

地质多样性概念及其实践价值

余 韵, 杨建锋, 夏 烨, 孙 月, 王 泉, 吕承训

YU Yun, YANG Jianfeng, XIA Ye, SUN Yue, WANG Quan, LYU Chengxun

中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要:地质多样性作为地球表面和地下物质、形态和过程的非生物多样性,是与生物多样性同等重要的概念,都是自然资本的重要组成部分,为人类带来生态系统产品和服务。通过探讨地质多样性的概念、价值及其服务,并归纳世界上主要国家和国际机构关于地质多样性研究与实践的相关做法与经验,从中发现:地质多样性逐步纳入到自然资源管理各环节,世界自然保护联盟通过了保护地质多样性决议,英国启动了地质多样性系列行动,北欧主要国家推进地质多样性保护,美国启动地质多样性研究工作,澳大利亚开展地质多样性评估。通过回顾地质多样性的研究和实践,认识到拓展了地质工作的服务领域,地质多样性赋予基础性、公益性地质工作更丰富的内涵。通过研究得出几点启示:①地质多样性丰富了自然资源综合调查实践;②地质多样性可为生态保护修复提供地质方案;③地质多样性突出地质系统的功能和价值,有效地拓展了地质工作的服务对象。

关键词:地质多样性;地质系统服务;生态系统服务;自然资本;地质调查

中图分类号:P620 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)04-0460-07

Yu Y, Yang J F, Xia Y, Sun Y, Wang Q, Lyu C X. The concept of geodiversity and its practical value. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 460-466

Abstract: Geodiversity, as the abiotic diversity of materials, forms, and processes on the earth's surface and subsurface, with the same important concept as biodiversity, is an essential component of natural capital assets that provide ecosystem goods and services to humans. This paper reviews and discusses the concept of geodiversity, its values and services, and summarizes major national and international institutions' studies and practices in this field. Geodiversity has been gradually integrated into all aspects of natural resource management. The IUCN has adopted a resolution on the protection of geodiversity. The UK has launched a series of geodiversity actions. The major Nordic countries are promoting geodiversity protection. The US has started geodiversity research. Australia is conducting geodiversity assessment. Through the study and practice of geodiversity, the service field of geological work has been expanded, and geodiversity has given a rich connotation to the primary and public welfare geological work. Several insights can be drawn from the study and practice of geodiversity. Firstly, geodiversity enriches the practice of comprehensive investigation of natural resources. Secondly, it can provide geological solutions for ecological protection and restoration. Thirdly, it highlights the functions and values of geosystems and expands the service targets of geological work.

Key words: geodiversity; geosystem services; ecosystem services; natural capital; geological survey

地质多样性 (geodiversity), 是地球表面和地下物质、形态和过程的非生物多样性^[1], 是与生物多样性同等重要的概念。关于地球生物多样性丧失的

当代危机已经众所周知, 2019年, 在联合国环境署主导下的生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台 (IPBES), 以脆弱性和自然资本/生态系统

收稿日期: 2020-09-22; 修订日期: 2021-01-29

资助项目: 中国地质调查项目《全国地质勘查进展与行业形势监测评估》(编号: DD20190669)

作者简介: 余韵 (1984-), 女, 博士, 副研究员, 从事资源经济学研究工作。E-mail: yuyun@mail.cgs.gov.cn

服务下降来显示地球的自然全景图。但这只讲述了自然故事的一部分,自然还有一部分即地球表面和地下的非生物多样性同样受到破坏与威胁,需要受到人类的关注和合理地开发利用。近期,国际上高度重视地质多样性研究^[2-5],一些国家和国际组织已经将地质多样性付诸于行动^[6],从理论研究转化为工作章程^[7]和行动计划^[8]。本文介绍地质多样性的概念、功能与价值,主要国家和国际机构的相关做法与经验,以及得到的启示。

1 概 念

地质多样性的概念最早起源于 20 世纪 40 年代^[9]。1992 年《生物多样性公约》的发布和 1993 年英国马尔文地质和景观保护国际会议的召开,地质多样性一词渐渐进入人们的视野。在马尔文会议上,地质学家和地貌学家用“地质多样性”一词作为生物多样性的“非生物对应词”^[1,10]。随后,学者们发现地质多样性除其内在的、文化的、经济的、功能的和科学的价值外^[11-12],在实现可持续发展目标方面也具有核心作用^[13],是可持续发展诸多方面的根基。2019 年, Schrod 等^[13]提出,如果不将地质多样性纳入生态系统服务体系,不将地质系统和生态系统有机结合,那么自然资源保护和可持续利用就难以实现。

