

DOI: 10.5846/stxb202006271659

黄璐, 邬建国, 王珂, 张微. 可持续景观规划——融合景观可持续性研究与地理设计. 生态学报, 2022, 42(2): 442-449.

Huang L, Wu J G, Wang K, Zhang W. Sustainable landscape planning: integrating landscape sustainability research with GeoDesign. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 442-449.

可持续景观规划——融合景观可持续性研究与地理设计

黄 璐^{1,*}, 邬建国^{2,3}, 王 珂^{1,4}, 张 微⁵

1 浙江大学新农村发展研究院, 杭州 310058

2 美国亚利桑那州立大学生命科学学院, 美国亚利桑那州 85281

3 美国亚利桑那州立大学可持续性学院, 美国亚利桑那州 85281

4 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

5 浙江大学软件学院, 杭州 310058

摘要: 人类活动对景观的影响遍及世界各个角落, 其广度、强度、频度不断增大。为了改变生态环境在人类社会经济增长压力下的不可持续状态, 景观需要科学合理的设计与管理。可持续景观规划是在景观尺度上, 在可持续性科学的指导下, 平衡生态系统服务的供需关系, 将生态、社会、经济活动过程反映到空间优化上, 不断提高人类福祉的规划过程。为了能够实践该规划思路, 在景观可持续性研究与地理设计融合的概念框架基础上, 提出可持续景观规划的八个步骤, 在问题诊断与目标设定、多源数据组织与管理、尺度匹配与多尺度分析、景观格局过程分析和可持续性评估、生态系统服务与景观格局关系模拟、情景分析与方案评估、地理设计平台搭建、可视化与人机互动等关键步骤中, 融入了强-弱可持续性、多尺度分析、生态系统服务、可持续性指标、大数据应用, 以及文化和地方感。研究提出的可持续性景观规划步骤与实现路径体现了多学科交叉、实时评估反馈、信息技术应用、利益相关者参与的特点, 可被用于旨在提高人类福祉的多尺度空间优化和可持续景观设计。

关键词: 景观可持续性; 地理设计; 空间优化; 生态系统服务; 景观格局

Sustainable landscape planning: integrating landscape sustainability research with GeoDesign

HUANG Lu^{1,*}, WU Jianguo^{2,3}, WANG Ke^{1,4}, ZHANG Wei⁵

1 The Rural Development Academy, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2 School of Life Sciences, Arizona State University, Tempe, AZ 85281, USA

3 School of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85281, USA

4 College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

5 School of Software Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: The scope, intensity, and frequency of human influences on landscapes have been increasing rapidly all over the world. In order to change the unsustainable state of the environment which is pressured by human activities, landscapes need to be planned and managed properly following scientific principles. Sustainable landscape planning is a sustainability science-based planning process that aims to balance the supply and demand of ecosystem services at the landscape scale, spatially optimizes ecological, social and economic processes, and ultimately improves human wellbeing. In order to implement this planning idea, here we propose an eight-step framework of sustainable landscape planning, which integrates

基金项目: 国家自然科学基金 (41701638)

收稿日期: 2020-06-27; 网络出版日期: 2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luhuang2019@zju.edu.cn

landscape sustainability research and GeoDesign. Strong/weak sustainability, multiple scales, ecosystem services, sustainability indicators, big data application, and culture and sense of place are integrated into the key steps of problem diagnosis and goal setting, organization and management of multisource data, scale matching and multiscale analysis, landscape pattern-process analysis and sustainability assessment, landscape pattern-ecosystem services relationship simulation, scenario analysis and scheme evaluation, GeoDesign platform construction, and visualization and human-computer interaction. The procedural steps and implementation pathways of sustainable landscape planning proposed in this study are characterized by interdisciplinarity, real-time evaluation feedbacks, use of advanced information technologies, and stakeholder participation, which can be used for multi-scale spatial optimization and sustainable landscape design to enhance human wellbeing.

