研究论文

城市生态系统长期定位观测数据与服务评估的关系*

孙尚伟[1] 孙振凯[2,3,4] 张 群[1] 王 成[2,3,4] 刘颂颂[4,5] 沈德才[4,5] 林若宜[4,5]

1 中国林业科学研究院 北京 100091
2 中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091
3 国家林业和草原局城市森林研究中心 北京 100091
4 广东珠江口城市群森林生态系统国家定位观测研究站 广东东莞 523106
5 东莞市林业科学研究所 广东东莞 523106

摘要：城市生态系统为城市和市民提供的服务功能是城市生态系统国家定位观测研究站（以下简称城市站）观测和研究的重点内容。为强化城市站观测数据的统一性、系统性和可对比性，以及合理利用观测数据评估生态系统服务，文章首先通过梳理国内外城市站的管理和观测研究实践，针对目前城市站数据观测和管理上存在的问题提出对策建议；其次在梳理城市生态系统服务与观测指标关系的基础上，构建基于观测数据的生态系统服务评估框架，以提升观测数据的利用价值，提高城市站的社会服务能力和影响力；最后从提升城市站观测数据质量、丰富观测研究成果类型，以及服务评估框架的可行性提出思考。

关键词：城市站；城市生态系统服务评估；长期定位观测指标；生态服务评估指标；服务评估框架
DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.18.0002

Relationship Between Services Assessment and Long-term Positioning Observation Data of Urban Ecosystem

Sun Shangwei[1] Sun Zhenkai[2,3,4] Zhang Qun[1] Wang Cheng[2,3,4]
Liu Songsong[4,5] Shen Decai[4,5] Lin Ruoyi[4,5]

(1. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Urban Forest Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 4. Guangdong Pearl River Estuary City Cluster Urban Ecosystem National Observation and Research Station, Dongguan 523106, Guangdong, China; 5. Dongguan Institute of Forestry Science, Dongguan 523106, Guangdong, China)

Abstract: China Terrestrial Ecosystem Research Network (CEN) started to construct the urban ecosystem stations in 2016, and 22 urban stations have been approved for construction by 2022. The services provided by urban ecosystems to cities and citizens are one of the key areas of observation and research by urban stations in China Terrestrial Ecosystem Research Network (CEN). In order to enhance the consistence, systematicity and comparability of the observation data from the urban stations and quantify the relationship between observation data and ecosystem services, the paper reviews the management and the observation research/practices of urban stations at home and abroad, summarizes the problems arising in the observation and management of urban station. Then the ecosystem service assessment framework

收稿日期：2024-06-18
* 基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金（CAFYBB2020ZB008）；国家重点研发国合项目（2021YFE0193200）
第一作者：孙尚伟（1986-），男，博士，高级工程师，研究方向为森林培育。E-mail：48601916@qq.com
通信作者：孙振凯（1987-），男，博士，助理研究员，研究方向为城市生物多样性和生态系统功能。E-mail：zksun_caf@caf.ac.cn

based on observation data is constructed centering on the core functions of urban stations and on the basis of the review of the relationship between urban ecosystem services and observation indicators. At the end, countermeasures are proposed for the access to and management of indicator-based observation data from the CEN urban stations.

Keywords: urban station; urban ecosystem service assessment; indicators for long-term positioning observation; indicator for ecosystem service assessment; service assessment framework

长期定位观测研究站有助于揭示生态系统结构功能变化规律、开展生态系统服务评估[1]。2016 年，《国家陆地生态系统定位观测研究网络中长期发展规划（2008—2020 年）修编版》新增城市站[1]。根据《国家陆地生态系统定位观测研究站发展方案（2023—2025 年）》，截至 2022 年城市站已发展到 22 个，计划到 2025 年增加到 34 个。我国城市站规模发展迅速，但其观测和成果产出情况亟需回顾和梳理，以期提升城市站的管理水平和产出效益。

在城市站开展城市生态系统服务评估，有利于实现建站目标和核心职能[2-3]，提升社会服务能力，增强社会显示度。但是与森林、荒漠、湿地等类型生态站相比，城市站还没有发布观测技术规范及服务评估规范[4]，容易造成生态站之间观测对象、范围、样点设置数量的不统一，难以整合利用观测数据评估生态服务。毛齐正等[5]较为系统地梳理了国内外的城市生态系统服务研究进展，并从支持、供给、调节、文化服务等方面汇总了关键的服务及评估指标。受限于数据来源，目前国内城市生态系统服务评估研究与实践在调节、供给服务方面的内容较多，更为重要的文化服务却体现不足。此外，以往的研究更多是以传统森林资源为评估对象，利用不同森林类型单元面积根据模型进行估算，评估结果跟城市生态系统关系不够紧密[6-7]。目前，城市站的观测数据不断积累，为丰富城市生态系统服务评估提供了潜在的数据支撑。但是观测数据如何有效转化为城市生态系统服务，还需要系统的分析。