Beier 等^[14]认为“地质多样性 (geodiversity)”指地质、地貌、土壤特征等各种条件的多样性;“非生物多样性 (abiotic diversity)”指地质多样性和气候多样性的综合;“环境多样性 (environmental diversity)”指生物和非生物因素的综合或指任何或所有上述概念的总称。Schrod 等^[13]认为,为更好地覆盖地球自然的多样性,地质多样性用来补充和增加现有生物多样性、气候多样性和海洋多样性所空缺的部分,以促进可持续发展目标的实现。

地质多样性是地球表面和地下物质、形态和过程的非生物多样性,不包括气候多样性。例如,岩石、土壤、水等物质;山脉、冰川、湖泊等地貌;土壤形成、海岸侵蚀、沉积物迁移等过程。从自然变化看,地质多样性包括从一个极端的纯静态特征到要素的集合,再到另一个极端即其形成过程,例如按照风力作用的方向形成的抛物线状沙丘^[15]。从要素看,地质多样性包括地质(岩石、矿物、化石)、地貌(地形、地貌、地势)、土壤、水文(地下水、地表水、

水循环)、沉积物等要素的多样性及其相互作用的过程^[7]。

2 价值及其服务系统

2.1 地质多样性是自然资本的重要组成部分

地质多样性是自然资本的重要组成部分(图 1)。世界自然资本论坛将“自然资本”(natural capital)定义为:“世界自然资产存量,包括地质、土壤、空气、水和生物^[17]。”这个定义把地质放在第一位,承认地质在自然的基础性地位。英国自然资本委员会^[18]发布《自然资本现状》报告,其中的自然资产清单,包括物种、生态群落,也包括土壤、淡水、矿产等。

自然资本通常被分为 2 种主要类型^[19-20]:可再生自然资本和不可再生自然资本。这 2 种自然资本一开始与生物性自然和非生物性自然关联,但是本文认为不能完全对应,因为有相当多的可再生自然资本是非生物性的,如淡水、海岸侵蚀、瀑布。尽管世界自然资本论坛正在倡导自然资本定义中出现地质,但是 Gray^[16]对比更多自然资本定义发现,地质只是以显性或隐性的方式包含其中,而且常常只涉及不可再生资源。

2.2 地质多样性提供地质系统服务

地质多样性与生物多样性为人类带来生态系统产品和服务,包括生态系统服务和地质系统服

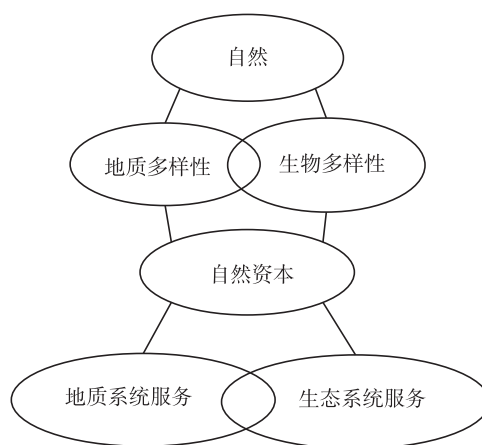


图 1 地质多样性、生物多样性与自然资本的关系(据参考文献[16])

Fig. 1 The relationship between geodiversity, biodiversity and natural capital

务,两者有重叠,共同供给和维护整个自然系统。Hjort 等^[21]解释生态系统是地质多样性、生物多样性和气候多样性 3 个多样性领域的结合,并且地质多样性支持或直接提供所有类型的生态系统服务。《千年生态系统评估》^[22]认为,生态系统中的非生物部分仅限于与生物部分相互作用的部分,但是许多地质系统服务不涉及生物交互作用^[23]。为了填补这一空白,Gray^[16]提出地质多样性基本框架,使用了“地质系统服务”概念,指地质多样性的物质、形态和过程驱动的服务,包括与生物相互作用的部分,如土壤形成和养分循环,同时也包括地质多样性本身提供的服务。