Key Words: landscape sustainability; GeoDesign; spatial optimization; ecosystem services; landscape pattern

可持续发展是时代的主题。正由于目前生存状态的不可持续性,人们才迫切需要“以应用为启发”和“以解决问题为导向”的研究,从而探讨解决人与环境失衡下产生的各种问题。与可持续发展直接相关的是一门新兴的整合型学科方向——可持续性科学^[1],研究人与环境之间的动态变化,非线性动力学、自组织复杂性、弹性、阈值、适应性管理、社会学习等是其重要概念^[1-2]。为了使可持续性科学具有操作性,须在合适的空间尺度上进行研究与实践。景观尺度上通全球、下达局地,提供了一个供科研工作者、规划者、决策者、利益相关者共同研究和探讨的空间单元。景观可持续性研究聚焦于景观和区域尺度,通过空间显式方法来研究景观格局、生态系统服务和人类福祉之间的动态关系^[2],一个重要研究点是如何设计出更加合理的景观格局,从而维持或提高生态系统服务,进而保障人类福祉。因此,可持续景观规划是在景观尺度上,在可持续性科学的指导下,深入了解环境与人类活动的动态关系,平衡生态系统服务供需,将环境、社会、经济活动过程反映到空间优化上,不断提高人类福祉的规划过程^[2-7]。本文为了探索如何开展可持续景观规划,连接了景观可持续性研究和地理设计,从两者的关系角度出发,提出了景观可持续性与地理设计融合的路径与方法,以期为可持续景观规划的方法研究和实践应用打下基础。

1 地理设计与景观可持续性的关系

地理设计是基于新一代信息技术,尤其是空间信息技术的规划方法。最早于2008年“GIS与设计中的空间概念”会议中被提出,最被认可的定义是“在系统性思维和数字技术支持下,模拟规划效应、产生规划方案的一种规划设计方法”^[8]。地理设计与传统基于CAD设计最大的不同在于前者具有与真实地理环境相关联的设计环境,设计者可随时获得该环境数据,拥有实时反馈机制的工作流程,可实现设计结果和评估模型的兼容。目前许多设计工具已经有了地理设计的雏形^[9]。CommunitzVis和INDEX等规划软件都支持用户在生成规划方案的同时迅速形成方案评估结果,建筑设计领域近年来尝试将建筑信息模型(Building Information Modeling)的范围进行拓展,使其不再只关注建筑本身,而是将建筑与周边环境的关系也纳入到建筑设计与管理过程中来。一些大型规划设计公司也在独立开发产品(如AECOM公司开发的可持续系统集成模型),从而对项目进行可持续的开发和管理。在当今技术飞速发展的背景下,地理设计拥有很强的生命力和拓展力。

为什么地理设计需要景观可持续性研究?当前地理设计主要面临四方面不足:生态过程的分析不足,规划过程的动态分析不足,公众参与规划的途径不足,规划结果的快速评估不足。针对第一个不足,正是景观可持续性研究能够为地理设计带来的最重要的内容。目前多数规划的生态分析是判断生态系统的状态,缺乏过程分析,尤其是过程变化对人的影响分析,随着生态环境数据的增多和以景观生态学为代表的学科融入,研究者对生态过程有了更多了解。地理设计可以在景观可持续性研究的指引下,将生态分析从注重自然环境分析,扩展到生态系统服务和人类福祉,更加贴合可持续发展方向。

为什么景观可持续性研究也需要地理设计? 景观可持续性研究的最终目的是优化空间格局, 提高人类福祉, 这要将空间格局、生态系统服务、人类福祉三者之间的关系以空间显式的方式进行分析、模拟和验证, 地理设计可以提供一个分析平台, 模拟一定限制条件下, 不同变量对其他变量的影响关系, 在这个过程中, 平台提供的可视化、实时评估反馈能够帮助进一步理解三者之间的关系, 提高景观可持续性研究的落地性^[10]。同时, 理想的地理设计包含了动态分析、快速评估与公众参与, 能够对景观可持续性这一与人类福祉密切相关的学科往实践方面再扩展一步, 使景观可持续规划成为一个新的规划研究方向, 使景观可持续性研究真正成为多维度、穿越自然科学和社会科学界线、集理论和实践为一体的学科方向。

