

DOI: 10.5846/stxb202110142896

韩宝龙, 欧阳志云. 城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用. 生态学报, 2021, 41(22): 8697-8708.

Han B L, Ouyang Z Y. The comparing and applying Intelligent Urban Ecosystem Management System (IUEMS) on ecosystem services assessment. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8697-8708.

城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用

韩宝龙, 欧阳志云*

中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:开展生态系统服务评估已经成为国土空间功能管治、城市治理、生态产品价值实现等工作中的先行基础动作。生态系统服务的类型和模型方法多, 数据需求复杂, 传统基于多学科软件开展生态系统服务评估的工作模式知识和技术门槛较高、效率低。当前专业的生态系统服务评估软件多为美国从业人员开发, 对我国的数据构成和本地化参数适应性有限。介绍了我国自主开发的生态系统分析软件(城市生态智慧管理系统, IUEMS)的主要功能和应用情况, 并将其的生态系统服务评估功能与 InVEST、ARIES 等国外主流软件在操作逻辑、评估模型、数据取得、空间精度、界面交互五个方面进行了对比。

关键词:生态系统服务; 城市生态智慧管理系统(IUEMS); InVEST; 软件; 比较

The comparing and applying Intelligent Urban Ecosystem Management System (IUEMS) on ecosystem services assessment

HAN Baolong, OUYANG Zhiyun*

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Ecosystem services assessment has become more frequently and widely used in land-use management, city management and the valuation of ecosystem benefits. Working with traditional tools from different domains, the variety of ecosystem services and their large data demands place significant requirements on ecosystem assessment efficiency. This has prompted the need for professional ecosystem assessment tools. Most of the current ecosystem assessment software are developed by foreign groups. Parts of these models and their parameters have not been successfully indigenized to Chinese data structure and ecosystem management demands. This paper introduces a Chinese tool for ecosystem assessment, Intelligent Urban Ecosystem Management System (IUEMS), and its application. Additionally, a comparison of five aspects (operation method, ecosystem services models, data requirement, spatial accuracy and user interface) is made using IUEMS and four other popular ecosystem assessment tools from around the world.

Key Words: ecosystem service assessment; Intelligent Urban Ecosystem Management System; Intelligent Urban Ecosystem Management System (IUEMS); InVEST; software; comparison

自联合国千年生态系统服务评估项目以来, 生态系统对人类产生的惠益愈发为人们认可和重视。全社会对生态系统的认识也经历了从实物量(如林木蓄积量、植被覆盖度)至功能量(如气候调节能力、水源涵养能力), 再至价值量(如生态系统服务价值, 生态产品总值)的深化。

基金项目:国家自然科学基金(71804180); 国家重点研发计划(2017YFF0207302); 中国科学院青年创新促进会项目(2020042); 中国科学院战略性先导专项 A 类(XDA230301)

收稿日期:2021-10-14; **接收日期:**2021-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

对于人口集聚的城市地区而言,生态系统不仅是人居环境的保障,更是社会经济发展的基础。虽然生态系统所提供的多数服务难以被公众所直接观察,但却具有不可替代的重要性^[1-2]。如城市绿地的蒸散和遮荫功能极大的缓解了城市热岛效应,减少了电力消耗^[3-4];城市透水地表,尤其是湿地和下沉式绿地,极大的减少了暴雨时期的城市内涝问题^[5-6];城市周边的植被空间和河、湖、湿地涵养了水源、净化了水质,使水资源能够稳定的供给^[7-12]。诸如此类,生态系统提供了防风固沙^[13-14]、固定二氧化碳^[15-16]、净化空气^[17-18]、削减噪声^[19-20]等与城市发展息息相关的重要服务功能。

科学量化测度生态系统服务能力,不仅有利于提升公众对生态系统重要性的认识,也有便于基于生态系统服务开展现代城市生态管理。我国的生态功能区划^[21]、国家主体功能区划中的重点生态功能区划^[22],以及全国、各省和各地的生态保护红线划定^[23]等重点生态保护管理工作均是以生态系统服务评估结果为基础开展。

生态系统服务功能评估工作涉及生态、水文、气象、地理信息等多个学科的知识,所用评估模型和软件工具也十分多样,有时需要在多个模型和工具间切换,过程十分繁琐,技术门槛较高。当前国际上较为常见的多元生态系统服务评估工具包括(1)美国斯坦福大学自然资本项目(Natural Capital Project)开发的 InVEST 工具(生态系统服务和权衡的综合评估工具,Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)^[24];(2)美国佛蒙特大学开发的 ARIES 工具(生态系统服务人工智能,Artificial Intelligence for Ecosystem Services)^[25];(3)美国地质勘探局与美国科罗拉多州立大学合作开发的 SoLVES 工具(生态系统服务社会价值评估,social values for ecosystem services)^[26];(4)美国林业局开发的 i-Tree 套件^[27]。

以上工具均为美国学者或企业开发,以科学研究为出发点,为生态系统服务评估提供了便利,我国学者利用这些工具也有诸多高质量研究产出。在专业科学研究中这些工具体现出了较好的应用性,但在将这些计算工具应用于我国各地政府的生态管理时,仍存在一些“水土不服”。主要体现在:(1)国外一些基于本地生态过程开发的模型,其模型(尤其是模型参数)并未进行很好的中国化,在我国的适用性仍有待检验^[28];(2)有较高的专业知识门槛,一些输入数据非中国可获取的常规数据,为国外各行业再加工的专业数据,或未标准化提供的网络抓取大数据;(3)有依靠主观经验输入的参数,一些输入参数的制作缺乏标准,需要用户主观判断输入;(4)有对地理信息软件的依赖性,输入数据的制备和输出数据的显示需要依托其他地信类软件。以上原因(详见下文的“比较”章节)降低了生态系统服务评估在我国从生态科学研究走向跨领域应用和政府决策应用的可行性和推广意义。

为此,中国科学院生态环境研究中心结合在该领域的长期技术积累和服务中国地方政府的实际应用需要,于2017年2月着手开展了我国第一个在线生态系统服务评估平台的开发,并于2018年9月上线城市生态智慧管理系统(IUEMS, Intelligent Urban Ecosystem Management System)进行测试,于2019年9月面向全网免费提供在线计算服务。本文将介绍 IUEMS 的主要功能和体系结构,并与国际主流软件进行对比,介绍 IUEMS 已经开展的典型应用,探讨未来的建设发展方向。

