

景观生态学在国土空间治理中的应用

吴健生^{1,2}, 王仰麟^{1,2}, 张小飞¹, 彭建^{1,2}, 刘焱序³

- (1. 北京大学城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;
2. 北京大学城市与环境学院地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;
3. 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)

摘要: 鉴于当前国土空间治理面临复杂的人类活动与自然环境相互作用而产生的生态风险与空间利用问题, 基于景观生态学学科特质与生态文明建设要求, 对当前国土空间治理工作进行梳理, 归纳了明确的生态系统服务定位、高效的建成空间结构、适宜且多样的产业发展支撑、多等级的生态系统服务与安全保障等国土空间治理需求。同时, 整合区域时空信息的理论基础与分析手段, 提出景观生态学在国土空间治理中应落脚于: (1) 识别并统一不同空间尺度的治理单元; (2) 辨析并评估景观功能的空间分异; (3) 构建基于生态风险防范的区域景观格局; (4) 识别集约高效的城乡协调发展格局; (5) 提出尺度联系的绿色发展架构; (6) 明晰多级多样的生态保障方案。

关键词: 国土空间治理; 景观生态学; 景观功能; 景观格局; 等级和尺度

国土空间是生态文明建设的载体, 亦是支撑区域居民生产、生活及提供生态系统服务的基础^[1]。长期以来, 人类活动与自然环境相互作用, 随着城市化、气候变化的影响不断增加, 当前国土空间面临严重的自然灾害、资源耗竭、环境质量恶化、生态系统服务降低等生态风险和可利用土地比例较低、城乡发展不均衡、土地开发与保护协调困难等严峻的发展困境^[2-5]。针对上述现象, 国家至各级政府持续推动各个层面的国土空间治理, 《关于统筹推进自然资源资产产权制度改革的指导意见》及《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》皆强调“自然资源整体保护”与“科学布局生产空间、生活空间、生态空间”的指导思想。

国土空间的优化与治理是近年来国内地理学、生态学、土地科学等相关学科努力探索的重要方向^[6-8]。景观生态学基于格局特征、分析过程、功能及其相互作用, 在归纳国土空间变化规律、空间异质性、时间动态性等方面有一定的学科积累^[9,10], 在国家、省、市与城乡的土地利用、产业经营、环境保护等方面亦有大量工作基础^[11], 通过多时空尺度的格局、过程、功能耦合分析, 可为区域乃至国家的生态文明建设提供科学的决策依据。

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671180)

作者简介: 吴健生 (1965-), 男, 湖南新化人, 博士, 教授, 主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: wujsh@pkusz.edu.cn

通讯作者: 彭建 (1976-), 男, 四川彭州人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态学、综合自然地理学研究。

E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

1 景观生态学研究对象及应用领域

景观生态学关注景观类型组成、空间格局及其变化特征，开展区域生态环境综合研究^[12]，研究内容包括景观结构和功能、动态变化、格局—过程互馈机制与格局优化、合理利用和保护等。景观生态学具有整合区域环境特征、资源分布与生态系统服务等空间信息的理论基础与分析手段，同时可有效地结合生态系统中生长、循环、调节及适应等作用与物质、能量流动，对不同时空尺度的空间特征进行深入探究，在识别空间治理单元、决定局地主导功能、协调区域景观功能冲突并保障生态环境质量等方面，提供空间特征辨析和评估的理论依据与实践方法。

2 国土空间治理的需求

国土空间承载着人类文明演进的各项需求，亦维系着未来的可持续发展^[13]。快速城市化过程中，国土空间长期存在耕地、基塘及河岸被建设用地及人工岸线侵占、沿海滩涂及红树林生态衰退^[14]与农业用地、生态用地与建设用地间矛盾日益凸显^[15]等现象，已对人类生存与区域发展带来冲击，而国土空间治理与优化亦成为应对区域环境污染^[16]、自然灾害冲击^[17]、生态退化^[18]等问题的重要切入点。

多元的发展需求扩大了国土资源开发与保护之间的矛盾。面对全球变化的挑战，国土空间的治理不仅需要解决上述问题，同时要具备支持区域发展、应对生态风险的能力。有鉴于此，在当前国土空间治理中，迫切需要整合区域资源特征、生态系统服务及风险防范等内容，构建自上而下、协调统一且等级明确的绿色发展框架，进而推动人与环境、城市与乡村、各类功能用地间协调发展。

2.1 明确的生态系统服务定位

在环境为体、生态为纲的生态文明建设中^[19]，需确立不同空间单元的生态系统服务定位。生态系统服务包括了人类从生态系统中获得的供给、调节、文化及支持等各项效益，包括精神与物质上的支持与交流^[20]。空间单元所表现的生态系统服务并非局限于单一类型，当区域内多数单元同时倾向于特定功能时，则需要对区域空间单元进行跨尺度的评估与整合^[21,22]，以避免功能缺失及发展不平衡的现象。此外，考虑到邻域单元的性质会使得不同的生态功能出现空间损益^[23]，因而更需要通过明确的生态系统服务定位，有效减少功能的空间耗费。在不同的空间尺度中，单元的边界会因为局地特性、功能连通性等影响因素有所不同，例如绿地类型、面积、形状及空间分布可影响地表温度^[24]，而这样的特性在城市建成区中更为显著。区域生态系统服务的定位，须依据城镇、农业与生态空间的具体需求，提出合理的镶嵌比例结构，同时依据环境变化与功能多样性的特点，在功能定位时对不同的生态系统服务进行时空权衡。