综上可知, 景观可持续性研究与地理设计分属两个不同的研究领域, 前者是可持续性科学的研究分支, 后者是规划学的新兴方法。除了有相互交叉融合的需求外, 是否具有融合的基础? 基于多学科背景, 我们提出了两者共同关注的六个研究点——强/弱可持续性、多尺度、生态系统服务、可持续性指标、大数据应用、文化和地方感。该部分内容已在 *Integrating GeoDesign with Landscape Sustainability Science*^[11] 中详细论述, 本文不再赘述, 这六个研究点将会体现在下文“景观可持续性与地理设计融合的路径与方法”中。

2 景观可持续性与地理设计融合的路径与方法

从景观可持续性研究和地理设计的学科背景出发, 本文提出了可持续景观规划的程序性框架(图1)。该框架主要包括八个步骤, 目的是要将景观可持续性研究的理念和信息技术的应用贯穿于规划设计过程, 最终评价的准则为是否协调环境、社会、经济三方关系, 提高了人类福祉。

2.1 问题诊断与目标设定

每一个景观或区域都面临错综复杂的可持续发展问题, 如何在保证生态环境的基础上进行景观综合利用开发、不断维护或提高生态系统服务与人类福祉是每个规划都面临的挑战。各景观特征不同(从自然景观到城市景观), 其空间内的生态系统服务类型不同, 生态系统服务之间的权衡与协同关系也随之变化^[12], 如城市景观以调节服务为核心, 乡村景观以供给服务为核心。

从当地及周边居民的需求出发, 联合多方利益相关者的需求, 明确需要关注的生态系统服务和所要达到的人类福祉, 有助于确认规划目标。

2.2 多源数据组织与管理

搭建地理设计数据库, 收集遥感、数字高程、水系、大气、土壤、生物多样性等生态地理信息数据, 行政区划、人口、物质能量消耗、产业经济、公共设施、历史文化等社会经济数据, 以及城乡规划、国土规划、环保规划、交通规划等相关规划专题辅助数据。在“3S”技术、数据管理技术的综合支持下, 可针对这些时空数据的多源、异构、多维、动态复杂性, 构建灵活的数据导入机制、适当的数据更新机制, 统一于储存服务器上存储和更新, 建立系统的地理设计数据库。

2.3 尺度匹配与多尺度分析

在规划初期, 需要选择合适的时空尺度进行空间分析。时间尺度具有灵活性, 通常根据数据可获得性进行选择, 一般需要三期数据进行空间格局分析, 因此时间跨度从几个月到几十年不等。时间尺度与空间尺度相关, 空间尺度越大, 时间尺度也相对越大。规划项目规定的空间尺度通常与观测尺度相一致。但为了考虑空间关联, 一般要将尺度向上、向下延伸, 所以至少需要在三个尺度上进行分析、建模, 找到不同景观格局与生

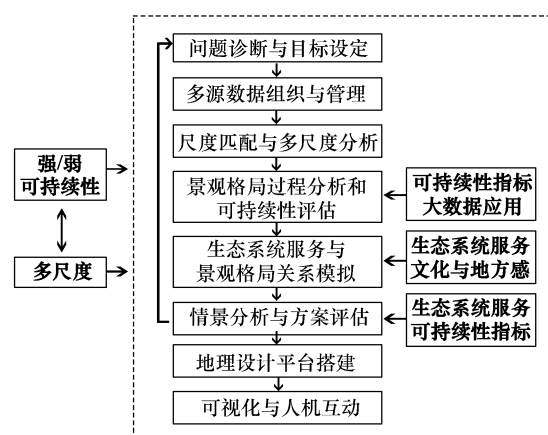


图1 可持续景观规划程序性框架(粗字体表示景观可持续性研究与地理设计的六个共同研究点), 根据文献^[11] 改绘

Fig.1 Procedural framework of sustainable landscape planning (bold fonts represent six common research points of landscape sustainability research and GeoDesign). Modified based on ^[11]