地质多样性至少提供 5 类 24 种服务(图 2)。笔者认为,地质多样性的作用与贡献不可低估或忽视。以《千年生态系统评估》为基础可展示与地质多样性相关的产品和服务。概括来讲,依赖地质多样性,地质系统为生物和人类提供的产品与服务包括 5 个大类(图 2)。供给服务是提供对生命和社会

至关重要的自然资源。调节服务是对生命和现代社会存在的基本条件予以调节,为从全球尺度到区域和地方尺度的调节服务。支持服务是地质多样性对生态系统支持的主要贡献,是栖息地的创造和维护。文化服务是地质多样性对生态系统文化服务的主要贡献。此外,地质多样性对生态系统的知识服务起到关键作用,包括地球历史、环境监测和预测、地质取证、教育、就业等。遗憾的是,现有生态系统服务及其评估分类,依旧出现了地质多样性缺失的现象^[1, 16, 24]。

3 应用探索

3.1 地质多样性逐步纳入到自然资源管理各环节

现今,地质多样性因其科学价值和为社会提供大量知识而逐渐被广泛认可,例如,过去气候变化的记录、生命进化及对地球系统如何运作的理解。理解未来可能发生的环境变化,地质多样性研究同时有助于理解环境变化对地球生物和人类生命的

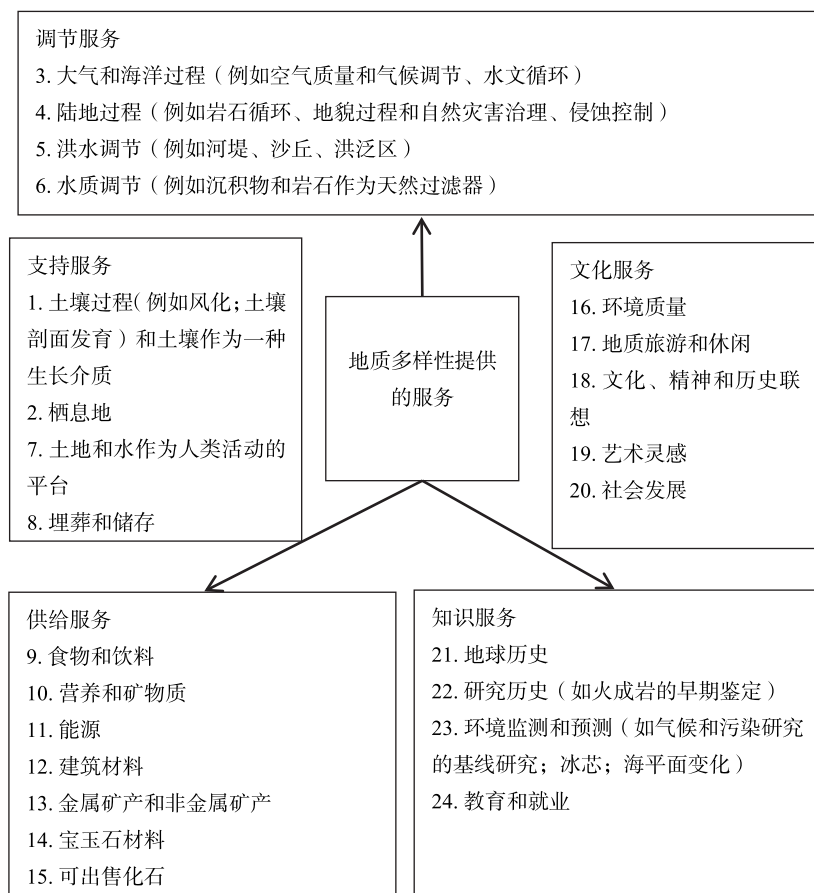


图 2 源于地质多样性的产品与服务(据参考文献[22-23])

Fig. 2 Summary of the goods and services provided by geodiversity

影响,也有助于人类采取措施应对或适应环境变化。过去的地质过程、地貌和沉积物的记录,有助于了解海岸系统是如何运作的,可用来指导适应性海岸管理,为人类和自然保护带来多重效益。了解过去的自然变化范围、速率和地貌过程类型,可用于预测和规划变化、验证保护管理决策和允许有限资源开发的优先次序等。