1 城市生态智慧管理系统(IUEMS)概述

2017年《深圳市陆域生态系统调查评估项目》启动^[29],是我国第一次系统性的对一个城市的生态系统进行摸底调查,其中生态系统服务评估工作是贯穿和联系多个专项研究的重要工作之一,为了提高生态系统服务评估工作的规范性,以及评估范式和评估结果在后续城市生态信息化管理工作中的可应用性,由中国科学院生态环境研究中心集合多个项目资源,组织实施了 IUEMS 的顶层设计和专项开发工作,并在 www.iuems.com 上线供全网用户免费使用。

IUEMS 主要由4个方面的功能组成(见图1):①基于独立模型的生态系统信息模型库;②基于人工智能的耦合生态关系模拟器;③面向用户的生态知识和数据共享平台;④面向典型场景的专题生态决策支持系统。本文重点介绍和比较生态系统评估功能,即生态系统信息模型库。

1.1 IUEMS 的生态系统评估功能

生态系统信息模型库(简称生态模型库,EIM,Ecosystem Information Model)。生态模型库由独立的、可在线运行的模型组成,主要分为三类:①各类生态系统服务评估模型,包括固碳释氧、气候调节、水源涵养等十余种典型生态系统服务模型,其中部分生态系统服务模型还有不同方法,如基于 NPP(净初级生产力)的固碳模型和基于生物量变化的固碳模型,以及基于固碳速率的固碳模型。②各类综合指标型评估模型,如人与自然耦合发展指数、生态资产指数、生态产品总值等。③其他辅助型模型,如城市人口集聚区边界划定、径流分析、数据增强、投影转换、分区统计等。根据用户的数据情况,一些模型可能存在运行的先后依存关系,如当用户不掌握径流空间数据,在计算水源涵养服务模型前,就需要先运行径流分析模型,以生成该数据。

此外,IUEMS 的生态模型库的适用范围并不局限于“城市”地区,这里 IUEMS(城市生态智慧管理系统)名中的“城市”是指该系统的一些模型结合了城市生态系统服务评估的特定需求,如景观溢价模型、路侧噪声削减模型等;其他生态系统服务模型均可在“非城市”(自然空间为主的区域)应用。

目前该生态模型库已经上线模型 38 项(含数据预处理模型,该数量会根据新模型上线和旧模型优化保持动态变化),每个模型均配有技术说明文档,多数模型数学方法引自国家或地方技术标准规范^[30-33],部分模型的数学方法为在研测试模型。所有模型都可通过在线预约免费使用。

1.2 IUEMS 的其他功能

人工智能生态耦合关系模拟器(简称生态大脑,EcoBrain,Brain of coupled Ecosystem),以卷积神经网络为依托,对栅格化的生态系统地理信息数据进行多图层(输入)对一图层(输出)的空间神经网络分析,实现连续数值的回归关系拟合,以及离散数值的类别关系拟合。受限于人工智能运算对硬件的巨大占用,需邮件申请审核后使用。

生态知识共享平台(简称生态共享平台,E-Sharing, Ecological knowledge and data Sharing platform),向公众介绍传播生态学知识和生态评估技术,包括微信公众号定期推送的文章和学术活动信息、微信客服的在线问答、获授权播放的各类生态专业知识视频和公共数据。

生态管理决策应用平台(简称生态应用平台,EzEco, Easy Ecosystem management),针对当前生态系统服务评估的常见应用需求,提供了配色出图、分析情景生成器、多情景结果可视化对比,以及使用户能够一次性计算多个生态系统服务的“敏捷计算”功能。除“敏捷计算”需要申请审核外,其他均自主预约使用。

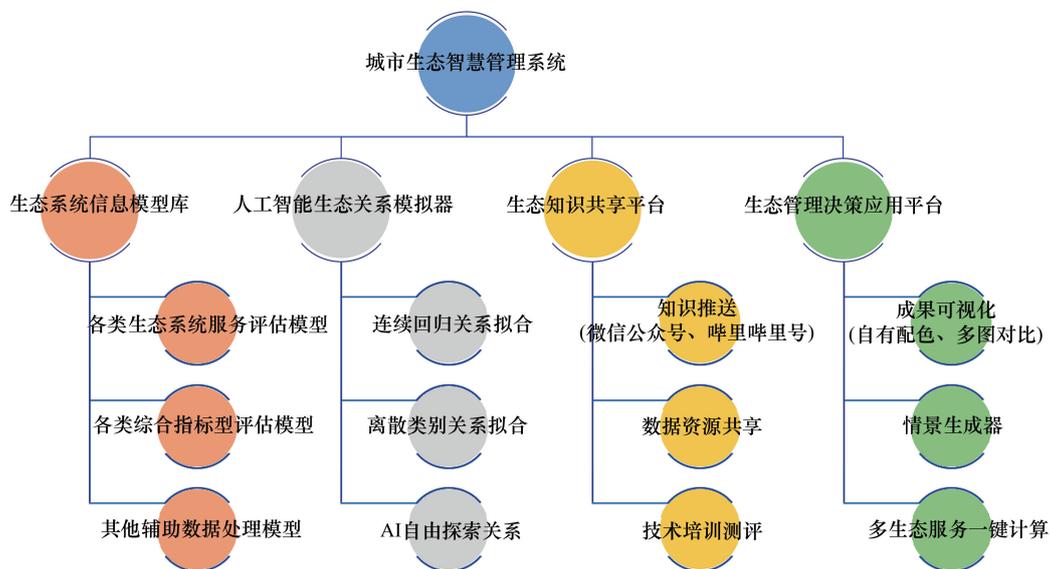


图 1 IUEMS 功能结构图

Fig.1 Functions of IUEMS

1.3 IUEMS 的操作特点

IUEMS 旨在降低生态系统评估的使用门槛,让更多的人能够了解生态系统服务和生态系统状况,应用生态系统评估结果,为了兼顾不同群体在不同场景的使用需求,IUEMS 的操作形成了以下特征。

(1)基于网盘数据的无人值守计算。为每个用户提供私人网盘空间,通过网盘中转个人电脑输入数据和平台计算结果数据。避免了高频数据的重复上传(如基本每个生态服务评估均会用到的生态系统分类图数据),可关闭本地计算机进行云端无人值守计算。

(2)计算过程的步骤化。IUEMS 中每个生态评估模型按照技术路线的主要步骤,进行逐步输入输出。有利于使用者明白评估模型的科学逻辑,同时,可以下载各步骤的中间结果,便于对结果开展溯源分析。

