

赵智聪, 王沛. 中国自然保护区连通性的重要意义与关键议题 [J]. 风景园林, 2022, 29 (7) : 12-17.

中国自然保护区连通性的重要意义与关键议题

Significance and Key Issues of Protected Area Connectivity in China

赵智聪 王沛
ZHAO Zhicong, WANG Pei



中图分类号: TU985
文献标识码: A
文章编号: 1673-1530(2022)07-0012-06
DOI: 10.14085/j.fjyl.2022.07.0012.06
收稿日期: 2022-01-02
修回日期: 2022-05-09

赵智聪 / 女 / 博士 / 清华大学国家公园研究院院长助理 / 清华大学建筑学院助理教授 / 本刊特约编辑 / 研究方向为国家公园与自然保护地、风景园林遗产、世界遗产地规划与保护管理
ZHAO Zhicong, Ph.D., is assistant director of the Institute for National Parks, Tsinghua University, an assistant professor in the School of Architecture, Tsinghua University, and a contributing editor of this journal. Her research focuses on planning, protection and management of national park and protected area, landscape heritage and world heritage sites.

王沛 / 男 / 清华大学建筑学院在读博士研究生 / 研究方向为国家公园与自然保护地、风景园林遗产、荒野保护
WANG Pei is a Ph.D. candidate in the School of Architecture, Tsinghua University. His research focuses on national park and protected area, landscape heritage and wilderness protection.

摘要: 自然保护区是保护生物多样性、应对和减缓气候变化影响的关键区域, 其功能的有效发挥有赖于连通性良好的自然保护区网络的形成。通过对生境破碎化和气候变化危机背景下自然保护区连通性的重要意义进行阐述, 辨析自然保护区连通性相关概念, 梳理相关研究和实践, 提出中国自然保护区连通性的概念, 并从概念层次、生态对象、空间范围和时间范围 4 个层面进行辨析, 探讨自然保护区连通性与国土空间规划, 自然保护区连通性与气候变化, 自然保护区连通性评价体系、监测体系、提升路径和保障机制 6 项关键议题。

关键词: 生物多样性保护; 自然保护区; 连通性; 气候变化; 生态廊道; 国土空间规划; 生态保护网络

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 51708323, 51978365)

Abstract: Protected areas are essential for biodiversity conservation and climate change mitigation, and the effective functioning thereof depends on the establishment of a well-connected protected area network. This research expounds on the importance of protected area connectivity in contexts of habitat fragmentation and climate change crisis. After differentiating and analyzing concepts and sorting out research and practice related to protected area connectivity, the research proposes the concept of protected area connectivity in China from the four aspects of the conceptual level, ecological object, space scope and time scope. It discusses six critical issues of protected area connectivity in China, including the relationship between protected area connectivity and territorial spatial planning, relationship between protected area connectivity and climate change, and the evaluation system, monitoring system, improvement path and guarantee mechanism for protected area connectivity.

Keywords: biodiversity conservation; protected area; connectivity; climate change; ecological corridor; territorial spatial planning; ecological conservation network

Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 51708323, 51978365)

连通性 (connectivity) 是一个在生态学、自然保护和生态修复领域广泛使用的术语, 例如景观连通性 (landscape connectivity)、生态连通性 (ecological connectivity)、栖息地连通性 (habitat connectivity)、种群连通性 (population connectivity)、基因连通性 (genetic connectivity) 和河流连通性 (river connectivity) 等。人类活动导致全球范围内栖息地和自然生态系统的损

失和破碎化, 扰乱了生态流动、物种迁移和种群之间的基因交换。对此, 自然保护者努力维持和恢复核心栖息地、高自然度土地 (relatively natural land) 和自然保护区的连通性^[1]。自然保护区是全球公认的保护生物多样性的核心措施^[2-3], 而连通性是影响自然保护区体系有效性的核心要素^[4-5], 因此提升自然保护区的连通性是应对和减缓气候变化对生物多样性影响的关键

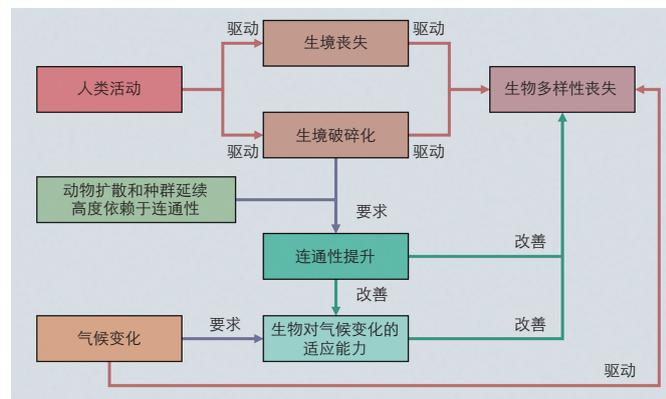
措施。“爱知生物多样性保护目标”（简称“爱知目标”）和尚在讨论中的“2020年后全球生物多样性框架”都针对“连通性良好的自然保护地”提出了相应目标，自然保护地连通性的重要意义在国际层面已经成为共识。本研究尝试在辨析连通性相关概念、梳理国内外自然保护地连通性相关研究和实践的基础上，提出中国自然保护地连通性的概念与关键议题。