在过去十年间,人们越来越重视人类赋予地质多样性更广泛的价值及其与保护生物多样性^[25-26]、气候变化适应性管理^[27]、生态系统方法和景观规划^[16]、自然资本和生态系统服务^[28-29]、海洋保护与规划^[30]、土地保护与利用^[31]、栖息地恢复和管理^[32]、地质遗迹保护^[33]、国家公园管理^[34]、可持续管理^[13]的联系。这说明地质多样性更广泛的价值正在不断被认可(表 1),为地质多样性纳入更广泛的自然资源管理政策和议程提供了框架体系。

3.2 保护地质多样性就是保护自然的舞台

保护地质多样性作为一种保护生物多样性的方法之一,可以保存广义环境中的有代表性样本,将此作为保护大多数物种的一种方法。保护地质多样性是保护自然的舞台(CNS),保护生物多样性也是保护自然的演员。地质多样性是自然的舞台,参与者是动植物在舞台上表演。在某种程度上,从整个海洋盆地和山脉到溪流和岩石露头,其起源都

归因于地质和地貌。

地质多样性最初纳入保护规划是源自于保护地质多样性本身,并不是因为地质多样性支持生物多样性。例如,世界上第一个国家公园——美国黄石公园于 1872 年建立。尽管生态学家早就认识到,地质多样性是生物多样性和物种分布格局的关键驱动力,但生物保护学家迟迟没有考虑利用地质多样性划分生物保护的优先区域。Anderson 等^[26]发现,传统保护规划旨在代表植被类型和物种的规划中增加地质多样性目标,通常不会增加优先考虑(保护)的总面积,也不会减少其他目标的实现。

地质多样性为生命变异的出现和维持而创造了“舞台”。在全球和区域尺度上,已经实证山地生物多样性是通过地质及其演化过程决定的,且大多数热带山地的高生物多样性与基岩地质密切相关^[35]。更精细尺度上,植物物种和群落的分布,与土壤和地貌过程及微地形和微气候条件密切相关。

3.3 主要国家和国际机构积极开展地质多样性保护实践

随着地质多样性理论的不断深化、数据分析的不断完善,以及一些国家和国际权威机构制定地质多样性章程或计划,决策者越来越重视保护自然的舞台,地质多样性也越来越多地服务于自然资源管理和可持续发展的决策,取得了不少实质性进展。

表 1 地质多样性与自然资源管理相关研究
Table 1 Study on geodiversity and natural resource management

连接自然资源管理	研究内容或案例
保护生物多样性	保护自然舞台——支持生物多样性的物理特征和自然过程
气候变化适应	了解地貌对气候变化的敏感性如何影响生物多样性适应;保护自然舞台并提供自然解决方案;提供环境异质性、宏观和微观避难所、景观和过程连通性
生态系统方法和景观规划	保护自然舞台和理解不同空间尺度上物理过程的作用和地质多样性、生物多样性和人类之间的联系
自然资本和生态系统服务	提供许多有价值的生态系统服务;有助于了解生态系统历史和生态系统服务的长期趋势,这些记录体现在古环境记录中
海洋保护与规划	支持海洋保护区的生物多样性,并根据对物理过程的理解为海洋空间规划和海岸线管理提供信息
土壤保护与利用	了解物理过程的作用,特别是与生境支持、土壤侵蚀和碳管理有关的作用
人与自然关系	了解地质多样性对文化遗产的许多影响,以及它们如何有助于增强当地社区的地方意识和开展可持续活动,如地质旅游
栖息地恢复和管理	通过了解自然过程并与自然过程合作来提供恢复策略;从古生态记录中了解生态系统历史
地质遗迹保护	地质学、地质遗迹地质公园、地质保护地、地质管理、地质教育和地质旅游发展过程与相互关系
国家公园管理	了解受威胁物种多样性对国家公园管理和规划非常重要,把地质多样性与受威胁物种丰富度和气候多样性结合研究;保护自然舞台粗滤方案
实现联合国可持续发展目标	为全球环境挑战、人类福祉和生态系统功能提供基于自然的解决方案