(3)计算数据的空间可视化。IUEMS 的所有计算过程中,其输入地理信息数据和输出(计算结果)的地理信息数据都可以即时的在操作页面显示,方便用户对数据的加载状态和数据可靠性做出基本判断(见图 2)。

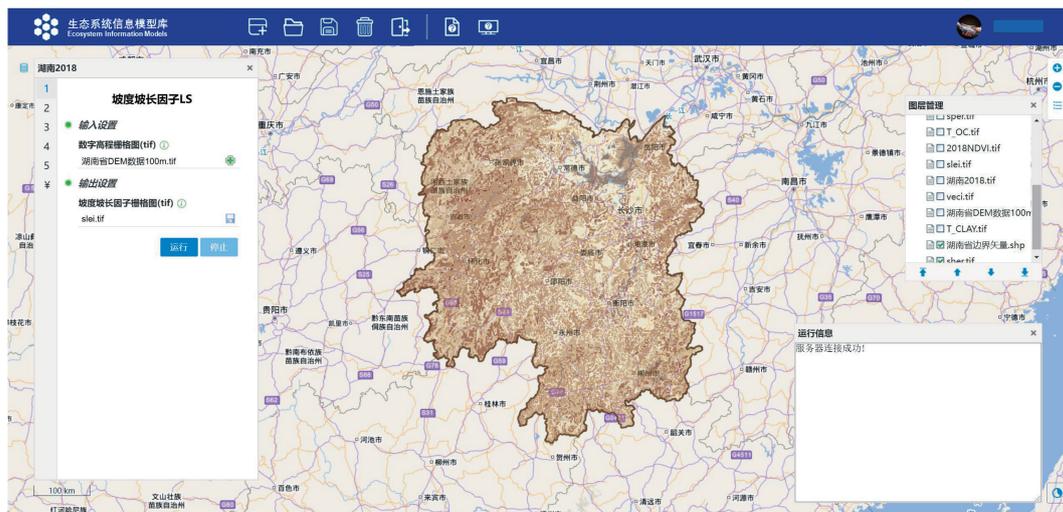


图 2 IUEMS 项目计算功能界面

Fig.2 User interface of IUEMS

(4)尽可能降低操作门槛。一是数据录入和输出均有提示信息,提示要点和单位;为每个模型均配技术文档和操作视频。二是在网盘提供样例数据和共享调用数据。三是“敏捷计算”功能可实现任意多个生态评估模型的“一次性输入输出”。四是提供数据预处理工具和出图工具,减少使用过程中的软件转换。

2 IUEMS 与当前主流生态服务评估软件的对比

由于各软件平台均有各自有不同的拓展功能场景,本文仅以共性的生态服务评估功能为对比的领域,选取 InVEST(3.9.0)、ARIES(0.11.0.281)、SoIve(ArcGIS 插件 3.0)、i-Tree ECO(6.0.23)与 IUEMS 的 EIM 功能(2021 年 10 月 31 日版)进行对比,主要考虑①操作逻辑,②已有生态系统服务模型,③模型输入数据的可获得性,④结果的空间精度,以及⑤操作界面友好度五个方面。以下仅说明各自特点,不做判断优劣。

2.1 在操作逻辑上的异同

InVEST、SoIve,以及 ARIES 的本地部分都是安装程序在本地计算机进行计算,其中 SoIve 是以插件形式基于 ArcGIS 或 QGIS 软件进行计算,ARIES 本地部分需要联网确认账号才能计算,ARIES 在线平台也需要在本地启动客户端进行账号确认才能使用。而 i-Tree ECO 的本地客户端仅用于上传数据和校验数据,以及读取计算结果文件,计算功能完全在云端。IUEMS 则无任何本地安装需求,在网上平台上传数据后,即可云计算,计算完成后可下载数据至本地。

i-Tree 控制云算力分配的方法为用户任务排队,即用户提交数据后即算发起计算任务,但需在后台排队

依次完成,完成需要等待时间不定;而 IUEMS 控制云算力的方法是以“天”为单位提前预约使用,每人可同时申请 10 天占用,预约后可直接使用,当天总预约使用人数满额后,只能通过邮件申请特殊使用。

此外,相较其他四个软件,IUEMS 按照主要计算步骤对计算过程进行逐步分解,使用户能够获取中间过程文件,便于结果分析。

2.2 在评估模型上的异同

五款软件对比版本中,InVEST 有生态系统服务相关模型 22 个,IUEMS 有相关模型 22 个,ARIES 有相关模型 8 个,SolVE 有相关模型 12 个。其中 SolVE 模型多以社会价值为主(文化服务价值类),并且模型分析结果为研究区内的相对价值分布,其数学模型基础均是基于最大熵模型;而其他四款软件的生态系统服务模型以调节服务为主,且多为生物物理过程模型,少部分为回归拟合模型。其中 i-Tree 模型主要是分析植被的生态系统服务,相对其他模型而言,分析模型更为微观,生物物理过程特征更详细。同时,IUEMS 中的大多数调节服务模型均与中国行业或地方标准中的模型保持一致^[30-33]。

本文对各软件生态系统服务名称的翻译为直译,并未刻意统一。这是因为对于相似名称的生态系统服务,各软件的数学模型所表达的生物物理过程基本一致,但是在产出结果数据时角度不同,如 InVEST 中的产水模型中的“基流”对应的是 IUEMS 中的水源涵养服务。由于这种不完全一一对应的情况比较普遍,所以本文不再比较五款软件各服务数学模型间的区别,只在下文对比 InVEST 和 IUEMS 的模型对应关系。

2.3 在数据取得方式上的异同

SolVE 为完全基于用户自有本地化调查数据计算,并需要用户将调查结果进行数字化,无共享数据库。ARIES 的网络功能部分则仅需要用户指定研究区域和时间范围,其网络平台基于软件方自有数据直接完成计算(或对已有成果的分区分区统计);其本地客户端需要用户自备数据。i-Tree ECO 的计算数据主要基于软件方组织的共享数据,用户可以共享数据以满足数据不足地区(无论时间还是空间,中国地区数据均相对匮乏)的计算需要,用户需提供的数据多为本地化的气象数据和精细植被特征数据。