1 提升中国自然保护地连通性的重要意义与紧迫性

1.1 连通性的重要意义

对于各类生态系统，连通性的重要性已得到学界的广泛认同。在保护生物多样性与应对气候变化方面，连通性的重要作用日益凸显（图 1）。人类活动导致的生境破碎化是对生物多样性的主要威胁之一^[6]，迫切需要采取保护和恢复措施以提高景观连通性，降低物种灭绝率并维持生态系统服务功能^[7]。连通性可以促进物种转移并改变其分布范围，增强物种的气候适应力^[8-9]。然而，在气候变化的情况下，对于部分物种，相比于生境面积，生境连通性的损失速度更快，因此保护生境连通性比保护生境面积更重要^[10-11]，保持和提升连通性对于实现生物多样性的长期有效保护至关重要^[12-13]。从荒野地保护的视角而言，在破碎化的生境中保护荒野地连通性对于维持生态过程具有重要意义^[14]，连通性是再野化的 3 个核心要素之一^[15]。在河流保护领域，则强调维持河流的自然流淌状态，其核心是维持河流水文连通性以确保河流的生态系统功能不受影响^[16]。对于海洋生态系统，许多学者呼吁，提升连通性应该成为有效保护海洋的重要战略^[17-18]。

提高自然保护地连通性已经成为气候变化背景下全球生物多样性保护、遏制人类正面临的第六次物种灭绝的关键而紧迫的策略。2010 年，在《生物多样性保护公约》（*Convention on Biological Diversity, CBD*）缔约国共同制定的“爱知目标”中明确指出了自然保护地连通性的重要性，其目标 11 要求“到 2020 年，全球陆域面积的 17% 和海域面积的 10%”应以某种形式纳入保护范围，并明确提



1 生境破碎化和气候变化背景下连通性对生物多样性保护的作用
Role of protected area connectivity in biodiversity conservation in the context of habitat fragmentation and climate change

出了自然保护地应形成“连通性良好的体系”（well connected systems）^①。国际上正在讨论的“2020年后全球生物多样性框架”初稿将这一目标从 17% 和 10% 统一提升到 30%，并明确提出：到 2030 年，自然系统的连通性至少增加 5%；到 2050 年，自然系统的连通性至少增加 15%^②。

1.2 提升自然保护地连通性的紧迫性

Saura 等对全球自然保护地连通性进行了评估，其结果显示，在 2018 年，全球具有良好连通性的陆地自然保护地覆盖了全球 7.5% 的陆地面积^[19]，该评估被联合国环境规划署（United Nations Environment Programme, UNEP）和世界自然保护联盟（International Union for Conservation of Nature, IUCN）联合发布的《2018 年保护地球报告》所采纳。这一评估结果远低于“爱知目标”提出的 17% 和“2020 年后全球生物多样性框架”初稿提出的 30% 的愿景。学术界呼吁，全世界必须采取一致的方式来保护生态连通性，从而实现功能性生态保护网络^[20]。

中国自然生境的连通性亦不容乐观。由于集约化农业生产、聚落建设和基础设施建设等原因，中国东部的荒野地破碎化程度可能是世界上最严重的^[20]；中国潜在自然流淌河流仅占全国河流总长度的 6.85%^[19]。长期以来，中国自然保护地破碎化、孤岛化现象亦十分严重^[21]。《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》指出，需要解决保护管理分割、保护地破碎和孤岛化问题，实现对自然生态系统的整体保护；《关于进一步加强生物多样性保护的意見》明确指出，

应因地制宜科学构建促进物种迁徙和基因交流的生态廊道，着力解决自然景观破碎化、保护区孤岛化、生态连通性降低等突出问题。根据 Saura 等的研究，中国具有良好连通性的陆地自然保护地覆盖了国土陆地面积的 8%~12%^[19]，低于“爱知目标”中 17% 的要求。因此，提高中国自然保护地连通性的相关研究和实践亟待开展。

2 中国自然保护地连通性概念辨析

2.1 连通性相关概念

在讨论连通性概念的相关文献中，景观连通性和生态连通性是最常使用的 2 个概念。虽然它们的定义有所差别，但回顾其出现的历史和演进过程可以发现，这种差别是在某一阶段由于研究的需要，在特定语境下产生的，并不影响人们对于自然界本身“连通”这一属性或特征的认识。同时，这种差别也反映出人们从不同的视角去解释自然界本身对连通的需求，进而有助于更全面和更谨慎地理解这一特征。近年来，许多研究又提出了气候连通性（climate connectivity）^[8, 22]的概念，进一步扩大了连通性概念的范畴。本质上，连通性是对自然界中的一组在空间和时间上不同的实体之间关系的结构化，是这些实体之间依赖性的体现。由此可见，探索这些自然实体之间的关系和依赖性的本质是连通性研究的基础^[23]。

