

# 城市生态用地需求测算研究进展与展望

彭建<sup>1,2</sup>, 汪安<sup>2</sup>, 刘焱序<sup>1</sup>, 马晶<sup>1</sup>, 吴健生<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学深圳研究生院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)

**摘要:** 作为城市地域自然生态系统服务供给的基本载体, 生态用地基于土地利用/土地覆被的内在关联将人类社会发展与自然生态演替耦合关联在一起, 已成为统筹解决城市建设扩展与自然生态保护矛盾的重要综合途径; 城市生态用地的需求测算直接决定供需均衡分析结果, 是城乡统筹生态用地规划与管理的关键环节。本文在系统梳理生态用地概念内涵的基础上, 对比分析了生态需求与生态用地需求的概念异同; 提出基于空间与功能的城市生态用地需求测算概念框架, 并据此将已有测算方法归并为经验判定法、生态系统服务法、空间格局法3大类, 从综合性、代表性、阈值与规模、位置等方面对比分析了法定定额法、历史趋势预判法、生态足迹法、碳氧平衡法、生态安全格局法等具体方法的基本特征及其优缺点; 最后将下一步研究的重点趋向概括为基于土地生态功能的城市生态用地分类、基于土地生态格局的城市生态用地效益综合测算、基于多目标情景的城市生态用地功能综合权衡、基于生态用地供需平衡分析的城市生态腹地识别4个方面。

**关键词:** 城市生态用地需求测算; 经验判定; 生态系统服务; 生态安全格局; 城市生态腹地; 进展与展望

DOI: 10.11821/dlxb201502013

## 1 引言

人类文明进程是在与自然环境的相互依存中不断发展的, 人类既有发展经济享受丰富物质生活的社会需求, 也有亲近自然、愉悦身心的生态诉求。随着工业化以来人类改造自然的能力越来越大, 自然生态系统的结构与功能被人为干扰、破坏的范围、程度与频率相应增大, 经济发展与生态保护的矛盾日益显现, 满足社会经济发展和自然生态环境保护的“双赢”成为当前人类可持续发展长期努力的目标<sup>[1-2]</sup>。但是, 由于自然生态承载力的有限性与资源利用的排他性, 人类活动影响下特定生态系统服务的增加往往会致其他服务的减少<sup>[3-4]</sup>, 权衡利弊以获取整体最优, 均衡不同方面需求一直以来都是可持续性战略的基本指导思想<sup>[5]</sup>。

作为人类最主要的栖息地, 城市的扩张即城市化已成为20世纪以来人类社会发展的最显著特征<sup>[6]</sup>。城市发展使原有的自然生态系统转变为自然—社会耦合系统, 系统内物质流、能量流均发生显著变化, 气候调节、水源涵养、土壤形成、废物处理、生物多样性维持等生态系统服务的数量与质量相应改变, 进而产生城市热岛、大气污染、雨洪灾害等城市生态环境问题<sup>[7-8]</sup>。土地作为人类社会生存和发展最根本的物质基础, 提供了人类

收稿日期: 2014-06-14; 修订日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271195) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271195]

作者简介: 彭建(1976-), 男, 四川彭州人, 副教授, 主要从事景观生态与土地利用、生态系统综合评估研究。

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

活动的基本空间载体,土地利用则是人类改变自然环境最突出的作用方式与驱动因素,通过与土地覆被的内在关联将人类社会经济与自然生态环境密切耦合在一起。城市生态用地作为一种土地利用方式是城市复合生态系统的重要组成部分,具有保护城市地域重要的生态系统和生物栖息地、改善居民生活质量的作用,其数量和空间分布都会对城市生态安全产生重要影响<sup>[9-10]</sup>,被视为统筹解决城市化进程人工建设扩展与自然生态保护矛盾的重要综合途径。

生态用地这一概念自董雅文等<sup>[11]</sup>首次撰文提出以后,近十余年来相关基础理论及应用研究有了较大进展。中国学者围绕土地生态功能对生态用地概念进行了深入探析,基于土地覆被类型、土地利用程度及二者的综合视角划分了生态用地类型<sup>[12-13]</sup>,提出了区域/城市生态用地的生态效益与质量评价模型<sup>[14]</sup>,并从法学、政策、财政、技术视角研究了生态用地管理<sup>[15]</sup>,提出生态用地的分级分类保护模式<sup>[16]</sup>。其中,无论是生态用地的概念内涵、分类体系等基础研究,还是生态功能评估与管理模式探析等应用研究,均以特定类型土地满足人类生态需求测算这一核心内容为研究基础。近年来,针对城市地域特定生态系统服务或具体生态用地类型,国内外学者开展了城市生态用地需求测算的理论方法探讨及个案分析,但对于该领域的整体研究进展仍缺乏系统梳理,尤其是缺乏不同模型方法适用性的综合对比。

随着国家生态文明发展目标与新型城镇化发展战略的确立,中国在新一轮的快速城市化进程中如何有效保障城市地域生态需求,实现环境与发展的和谐共赢,成为当前迫切需要解决的问题。因此,本文在整合分析生态用地相关概念内涵的基础上,系统梳理城市生态用地需求测算方法,对比分析不同评估模型的优缺点,并提出当前迫切需要解决的核心科学问题,以期有效促进城市生态用地需求测算研究进展、切实保障中国城市化进程的有序推进。

## 2 生态用地与生态需求

土地分类是对土地进行准确评价、合理利用、有效监测、严格保护的重要环节,是土地科学的重要基础研究内容。1940年以来,中国相关政府管理部门主导了多次土地分类,但由于对“利用”一词的狭义理解以及对未利用地生态价值的忽视,其分类结果都出现了“未利用地”这一类别,将雪原、滩涂等具有重要生态功能的土地归为“未利用土地”类别<sup>[17]</sup>。例如,1998年公布的国家土地管理法与2002年的“全国土地分类(试行)”均将土地分为“农用地”、“建设用地”、“未利用地”。这引起了学者们的广泛讨论,事实上土地利用绝不局限于对土地空间的直接接触、占有或对土地原有属性状态的人为改变;那些具有重要生态功能的土地,如沼泽、河流、湖泊在调节气候、涵养水源、维系生物多样性、平衡生物地球化学循环等方面都有着重要的作用,实质上间接地为人类所利用。但“未利用地”的分类命名否定了其生态价值,忽视了人类对于自然保留地的间接利用;这在客观上引导人们认为这些土地因为没有价值,或者利用难度大而造成了暂时没有加以利用的“闲置”、“浪费”,人类应充分开发这些土地以提高土地利用效率<sup>[18]</sup>。因此,传统土地利用分类系统尤其是“未利用地”的划分掩盖了土地的功能属性,而土地事实上是一个综合的功能整体;一个健康的土地系统不仅需要具有结构上的完整性,还必须实现功能上的连续性<sup>[19]</sup>;学者们纷纷倡导基于生态功能的土地(利用)分类<sup>[16,20]</sup>。对此,2008年颁布的《全国土地利用总体规划纲要(2006-2020年)》与2012年发布的《城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137-2011)》出现了积极的应对,取消了未利用地类,这有利于从源头上限制不合理的土地开发活动;但其并未明晰生态