本文根据城市站观测和管理经验，结合国内外城市站的观测和研究实践，拟针对目前城市站数据观测和管理上存在的不足提出优化建议，以解决城市站观测数据不统一、数据汇交质量不高等问题。围绕城市站的核心职能，以观测数据为对象，拟耦合对应的服务及评估指标，提出基于观测数据的服务评估框架，以提升其利用价值，丰富城市站的成果产出，提高城市站的社会服务能力和影响力。

1　城市站数据观测与管理

1.1　国外进展

1.1.1　数据观测

欧美开展长期定位研究较早[1]。例如美国的长期定位监测网络（Long Term Ecological Research，LTER）自 1980 年成立，现有的 27 个生态站中包括菲尼克斯和明尼阿波利斯 2 个城市站；另外，美国林务局管理的城市站有 5 个，分别在巴尔的摩、纽约、芝加哥、费城和斯普林菲尔德。受经费支持周期影响，明尼阿波利斯站在 2021 年 3 月得到资助加入 LTER，而巴尔的摩站在 2022 年 9 月支持经费到期后退出 LTER。这些城市站没有统一的监测内容和方法[8]。例如，巴尔的摩站注重流域水文的监测，而菲尼克斯站除了对土壤、水文、植被进行监测外，还建立了社会调查网[8]。欧洲长期研究网络（Long-Term Ecosystem Research in Europe，eLTER）于 2003 年启动，在其 500 个站点中仅包含 5 个城市站：芬兰 1 个、法国 2 个、波兰 1 个、斯洛文尼亚 1 个。eLTER 致力于在整个欧洲收集分析生态系统信息，因此需要限定指标、方法和流程以获取可对比的标准数据。基于目标相关性、性价比、操作可行性 3 个原则，eLTER 制定了标准化观测（eLTER Standard Observations，SOs）体系，其包含一套尽量精简的反映地球系统现状和变化趋势的指标。

1.1.2　数据管理与成果

LTER 的目标之一是创造精心设计和保存的数据库。基于可查询、可获取、可操作、可重复利用等原则，LTER 通过多个数据搜索门户分享数据，一些站点也有独立的网站分享数据。根据 LTER 在 2019 年发布的十年总结报告，其主要的

数据库 Environmental Data Initiative 在 2019 年 2 月就能提供 68511 份数据包[9]。1997—2021 年，巴尔的摩站在其网站发布了 1508 条成果记录，包括期刊论文、会议论文、图书、图书章节、研究报告、年度报告、毕业论文，以及汇报材料、新闻文章、网页文章、视频、图片等类型。eLTER 也建立了信息管理系统（Dynamic Ecological Information Management System），因为建立时间较晚，eLTER 的城市站公开数据多以站点信息及气候数据为主。

1.2 国内进展

1.2.1 数据观测

目前在国内有 3 个较为成熟的生态系统观测网络：一是科技部在不同主管部门的野外台站的基础上整合建立的国家生态系统观测研究网络（National Ecosystem Research Network of China，CNERN）；二是中国科学院建立的中国生态系统研究网络（Chinese Ecosystem Research Network，CERN）；三是国家林业和草原局建立的国家陆地生态系统定位观测研究站网（China Terrestrial Ecosystem Research Network，CEN）[10]。CNERN 有 3 个城市群尺度的城市站[1]，CERN 有 1 个北京城市站[8]，CEN 有 22 个城市站（截至 2022 年）。CNERN 较早地制定了农田、森林、草地、荒漠、湿地 5 个生态系统的观测指标及观测规范，但 2024 年最新制定的《国家野外科学观测研究站观测技术规范 第一卷 生态系统与生物多样性》才包括城市生态系统观测内容及方法[11]；CERN 城市站在气象、空气、水、土壤、生物等方面制定了长期监测指标[8]；CEN 在 2019 年制定了城市生态系统定位观测指标体系[12]，但是没有发布观测技术方法。

1.2.2 数据管理与成果

CNERN 数据成果丰富且公开共享方式比较成熟，建立了“国家生态科学数据中心资源共享平台（NESDC）”，依据资源服务方式面向不同注册用户公开。其主要的数据成果类型有论文、专著、咨询报告、专利、软件著作权、标准等。CERN 是 CNERN 的骨干成员，有较多生态站纳入到了 CNERN，数据服务也整合到了 NESDC。CEN 一直以来都较为注重数据观测与信息管理系统建设，2017 年开始通过网络系统汇交数据。据统计，CEN 已累计汇交数据 2155 万条，监测数据支撑编制了《三北防护林体系建设 40 年综合评价报告》[4]《中国陆地生态系统质量定位观测评估研究报告（2020 年）》[13]等重要报告。CEN 尚未建立开放的资源信息网站。CEN 城市站建站较晚，数据和成果积累不足，即使是城市树木种类、城市植被指数等本底数据的汇交率也偏低[14]。