2.1.1 景观连通性

景观连通性是景观生态学的核心概念之一。在景观生态学的起步阶段，学者们关注景观元素之间是如何发生联系的，在研究上

述问题的过程中, 1984年Merriam最早提出景观连通性的概念^[24]; 同年, Baudry等提出景观连通度(landscape connectedness)的概念^[25]; 1986年, Forman和Godron将景观连通性定义为描述景观中廊道或基质如何连接和延续的一种测度指标^[26]; 1993年, Taylor等明确将景观连通性定义为景观阻碍或促进生物在资源斑块间运动的程度, 并认为景观连通性是景观结构的核心要素之一^[27], 这一定义得到了学界的广泛认可。随着景观生态学的发展, 学界不再区分连通性(connectivity)和连通度(connectedness), 而采用结构连通性(structural connectivity)和功能连通性(functional connectivity)来区分景观结构和景观功能2个层面的连通性。前者主要关注景观结构, 与生物体的行为和特征没有直接联系; 后者则关注生物体对单个景观元素以及整个景观的空间结构的行为反应, 认为同一景观对于不同物种甚至是同一物种在不同的时间具有不同的功能连通性^[28]。

2.1.2 生态连通性

《保护迁徙野生动物物种公约》(Convention on Migratory Species, CMS)将生态连通性定义为不受阻碍的物种运动(unimpeded movement of species)和维持地球生命的自然过程的流动(flow of natural processes that sustain life on earth)^[29]。该定义被IUCN 2020年出版的《通过生态网络和生态廊道保护连通性指南》(Guidelines for Conserving Connectivity Through Ecological Networks and Corridors)所采纳^[12]。该指南还明确规定了物种生态连通性、物种功能连通性和物种结构连通性的概念, 并将之作为生态连通性的补充。上述定义强调了生态连通性的功能属性, 将连通性与物种运动和自然过程的流动等同, 而弱化了结构属性, 认为结构连通性是对功能连通性的估算。

2.1.3 气候连通性

气候连通性是指随着气候变化, 景观在多大程度上允许物种迁移到与现有栖息地气候接近的适宜栖息地^[30-31]。这一概念是在全球气候变化的背景下发展起来的, 本质上属于景观连通性的内容。由于气候变化会对物种的分布范围产生强烈的影响, 而生境破碎化会

导致物种分布转移的失败, 因此气候连通性对于生物多样性保护的重要性日益提升^[8]。

2.1.4 生态廊道和生态保护网络

廊道和连通性具有紧密的联系, 但又是不同的概念。廊道被普遍认为是与斑块和基质并列的景观结构的基本组成单元, 但又存在将其概念从结构层面拓展到功能层面的观点, 即认为廊道是景观中一切促进个体移动、促进基因交换和支持生态过程的空间^[32]。生态廊道(ecological corridor)的保护和建设是被广泛使用的对连通性进行保护和提升的有效措施^[32-33]。IUCN将生态廊道定义为可通过对其进行长期管治来维持或恢复有效的生态连通性的明确界定的地理空间; 将生态保护网络(ecological network for conservation)定义为由核心生境(自然保护区、其他有效的区域保护措施和其他完整的自然区域)组成并由生态廊道连接的系统, 通常在破碎化的系统中建立这样的系统以维护或恢复生物多样性^[12]。生态廊道和生态网络也常应用于生态修复、景观和城市规划设计领域, 是较为宽泛的2个概念。

2.2 中国自然保护区连通性概念

在辨析连通性相关概念的基础上, 本研究提出中国自然保护区连通性的定义: 自然保护区(及周围景观)在结构和功能上维持自然保护区和周围景观中物种运动和自然过程流动的程度。对这一定义可从概念层次、生态对象、空间范围和时间范围4个层面来理解。

1) 在概念层次上, 包括结构和功能2个层次, 结构连通性是功能连通性的基础, 功能连通性是结构连通性的目标。2) 在生态对象上, 包括两大对象: 物种运动和自然过程流动。物种运动是指群落、种群、个体、基因、配子和繁殖体在空间上的运动; 自然过程流动是指可以维持生命过程的非生物物质在空间中的移动, 例如河流流淌、风等。3) 在空间范围上, 包括5个范围: 自然保护区内部、自然保护区与周围景观、自然保护区之间、自然保护区体系、自然保护区体系与所在景观整体。4) 在时间范围上, 自然保护区连通性面向当前、气候变化过程中以及未来任意时刻。

需要注意的是, 自然保护区连通性不等

同于物种运动和自然过程流动, 而是自然保护区维持这2种生态对象的程度, 是自然保护区的属性。本研究提出的这一定义强调自然保护区连通性不仅限于保护地体系内部, 而是需要在较长的时间范围内、较多层次的空间尺度上考虑的概念。

另外, 连通性和完整性具有紧密的联系, 有学者认为连通性是完整性的组分, 保护连通性是保护完整性的重要手段^[34]。在研究中, 要明确连通性与完整性、原真性等重要概念之间的关系, 确定连通性在中国自然保护区体系建设中的定位, 明确生态廊道与自然保护区体系的关系。

