
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

赵正¹ 韩锋² 侯一蕾³¹

(1. 上海师范大学 旅游学院 上海 200234;

2. 中国林业科学研究院 林业科技信息研究所 北京 100091;

3. 北京林业大学 经济管理学院 北京 100083)

【摘要】：在综合国内若干城市生态系统服务功能价值研究实例的基础上, 构建了我国城市森林生态系统服务功能价值转移数据库和相应的 Meta 回归分析模型, 对价值转移评估的影响因素进行了全面探讨, 并对该模型的样本外价值转移的有效性进行了检验。研究结果表明: (1) 我国城市森林生态系统服务功能的平均价值为 5.868 万元/hm²·a, 按照价值高低排序依次为: 涵养水源>固碳释氧>保育土壤>生物多样性保护>净化大气环境>森林游憩>积累营养物质, 且总体呈现出西部地区>东部地区>中部地区的区位分布特征; (2) 城市森林生态系统服务功能的评估方法、类型因素, 城市的区位、人口、经济因素和研究区面积因素都是影响城市森林生态系统服务功能价值变化的主要因素; (3) 所构建的 Meta 价值转移模型的样本外价值转移的平均转移误差为 18.54%, 用于研究样本外价值转移估计的有效性较好。

【关键词】: Meta 分析 城市森林生态系统 价值转移

【中图分类号】: P964 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2021)01-0064-12

当前, 环境污染、生态破坏、资源枯竭等生态环境问题威胁着人类的未来生存和发展, 作为面积最大、生物类别最丰富、结构最复杂、功能最完善的自然生态系统, 森林生态系统在供给自然资源、改善生态环境等方面发挥着重要作用。在我国城镇化发展不断深化、生态文明建设持续推进的背景下, 城市森林生态系统作为现代城市的重要有机组成部分, 在城市生态环境改善和经济社会可持续发展进程中同样扮演着关键性的角色。其中, 城市森林生态系统服务功能是城市森林生态系统在社会、经济及环境等多方面为城市居民提供自然资源、生态产品和服务的能力, 其价值来源于城市森林发挥作用的社会利益和成本, 并且能够通过价值评估的过程以货币化的方式加以体现^[1,2]。多年来, 森林生态系统的服务功能价值分类及核算问题不仅是学术界研究的重点, 同时也得到了政府部门和社会公众的愈发广泛的关注。中国国家林业局在 2008 年发布的《LY/T1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范》, 首次对中国森林生态系统服务功能评估的数据来源、指标体系及方法等进行了规范性说明, 标志着中国在森林生态系统服务功能评估领域构建了较为完整的评估体系, 森林生态系统的重要性得以进一步体现^[3]。我国学者在该框架下从不同尺

作者简介: 赵正(1988~), 男, 讲师, 主要研究方向为区域发展、城市生态建设. E-mail: zzshnu@shnu.edu.cn

侯一蕾 E-mail: houyilei427@163.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971254); 北京林业大学科技创新计划项目(JGZKPY002)

度出发、利用不同方法对森林生态系统服务功能价值进行了全面、系统性的评价研究,为开展系统性的文献分析奠定了基础。虽然当前国内外对于森林生态系统服务功能价值的研究已经逐步从基于案例的实验性研究转变为基于已有研究成果的整合性研究,但是从国家级和省级尺度开展的森林生态系统服务功能价值评价的宏观性研究往往占据着主导地位,而基于市级行政区域尺度的研究则相对较少。也就是说,已有研究并未充分覆盖和突出森林生态系统在“城市区域”的特殊性。同时,城市森林生态系统服务功能的影响机制较为复杂,会因功能价值类型、研究方法和时空分布等因素的差异而体现出异质性。因此,基于市域尺度、对森林生态系统服务功能价值评价的相关研究成果开展的文献分析具有重要的学术研究和现实意义。

综上,本研究在综合国内若干城市生态系统服务功能价值实证研究实例的基础上,将研究对象聚焦于中国城市森林生态系统,构建了中国城市森林生态系统服务功能价值转移数据库和相应的 Meta 回归分析模型,从系统评价的思路和研究方法出发,对价值转移评估的影响因素以及价值转移模型的样本外价值转移有效性进行了全面探讨。研究目的在于通过系统性综述研究的方式,进一步明确中国城市森林生态系统服务功能价值的总体情况,为相关部门做出更好的城市森林生态系统管理决策提供理论支撑,进而为中国城市森林生态系统的健康和可持续性发展提供支持。

1 研究方法

Meta 分析可以对多个研究了相同现象的研究进行的系统性综合分析,并通过 Meta 回归模型对其共性的研究结果进行解读^[4]。Glass(1976)首次将该方法作为一种系统分析方法加以应用,并在此后广泛运用于环境经济学等多个领域^[5,6]。本研究的 Meta 价值转移方法是基于 Meta 分析的一般思想,在时间、经济成本及环境条件限制的情况下所产生的一种用于自然资源价值评估的新方法。具体而言,Meta 价值转移方法是基于对既有生态系统(即“研究地”)的服务功能价值的系统性评价结果,对该类型生态系统服务功能价值的影响因素进行讨论,进而对另一个相似的生态系统(即“政策地”)进行价值估计和预测的过程,亦称为“效益转移(Benefit Transfer)”^[7~9]。Meta 价值转移方法能够通过转移函数对“研究地”和“政策地”在生态系统类型及特征、评估方法选取及应用、社会经济禀赋及条件等方面的差异加以控制,是一种较为准确和严密的价值转移评估方法^[10,11]。Meta 价值转移方法的应用是对本研究在城市森林生态系统服务功能价值进行系统评价的基础上的一种拓展。

