

什么是可持续性科学?

邬建国^{1,2,3,*} 郭晓川¹ 杨 劼¹ 钱贵霞¹ 牛建明¹ 梁存柱¹ 张 庆¹ 李 昂⁴

(¹内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心,呼和浩特 010021; ²北京师范大学人与环境系统可持续性研究中心,北京 100875; ³美国亚利桑那州立大学生命科学院和全球可持续性研究所,坦佩,亚利桑那州 85287,美国; ⁴中国科学院植物研究所,北京 100093)

摘 要 可持续发展是我们时代的主题,也是人类面临的重大挑战。自20世纪70年代,尤其是近20年来,可持续发展的概念日益频繁地出现在学术文章、政府文件以及公益宣传和商业广告之中。然而,为可持续发展提供理论基础和实践指导的科学——可持续性科学——是在21世纪初才开始形成的。该科学在短短的十几年中迅速开拓、不断发展,正在形成其科学概念框架和研究体系。中国是世界大国,是可持续性科学的哲学思想——“天人合一”——的故乡,有必要承担起时代之重任,在追求“中国梦”的同时促进全球可持续发展,并积极参与进而引领可持续性科学的研究和实践。为了帮助实现这一宏伟而远大目标,本文拟对可持续性科学的基本概念、研究论题和发展前景作一概述。可持续性科学是研究人与环境之间动态关系——特别是耦合系统的脆弱性、抗扰性、弹性和稳定性——的整合型科学。它穿越自然科学和人文与社会科学,以环境、经济和社会的相互关系为核心,将基础研究和应用研究融为一体。可持续发展的核心内容往往因时、因地、因人而异。因此,可持续性科学必须注重多尺度研究,同时应特别关注50到100年的时间尺度和景观以及区域的空间尺度。景观和区域不但是最可操作的空间尺度,同时也是上通全球、下达局地的枢纽尺度。可持续性科学需要聚焦于生态系统服务和人类福祉的相互关系,进而探讨生物多样性和生态系统过程,以及气候变化、土地利用变化和其他社会经济驱动过程对这一关系的影响。我们认为,景观和可持续性是可可持续性科学的核心研究内容,也将是可持续性科学在以后几十年的研究热点。

关键词 可持续性科学 可持续发展 人与环境耦合系统 生态系统服务 人类福祉 景观 区域
文章编号 1001-9332(2014)01-0001-11 **中图分类号** F061.3 **文献标识码** A

What is sustainability science? WU Jian-guo^{1,2,3}, GUO Xiao-chuan¹, YANG Jie¹, QIAN Gui-xia¹, NIU Jian-ming¹, LIANG Cun-zhu¹, ZHANG Qing¹, LI Ang⁴ (¹Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science (SUCCESS), Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; ²Center for Human-Environment System Sustainability (CHESS), Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ³School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA; ⁴Institute of Botany, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100093, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(1): 1-11.

Abstract: Sustainability is the theme of our time and also the grandest challenge to humanity. Since the 1970s, the term, sustainable development, has frequently appeared in the scientific literature, governmental documents, media promotions for public goods, and commercial advertisements. However, the science that provides the theoretical foundation and practical guidance for sustainable development – sustainability science – only began to emerge in the beginning of the 21st century. Nevertheless, the field has rapidly developed in depth and expanded in scope during the past decade, with its core concepts and research methods coalescing. China, as the most populous country in the world and home to the philosophical root of sustainability science – the unity of man and nature, is obligated to take upon the challenge of our time, to facilitate global sustainability while pursuing the Chinese Dream, and to play a leading role in the development of sustainability science. Toward this grandiose goal, this paper presents the first Chinese introduction to sustainability science, which

* 通讯作者. E-mail: Jingle.Wu@asu.edu
2013-10-08 收稿, 2013-10-22 接受.

discusses its basic concepts, research questions, and future directions. Sustainability science is the study of the dynamic relationship between humans and the environment, particularly focusing on the vulnerability, robustness, resilience, and stability of the coupled human-environment system. It is a transdisciplinary science that integrates natural sciences with humanities and social sciences. It hinges on the environment-economy-society nexus, and merges basic and applied research. The key components of sustainability often change with time, place, and culture, and thus sustainability science needs to emphasize multi-scale studies in space and time, with emphasis on landscapes and regions over a horizon of 50 to 100 years. It needs to focus on the relationship between ecosystem services and human well-being, as influenced by biodiversity and ecosystem processes as well as climate change, land use change, and other socioeconomic drivers. Landscape sustainability is at the core of sustainability science, and is expected to be a hot research topic in the next few decades.

Key words: sustainability science; sustainable development; coupled human-environment systems (CHES); ecosystem services; human well-being; landscape; region.

自 18 世纪下半叶的工业革命以来,世界人口已经从不足 10 亿增加到 71 亿之多。毫无疑问,工业革命以来的科学、技术革命大大地推动了社会和经济的发展,使人类物质生活的整体水平得以大大提高;但一系列的重大环境问题亦相伴而来。人类驯化植物而发展了农业;驯养动物而发展了牧业;聚居贸易,劳动分工进而创造了城市;随之而来的是经济规模化、工业化和现代化。今天,人类之能事可谓拔山填海,堵江截流,呼风唤雨,改天换地。人类不只是驯化个别种群或物种,而是在驯化整个生态系统,整个景观,乃至整个生物圈^[1-4]。自然已不再“自然”,其“均衡”早已被打破^[5]。有多少昔日的桃花源和阿尔卡笛亚(Arcadia)已是天不蓝、水不澈、风不清、雨不顺?地球系统已经千疮百孔,表破内损,包括全球气候变化、生物多样性锐减、自然资源耗竭以及环境质量下降在内的诸多环境问题正在挑战着人类社会的可持续性。因此,如何在满足人类发展需求的同时,持续地保障地球生命支持系统的基本结构和功能,即“可持续发展”^[6-10],已成为学术界和社会各界广泛关注的重大科学和决策问题^[11-13]。

可持续发展的理念可追溯到中国古典哲学之核心思想——“天人合一”^[1]。20 世纪 70 年代,当人口、资源、生态和环境问题日趋严重、广为人知之时,可持续发展概念才开始盛行^[14-16]。然而,从 1987 年联合国世界环境与发展委员会正式定义什么是可持续发展,到 1992 年联合国在巴西里约热内卢举行的首届可持续发展地球峰会(Earth Summit),再到 2002 年在南非约翰内斯堡召开的第二届地球峰会,以及 2012 年重返巴西里约热内卢的第三届可持续发展地球峰会,显然可见 20 多年来联合国和世界各国政府对可持续发展的高度重视。作为可持续发展

