

张欣, 尤春赫, 李诗菁, 等. 生态系统净化空气服务研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 232-239.

ZHANG X, YOU C H, LI S J, et al. Research progress of ecosystem air purification service [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 232-239.

生态系统净化空气服务研究进展

张欣¹, 尤春赫¹, 李诗菁², 田美荣³, 冯朝阳³, 张璐^{3*}

1. 河北师范大学地理科学学院, 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 河北省环境演变与生态建设实验室

2. 兰州大学生命科学学院, 草地农业生态系统国家重点实验室

3. 中国环境科学研究院, 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室

摘要 生态系统服务对人类福祉和区域可持续发展具有不可替代性, 净化空气是生态系统服务主要类型之一, 对于人居环境改善和区域生态文明建设具有重要意义。对生态系统净化空气服务及其量化研究成果进行归纳整理, 阐述了生态系统净化空气服务的来源、概念及内涵, 归纳总结了市场理论法和生态模型法估算净化空气服务的优缺点, 梳理了国内外相关研究实践与进展。针对净化空气服务研究理论体系不完善、时空动态研究方法较少、生态系统类型较单一和尺度整合研究成果不足等问题, 提出未来应强化生态系统净化空气服务理论基础针对性, 重视研究方法动态化和精准化, 加强多尺度融合和生态系统类型多样性。

关键词 生态系统服务; 净化空气; 评估方法; 价值评估

中图分类号: X171.4 文章编号: 1674-991X(2022)01-0232-08 doi: 10.12153/j.jssn.1674-991X.20210168

Research progress of ecosystem air purification service

ZHANG Xin¹, YOU Chunhe¹, LI Shijing², TIAN Meirong³, FENG Chaoyang³, ZHANG Lu^{3*}

1. School of Geographical Sciences, Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University

2. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Life Sciences, Lanzhou University

3. State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-processes and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract Ecosystem services are irreplaceable for human well-being and regional sustainable development. Air purification is one of the main types of ecosystem services, which is of great significance to the improvement of human settlement quality and the construction of regional ecological civilization. The ecosystem air purification service and its quantitative research results were reviewed, the source, concept and connotation of the ecosystem air purification service were elaborated, the advantages and disadvantages of the market theory method and the ecological model method for estimating air purification services were summarized, and the research practices and developments related to air purification services at home and abroad was combed. In view of the existing problems, such as the imperfect theoretical system of air purification service research, fewer research methods on temporal and spatial dynamics, relatively single ecosystem types, and insufficient research results on scale integration, it was suggested that the future research should strengthen the pertinence of the theoretical basis of ecosystem air purification services, pay attention to the dynamic and precise research method, and enhance the multi-scale integration and the diversity of ecosystem types, etc.

Key words ecosystem services; air purification; evaluation method; value evaluation

生态系统服务作为连接自然生态系统与人类福祉的桥梁, 已经成为自然、社会与经济等多学科交叉研究的热点。净化空气服务作为生态系统服务的主

要类型之一, 具有维持人类良好大气环境、提升人居环境质量、提高人类福祉等作用, 对其研究进展进行梳理具有重要理论与现实意义。工业革命前, 人类

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0506905)

作者简介: 张欣(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域生态学, 13127083066@163.com

* 责任作者: 张璐(1988—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事城市林业、生态系统服务研究, 837483159@qq.com

生产生活方式对环境影响较小,大气环境质量较好,扩散稀释、雨水冲洗、重力沉降等自然过程能使大气环境得到净化,人们对自然生态系统净化空气服务的认识不充分,意识不到大自然对人类生存的巨大作用。工业革命后,大气环境问题越来越严峻,人们开始关注自然生态系统对人类社会的影响,尤其是认识到自然生态系统对人类生存环境质量改善的重要作用,净化空气服务相关研究越来越受到关注^[1-5]。

国际上,很多全球研究计划或平台涉及生态系统净化空气服务。如联合国全球尺度的“生态系统服务与人类福祉”的千年生态系统评估计划(MA)^[6]、国际地圈生物圈计划(IGBP)的核心项目之一全球大气化学(IGAC)^[7]、生态系统与生物多样性经济学(TEEB)^[8]、联合国环境规划署(UNEP)的生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)等。在上述研究计划或平台进行生态系统服务评估过程中,净化空气服务均是重要指标,国际上不同尺度净化空气服务相关研究成果越来越多。国内学者参考国际上先进理念与方法,对净化空气服务研究进行跟进,如侯元兆等^[9-10]提出净化和调节空气等7种生态系统服务类型。欧阳志云等^[11-13]也将净化空气作为生态系统调节服务开展研究。国内实践研究多侧重自然生态系统净化空气价值评估^[14-21],或对城市绿地或森林生态系统净化空气服务进行估算^[22-28]。当前,国内外净化空气服务研究多包含于生态系统服务评估体系内,专门研究净化空气服务的成果较少。