3 自然保护区连通性的研究和实践

3.1 自然保护区连通性的研究

连通性研究是基于对连通性的测量、模拟和分析而展开的。连通性测量可以采用对物种个体的无线电追踪、GPS定位等方法, 也可通过种群基因分析来间接测量; 在大尺度的研究中, 则往往通过近邻分析、扩散概率函数、最小成本路径分析、电流理论模型、空间结构扩散或基于个体的模型进行模拟; 而分析连通性的数学方法主要包括图论、矩阵理论和微分方程^[23]。上述研究的主要目标可以分为2类: 一是进行连通性评价; 二是进行连通性制图以识别潜在廊道或连通性保护优先区。

1) 在连通性评价方面, 衍生出多种基于图论的景观指数。有学者发现2014—2021年的237篇连通性评价研究文献中使用了118种指数^[35]。2) 连通性制图主要分为2类: 一类旨在连通单一物种或多个焦点物种(focal-species)的栖息地; 另一类旨在连通高生态完整性(高自然度)的土地^[36]。最小成本路径分析和电流理论模型被广泛应用于连通性制图研究中^[37], 基于电流模型的Omniscape软件实现了对全域景观连通性的模拟^[38]。

随着人们对连通性在保护生物多样性、应对气候变化和维护国土生态安全方面重要作用的认识不断加强, 对自然保护区连通性的评价研究和制图研究也日益增多, 包括了从全球层面到自然保护区单体的各空间尺度的研究。

在全球研究层面, Saura 团队在对全球自然保护地连通性评价的基础上, 讨论了全球自然保护地连通性的变化趋势^[39]。Dinerstein 团队提出旨在扭转生物多样性丧失并稳定气候的全球生态安全网络, 并识别了全球范围的野生动物廊道和气候廊道^[40]。

在洲域和跨国层面, 欧洲和北美洲开展的连通性研究较多。在欧洲, 开展的研究主要有欧盟自然 2000 保护网络 (Natura 2000) 中毗邻国家边界的保护地群的连通性评价^[41]、欧洲森林景观连通性的变化趋势分析^[42]、欧洲森林气候连通性分析等^[39]。在北美洲, 近年来开展了一系列洲域尺度的生态廊道构建和气候连通性研究^[43-45]。

在国家层面, 世界上诸多国家已经开展了全境的自然保护地或生态保护类用地的连通性评价和廊道建设研究。美国开展了大量的研究, 如全境大型自然保护地间生态廊道识别^[46]、高自然度土地间生态廊道识别^[47]、高自然度土地间气候连通性评价及气候廊道识别等^[48]。

在区域层面, 研究主要关注自然保护地单体之间的连通性, 强调在区域范围内构建生态廊道的重要性。研究可大体分为 2 类: 1) 针对关键物种或特殊生态系统展开研究, 如欧洲阿尔卑斯山区域针对当地特有种的自然保护地连通性研究^[49]、中国三峡大坝地区豹类栖息地连通性研究^[50]、美国索诺兰沙漠地区特殊生态系统连通性研究^[51]、巴西大西洋沿岸森林连通性研究等^[52]; 2) 在物种监测数据缺乏的情况下, 关注高自然度土地之间的结构连通性和生态廊道模拟, 如美国西部基于连通性的自然保护优先区识别^[53]、中国大太行山地区荒野地网络构建^[36]等。

在自然保护地单体层面, 连通性研究关注某些关键物种的迁徙或运动需求, 基于物种监测数据进行连通性评价和廊道模拟, 或针对特定自然过程进行连通性评价, 如加拿大国家公园灰熊和黑熊的基因连通性分析^[54]、印度卡兹兰加国家公园基于物种监测数据的生态廊道有效性分析^[55]。中国在这一尺度的连通性研究数量较多, 例如钱江源国家公园试点区连通性评价^[56]、大熊猫自然保护区生态

廊道识别^[57]、莫莫格国家级自然保护区的地表水文连通性评估^[58]等。

在连通性研究上, 中国缺乏国家尺度或考虑气候变化方面的研究。虽然已有学者模拟了中国生态保护优先区之间的生态廊道^[59], 但较为粗略, 尚未在全国尺度针对自然保护地进行连通性评估或生态廊道模拟。

3.2 自然保护地连通性的实践

自 20 世纪 90 年代以来, 国际上陆续开展了许多大尺度连通性保护行动, 例如 1990 年中美洲的 Paseo Pantera 项目、1991 年北美洲的 Wildland 项目^[60]。1993 年, 著名的黄石到育空保护倡议 (Yellowstone to Yukon Conservation Initiative, Y2YCI) 提出, 致力于实现连接从美国黄石地区到加拿大育空地区景观的宏大构想。黄石到育空 (Y2Y) 范围内现有约 700 个自然保护区和 11 个国家公园, 直线距离长达约 3 200 km; Y2YCI 组织和 467 个合作伙伴合作, 建立多元保护尺度体系和生态廊道, 有效提高了该地区的生态完整性和连通性, 被认为是全球大尺度自然景观连通性保护的先驱和典范^[60]。