的科学依据和运作指南,可持续性科学(sustainability science)也在 21 世纪初应运而生。

何谓可持续性科学?虽然确切而公认的答案尚且难寻,但可以肯定的是,该科学在短短的十几年中迅速发展,广泛拓展,其科学概念框架和研究体系正在形成。作为泱泱大国的中国,为了追“中国梦”,实现生态文明,就必须在可持续性科学方面有长足发展,继续为世界可持续发展做出重大贡献。然而,目前国内学界对该领域的研究和介绍甚少。为此,本文拟对可持续性科学的基本概念和研究论题作一较为系统的介绍,并对可持续性评估方法和可持续性科学的发展前景加以讨论。

1 可持续发展和可持续性

1.1 可持续发展的概念

中文的“可持续发展”是直接从英文的 sustainable development 翻译而来。根据《在线词源词典》(<http://www.etymonline.com/>),英文“sustainable”一词出现在 17 世纪早期,当时该词的含义是“bearable”(可忍受的)或“defensible”(可辩护的或可防御的)。直到 1965 年,“sustainable”一词才开始具有我们现在所熟悉的含义:“capable of being continued at a certain level”(在一定水平上持续的能力)。作为名词的“sustainability”(可持续性)最早出现于 1907 年,当时主要是法庭用语(譬如,法庭上一方律师对另一方律师在陈述时提出反对或抗议的“有效性”,即能否得到法官确认)。作为一个意指环境、经济和社会 3 个方面持续发展的能力和趋势的术语,“可持续性”一词在 1972 年最早出现在英国,1974 年出现在美国,此后在 1978 年出现在联合国文件中^[17]。今天,与“可持续”有关的这些术语已成为学

术界、政策领域及各种媒体的流行语。在英文文献中,“可持续发展”和“可持续性”经常作为同义语使用。

可持续发展的定义有一百多个,但最被广泛接受的无疑是 1987 年世界环境与发展委员会(World Commission on Environment and Development, WCED) 的定义^[16]。在题为《我们共同的未来》(Our Common Future) 的报告中,WCED 首次正式地将可持续发展定义为“满足当代人类的需求而不损害子孙后代满足他们自己需求的能力”;可持续发展同时也是“一个资源利用、投资取向、技术发展以及政策变化都协调一致,不断促进满足人类现在和将来需求之潜力的变化过程”^[18]。WCED 报告进而指出,满足人类基本需要是最重要的;经济发展和资源平等共享是必需的;利益相关者的有效参与能够促进平等;发展是有限度的,须考虑环境的承载力;科技水平、环境资源特征、管理体制以及社会经济现状均会影响某个地区乃至全球的可持续性。

1999 年,美国国家研究理事会(National Research Council, NRC) 发表了题为《我们共同的旅途: 向可持续性过渡》(Our Common Journey: A Transition Toward Sustainability) 的报告,讨论了有关可持续发展的各种观点,以及发展和持续两者之间的相互关系^[19]。NRC 报告依循 WCED 报告的理念,指出可持续发展旨在“实现社会发展目标和环境极限的长期协调”^[16]。2002 年可持续发展地球峰会发布的《约翰内斯堡可持续发展宣言》(Johannesburg Declaration on Sustainable Development; <http://www.unescap.org/esd/environment/rio20/pages/Download/johannesburgdeclaration.pdf>) 进一步阐述了可持续发展的“三支柱”(three pillars) 或“三重底线”(triple bottom line) 概念,即可持续发展要同时考虑环境保护、经济发展和社会平等 3 个方面(图 1)。

协调环境、经济和社会之间的相互联系是可持续发展的焦点和难点,而理解三者之间关系往往涉及到“强可持续性”(strong sustainability) 和“弱可持续性”(weak sustainability) 的观点。这两种观点的主要区别在于如何看待人造资本(human-made 或 manufactured capital) 和自然资本(natural capital) 之间的“可替代性”(substitutability) (图 2)。具体地讲,强可持续性观点认为,人造资本(如机器、工具、建筑和基础设施) 和自然资本(指自然资源和生态系统) 是互补关系,环境的可持续性必须得以保障,以损害环境为代价的经济发展是不可持续的;弱可持

续性观点则认为,人造资本和自然资本之间是互为替代关系,故此,只要总的资本量不减,一个环境恶化但经济发达的地区也是“可持续的”^[20]。显然,从长远的角度来看,弱可持续性实际上是不可持续的。而强可持续性也并非主张极端的“环境保护主义”,它只是强调环境可持续性的重要性和必要性。若没有环境的可持续,实现长期的经济和社会的可持续是不可能的^[1,16,20-21]。极端的强可持续性观点认为应该杜绝绝对生态系统的开发和利用,这显然是不切实际的,因此在文献中称之为“荒唐的强可持续性”(absurdly strong sustainability) ^[1,16,20-21]。显然,强、弱

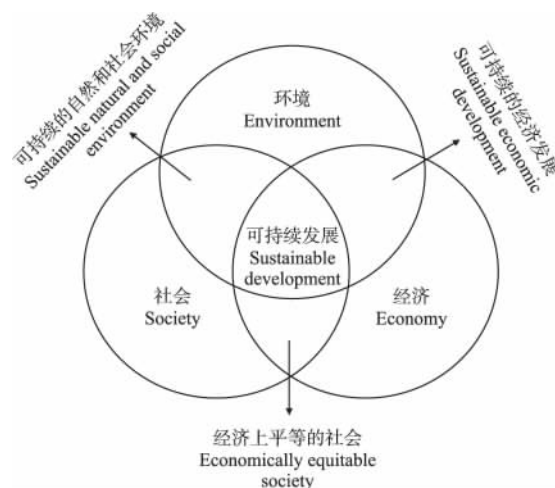


Fig.1 The three-pillar or triple bottom line concept of sustainability (environment , economy and society) .

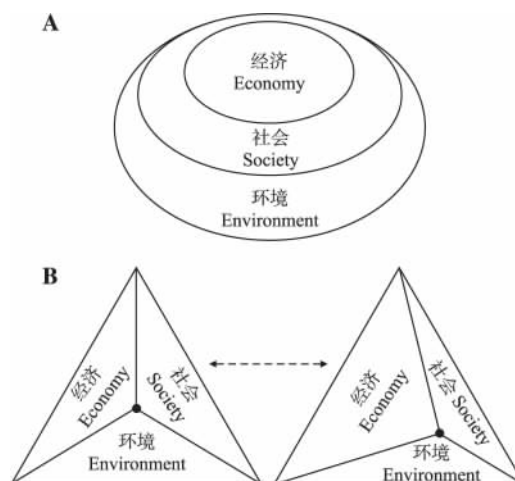


Fig.2 Comparison between strong sustainability (A) and weak sustainability (B) perspectives.

两者的关键不同在于三支柱之间的“可取代性”及其极限或阈值 The main differences hinge on substitutability among the three pillars and its limits or thresholds.