InVEST 无共享数据库,数据部分为美国相关行业的公开专业数据(如季节性产水模型中的土壤水文分组数据、径流曲线数据),其他需输入的地信数据多为 NASA 和其他欧美遥感产品平台可免费提供的遥感产品(如美国航天局提供的植被地表蒸散量数据、地物覆盖数据),但是也存在大量需要主观判断的半定性和定性经验参数(如城市降温模型中的绿地的最大降温距离参数),以及中国地区难获取的外国社交平台大数据(休闲娱乐模型中的访客数量是基于图片共享网站 Flickr 的图片地理标记数据)。IUEMS 有共享数据库,用户可以在平台直接调用,同时,用户需要录入的数据均为在中国地区可以获取的数据,输入数据的格式也均为中国科研机构和政府部门使用的常见格式。

2.4 在结果空间精度上的异同

InVEST、IUEMS 的数据空间精度均取决于用户输入数据的空间精度,简而言之会向空间分辨率最高的输入计算数据靠齐;而 ARIES 网络功能部分的名义分辨率由用户输入(用于根据实际分辨率重采样),实际分辨率则由后天原始数据的分辨率决定(普遍弱于 250m 和 500m),本地客户端的分辨率可以人工调整;i-Tree ECO 所提供的报告主要为研究区内的总结(多为柱状图),因而不涉及到空间分辨率,其空间精度取决于原始调查数据的详细程度。SolVE 的结果数据空间分辨率为用户自定义的空间插值分辨率。

2.5 在操作界面友好度上的异同

五款软件的操作界面均较为友好,且都有输入提示信息,但 ARIES 的本地客户端计算生态系统服务时,需额外撰写代码编程。InVEST、ARIES、SolVE 和 IUEMS 均有计算进度提示,但 i-Tree ECO 仅在计算完成后邮件通知结果。InVEST 的地信结果无可可视化显示页面,ARIES、IUEMS 可在平台内展示,SolVE 通过依托的地信软件展示,i-Tree ECO 基本无地图展示。ARIES、i-Tree ECO、SolVE 提供计算结果的报告,InVEST、IUEMS 则不提供自动报告。此外,IUEMS 的实操帮助更为详细,在每个模型计算界面均提供视频操作链接和技术说明文档。以上内容见表 1。

表 1 IUEMS 与主流生态系统服务评估软件比较

Table 1 Comparison among IUEMS and other 4 widely used ecosystem service assessment software

软件名 Name	InVEST (3.9.0)	ARIES (0.11.0.281)	Solve (ArcGIS 插件 3.0)	i-Tree ECO (6.0.23)	IUEMS (20211003)
操作逻辑 Operation method	下载后在本地整体安装,不能选择各 别模型安装;每个模型都是独立的人 口;在本地调用存储数据。	网站平台用户只需要输入时间和计 算范围,不用上传计算用数据,只需 等待和下载计算结果,不提供中间过 程数据。本地客户端可以通过编程 和调用本地数据计算生态系统服务。	通过在 ArcGIS 或 QGIS 上安装 Solve,结合插件内嵌的 Maxent 模型 实现本地计算;用户选择所需模型, 计算完成后生成对应结果。	通过本地客户端上传植被数据和检 测数据完整性;对于无环境背景数据 的地区,需要将环境背景数据通过网 站上传至公共数据平台。在云端非 队计算,完成后邮件返回计算结果, 不提供过程数据;通过本地客户端查 看报告。	注册后在线使用;数据上传至网盘读取存 储;计算完成后下载数据至本地;计算中可 关闭本地计算机
已有模型 Ecosystem model	作物生产、授粉、水产养殖、渔业、渔 业栖息地情景分析、水产水量、季节 性产水、固碳、海岸蓝色碳、森林碳边 缘效应、城市降温、城市内涝风险削 减、泥沙迁移、营养物质迁移、波浪能 生产、风能、生境质量、生境风险评 估、景观质量、海岸带脆弱性、生物多 样性指数、休闲娱乐。	固碳服务、授粉、洪涝调蓄、户外游 憩、减少泥沙淤积、物质供给、水源涵 养、火灾分析。	只评估社会服务价值,所有服务价值 均为相对价值,且都是基于最大熵模 型计算。社会价值服务;审美价值、 生物多样性、文化价值、经济价值、未 来价值、历史价值、内在价值、学习价 值、生命维持、娱乐价值、精神价值、 疗养价值。	以下仅考虑植被发挥的作用: 食物供给、固碳释氧、空气净化、降低 建筑能耗、削减径流、水质、降低紫外 线强度、野生动物栖息地、潜在虫害 影响、挥发性有机物产生。	物质供给、水源涵养、气候调节、缓解城市热 岛效应、固碳释氧(NPP)、固碳释氧(生物 量)、固碳释氧(固碳速率)、减少泥沙淤积 (土壤保持)、面源污染控制(径流)、面源污 染控制(水土流失)、噪声削减、空气净化、 海岸带防护、水体自净、洪涝削减、防风固 沙、空气健康、地产品观溢价、酒店景观溢 价、文化旅游、动物生境、病虫害防治
数据获取 Data requires	基于美国相关行业公开的专业数据, 全网可免费获取数据及网络抓取大 数据;提供样例数据。	网站平台均为公共数据,不需要额外 上传数据。本地客户端需用户根据 计算内容自己提供数据,数据主要为 全网可免费获取的数据。	完全基于用户自有数据,用户需进行 本地化的调查问卷,且需要受访者以 文字表达地理信息,再由用户进行数 字化。	基于全网用户共享的公共数据,中国 数据有限且更新慢;用户自己提供的 数据主要是需要实地调查的植被数 据;用户更新公共环境背景数据需要 后台审核;提供样例数据。	基于全网可免费获取数据、中国政府各部门 可提供数据,以及在中国开展的调查问卷 和抓取的大数据;提供样例数据,以及提供 共享数据
空间精度 Spatial accuracy	取决于用户输入数据的空间精度,结 果数据会向空间分辨率最高的输入 数据看齐。	网站平台输出结果的名义空间分辨 率根据计算范围大小调整,但实际分 辨率总体不高(弱于 250m)。本地 客户端的分辨率可以用用户自己设定 或软件自动选择。	用户自定义空间精度。	无空间分辨率区别,不提供地图形式 的结果;按用户提供的植被个体提供 结果数据。	取决于用户输入数据的空间精度,结果数据 会向空间分辨率最高的输入数据看齐
界面友好 User	有提示信息;有计算进度;无地图可 视化界面;无自动报告。	有提示信息;有计算进度;有地图可 视化界面;提供自动报告。	有提示信息;无计算进度(等待完成 邮件);上传公共环境背景数据时地 理信息页面(谷歌)无法在中国打 开;提供自动报告(有直方图,无地 图)。	有提示信息;有计算进度;有地图可视化界 面;无自动报告;每个模型上均有视频教程 和技术说明	