2.2 高效的建成空间结构

建成区承载了人类主要的生产与生活需求，其空间结构的健全及功能的完善与人类健康、区域可持续发展息息相关。建成空间不单指水平面的空间范围，更包含垂直面上的空间利用。在全球化的过程中，面对全球市场竞争的压力，建成空间的功能较以往更为复杂，空间的高效利用成为当前需要重点探讨的方向^[25]。资源与劳动力的集聚提高了生产与技术水平，带动了区域产业竞争力，但建成区无序扩张所衍生的自然地形改变、

水域及植被面积减少、生境破碎、环境污染与热岛效应、生物多样性降低、人群健康下降等^[26]成为城市、区域乃至全球日益严峻的生态风险问题。因此,国土空间高效利用已不仅限于提高经济产出,更涉及资源、能源消耗的降低与生态系统服务的提升。在城镇建成空间规划时,应避免不必要的建成区扩张,同时减少水土资源及能源的消耗^[27];在有限的空间内科学配置具有生态功能的空间单元,保障建成空间的生态系统服务与安全,实现生产空间、生活空间与生态空间的全面协调与高效发展。

2.3 适宜且多样的产业发展支撑

生态文明建设包含尊重、顺应自然的基本理念,将其推广至国土空间治理中的产业支撑层面,则可理解为因地制宜的资源保护与可持续利用。因目标不同,适宜性分析被广泛应用于开发建设^[28]、农作物种植^[29]、土地利用规划^[30]、交通规划、动植物及文化遗产保护^[31]等方面,特别是在涉及多个发展目标的地区,通过空间适宜性分析可以协调产业发展,降低产业竞争带来的负面影响,同时扶持相对弱势的重要产业。此外,国土空间亦需随着多变的外在环境,兼具多样性特质与不断修正、调节的能力;随着产业结构变化,需要充分考虑全球价值链分工的定位、国家及区域需求等^[32],在国土空间利用上保持空间类型的多样性及弹性利用的能力,以期能更好地支撑产业发展。

2.4 多等级的生态系统服务与安全的保障

生态保障的实质是确保生态系统服务的持续供给并将生态风险降至最低。国土空间治理的保障取决于不同尺度政府部门的规划与管理措施、各项效益补偿及环境意识提升等方面的共同作用。目前基于生态环境保护的规划与管理措施繁多,涉及自然保护区、重点生态功能区、生物多样性保护优先区^[33]及生态保护红线^[34]等,期望通过统筹资源有偿使用、功能损害赔偿等机制,科学配置生态资源,从而确保区域最大的生活、生产及生态效益^[35]。具体操作上并非以经济收益取代原有的生态系统服务^[36],而是通过经济激励,修复与恢复区域关键生态系统服务的可持续供给。这一过程仍需管理者的引导,并伴随居民与参与者环境意识的提升,自上而下持续确保区域的生态安全。

3 景观生态学在国土空间治理中的主要应用方向

国土空间治理是权衡资源环境特征与生存、发展需求的过程,从人类与环境系统的相互作用与影响出发^[37],结合不同等级尺度的调控方法,对国家与区域自然本底特征、社会经济现状及未来发展进行分类、对比及整合,就当前自然资源利用冲突影响范围及空间差异进行分析判断。通过景观生态学分析,针对上述需求,识别统一的空间单元,辨析不同尺度国土空间特征及其演变规律、相互作用机制及功能联系,结合生态风险防范,提出针对生产、生活、生态功能的绿色发展架构及相应的补偿方案,以求合理保障生态单元、规范城市建设发展进程,协同单一功能最大化及整体功能最优化,最终达到可持续的目标(图1)。

3.1 识别并统一不同空间尺度的治理单元

地表空间单元在研究与实践中会依据研究对象、目标、范围及数据可获得性等因素进行调整^[38]。在水土流失治理、水污染防治、洪涝灾害预防等工作中,不同尺度的流域因水域物理及化学特性被视为空间分析单元^[39];在农业生产力分析中,因单位面积产量与产值的统计标准,通常将相同作物的地块作为均质的空间单元^[40];在生物多样性的量