可持续性观点对于如何理解和评估可持续发展有着重要影响。

1.2 人类福祉和生态系统服务

可持续发展的最终目的是提高人类福祉 (human well-being), 即满足当代人和后代人的物质和精神需求。人类需求会因社会经济状况、文化传统、生活方式等诸多因素而变化。那么, 可持续发展应该如何考虑人类需求和人类福祉呢? 美国社会心理学家亚伯拉罕·马斯洛 (Abraham Maslow) 的人类需求层次理论 (hierarchy of human needs) 将人类需求划分为 6 个层次: 生理需求 (physiology)、安全需求 (safety and security)、社交需求 (love and belonging)、尊重需求 (esteem)、自我实现 (self-actualization) 和超越自我 (self-transcendence) [22-23]。马斯洛理论虽然多年来颇有争议, 但影响甚广 [16]。马斯洛的层次理论聚焦于个人需求, 但可持续性科学须考虑的人类福祉应注重于群体或大众利益。千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MEA) 将人类需求综合为 5 个方面: 基本生活材料、自由、健康、良好社会关系以及安全保障 [24]。这一观点已

经广为采纳, 并且得以进一步发展和完善 [16]。

满足人类需求必然依赖于生态系统服务, 即“人类从生态系统中所获得的利益” [24]。尽管有多种生态系统服务分类方法, 目前最为广泛应用的是千年生态系统评估中的划分方案——即生态系统服务包括 4 类: 支撑服务 (指生态系统过程和功能, 如土壤形成、生产力和养分循环等)、供给服务 (如食物、淡水、纤维等)、调节服务 (如空气和水的净化、气候调节、疾病和自然灾害的控制等) 和文化服务 (如游憩、精神滋养、以及其他非物质性利益)。生态系统服务依赖于生物多样性和生态系统过程和功能, 同时受社会、经济和政策等多方面因素的影响, 被普遍认为是连接自然资本与人类福祉的重要桥梁 [25] (图 3)。因此, 生态系统服务为可持续发展研究提供了一个可操作的概念框架, 并已经成为该领域的一个核心论题。

2 可持续性科学的概念

“可持续性科学”一词是美国国家研究理事会在 1999 年题为《我们共同的旅途: 向可持续性过

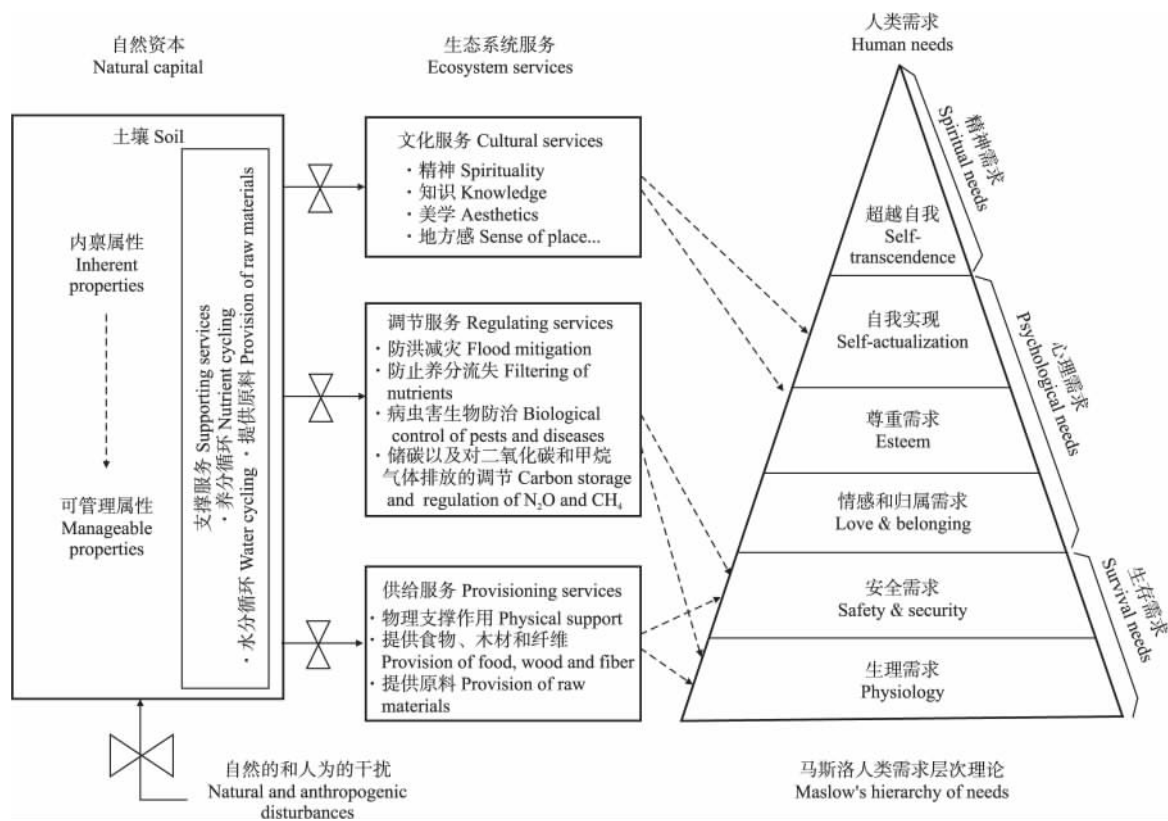


图 3 生态系统结构和功能 (自然资本)、生态系统服务和人类需求之间的关系——以土壤生态系统为例

Fig. 3 Relationship among ecosystem structure and function (natural capital), ecosystem services, and human well-being: Using soil ecosystem as an example.

根据 Dominati 等 [43] 修改重绘 Redrawn with modifications based on Dominati, et al [43].

渡》的报告中首次提出的^[19]。2001年,Kates等^[6]在《科学》杂志中撰文,第一次系统地介绍了这一新兴的整合型科学,由此可持续性科学正式问世。《美国国家科学院院刊》(Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, PNAS)分别在2003和2007年出版了两期有关可持续性科学的专辑^[26-27],为推动该领域的迅速发展起到了积极作用。Kates等^[6]在2001年将可持续性科学定义为,在局地、区域和全球尺度上研究自然和社会之间动态关系的科学,是为可持续发展提供理论基础和技术手段的横向科学^[7,12,16,28]。可持续性科学整合自然科学和人文与社会科学,以环境、经济和社会的相互关系为核心,将基础研究和应用研究融为一体。非线性动力学(nonlinear dynamics)、自组织复杂性(self-organizing complexity)、脆弱性(vulnerability)、弹性(resilience)、惯性(inertia)、阈值(threshold)、适应性管理(adaptive management)和社会学习(social learning)是可持续性科学中的重要概念^[6-7,16]。同时,可持续性科学强调对现有科学技术的创造性利用以及发展新型可持续性技术的重要性。综上所述,可持续性科学是研究人与环境之间动态关系,特别是耦合系统的脆弱性、抗扰性、弹性和稳定性的整合型科学。