IUCN 连通性保护专家组收集了 25 项陆地连通性实践典型案例^[12], 专家组下设的海洋连通性工作组收集了 15 项海洋连通性保护实践案例^[61], 美国大型景观保护中心 (Center for Large Landscape Conservation) 在这些案例的基础上将大尺度连通性保护案例库扩充到 133 项^[62]。这些项目都在不断印证连通性保护与提升的重要价值。

中国正在进行的国家公园建设在一定程度上体现了对连通性的保护^[60], 许多区域尺度的针对特定物种的连通性实践探索正在进行。例如“滇金丝猴全境保护网络”项目、“带豹回家”项目等。然而中国现有的连通性保护实践在面积上与国际大尺度连通性保护实践仍有差距, 缺乏大尺度和国家尺度的自然保护地连通性保护和生态廊道建设的系统性研究与实践。

4 中国自然保护地连通性研究和实践的关键议题

基于连通性对生物多样性保护和应对气

候变化危机的重要功能, 以及提升中国自然保护地连通性的重要性和紧迫性, 本研究围绕中国自然保护地连通性的概念, 结合中国连通性研究和实践现状, 提出中国自然保护地连通性研究和实践的 6 项关键议题。

4.1 自然保护地连通性与国土空间规划

中国正在进行“国家公园体制建设”“以国家公园为主体的自然保护地体系建设”, 以及包括 3 条控制线划定在内的“国土空间规划改革”。一系列涉及空间策略的改革措施, 既是中国生态文明建设的重要内容, 也将为中国生物多样性保护带来持续而深刻的影响。自然保护地规划应成为贯穿国土空间规划三级体系的专项规划^[63], 自然保护地内部连通性应被纳入自然保护地规划的内容中, 而其他 4 个空间范围 (自然保护地与周围景观、自然保护地之间、自然保护地体系、自然保护地体系与所在景观整体) 的自然保护地连通性需要自然保护地周围景观的参与, 需要生态廊道的建设, 与国土空间全域相关。如何在国土空间规划中纳入这 4 个空间范围的自然保护地连通性的内容, 仍需进一步明确。

4.2 自然保护地连通性与气候变化

气候变化导致物种分布范围的转移, 这必然要求对自然保护地和周围景观之间的连通性有所保障, 甚至需要对自然保护地边界进行适应性调整, 以促进物种的成功转移。此外, 气候变化对连通性的影响机制、影响程度, 连通性对气候适应性的作用仍需进一步的定量研究。在此基础上需要评估气候变化下连通性损失风险, 进而确定气候变化下维持连通性的应对策略。

4.3 自然保护地连通性评价体系

建立统一的自然保护地连通性评价体系, 包括评价机制、评价方法和评价指标等内容, 可适用于不同类型的自然保护地, 以对自然保护地连通性在 5 个空间范围 (自然保护地内部、自然保护地与周围景观、自然保护地之间、自然保护地体系、自然保护地体系与所在景观整体) 内进行评价。其中, 评价指标分为对结构连通性进行评估的结构指标和基于对功能连通性进行度量的功能指标。结构指标可包括保护地空间布局连通性、关键物

种栖息地连通性、荒野地连通性等；功能指标应基于对连通性的直接或间接度量，例如关键物种种群连通性、关键物种基因连通性、水文流动连通性等。当前，在国家尺度进行自然保护地连通性评价成为十分紧迫的任务，这一评价是指导中国自然保护地连通性提升的基础，也是自然保护地原真性和完整性研究的重要内容^[64]。

4.4 自然保护地连通性监测体系

自然保护地连通性服务于物种运动和自然过程流动这2个生态对象，对这2个生态对象本身进行监测和研究，掌握二者的运行规律，有利于加深对连通性的认识，完善结构连通性和功能连通性的评估方法。而对二者的监测结果，还可以反映自然保护地的建设水平。截至2019年底，中国已经建立10多个区域性或全国性红外相机监测网络或监测平台，布设红外相机约2万台，但目前还存在空间分布不均匀、缺乏系统规划等问题^[65]，生物多样性监测往往仅限于自然保护地内部。对此，需要构建涵盖自然保护地连通性对应的5个空间范围内的物种运动和自然过程流动的监测体系，加强对自然保护地之间的其他区域的监测。

4.5 自然保护地连通性提升路径

在自然保护地连通性评价和监测的基础上，从国家自然保护地体系、区域自然保护地体系和自然保护地单体3个空间尺度，制定自然保护地连通性提升路径。提升路径包括空间布局和技术标准2方面：在空间布局上，应通过自然保护地空间拓展、自然保护地分区优化、生态廊道建设等策略，加强自然保护地的结构连通性；在技术标准上，应确定生态廊道、生物通道的建设方法和标准，保障自然保护地功能连通性的实现。

4.6 自然保护地连通性保障机制

中国现有的连通性研究往往注重对连通性的评价和对生态廊道的空间模拟，缺乏对连通性相关体制机制的研究。自然保护地连通性是关乎保护地数量和质量双重目标的重要指标，需要通过政策制度的顶层设计，来保障并持续提高自然保护地连通性，这也是需要关注的关键议题之一。以中国生态保护

