanjun's birth. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 608-619. [毛汉英. 人地系统优化调控的理论方法研究. *地理学报*, 2018, 73(4): 608-619.]
- [31] Liu Yi. Preface to the special issue on Chinese man-land relationships in a new era. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1477-1484. [刘毅. 论中国人地关系演进的新时代特征: “中国人地关系研究”专辑序言. *地理研究*, 2018, 37(8): 1477-1484.]
- [32] Deng Wei. Discussion on mountain area resource and environment carrying capacity. *Geographical Research*, 2010, 29

- (6): 959-969. [邓伟. 山区资源环境承载力研究现状与关键问题. 地理研究, 2010, 29(6): 959-969.]
- [33] Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016). *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 266-276. [樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载力预警(2016版)的基点和科学技术方法进展. 地理科学进展, 2017, 36(3): 266-276.]
- [34] Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letter*, 2010, 5(1): 015101.
- [35] Yang Suiqiao, Yang Jianping, Wang Shijin, et al. Adaptive capacity evaluation of ecological-economic system to cryospheric change: A case study in the Mount Yulong. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 485-493. [杨岁桥, 杨建平, 王世金, 等. 生态—经济系统对冰冻圈变化的适应能力评价: 以玉龙雪山地区为例. 冰川冻土, 2012, 34(2): 485-493.]
- [36] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [37] Peng Jian, Du Yueyue, Liu Yanxu, et al. From natural regionalization, land change to landscape service: The development of integrated physical geography in China. *Geographical Research*, 2017, 36(10): 1819-1833. [彭建, 杜悦悦, 刘炎序, 等. 从自然区划、土地变化到景观服务: 发展中的中国综合自然地理学. 地理研究, 2017, 36(10): 1819-1833.]
- [38] Kahn M E. The climate change adaptation literature. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2016, 10(1): 166-178.
- [39] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [40] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [41] Yang D W, Cai J J, Hull V, et al. New road for telecoupling global prosperity and ecological sustainability. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(10): e01242.
- [42] Peng Jian, Mao Qi, Du Yueyue, et al. Research frontier and challenges of terrestrial system regionalization in China. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 121-129. [彭建, 毛祺, 杜悦悦, 等. 中国自然地域分区研究前沿与挑战. 地理科学进展, 2018, 37(1): 121-129.]
- [43] Zheng Rongbao, Liu Yihua, Dong Yuxiang, et al. Appraisal of land resources security in Guangzhou based on major function regionalization. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(6): 654-664. [郑荣宝, 刘毅华, 董玉祥, 等. 基于主体功能区划的广州市土地资源安全评价. 地理学报, 2009, 64(6): 654-664.]
- [44] Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(15): 8197-8207.
- [45] Wu Q B, Zhang Z Q, Liu Y Z. Long-term thermal effect of asphalt pavement on permafrost under an embankment. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60(3): 221-229.
- [46] Shi P J, Sun S, Wang M, et al. Climate change regionalization in China (1961-2010). *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(11): 2676-2689.
- [47] Wu Shaohong, Pan Tao, Liu Yanhua. Comprehensive climate change risk regionalization of China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 3-17. [吴绍洪, 潘韬, 刘燕华. 中国综合气候变化风险区划. 地理学报, 2017, 72(1): 3-17.]
- [48] Liu Xingcai, Tang Qihong, Yin Yuanyuan, et al. Regionalization of integrated environmental risk of China under future climate change. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4): 636-644. [刘星才, 汤秋鸿, 尹圆圆, 等. 气候变化下中国未来综合环境风险区划研究. 地理科学, 2018, 38(4): 636-644.]

Theories and methods on comprehensive regionalization of cryospheric services

LIN Haoxi^{1,2,3}, HUANG Jinchuan^{1,2}, XIAO Cunde⁴, QI Xiaoxiao¹, CHEN Yunqian⁵

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China; 4. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. Beijing National Day School, Beijing 100039, China)

Abstract: Cryosphere is one of the five most important spheres, which impacts the global climate system and has a close correlation with the sustainable development of the socio-economic system and the natural ecosystem. It serves as an important water source and solid water reservoir in cold and arid regions of China, the most developed country in terms of cryospheric in the middle and low latitude area. Widely distributed glacier, permafrost and snow cover not only have irreplaceable climatic effects, but also play a key role in guaranteeing economic development and ecosystem stability of the oasis in China's cold and arid regions. During the past decades, the studies in this field mainly focus on the adverse impacts of cryospheric; only a few are on cryospheric services and their profitability from socio-economic perspectives. There are even fewer studies on the comprehensive regionalization of cryospheric services. It becomes increasingly prominent to find the way to identify and quantify the structure of cryospheric services and their constituent elements, while we strengthen the scientific understanding of the spatial heterogeneity, complexity, and characteristics of cryospheric services. According to the development needs of the cryospheric science, this paper provides the research on comprehensive regionalization of cryospheric services and hopes to make necessary adjustments to the mutual promotion and coercion relationship of the cryospheric services. On one hand, it meets the major strategic needs of the Belt and Road Initiative, and considers the preparation for the Winter Olympics and the ecological progress; on the other hand, it contributes to mitigating risks and making reasonable use of cryospheric services. Firstly, a classification system is established for cryospheric services. Then, guided by the supply and demand equilibrium model, an importance evaluation of each cryosphere service is carried out, including supply-side importance evaluation, demand-side importance evaluation and the "developmental negative list" for amendment. Afterward, the location entropy algorithm is employed to determine the spatial distribution of the major cryosphere service under the guidance of service maximization model. Finally, the three-dimensional cube expansion method is applied into the comprehensive regionalization of cryospheric services, which divides the study area into multiple spatial levels, such as relatively independent, complete and organically linked units. To sum up, a comprehensive regionalization research system that integrates the natural supply and human demand and suits cryosphere characteristics is constructed. This paper aims at setting up a bridge between the supply of cryospheric services and the needs of social and economic development. It provides a reference for solving one of the key and urgent scientific issues regarding cryospheric science and the sustainable development of the man-earth areal system.

Keywords: theory; method; service; comprehensive regionalization; cryosphere