2.6 InVEST 和 IUEMS 在模型上的对应关系

由于 InVEST 和 IUEMS 都是种类更为全面的生态系统服务评估平台,此处将二者的模型对应关系进行梳理(见表 2)。特别说明的是,IUEMS 的模型均以生态系统服务为输出对象,但一些 InVEST 模型并不直接输出生态系统服务评估结果,需要进一步加工才能得到。如 IUEMS 中输出的是海岸带防护服务量,而 InVEST 为脆弱性分级,需进一步分析才能得到防护量。此外,二者即使模型概念能够匹配,所采用的数学模型也不一定完全一致。如 IUEMS 的缓解热岛效应模型为回归模型,而 InVEST 中的城市降温模型为经验参数模型。并且,两个模型平台各存在一些对方没有涉及到的特殊模型。

表 2 IUEMS 与 InVEST 软件的模型对应关系

Table 2 Models comparison between IUEMS and InVEST software

IUEMS 中的模型 Models in IUEMS	InVEST 中对应的模型 Corresponding models in InVEST
径流分析模型 (可以日为时间分辨率)	年产量模型中的年径流量 季节性产水量模型中的季节性径流量
水源涵养模型	年产量模型中的年基流量 季节性产水量模型中的季节性基流量
面源污染控制(径流)模型	营养物质迁移模型(地上部分)
面源污染控制(土壤)模型	营养物质迁移模型(地下部分)
海岸的防护模型	海岸的脆弱性模型
减少泥沙淤积模型	泥沙迁移模型
缓解热岛效应模型	城市降温模型
洪涝削减模型	城市内涝削减模型
动物生境质量模型	生境质量模型
IUEMS 中的特殊模型 Unmatched models in IUEMS	InVEST 中的特殊模型 Unmatched models in InVEST
物质供给、气候调节、固碳释氧(NPP 法,当年量)、固碳释氧(生物量法,当年量)、固碳释氧(固碳速率法,当年量)、噪声削减、空气净化、水体自净、防风固沙、空气健康、地产景观溢价、酒店景观溢价、病虫害防治、文化旅游。	作物生产、授粉、水产养殖、渔业、渔业栖息地情景分析、海岸蓝色碳、森林碳边缘效应、波浪能生产、风能、生境风险评估、景观质量、生物多样性指数、固碳模型(累计碳储量)、休闲娱乐

3 IUEMS 的应用实践

在 IUEMS 开发期间,与来自北京、上海、广州、深圳等多个城市,覆盖高校科研、规划咨询、信息技术、公益组织等多个行业的十余家单位开展了测试合作,平均每个模型工具被运行测试百次以上。

在 IUEMS 上线面向全网投入使用后,稳定的单位和个人在线用户已过千人,已直接服务于北京、广东深圳、浙江丽水、黑龙江齐齐哈尔、云南昆明、云南普洱、辽宁大连、山东平度、重庆城口、重庆广阳岛等各地政府的生态系统服务评估相关工作。

以下结合 IUEMS 在《深圳市陆域生态系统调查评估项目》和《深圳市生态系统生产总值(GEP)评估》中的应用情况,对各类典型应用加以介绍。

3.1 典型生态工程的建设潜力与生态效益评估

利用 IUEMS 平台生态模型库(EIM)功能评估了深圳典型海绵工程(路侧下沉绿地及屋顶绿化)的建设潜力及潜在生态系统服务效益(见图 3)。研究认为在 2018 年降雨和实际径流削减情景下,(1)潜在的路侧下沉绿地建设能够带来径流削减能力提升 10.34%,暴雨期径流削减能力提升 1.86%;(2)在进行充分的屋顶绿化条件下,屋顶绿化能够提供的径流削减量约为当前总削减量的 4.76%,暴雨时期径流削减量为当前总暴雨削减量的 12.70%;(3)充分屋顶绿化情况下,屋顶绿化暴雨径流削减价值为 17.20 亿元/年,同时考虑屋顶绿化的固碳和气候调节三项生态系统服务价值后,该值为 28.28 亿元/年;(4)据此计算,当屋顶绿化工程存续期(考虑年维护成本)大于 8 年时,投入产出平衡;当工程存续期为 20 年时,净收益约为 257.65 亿元。