修复制度、生态红线保护制度、国土空间规划制度、自然资源资产产权制度等一系列生态文明制度建设为契机，通过体制机制保障，将自然保护地连通性研究成果迅速并全面地转化为政策制度和实践方案，激励包括自然保护地管理人员、自然保护地周边社区、自然保护地之间的关键区域的城乡居民，乃至社会公众共同关注自然保护地的连通性问题，全面开展连通性保护和修复实践，从而进一步提升中国自然保护地体系的系统性和有效性。

5 结语

中国自然保护地体系的整合优化正值窗口期，连通性是关系到自然保护地空间格局是否完善、保护功能能否充分发挥的关键指标。本研究提出的6项关键议题中，自然保护地连通性与国土空间规划、自然保护地连通性与气候变化是2项需要长期关注并不断推进研究与实践的议题；自然保护地连通性评价体系、监测体系的建立是当务之急，是系统性掌握自然保护地连通性现状水平的必然要求，也是在各项规划与实践中逐步落实连通性提升路径的基本前提；同时，自然保护地连通性提升的路径将随着技术进步、实践积累增加、地带性要求逐步明确而丰富起来，连通性保护与提升的保障体制机制设计需要同步推进与不断加强。

注释 (Notes):

- ① 参见 CBD 网站: <https://www.cbd.int/sp/targets/>。
② 参见 CBD 网站: <https://www.cbd.int/doc/c/abb5/591f/2e46096d3f0330b08ce87a45/wg2020-03-03-en.pdf>。

参考文献 (References):

[1] BELOTE T, BEIER P, CREECH T, et al. A Framework for Developing Connectivity Targets and Indicators to Guide Global Conservation Efforts[J]. *Bioscience*, 2020, 70(2): 122-125.
[2] PIMM S L, JENKINS C N, LI B B. How to Protect Half of Earth to Ensure It Protects Sufficient Biodiversity[J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): eaat2616.
[3] CHAPE S, HARRISON J, SPALDING M, et al. Measuring the Extent and Effectiveness of Protected Areas as an Indicator for Meeting Global Biodiversity Targets[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1454): 443-455.

[4] BAUDUIN S, CUMMING S G, ST-LAURENT M-H, et al. Integrating Functional Connectivity in Designing Networks of Protected Areas Under Climate Change: A Caribou Case-Study[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(9): e0238821.
[5] CARR M H, ROBINSON S P, WAHLE C, et al. The Central Importance of Ecological Spatial Connectivity to Effective Coastal Marine Protected Areas and to Meeting the Challenges of Climate Change in the Marine Environment[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2017, 27(S1): 6-29.
[6] PASCUAL-HORTAL L, SAURA S. Comparison and Development of New Graph-Based Landscape Connectivity Indices: Towards the Prioritization of Habitat Patches and Corridors for Conservation[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
[7] HADDAD N M, BRUDVIG L A, CLOBERT J, et al. Habitat Fragmentation and Its Lasting Impact on Earth's Ecosystems[J]. *Science Advances*, 2015, 1(2): 1500052.
[8] KEELEY A T, ACKERLY D, CAMERON D R, et al. New Concepts, Models, and Assessments of Climate-Wise Connectivity[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(7): 073002.
[9] LITTLEFIELD C E, MCRAE B H, MICHALAK J L, et al. Connecting Today's Climates to Future Climate Analogs to Facilitate Movement of Species Under Climate Change[J]. *Conservation Biology*, 2017, 31(6): 1397-1408.
[10] LIANG J C, DING Z F, JIANG Z G, et al. Climate Change, Habitat Connectivity, and Conservation Gaps: A Case Study of Four Ungulate Species Endemic to the Tibetan Plateau[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(4): 1071-1087.
[11] GRANDE T O, AGUIAR L M S, MACHADO R B. Heating a Biodiversity Hotspot: Connectivity is More Important than Remaining Habitat[J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(3): 639-657.
[12] HILTY J, WORBOYS G L, KEELEY A, et al. Guidelines for Conserving Connectivity Through Ecological Networks and Corridors[M]//IUCN WCPA. Best Practice Guidelines for Protected Area Managers Series (No. 30). Gland: IUCN, 2020.
[13] GROSS J E, WATSON J E M, WELLING L A, et al. Adapting to Climate Change: Guidance for Protected Area Managers and Planners[M]//IUCN WCPA. Best Practice Guidelines for Protected Area Managers Series (No. 24). Gland: IUCN, 2016.
[14] 曹越, 杨锐. 国际荒野地保护实践评析: 基于荒野制图、系统性与连通性的视角[J]. *中国园林*, 2020, 36(6): 6-12.
[15] CARVER S, CONVERY I, HAWKINS S, et al. Guiding Principles for Rewilding[J]. *Conservation Biology*, 2021, 35(13): 1882-1893.
[16] 张益章, 周语夏, 刘海龙. 国土尺度河流干扰度评价与空间分布制图研究[J]. *风景园林*, 2020, 27(8): 10-17.
[17] GOETZE J S, WILSON S K, RADFORD B, et al. Increased Connectivity and Depth Improve the Effectiveness of Marine Reserves[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(15): 3432-3447.
[18] MAGRIS R A, PRESSEY R L, WEEKS R, et al. Integrating Connectivity and Climate Change into Marine Conservation Planning[J]. *Biological Conservation*, 2014, 170: 207-221.
[19] SAURA S, BERTZKY B, BASTIN L, et al. Protected Area Connectivity: Shortfalls in Global Targets and Country-Level Priorities[J]. *Biological Conservation*, 2018, 219: 53-67.
[20] CAO Y, CARVER S, YANG R. Mapping Wilderness