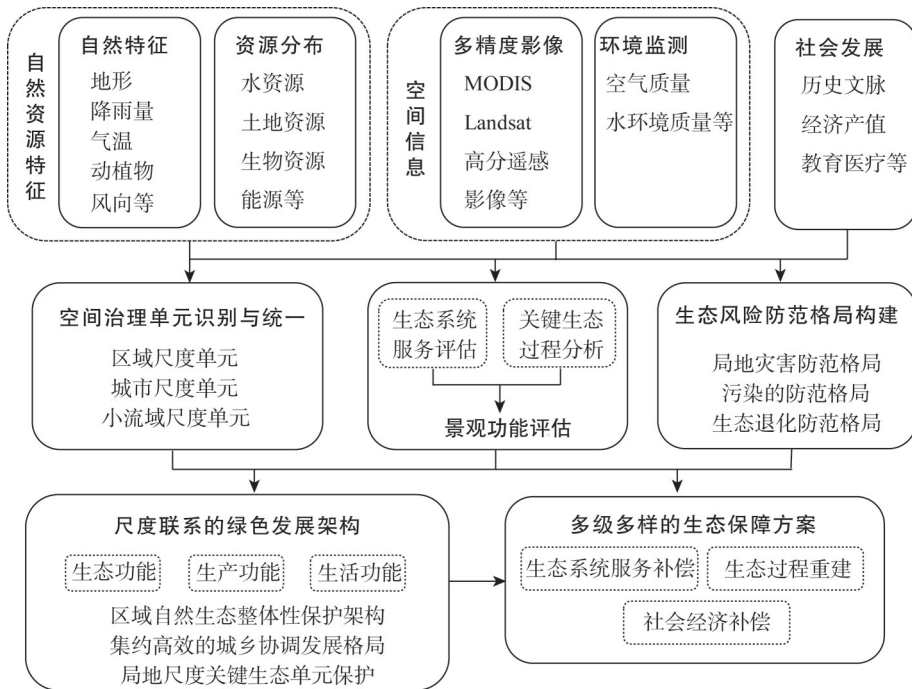


图1 景观生态学在国土空间治理中的相关应用

Fig. 1 Highlights of landscape ecology in the territory optimization

化评估和生态过程模拟中，空间单元随着物种调查数据的空间化或模型建构需要，以网格方式体现^[41]；在空间制图工作中，相关研究则强调整合地表各项资源环境特征，例如海拔、坡度、降雨量、植被覆盖度等^[42]。在气候变化影响监测的相关研究中，关注不同地表覆盖类型对暴雨的抵御特性，区域土地利用/覆盖类型斑块被视为空间单元^[43]。其他长时间的生态过程更因涉及植物群落演替、土壤水分、干扰、城市化等信息，采用像元、种群、流域及行政单元等作为空间单元^[44-45]。另外，景观亦可被视为综合不同土地利用类型的整体，衔接了像元与区域、流域等跨尺度对象，用以指示研究区的整体特征^[46]。

为了对国土空间进行有效的治理，景观生态学研究需结合不同空间尺度的治理目标，对各个尺度中最小的适应与转变单元进行识别。归纳相关研究，景观生态学应为当前国土空间治理单元的识别与统一整合下述信息：(1) 资源环境特征：基于地形、土壤、植物、水文、气候等自然地理特征，以求对资源环境的最适宜利用；(2) 区域人文发展脉络：通过掌握区域历史、人文、教育、经济等城市发展需求，在节约用地的前提下保障区域人文传承与发展；(3) 关键生态过程：为了保障区域生物生产、环境净化等生态系统服务，应对关键的群落、种群及其长期以来的生境保护。另外，考虑到景观单元的尺度效应，需依据整体功能、效益保障目标，结合连通性、聚集度等与功能紧密相关的格局特征，对国土空间治理单元的特征尺度进行深入辨析。

3.2 辨析并评估景观功能的时空分异

景观功能的表现具有独立性，当其在空间中共同作用时亦具有整体性^[47,48]，因而辨析景观功能的时空分异特征一直是景观生态学研究的重要内容。通过空间单元类型组成、格局变化，评价功能的时空演变^[49]，可辨析功能的时空位置^[50]。相较于由资源利用视角

赋予空间单元功能的唯一性,景观功能辨析的视角则更能体现空间单元多功能复合特征,例如乔木单元,在森林景观中体现了水源涵养、水土保持及生物多样性保护等功能,在城市景观中则成为微气候调节、环境净化、雨洪管理的重要单元^[51],城市边缘或不连续的绿地在维持生物多样性方面亦不可小觑^[52],因而评估、辨析、整合景观功能的空间分异,可有效地促进整体功能的最优化^[53]。另外,局地及外围生物物理变化、水分与养分运移、地形变化、生物迁移、人类文明等社会生态过程^[54]的影响亦需要在景观功能评估中加以考虑。

景观功能的评估可确立功能的空间差异,有助于整合国土空间中的资源环境特征,提高国土空间利用效率,协同当前与未来发展需求。由景观功能的视角对空间特征进行科学合理的评估需具备下述步骤:(1)基于区域绿色发展目标,确立评估过程中的基本空间单元;(2)综合分析景观格局与过程,包括动植物生长、迁徙、繁衍及其空间变化、城市建设和人流交通等城市化过程特征、景观格局连通性和优势度等格局特征变化;(3)判断区域主导的景观功能、服务范围及整体特征;(4)量化不同功能间的相互作用,考虑功能随着区域环境与发展需要而转变的特性,对不同的景观功能进行时空权衡,合理定位功能区,避免功能互斥,以求功能间的互利共生,节约利用有限的国土空间并达到整体的最大效益。

3.3 构建基于生态风险防范的区域景观格局

城市化、气候变化及土地利用方式的转变为当前的国土空间治理带来了风险,对人类生存与发展产生了一定的冲击^[55],因而构建基于生态风险防范的景观格局,是应对全球变化需要考虑的重点议题^[56,57]。景观格局与自然灾害、环境污染及生态系统服务退化等不同的生态风险间存在联系^[58,59],合理的配置生态单元可有效调节微气候、约束建成区无序蔓延、保护土壤、净化大气与水环境,同时降低高温热浪、城市内涝等自然与人为灾害影响,提供人们防灾避难场所,对保障区域可持续发展极为重要。

生态文明建设需要坚实的安全保障,因此国土空间治理亦需要由国家、区域的整体生态安全出发,将区域与局地视为风险防范系统的空间组成单元,考虑总体的生态系统服务稳定、局地灾害与污染的防范及重点生态过程的保障,单元类型组成、面积规模、连通性等皆是构建生态风险防范格局需要综合考虑的内容。此外,格局方案需具备操作上的弹性,生态保护红线的划定是保障生态安全与服务的最低标准,红线外部的生态空间可依据整体建设需要进行调整,以维持功能动态平衡,使得既定的格局成为功能保障的基础亦是推动长远发展的有力支撑。

在具体工作中应结合已有的生态用地格局,综合考虑区域生态系统服务、灾害防范等需求。当前存在尚需突破的难点在于:(1)在综合方案拟定过程中,假若需进行单元的筛选,如何判定局地空间单元在区域生态风险防范格局中的重要性及其阈值?(2)如何整合气候、地质、土壤等多种环境条件,同时考虑距离衰减、地表特征等因素共同影响,自上而下地落实区域至局地尺度关键单元的边界?