用地,又暗示着土地生态效益在现实土地管理中仍难以受到足够的重视<sup>[21]</sup>。

在20世纪90年代中国城市化进程加快、城市生态问题日益突出的背景下,董雅文等<sup>[11]</sup>首次提出了生态用地的概念,阐释了城市的生态防护主体与功能,将生态要素的空间实体统称为生态用地。2000年,国务院发布的《全国生态环境保护纲要(国发[2000]38号)》首次在政府、行业文件中提及生态用地。此后,国内学者基于多学科视角对生态用地的概念内涵进行了探讨。总体来看,生态用地的定义可分为生态中心与人类中心两种类型(表1)。其中,生态中心视角基于生态学,强调生态系统的完整性与生态功能的发挥,其评判标准又可细分为广义生态中心、狭义生态中心两类。前者认为凡是具有生态功能的土地均应称作生态用地,包括具有生态功能的城市近郊农用地;后者则认为只有以生态功能为主体功能的土地才可视为生态用地,如以经济生产为主的农用地不能算作生态用地。人类中心视角是从法学角度出发,以“人类”为中心,突出人与生态用地的关系,强调生态用地保障人类生态安全的重要功能,关注生态用地的保护对土地权利人的权利和义务可能产生的影响<sup>[15]</sup>。相较而言,广义生态中心视角定义过于宽泛,因为理论上任何土地都会具有程度不一的生态功能,如此则丧失了土地类别划分的意义;狭义生态中心与人类中心视角均有合理之处但又不尽全面,因为城市是自然与人工耦合而成的复合生态系统,城市生态用地形成与演化不能单纯以“生态”或者“人类”为中心来看待,而应将自然与人类作为相互关联组成要素平等对待。城市生态用地既有维持生态系统自身能量流、物质流、信息流稳定,保障城市发展生态基底安全的功能,又有着为人类提供供给、调节、支持与文化等多重生态系统服务的功效,同时拥有自然与社会属性。因此,可以将城市生态用地定义为城市赖以生存的自然基底,是以维护城市生态安全,为城市居民提供必要生态系统服务为主体功能的土地类型。

表1 生态用地概念类型

Tab. 1 The concepts of ecological land

类型	学科视角	提出背景	关注点	判定标准	代表人物
生态中心	生态学	自然资源遭到破坏,生态用地未受到重视	生态用地所提供的生态功能	凡是具有生态功能的土地(广义) 以生态功能为主的土地(狭义)	岳健 <sup>[18]</sup> 郭荣朝 <sup>[22]</sup> 陈爽 <sup>[23]</sup> 俞孔坚 <sup>[24]</sup>
人类中心	法学	人与生态用地关系不明确,缺乏有效保护制度	生态用地保护对土地权利人的权利和义务可能产生的影响	保障人类生态安全、以发挥生态功能为主的用地	唐双娥 <sup>[15]</sup>

毋庸置疑,城市生态用地的核心属性是生态功能,基于生态功能开展生态用地分类对于明晰生态用地效益有着重要意义。随着城市文明的演进,城市居民的自然生态需求日益增大,对洁净的水源、清新的空气、适宜的温度、可亲的景观的渴求益发强烈。这种生态需求实质上反映了人们对于生态功能的需求,而生态功能是生态用地的核心属性,其物质载体即是生态用地,因此人类对生态功能的需求反映到物质上即是对生态用地的需求。并且,由于土地在数量、空间上相对容易测算,目前人类生态需求的计量往往转化为对发挥特定生态功能的土地需求量。因此,生态用地与生态需求的关联体现为以具体生态功能为连结纽带的现象与本质的伴生关系。

### 3 城市生态用地需求测算研究进展

城市生态用地需求测算的结果常常表现为一定的数量规模及其空间范围,但实质则

是生态功能，因此，功能与空间是相关测算模型与方法需要重点考虑的两个核心要素。其中，功能是空间的核心属性，空间则是功能的物质载体，二者必须有效关联才能正常发挥作用（图1）。具体而言，生态功能要素需要综合考虑功能类型综合性、代表性与阈值问题，这是因为不同发展程度的城市对生态功能

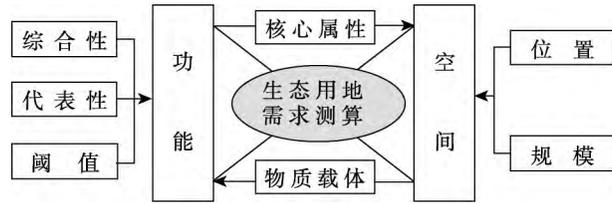


图1 城市生态用地需求测算概念框架

Fig. 1 The conceptual framework for measuring urban ecological land demand

的需求并不一致，不同生态本底的城市其自然系统所能提供的生态功能也有所不同，因此，综合性就要求生态功能的权衡既要考虑社会经济的发展需求也要兼顾自然生态的供给能力；生态功能类型广泛且不同类型之间的相互作用关系复杂，难以对每一项功能进行精确测算，代表性要求必须选取研究区具有代表性的核心功能进行研究；此外，城市作为一个开放系统与外部区域相互依存，存在密切的物质、能量交换，加之自然生态系统服务大多非原位消费、存在空间可传递性，城市所需要的生态功能不必完全由城市自身的生态用地提供，但城市自身所应承担的生态功能比例阈值由此成为研究的关键环节。另一方面，影响生态用地功能发挥的空间要素主要包括规模与位置两方面，这是事物空间属性的两大基本特征。其中，规模在数量上对生态用地与建设用地进行权衡，保留一定数量的生态用地是生态功能发挥的根本保障；格局反衍过程<sup>[25]</sup>，位置通过相关自然因子在立地空间上的特征组合显著影响生态过程，进而对生态用地的功能与效益产生促进或阻碍作用。

根据对功能与空间两大城市生态用地需求测算核心要素关注的不同，可以将已有的测算方法归并为经验判定法、生态系统服务法和空间格局法3大类，其中后两者分别强调功能与空间要素，而前者则缺乏对空间要素的定量关注。

3.1 经验判定法

经验判定法是以历史时期城市生态用地需求特征基本不变为假设前提，往往从长时间序列的城市生态用地动态演化过程中寻找内在变化规律，通过经验判定或者模型远景未来不同时期城市人口、GDP、产业、建设用地等同生态用地需求密切相关因子的变化情景，来定量判断城市生态用地需求，具体包括法定定额法和历史趋势预判法。