笔者系统梳理生态系统净化空气服务相关概念及内涵,针对当前净化空气服务价值评估的方法与应用成果进行总结,分析当前净化空气服务研究中存在的问题,提出未来发展方向,有利于完善净化空气服务相关理论与方法,有助于提升人居环境质量与推进区域生态文明建设等实践。

1 概念与内涵

有关生态系统净化空气服务的概念与内涵,不同的学者虽有不同表述,但对基本内涵已达成共识。1970年,关键环境问题研究小组(Study of Critical Environment Problems, SCEP)首次使用“service”,并列出了“environment service”(环境服务),该研究小组首次提出了与净化空气服务相关的生态系统调节大气组成的功能^[29]。1997年Daily^[1]的《自然的服务:社会对自然生态系统的依赖》和Costanza等^[2]的《全球生态系统服务与自然资本价值核算》使生态系统服务成为生态学和经济学

等相关领域的研究热点,Daily^[1]将生态系统服务进行分类,提到空气的净化和废物的去毒和降解功能,同年Constanza等^[2]提出生态系统的环境效益时,论述了生态系统对大气组成的调节作用和废物处理能力。Wallace等^[3-5]按照不同的分类依据,将净化空气服务相关指标划分到不同的生态系统服务分类系统中,MA中将空气质量调节划分到调节服务中,并描述了其对人类福祉的作用以及与其他各类生态系统服务之间的关系^[6]。欧阳志云等^[11-12]参考了国外学者对生态系统服务的定义,认为生态系统服务包括环境净化与有害有毒物质的降解。在生态系统服务分类体系中,被广泛接受和使用的方案是MA的分类体系,该体系将空气净化、气体调节、空气质量调节等统一称为净化空气服务。

当前,国内关于净化空气服务的概念,主要集中在森林、城市绿地生态系统。国家林业局2008年发布并于2020年更新的GB/T 38582—2020《森林生态系统服务功能评估规范》(简称《规范》)^[30]中指出,净化空气服务是指森林生态系统对各种污染物的吸收、吸附、过滤、阻挡以及减少噪声、提供负离子、优化环境等功能。《规范》提出,净化空气服务主要内容包括吸收气体污染物和滞尘,其中吸收的气体污染物包括SO₂、氟化物、氮氧化物,滞尘的污染物包括总悬浮颗粒物、PM₁₀、PM_{2.5}。张三焕等^[31]认为,森林生态系统净化空气服务是指森林植被通过叶片上的气孔进行光合作用,吸收并净化空气中的有毒有害物质的能力。城市绿地生态系统净化空气服务^[22-23]是指植被吸收稀释、分解转化空气中的污染气体,并通过植被光合作用转化为无毒无害有机物,转害为利,从而提高空气质量。王玉芹^[32]认为,城市森林净化空气是指植被通过吸收、吸附、阻滞和过滤等形式,将气体污染物转移到对人类不产生危害的地方。

也有学者针对生态系统给出净化空气服务的概念与内涵。如施晓清等^[33]认为,生态系统净化空气服务就是在生态系统的物质循环和能量流动的过程中,运用物理、化学和生物作用,吸收、处理、转化人类向大气中排放的污染物,使之排放量不超过环境承载阈值,并将生态系统净化空气服务分为吸收CO₂放出O₂、吸收SO₂、净化降尘和飘尘3个指标。康文星^[34]认为,生态系统净化空气服务是指生态系统中的生物群落或种群通过自身新陈代谢、自养或异养方式吸收、吸附、转移大气中的污染物,使之浓度和毒性不断降低直至消失的过程。

笔者认为,生态系统净化空气服务是指各类生

态系统吸收空气中的污染物,降低大气中污染物浓度、调节大气成分、改善大气环境质量等作用。净化空气服务是生态系统服务的重要组成部分,只要各种污染物的排放量在生态系统自我调节能力限度内,生态系统就可以通过自身作用调节并净化大气环境。生态系统净化空气服务的内涵主要是各类生态系统通过吸收、过滤、分解、阻滞大气污染物,从而达到净化空气的效果,其中净化空气效果最好的是绿色植被,其净化空气主要体现在 3 个方面: 1) 吸收 CO₂ 释放 O₂, 维持碳氧平衡; 2) 植被吸收、过滤空气中各类污染物, 净化大气; 3) 通过植物叶片分散、反射、过滤等作用降低各种能量污染, 如放射性污染、噪声污染等。