1.3 CEN 城市站观测管理对策

1.3.1 亟需发布统一的观测技术方法

城市站观测指标体系在水土气生观测指标之外，新增了城市森林资源、游憩康养环境等特色观测指标[12]。考虑到城市环境与森林、湿地等自然生态系统的环境不同，森林站、湿地站等已发布的观测技术方法虽具有一定的参考意义，但不完全适用于城市站，需要编制符合城市站需求的观测技术方法。在明确观测指标观测频度、时间节点等要求的基础上，明确观测对象、范围、观测样方样点样线设置等技术要求，提高城市站观测数据的科学性和可对比性。

1.3.2 理清指标观测的空间尺度

根据观测指标的设定目的，城市站观测的空间尺度可以归纳为 3 类：一是全市域尺度，适用于城市森林资源观测指标，反映城市化发展中生态资源整体变化情况；二是观测点尺度，需要根据城市情况进行观测站点布局[1]，共同观测气象、大气环境、游憩康养环境、水文、土壤等方面的观测指标；三是固定样地尺度，其面积不小于 0.6 hm^2[15]，主要用于观测植物群落指标，也可以作为观测点的组成部分。因此，理清观测指标的空间尺度，有利于水土气生等各组分数据在同一尺度耦合分析。

1.3.3 统一指标观测时间、频次

根据城市站观测指标体系标准，观测时间频次可以分为 3 类。一是长周期本底数据，即 5 年、3 年或每年 1 次的指标，比如森林资源、游憩康养环境、土壤、植物群落；二是短周期动态观测数据，即每季度、每月 1 次或发生时观测的指标，比如大气环境（花粉种类按发生季节观测）；三是连续自动观测数据，比如气象观测指标。观测指标时间和频次的统一，有利于合理安排观测工

作，也有利于反映指标时间动态变化的生态学意义。

1.3.4　利用好观测数据管理系统

CEN 的数据管理系统于 2017 年使用，填报观测数据、行政管理类和实物资源类数据。管理系统设定了数据填报员、生态站管理员、审核专家等不同角色，以用于数据的填报和审核。管理系统提高了生态站管理效率和水平，数据资料的积累可以避免人事变动带来的缺失问题。管理系统增加了实物资源与观测数据的联动，只有在实物资源输入了观测点，才能填报对应的观测数据，与本文需理清指标观测空间尺度的观点一致。

2　基于城市站观测数据的服务评估

2.1　城市生态系统服务评估

城市生态系统服务是指人类从中获取的效益[5,16]，通常将城市内部或周边植被与水体等自然生态系统成分作为服务来源[5,16-19]。城市生态系统服务评估，即对生态系统服务进行量化和评价[20,21]，有利于提高城市森林等城市生态系统受到管理部门的重视程度，优化用地方式或者制定基于投入产出效益的政策，以促进城市更加宜居和可持续发展[21]。

常用的服务评估方法主要有 3 种，即指标评估法、价值评估法、模型评估法，其中指标评估法是后两者的基础[5]。选取的服务评估指标需具备可对比性，且简单易懂、适合交流，能够为管理部门、公众等利益相关者所理解[20]。尽管对服务评估指标已有大量研究，但服务评估指标的构建还有很多挑战，比如不同指标因内涵相近，在评估中重复核算；或同一个指标在不同服务里面内涵不同[20]。有学者将服务评估指标分成 2 类，即陈述性指标（state indicators）和性能指标（performance indicators）。陈述性指标描述提供服务的生态系统成分或过程，能够反映提供服务的能力，比如利用乔木覆盖率与密度反映植被的暴风雨抵御能力，利用道路树木反映气候变化应对和缓解服务[22]；性能指标描述在可持续发展模式下能够提供的服务量[23]，反映服务的数量和质量，比如休闲区域的面积、可达性等。

2.2　观测指标与服务评估的关系

城市站围绕城市生态系统的结构、功能和演变规律[1,3]制定了观测指标体系。根据相关学者对服务评估指标分类的研究[23]，观测指标与服务有两种关系，一种是能够描述服务量，如乔木、灌木种类能够表征生物多样性服务中承载物种的数量等；另一种是能够描述提供服务的生态系统成分或过程，如缓冲极端环境服务中能够缓冲热浪的树冠覆盖率和植被指数。后者并不能直接反映人们从生态系统中获取的益处，但是反映了其提供服务的能力[22]。《城市生态系统定位观测指标体系（LY/T 2990-2018）》包含了 7 个一级、33 个二级、130 个三级观测指标。本文针对每一个观测指标，按照服务的定义或者依据研究案例中相同或类似的服务评估指标，确定其能够代表或能够影响的服务（附表 1）。在 130 个三级观测指标中，气压、降水理化性质、总辐射、日照时数等 12 个三级观测指标受生物影响较少且缺乏相关文献资料，没有确定对应的服务；其余 118 个三级观测指标都对应了至少一个服务类型；同样，一个服务类型也能对应多个观测指标（附表 1）。同一个指标在不同的服务类别下，表达的服务内涵不一样，比如树冠覆盖率能够直接表达精神服务中绿色植物的可视数量，也能反映缓冲极端环境服务的能力。