(1) 法定定额法

法定定额法一般遵照各级政府、部门、组织制定并颁布实施的法律、法规、规范、标准以及参照当地政府的生态环境建设目标等来确定城市地域的生态用地需求数量规模；相关指标内容既包括以绿地率、绿地覆盖率、人均游憩率等形式进行的总量控制，也包括由农林、水利、交通等职能部门对水源涵养保护、基本农田、交通隔离林带的单项规划。目前，中国已基本形成一套涵盖国家、区域、城市、区县、街道的层级较为全面的生态用地需求指标体系，上下级指标相互关联、层层递进。例如，联合国可持续发展委员会（UNCSD）提出了国际间合作的指标体系《21世纪议程》，中国相应制定了《中国21世纪议程》；在国家层面开展园林城市、森林城市评定工作，从全国层面划分了生态用地数量标准；广东省在省级层面开展的生态控制线划定指引，确定全省的生态用地需求规模，并结合区域、城市情况对各市生态用地数量进行权衡、协调；珠江三角洲城镇群除根据广东省的指引要求外，结合自身城镇群的特点制定了珠三角环境保护规划、绿道系统，提出结合自身情况的生态需求规模；在城市层面，深圳、东莞已经完成

了生态控制线的划定,对生态用地以坐标的形式落实到了空间地块上,并以政府规划条例的形式进行了确定、实施,取得了良好的效果。

总体来看,法定定额法因其层级衔接、内容全面的指标体系为城市生态用地测算提供了有力参考,尤其对于规划编制力量较弱的区域。但目前来看,也存在着较大弊端:①指标的经验性受到质疑,编制单位往往仅展示编制结果,不说明编制依据、方法,而这些指标的制定过程中经验的判断往往占了很大成分,使得使用者对编制结果的科学性、准确性产生怀疑;②对城市特点考虑不足,上级指标在协调本级指标的时候往往考虑的是区域的整体状况,较少考虑下级不同区域的特点;③编制主体混乱、权责不明,编制单位虽然遍及各个层级、各个部门,但相互之间缺乏有效协调与内在衔接,各自编制结果往往存在一定的冲突,且缺乏对编制成果实施的有效监督、法律保障,导致执行力不强。

### (2) 历史趋势预判法

尽管人类社会—自然耦合系统作为一个复杂系统,具有非线性特征,但亦有学者指出,通过分析、理解土地历史变化的机制和原因能够对未来土地变化的趋势、速率进行预判。历史趋势预判法即通过模型对生态用地历史变化过程、机理和环境影响进行分析,以掌握其规律进而对生态用地未来趋势进行预判。目前,主要应用的模型有统计模型、元胞模型、系统动力学模型。统计模型如回归分析、灰色系统模型等,可以定量刻画城市生态用地变化与社会经济发展的时间序列发展趋势,在空间异质性和空间相互作用的影响上具有优势,但在处理决策过程和一些社会因素方面的量化上则遇到困难,且其无法阐释社会经济系统与自然生态系统的内在关联机理。元胞模型包括元胞自动机和马尔可夫模型等,基本分析单位为适宜的空间网格;生态用地的时空变化取决于每个网格和周围网格在时空尺度的转换规则,相同的空间单元在相同的空间网格作用下服从相同的转换规则,其在模拟生态用地的生态过程变化方面有着显著优势,但其应对人类决策时有所不足<sup>[26]</sup>。系统动力学模型建立在控制论、系统论和信息论基础上<sup>[27]</sup>,研究反馈系统结构、功能和动态行为特征,能够反映复杂系统结构、功能与动态行为之间的相互作用关系,从而考察复杂系统在不同情景下的变化行为和趋势,但所需数据量大、精度要求高。

总体来看,上述模型的应用在一定程度上均能为未来生态用地需求的判定提供参考,但由于土地变化过程复杂,影响其变化的自然和社会经济要素众多且难以监测,各要素间又相互影响、相互作用,驱动因子与驱动背景环境之间会发生相互转化和演替<sup>[28]</sup>,使得难以准确评估未来土地变化;并且,历史趋势预判法以历史规律为预测规则,规避了对生态过程、人文过程、生态功能与生态用地关联复杂关系的考虑,但历史规律不一定有其现时合理性,未必适合当代或未来的科技水平、发展状况,缺乏对生态用地需求的机理分析,无法从根本上确定城市生态用地需求数量。

## 3.2 生态系统服务法

生态系统服务法是从生态功能角度出发选取具有一定代表性、与土地关联、便于折算计量的特定生态系统服务来表征城市社会经济生态需求以及自然生态系统所提供的生态供给量,再将其追踪投影到生态用地上从而得到城市生态用地需求量,目前应用较为广泛的主要包括生态足迹法、碳氧平衡法。

### (1) 生态足迹法

生态用地需求测算的关键在于如何将社会经济系统与自然生态系统耦合在一起定量表征人类社会的生态需求并将其投影在土地利用上,生态足迹法通过“生物生产性用

地”将人类社会的生态需求与自然土地的生态供给统一在一起<sup>[29-30]</sup>。生物生产性用地指具有生物生产能力的土地或水体,主要包括可耕地、林地、草地、化石燃料土地、建筑用地和水域等6种类型<sup>[31]</sup>。生态足迹法将人类活动消费的物质、能源及其所产生的废弃物数量按比例折算到生物生产性土地面积上,从而基于生物生产性土地面积定量测算了城市地域的生态需求,同时可以将不同区域、不同类型的生态用地按照产量因子、均衡因子换算成统一的生物生产性用地,这样基于生物生产性土地面积视角将生态需求与生态供给综合在一起直接判断生态盈余或赤字状况。当然,也可以基于全球可比的生物生产性土地面积进行不同城市或同一城市不同时期的生态消费(需求)对比<sup>[32-33]</sup>,并探讨GDP、人口等相关指标与生态足迹的关联来预测不同社会经济发展情景下的城市生态用地需求<sup>[34-35]</sup>。

尽管对于生态足迹方法尚存有弱可持续性评价、缺乏预测功能、评估结果非决定性、假定空间互斥性等不足<sup>[36]</sup>,但该方法在定量表征人类活动对于自然生态系统的影响及生态功能的需求方面无疑是成功的。生态足迹法最突出的特点就是将人类生产、生活消费与其赖以支持的自然生态系统紧密结合在一起<sup>[37]</sup>,让两个不同的复杂系统能够彼此关联并进行比较。但是,需要注意的是,生物生产只是城市生态用地功能的一个方面,并且从区域土地功能分异的视角来看还不是城市最重要的职能,代表性不强,难以完全表征城市生态需求。此外,城市作为一个开放系统,其所需的物质、能源及其产生的废物并不完全由城市自身的生态用地来供给,这也是目前为止全球不同规模城市生态足迹核算基本均为赤字的本质原因所在;因此,判断城市自身生态用地所应承担的生态功能份额(或阈值)成为当前迫切需要解决的研究难点。