Wu^[1,7-8,16]在一系列文章中进一步阐述了可持续性科学的一些特点。他认为,可持续性科学是具有3个主要特征的全新的跨学科范式。首先,可持续性科学是一个多维度的、穿越传统的自然科学和社会科学界线的、集理论和实践为一体的科学。其次,可持续性科学中的可持续性具有时、空以及组织结构上的多尺度和等级特征,因此自上而下(top down)或自下而上(bottom up)的研究策略非但重要,而且是必须的。第三,可持续性科学强调地区特点和解决实际问题,其研究对象应该“具有特殊社会、文化、生态和经济特征”^[28],因此,景观和区域应该是可持续性科学研究和实践的关键尺度,或基本空间单元^[1,7,16]。

作为一个新的研究领域和范式,可持续性科学是时髦一时、过眼云烟?还是地位确立、日益蓬勃?针对这个问题,Bettencourt和Kaur^[11]分析了1974—2010年间发表的有关可持续发展的英文文章,发现可持续性科学具有4个不同于传统科学的发展特点。第一,自从1987年世界环境与发展委员会正式定义“可持续发展”之后,相关文章呈现爆发式增长(平均8.3年增长1倍,图4);第二,从发表文章数

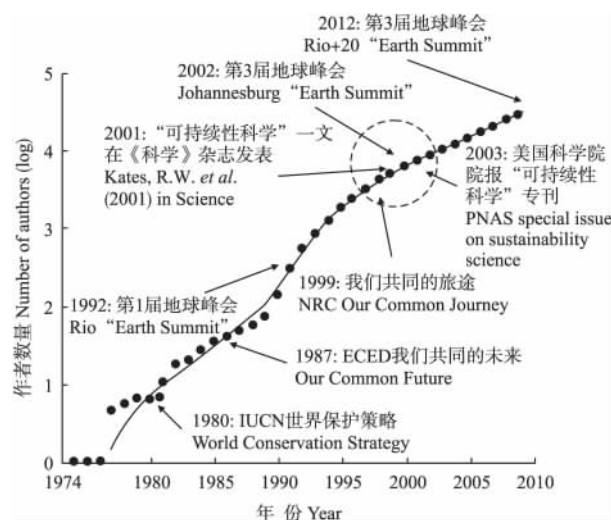


图4 可持续发展研究历程中的重要事件和可持续性科学的形成

Fig. 4 Historic events in sustainable development research and the emergence of sustainability science.

根据 Bettencourt 和 Kaur^[11] 修改重绘 Redrawn with modifications from Bettencourt and Kaur^[11].

量和引用频次来看,参与研究可持续性的国家数量众多,不仅包括传统的科学强国(如美国、西欧和日本等发达国家),同时也包括大量的发展中国家(如中国、巴西、印度、南非、土耳其等);第三,传统科学的发展往往局限于较窄的专业领域,而可持续性科学涉及的领域甚广,其中社会学、生物学以及工程学是对其发展作出重大贡献的3个领域;第四,共同作者数量多,体现了比传统科学研究远为广泛的作者间的合作(图4)。Kates^[12]对 Bettencourt 和 Kaur^[11]的工作给予了肯定,认为“他们作为可持续性科学领域的局外人,利用自身的专业技术,深刻揭示了可持续性科学与传统科学的区别”。

然而,尽管我们可以概略地把可持续性科学说成是“研究可持续发展的科学”,凡是有关可持续发展的研究并非一定是可持续性科学的内容。关于可持续发展的研究至少已有40年的历史,其间有大量的论文以及政府和其他非学术组织的报告发表。2000年以前发表的大多数有关可持续发展的文献缺乏统一的概念框架,缺乏系统性和严谨性,缺乏科学规范。因此,这一时期的许多可持续发展的研究被视为社会科学或与政府决策有关的实用研究,并未受到自然科学家的广泛重视。而在自然科学中,与可持续发展研究关系最为密切的包括生态学和环境科学。但这两个学科中的所谓可持续发展研究,长期以来只重视生态或环境可持续性,对社会和经济可持续性考虑甚少。而所谓生态或环境可持续性长期以

来聚焦于生物多样性保护和生态系统稳定性。我们在这一节开首已谈到,直到 21 世纪初可持续性科学才正式问世,但在短短的十几年来已经引起了自然科学、社会科学、人文学科各领域的广泛关注,其科学框架和理论与方法体系正在形成之中。

3 可持续性科学的主要研究论题

如前所述,可持续性科学的研究领域非常之广,涉及到的学科亦极为庞杂。但是,作为一门科学,无论交叉学科还是横向学科,都须有其主导性的研究核心问题。这里,我们根据近年来该领域的一系列重要文献,归纳并讨论一下可持续性科学的主要研究论题。

在 2001 年发表的可持续性科学的奠基之作中,Kates 等^[6]提出了该领域的 7 个核心论题:

1) 如何把自然和社会之间的动态关系——包括滞后和惯性——更好地整合到正在兴起的地球系统-人类发展-可持续性的耦合模式和概念框架之中?

2) 环境和发展的长期变化趋势——包括消费和人口——如何改变自然和社会之间的相互作用,进而影响可持续性?

3) 在不同区域,对于不同的生态系统和人类生计类型,什么在决定自然-社会耦合系统的脆弱性(vulnerability)和弹性(resilience)?

4) 如何科学而有效地定义能够预警自然-社会系统严重退化的极限条件和边界域值?

5) 什么样的激励结构系统(systems of incentive structures)——包括市场、政策、规范和科学信息——方能最有效地促进将自然和社会相互作用导入可持续轨道的社会能力(social capacity)?

6) 如何将现有的关于环境和社会条件的监测和呈报系统加以整合和扩展,从而为向可持续性过渡提供更有指导?

7) 如何将如今相对独立的研究规划、监测、评估和决策支撑诸项活动更好地整合于适应性管理和社会学习(social learning)的系统之中?

2010 年,Levin 和 Clark^[29]在 Kates 等^[6]的 7 个“核心”问题的基础上,提出了可持续性科学中的 6 个“基本”问题:

1) 人类福祉和自然环境之间的主要得失权衡(tradeoffs)是什么,而这些得失权衡又是如何受人类利用自然的方式所影响?

2) 什么在决定人与环境耦合系统的适应性,更

广义地讲,该系统在外部干扰和内部变化情况下的脆弱性、抗扰性(或鲁棒性,robustness)和弹性?

3) 什么在决定人与环境之间相互作用的长期趋势和演变过程?

4) 如何构建能更好解释人与环境相互作用在种类和变化趋势方面之差异的理论和模型?

5) 如何才能使社会最有效地引导和管理人与环境系统,从而使其向可持续性过渡?

6) 如何有效而严谨地评估人与环境相互作用不同轨迹的“可持续性”?