2.3　基于观测数据的服务评估框架

尽管联合国千年生态系统评估将生态系统系列服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务已成为普遍共识[21,24-26]，但也有很多研究根据城市环境和社会经济条件分析特定的城市生态系统服务[17,27-28]，以凸显城市生态系统特色。因此，本文在融合归纳前人研究和实践的基础上，根据观测指标对应的服务建立了两级服务结构（表 1）。一级为 6 个关键且容易理解的服务组，分别为生态安全、生态文化、净化环境、居民健康、气候调节、生物多样；二级为 22 个服务类型，由观测指标对应的服务（附表 1）归纳生成，即将相同含义的服务合并以避免造成重复评估[17]。具体如下：以气候调节为重点，将缓冲极端环境服务中植被对热浪的吸收归纳到气候调节；将缓冲极端环境服务其它部分、排水服务、径流

调节、雨洪缓解、暴风雨抵御能力等合并为雨洪缓解；将土壤质量维持、健康土壤维持、土壤形成和组成、养分迁移等服务合并为土壤质量维持，并将其中重金属及有机污染物指标纳入土壤净化；将空气质量维持服务中的固碳和生产力服务确定为固碳服务；将传粉服务、传粉和种子扩散合并为传粉和种子扩散；将动物景观、自然观察、精神服务、美学服务等重新梳理为植物景观、动物景观、声音景观；将生物多样性服务细分为物种多样性、生境多样性；将臭氧吸收紫外辐射、区域降雨格局的维持、能源生产、氧气浓度等受单个城市生态系统影响小的服务类型删除。在 22 个二级服务里面，保留了与人类栖息地冲突、致敏 2 个负服务。

在确定好服务框架后，将目前城市站观测指标纳入评估指标，最终建立基于城市站观测指标的服务评估框架。其中，确定与服务对应的观测指标主要依据 3 个原则：一是精简同一服务下含义重复的指标，避免重复评估[20]，如不纳入水面蒸发、反射辐射、净辐射、局域热量通量，避免与空气温度重复，不纳入挥发性有机化合物浓度，避免与臭氧及氮氧化物浓度重复；二是删除关注度低、贡献率低的指标，如风向、土壤温湿度；三是突出单个指标的重点服务功能，单个指标对应多个服务时，在贡献率高的服务中保留，如树冠覆盖率只放在了雨洪缓解和植物景观服务中（表 1）。整体上，22 个二级服务均有至少 1 个观测指标用于评价，也有观测指标则对应了多个服务，比如树冠覆盖率、鸟种类等，在不同服务里面其内涵也不同（表 1）。

表 1 基于城市站观测数据的服务评估框架

序号	一级服务	二级服务	观测(评估)指标
1	生态安全服务	雨洪缓解	树冠覆盖率,植被指数(NDVI),下渗量,地表径流量,土壤入渗率
2		传粉和种子扩散	鸟种类、密度,小型哺乳类动物种类、密度,蜂种类、密度,蝴蝶种类、密度
3		生物防治	外来入侵物种数量,病害种类,虫害种类,平均病株密度,平均虫口密度,外来入侵物种种群密度
4		与人类栖息地冲突	鸟种类、密度(对应生物),小型哺乳动物种类、密度(对应生物)
5		固碳	CH_4浓度,植物生长所有指标,森林凋落物量
6		土壤质量维持	土壤颗粒组成,容重,孔隙度(非毛管孔隙度),pH 值,有机质(SOM),全氮,全磷,有效磷,全钾,有效钾,阳离子交换量(CEC),可溶性盐含量,水解氮,亚硝态氮(NO_2^-),微生物量碳、量氮,有机覆盖物覆盖厚度、覆盖量、N、P、K 养分含量
7	生态文化服务	历史纪念服务	古树数量,名木数量
8		植物景观	树冠覆盖率,观花植物,观果植物,彩叶植物,叶面积指数,乔灌木物候特征
9		动物景观	鸟种类、密度,小型哺乳类动物种类、密度,湿地两栖动物种类、密度,蜂种类、密度,蝴蝶种类、密度,蜻蜓种类、密度
10		声音景观	声强(自然声)
11	净化环境服务	空气净化	TSP、$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度,NO_X(NO、N_2O、NO_2)浓度,SO_2浓度,O_3浓度,CO 浓度,空气微生物浓度
12		土壤净化	重金属元素,土壤苯并[a]芘,土壤多环芳烃(PAH)
13		水体净化	河、湖、沼泽等湿地水的化学性质、生物性质所有指标
14	居民健康服务	降噪	声强(噪声)
15		紫外线防护	紫外辐射(UVA/UVB)
16		致敏	花粉,浓度,飞毛飞絮
17		空气质量维持	负氧离子、空气芬多精
18	气候调节服务	温度调节	空气温度
19		湿度调节	空气相对湿度
20		风速调节	风速
21	生物多样服务	物种多样性	乔木种类,灌木种类,草本种类,鸟种类、密度,小型哺乳类动物种类、密度,湿地底栖动物种类,湿地两栖动物种类、密度,蜂种类、密度,蝴蝶种类、密度,蜻蜓种类、密度,土壤动物种类(限节肢类动物)
22		生境多样性	森林斑块(每个等级的数量和密度),生态廊道(密度),景观破碎度,景观连接度,景观多样性指数