2 净化空气服务价值评估方法研究

生态系统净化空气服务价值评估的方法大多使用价值量评估法, 主要依据生态学、经济学和社会学

等原理与方法, 从功能量和价值量的角度对生态系统净化空气服务进行价值化评估^[35]。经济学中的市场价值理论是开展净化空气服务价值评估研究的基础。此外, 随着人们对生态系统调节服务重要性认识的加深, 遥感定量监测、模型模拟等技术手段得到发展, 为净化空气服务定量研究方法的进步与完善提供了支撑。本研究主要对市场理论法和生态模型法进行分析, 比较其优缺点, 并介绍通过试验测算生态系统净化空气服务的方法。

2.1 市场理论法

市场理论法是以统计学和市场价值理论为基础开展生态系统服务价值评估的方法, 是使用较早的传统评估方法, 也是目前所有生态系统服务价值的定价基础^[35]。目前常用的市场理论法主要分为直接市场估算法和替代市场估算法^[36-38], 其中用来计算生态系统净化空气服务价值的方法主要有市场价值法、影子工程法、替代消费法等(表 1)。

表 1 净化空气服务价值评估方法

Table 1 Evaluation methods for the value of air purification services

方法类型	具体方法	概念	优点	缺点
直接市场估算法	市场价值法 ^[18, 24]	使用市场价格充当货币价值的一种近似值指标, 估计净化空气服务价值, 以其在交易和转让中形成的价格估算	明确反映个人消费者偏好和真实支付意愿, 结果较为客观	供应水平难以衡量, 忽略间接效益, 难以准确计算净化空气服务新增价值量
替代市场估算法	影子工程法 ^[19]	使用技术手段获得净化空气服务以相同效用所需的生产费用为依据, 间接地估算价值量, 我国学者使用较多	将不可量化的问题转化为可量化的问题, 简化了估价过程	影子工程法只是对净化空气服务的近似代替, 评估结果存在一定的偏差
	替代消费法 ^[15]	根据现有的可用替代品的成本估计净化空气服务的经济价值	可以根据替代品成本评价不具有市场性的服务	净化空气服务可替代的产品少, 准确计量难度大

2.2 生态模型法

21 世纪初期, 国外学者研发出大量生态系统模型, 其主要基于生态系统组成、结构与过程原理, 体现生态系统服务的复杂性和分布不均匀性, 实现评估动态化、精确化。由于生态模型种类丰富、数据获取方便、操作简单、评估精度较高, 不仅可以评估生态系统服务效益, 还可以定量测算各类生态系统净化空气的物质量, 进而成为生态系统服务评估的主流方法之一。

国内外对不同类型生态系统净化空气服务的物质量和价值量研究, 主要有城市绿地(CITYgreen)模型和 i-Tree 模型测算法。CITYgreen 模型包括净化空气模型和固碳释氧模型 2 个模块, 其中净化空气服务主要表现在吸收、过滤、分解和阻滞大气中的污染物量, 污染物类型包括二氧化硫、一氧化氮、一氧化碳、臭氧等, 首先计算植物对大气污染物的年消

减量, 再根据净化不同污染物需要的成本, 测算相应的净化空气服务价值量^[39]。该模型操作简单, 考虑了树冠的覆盖面积、大气污染物浓度和污染物沉积速率等多种因素, 需要使用高分辨率的航片, 研究结果的数字化精度较高。i-Tree 模型主要包括城市森林生态价值评估(UFORE)和行道树管理分析(STRATUM)2 个模块, 该模型作为将城市生态效益以货币形式呈现的评价模型, 量化的景观绩效主要为城市森林对固碳和空气质量的影响^[40], 该模型使用时要采集精确的样地数据, 获得基本的树种、树高、树冠等数据, 然后结合研究区具体的环境条件估算其净化空气的价值。这些生态模型克服了早期生态统计学方法中以点代面的不足, 使得净化空气服务评估结果能够在空间上展示出来, i-Tree 模型比 CITYgreen 模型研究的树种类型更丰富, 评估结果准确性更高。但上述生态模型都有一定的适用范围和

局限性。CITYgreen 模型适用于城市绿地及大型公园的规划管理与生态效益分析,该模型只是简单考虑树冠、树高等因素,不能针对不同树种设定参数;i-Tree 模型适用范围较 CITYgreen 模型广,然而数据库中的树种类别不全面,在使用 STRATUM 模块处