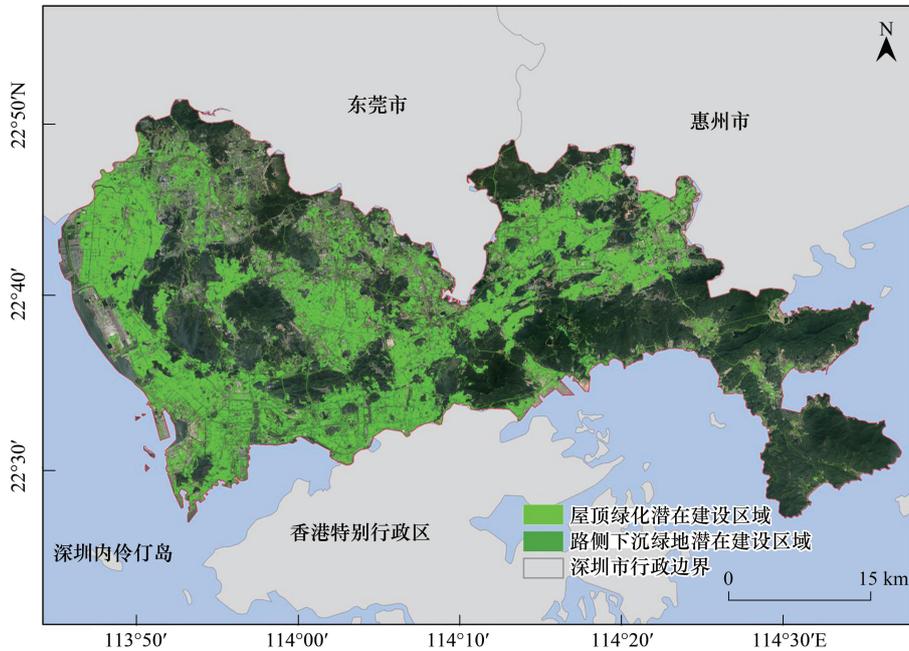


图3 深圳典型海绵工程的建设潜在区域

Fig.3 Potential area for spongy city engineerings

3.2 城市多元生态系统服务及其价值评估

利用 IUEMS 平台生态模型库(EIM)功能,完成了深圳市“十三五”期间各年 13 项生态系统服务及其价值(生态系统生产总值)的空间化评估。评估结果显示:(1)2020 年气候调节服务使深圳当年减少了约 680 亿度降温能耗,相当于全年用电量的 70%;该项生态系统服务价值占 GEP 比最大,为 37%。(2)“十三五”期间,GEP 总体稳步增长,年均增速 2.24%(见图 4);但 2020 年由于疫情对文化旅游产业的影响,使生态文化旅游服务价值出现大幅下降,拖累全年 GEP 增长。(3)深圳生态系统调节服务呈现东高西低的特征,生态系统文化旅游服务呈现西高东低的特征,反映出西部城市片区需要加强城市内部生态基础设施建设,东部郊野片区需要进一步加强的生态文旅设施建设(见图 5)。

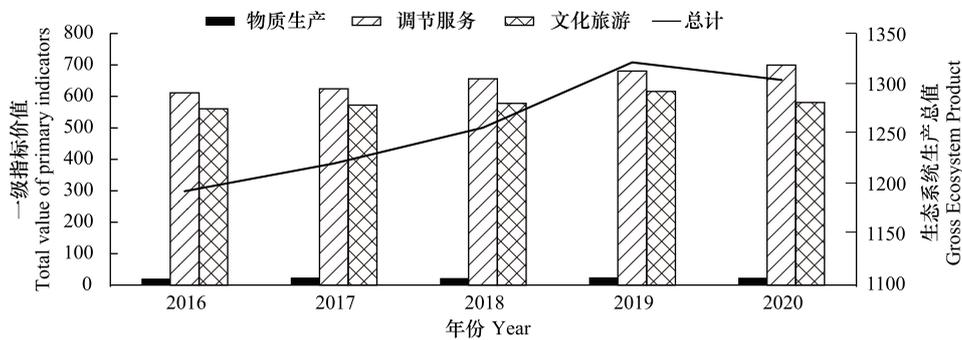


图4 深圳市“十三五”期间生态系统生态总值(GEP)结构与变化/亿元

Fig.4 The changes of GEP at Shenzhen (from 2016 to 2020)

3.3 深圳市重点生态保护区与优先开发区域识别

利用 IUEMS 平台生态管理决策应用功能(EzEco)评估并识别 2020 年深圳市生态系统服务价值占比最大的前五种调节服务类型,分别取其数值从大到小前五分位所分布区域进行交集,得到深圳市重点生态保护区(见图 6),该区域占全市陆域面积 53.04%,区域内提供的 GEP 占全市 GEP 的 87.12%。

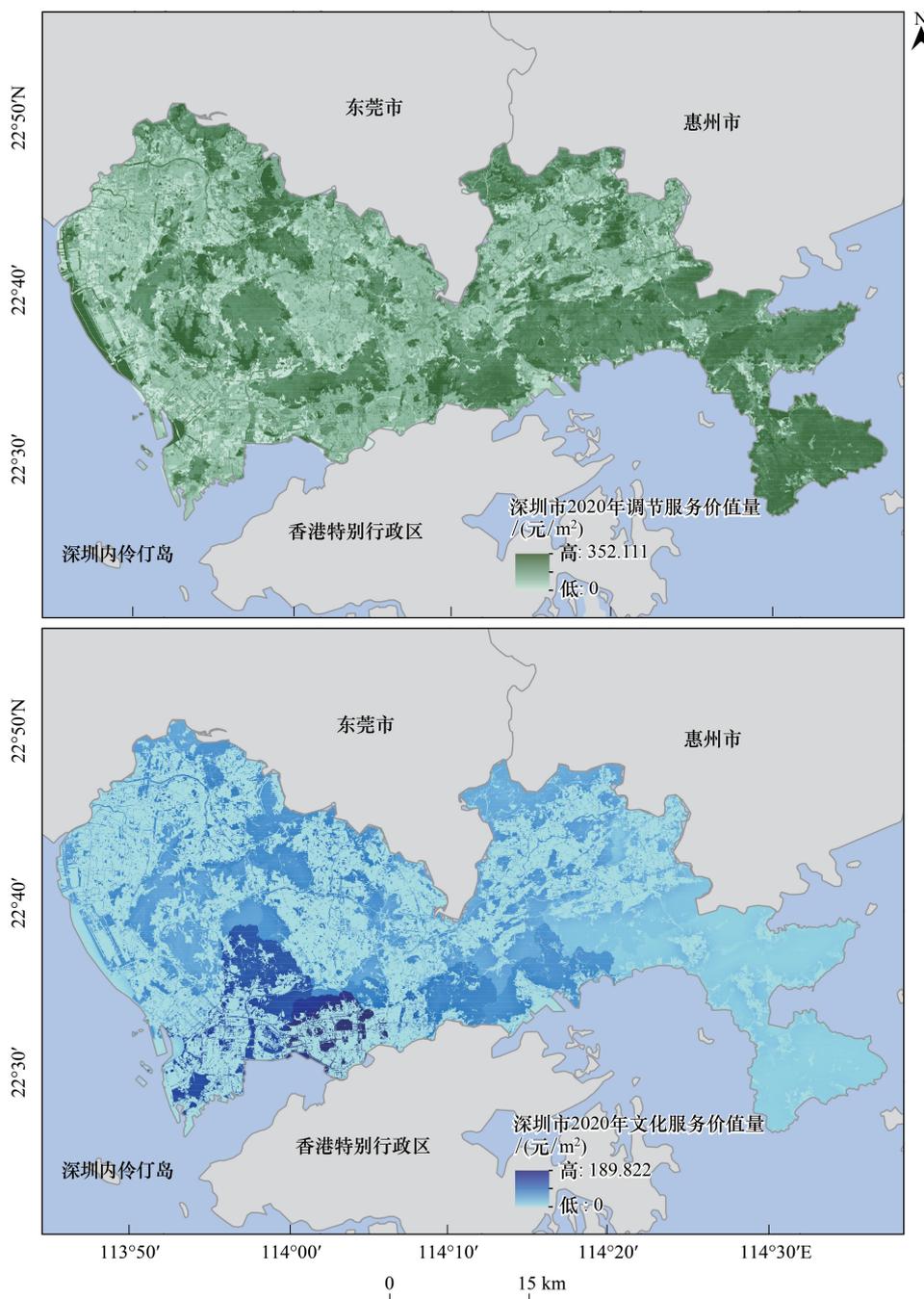


图5 深圳市2020年生态系统服务价值空间分布特征

Fig.5 Distribution of ecosystem service value at Shenzhen (Year 2020)