## (2) 碳氧平衡法

土地生态功能多种多样,但就目前技术水平和数据可靠性分析,其中多数生态功能难以计量,或至今尚未形成普遍公认的核算方法<sup>[38]</sup>。研究者们往往根据“木桶法则”或“最小因子定律”,在众多土地生态功能中筛选出无法替代、不能交易、数量稀缺的土地生态功能作为生态需求测算的基础和依据<sup>[39]</sup>。其中,碳氧平衡因其对于人类及动植物生存环境的极端重要性,而成为学者们首要考虑的功能类型。基于碳氧平衡测算城市生态用地需求大体遵循了以下主要途径:首先,依据城市生态用地光合作用测算出城市固碳释氧量,依据社会经济统计数据测算城市排碳耗氧量,分析城市碳氧收支状况;其次,依据城市规划或者土地利用规划等采用趋势外推等方法预测目标年碳氧平衡情况;再次,确定城市自身生态用地供给固碳释氧服务的最小比例。目前,主要依据IPCC1995年气候变化报告中“全球每年因耗能(如煤炭和石油)释放的CO<sub>2</sub>有1/3进入大气、1/3被海洋吸收、1/3被固定在陆地生态系统中”的观点将城市固碳比例定在1/3;最后,依据目标年碳氧平衡量及城市自身固碳释氧比例,测算生态用地最小需求。

碳氧平衡法以其不可替代的功能特殊性与计算的简便性,受到广泛的应用。张颖等<sup>[40]</sup>、吴涛等<sup>[41]</sup>、牛彦琼等<sup>[42]</sup>先后基于碳氧平衡法对长沙、广州、石家庄等城市的生态用地需求进行了定量测算;贵立德<sup>[43]</sup>利用碳氧平衡法分析了兰州城市生态用地长时间序列的供求关系并采用灰色关联模型评价了城镇化水平与城市生态用地供求的耦合特征;汤洁等<sup>[44]</sup>、曲艺等<sup>[45]</sup>以碳氧平衡为优化目标基于线性规划模型对生态用地进行了数量结构优化。但是,碳氧平衡法在实践应用中也表现出了一定的局限性:首先,在空间尺度上,大气碳氧平衡作为区域乃至全球尺度的生态过程,应用于城市尺度往往受到学者的怀疑;其次,在计算方法上,碳氧平衡的计算过程还有较多不确定的地方,尤其是城市自身生态用地所应承担的固碳释氧比例难以确定,而城市固碳释氧量采用不同的计算方法往往会

得到差异较大的计算结果;最后,在代表性上,碳氧平衡这一区域尺度的生态功能无法完整代表城市生态用地的功能,需要将多个生态系统服务结合起来综合考虑。

### 3.3 空间格局法

空间格局法是考虑空间格局与生态功能之间的联系,分析生态用地数量、位置、形状对关键生态功能的影响,而识别出承担这些生态功能的关键生态用地,并将其视为维系城市生态可持续性的最小生态用地需求(规模)的方法,目前较为成熟的是生态安全格局法。基于城市生态用地视角,生态安全指维护土地生态过程健康有序,城市居民能够持续高效获得主要生态系统服务<sup>[46-49]</sup>。目前,生态安全格局法首先基于功能稀缺、空间依存、尺度关联、土地调节等原则确定城市的核心生态功能(主要是涵盖水安全、生物保护安全、地质灾害规避、游憩安全等),进而基于遥感与GIS开展景观过程分析和模拟,从而判定对维护这些核心生态功能最为关键的景观要素及其空间位置。由于生态安全格局在各种过程中存在一系列阈限和层次,这些阈限和层次不是顶级的和绝对的,而呈一种阶梯状的、不均匀分布,因此,生态安全格局的结果往往以高、中、低多层次的安全水平出现,以更有效地协调不同性质的土地利用之间的关系,为规划者、决策者、公众提供参考方案。近年来,国内学者基于生态安全格局识别与构建,相继开展了县域<sup>[50-51]</sup>、市域<sup>[52-54]</sup>及城市群<sup>[55]</sup>等不同空间尺度的生态用地需求测算,探讨了基于生态安全格局的城市/区域生态用地的结构优化与功能规划途径与方法<sup>[56-57]</sup>,并提出将生态安全格局边界作为城市发展所需求的生态用地保护线与城市建设用地增长的控制线<sup>[24, 58]</sup>。

以生态安全为目标选择的生态系统服务集合相对特定生态系统服务而言更加综合,更有代表性;基于景观过程的空间分析,将土地生态功能与土地空间格局紧密联系在一起,能同时确定生态用地的数量规模与空间布局。但究其实质,生态安全格局的构建过程即是对重要生态用地的选择,生态安全格局法是以对于自然生态安全(功能)具有关键作用的生态用地(供给)来表征区域或城市的最小生态用地需求;因此,生态安全格局法更多的是从自然生态系统供给现状出发,未能有效综合社会、经济系统对于生态功能及其载体——生态用地的需求。尽管相比于生态系统服务法,多层次水平的生态安全格局基于最小生态用地需求特质在一定程度上回避了难以确定城市自身应该承担的生态系统服务比例阈值的问题;但该方法测算出的仅仅是城市生态用地需求的最小值,对于城市生态用地需求标准值的测算方法,以及其他满足非最低生态(安全)需求用地纳入标准值测算结果的原则与依据,还有待进一步深入探讨。

综合对比经验判定法、生态系统服务法与空间格局法等上述3大类方法(表2),可以发现:经验判定的方法可以避开对生态过程、人文过程等复杂问题的分析,但鉴于未来事件发生的偶然性,模型往往缺乏对科技进步、政策变化等因素的考量,难以完全准确地远景未来,且未能考虑历史规律的局限性,以及人类活动对于未来土地变化的主动干预;生态系统服务法能够通过选择特定类型的生态系统服务将人类社会经济系统与自然生态系统耦合到同一定量因子的核算上,但其缺点在于特定生态功能不一定能完整的代表城市生态用地的整体功能,且面对城市与其生态腹地的功能整合时难以确定城市自身生态用地所应当承担的生态功能阈值;空间格局法的突出特点是能够将生态用地的空间属性与功能属性关联直接得到生态用地的数量规模和空间分布,且其基于生态安全视角关注的生态功能集合一般更为综合、全面,更能代表城市生态用地的核心功能;但其本质是从自然生态系统的核心生态功能供给表征城市最小生态需求,缺乏对社会经济系统生态需求的综合考虑,未能将自然生态系统与社会经济系统耦合关联起来。

表2 城市生态用地需求测算方法对比

Tab. 2 Comparison among different methods in measuring urban ecological land demand