3.4 识别集约高效的城乡协调发展格局

城市化既是当前全球变化的主要驱动因素,同时也是全球化的主要表征。快速城市化过程通过积累区域的资金、人流与资源,带动社会与经济发展^[60],也为国土空间带来难以逆转的变化。长期向城市建设倾斜的发展模式已为区域可持续发展带来变数,近年

来相关研究分别由城乡一体化发展、城乡统筹视角,提出空间格局优化理念^[61-63],通过突破行政与自然边界限制,将城乡视为整体治理与发展单元,由城市带动周边乡镇的经济增长;以周边大范围的生态用地串连城市内部绿地,维持或增加区域的整体生态系统服务供给,明确城乡互利共生的发展方向。

在国土空间利用上,城乡建设需强调资源节约及高效利用原则。面对人口基数庞大而可供建设的土地资源有限的现实情况,需要基于区域景观格局特征,对空间单元的承载能力与生态系统服务水平进行辨析,确立各单元最有效的分工与优化方案。生态文明建设并非在区域空间中均匀分布各项服务,需因地制宜,通过详细的地表特征评估与承载力分析,在时、空、量、构、序范畴实现区域总体效益的提升^[64]。

景观格局、过程与功能的分析结果可有效评估国土空间的使用效率并协调不同使用目标所引发的冲突。除了前述内容外,当前的景观生态研究工作亦需关注:(1)通过量化区域景观格局的构成类型、比例与空间特征,明晰城市景观格局与社会经济效益的关联;(2)判断不同单元间的主导功能相互关系并妥善利用,有效避免生态保护与城乡建设冲突;(3)结合景观过程与景观流的空间位置,识别关键单元,提高国土空间利用效率。此外,随着影像精度的提升、空间信息技术的进步与大数据平台的成熟,为城乡协调发展提供了高精度、长时段的数据与信息积累,当前需要藉由空间格局、生态过程与生态系统服务等分析,对上述复杂的社会生态信息进行简化与综合,以支撑国土空间治理工作。

3.5 提出尺度联系的绿色发展架构

景观格局与功能特征、生物多样性保护、资源分布、驱动力等研究结果皆存在一定的尺度效应^[65-67]。其中,景观单元及其功能的尺度联系源于地表景观的等级组织和复杂性^[68]。以城市化为例,在局地尺度中建成区取代了自然景观单元,降低了部分生态系统服务,但在区域尺度上高度集聚的人口,更集约地利用了国土资源,缓解了人类活动散布与蔓延对自然单元的破坏^[69]。景观功能的体现需仰赖不同尺度中相应的功能单元,通过调整功能等级与单元分工,实现整体效益的最大化,其中,社会效益的体现需依靠生活、生产功能,而生活与生产功能则是通过商业、居住、教育等单元所构成;生态效益则通过林地、草地、河流、坑塘完整性与稳定性体现^[70]。通过不同空间尺度的功能提升与分工重组,可提高并巩固区域景观功能的完整性与稳定性。

国土空间治理过程中,绿色发展的落实必须考虑生活、生产及生态功能的尺度联系。在具体工作中,区域尺度需确立自然生态整体性保护的空间架构以指导国土空间利用,城市尺度则强调空间节约与集约利用,明确城市建设的边界,局地尺度则需要判断关键生态单元^[71]并予以优先保障。

3.6 明晰多级多样的生态保障方案

生态保障的内容包括对既有生态系统服务的保护,亦包含生态系统服务的区际流动及其补偿。其中,生态系统服务的保护可通过构建生态屏障达成^[72],而生态补偿的理想目标是避免或有效降低开发行为的负面影响,维系区域生态系统服务的稳定供给^[73,74],建立人与生态环境间互利共生关系,从而提升区域总体效益。当前的生态补偿机制存在一定的困境,一方面生态系统的破坏损失难以用经济价值准确估算,例如生态系统服务下降、人群健康冲击,甚至人为活动导致的滑坡、洪涝灾害,难以通过市场价值全面量

化;另一方面,现行的补偿机制存在补偿标准不一致、长效补偿机制未建立、对社会生态系统综合考虑不足等问题^[75,76],导致现行的补偿政策仍存在争议,进而影响了人地和谱与区域可持续发展。

基于总体效益考虑,生态补偿机制不应局限于经济补偿,而需充分协调并综合生态系统服务、社会发展、绿色基础设施建设、区域重要生态过程、灾害防范、空间优化等多个方面进行综合评估,以求区域综合效益的全面提升。补偿评估的过程需结合情景分析以模拟和评估补偿结果,有效降低局地开发建设对整体生态环境的冲击。同时,基于关键单元的识别,降低格局调整的影响与经济投入,提升生态功能、强化功能与过程的空间联系;通过空间政策的鼓励与推动,使得生态补偿的成果转化为区域生存与发展的倚仗,以落实生态文明建设。