态过程的特征尺度。在强可持续性观点下,上一级空间对下一级空间有约束作用,下一级空间对上一级空间有支撑作用,在此过程中,要保证多种类型尺度(如观测尺度、分析尺度、建模尺度、政策尺度等)的一致性。此外,由于可持续景观规划一般在中观尺度上进行,强、弱可持续性都会涉及到。在宏观尺度上须持强可持续性观点,在微观尺度上可偏向弱可持续性^[13]。为了在景观或区域尺度上实现强可持续性,有时在小尺度上采取弱可持续性是有必要的^[2]。

2.4 景观格局过程分析和可持续性评估

景观格局分析方法相对成熟,一般选用选择面积-边缘类指数、形状类指数、聚散性指数,近年也涌现三维景观格局指数、形态学空间格局分析等方法研究景观格局多维度空间特征及变化情况^[14-16]。景观格局分析需与过程相联系,可选择规划区中的关键生态过程,如关键物种的动态、种子或花粉的传播、物质循环、能量流动等,利用已有研究结果在当地进行参数调整与计算。在可持续性评估中,可选择的指数较多,无论是单一聚合性指数还是指标集,每种指标衡量的侧重点不同,因此需要用多种指标共同衡量。同时,为了坚持强可持续性观点,要至少包含一个强可持续性指标^[17-18],如生态足迹、环境绩效指数、绿色城市指数、基于“压力-状态-响应”框架的指标集、物质能量流指标集等。

2.5 生态系统服务与景观格局关系模拟

生态系统服务连接景观格局、过程与人类福祉,是景观可持续性研究中的重要内容。指标评估法、价值评估法及模型模拟法是生态系统服务供给评估的主要途径。指标法主要针对物质量,能比较客观地反映生态系统的生态过程;而价值法主要针对价值量,偏向于反映生态系统服务的稀缺性,能够为决策制定提供依据^[19]。从强可持续性角度而言,在大尺度上可采用指标法,反映生态系统结构-功能-服务过程,确保关键自然资本不受损害^[20],小尺度上可采用价值法评估自然资本被人造资本替换的价值、协助决策,因此生态系统服务评估在规划设计中应用前景广泛^[21-24]。目前文化服务的研究进度明显慢于其他生物物理服务的研究,在研究方法上有待进一步探索^[25-26]。

生态系统服务与景观格局的关系是可持续景观规划的核心步骤(图2)。可根据未来一段时间内生态系统服务的需求,选取重点关注的生态系统服务供给,如城市景观重点关注的降温、滞尘、持水、降噪等服务,乡村景观重点关注的粮食供给、传粉、水资源供给、水质净化等服务,建立关键生态系统服务供给与景观格局之间的数量关系^[27-29]。目前大多数研究表明,相较于景观组成,景观配置对生态系统服务的影响较小,但定向调节景观配置会影响生态系统服务供给,或者影响特定生态系统服务间相互作用的强度与方向^[30]。在此基础上,根据生态系统服务需求,调整景观结构,实时比较不同组成或配置下的生态系统服务供给变化情况。选择在保障关键生态系统服务供给的基础上、能够满足生态系统服务需求的景观结构。

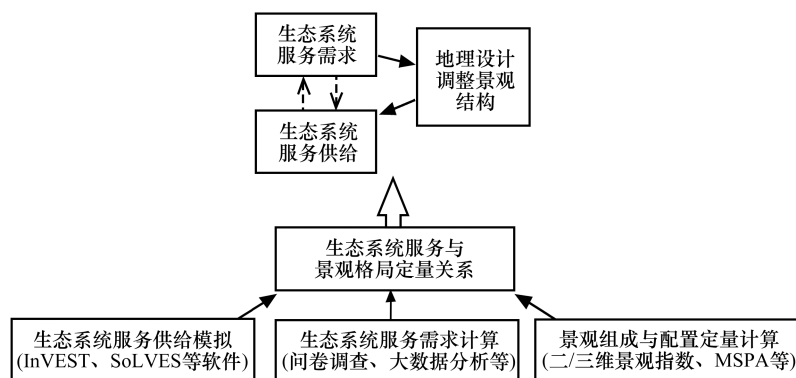


图2 生态系统服务与景观格局的关系模拟

Fig.2 Simulation of the relationships between ecosystem services and landscape pattern