3 几点思考

3.1 城市站观测数据质量需要提升

城市站目前没有发布统一的观测技术方法，各城市站的观测数据在观测对象、范围、样点设置数量和位置、观测频次等方面很难达到统一。观测指标的空间尺度中，市域和固定样地尺度可以直接确定，但观测点尺度还需要科学系统的观测点位布设[1]，以获取系统、有代表性的数据。观测频次方面，从作者审定城市站汇交的观测数

据经验来看，长周期本底数据汇交率低，短周期和连续自动观测数据观测点数量过少，很多生态站只提交 1 个观测点的数据，汇交的数据很难代表所在城市生态系统结构和功能。因此，即使城市站发布了统一的观测技术方法，在数据汇交方面也要高质量要求，以保障观测数据的代表性。

3.2　城市站观测研究成果类型需要丰富

目前城市站产出以科学研究成果为主，在技术咨询服务及数据共享方面还有待进一步提升。城市站中上海站成果较为突出，其围绕城市站研究申请科研项目，产出了学术论文、专利、标准等科技成果，同时开展了技术培训、科普教育等社会服务，并协助相关部门开展了上海森林生态系统服务价值评估等技术服务，积累了以声音景观数据为主的共享数据。在国外，LTER 生态站共享数据模式较为成熟，而以巴尔的摩为代表的城市站，其研究咨询报告、年度报告、媒体宣传等成果形式，均值得借鉴学习。

3.3　基于观测指标数据的服务评估框架的可行性与不足

本文建立了两级服务结构，并利用城市站观测指标与服务的关系将其作为评估指标构建了服务评估框架。该框架突破了以往城市生态系统服务分组模式，相关服务更容易被感知和理解，评估数据来源于城市站更规范和丰富，具备较高的可行性和应用价值。但是目前的评估框架也有不足之处：一是基于观测指标搭建的服务体系不够全面。例如缺乏关键的游憩服务；不同环境和社会经济条件下的城市对服务的需求不同[29]，建议各个城市根据各自的需求补充增加关键服务的调查或监测。二是有些观测指标评价服务不够直接。例如利用树冠覆盖率、植被指数（NDVI）反映城市生态系统雨洪缓解能力，需要一定的专业知识去理解；空气污染物含量等观测指标表征的是提供清洁空气的服务，而不是净化的物质量。三是利用观测指标评价服务还较为简单初始。例如观测指标中的细根生物量能够反映碳储量，但是其动态变化才能反映地下根系生产力；雨洪缓解、固碳等服务的定量评估都需要估算模型，观测指标可能只是模型中的部分参数，计算最终结果时还需要补充监测其他指标。

参考文献

[1]李世东,王成,孙振凯.我国城市生态系统定位观测研究站的空间布局[J].中国城市林业,2023,21(3):52-59.

[2]国家林业局.国家林业局陆地生态系统定位研究网络中长期发展规划(2008—2020 年)[Z].北京,2018.

[3]李世东,王成,孙振凯.中国城市群生态系统及其定位观测研究站点的科学布局[J].中国城市林业,2023,21(6):63-71.

[4]李世东,孙尚伟,杨振寅,等.国家陆地生态系统定位观测研究站建设进展与发展策略[J].陆地生态系统与保护学报,2023,3(6):68-77.

[5]毛齐正,黄甘霖,邬建国.城市生态系统服务研究综述[J].应用生态学报,2015,26(4):1023-1033.

[6]肖建武.城市森林服务功能分析及价值研究[M].北京:经济科学出版社,2011.

[7]郝瑞军,张桂莲.城市森林生态系统服务价值评估研究:以上海(2013 年度)为例[M].北京:中国林业出版社,2021.

[8]王效科,欧阳志云,任玉芬,等.中美城市生态系统长期监测的内容和方法[J].地球科学进展,2014,29(5):617-623.

[9]GROFFMAN P, BURKEPILE D, DAVIS F, et al. Long Term Ecological Research Network Decadal Review Self Study[EB/OL].(2019-10-04)[2024-06-18].https://lternet.edu/wp-content/uploads/2019/10/LTER_Self_Study_2019-10-04.pdf.

[10]卢康宁,段经华,纪平,等.国内陆地生态系统观测研究网络发展概况[J].温带林业研究,2019,2(3):13-17.

[11]于贵瑞,何洪林,李庆康,等.国家野外科学观测研究站观测技术规范第一卷 生态系统与生物多样性[M].北京:科学出版社,2024.