2011 年,Kates^[12]又根据 Levin 和 Clark^[29]的论述对 2001 年提出的 7 个核心论题做了修改,具体内容如下:

1) 什么在决定人与环境耦合系统的长期趋势和演变过程,从而主导本世纪的主要变化方向?

2) 什么在决定人与环境系统的适应性、脆弱性及弹性?

3) 如何构建能够更好解释人与环境相互作用之差异的理论和模型?

4) 人类福祉与自然环境之间的主要得失权衡是什么?

5) 如何科学而有效地定义能够为人与环境系统预警的极限条件?

6) 如何才能使社会最有效地引导和管理人与环境系统,从而使其向可持续性过渡?

7) 如何评估环境和发展的不同途径的“可持续性”?

比较一下以上的 3 个版本不难看出,Levin 和 Clark^[29]所提出的 6 个基本问题与 Kates 等^[6]提出的 7 个论题其实相似,但不尽相同。首先,Levin 和 Clark^[29]的第 2、3、4、5 和 6 基本问题分别对应于 Kates 等^[6]的第 3、2、1、5 + 6 和 7 核心论题,但两者间有一重要区别:那就是前者增加了人类福祉与自然环境之间的主要得失权衡一项。确实,人与环境之间、生态系统服务和人类福祉之间、以及不同生态系统服务之间的得失权衡是近些年来生态学、环境科学和可持续性科学研究的一大热点。第二,Levin 和 Clark^[29]用人与环境(耦合)系统取代了自然-社会(耦合)系统。当今世界,没有人为干扰的“自然”实在罕见;即使在生态学中,何为自然争议颇多,从未有定论。因此,在探讨可持续性科学问题时,人与环境系统比自然-社会系统更适当。第三,Levin 与 Clark^[29]似乎将“预警”极限和边界阈值一条有意删除。当然,在研究人与环境系统的脆弱性、抗扰性和弹性时,不

可避免地要涉及到极限和边界阈值的概念。

Kates^[12]在2011年修改后的7个核心论题,是对Kates等^[6]2001版的7个论题和Levin和Clark^[29]2010年提出的6个基本问题的整合。除了在排列顺序和措辞上有所不同,Kates^[12](2011)的7个核心论题中的6个(1、2、3、4、6、7)和Levin和Clark^[29]所提的6个基本问题基本等同。显然,人与环境系统取代了自然社会系统。更重要的是,Kates^[12]增加了人类福祉与自然环境之间的主要得失权衡,而将其2001年版中激励结构系统和监测和呈报系统加以合并,统称为引导和管理人与环境系统,从而使其向可持续性过渡的社会能力。此外,他仍然将确定系统预警的极限和阈值作为一个核心论题单独列出。综上所述,Kates^[12]在2011年的修改版是对目前可持续性科学主要研究论题最完整和最权威的概括。

4 可持续性定量评估方法

如何定量地评估“可持续性”显然是可持续性科学研究中的一个重要环节^[13,30-31]。可持续性定量评估方法的研究和应用在可持续性科学正式出现之前就已经开始。1992年在巴西里约热内卢召开的第一届地球峰会上通过了《21世纪议程》(Agenda 21; <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>),呼吁构建可持续发展评估方法。随后,一系列的国际组织、政府部门和学术团体及许多科学家一直在积极推进可持续发展评估的研究和应用,涌现出多种评估方法和分类标准,已经发表的文献可谓海量。泛阅取优,Ness等^[31]依据3个标准——时间特征(回溯/历史性的或前瞻/预测性的)、研究焦点(如针对产品的、政策的或某一区域的)和整合程度(即是否同时考虑自然、社会和经济3个方面)——将可持续发展评估方法大致分为3类:指标(indicator)和指数(index)、基于产品的评估方法(product-related assessment methods)和往往涉及到动态模型的综合性评估方法(integrated assessment methods)(图5)。其中,可持续性指标和指数以及可持续性动态模型尤为重要。前者在数学上较为简单,已经广为使用;后者可以模拟系统过程和功能,有助于理解、预测和调控人与环境耦合系统的行为。由于篇幅有限,我们在这里只作一概述。

4.1 可持续发展指数和指标体系

可持续性指标框架是基于可持续发展原理,指导指标选择、发展和整合的概念构架^[13]。常见的可

持续性指标框架包括:1)压力-状态-响应框架(pressure-state-response framework,PSR)、基于主题的框架(theme-based framework)、基于资本的框架(capital-based framework)、综合核算框架(integrated accounting framework)以及包容性财富框架(inclusive wealth framework)^[13,32-34]。

比较广泛应用的综合性可持续性指标包括:生态足迹(ecological footprint,EF)、绿色GDP、人类发展指数(human development index,HDI)、幸福星球指数(happy planet index,HPI)、真实进步指标(genuine progress indicator,GPI)、可持续经济福利指数(index of sustainable economic welfare,ISEW;与GPI基本相同)、环境绩效指数(environmental performance index,EPI;其前身为环境可持续指数,environmental sustainability index,ESI)以及包容性财富指数(inclusive wealth index,IWI)。这些指数在这里只是简单提及,大量文献对其有详尽描述^[13]。这些综合指数往往包含代表环境、经济和社会诸方面的多个指标,经过加权和聚合最终获得一个衡量可持续性的总值。然而,在应用可持续性指标体系时,则不需要将所有指标聚合成一个指数。采用多个指标分别度量可持续性的各个维度和具体方面有时更为必要,更容易理解。影响较为广泛的可持续发展指标体系包括联合国千年发展目标指标体系(Millennium Development Goals Indicators; <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Default.aspx>)和联合国可持续发展委员会指标体系(United Nations Commission on Sustainable Development Indicators)^[34]。

值得一提的是,我国在可持续发展指标体系的发展和应用方面做了大量工作^[15,35-37]。譬如,中国科学院可持续发展战略研究组设计了一套“五级叠加,逐层收敛,规范权重,统一排序”的可持续发展指标体系^[37]。该指标体系分为总体层、系统层、状态层、变量层和要素层5个等级。总体层表达可持续发展的综合能力;系统层包括具有内部逻辑关系的5大支持系统:生存支持系统、发展支持系统、环境支持系统、社会支持系统和智力支持系统;状态层从不同角度表现某一系统的静态或动态特征;变量层采用多个指标反映状态的行为、关系、变化及其原因;要素层采用可测的、可比的、可获得的指标及指标群对变量层的数量表现、强度表现、速率表现给予直接的度量^[37]。该指标体系考虑了可持续发展的时空耦合以及各要素间相互作用,体现了发展度、协调度、持续度三者的统一^[38]。