InVEST:生态系统服务和权衡综合评估模型;SoLVES:生态系统服务社会价值模型;MSPA:形态学空间格局分析

2.6 情景分析与方案评估

情景分析是对未来可能性的探索^[31-32],通过设定未来情景的不同目标值,基于生态系统服务供给与景观格局的关系,得出不同目标值下的景观格局情景方案^[33]。在地理设计情景分析中,如何选择合适的特征指标描述未来状态、对未来状态如何挑选可持续性指标进行再评价是核心步骤。对每个情景方案进行评估时,可进行生态系统服务权衡和协同分析、不确定性分析、成本-效益分析,并在此基础上进行各个情景的可持续性评估、人类福祉评估。

2.7 地理设计平台搭建

建模阶段:基于 CAD 现状图,对土地与景观类型分类后进行地块划分与建模(图 3)。解决 CAD 与 GIS 软件无缝连接,特别是在数据交互、转换方法上的连接。在此基础上,开发软件形成一套规则建模的库,实现中小空间尺度的参数化建模。

分析阶段:将生态系统服务模型与指标融入地理设计平台,依靠生态系统服务与景观格局的关系,通过调整景观结构,求解生态系统服务变化。在这个过程中,形成内生的分析手段,将设计的整个流程整合在地理设计的框架中,使所有规划分析图都能够基于平台半自动生产,缩短设计周期。