理数据时需要传送到美国林业局进行长时间的的分析。此外,这 2 个模型的内置数据(包括气象数据和空气污染浓度数据等)的选取和参数的设定主要适用于美国地区,因此具有一定的地域性,在使用模型时将会产生一定的误差(表 2)。

表 2 净化空气服务价值评估生态模型比较

Table 2 Comparison of ecological models for evaluating the value of air purification services

模型名称	研发机构	用途	所需数据	模型优缺点
CITYgreen ^[39, 41-42]	美国林业局	城市绿色空间的规划管理、净化效益计算和动态变化的模拟预测	研究区域不同年份已分类的遥感影像,选择适宜分辨率的航片,土地利用现状矢量图、行政区划划矢量图	优点为基于地理信息系统,用于城市森林结构分析与净化空气效益评价,可视化表达研究结果;缺点为对遥感图像要求比较高,影像要预先分类
i-Tree ^[43-45]	美国林业局	城市和农村林业分析和效益评估工具	样地数据、气象数据、空气污染浓度数据、各树种对空气质量的影响排序数据、大气边界层高度等	优点为可针对不同树种设定具体参数信息,估算物种丰富度和多样性,评估结果准确度高;缺点为分析结果需提交美国林业局审核,比较被动,耗时较久

2.3 其他方法

除以上方法外,研究方法还包括野外调查和试验测算。针对污染物吸收方面,研究人员采用比浊法^[46]、人工熏气试验和现场调查法^[47]等估算大气中的含硫量、氟化氢含量和含氮量,探讨森林和城市绿地对大气污染物的净化作用。在滞尘方面,部分学者采用干洗法、面积-吸收能力法^[18]等估算植被的滞尘效益。在中国,多数学者采用《中国生物多样性国情研究报告》^[48]中单位面积森林对污染物的吸收能力评估净化空气服务价值。自《规范》^[30]出台以来,自然森林、城市森林生态系统净化空气服务价值的评估主要采用以下方法:首先,利用森林资源各类调查数据测算净化空气的物质量;其次,采用分布式测算方法^[27]以及 2.1 节中相关方法,将净化空气的物质量价值化;最后,综合评估净化空气总价值。评估过程中所涉及的各项指标及评价参数参考《规范》进行取值。

3 净化空气服务实践应用研究进展

3.1 国外实践应用研究

随着信息技术的发展与创新,国外相继研发了多种评估生态系统服务的生态模型,美国芝加哥、休斯顿、亚特兰大等多个城市利用 CITYgreen 模型对生态系统净化空气服务净化空气模块进行生态效益分析^[49]。Brack^[50]运用模型法评价了澳大利亚城市森林消除污染物,降低温度及固碳的能力。Solecki^[51]使用 CITYgreen 模型探讨城市绿地与热岛效应的关系,认为城市植被能够吸收、过滤大气污染物和缓解热岛效应。Nowak 等^[52]收集美国数十个城市每个小

时气温、降水和污染气体浓度数据,利用 i-Tree 模型中的 UFORE 模块估算和分析其净化空气的价值。智利政府为治理城市空气污染,提出通过城市森林吸收各类大气污染物以降低污染物的排放量^[53]。Currie 等^[54]也使用 UFORE 模块对绿色植物和绿色屋顶净化空气的能力进行定量评估。Song 等^[55]将人口密度作为评估韩国森林生态系统净化空气服务价值的主要因素,并模拟其在污染物浓度和人口密度方面的差异。Zouli 等^[56]研究监测雅典国家公园城市绿地对于改善城市小气候、降低城市热岛的作用。此后, Dunn-Johnston 等^[57-58]利用 i-Tree 模型研究城市森林对大气污染物的净化作用,主要包括生物源挥发性有机物排放量、植被清除大气中臭氧、二氧化氮和可吸入颗粒物的速率等。Jayasooriya 等^[59]利用 i-Tree Eco 模型净化空气模块研究 6 种不同绿色基础设施对大气污染物的吸收能力,结果发现街道绿化植被对大气污染物的吸收能力强于绿色屋顶和绿色墙面。

国际上对于生态系统净化空气服务及其价值化研究已经取得一定的进展,不同的学者针对不同尺度不同生态系统类型净化空气服务研究做出了论述,为决策者提供政策支持。但相关研究成果多采用市场理论法或者 CITYgreen 模型、i-Tree 模型等进行评估,研究方法多样性方面不足。