(1)世界自然保护联盟通过保护地质多样性决议。2008 年,世界自然保护联盟通过《保护地质多样性和地质遗迹》决议,提出地质多样性是自然的一部分,强调地质多样性是生物、文化和景观多样性的关键因素。同年,世界自然保护联盟还修订了《保护区管理类别应用指南》,地质多样性被正式确定为保护区的一个组成部分。联合国教科文组织承认地质多样性具有显著的广泛价值,并将其列入《世界遗产名录》。

(2)英国启动了地质多样性系列行动。2003 年,“自然英格兰”与英国采石产品协会、硅砂和型砂协会联合发布《地质多样性和矿业》研究报告。英国大约 40 个地方制定了《地质多样性行动最佳实践指南》。2006 年,“自然英国”的《英国地质多样性的社会和经济价值》研究报告,评估了地质多样性能够给经济、社会和文化带来福祉。2007 年,英国地质调查局实施了《诺森伯兰国家公园:地质多样性调查和行动计划》。2010 年,英国实施“地质多样性行动计划”,提出在环境规划发展的政策及立法中加强地质多样性的保护和管理。2011 年,英国发布《英国国家生态系统评估》报告,共 27 章,其中第 2 章专项介绍地质多样性,另有 7 章涉及大量的地质多样性内容。2012 年,苏格兰地质多样性论坛牵头、英国地质调查局参与发布了《苏格兰地质多样性章程》,2014 年和 2018 年两度更新。英国在地质多样性方面还有丰富的实践(表 2)。

(3)北欧主要国家推进地质多样性保护。21 世纪初,欧洲也开始接受这样的观点:地质多样性的内在价值受到人类威胁。一个重要的里程碑是,

2000 年,瑞典、挪威、芬兰、丹麦、冰岛等北欧国家发布了《地质多样性与北欧自然保护》研究报告,为保护这些国家的超强地质多样性提供了案例。2003 年,北欧部长理事会出版研究报告,使案例在国际上更容易理解。欧洲在景观规划和空间规划中,也纳入了地质多样性的相关要求。

(4)美国启动地质多样性研究工作。2016 年,美国地质调查局开展美国东南部 19 个生态系统的气候变化脆弱性调查,其中考虑了地质多样性和生物多样性的关系^[36]。美国地质调查局还承担由地球观测组织委托的全球生态系统分类和制图,在生态土地分类单元中考虑地质多样性要素(表 2)。美国实施国家公园和国家自然地标计划,调查了国家景观和要素的多样性。美国国家公园管理局正在对美国国家公园内的地质多样性进行调查,包括地质多样性图集和研究报告,在此基础上,实行地质多样性和生物多样性的一体化管理。主要由美国地质调查局参与国家公园的地质填图和报告编写工作。美国还实施了景观保护合作计划,评估地质多样性在景观保护规划中的用途。

(5)澳大利亚开展地质多样性评估工作。2002 年,《澳大利亚自然遗产章程》最早提出了自然保护的关键原则:保护是基于对生物多样性和地质多样性的尊重。保护应尽可能减少对生态过程、进化过程和地球过程的物理干预^[37]。近年来,澳大利亚继续深化地质多样性研究,并付诸于管理实践。例如,为给最高环境标准下开发非常规油气资源提供评估参考,澳大利亚环境和能源部启动了为期 5 年的“地质和生物区评估计划”^[38],其中的重点是评估地质多样性。

表 2 主要国家地质调查机构参与相关活动清单

Table 2 Summary of some geological survey agencies involved in the geodiversity activities

序号	机构名称	参与情况
1	美国地质调查局	2020 年开展全球生态系统分类和绘图工作,将地质多样性要素纳入其生态用地分类单元
2	美国地质调查局	2020 年参与美国国家公园内的地质多样性调查工作
3	美国地质调查局	2016 年开展美国东南部 19 个生态系统气候变化脆弱性调查,开展地质多样性和生物多样性关系研究
4	澳大利亚地球科学局	2017 年参与澳大利亚环境和能源部“地质和生物区评估计划”
5	英国地质调查局	2018 年作为主要参与者发布《英格兰地质多样性章程》(第二版)
6	英国地质调查局	2017 年作为主要参与者发布《北爱尔兰地质多样性章程》
7	英国地质调查局	2014 年作为主要参与者发布《英格兰地质多样性章程》(第一版)
8	英国地质调查局	2012 年作为主要参与者发布《苏格兰地质多样性章程》
9	英国地质调查局	2010 年参与“英国国家地质多样性行动计划”
10	英国地质调查局	2007 年开展诺森伯兰国家公园地质多样性调查和行动计划