类型	模型	基本思路	优点	缺点
经验判定法	法定定额	各级政府、部门、组织、制定并颁布实施的法律法规、规范、标准	简单明确、易操作	指标阈值缺少科学性；城市特点考虑不足；编制主体混乱、权责不明
	历史趋势预判	基于历史规律通过模型预测未来土地变化	规避复杂分析，基于过去预测未来	无法阐释社会经济系统与自然生态系统的内在关联机理；缺乏主动干预
生态系统服务法	生态足迹	利用生物生产性用地测算自然、人类对生态功能的供给与需求	综合核算自然生态系统与人类社会经济系统的生物生产功能与需求	生态功能代表性不强；难以确定城市自身所应承担的功能阈值
	碳氧平衡	利用绿色植物固碳释氧量与城市的排碳耗氧量评估碳氧平衡、测算生态用地需求	综合关注人类个体的生理需求与经济活动的生产需求	生态功能代表性不强；城市尺度应用有限；难以确定城市与外界的气体交换
空间格局法	生态安全格局	通过景观过程分析和模拟判别关键性景观要素及其空间位置	生态功能代表性强；同时确定数量规模与空间分布	未能耦合自然生态系统与人类经济社会系统；基于供给核算需求

## 4 城市生态用地需求测算研究展望

随着中国新型城镇化与生态文明建设的开展，城市生态用地将在中国城市建设中承担更加重要的作用，同时也将对城市生态用地需求测算研究提出更高要求（图2）：首先，需求测算研究的结果将不仅仅反映在生态用地这一笼统概括的用地类型层面，而是表征为更加细致的生态用地类型。因此，基于土地生态功能的城市生态用地分类将是整个城市生态用地需求测算研究的数据与工作基础；其次，基于土地生态分类，城市生态用地需求测算的核心重点将从单纯的数量测算，转向关注土地数量、质量及空间格局的综合效益核算；在效益—需求测算的同时，必须综合考虑不同生态功能相互依存关系，即重点关注多目标情景下的生态功能综合权衡这一关键环节；最后，城市生态平衡的维系需要周边大量乡村地域的支撑，基于生态用地供需平衡分析，识别为城市提供重要生态功能的乡村腹地并明晰相关生态补偿策略，成为城市生态用地需求测算研究的重要实践应用方向。

### 4.1 基于土地生态功能的城市生态用地分类

与建设功能相对应，生态功能包含众多人类从中受益的生态系统服务，以及保障这些生态系统服务

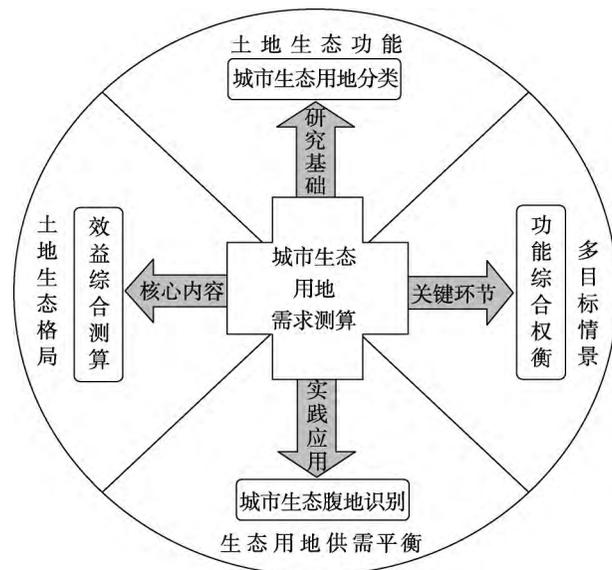


图2 城市生态用地需求测算研究重点方向

Fig. 2 The key directions for measuring urban ecological land demand in future studies

但未能纳入人类最终消费的中间生态过程。而生态系统服务本身则是一个较为宽泛的系统,更为细致的生态系统服务分类使得人类能够更清晰地认识、更准确地估算各项生态需求<sup>[59]</sup>。不同的生态功能如水源涵养、气候调节、粮食生产、废物代谢所起的作用不一样,人类生产、生活中对其需求也就不一样,同样以其为主要功能的不同类型生态用地如森林、农田、湿地也就不能完全等同,人类对其需求也不一样。笼统的生态用地概念无法细致表征人类对于不同类型生态用地的功能需求,也就无法精细的对生态用地进行评估、管理,无法满足高度城市化地区人多地少情况下对生态功能高质量、高效率的需求。因此,基于土地生态功能的生态用地分类尤为重要。土地分类是土地科学的基础任务和重要内容,既是土地利用现状调查、评价、规划研究的基础和前期性工作,也是对土地实施有效管理的前提。目前,土地利用分类多从土地覆被类型或土地利用程度等功能角度进行划分;而土地生态系统作为一个综合的功能整体,土地利用的可持续性亦是其功能目标,必须实现功能上的连续性<sup>[20]</sup>。尽管已有学者对生态用地分类进行了相关研究<sup>[12]</sup>,但在分类体系及其划分依据方面对于土地的生态功能属性仍有待进一步强调。

#### 4.2 基于土地生态格局的城市生态用地效益综合测算

城市生态用地的数量规模是影响城市生态效益的重要环节,同时土地质量也是影响生态环境的关键因素;在人均资源占有量低、城镇化速度加快的现实国情下,城市生态用地需求测算重点将从单纯的数量导向转变到强调质量—数量并重的综合效益<sup>[60]</sup>。生态用地的质量既包括垂直生态系统的生态类型、群落结构、立地条件等,也包括水平生态系统的斑块、廊道之间的关联。各级生态系统、景观斑块间的相互作用使城市生态用地的整体效益并不等于各部分生态用地的效益之和。因此,为保证城市生态用地的综合效益最大化,不仅要强调生态用地斑块的面积规模大小,更需要重视的是生态用地斑块的坐落位置、生境质量、斑块连通性及其抗干扰能力与受干扰后的恢复力等属性特征,即城市生态用地需求测算应强调土地生态格局指标在描述生态用地效益时的定量指示意义,从而由以数量规模为基础的指标控制转向以质量管控、空间优化为导向的城市生态规划与生态系统管理。作为城市生态学研究的热点领域之一,城市生态系统健康与城市生态风险耦合了多种自然生态要素、生态过程与景观格局及其与人类活动的相互关联,是评价城市生态用地效益的重要综合途径。目前,尽管基于生态学、景观生态学理论与方法,已有学者针对土地利用格局与生态效益开展了大量研究,但大多为关注景观格局指数或基于最小累积阻力模型进行区域生态廊道规划,基于土地生态格局的城市生态用地效益综合测算模型与方法研究亟需加强。