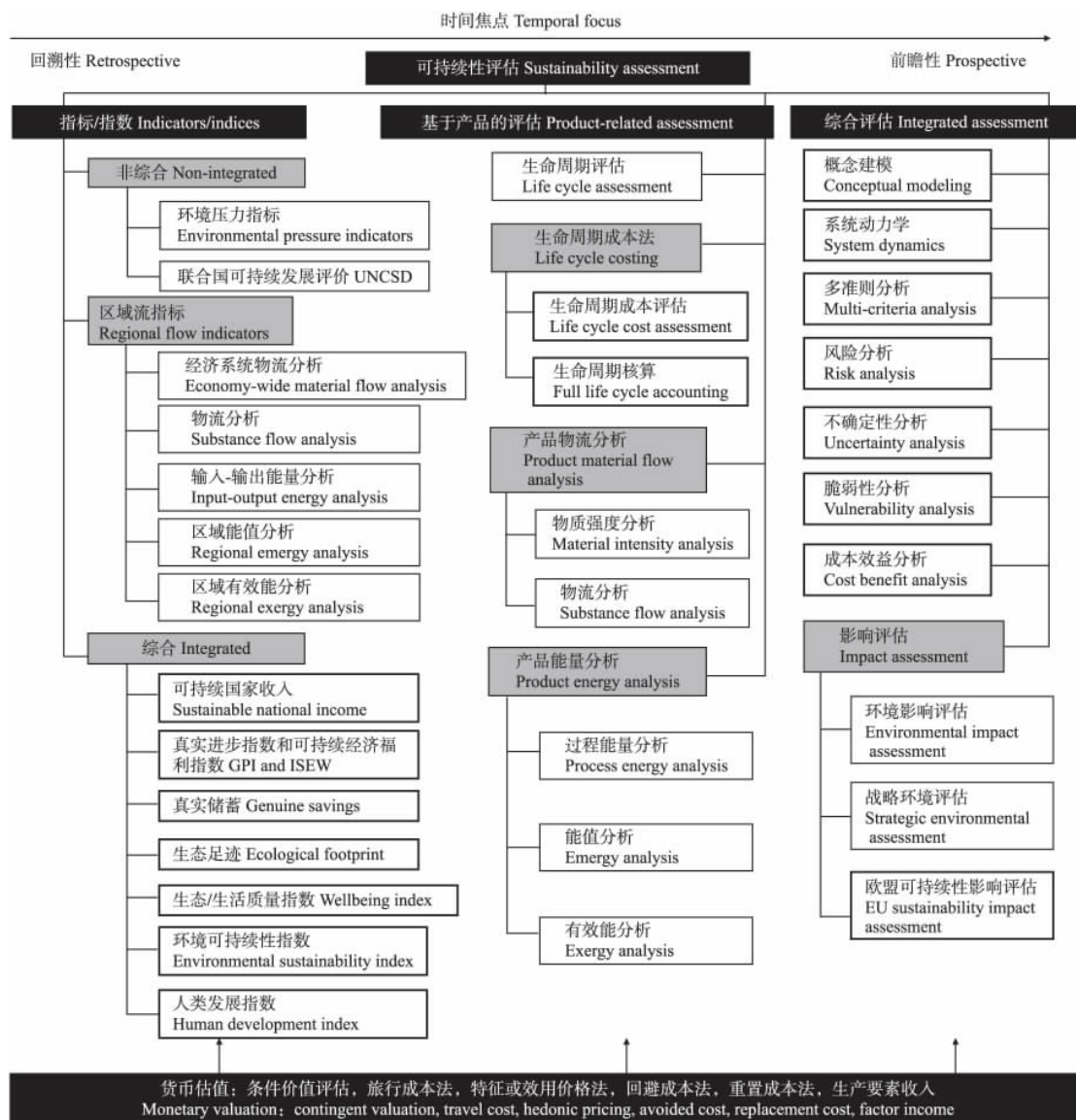


图5 可持续发展评估方法分类

Fig. 5 Classification of sustainability assessment tools.

根据 Ness 等^[31] 重绘。粗线框表示同时涵盖 2 或 3 个可持续性支柱的方法 Slightly modified from Ness *et al.*^[31]. Boxes with thick lines represented methods that simultaneously consider 2 or 3 sustainability pillars.

4.2 可持续发展动态模型

可持续性指标和指数是基于数据的,对系统状态在某一时刻或时间段的量化。虽然在采用时间序列数据时,指标或指数亦可用来刻画系统状态随时间的变化,但并不直接涉及系统的过程和机制,因此缺乏解释和预测能力。为了对环境-经济-社会耦合系统有深刻的认识和理解,并对将来可能发生的情况进行分析、模拟和预测,可持续发展动态模型是必不可少的。

理想的可持续发展动态模型应该同时考虑环境、社会和经济过程及其相互关系,将这些关系定量化,进而通过模拟试验或情景分析来探讨不同的管

理、规划和决策方案如何影响人与环境系统的可持续性,包括系统脆弱性、弹性、抗扰性和稳定性。因为简单的数学解析模型(analytical models)往往不足以描述复杂的人与环境耦合系统的结构和过程,可持续性模型大多是计算机模拟模型。例如,GAPSIM 是为研究土耳其安纳托利亚地区综合发展所导致的长期环境问题而设计的系统动力学模拟模型^[39]。PALM 是模拟自给型农村社区碳、水和氮的循环以及经济、劳动力和决策等因素相互作用的智能体模型(agent-based model)^[40]。SUNtool 是用于城市社区可持续发展规划设计的模拟模型,已应用于捷克、芬兰、法国、希腊、瑞士和英国的一些城市社区的可持续

续发展规划研究^[41]. Threshold 21 是突出政策分析的国家尺度可持续发展的系统动力学模型^[42]. 它涉及整个国家可持续发展的经济、社会和环境诸方面,已应用于包括发达国家和发展中国家在内的 20 多个国家. SCENE 是具有 4 个等级层次的可持续发展概念模型框架,可用于指导建立可持续性指标体系和发展环境-经济-社会耦合动态模型^[43-44].

在过去的 20 多年来,可持续发展指标体系和动态模型方法均有长足发展. 虽然问题尚多,但可持续性科学的进一步发展必然要更加依赖于这些定量研究手段. 就目前研究现状而言,除了要解决许多技术问题之外,未来研究需要将可持续发展指标体系和动态模型与可持续性科学的核心问题紧密结合在一起. 只有这样,可持续性评估方法的发展和可持续性科学核心问题的深入探究才能相得益彰. 此外,基于地域的可持续性案例研究永远是必要的,也是极为重要的,但寻求普遍规律是任何科学必须具有的特征.

5 讨论和结论

生态学家常言,生态学是人类生存的科学. 其实,当之无愧的人类生存之科学应该是可持续性科学. Kates 等^[45]指出,可持续发展必须要回答 3 个基本问题:持续什么? 发展什么? 持续多久? 在具体的可持续性研究中,还有两个基本问题应该明确地回答^[1,46]:持续和发展两者间关系是什么? 空间尺度是什么? 生物多样性、生态系统过程和生态系统服务是需要持续的;经济、社会和人类福祉是需要发展的;持续的时间尺度不是无限或永远;环境和发展非但相互制约,亦可相辅相成;可持续性研究在空间上应该是多尺度的,但景观和区域可能往往是最可操作的.