渲染阶段:针对不同的规划情景方案,对其进行分析与评估后,选定 1—2 种较合适方案,对纹理、光线、投影等信息进行渲染,建立三维虚拟系统。

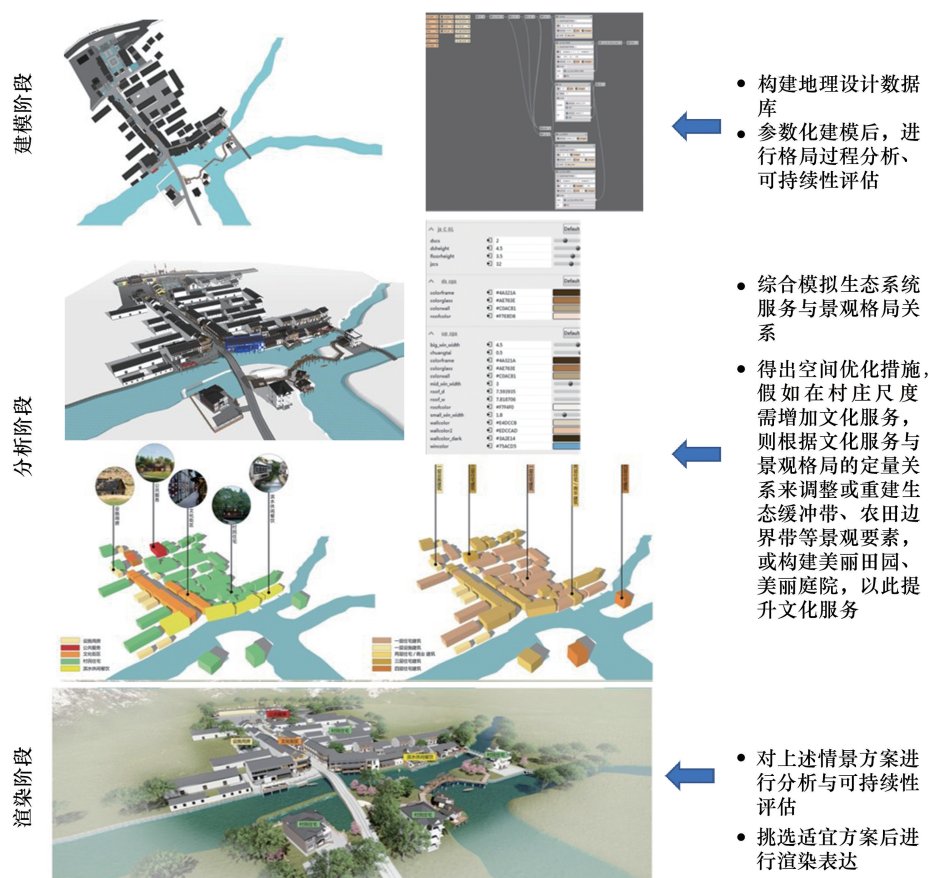


图 3 以村庄尺度为例展示地理设计平台搭建过程

Fig.3 The process of building GeoDesign platform taking the village scale as an example

2.8 可视化与人机互动

在以上步骤中,一方面通过时空大数据反演,结合地面感知网数据,对生态系统服务、地理信息、社会经济

模拟过程中产生的时空数据进行实时动态的可视化表达。在当前,社会经济大数据由于跟人们生活更加密切相关,应用手段层出不穷。随着物联网设备成本的逐步降低,生态环境大数据也日渐丰富,逐步被应用于规划设计领域。然而,由于缺乏数据共享,来自不同项目的大量数据还未能发挥最大价值^[34]。除传统鼠标键盘交互外,积极开发手势交互、命令行交互、脚本语言交互等,利用数字沙盘系统进行展示表达,便捷的交互方式能够为参与式规划提供一条新的途径^[35]。

3 结语

正如诺贝尔经济学奖、图灵奖获得者、人类历史上罕见的通才 Herbert Simon 于 1996 年所述“科学需要关注‘事物是如何运作的’(传统自然科学)和‘事物应该如何运作’(工程和设计科学)”^[36]。规划是根据现实与未来需求,将相关的学科知识综合起来,为复杂的现状瓶颈突破和未来发展方向提供分析与解决方案。面对迫在眉睫的可持续发展问题,研究者已经积累了一定的可持续性方面理论知识(包括可持续性科学,以及生态学、地理学、土地变化科学、土地系统科学、土地系统设计、景观生态学等)^[7,37-39],但如何将这些知识与当今先进技术结合,合理地应用在景观规划中?可持续景观规划作为一个交叉性极强的学科方向,目标非常明确,即在景观可持续性研究的理论基础上,在地理设计方法与平台的支持下,通过空间优化维持或提高生态系统服务,设计出能够提高人类福祉的可持续景观。本文提出的八个步骤已融合了景观可持续性研究与地理设计的六个研究基础,为可持续景观规划提供了路径与方法。

景观可持续性研究在不断积累知识,生态系统服务与景观格局的关系在世界各地被积极研究^[16,27-29];地理设计的技术在不断推陈出新^[35,40-47],现阶段努力方向是拓展建筑信息模型,实现大尺度参数化设计,下一阶段也许是实现更友好的人机交互。这要求研究人员与规划人员具有广博的眼界,并具备专业的技术,更重要的是能够紧密协作。景观是承载生态环境、社会经济发展的综合性空间,我们不仅需要生态系统服务指标、景观指数,更需要景观可持续性指数,只有将生态系统服务结合社会经济过程后才有可能提出具有操作性的规划解决方案。因此,可持续景观规划既需要地理设计中的技术来拓展应用领域,同时也需要更多自然科学与社会科学的支持,我们期待各学科的共同探讨,共同“设计”可持续的未来景观。

参考文献(References):