3.2 国内实践应用进展

中国对于生态系统服务及其价值化研究起步略晚,起始于 20 世纪 80 年代初。生态系统净化空气服务研究主要集中在森林和城市绿地生态系统。侯元兆等^[9-10]首次对中国森林资源净化空气服务及其

价值进行了定量估算;欧阳志云等^[11]参照《中国国土资源数据第一卷》指出植被对各种大气污染物的吸收系数和滞尘能力。肖寒等^[14]结合海南建峰岭地区的生态环境及其特征,选用替代消费法对森林生态系统净化空气中吸收气体污染物的能力和滞尘能力进行定量评价。吴钢等^[15]将物质量和价值量方法相结合,动态评估及分析长白山森林生态系统净化空气服务价值。在中国森林生态系统类型划分的基础上,靳芳等^[17]根据《中国生物多样性国情研究报告》中的相关公式,计算森林不同植被净化 SO_2 和滞尘的价值。周月明等^[20-22]分别对天山北坡、广州市森林生态系统净化大气价值进行了评估。李晓阁^[23]选择 2 个城市市区分别作为试验组和对照组,测算 SO_2 、氮氧化物、总悬浮颗粒物 3 种大气污染物的浓度,监测其动态变化,并对城市森林净化、吸附气体污染物的能力进行比较,评估其净化空气的价值。柳云龙等^[24]运用市场价值法计算出上海城市绿地净化空气价值占生态系统服务总价值的比例。张绪良等^[25]利用替代消费法对青岛市 11 年间城市绿地生态系统净化空气服务中的吸收气体污染物和滞尘能力进行研究。近年来,随着遥感技术、全球定位系统、地理信息系统等技术的快速发展,国外学者研发的生态模型在中国得到应用与推广。陈莉等^[39]利用 CITYgreen 模型中的净化空气模块计算深圳市 4 个年份景观生态功能区绿地系统的净化空气服务价值。i-Tree 模型目前运用于青岛^[43]、杭州^[44]等城市的净化空气生态效益评估。马宁等^[43]讨论了在城市生态系统中利用 i-Tree 模型研究净化空气服务的应用前景和存在的问题。

总体而言,我国在生态系统净化空气服务研究方面,相关理论体系和研究方法正在逐步完善,针对不同尺度、不同生态系统类型生态系统净化空气服务实践探索越来越多,研究成果的可靠性逐步提高,为实现生态系统有效管理提供了科学依据。但是相关研究原创性方法和成果较少,多是沿用国外的研究思路或生态模型,对森林和城市绿地之外的生态系统类型重视不足,研究方法和实践均有待深入。

4 相关研究存在的问题

大气污染是现阶段突出的环境问题之一,大气环境质量直接决定着人居环境质量。生态系统净化空气服务研究是生态学、地理学 and 经济学共同关注的热点,研究者对净化空气服务的认识越来越深入,评估方法在不断完善。但由于生态系统自身的复杂性和人类认识的局限性,净化空气服务研究还存在

许多问题亟待解决。

(1)净化空气服务研究理论探索较少,多包含于生态系统服务理论体系内。在过去的 30 年中,对生态系统服务(包括净化空气在内)及其价值研究是相关研究领域最重要和发展最快的方向,国内外对生态系统服务研究成果较多,理论与方法体系正在逐步成熟。但专门针对净化空气服务理论与方法的探索较缺乏,已有研究对生态系统自身的复杂性、净化空气服务价值产生过程掌握不准确,导致研究成果多侧重于净化空气服务的价值核算,缺乏统一的净化空气服务理论体系。

(2)净化空气服务研究方法体系不完善,研究深度不够。主要表现在:1)已有研究多侧重静态评估,缺乏动态评估。生态系统结构与功能的变化导致了生态系统服务的产生与变化。生态系统净化空气服务应具有时空动态变化的特征。然而,过去的研究主要集中在静态评估上,净化空气服务动态研究的成果较少。虽然国内外学者在生态系统服务评估体系中新增了动态因子,一定程度上实现了净化空气服务的动态评估,然而其评估结果可靠性与准确性仍需验证。2)现有研究多直接套用国外模型,与研究区契合度有待完善。随着大数据的发展和生态评估模型的开发,国内学者也开始使用 CITYgreen、i-Tree 等生态模型进行净化空气服务价值估算,但模型使用过程中存在具有地域性、处理范围较窄、操作条件受限、结果准确性和可视性差等不足,评估过度依赖于土地利用和植被分类,对植被每年生长质量重视不足。通过实地监测、试验对比研究净化空气服务物质质量的文献不多,尤其缺乏自主研发的适合我国国情的生态系统净化空气服务评估模型,评估结果的科学性、可比性和应用性需要进一步增强。