4 结论与启示

地质多样性是地球表面和地下物质、形态和过程的非生物多样性。地质多样性是与生物多样性并驾齐驱的重要概念,都是自然资本资产的重要组成部分,为人类带来生态系统产品和服务^[39]。国际机构和一些国家高度重视地质多样性研究,将地质多样性应用于自然保护管理、自然开发利用决策和生态系统评估体系。通过地质多样性的研究和实践,拓展了地质工作的服务领域。实践证明,地质多样性赋予基础性、公益性地质工作更丰富的内涵,为自然资源综合管理工作打开了新的窗口。

(1)地质多样性丰富了自然资源综合调查实践。自然资源综合调查是自然资源综合管理的基础性工作,是掌握自然资源本底状况的工作。地质多样性涉及提供物质资源的地下较深处空间,更涉及从地下延伸到深部作用过程与同生命生存密切相关的地表作用过程,有助于明确地表基基层调查评价的方向与路径。地质工作可通过地质多样性调查、评价与监测,摸清自然资源数量和质量家底,为自然资源综合管理工作提供基础支撑。

(2)地质多样性可为生态保护修复提供地质方案。地质多样性对生态系统形成与维护具有支撑作用,为生物多样性提供“自然的舞台”。地质多样性关注地球表面和地下物质组成,更关注形成过程、相互作用、结构演变。地质工作可通过地质多样性研究和调查,认识生态过程、进化过程和地球过程,提出遵循自然生态系统演替规律的地质方案。

(3)地质多样性突出地质系统的功能和价值,拓展了地质工作的服务对象。地质多样性是决定生物、文化和景观多样性的关键因素,与生物多样性一样为生态系统提供服务。地下决定地上,岩石决定土壤,构造决定地貌,不同地质基地孕育不同的生态系统或生态景观。生态系统功能评价广泛地运用基础性地质工作的成果,使自然生态系统与经济社会系统紧密联系起来。

致谢:对成文过程中提出宝贵修改意见的审稿专家表示衷心感谢。

参考文献

[1] Gray M. Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature 2004[M]. John Wiley & Sons: London, UK, 2004: 5.

[2] Alahuhta J, Toivanen M, Hjort J. Geodiversity-biodiversity relationship needs more empirical evidence[J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2020, 4: 2-3.

[3] Fox N, Graham J, Eigenbrod F, et al. Incorporating geodiversity in ecosystem service decisions[J]. *Ecosystems and People*, 2020, 16: 151-159.

[4] Antonelli A, Kissling D, Flantua A, et al. Geological and climatic influences on mountain biodiversity[J]. *Nature Geosci.*, 2018, 11: 718-725.

[5] Knudson C, Kay K, Fisher S. Appraising geodiversity and cultural diversity approaches to building resilience through conservation[J]. *Nature Clim Change*, 2018, 8: 678-685.

[6] Gray M, Gordon E. Geodiversity and the “8Gs”: a response to Brocx & Semeniuk(2019)[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2020, 67(3): 437-444.

[7] Scottish Geodiversity Forum. Scotland's Geodiversity Charter 2018-2023 [EB/OL]. (2017-02-01) [2020-09-01]. <http://scottishgeodiversityforum.org/charter/>.

[8] UK Geodiversity Action Plan[EB/OL]. (2012-01-01) [2020-09-01]. <http://ukgap.org.uk/>.

[9] Santos M, Corte D, Saad R, et al. Geodiversity index weighted by multivariate statistical analysis[J]. *Appl. Geomat.*, 2020, 12, 361-370.

[10] Gray M. Geodiversity: developing the paradigm[J]. *Proc. Geol. Assoc.*, 2018, 19: 287-298.

[11] Gray M. Other nature: geodiversity and geosystem services[J]. *Environmental Conservation*, 2011, 38: 271-274.

[12] Boothroyd A, McHenry M. Old Processes, New Movements: The Inclusion of Geodiversity in Biological and Ecological Discourse[J]. *Diversity*, 2019, 11: 216.