4 结论

在全球化与快速城市化的强力推动下,当前的国土空间治理面临更为复杂的社会、经济与环境约束,承载了更为多元的发展诉求,需要坚实的科学基础以支撑长远发展。景观生态学作为由生态系统角度出发剖析地表空间肌理特征的学科之一,对于格局、功能与过程的尺度联系具有长期的工作积累,在系统解决当前国土空间治理问题上具有一定的优势。将景观生态学引入国土空间治理,可在识别并统一不同空间尺度的治理单元、辨析并评估景观功能的空间分异、构建基于生态风险防范的区域景观格局、识别集约高效的城乡协调发展格局、提出尺度联系的绿色发展架构、明晰多级多样的生态补偿方案等既有的工作基础上,进行更深入的探索,为科学布局生产空间、生活空间、生态空间提供基于地表空间特征与生态调节、适应作用的优化理论与实践依据。

除上述内容外,国土空间中所包含的海洋区域在当前的景观生态研究中仍较少涉及,但基于生态系统服务、空间格局完整性与生态风险防范等考虑,后续研究还应对这部分工作进行补充。

参考文献(References):

- [1] 樊杰. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 193-206. [FAN J. The strategy of major function oriented zoning and the optimization of territorial development patterns. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(2): 193-206.]
- [2] 史培军, 李宁, 叶谦, 等. 全球环境变化与综合灾害风险防范研究. 地球科学进展, 2009, 24(4): 428-435. [SHI P J, LI N, YE Q, et al. Research on global environmental change and integrated disaster risk governance. Advances in Earth Science, 2009, 24(4): 428-435.]
- [3] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 等. 土地利用变化影响气候变化的生物地球物理机制. 自然杂志, 2014, 36(5): 356-363. [LIU J Y, SHAO Q Q, YAN X D, et al. Geobiophysical effects of land use change on climate change. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(5): 356-363.]
- [4] 尤南山, 蒙古军, 李枫, 等. 1980-2017年中国土地资源学发展研究. 中国土地科学, 2017, 31(11): 4-15. [YOU N S, MENG J J, LI F, et al. Progress and its prospects of land resources science in China from 1980 to 2017. China Land Science, 2017, 31(11): 4-15.]
- [5] 史洋洋, 吕晓, 黄贤金, 等. 江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应. 自然资源学报, 2017, 32(6): 961-976. [SHI Y Y, LYU X, HUANG X J, et al. Arable land use transitions and its response of ecosystem services value change in Jiangsu coastal areas. Journal of Natural Resources, 2017, 32(6): 961-976.]
- [6] 唐常春, 孙威. 长江流域国土空间开发适宜性综合评价. 地理学报, 2012, 67(12): 1587-1598. [TANG C C, SUN W.

- Comprehensive evaluation of land spatial development suitability of the Yangtze River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(12): 1587-1598.]
- [7] 金贵, 王占岐, 姚小微, 等. 国土空间分区的概念与方法探讨. *中国土地科学*, 2013, 27(5): 48-53. [JIN G, WANG Z Q, YAO X W, et al. Concept and methods for spatial zoning. *China Land Science*, 2013, 27(5): 48-53.]
- [8] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略. *中国科学院院刊*, 2016, 31(1): 1-12. [FAN J. Theoretical innovation in optimization of protection and development of China's territorial space and coping strategy of 13th Five-Year Plan. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(1): 1-12.]
- [9] TENG M J, ZENG L X, ZHOU Z X, et al. Responses of landscape metrics to altering grain size in the Three Gorges Reservoir landscape in China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(13): 1055.
- [10] 肖姚, 朱凤武, 周生路, 等. 经济发达地区影响土地生态质量的关键景观格局因子研究: 以江苏省昆山市为例. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1731-1743. [XIAO Y, ZHU F W, ZHOU S L, et al. Key landscape pattern factors affecting land ecological quality in developed areas: A case study of Kunshan city in Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1731-1743.]
- [11] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 等. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 798-804. [FU B J, LYU Y H, CHEN L D, et al. The latest progress of landscape ecology in the world. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 798-804.]
- [12] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. *景观生态学原理及应用*. 北京: 科学出版社, 2011: 4-6. [FU B J, CHEN L D, MA K M, et al. *Principles and Applications of Landscape Ecology*. Beijing: Science Press, 2011: 4-6.]
- [13] KLEIN R J T, HUQ S, DENTON F, et al. Inter-relationships between adaptation and mitigation. In: PARRY M L, CANZIANI O F, PALUTIKOF J P, et al. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 745-777.
- [14] ZHAO J Z, DAI D B, LIN T, et al. Rapid urbanisation, ecological effects and sustainable city construction in Xiamen. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2010, 17(4): 271-272.
- [15] PÉREZ-SOBA M, PETIT S, JONES L, et al. Land use functions: A multifunctionality approach to assess the impact of land use changes on land use sustainability. In: HELMING K, PÉREZ-SOBA M, TABBUSH P. *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Berlin: Springer, 2008: 375-404.
- [16] VIZCAINO P, LAVALLE C. Development of European NO₂ land use regression model for present and future exposure assessment: Implications for policy analysis. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 140-154.
- [17] SHI Y, KATZSCHNER L, NG E. Modelling the fine-scale spatiotemporal pattern of urban heat island effect using land use regression approach in a megacity. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 891-904.
- [18] HAAS J, BAN Y F. Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2014, 30(1): 42-55.
- [19] 王如松. 生态文明: 生态政区建设的抓手. *环境保护*, 2008, 409(23): 46-50. [WANG R S. Eco-civilization: Key link of eco-political district construction. *Environmental Protection*, 2008, 409(23): 46-50.]
- [20] HAINES-YOUNG R, POTSCHIN M, KIENAST F. Indicators of ecosystem service potential at European scales: Mapping marginal changes and trade-offs. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 39-53.
- [21] LAW E A, BRYAN B A, MEIJAARD E, et al. Mixed policies give more options in multifunctional tropical forest landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54: 51-60.
- [22] RUIZ A G, DOBBIE M, BROWN R R. Toward multifunctional landscapes in Australian cities: What disciplinary dynamics and practitioner strategies inform transdisciplinary practice?. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 15-23.
- [23] WU J G. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 125: 209-221.
- [24] LI W F, CAO Q W, LANG K, et al. Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 457-465.
- [25] 孙斌栋, 王旭辉, 蔡寅寅. 特大城市多中心空间结构的经济绩效: 中国实证研究. *城市规划*, 2015, 39(8): 39-45. [SUN B D, WANG X H, CAI Y Y. An empirical study on the economic performance of polycentric spatial structure of