(3)研究多集中在森林、城市绿地生态系统,研究尺度比较单一。主要表现在:1)涉及生态系统类型单一。当前,国内外净化空气服务多侧重森林生态系统和城市绿地开展研究,很多研究者直接套用《规范》^[30]中的公式计算净化空气服务,城市绿地相关研究也多是侧重城市森林的净化空气服务物质质量和价值量测算,而针对其他生态系统类型,比如草地、湿地、农田等生态系统的净化空气服务研究成果较少。2)研究时空尺度融合不足。国外净化空气服务研究主要集中在全球和以国家为主的宏观尺度,或城市、流域等中尺度,国内净化空气服务研究主要集中在城市、自然保护区等中小尺度。当前,大尺度净化空气研究与中小尺度相关研究缺少交叉融合,同样生态系统在不同的空间尺度上研究结果不

一致,研究成果的尺度整合需要加强。

5 展望

随着生态系统净化空气服务研究的不断深入,评估方法的模型化、精准化、动态化是主要研究方向,研究技术方法的集成与空间可视化表达也正在加强,相关研究亟需在以下几个方面取得进步。

(1)加强生态系统结构、功能与净化空气服务的关系研究,构建生态系统净化空气服务理论体系。在完善森林、城市绿地生态系统的相关研究基础上,充分理解净化空气服务中物质循环、能量流动过程,逐步明确不同类型生态系统净化空气服务机理或原理,使净化空气服务研究工作理论依据逐步得到强化。

(2)增加净化空气服务动态研究,完善评估方法。第一,加强净化空气服务时空动态变化研究,基于生态系统类型的数量、面积、质量等动态因子,测算生态系统净化空气服务物质质量或价值量的变化。第二,在引进国外先进生态模型的基础上,修正适用范围和技术参数,采用情景分析和动态模型的方法对净化空气服务及其价值变化做出预测与响应。第三,自主研发适合我国国情和特有生态系统类型的净化空气服务价值时空动态模型,在模型中增加多元地球空间参数,如大气 CO₂ 浓度分布、大气污染空间格局等,提高净化空气服务评估结果的准确性。

(3)重视不同类型、不同尺度净化空气服务的整合与关联研究。第一,加强森林、草地、湖泊湿地、荒漠、海洋与农田等不同生态系统,以及不同地域、不同社会发展特征生态系统的净化空气服务研究,全面掌握生态系统与大气环境质量的关系。第二,强化大尺度与中小尺度相关研究的交叉融合,推进研究尺度之间耦合或融合。在总结中小尺度研究经验基础上,开展更大尺度的复合生态系统净化空气服务评估,逐步增强研究成果的适用性。

参考文献

- [1] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [2] COSTANZA R, D'ARGE R, de GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [3] WALLACE K J. Classification of ecosystem services: problems and solutions[J]. *Biological Conservation*, 2007, 139(3/4): 235-246.
- [4] BOYD J, BANZHAF S. What are ecosystem services: the need for standardized environmental accounting units[J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 616-626.
- [5] FISHER B, KERRY T R. Ecosystem services: classification for valuation[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141(5): 1167-1169.
- [6] MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and human well-being: synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [7] IGAC计划大气气溶胶研究进展[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(5): 71-76.
- [8] 杜乐山, 李俊生, 刘高慧, 等. 生态系统与生物多样性经济学(TEEB)研究进展[J]. *生物多样性*, 2016, 24(6): 686-693.
- DU L S, LI J S, LIU G H, et al. Progress in the researches on the economics of ecosystems and biodiversity(TEEB)[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(6): 686-693.
- [9] 侯元兆. 中国森林资源核算研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [10] 孟祥江, 侯元兆. 森林生态系统服务价值核算理论与评估方法研究进展[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(6): 8-12.
- MENG X J, HOU Y Z. Research advance in valuation theory and assessment method of forest ecosystem services[J]. *World Forestry Research*, 2010, 23(6): 8-12.
- [11] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- OUYANG Z Y, WANG R S, ZHAO J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640.
- [12] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 5-9.
- XIE G D, LU C X, CHENG S K. Progress in evaluating the global ecosystem services[J]. *Resources Science*, 2001, 23(6): 5-9.
- [13] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
- FU B J, ZHOU G Y, BAI Y F, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576.
- [14] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探: 以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 481-484.
- XIAO H, OUYANG Z Y, ZHAO J Z, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: a case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 481-484.
- [15] 吴钢, 肖寒, 赵景柱, 等. 长白山森林生态系统服务功能[J]. *中国科学(C辑: 生命科学)*, 2001, 31(5): 471-480.
- [16] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.
- ZHAO T Q, OUYANG Z Y, ZHENG H, et al. Forest ecosystem services and their valuation in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480-491.
- [17] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1531-1536.
- JIN F, LU S W, YU X X, et al. Forest ecosystem service and its evaluation in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,