#### 4.3 基于多目标情景的城市生态用地功能综合权衡

生态用地需求测算要综合考虑经济、社会、生态系统的协调发展,是涉及多学科、多尺度、多层次的综合性问题。在目前缺乏成熟完善的理论指导情况下,多目标情景模型的有机综合为生态用地需求测算提供了一条有效的研究途径。对于不同城市、同一城市的不同区位、同一区位的不同时期,城市生态用地所体现的功能是不同的,人类社会对同一功能的需求程度也是有所差异的。同时,不同生态系统服务(生态功能)之间往往存在协同、冲突或兼容等密切的相互依存关系,生态用地多种功效最大化仅仅存在理论上的可能,现实中难以同时达到。因此,有必要基于不同生态功能的相互关联特征以及人类社会的需求特点,采用情景分析对模型模拟结果进行进一步的综合权衡。尤其是随着中国城市化进程的快速推进,在城市生态用地布局中应对比先进城市案例,确定城市功能定位与发展预期,设定满足城市发展长远需求的情景。位于城市边缘的生态用地目前仅能提供固碳释氧、水土保持等调节功能,但随着城市不透水面扩张,其在局地降

温防风、净化环境、减弱噪声等方面的功效对于当地城市居民而言将益发重要。这一基于未来情景的城市生态用地需求测算仅靠单一模型进行现状分析是无法实现的,也是城市生态规划应当着力避免的。例如,深圳在划定基本生态控制线时,依据《深圳市城市规划标准与准则》确定全市的城市绿地率、城市绿化覆盖率,运用碳氧平衡法确定的城建用地和生态用地适宜比例,通过横向比较国内外相关城市(新加坡、香港、北京、上海)生态建设情况,最终得出深圳市生态用地面积应达到市域面积的50%以上。然而,该目标情景仅仅是一个多方案的比较,方案之间如何权衡、融合并没有深入研究,如何综合各方法特点、取长补短,在功能上既能够代表城市的核心生态需求又能够综合人文与自然两方面的属性特征,在空间上将生态功能与土地利用更好的关联起来是今后研究需要重点关注的方向。

#### 4.4 基于生态用地供需平衡分析的城市生态腹地识别

城市作为人类活动的重要集聚场所,通过人流、物流、能量流和信息流与外围区域发生多种联系,因而城市与受其影响的区域——腹地之间存在相互依存、互为助力的共生关系。城市的经济腹地——受城市经济辐射显著影响地域的空间识别,很早以来就引起了经济地理学界的关注;但是,对于城市地域与其周边乡村地域生态功能的密切联系,却较少受到城市生态学者的重视。就城市生态系统而言,因受人工干预强烈,营养结构简单,自然调节能力弱,无法独立完成系统自身的物质循环和能量转换,是一个对外界高度开放与依赖的典型人工生态系统;而生态系统服务乃至土地生态功能与生态安全均具有空间上的耦合性,流域上下游之间、上下风向之间,城乡、水陆以及山区和平原之间相互影响、交叉作用。因此,一个地区的生态安全与邻近地区戚戚相关<sup>[61]</sup>,城市生态系统与其外部环境是一个有机的整体,城市的生态需求常常需要扩展到城市之外去实现其供给<sup>[62]</sup>。这些与城市具有密切生态联系,具有维持城市赖以生存之生态基础作用的城市外围特定区域便成为城市生态腹地<sup>[63]</sup>。随着全国城市化进程的高速推进,城市建设占用生态空间、生态用地相对不足已成为当前不同规模城市面临的现实窘境,作为城市生态空间的有机组成部分,城市生态腹地客观上缓解了城市地域生态供给的不足,其空间识别理应成为城市生态用地需求测算不可忽略的内容。但在城市生态腹地具体的划定过程中,无论是生态腹地的空间识别还是行政管理都遇到较大困难。基于生态用地供需平衡分析的城市生态腹地识别,成为城市生态用地供需需求测算的重要实践应用方向,如何计算生态腹地与城市之间的生态供需状况,确定两者之间的平衡阈值;如何破除行政界线分割,利用生态补偿保证生态腹地生态用地功能的有效发挥,都是下一步需要重点探讨的问题。

#### 参考文献(References)

- [1] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: From theory to implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(28): 9455-9456.
- [2] Tallis H, Kareiva P, Marvier M et al. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(28): 9457-9464.
- [3] Rodriguez J P, Beard T D, Bennett E M et al. Tradeoffs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28-42.
- [4] Bennett E M, Balvanera P. The future of production systems in a globalized world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(4): 191-198.
- [5] Mooney H A, Duraipappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(Suppl. 1): 3665-3672.
- [6] Platt R H, Rowan A R, Pamela C M. *The ecological city: Preserving and Restoring Urban Biodiversity*. Amherst: Univ.

- of Massachusetts Press, 1994.
- [7] Gunawardhana L N, Kazama S, Kawagoe S. Impact of urbanization and climate change on aquifer thermal regimes. *Water Resources Management*, 2011, 25(13): 3247-3276.
- [8] Liu Zhenhuan, Wang Yanglin, Peng Jian et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971. [刘珍环, 王仰麟, 彭建等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征: 以深圳市为例. *地理学报*, 2011, 66(7): 961-971.]
- [9] Li Feng, Ye Yaping, Song Bowen et al. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: A case study in Changzhou City, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5623-5631. [李锋, 叶亚平, 宋博文等. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变: 以常州市为例. *生态学报*, 2011, 31(19): 5623-5631.]
- [10] Su Weizhong, Yang Guishan, Zhen Feng. Ecological land fragmentation and its connectivity with urbanization in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(12): 1309-1317. [苏伟忠, 杨桂山, 甄峰. 长江三角洲生态用地破碎度及其城市化关联. *地理学报*, 2007, 62(12): 1309-1317.]
- [11] Dong Yawen, Zhou Wen, Zhou Lan et al. Ecological protection in urbanization distinct: A case study of Nanjing city, Jiangsu Province. *Urban Research*, 1999(2): 6-10. [董雅文, 周雯, 周岚等. 城市化地区生态防护研究: 以江苏省南京市为例. *城市研究*. 1999(2): 6-10.]
- [12] Deng Xiaowen, Sun Yichao, Han Shijie. General principles of urban ecological land classification and planning. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 2003-2006. [邓小文, 孙贻超, 韩士杰. 城市生态用地分类及其规划的一般原则. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 2003-2006.]
- [13] Wang Zhenjian, Li Ruxue. Classification, ecosystem service, protection and utilization of the urban ecological land: A case study of Liaocheng City. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6): 306-308. [王振健, 李如雪. 城市生态用地分类、功能及其保护利用研究: 以山东聊城市为例. *水土保持研究*, 2006, 13(6): 306-308.]
- [14] He Chunyang, Shi Peijun, Li Jinggang et al. Scenarios simulation land use change in the northern China by system dynamic model. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 599-607. [何春阳, 史培军, 李景刚等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. *地理学报*, 2004, 59(4): 599-607.]
- [15] Tang Shuang'e. The Definition and scopes of ecological land in law. *Ecological Economy*, 2009(7): 190-193. [唐双娥. 法学视角下生态用地的内涵与外延. *生态经济*, 2009(7): 190-193.]
- [16] Liu Xin, Gu Yu, Deng Hongbin. Importance assessment of ecological land protection in Jiangxi Province. *China Environmental Science*, 2010, 30(5): 716-720. [刘昕, 谷雨, 邓红兵. 江西省生态用地保护重要性评价研究. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 716-720.]
- [17] Xu Jian, Zhou Yankang, Jin Xiaobin et al. Discussing virgin land classification subsystem based on the protection of the eco-environment. *Resources Science*, 2007, 29(2): 137-141. [徐健, 周寅康, 金晓斌等. 基于生态保护对土地利用分类系统未利用地的探讨. *资源科学*, 2007, 29(2): 137-141.]
- [18] Yue Jian, Zhang Xuemei. A discussion on classification of land use in China. *Arid Land Geography*, 2003, 26(1): 111-123. [岳健, 张雪梅. 关于我国土地利用分类问题的讨论. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 111-123.]
- [19] Chen Jing, Shi Peijun. Discussion on functional land use classification system. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2005, 41(5): 536-540. [陈婧, 史培军. 土地利用功能分类探讨. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(5): 536-540.]
- [20] Deng Hongbin, Chen Chundi, Liu Xin et al. Conception and function classification of regional ecological land. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1519-1524. [邓红兵, 陈春娣, 刘昕等. 区域生态用地的概念及分类. *生态学报*, 2009, 29(3): 1519-1524.]
- [21] Wen Rui, Wu Yuzhe. An Investigation on influences of implementing new code of land use classification on land Administration in China. *Resources Science*, 2010, 32(4): 731-736. [文锐, 吴宇哲. 《土地利用现状分类》实施对中国土地管理影响之管见. *资源科学*, 2010, 32(4): 731-736.]
- [22] Guo Rongchao, Miao Changhong. A study on the eco-spatial structure of the urban group. *Economic Geography*, 2007, 27(1): 104-107. [郭荣朝, 苗长虹. 城市群生态空间结构研究. *经济地理*, 2007, 27(1): 104-107.]
- [23] Chen Shuang, Liu Yunxia, Peng Lihua. Dynamics of urban ecological space evolution and policy responses: A case study of Nanjing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2270-2278. [陈爽, 刘云霞, 彭立华. 城市生态空间演变规律及调控机制. *生态学报*, 2008, 28(5): 2270-2278.]
- [24] Yu Kongjian, Qiao Qing, Li Dihua et al. Ecological land use in three towns of eastern Beijing: A case study based on landscape security pattern analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1932-1939. [俞孔坚, 乔青, 李迪