- mega-cities in China. *City Planning Review*, 2015, 39(8): 39-45.]
- [26] PENG J, TIAN L, LIU Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.
- [27] SANTANA M V, ZHANG Q, NACHABE M H, et al. Could smart growth lower the operational energy of water supply?: A scenario analysis in Tampa, Florida, USA. *Landscape & Urban Planning*, 2017, 164: 99-108.
- [28] 纪学朋, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于陆海统筹视角的国土空间开发建设适宜性评价: 以辽宁省为例. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 451-463. [JI X P, HUANG X J, CHEN Y, et al. Comprehensive suitability evaluation of spatial development and construction land in the perspective of land-ocean co-ordination: A case study of Liaoning province, China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 451-463.]
- [29] 王鹤龄, 王润元, 张强, 等. 甘肃马铃薯种植布局对区域气候变化的响应. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1111-1116. [WANG H L, WANG R Y, ZHANG Q, et al. Responses of potato planting allocation in Gansu province of Northwest China to regional climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1111-1116.]
- [30] KAZEMI H, AKINCI H. A land use suitability model for rainfed farming by multi-criteria decision-making analysis (MCDA) and geographic information system (GIS). *Ecological Engineering*, 2018, 116: 1-6.
- [31] IBOUROI M T, CHEHA A, ASTRUC G, et al. A habitat suitability analysis at multi-spatial scale of two sympatric flying fox species reveals the urgent need for conservation action. *Biodiversity & Conservation*, 2018, 27: 2395. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1544-8>.
- [32] 孙少勤, 邱璐. 全球价值链视角下中国装备制造业国际竞争力的测度及其影响因素研究. *东南大学学报: 哲学社会科学版*, 2018, 20(1): 61-68. [SUN S Q, QIU L. Measurement of international competitiveness of China's equipment manufacturing and its determinants: A study from the perspective of global value chains. *Journal of Southeast University: Philosophy and Social Science*, 2018, 20(1): 61-68.]
- [33] 侯鹏, 翟俊, 曹巍, 等. 国家重点生态功能区生态状况变化与保护成效评估: 以海南岛中部山区国家重点生态功能区为例. *地理学报*, 2018, 73(3): 429-441. [HOU P, ZHAI J, CAO W, et al. Evaluation on ecosystem changes and protection of the national key ecological function zones in mountainous areas of central Hainan Island. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 429-441.]
- [34] 邹长新, 王丽霞, 刘军会. 论生态保护红线的类型划分与管控. *生物多样性*, 2015, 23(6): 716-724. [ZOU C X, WANG L X, LIU J H. Classification and management of ecological protection redlines in China. *Biodiversity Science*, 2015, 23(6): 716-724.]
- [35] 戴文远, 江方奇, 黄万里, 等. 基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究: 以福州新区为例. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2098-2109. [DAI W Y, JIANG F Q, HUANG W L, et al. Study on transition of land use function and ecosystem service value based on the conception of production, living and ecological space: A case study of the Fuzhou new area. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2098-2109.]
- [36] FANG Q, ELLIOTT M. China: Prevent misuse of eco-compensation. *Nature*, 2016, 533(7603): 321. <https://doi.org/10.1038/533321a>.
- [37] 汪文忠. 新型城镇化背景下土地集约利用分析. *国土资源*, 2017, (1): 42-43. [WANG W Z. Analysis of land intensive utilization under the background of new-type urbanization. *Land & Resources*, 2017, (1): 42-43.]
- [38] 刘露, 周生路, 田兴, 等. 不同比例尺下耕地质量分等结果的差异及影响因素研究. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 629-638. [LIU L, ZHOU S L, TIAN X, et al. Analysis on the differences and influential factors of cultivated land quality gradation at different scales. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 629-638.]
- [39] DIYABALANAGE S, SAMARAKOON K K, ADIKARI S B, et al. Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the central highlands of Sri Lanka. *Applied Geography*, 2017, 79: 103-114.
- [40] 蔡运龙, 李军. 土地利用可持续性的度量: 一种显示过程的综合方法. *地理学报*, 2003, 58(2): 305-313. [CAI Y L, LI J. Measurement of land use sustainability: A comprehensive method representing processes. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 305-313.]
- [41] GIOIA P, PIGOTT J P. Biodiversity assessment: A case study in predicting richness from the potential distributions of plant species in the forests of South-Western Australia. *Journal of Biogeography*, 2010, 27(5): 1065-1078.