- 2005, 16(8): 1531-1536.
- [18] 王景升, 李文华, 任青山, 等. 西藏森林生态系统服务价值[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 831-841.
WANG J S, LI W H, REN Q S, et al. The value of Tibet's forest ecosystem services[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 831-841.
- [19] 胡海胜. 庐山自然保护区森林生态系统服务价值评估[J]. *资源科学*, 2007, 29(5): 28-36.
HU H S. Evaluation of the service value of the forest ecosystem in Lushan Mountain Nature Reserve[J]. *Resources Science*, 2007, 29(5): 28-36.
- [20] 周月明. 天山北坡山地森林空气净化功能分析及生态价值评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [21] 赵金龙, 王砾鑫, 韩海荣, 等. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2229-2237.
ZHAO J L, WANG L X, HAN H R, et al. Research advances and trends in forest ecosystem services value evaluation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 2229-2237.
- [22] 李琼. 广州市城市森林生态服务功能研究[D]. 长沙: 中南林学院, 2005.
- [23] 李晓阁. 城市森林净化大气功能分析及评价[D]. 长沙: 中南林学院, 2005.
- [24] 柳云龙, 朱建青, 施振香, 等. 上海城市绿地净化服务功能及其价值评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(5): 28-32.
LIU Y L, ZHU J Q, SHI Z X, et al. Purification services and their value assessment of city green space in Shanghai[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2009, 19(5): 28-32.
- [25] 张绪良, 徐宗军, 张朝晖, 等. 青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值[J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2576-2584.
ZHANG X L, XU Z J, ZHANG Z H, et al. Environment purification service value of urban green space ecosystem in Qingdao City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2576-2584.
- [26] 张文文, 孙宁晓, 韩玉洁. 上海城市森林生态系统净化大气环境功能评估[J]. *中国城市林业*, 2018, 16(4): 17-21.
ZHANG W W, SUN N X, HAN Y J. Assessment of atmospheric purification function of urban forest ecosystem in Shanghai[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2018, 16(4): 17-21.
- [27] 韩玉洁, 孙文, 张文文. 基于分布式测算方法的上海城市森林生态系统服务功能评估[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2019(2): 147-155.
HAN Y J, SUN W, ZHANG W W. Evaluation of ecosystem services for urban forests in Shanghai based on a distribution measurement methodology[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2019(2): 147-155.
- [28] 赵正, 韩锋, 侯一蕾. 基于Meta回归方法的中国城市森林生态系统服务功能价值再评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(1): 64-75.
ZHAO Z, HAN F, HOU Y L. Reevaluation of urban forest ecosystem services function in China: based on meta-regression analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(1): 64-75.
- [29] 刘尧, 张玉钧, 贾倩. 生态系统服务价值评估方法研究[J]. *环境保护*, 2017, 45(6): 64-68.
LIU Y, ZHANG Y J, JIA Q. Study on the methods of ecosystem services valuation[J]. *Environmental Protection*, 2017, 45(6): 64-68.
- [30] 国家林业和草原局. 森林生态系统服务功能评估规范: GB/T 38582—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [31] 张三焕, 赵国柱, 田允哲, 等. 长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究[J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 2001, 27(2): 126-134.
ZHANG S H, ZHAO G Z, TIAN Y Z, et al. Study on value the ecological environment valuation of forestry resource: for case by Hunchun forestry in Changbai Mountain[J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science Edition)*, 2001, 27(2): 126-134.
- [32] 王玉芹. 厦门城市森林生态系统服务功能及价值评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [33] 施晓清, 赵景柱, 吴钢, 等. 生态系统的净化服务及其价值研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 908-912.
SHI X Q, ZHAO J Z, WU G, et al. Purifying service of ecosystem and its value[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 908-912.
- [34] 康文星. 森林生态系统服务功能价值评估方法研究综述[J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(6): 128-131.
KANG W X. Review of evaluation system on the value of forest ecosystems services[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 25(6): 128-131.
- [35] 李丽, 王心源, 骆磊, 等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1233-1245.
LI L, WANG X Y, LUO L, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1233-1245.
- [36] 刘玉龙, 马俊杰, 金学林, 等. 生态系统服务功能价值评估方法综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(1): 88-92.
LIU Y L, MA J J, JIN X L, et al. Summary of assessment methods for valuation of ecosystem service function[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15(1): 88-92.
- [37] 张振明, 刘俊国. 生态系统服务价值研究进展[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1835-1842.
ZHANG Z M, LIU J G. Progress in the valuation of ecosystem services[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 1835-1842.
- [38] 周晨, 李国平. 生态系统服务价值评估方法研究综述: 兼论条件价值法理论进展[J]. *生态经济*, 2018, 34(12): 207-214.
ZHOU C, LI G P. A review of evaluation methods of ecosystem services: also on the theoretical progress of contingent valuation method[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(12): 207-214.
- [39] 陈莉, 李佩武, 李贵才, 等. 应用CITYgreen模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 272-282.
CHEN L, LI P W, LI G C, et al. Application of CITYgreen model in air purification, carbon fixation and oxygen release by greenbelt system of Shenzhen City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 272-282.