- 华等. 基于景观安全格局分析的生态用地研究: 以北京市东三乡为例. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1932-1939.]
- [25] Peng Jian, Wang Yanglin, Liu Song et al. Research on landscape ecology and sustainable land use. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(1): 154-160. [彭建, 王仰麟, 刘松等. 景观生态学与土地可持续利用研究, 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(1): 154-160.]
- [26] Pei Bin, Pan Tao. Land use system dynamic modeling: Literature review and future research direction in China. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1060-1066. [裴彬, 潘韬. 土地利用系统动态变化模拟研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1060-1066.]
- [27] Huang Qiuhaio, Cai Yunlong. Review on several domestic land use change models. *China Land Science*, 2005, 19(25): 25-30. [黄秋昊, 蔡运龙. 国内几种土地利用变化模型述评. *中国土地科学*, 2005, 19(25): 25-30.]
- [28] Jie Xiuping, Zhou Jie, Zhang Hailong et al. LUCC analysis of Xi'an Region based on landscape ecology and Markov model. *Resources Science*, 2006, 26(6): 175-181. [解修平, 周杰, 张海龙等. 基于景观生态和马尔可夫过程的西安地区土地利用变化分析. *资源科学*, 2006, 26(6): 175-181.]
- [29] Bagliani M, Galli A, Niccolucci V et al. Ecological footprint analysis applied to a sub-national area: The case of the Province of Siena (Italy). *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(2): 354-364.
- [30] Wackernagel M, Yount J D. Footprints for sustainability: The next steps. *Environment, Development and Sustainability*, 2000, 2(1): 23-44.
- [31] Peng Jian, Wang Yanglin, Chen Yanfei et al. Economic value of urban ecosystem services: A case study in Shenzhen. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*. 2005, 41(4): 594-604. [彭建, 王仰麟, 陈燕飞等. 城市生态系统服务功能价值评估初探: 以深圳市为例. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(4): 594-604.]
- [32] Folke C, Kautsky N. The ecological footprint: Communicating human dependence on nature's work. *Ecological Economics*, 2000, 32: 351-355.
- [33] Xie G D, Cao S, Lu C et al. Human's consumption of ecosystem services and ecological debt in China. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 43-51.
- [34] Chen Yong, Mao Changbao, Cheng Lin. A study on eco-optimum population in different parts of China using theory of ecological footprint. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 560-566. [陈勇, 茆长宝, 程琳. 基于地区生态足迹差异的生态适度人口研究. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 560-566.]
- [35] Zhang Jiankun, Wang Chaoyang, Wang Biao. A study on industrial ecological optimum population based ecological footprint: A case study of Nanjing City. *Human Geography*, 2010, 25(6): 89-92. [张建坤, 王朝阳, 王彪. 基于生态足迹的产业适度人口分析: 以南京市为例. *人文地理*, 2010, 25(6): 89-92.]
- [36] Peng Jian, Wu Jiansheng, Jiang Yiyi et al. Shortcomings of applying ecological footprints to the ecological assessment of regional sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2716-2722. [彭建, 吴健生, 蒋依依等. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷. *生态学报*, 2006, 26(8): 2716-2722.]
- [37] An Baosheng, Cheng Guodong. Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 1002-1009. [安宝晟, 程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析. *生态学报*, 2014, 34(4): 1002-1009.]
- [38] Wang Wei. An approach on ecosystem services classification and valuation. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11): 1314-1316. [王伟. 生态系统服务功能分类与价值评估探讨. *生态学杂志*, 2005, 24(11): 1314-1316.]
- [39] Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613. [欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.]
- [40] Zhang Ying, Wang Qun, Li Bianjiang et al. Study on forecasting ecological land demand with carbon-oxygen balance method. *China Land Science*, 2007, 21(6): 23-28. [张颖, 王群, 李边疆等. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究. *中国土地科学*, 2007, 21(6): 23-28.]
- [41] Wu Tao, Yang Muzhuang, Zhen Yanmin. Supply and demand of Guangzhou ecological land. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 15: 202-204. [吴涛, 杨木壮, 郑延敏. 广州市生态用地供需测算. *广东农业科学*, 2012, 15: 202-204.]
- [42] Niu Yanqiong, Li Shuangjiang, Luo Xiao et al. Study on ecological land demand of Shijiazhuang City based on carbon-oxygen balance method. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*. 2012, 40(12): 7325-7327. [牛彦琼, 李双江, 罗晓等. 基于碳氧平衡法的石家庄生态用地需求研究. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7325-7327.]
- [43] Gui Lide. Relationship between urbanization level and ecological land demand and supply in Lanzhou city. *Bulletion of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(4): 298-302. [贵立德. 兰州市城镇化水平与其生态用地的供求关系. *水土保持通报*, 2012, 32(4): 298-302.]