[12]中国林业科学研究院林业研究所,国家林业和草原局森林研究中心,国家林业和草原局生态定位观测网络中心,等.城市生态系统定位观测指标体系 LY/T 2990—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[13]杨振寅.中国陆地生态系统质量定位观测研究报告 总论 2020[M].北京:中国林业出版社 2021.

[14]国家林业和草原局科学技术司.中国陆地生态系统质量定位观测研究报告-2020-城市生态空间[M].北京:中国林业出版社,2021.

[15]中国林业科学研究院林业研究所,国家林业和草原局城市森林研究中心,国家林业和草原局生态定位观测网络中心,等.城市生态系统定位观测研究站建设技术规范 LY/T 2989—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[16]BOLUND P, HUNHAMMAR S. Ecosystem services in urban areas[J]. Ecological Economics, 1999, 29(2): 293-301.

[17]COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[18]TAN P Y, ZHANG J Y, MASOUDI M, et al. A conceptual framework to untangle the concept of urban ecosystem services[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 200: 103837.

[19]OUYANG X Y,LUO X Y.Models for assessing urban ecosystem services:status and outlooks[J].Sustainability,2022,14(8):4725.

[20]HAASE D,LARONDELLE N,ANDERSSON E,et al.A quantitative review of urbanecosystem service assessments:concepts,models,and implementation[J].Ambio,2014,43(4):413-433.

[21]JIM C Y,CHEN W Y.Ecosystem services and valuation of urban forests in China[J].Cities,2009,26(4):187-194.

[22]RADFORD K G,JAMES P.Changes in the value of ecosystem services along a rural - urban gradient:A case study of Greater Manchester,UK[J].Landscape and Urban Planning,2013,109(1):117-127.

[23]DE GROOT R,FISHER B,CHRISTIE M,et al.Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation[M]//KUMAR P.The economics of ecosystems and biodiversity:Ecological and economic foundations.London:Routledge,2012.

[24]LEEMANS R,DE GROOT R.Millennium ecosystem assessment:ecosystems and human well-being:A framework for assessment[J].Island Press,2003,4(3/4):199-213.

[25]BERGHÖFER A,MADER A,PATRICKSON S,et al.TEEB Manual for cities:ecosystem services in urban management[M].The Economics of Ecosystems and Biodiversity,2011.

[26]GÓMEZ-BAGGETHUN E,GREN Å,BARTON D N,et al.Urban ecosystem services[M]//Urbanization,biodiversity and ecosystem services:Challenges and opportunities.Dordrecht:Springer,2013.

[27]LARONDELLE N,HAASE D.Urban ecosystem services assessment along a rural - urban gradient:a cross-analysis of European cities[J].Ecological Indicators,2013,29:179-190.

[28]BERGLIHN E C,GÓMEZ-BAGGETHUN E.Ecosystem services from urban forests:The case of Oslomarka,Norway[J].Ecosystem Services,2021,51:101358.

[29]GÓMEZ-BAGGETHUN E,BARTON D N.Classifying and valuing ecosystem services for urban planning[J].Ecological Economics,2013,86:235-245.

[30]DOBBS C,ESCOBEDO F J,ZIPPERER W C.A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators[J].Landscape and Urban Planning,2011,99(3/4):196-206.

[31]JENERETTE G D,HARLAN S L,STEFANOV W L,et al.Ecosystem services and urban heat riskscape moderation:water,green spaces,and social inequality in Phoenix,USA[J].Ecological Applications:A Publication of the Ecological Society of America,2011,21(7):2637-2651.

[32]TRATALOS J,FULLER R A,WARREN P H,et al.Urban form,biodiversity potential and ecosystem services[J].Landscape and Urban Planning,2007,83(4):308-317.

[33]BENINDE J,VEITH M,HOCHKIRCH A.Biodiversity in cities needs space:A meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation[J].Ecology Letters,2015,18(6):581-592.

[34]PRZEWOŽNA P,MĄCZKA K,MIELEWCZYK M,et al.Ranking ecosystem services delivered by trees in urban and rural areas[J].Ambio,2022,51(9):2043-2057.

[35]SONG D,ZHANG X,ZHOU X,et al.Influences of wind direction on the cooling effects of mountain vegetation in urban area[J].Building and Environment,2022,209:108663.

[36]CHEN H,HUANG J J,LI H,et al.Revealing the response of urban heat island effect to water body evaporation from main urban and suburb areas[J].Journal of Hydrology,2023,623:129687.

[37]SHAHFAHAD,ALI BINDAJAM A,NAIKOO M W,et al.Response of soil moisture and vegetation conditions in seasonal variation of land surface temperature and surface urban heat island intensity in sub-tropical semi-arid cities[J].Theoretical and Applied Climatology,2023,153(1):367-395.