- [40] 邱雯婉, 张敏霞, 鲍沁星. i-Tree模型在城市森林景观绩效量化中的应用评析[J]. 浙江林业科技, 2019, 39(5): 106-116.
QIU W W, ZHANG M X, BAO Q X. Evaluation on application of i-Tree model in urban forest quantification[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2019, 39(5): 106-116.
- [41] 郑中霖. 基于CITYgreen模型的城市森林生态效益评价研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2006.
- [42] 李薇. CITYgreen软件在城市绿地生态效益评价中的应用: 以奥林匹克森林公园规划方案为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [43] 马宁, 何兴元, 石险峰, 等. 基于i-Tree模型的城市森林经济效益评估[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 810-817.
MA N, HE X Y, SHI X F, et al. Assessment of urban forest economic benefits based on i-Tree model: research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(4): 810-817.
- [44] 张玉阳, 周春玲, 董运斋, 等. 基于i-Tree模型的青岛市南区行道树组成及生态效益分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1739-1747.
ZHANG Y Y, ZHOU C L, DONG Y Z, et al. Composition and ecological benefits of street trees in Shinan District of Qingdao City, Shandong Province based on i-Tree Model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(7): 1739-1747.
- [45] 刘朋朋. 基于i-Tree模型杭州西湖景区行道树生态效益分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [46] 管东生, 刘秋海, 莫大伦. 广州城市建成区绿地对大气二氧化硫的净化作用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1999, 38(2): 110-114.
GUAN D S, LIU Q H, MO D L. The role of Guangzhou urban vegetation in removing atmospheric sulfur[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1999, 38(2): 110-114.
- [47] 鲁敏, 李英杰. 部分园林植物对大气污染物吸收净化能力的研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(2): 45-49.
LU M, LI Y J. Research on absorption and purgation ability to atmospheric pollutants of some garden plants[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2002, 17(2): 45-49.
- [48] 《中国生物多样性国情研究报告》编写组. 中国生物多样性国情研究报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [49] American Forests. CITYgreen: calculating the value of nature[M]. Washington DC: American Forests, 1999.
- [50] BRACK C L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: S195-S200.
- [51] SOLECKI W D, ROSENZWEIG C, PARSHALL L, et al. Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey[J]. *Environmental Hazards*, 2005, 6(1): 39-49.
- [52] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3/4): 115-123.
- [53] ESCOBEDO F J, WAGNER J E, NOWAK D J, et al. Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(1): 148-157.
- [54] CURRIE B A, BASS B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(4): 409-422.
- [55] SONG C, LEE W K, CHOI H A, et al. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 63: 27-34.
- [56] ZOULIA I, SANTAMOURIS M, DIMOUDI A. Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 156(1/2/3/4): 275-292.
- [57] DUNN-JOHNSTON K A, KREUZWIESER J, HIRABAYASHI S, et al. Isoprene emission factors for subtropical street trees for regional air quality modeling[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 234-243.
- [58] GUIDOLOTI G, SALVIATO M, CALFAPIETRA C. Comparing estimates of EMEP MSC-W and UFORE models in air pollutant reduction by urban trees[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(19): 19541-19550.
- [59] JAYASOORIYA V M, NG A WM, MUTHUKUMARAN S, et al. Green infrastructure practices for improvement of urban air quality[J]. *Urban For Urban Green*, 2017, 21: 34-47. ⊗