- in China: Comparing and Integrating Boolean and WLC Approaches[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 192: 103636.
- [21] 欧阳志云, 杜傲, 徐卫华. 中国自然保护地体系分类研究[J]. *生态学报*, 2020, 40 (20) : 7207-7215.
- [22] MCGUIRE J L, LAWLER J J, MCRAE B H, et al. Achieving Climate Connectivity in a Fragmented Landscape[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(26): 7195-7200.
- [23] KOOL J T, MOILANEN A, TREML E A. Population Connectivity: Recent Advances and New Perspectives[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(2): 165-185.
- [24] MERRIAM G. Connectivity: A Fundamental Ecological Characteristic of Landscape Pattern[C]// IALE. Proceedings of the First International Seminar of the International Association of Landscape Ecology. Roskilde: Roskilde University Centre, 1984.
- [25] BAUDRY J, MERRIAM H G. Connectivity and Connectedness: Functional Versus Structural Patterns in Landscapes[C]//Münstersche Geographische Arbeiten. Connectivity in Landscape Ecology, Proceedings of the Second International Seminar of the International Association of Landscape Ecology. Paderborn: Ferdinand Schöningh, 1988.
- [26] FORMAN R T T, GODRON M. *Landscape Ecology*[M]. New York: Wiley, 1986.
- [27] TAYLOR P D, FAHRIG L, HENEIN K, et al. Connectivity is a Vital Element of Landscape Structure[J]. *Oikos*, 1993, 68(3): 571-573.
- [28] KINDLMANN P, BUREL F. Connectivity Measures: A Review[J]. *Landscape Ecology*, 2008, 23(8): 879-890.
- [29] CMS. Improving Ways of Addressing Connectivity in the Conservation of Migratory Species[EB/OL]. (2017-12-14) [2021-11-03]. <https://www.cms.int/en/document/improving-ways-addressing-connectivity-conservation-migratory-species-0>.
- [30] HAN Q, KEEFFE G, CULLEN S. Climate Connectivity of European Forests for Species Range Shifts[J]. *Forests*, 2021, 12(7): 940.
- [31] CARROLL C, PARKS S A, DOBROWSKI S Z, et al. Climatic, Topographic, and Anthropogenic Factors Determine Connectivity Between Current and Future Climate Analogs in North America[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5318-5331.
- [32] CHETKIEWICZ C-L B, ST CLAIR C C, BOYCE M S. Corridors for Conservation: Integrating Pattern and Process[J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2006, 37(1):317-342.
- [33] GILBERT-NORTON L, WILSON R, STEVENS J R, et al. A Meta-Analytic Review of Corridor Effectiveness[J]. *Conservation Biology*, 2010, 24(3): 660-668.
- [34] 何思源, 苏杨. 原真性、完整性、连通性、协调性概念在中国国家公园建设中的体现[J]. *环境保护*, 2019, 47 (3) : 28-34.
- [35] HASHEMI R, DARABI H. The Review of Ecological Network Indicators in Graph Theory Context: 2014-2021[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2022, 16(2): 1-24.
- [36] CAO Y, YANG R, CARVER S. Linking Wilderness Mapping and Connectivity Modelling: A Methodological Framework for Wildland Network Planning[J]. *Biological Conservation*, 2020, 251: 108679.
- [37] ZHANG J J, JIANG F, CAI Z Y, et al. Resistance-Based Connectivity Model to Construct Corridors of the Przewalski's Gazelle (*Procapra Przewalskii*) in Fragmented Landscape[J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1656.
- [38] LANDAU V A, SHAH V B, ANANTHARAMAN R, et al. Omniscape.jl: Software to Compute Omnidirectional Landscape Connectivity[J]. *The Journal of Open Source Software*, 2021, 6(57): 2829.
- [39] SAURA S, BERTZKY B, BASTIN L, et al. Global Trends in Protected Area Connectivity from 2010 to 2018[J]. *Biological Conservation*, 2019, 238: 108183.
- [40] DINERSTEIN E, JOSHI A, VYNNE C, et al. A "Global Safety Net" to Reverse Biodiversity Loss and Stabilize Earth's Climate[J]. *Science Advances*, 2020, 6(36): eabb2824.
- [41] OPERMANIS O, MACSHARRY B, AUNINS A, et al. Connectedness and Connectivity of the Natura 2000 Network of Protected Areas Across Country Borders in the European Union[J]. *Biological Conservation*, 2012, 153: 227-238.
- [42] SAURA S, ESTREGUIL C, MOUTON C, et al. Network Analysis to Assess Landscape Connectivity Trends: Application to European Forests (1990–2000)[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 407-416.
- [43] BARNETT K, BELOTE R T. Modeling an Aspirational Connected Network of Protected Areas Across North America[J]. *Ecological Applications*, 2021, 36(1): e02387.