[38]BROWN T C,BERGSTROM J C,LOOMIS J B.Defining,valuing,and providing ecosystem services[J].Natural Resources Journal,2007,47(2):331-376.

[39]GAPSKI N H,MARINOSKI D L,MELO A P,et al.Impact of urban surfaces' solar reflectance on air temperature and radiation flux[J].Sustainable Cities and Society,2023,96:104645.

[40]DE GROOT R S,WILSON M A,BOUMANS R M J.A typology for the classification,description and valuation of ecosystem functions,goods and services[J].Ecological Economics,2002,41(3):393-408.

[41]PUKOWIEC-KURDA K.The urban ecosystem services index as a new indicator for sustainable urban planning and human well-being in cities[J].Ecological Indicators,2022,144:109532.

附表1 城市站观测指标与研究中的服务类型和评估指标对照表

观测指标名称	服务类型(评估指标)
乔木种类	精神服务(植物种类)[23],生物和遗传多样性维持(多样性指数、乡土树种比例)[30]
灌木种类	精神服务(植物种类)[23],生物和遗传多样性维持(多样性指数、乡土树种比例)[30]
树冠覆盖率	精神服务(绿色植物能见度)[23],缓冲极端环境服务(植被带对暴风雨、洪水、海啸等缓冲,植被对热浪的吸收)[29]
植被指数(NDVI)	气候调节(NDVI)[31],缓冲极端环境服务(植被带对暴风雨、洪水、海啸等缓冲,植被对热浪的吸收)[29]
森林斑块(每个等级的数量和密度)	生物多样性[32],缓冲极端环境服务(植被对热浪的吸收)[29]
生态廊道(密度)	生物多样性[33]

附表 1(续)

观测指标名称	服务类型(评估指标)
景观破碎度	生物多样性[33]
景观连接度	生物多样性[33]
景观多样性指数	生物多样性[33]
古树数量	历史纪念服务[34]
名木数量	历史纪念服务[34]
气压	无
风向	温度调节[35]
风速	温度调节[29]
水面蒸发	气候调节(蒸发量)[36]
空气温度	维持适宜气候服务(降温)[30],温度调节服务(单位面积树木覆盖降温度数)[29]
土壤温度	温度调节[37]
空气相对湿度	温度调节[29]
土壤湿度	温度调节[37]
降水量	区域降雨格局的维持[38]
总辐射	无
反射辐射	温度调节[39]
净辐射	温度调节[39]
总紫外辐射	臭氧吸收紫外辐射[40]
日照时数	无
局域热量通量	温度调节[39]
TSP、$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度	灰尘颗粒净化服务(颗粒物净化)[30],空气净化服务(污染物净化量)[29]
NO_X(NO、N_2O、NO_2)浓度	空气质量维持服务(空气污染物净化)[30],空气净化服务(污染物净化量)[29]
SO_2浓度	空气质量维持服务(空气污染物净化)[30],空气净化服务(污染物净化量)[29]
O_3浓度	空气质量维持服务(空气污染物净化)[30],空气净化服务(污染物净化量)[29]
CO 浓度	空气质量维持服务(空气污染物净化)[30],空气净化服务(污染物净化量)[29]
CH_4浓度	气候调节[29]
挥发性有机化合物(VOC)浓度	负服务(降低空气质量)[30],空气质量问题(VOCs 释放)[29]
空气微生物浓度	空气质量维持服务(空气污染物净化)[30],空气净化服务(污染物净化量)[29]
氧气浓度	支持服务[3]、空气流通(氧气供给)[41]
花粉种类	负服务(降低空气质量)[30],过敏负服务(花粉致敏)[29]
花粉浓度	负服务(降低空气质量)[30],过敏负服务(花粉致敏)[29]
飞毛飞絮	负服务(降低空气质量)[30]
负氧离子	空气质量维持服务[30]
空气芬多精	空气质量维持服务[30],生物防治服务[25]
紫外辐射(UVA/UVB)	紫外线防护[38]
声强	降噪服务(无噪音环境,物理降噪)[23]、精神服务(自然声范围)[23],降噪服务(单位植被厚度降低声音呗数)[29]
鸟种类	传粉服务、生物防治服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观[29],自然观察(观鸟)[41]
鸟密度	传粉服务、生物防治服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观[29],自然观察(观鸟)[41]
小型哺乳类动物种类	传粉服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观、与人类栖息地冲突[29],自然观察[41]
小型哺乳类动物密度	传粉服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观、与人类栖息地冲突[29],自然观察[41]
湿地底栖动物种类	动物景观[29],自然观察[41]
湿地两栖动物种类	动物景观[29],生物防治服务[25],自然观察[41]
湿地两栖动物密度	动物景观[29],生物防治服务[25],自然观察[41]
蜂种类	传粉服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观[29],自然观察[41]
蜂密度	传粉服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观[29],自然观察[41]
蝴蝶种类	传粉服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观[29],自然观察[41]
蝴蝶密度	传粉服务[25],传粉和种子扩散服务、动物景观[29],自然观察[41]
蜻蜓种类	动物景观[29],生物防治服务[25],自然观察[41]
蜻蜓密度	动物景观[29],生物防治服务[25],自然观察[41]
种类(限节肢类动物)	生物多样性[30]
观花植物	传粉能力(开花植物多样性)、美学服务[23]
观果植物	精神服务(植物种类)、美学服务[23]
彩叶植物	精神服务(植物种类)、美学服务[23]
下渗量	排水服务[30]
地表径流量	排水服务[30]
可沉降物	无
pH 值(降水)	无
总氮(以 N 计)(降水)	无
总磷(以 P 计)(降水)	无
可溶性磷(PO_4^{3-})(降水)	无
氯化物(Cl^-)(降水)	无
硫酸盐(SO_4^{2-})(降水)	无
硝酸盐(NO_3^-)(降水)	无
亚硝酸盐(NO_2^-)(降水)	无
pH 值(湿地水)	治污服务[29]
总氮(以 N 计)(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]