此外,在经济发展优先情景下(通过 CA-Markov 模拟),通过将 68 km² 的新增建成区域分配至 GEP 低值区域(优先开发区),使全市 GEP 年度损失减少 33.68 亿元。优先开发区面积占全市陆域面积 3.40%(图 7),仅提供了 1.92%的生态服务价值。

4 思考与展望

4.1 生态系统评估软件相较细分学科专业软件的区别

InVEST、ARIES 与 IUEMS 等作为综合性的生态系统服务的评估软件,与 i-Tree(植被领域)、SWAT(水文

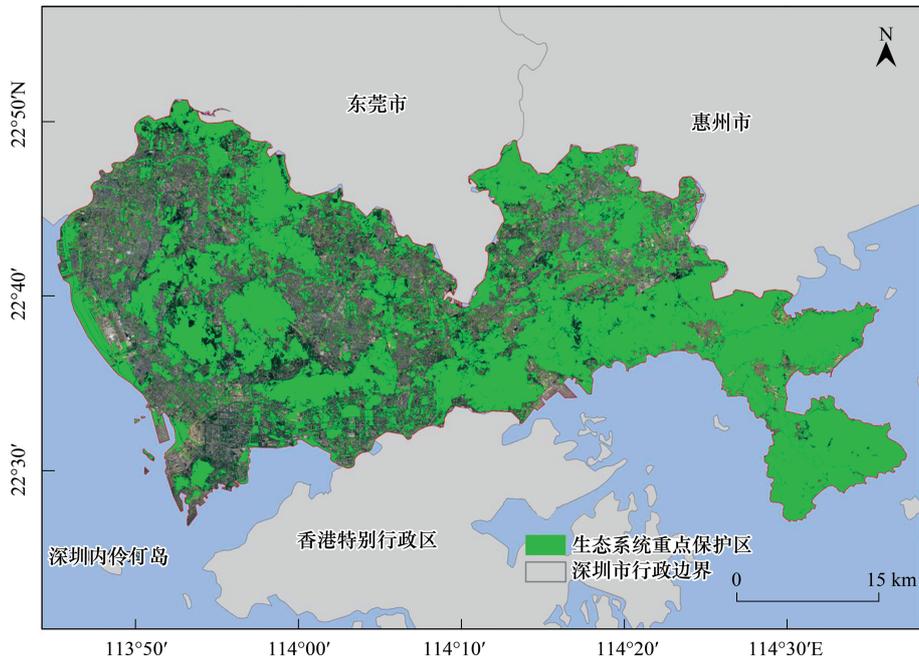


图 6 深圳市生态系统重点保护区识别

Fig.6 Identification of the important ecosystem area at Shenzhen

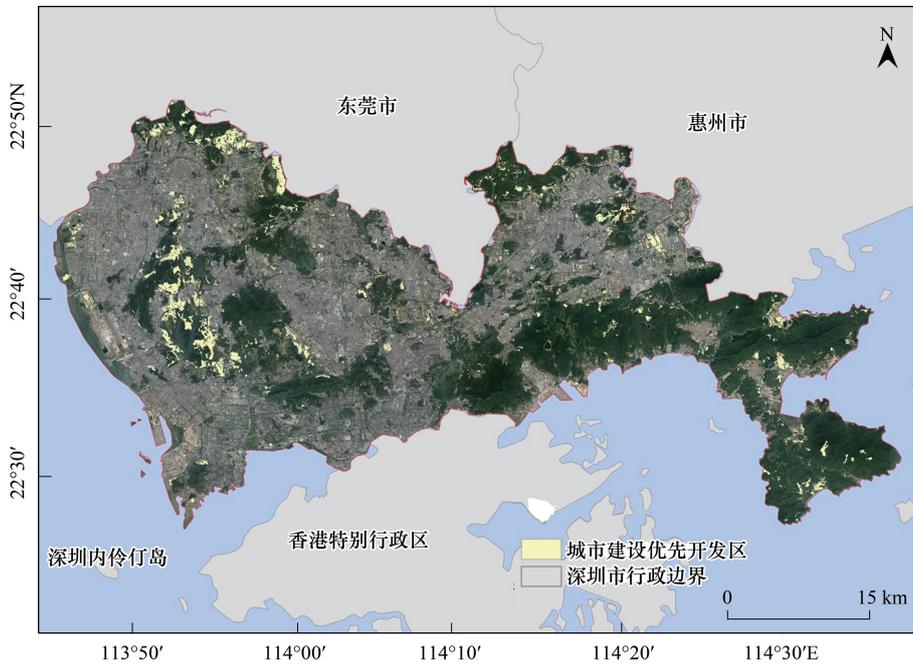


图 7 深圳市城市建设优先开发区识别

Fig.7 Identification of prior developing area at Shenzhen

领域)、CALPUFF(大气领域)等各细化学科的专业软件比较,前者建立在生态系统的各类中宏观过程机理上,后者建立在各学科的中微观机理上,适用用户和情景有明显区别。

前者综合性生态系统评估软件的优势在于①同一软件覆盖的生态系统服务类型多,学习时间成本低;②体现生态系统服务形成的关键过程,简洁易懂,能用于主要特征和问题辨识,便于利益相关方的管理决

策;③对各细分学科领域的数据和专业知识要求不高,使数据资源薄弱的地方和跨领域人士更易使用。

后者各学科细分专业软件的比较优势在于①数据需求更为细致,细分领域的专业知识涉及更多;②由于对该领域的细节刻画丰富,可服务于工程设计和施工。

4.2 当前制约我国生态系统服务评估应用工作的主要困难

在与 IUEMS 用户交流使用情况时发现,当前制约我国生态系统服务评估应用工作的主要困难在于:①相关输入数据难获取,用户既不掌握获取渠道,也无法对数据质量做出判断;②一些国外模型的数据需求,其没有对应的中国区数据基础,如果用全球数据产品则空间分辨率不足;③用户对生态系统服务的形成机理和计算逻辑没有深刻理解,导致“可算,不可解释”;④用户对地理信息及其软件操作的知识掌握不足,不能有效制备数据和分析数据等。