- [44] STRALBERG D, CARROLL C, NIELSEN S E. Toward a Climate-Informed North American Protected Areas Network: Incorporating Climate-Change Refugia and Corridors in Conservation Planning[J]. *Conservation Letters*, 2020, 13(4): e12712.
- [45] PARKS S A, CARROLL C, DOBROWSKI S Z, et al. Human Land Uses Reduce Climate Connectivity Across North America[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(5): 2944-2955.
- [46] BELOTE R T, DIETZ M S, MCRAE B H, et al. Identifying Corridors Among Large Protected Areas in the United States[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(4): e0154223.
- [47] THEOBALD D M, REED S E, FIELDS K, et al. Connecting Natural Landscapes Using a Landscape Permeability Model to Prioritize Conservation Activities in the United States[J]. *Conservation Letters*, 2012, 5(2): 123-133.
- [48] MCGUIRE J L, LAWLER J J, MCRAE B H, et al. Achieving Climate Connectivity in a Fragmented Landscape[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(26): 7195-7200.
- [49] SCHOVILLE S D, DALONGEVILLE A, VIENNOIS G, et al. Preserving Genetic Connectivity in the European Alps Protected Area Network[J]. *Biological Conservation*, 2018, 218: 99-109.
- [50] HUANG Y, HUANG J-L, LIAO T-J, et al. Simulating Urban Expansion and Its Impact on Functional Connectivity in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 643: 1553-1561.
- [51] AGUILAR R, CRISTÓBAL-PÓREZ E J, BALVINO-OLVERA F J, et al. Habitat Fragmentation Reduces Plant Progeny Quality: A Global Synthesis[J]. *Ecology Letters*, 2019, 22(7): 1163-1173.
- [52] CROUZEILLES R, LORINI M L, GRELE C E V. The Importance of Using Sustainable Use Protected Areas for Functional Connectivity[J]. *Biological Conservation*, 2013, 159: 450-457.
- [53] DICKSON B G, ALBANO C M, MCRAE B H, et al. Informing Strategic Efforts to Expand and Connect Protected Areas Using a Model of Ecological Flow, with Application to the Western United States[J]. *Conservation Letters*, 2017, 10(5): 564-571.
- [54] SAWAYA M A, KALINOWSKI S T, CLEVENGER A P. Genetic Connectivity for Two Bear Species at Wildlife Crossing Structures in Banff National Park[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 281(1780): 20131705.
- [55] CHAKRABORTY P, BORAH J, BORA P J, et al. Camera Trap Based Monitoring of a Key Wildlife Corridor Reveals Opportunities and Challenges for Large Mammal Conservation in Assam, India[J]. *Tropical Ecology*, 2021, 62(2): 186-196.
- [56] PENG Y J, MENG M H, HUANG Z H, et al. Landscape Connectivity Analysis and Optimization of Qianjiangyuan National Park, Zhejiang Province, China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(11): 5944.
- [57] LU Y-F, LI Q-W, WANG Y-K, et al. Planning Conservation Corridors in Mountain Areas Based on Integrated Conservation Planning Models: A Case Study for a Giant Panda in the Qionglai Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(11): 2654-2662.
- [58] 陈月庆, 黎黎, 章光新, 等. 莫莫格国家级自然保护区地表水文连通性定量评估[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (11) : 3833-3841.
- [59] LIANG J, HE X Y, ZENG G M, et al. Integrating Priority Areas and Ecological Corridors into National Network for Conservation Planning in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 22-29.
- [60] 余付勤, 张百平, 王晶, 等. 国外大尺度生态廊道保护进展与秦岭国家公园建设[J]. *自然资源学报*, 2021, 36 (10) : 2478-2490.
- [61] LAUSCHE B, LAUR A, COLLINS M. Marine Connectivity Conservation 'Rules of Thumb' for MPA and MPA Network Design: Version 1.0[R/OL]. IUCN WCPA Connectivity Conservation Specialist Group's Marine Connectivity Working Group, 2021[2021-12-04]. https://conservationcorridor.org/wp-content/uploads/Marine-Connectivity-Conservation-Rules-of-Thumb-for-MPA-and-MPA-Network-Design_2021.pdf.
- [62] Center for Large Landscape Conservation. *Globaescapes*[EB/OL]. [2021-11-28]. <https://globaescapes.org/>.
- [63] 赵智聪, 杨锐. 论国土空间规划中自然保护地规划之定位[J]. *中国园林*, 2019, 35 (8) : 5-11.
- [64] 赵智聪, 杨锐. 中国国家公园原真性与完整性概念及其评价框架[J]. *生物多样性*, 2021, 29 (10) : 1271-1278.
- [65] 李晟. 中国野生动物红外相机监测网络建设进展与展望[J]. *生物多样性*, 2020, 28 (9) : 1045-1048.

图片来源 (Sources of Figure):

图 1 由作者绘制。

(编辑 / 李卫芳)