附表 1(续)

观测指标名称	服务类型(评估指标)
总磷(以 P 计)(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
全钾(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
化学需氧量 COD(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
生化需氧量 BOD(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
溶解氧含量 DO(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
重金属元素(全镉,全铅,全铬,全汞)(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
苯并[a]芘(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
硬度(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
总碱度(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
微量元素(硼、锰、锌、铁、钼、铜等)(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
钾离子(K^+)(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
钠离子(Na^+)(湿地水)	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
大肠杆菌群	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
细菌总数	治污服务[25],治污服务(污染物含量变化及污染水平)[29]
土壤颗粒组成	土壤质量维持[30]
土壤容重	土壤质量维持(土壤容重)[30]
土壤孔隙度(非毛管孔隙度)	土壤质量维持[30]
土壤入渗率	排水服务[30],雨洪缓解服务(土壤入渗能力、未硬化土壤面积比例)[29]
pH 值(土壤)	土壤质量维持(土壤肥力)[30]
土壤有机质(SOM)(土壤)	土壤质量维持(土壤肥力)[30,40]
全氮(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
全磷(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
有效磷(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
全钾(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
有效钾(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
重金属元素(全镉,全铅,全铬,全汞,全铜,全锌)(土壤)	健康土壤维持(重金属)[30,5],治污服务[40]
土壤苯并[a]芘(土壤)	健康土壤维持[30],治污服务[40]
土壤多环芳烃(PAH)(土壤)	健康土壤维持[30],治污服务[40]
阳离子交换量(CEC)(土壤)	土壤质量维持[30,40]
可溶性盐含量(土壤)	健康土壤维持[30,40]
水解氮(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
亚硝态氮(NO_2^-)(土壤)	健康土壤维持(土壤养分)[30,40]
土壤微生物量碳	健康土壤维持[30,40]
土壤微生物量氮	健康土壤维持[30,40]
覆盖厚度	健康土壤维持[30,40]
覆盖量	健康土壤维持[30,40]
N、P、K 养分含量	健康土壤维持[30,40],土壤形成和组成(自然分解)[41],养分迁移[38]
群落乔木密度	暴风雨抵御能力(树木群落结构)[30]
树冠覆盖率	暴风雨抵御能力(树木群落结构)、休闲服务[30],精神服务(绿色植物能见度)[23]
叶面积指数	精神服务(绿色植物能见度)[23],温度调节服务(LAI)、降噪服务(叶面积以及与路的距离)[29]
乔木种类	精神服务(植物种类)[23]、生物和遗传多样性维持(多样性指数、乡土树种比例)[30]
灌木种类	精神服务(植物种类)[23]、生物和遗传多样性维持(多样性指数、乡土树种比例)[30]
草本种类	精神服务(植物种类)[23]、生物和遗传多样性维持(多样性指数)[30]
乔木胸径年生长量	空气质量维持服务(固碳量)、生产力服务(生物量)[30]
乔木高度年生长量	空气质量维持服务(固碳量)、生产力服务(生物量)[30]
灌木地径	空气质量维持服务(固碳量)、生产力服务(生物量)[30]
灌木盖度	空气质量维持服务(固碳量)、生产力服务(生物量)[30]
草本盖度	空气质量维持服务(固碳量)、生产力服务(生物量)[30]
细根生物量	空气质量维持服务(固碳量)、生产力服务(生物量)[30]
乔灌木物候特征	美学服务[23]
凋落物量	生产力服务(生物量)[30]
凋落物化学 C、N、P 总量	健康土壤维持[30],土壤形成和组成(自然分解)[41]
外来入侵物种数量	生物防治服务[25,40]
病害种类	生物防治服务[25,40]
虫害种类	生物防治服务[25,40]
平均病株密度	生物防治服务[25,40]
平均虫口密度	生物防治服务[25,40]
外来入侵物种种群密度	生物防治服务[25,40]

注：括号内是研究案例中服务类型对应的评估指标。