- [42] HOLLINGSWORTH T N, WALKER M D, CHAPIN III F S, et al. Scale-dependent environmental controls over species composition in Alaskan black spruce communities. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(7): 1781-1796.
- [43] PRESTELE R, ARNETH A, BONDEAU A, et al. Current challenges of implementing anthropogenic land-use and land-cover change in models contributing to climate change assessments. *Earth System Dynamics*, 2017, 8(2): 369-386.
- [44] 白瑜, 孟治国, 赵凯, 等. 像元尺度土壤水分监测网络及其对 L 波段土壤水分产品的初步验证结果. *遥感技术与应用*, 2018, 33(1): 78-87. [BAI Y, MENG Z G, ZHAO K, et al. Pixel-scale soil moisture monitoring network and its preliminary validation of L-band soil moisture products. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(1): 78-87.]
- [45] RATHBURN S L, SHAHVERDIAN S M, RYAN S E. Post-disturbance sediment recovery: Implications for watershed resilience. *Geomorphology*, 2017, 305: 61-75.
- [46] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 等. 红壤丘陵景观单元土壤有机碳和微生物生物量碳含量特征. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 429-433. [TANG G Y, HUANG D Y, TONG C L, et al. Characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in hilly red soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 429-433.]
- [47] NAVEH Z. Ten major premises for a holistic conception of multifunctional landscapes. *Landscape & Urban Planning*, 2001, 57(3): 269-284.
- [48] WILLEMEN L, HEIN L, VAN MENSVOORT M, et al. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62-73.
- [49] 王根绪, 刘国华, 沈泽昊, 等. 山地景观生态学研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 3967-3981. [WANG G X, LIU G H, SHEN Z H, et al. Research progress and future perspectives on the landscape ecology of mountainous areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 3967-3981.]
- [50] LIU Y X, FU B J, ZHAO W W, et al. A solution to the conflicts of multiple planning boundaries: Landscape functional zoning in a resource-based city in China. *Habitat International*, 2018, 77: 43-55.
- [51] BURKMAN C E, GARDINER, M. Urban greenspace composition and landscape context influence natural enemy community composition and function. *Biological Control*, 2014, 75: 58-67.
- [52] VAN DER WALT L, CILLIERS S S, DU TOIT M J, et al. Conservation of fragmented grasslands as part of the urban green infrastructure: How important are species diversity, functional diversity and landscape functionality?. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(1): 87-113.
- [53] GARCIA-MARTIN M, BIELING C, HART A, et al. Integrated landscape initiatives in Europe: Multi-sector collaboration in multi-functional landscapes. *Land Use Policy*, 2016, 58: 43-53.
- [54] CLAESSENS L, SCHOORL J M, VERBURG P H, et al. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 157-170.
- [55] MARTIN K L, HWANG T, VOSE J M, et al. Watershed impacts of climate and land use changes depend on magnitude and land use context. *Ecohydrology*, 2017, 30: e1870. <https://doi.org/10.1002/eco.1870>.
- [56] 李杨帆, 林静玉, 孙翔. 城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用. *地理研究*, 2017, 36(3): 485-494. [LI Y F, LIN J Y, SUN X. An early warning method on ecological risk and its application to improve landscape ecological security pattern regulation. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 485-494.]
- [57] WANG S D, ZHANG X Y, WU T X, et al. The evolution of landscape ecological security in Beijing under the influence of different policies in recent decades. *The Science of the Total Environment*, 2018, 646: 49-57.
- [58] 彭建, 刘焱序, 潘雅婧, 等. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究: 回顾与展望. *地球科学进展*, 2014, 29(10): 1186-1196. [PENG J, LIU Y X, PAN Y J, et al. Study on the correlation between ecological risk due to natural disaster and landscape pattern-process: Review and prospect. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(10): 1186-1196.]
- [59] FENG H H, ZOU B, TANG Y M. Scale- and region-dependence in landscape-PM_{2.5} correlation: Implications for urban planning. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 918.
- [60] 赵小风, 黄贤金, 陈逸, 等. 城市土地集约利用研究进展. *自然资源学报*, 2010, 25(11): 1979-1996. [ZHAO X F, HUANG X J, CHEN Y, et al. Research progress in urban land intensive use. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1979-1996.]
- [61] 陈肖飞, 姚士谋, 张落成. 新型城镇化背景下中国城乡统筹的理论与实践问题. *地理科学*, 2016, 36(2): 188-195. [CHEN X F, YAO S M, ZHANG L C. The theory and practice of urban-rural integration in China under the new urban-