- [1] Kates R W, Clark W C, Corell R, Hall J M, Jaeger C C, Lowe I, McCarthy J J, Schellnhuber H J, Bolin B, Dickson N M, Faucheux S, Gallop G C, Grübler A, Huntley B, Jäger J, Jodha N S, Kaspersen R E, Mabogunje A, Matson P, Mooney H, Moore III B, O'Riordan T, Svedin U. Sustainability science. *Science*, 2001, 292(5517): 641-642.
- [2] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [3] Ahern J. Theories, methods and strategies for sustainable landscape planning//Tress B, Tress G, Fry G, Opdam P, eds. *From Landscape Research to Landscape Planning: Aspects of Integration, Education and Application*. Dordrecht: Springer, 2005.
- [4] Forman R T T, Wu J G. Where are the best places for the next billion people? Think globally, plan regionally//Geneletti D, ed. *Handbook on Biodiversity and Ecosystem Services in Impact Assessment*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2016.
- [5] Leitão A B, Ahern J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 59(2): 65-93.
- [6] Musacchio L R. The scientific basis for the design of landscape sustainability: a conceptual framework for translational landscape research and practice of designed landscapes and the six Es of landscape sustainability. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 993-1013.
- [7] Wu J G. Linking landscape, land system and design approaches to achieve sustainability. *Journal of Land Use Science*, 2019, 14(2): 173-189.
- [8] Steinitz C. *A Framework for Geodesign: Changing Geography by Design*. Redlands, CA: ESRI, 2012.
- [9] 杨言生, 李迪华. 地理设计: 概念、方法与实践. *国际城市规划*, 2013, 28(1): 94-97.
- [10] Lenzholzer S, Duchhart I, Koh J. 'Research through designing' in landscape architecture. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 120-127.
- [11] Huang L, Xiang W N, Wu J G, Traxler C, Huang J Z. Integrating geoDesign with landscape sustainability science. *Sustainability*, 2019, 11(3): 833.

- [12] Braat L C, ten Brink P. The Cost of Policy Inaction: the Case of not Meeting the 2010 Biodiversity Target. Wageningen; European Commission, 2008.
- [13] von Haaren C, Warren-Kretzschmar B, Milos C, Werthmann C. Opportunities for design approaches in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 130: 159-170.
- [14] Vogt P, Riitters K H, Estreguil C, Kozak J, Wade T G, Wickham J W. Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology*, 2007, 22(2): 171-177.
- [15] Kedron P, Zhao Y, Frazier A E. Three dimensional (3D) spatial metrics for objects. *Landscape Ecology*, 2019, 34(9): 2123-2132.
- [16] Grafius D R, Corstanje R, Harris J A. Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape Ecology*, 2018, 33(4): 557-573.
- [17] Huang L. Exploring the strengths and limits of strong and weak sustainability indicators: a case study of the assessment of China's megacities with EF and GPI. *Sustainability*, 2018, 10(2): 349.
- [18] Huang L, Wu J G, Yan L J. Defining and measuring urban sustainability: a review of indicators. *Landscape Ecology*, 2015, 30(7): 1175-1193.
- [19] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290-292.
- [20] Ekins P. Identifying critical natural capital: conclusions about critical natural capital. *Ecological Economics*, 2003, 44(2/3): 277-292.
- [21] Babí Almenar J, Rugani B, Geneletti D, Brewer T. Integration of ecosystem services into a conceptual spatial planning framework based on a landscape ecology perspective. *Landscape Ecology*, 2018, 33(12): 2047-2059.
- [22] BenDor T K, Spurlock D, Woodruff S C, Olander L. A research agenda for ecosystem services in American environmental and land use planning. *Cities*, 2017, 60: 260-271.
- [23] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [24] Chen X Q, Wu J G. Sustainable landscape architecture: implications of the Chinese philosophy of "unity of man with nature" and beyond. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 1015-1026.
- [25] Aalders I, Stanik N. Spatial units and scales for cultural ecosystem services: a comparison illustrated by cultural heritage and entertainment services in Scotland. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1635-1651.
- [26] Plieninger T, Bieling C, Fagerholm N, Byg A, Hartel T, Hurley P, López-Santiago C A, Nagabhatla N, Oteros-Rozas E, Raymond C M, van der Horst D, Huntsinger L. The role of cultural ecosystem services in landscape management and planning. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 28-33.
- [27] Jones K B, Zurlini G, Kienast F, Petrosillo I, Edwards T, Wade T G, Li B L, Zaccarelli N. Informing landscape planning and design for sustaining ecosystem services from existing spatial patterns and knowledge. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 1175-1192.
- [28] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, Ribeiro M C, Paglia A P. The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, 2018, 33(8): 1247-1257.
- [29] Herrero-Jáuregui C, Amaiz-Schmitz C, Herrera L, Smart S M, Montes C, Pineda F D, Schmitz M F. Aligning landscape structure with ecosystem services along an urban-rural gradient. Trade-offs and transitions towards cultural services. *Landscape Ecology*, 2019, 34(7): 1525-1545.
- [30] Rieb J T, Bennett E M. Landscape structure as a mediator of ecosystem service interactions. *Landscape Ecology*, 2020, 35(12): 2863-2880.
- [31] Boyko C T, Gaterell M R, Barber A R G, Brown J, Bryson J R, Butler D, Caputo S, Caserio M, Coles R, Cooper R, Davies G, Farmani R, Hale J, Hales A C, Hewitt C N, Hunt D V L, Jankovic L, Jefferson I, Leach J M, Lombardi D R, MacKenzie A R, Memon F A, Pugh T A M, Sadler J P, Weingaertner C, Whyatt J D, Rogers C D F. Benchmarking sustainability in cities: the role of indicators and future scenarios. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 245-254.
- [32] 黄璐, 邬建国, 严力蛟. 基于远景分析的上海城市发展可持续性评价, 高玉葆, 邬建国主编, 现代生态学讲座(Ⅷ) 群落、生态系统和景观生态学研究新进展, 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [33] Pickard B R, van Berkel D, Petrasova A, Meentemeyer R K. Forecasts of urbanization scenarios reveal trade-offs between landscape change and ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32(3): 617-634.
- [34] Hampton S E, Strasser C A, Tewksbury J J, Gram W K, Budden A E, Batcheller A L, Duke C S, Porter J H. Big data and the future of ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(3): 156-162.
- [35] Janssen R, Dias E. A pictorial approach to geodesign: a case study for the Lower Zambezi valley. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 164: 144-148.
- [36] Simon H A. *The Sciences of the Artificial*. 3rd ed. Cambridge: The MIT Press, 1996: 231-231.
- [37] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666-20671.