具体地说,可持续发展的许多重要内容会因时、因地、因人而异. 地球非永恒,宇宙非永恒,可持续性也不该是永远. 那么,在研究可持续发展问题时,什么时间尺度为宜? NRC 报告^[19]建议的是两代人的时间(约 50 年);Kates^[12]认为应该是一个世纪. 人和环境系统是由多尺度格局和过程组成的复杂系统,其可持续性研究的时间尺度也应该是在多个时间尺度上进行^[1,5,46]. 然而,对于大多数可持续性研究而言,几十年到一百年的时间尺度较为合理. 时间太短难以称为“长期”,但若时间太长,环境变化、科学技术进步、政策变化以及人类生活方式的改变会

对研究带来极大的不确定性^[16]. 这样的科学研究恐怕无异于“科学幻想”.

勿容置疑,实现全球可持续发展是人类之最终目标,可持续性科学必须注重多尺度研究. 同时,我们认为应该明确,景观和区域是可持续发展研究和实践的基本空间单元^[1,7,46]. 景观和区域大于单个局地生态系统,但远小于包含多个环境-经济-社会复合体系的大陆或全球,因此是研究可持续性过程和机理方面最可操作的空间尺度. 景观和区域不但是可持续性研究的基本空间单元,而且也是上通全球、下达局地的一个重要枢纽尺度^[1,7,46]. 既然如此,景观可持续性的研究在可持续性科学的发展中应具重要地位. Wu^[16]将景观可持续性定义为“特定景观所具有的、能够长期而稳定地提供生态系统服务、从而维护和改善本区域人类福祉的综合能力”. 在此基础上,Wu^[16]进而定义了景观可持续性科学(landscape sustainability science):“景观可持续性科学是聚焦于景观和区域尺度的,通过空间显示方法来研究景观格局、生态系统服务和人类福祉之间相互关系的科学”(图 6). 为了理解这种动态关系,生物多样性和生态系统过程,以及气候变化、土地利用变化和其他社会经济驱动过程对生态系统服务和人类福祉的影响,也必须加以考虑(图 6).

景观可持续性科学研究的最终目的是,寻求在具有不确定性的内部动态和外部干扰的情况下,能够促进生态系统服务和人类福祉长期维系和改善的景观与区域空间格局(图 6). 这些“最优”或“较优”的格局必然是动态的,与时俱变的. 在某一具体区域,不同类型的景观(如自然景观、半自然景观、农业景观和城市景观)在生态系统服务的类型和数量上亦不同;因此,景观尺度上的可持续性必须要重视不同类型的生态系统的组成和空间配置,而区域尺度上的可持续性则必须重视不同类型的景观的组成和空间配置. 空间格局优化是景观和区域可持续性科学的一个共同的核心问题;而研究和实现空间优化显然与土地规划和设计以及社会经济体制和政策密切相关. 我们认为,景观可持续性科学是可持续性科学的核心内容,也将是该领域在日后几年到几十年的研究热点^[16,47-50]. 这些研究对我国国土资源空间优化,构建美丽地区和美丽中国,最终实现生态文明是至关重要的,其意义也是显而易见的. 因此,我

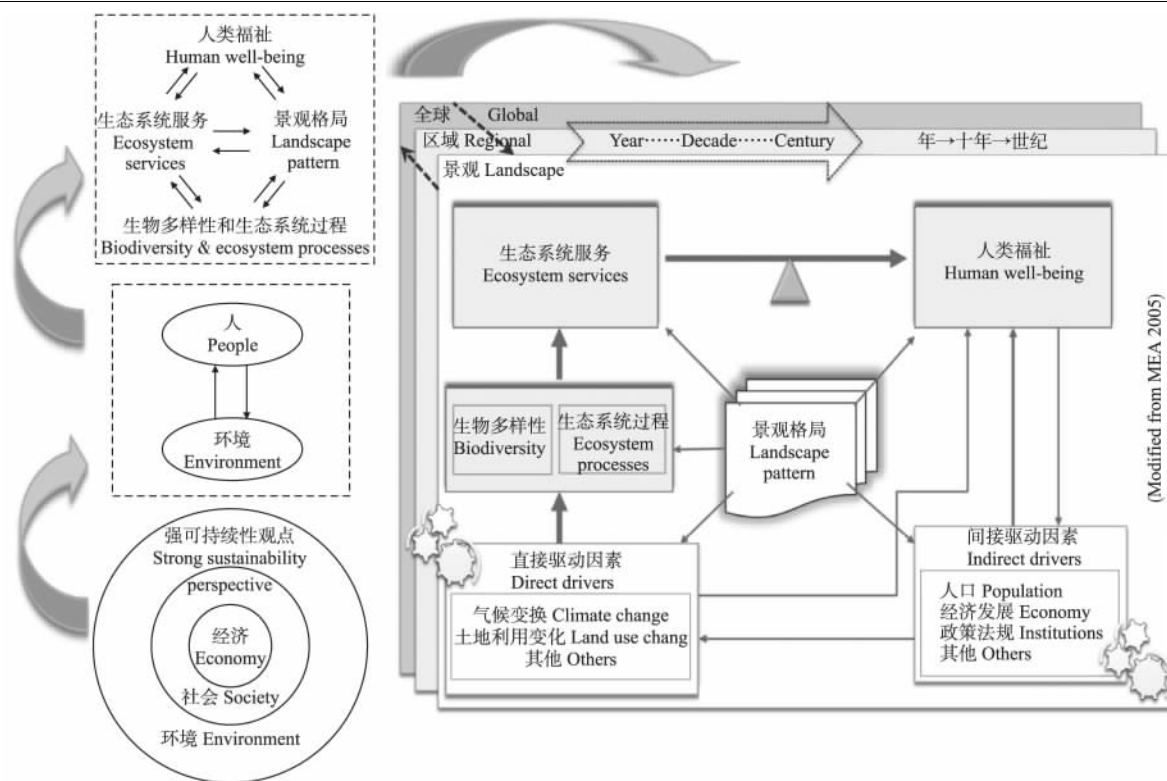


图6 景观可持续性科学概念框架

Fig. 6 Framework of landscape sustainability science, showing the key elements and their relationships.

根据 Wu^[16] 修改重绘 Modified from Wu^[16].