- [44] Tang Jie, Mao Zilong, Wang Chenye et al. Regional land use struction optimization based on carbon balance: A case study Tongyu county, Jilin province. *Resources Science*, 2009, 31(1): 130-135. [汤洁, 毛子龙, 王晨野等. 基于碳平衡的区域土地利用结构优化: 以吉林省通榆县为例. *资源科学*, 2009, 31(1): 130-135.]
- [45] Qu Yi, Su Bangrong, Ou Minghao et al. Optimization of land use quantity structure based on ecological land constraints. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(1): 155-161. [曲艺, 舒帮荣, 欧名豪等. 基于生态用地约束的土地利用数量结构优化. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(1): 155-161.]
- [46] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 1037-1052.
- [47] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [48] Zhou Rui, Wang Xinjun, Su Hailong et al. Identification and security pattern of ecological land in Pingdingshan newly developed area. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 35(6): 1-12. [周锐, 王新军, 苏海龙等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建. *生态学报*, 2014, 35(6): 1-12.]
- [49] Xiao Dunin, Chen Wenbo, Guo Fuliang. On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 354-358. [肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 354-358.]
- [50] Kang Xiangwu, Liu Xuehua. Construction of regional ecological security pattern for Shunyi District, Beijing. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(10): 71-78. [康相武, 刘雪华. 北京顺义区域生态安全格局构建. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(10): 71-78.]
- [51] Li Yonghong, Xiang Bao, Yuan Xingzhong et al. Ecological security patterns for regional landscapes: A case in the Cheng-Yu economic zone. *Acta Agrestia Sinica*. 2013, 21(1): 18-24. [李咏红, 香宝, 袁兴中等. 区域尺度景观生态安全格局构建: 以成渝经济区为例. *草地学报*, 2013, 21(1): 18-24.]
- [52] Li Y, Sun X, Zhu X, Cao H. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [53] Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua et al. The function of ecological security patterns as an urban growth framework in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 29(3): 1189-1204. [俞孔坚, 王思思, 李迪华等. 北京市生态安全格局及城市增长预测. *生态学报*, 2009, 29(3): 1189-1204.]
- [54] Su S, Li D, Yu X et al. Assessing land ecological security in Shanghai (China) based on catastrophe theory. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(6): 737-746.
- [55] Xie Hualin, Li Xiubin. A method for identifying spatial structure of regional critical ecological land based on GIS. *Resources Science*, 2011, 33(1):112-119. [谢花林, 李秀彬. 基于GIS的区域关键性生态用地空间结构识别方法探讨. *资源科学*, 2011, 33(1):112-119.]
- [56] Fang Shubo, Xiao Dunin, An Shuqing. Regional ecosecurity pattern in urban area based on land use analysis: A case study in Lanzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2284-2290. [方淑波, 肖笃宁, 安树青. 基于土地利用分析的兰州市城市区域生态安全格局研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2284-2290.]
- [57] Li Hui, Yi Na, Yao Wenjing et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 5928-5936. [李晖, 易娜, 姚文璟等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936.]
- [58] Su Yongxian, Zhang Hong'ou, Chen Xiuzhi et al. The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1524-1534. [苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. *生态学报*, 2013, 33(5):1524-1534.]
- [59] Li Shuangcheng, Liu Jinlong, Zhang Caiyu et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography. *Acta Geographica Sinica*. 2011, 66(12): 1618-1630. [李双成, 刘金龙, 张才玉等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618-1630.]
- [60] Peng Jian, Jiang Yiyi, Li Zhengguo et al. Evaluation of land use efficiency: A case study of Jiangnin County. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(3): 304-309. [彭建, 蒋依依, 李正国等. 快速城市化地区土地利用效益评价: 以南京市江宁区为例. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(3): 304-309.]
- [61] Wang Rusong, Ouyang Zhiyun. Some considerations with scientific views on ecological security in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2007, 22(3): 223- 229. [王如松, 欧阳志云. 对我国生态安全的若干科学思考. *中国科学院院刊*, 2007, 22(3): 223- 229.]
- [62] Peng Jian, Wang Yanglin, Jing Juan et al. Research on integrated regional planning of urban landscape functions: A case

study in Shenzhen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1714-1719. [彭建, 王仰麟, 景娟 等. 城市景观功能的区域协调规划: 以深圳市为例. *生态学报*, 2005, 25(7): 1714-1719.]

- [63] Wang Baojun, Song Cui'e, Fu Hua. Tentative study of urban eco-hinterland: On Beijing's urban eco-hinterland's construction. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2008, 21(1): 9-12. [王宝钧, 宋翠娥, 傅桦. 城市生态腹地的初步研究: 兼论北京城市生态腹地构建. *城市环境与城市生态*, 2008, 21(1): 9-12.]

## Research progress and prospect on measuring urban ecological land demand

PENG Jian<sup>1,2</sup>, WANG An<sup>2</sup>, LIU Yanxu<sup>1</sup>, MA Jing<sup>1</sup>, WU Jiansheng<sup>1,2</sup>

(1. Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** As a fundamental supplying carrier of natural ecosystem services in urban areas, ecological land couples human social development and natural ecological succession based on the inherent correlation between land use and land cover. Thus spatial optimization of ecological land has gradually become a vital and comprehensive approach to address the conflicts between urban development and ecological conservation. The measurement of urban ecological land demand can directly determine the equilibrium between supply and demand for ecological land, which is a significant step in overall planning and management of urban ecological land. After a systematic review of the concept of ecological land, the similarities and differences between ecological demands and ecological land demands are discussed in this paper. Then a conceptual space- function framework for measuring urban ecological land demand is proposed. Within this framework methodologies of measuring urban ecological land fall into three categories, namely experimental predication, ecosystem services and spatial patterns. In details, the category of experimental predication includes legal quota and historical trend methods. The methods of ecological footprint and carbon-oxygen equilibrium belong to the category of ecosystem services, while the method of ecological security pattern is included in the spatial patterns category. By methodological principles analysis, the advantages and disadvantages of these methods are comparatively discussed and summarized in terms of comprehensiveness, representativeness, threshold and area, and location. Finally, four key directions of future research are presented: urban ecological land classification related to ecological functions, comprehensive efficiency measurement on urban ecological land focusing on spatial patterns of ecological land, functional tradeoff of urban ecological land using multi-target scenarios, and urban ecological hinterland recognition based on ecological land supply-demand balance analysis.

**Keywords:** urban ecological land demand measurement; experimental predication; ecosystem services; ecological security pattern; urban ecological hinterland; research progress and prospect