- [38] Verburg P, Erb K H, Mertz O, Espindola G. Land system science: between global challenges and local realities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 433-437.
- [39] Verburg P H, Crossman N, Ellis E C, Heinemann A, Hostert P, Mertz O, Nagendra H, Sikor T, Erb K H, Golubiewski N, Grau R, Grove M, Konaté S, Meyfroidt P, Parker D C, Chowdhury R R, Shibata H, Thomson A, Zhen L. Land system science and sustainable development of the earth system: a global land project perspective. *Anthropocene*, 2015, 12: 29-41.
- [40] Nyerges T, Ballal H, Steinitz C, Canfield T, Roderick M, Ritzman J, Thanatemaneeerat W. Geodesign dynamics for sustainable urban watershed development. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 25: 13-24.
- [41] Perkl R M. Geodesigning landscape linkages: coupling GIS with wildlife corridor design in conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 156: 44-58.
- [42] Huang G P, Zhou N X. Geodesign in developing countries: the example of the master plan for wulingyuan national scenic area, China. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 156: 81-91.
- [43] Moura A C M. Geodesign in Parametric Modeling of urban landscape. *Cartography and Geographic Information Science*, 2015, 42(4): 323-332.
- [44] Hayek U W, Von Wirth T, Neuenschwander N, Grêt-Regamey A. Organizing and facilitating Geodesign processes: integrating tools into collaborative design processes for urban transformation. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 156: 59-70.
- [45] Slotterback C S, Runck B, Pitt D G, Kne L, Jordan N R, Mulla D J, Zerger C, Reichenbach M. Collaborative Geodesign to advance multifunctional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 156: 71-80.
- [46] Ye Y, Yeh A, Zhuang Y, van Nes A, Liu J Z. "Form Syntax" as a contribution to geodesign: a morphological tool for urbanity-making in urban design. *Urban Design International*, 2017, 22(1): 73-90.
- [47] 周文生, 杨旭彤, 苏文松. 地理设计平台的研发及其在城市规划中的应用探索. *中国园林*, 2014(10): 12-17.