们希望,也相信,在以后的几十年内中国将在可持续性科学的研究和实践方面有长足发展,并跻身于世界可持续发展强国之列。

参考文献

- [1] Wu JG. A landscape approach for sustainability science// Weinstein MP, Turner RE, eds. Sustainability Science: The Emerging Paradigm and the Urban Environment. New York: Springer, 2012: 59–77
- [2] Clark W, Crutzen P, Schellnhuber H. Science for global sustainability: Toward a new paradigm// Schellnhuber H, Crutzen P, Clark W, et al. eds. Earth System Analysis for Sustainability. Berlin: Dahlem University Press, 2004: 1–28
- [3] Kareiva P, Watts S, McDonald R, et al. Domesticated nature: Shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 2007, **316**: 1866–1869
- [4] Wu JG. Making the case for landscape ecology: An effective approach to urban sustainability. *Landscape Journal*, 2008, **27**: 41–50
- [5] Wu JG, Loucks OL. From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Quarterly Review of Biology*, 1995, **70**: 439–466
- [6] Kates RW, Clark WC, Corell R, et al. Environment and development: Sustainability science. *Science*, 2001, **292**: 641–642
- [7] Wu JG. Landscape ecology, cross-disciplinarity, and sustainability science. *Landscape Ecology*, 2006, **21**: 1–4
- [8] Wu JG. Urban sustainability: An inevitable goal of landscape research. *Landscape Ecology*, 2010, **25**: 1–4
- [9] Wu J-G (邬建国). Landscape Ecology and Sustainability Science// Wu Y-G (伍业刚), Fan J-W (樊江文), eds. Ecological Complexity and Ecological Vision. Beijing: Higher Education Press, 2010
- [10] Jerneck A, Olsson L, Ness B, et al. Structuring sustainability science. *Sustainability Science*, 2011, **6**: 69–82
- [11] Bettencourt LMA, Kaur J. Evolution and structure of sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**: 19540–19545
- [12] Kates RW. What kind of a science is sustainability science? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**: 19449–19450
- [13] Wu JG, Wu T. Sustainability indicators and indices: An overview// Christian N, Madu C, Kuei C, eds. Handbook of Sustainable Management. London: Imperial College Press, 2012: 65–86
- [14] Zhao J-Z (赵景柱). Theoretical analysis of sustainable development (I). *Ecological Economy (生态经济)*, 1991, **5**(2): 12–15 (in Chinese)
- [15] Zhao J-Z (赵景柱). Theoretical analysis of sustainable development (II). *Ecological Economy (生态经济)*, 1991, **5**(3): 6–10 (in Chinese)
- [16] Wu JG. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 999–1023
- [17] Kidd CV. The evolution of sustainability. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 1992, **5**: 1–26

- [18] WCED. Our Common Future. New York: Oxford University Press, 1987
- [19] NRC. Our Common Journey: A Transition toward Sustainability. Washington, DC: National Academies Press, 1999
- [20] Daly H, Jacobs M, Skolimowski H. Discussion of beckerman's critique of sustainable development. *Environmental Values*, 1995, **4**: 49–70
- [21] Daly H, Cobb J. For the Common Good. Boston: Beacon Press, 1989
- [22] Koltko-Rivera ME. Rediscovering the later version of Maslow's hierarchy of needs: Self-transcendence and opportunities for theory, research, and unification. *Review of General Psychology*, 2006, **10**: 302–317
- [23] Maslow A. Motivation and Personality. New York: Harper and Row, 1954
- [24] MEA. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. Washington DC: Island Press, 2005
- [25] Dominati E, Patterson M, Mackay A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 2010, **69**: 1858–1868
- [26] Clark WC, Dickson NM. Sustainability science: The emerging research program. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, **100**: 8059–8061
- [27] Ostrom E, Janssen MA, Anderies JM. Going beyond panaceas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**: 15176–15178
- [28] Kates RW. Sustainability science// IAP (Interacademy Panel on International Issues), ed. Transition to Sustainability in the 21st Century: The Contribution of Science and Technology. Washington DC: National Academies Press, 2003: 140–145
- [29] Levin SA, Clark WC. Toward a Science of Sustainability: Report from toward a Science of Sustainability Conference. Princeton: Princeton Environmental Institute, 2010
- [30] Parris TM, Kates RW. Characterizing and measuring sustainable development. *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, **28**: 559–586
- [31] Ness B, Urbel-Piirsalu E, Anderberg S, et al. Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 2007, **60**: 498–508
- [32] OECD. OECD Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1993
- [33] UNU-IHDP, UNEP. Inclusive Wealth Report 2012: Measuring Progress toward Sustainability. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
- [34] UN. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. 3rd Ed. New York: United Nations, 2007
- [35] Zhao J-Z (赵景柱). Theoretical analysis on the measurement of sustainable development of social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1995, **15**(3): 327–330 (in Chinese)
- [36] Zhao JZ. Towards Sustainable Cities in China: Analysis and Assessment of Some Chinese Cities in 2008. New York: Springer, 2011
- [37] Sustainable Development Research Group of Chinese Academy of Sciences (中国科学院可持续发展战略研究组). Assessment Report of China Sustainable Development. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese).
- [38] Niu W-Y (牛文元). Theory and practice of sustainable development in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* (中国科学院院刊), 2012, **27**(3): 280–290 (in Chinese)
- [39] Saysel AK, Barlas Y, Yenigun O. Environmental sustainability in an agricultural development project: A system dynamics approach. *Journal of Environmental Management*, 2002, **64**: 247–260
- [40] Matthews R. The People and Landscape Model (PALM): Towards full integration of human decision-making and biophysical simulation models. *Ecological Modelling*, 2006, **194**: 329–343
- [41] Robinson D, Campbell N, Gaiser W, et al. SUNtool A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, 2007, **81**: 1196–1211
- [42] Barney GO. The Global 2000 Report to the President and the Threshold 21 Model: Influences of Dana Meadows and system dynamics. *System Dynamics Review*, 2002, **18**: 123–136
- [43] Grosskurth J. Ambition and reality in modeling: A case study on public planning for regional sustainability. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 2007, **3**: 3–11
- [44] Grosskurth J, Rotmans J. The scene model: Getting a grip on sustainable development in policy making. *Environment, Development and Sustainability*, 2005, **7**: 135–151
- [45] Kates RW, Parris TM, Leiserowitz AA. What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice. *Environment*, 2005, **47**: 8–21
- [46] Wu JG. Hierarchy and scaling: Extrapolating information along a scaling ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, **25**: 367–380
- [47] Wu JG. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 1–11
- [48] Musacchio L. Key concepts and research priorities for landscape sustainability. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 995–998
- [49] Turner M, Donato D, Romme W. Consequences of spatial heterogeneity for ecosystem services in changing forest landscapes: Priorities for future research. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 1081–1097
- [50] Potschin M, Haines-Young R. Landscapes, sustainability and the place-based analysis of ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2013, **28**: 1053–1065

作者简介 邬建国,男,内蒙古人,美国亚利桑那州立大学教授,中美生态、能源及可持续性科学内蒙古研究中心和北京师范大学人与环境系统可持续性研究中心创始人。主要从事景观生态学、城市生态学和可持续性科学研究,发表著作13部,论文230余篇。E-mail: Jingle.Wu@asu.edu

责任编辑 肖红