- ization. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 188-195.]
- [62] 贺艳华, 李民, 宾津佑, 等. 近 10 年来中国城乡一体化空间组织研究进展与展望. *地理科学进展*, 2017, 36(2): 219-230. [HE Y H, LI M, BIN J Y, et al. Progress and prospect on spatial organization of urban-rural integration in China since 2006. *Progress in Geography*, 2017, 36(2): 219-230.]
- [63] 余亮亮, 蔡银莺. 国土空间规划管制与区域经济协调发展研究: 一个分析框架. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1445-1456. [YU L L, CAI Y Y. Research on spatial regulation of land use planning and coordinated development of regional economy: An analytical framework. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1445-1456.]
- [64] 王如松. 绿韵红脉的交响曲: 城市共轭生态规划方法探讨. *城市规划学刊*, 2008, (1): 8-17. [WANG R S. Urban conjugate ecological planning and its application in Beijing. *Urban Planning Forum*, 2008, (1): 8-17.]
- [65] SUN Y W, GUO Q H, LIU J, et al. Scale effects on spatially varying relationships between urban landscape patterns and water quality. *Environmental Management*, 2014, 54(2): 272-287.
- [66] 彭羽, 卿凤婷, 米凯, 等. 生物多样性不同层次尺度效应及其耦合关系研究进展. *生态学报*, 2015, 35(2): 577-583. [PENG Y, QING F T, MI K, et al. Study progress on spatial scale effects and coupling relationships of different levels in biodiversity. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 577-583.]
- [67] 周玉玺, 葛颜祥, 周霞. 我国水资源“农转非”驱动因素的时空尺度效应. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 65-77. [ZHOU Y X, GE Y X, ZHOU X. Scale effect on driving factors of agriculture-to-urban water transfers in China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 65-77.]
- [68] 钱雨果, 周伟奇, 李伟峰, 等. 基于类型和要素的城市多等级景观分类方法. *生态学报*, 2015, 35(15): 5207-5214. [QIAN Y G, ZHOU W Q, LI W F, et al. A hierarchical landscape classification system for urban regions with high-resolution remote sensing image. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5207-5214.]
- [69] SICILIANO G. Urbanization strategies, rural development and land use changes in China: A multiple-level integrated assessment. *Land Use Policy*, 2012, 29(1): 165-178.
- [70] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析. *地理学报*, 2016, 71(1): 49-65. [LI G D, FANG C L. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 49-65.]
- [71] 张林波, 李伟涛, 王维, 等. 基于 GIS 的城市最小生态用地空间分析模型研究: 以深圳市为例. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 69-78. [ZHANG L B, LI W T, WANG W, et al. Research on space modeling for minimum urban ecological land based on GIS: A case in Shenzhen. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 69-78.]
- [72] 傅伯杰, 王晓峰, 冯晓明, 等. 国家生态屏障区生态系统评估. 北京: 科学出版社, 2017: 9-23. [FU B J, WANG X F, FENG X M, et al. *Ecosystem Assessment of National Ecological Shelter Areas*. Beijing: Science Press, 2017: 9-23.]
- [73] QUÉTIÉ F, LAVOREL S. Assessing ecological equivalence in biodiversity offset schemes: Key issues and solutions. *Biological Conservation*, 2011, 144: 2991-2999.
- [74] REID J, BRUNER A, CHOW J, et al. Ecological compensation to address environmental externalities: Lessons from South American case studies. *Journal of Sustainable Forestry*, 2015, 34(6-7): 605-622.
- [75] 范明明, 李文军. 生态补偿理论研究进展及争论: 基于生态与社会关系的思考. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(3): 130-137. [FAN M M, LI W J. Research progress and debate on the theory of payment for ecosystem services: Based on the relationship between ecology and society. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(3): 130-137.]
- [76] 王甲山, 刘洋, 邹倩. 中国水土保持生态补偿机制研究述评. *生态经济*, 2017, 33(3): 165-169. [WANG J S, LIU Y, ZOU Q. Review on ecological compensation for soil and water conservation mechanism in China. *Ecological Economy*, 2017, 33(3): 165-169.]

Application of landscape ecology in territory optimization

WU Jian-sheng^{1,2}, WANG Yang-lin^{1,2}, CHANG Hsiao-fei¹, PENG Jian^{1,2}, LIU Yan-xu³

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Globalization and urbanization promote rapid development of countries and regions and rapid growth in the area of buildings, diversify ecological functional needs, and expand paucity in the utilization of land resources. It is greatly important to deal with problems and risks including unbalanced regional development, exhaustion of resources, decline in environmental quality, and frequent occurrence of natural disasters in the current territory optimization. The analysis of regional ecological characteristics and advancing and refining development needs based on construction standards of ecological civilization are proposed to enhance the comprehensive benefits of regional ecological services and socio-economic development. Landscape ecology involving analysis of the texture characteristics of surface space from the ecosystem perspective has a long-term effect on the scale, pattern, function, process, and linkage among them and is advantageous in systematically dealing with current problems of territory optimization at different spatial and temporal scales. The study integrates land and resources management under the background of global change from the perspective of landscape ecology and based on an understanding of ecological civilization construction. It raises the demands of the territory optimization in terms of the specific orientation of ecosystem services, efficient building area structures, suitable and diversified industrial development supports, and multi-level ecosystem services and safeguards. Based on studies on different spatial and temporal scales and landscape ecology in land space governance, the current territory optimization should focus on the following topics: (1) Identifying and unifying governance units at different spatial scales; (2) Defining and evaluating spatial variation of landscape functions; (3) Constructing landscape patterns based on ecological risk prevention; (4) Proposing an intensive and efficient plan for the coordinated development of urban and rural areas; (5) Investigating the framework of green development with multi-scale linkage; (6) Exploring multi-level and diverse ecological compensations. Additionally, the marine area included in the territory is less involved in current landscape ecological research. It should be supplemented in a follow-up study to maintain ecosystem services, improve landscape functions, and prevent ecological risk.

Keywords: territory optimization; landscape ecology; landscape functions; landscape pattern; multi-level and scale