[13] Schrodt F, Bailey J, Daniel W, et al. To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(33): 16155-16158.

[14] Beier P, Sutcliffe P, Hjort J, et al. A review of selection-based tests of abiotic surrogates for species representation[J]. *Conservation Biology*, 2015, 29: 668-679.

[15] Brocx M, Semeniuk V. Geoheritage and geoconservation - history, definition, scope and scale[J]. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 2007, 90: 53-87.

[16] Gray M. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 34: 106-112.

[17] Natural capital forum[EB/OL]. (2016-12-01) [2020-09-01]. www.naturalcapitalforum.com.

[18] UK Department of Environment, Food and Rural Affairs. The state of natural capital: restoring our natural assets. Natural Capital Committee, 2nd report[C]//Department of Environment, Food and Rural Affairs, UK, 2014: 20.

[19] Costanza R, Daly E. Natural capital and sustainable development[J]. *Conservation Biology*, 1992, 6: 37-46.

[20] Voora A, Venema D. The Natural Capital Approach: A Concept

- Paper [C]//International Institute for Sustainable Development, Winnipeg, 2008: 25.
- [21] Hjort J, Gordon J, Gray M, et al. Why geodiversity matters in valuing nature's stage[J]. *Conservation Biology*, 2015, 29: 630–639.
- [22] 张永民. 生态系统与人类福祉: 评估框架[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 15.
- [23] Brilha J, Gray M, Pereira I, et al. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature[J]. *Environmental Science and Policy*, 2018, 86: 19–28.
- [24] Gray M, Gordon E, Brown J. Geodiversity and the ecosystem approach: The contribution of geoscience in delivering integrated environmental management [J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2013, 124(4): 659–673.
- [25] Anderson G, Comer J, Beier P, et al. Case studies of conservation plans that incorporate geodiversity[J]. *Conservation Biology*, 2015, 29: 680–691.
- [26] Lawler J, Ackerly D, Albano M, et al. The theory behind, and the challenges of, conserving nature's stage in a time of rapid change[J]. *Conservation Biology*, 2015, 29: 618–629.
- [27] Theobald M, Harrison D, Monahan B, et al. Ecologically-relevant maps of landforms and physiographic diversity for climate adaptation planning[J]. *PLoS One*, 2015, 10(12): e0143619.
- [28] Van F, Van H. Geosystem services: A concept in support of sustainable development[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 20: 30–36.
- [29] Alahuhta J, Ala T, Tukiainen H, et al. The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 47–56.
- [30] Kaskela M, Rousi H, Rou H, et al. Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: The role of geodiversity in Eastern Gulf of Finland ecosystems[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 142: 1–13.
- [31] Thomas F. Geodiversity and landscape sensitivity: A geomorphological perspective[J]. *Scottish Geographical Journal*, 2012, 128: 195–210.
- [32] Gillson L, Dawson T P, Jack S, et al. Accommodating climate change contingencies in conservation strategy [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2013, 28: 135–142.
- [33] Brocx M, Semeniuk V. Geodiversity and the “8Gs”: a response to Gray & Gordon(2020) [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*. Taylor & Francis, 2020, 67(3): 445–451.
- [34] Tukiainen H, Bailey J, Field R, et al. Combining geodiversity with climate and topography to account for threatened species richness[J]. *Conservation Biology*, 2017, 31(2): 364–375.
- [35] Rahbek C, Borregaard K, Antonelli A, et al. Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes[J]. *Science*, 2019, 365(6458): 1114–1119.
- [36] Cartwright M, Costanza J. Ecosystem vulnerability to climate change in the southeastern United States [M]. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2016–3052.
- [37] Australian Heritage Commission. Australian Natural Heritage Charter[C]// Australian Heritage Commission, Canberra, 2002: 12.
- [38] 郑人瑞, 吴登定, 杨宗喜, 等. 全球地质调查发展新动向与新趋势——国外主要国家地质调查机构新一轮发展战略综述[J]. *地质通报*, 2019, 38(11): 1769–1776.
- [39] 施俊法. 21 世纪前 20 年世界地质工作重大事件、重大成果与未来 30 年中国地质工作发展的思考 [J]. *地质通报*, 2020, 39(12): 2044–2057.