4.3 IUEMS 将不断完善服务我国生态系统评估与应用的能力

(1)进一步降低数据获取门槛。IUEMS 将通过生态知识共享平台分享免费数据获取渠道;共享更多制备好的公共数据供用户直接调用;引入高质量的数据源,满足客户高时空分辨率数据的定制需求;增加更多的数据预处理模块,降低对地信软件的依赖。

(2)进一步加快新模型开发。IUEMS 将进一步加大生态系统服务模型的研发,加大与科研同行的交流,吸收更多具有普适性的中国本地化模型进入到 EIM 体系;加强生态系统的社会服务价值评估模型开发,补齐我国相关工作的短板。

(3)面向其他行业开发易用工具。IUEMS 将面向我国生态产品总值核算需求,扩大 GEP 一键版(GEP pro)服务范围,让更多非生态研究领域人士了解生态产品价值,能够计算生态产品价值;同时,面向我国国土空间规划中生态分析需求,逐步推出具有生态保护红线划定、生态重要性区域识别等功能的生态空间规划套件(EPLAN),让更多城市规划师能够轻松开展生态分析。

(4)探索提供生态系统服务分析产品。IUEMS 也将学习 ARIES、i-Tree 的服务内容,向用户提供一些已经计算完成的生态系统服务产品,鼓励用户分享自己的分析产品。为更多生态系统服务应用人员免除分析过程,使其能够直接获取数据开展应用。

致谢:感谢四年来参与 IUEMS 学术把关、数学模型开发和实践应用的数十位国内外专家和研究生,包括多次为 IUEMS 提供建议的美国斯坦福大学自然资本项目的 InVEST 团队;感谢 IUEMS 软件编程团队及参与测试的数十家合作单位;感谢为 IUEMS 提供应用实践机会的政府部门和机构。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d' Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997,387(6630),253-260.
- [2] Daily G C. *Natures Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. 1997, Washington DC: Island Press.
- [3] Park C Y, Park Y S, Kim H G, Yun S H, Kim C K. Quantifying and mapping cooling services of multiple ecosystems. *Sustainable Cities and Society*,2021,73,103123.
- [4] 张昌顺,谢高地,鲁春霞,刘春兰,李娜,王硕,孙艳芝.北京城市绿地对热岛效应的缓解作用. *资源科学*,2015,37(06):1156-1165.
- [5] Yao L, Chen L, Wei W, Sun R. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015,14(2),300-308.
- [6] 李娜,孟雨婷,王静,俞茜,张念强.低影响开发措施的内涝削减效果研究——以济南市海绵试点区为例. *水利学报*,2018,49(12):1489-1502.
- [7] Piaggio M, Siikamäki J. The value of forest water purification ecosystem services in Costa Rica. *Science of The Total Environment*, 2021,789,147952.
- [8] 赵欣胜,崔雨娟,李伟,康晓明,雷茵茹,马琼芳,孙宝娣,于菁菁.吉林省湿地生态系统水质净化功能分析及其价值评价. *水生态学杂志*,2016,37(01):31-38.

- [9] Biao Z, Wenhua L, Gaodi X, Yu X. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 2010, 69 (7), 1416-1426.
- [10] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37 (07): 2455-2462.
- [11] Chen X, Li F, Li X, Hu Y, Hu P. Evaluating and mapping water supply and demand for sustainable urban ecosystem management in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251, 119754.
- [12] 欧维新, 刘翠, 陶宇. 太湖流域水供给服务供需时空演变分析. *长江流域资源与环境*, 2020, 29 (03): 623-633.
- [13] Teng Y, Zhan J, Liu W, Sun Y, Agyemang, F B, Liang L, Li Z. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2021, 123, 107340.
- [14] 黄麟, 祝萍, 肖桐, 曹巍, 巩国丽. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应. *地理科学*, 2018, 38 (04): 600-609.
- [15] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征. *应用生态学报*, 2015, 26 (09): 2881-2890.
- [16] Lan X, Liu Z, Chen X, Lin K, Cheng L. Trade-off between carbon sequestration and water loss for vegetation greening in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319, 107522.
- [17] 张欣, 尤春赫, 李诗菁, 田美荣, 冯朝阳, 张璐. 生态系统净化空气服务研究进展. *环境工程技术学报*: 1-10 [2021-10-13].
- [18] Song C, Lee W K, Choi HA, Kim J, Jeon S W, Kim J S. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea. *Environmental Science & Policy*, 2016, 63, 27-34.
- [19] Margaritis E, Kang J. Relationship between green space-related morphology and noise pollution. *Ecological Indicators*, 2017, 72, 921-933.
- [20] 陈龙, 谢高地, 盖力强, 裴厦, 张昌顺, 张彪, 肖玉. 道路绿地消减噪声服务功能研究——以北京市为例. *自然资源学报*, 2011, 26 (09): 1526-1534.
- [21] 中华人民共和国生态环境部, 关于印发《全国生态功能区划 (修编版) 》的公告, https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm.
- [22] 中华人民共和国中央人民政府, 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知, http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm.
- [23] 中华人民共和国生态环境部, 关于印发《生态保护红线划定技术指南》的通知, https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm.
- [24] 美国斯坦福大学自然资本项目, <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- [25] 美国佛蒙特大学, <https://aries.integratedmodelling.org/>.
- [26] 美国地质勘探局, 美国科罗拉多州立大学, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20151008>.
- [27] 美国林业局, <https://www.itreetools.org/i-tree-tools-download>.
- [28] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, 2013, 32 (12): 3360-3367.
- [29] 中国首份城市陆域生态调查评估报告发布. <https://m.gmw.cn/baijia/2020-11/12/1301791219.html>.
- [30] 深圳市市场监督管理局, 深圳市地方标准批准发布公告 (总第 50 号), http://amr.sz.gov.cn/xgk/qt/tzgg/content/post_8567911.html.
- [31] 浙江省市场监督管理局, 浙江省市场监管局批准发布《生态系统生产总值 (GEP) 核算技术规范 陆域生态系统》省级地方标准, http://zjamr.zj.gov.cn/art/2020/9/29/art_1229047334_58814039.html.
- [32] 中华人民共和国生态环境部, 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估, https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/202106/t20210615_839011.shtml.
- [33] 抚州市市场监督管理局, 《生态系统生产总值核算技术规范》等三项江西省地方标准正式获批发布, http://fzscj.jxfz.gov.cn/art/2021/7/9/art_5567_3711860.html