1.1 选择性偏倚检验方法

在进行 Meta 回归分析前,本研究基于标准的 FAT-PET(Funnel Asymmetry Testing-Precision Effect Testing)检验方法进行文献的选择性偏倚检验。参考相关研究成果,本研究以每一个研究观察值平方根的倒数代替城市森林生态系统服务功能价值的标准差,得到改进后的 FAT-PET 方程如下^[4,12]:

$$\ln V_{ij} = \alpha + \beta (1/\sqrt{N_{ij}}) + \varepsilon_{ij}$$

式中: i 表示第 i 个观察值; j 表示第 j 个文献研究; V_{ij} 表示该研究的城市森林生态系统服务功能价值观察值; N_{ij} 表示观察值数; α 表示常数项; β 表示为标准差系数; ε_{ij} 表示误差项。

1.2 Meta 回归方法

基于选择性偏倚检验的结果,本研究选取对数线性模型形式进行 Meta 回归模型的构建。已有研究指出,对于森林生态系统服务功能价值观察值的自然对数变换,可以在一定程度上减小原始数据的差异性、波动性和非对称性,从而降低价值偏移度、减小异方差性和提高模型的拟合精度^[13]。同时,已有研究已经广泛使用对数线性模型形式进行 Meta 价值转移分析,本研究采用此形式可以方便不同研究结果之间的比较。基于此,本研究构建以下形式的 Meta 回归模型:

$$\ln y = a + b_{method} X_{method} + b_{type} X_{type} + b_{area} X_{area} + b_x X_x + u$$

式中: y 为进行基期调整之后的城市森林生态系统服务功能价值的对数向量; X_{method} 、 X_{type} 、 X_{area} 和 X_x 为自变量矩阵; b_{method} 、 b_{type} 、 b_{area} 和 b_x 为自变量系数矩阵; a 、 u 分别为常数项和残差项。在自变量中, X_{method} 为城市森林生态系统服务功能价值评估方法变量; X_{type} 为城市森林生态系统服务功能类型变量; X_{area} 为被评估城市的区位变量; X_x 为城市人口、经济变量以及研究区面积变量。

1.3 有效性检验方法

在使用价值转移方法代替和辅助实证研究时, 需要进行有效性检验, 即检验城市森林生态系统服务功能的文献研究价值与模型预测价值之间的一致性。本研究拟采用文献研究价值与 Meta 价值转移模型预测价值之间的转移误差 (TransferError, TE) 来检验价值转移模型的有效性, 转移误差值越小则 Meta 价值转移模型的预测作用越好。TE 的计算公式为:

$$TE = (y_{observe} - y_{estimate}) / y_{estimate} \times 100\%$$

式中: TE 表示转移误差; $y_{observe}$ 为实证研究得到的服务功能价值; $y_{estimate}$ 为价值转移模型预测的服务功能价值预测值。

2 研究设计

2.1 基础文献的搜集和 Meta 价值转移数据库的建立

Meta 价值转移模型对基础文献数量及质量具有较强的依赖性^[10]。本研究以中国内地典型城市 (不包括港澳台地区) 作为研究区域, Meta 分析所使用的基础文献来源于中国学术期刊网络出版总库 (China Academic Journal Network Publishing Database, CAJD)。首先, 为了尽可能多地搜集可供本研究 Meta 分析的研究案例, 本研究以“森林生态系统服务价值”、“森林生态系统服务功能价值”等作为关键词、主题词, 对 1990 年至今公开发表的与“中国森林生态系统服务功能价值评估”主题相关的研究文献进行初步搜索, 于 2019 年 2 月 21 日初次检索到 1879 篇相关文献。基于此, 为了提炼一个相对完整的研究框架, 同时聚焦于城市森林生态系统这一核心研究对象, 本研究按照以下标准对“城市森林生态系统”相关的文献进行二次筛选: (1) 所选文献必须是以市域尺度开展的研究; (2) 所选文献是基于国家林业局颁布的《LY/T1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范》而展开的评估, 且包含可以直接提取的不同城市生态系统服务功能的单位面积价值, 或者可以经过简单处理得到的单位面积价值; (3) 所选文献必须能够明确体现出生态系统服务功能价值评估所采用的研究方法; (4) 所选文献的评估对象必须为某一城市的各类森林生态系统服务功能价值集合, 而非某一单一的城市森林生态系统服务功能价值; (5) 所选文献没有使用能值分析方法和价值转移方法。按照以上文献筛选标准进行二次冗余筛查后, 最终 35 篇相关文献共计 555 个价值观察值入选城市森林生态系统服务功能价值转移研究数据库, 其中 28 篇为期刊论文, 7 篇为学位论文^[14~48]。以上入选 Meta 价值转移数据库的文献的具体情况如表 1 所示。

表 1 本研究相关文献的观察值数量*

城市	测量年份	观察值数量	常住人口数量	人均 GDP	森林面积	城市	测量年份	观察值数量	常住人口数量	人均 GDP	森林面积
北京	2005	15	7.34	10.72	13.45	灵宝	2001	14	4.27	9.14	11.40
深圳	2015	14	7.04	12.00	11.14	禹州	2010	16	4.73	10.27	9.39

池州	2009	15	5.06	9.65	13.18	重庆	2011	15	7.98	10.40	14.92
崇左	2015	16	5.32	10.41	13.76	晋江	2014	17	5.33	11.18	9.04
楚雄	2008	17	4.01	10.74	12.76	江山	2011	16	4.06	10.24	11.76
鹤山	2009	17	3.86	10.32	10.89	邵武	2011	16	3.31	9.84	12.26
广州	2009	16	7.08	11.30	12.80	苏州	2007	17	6.44	11.38	11.07
黄冈	2013	14	6.43	9.97	13.48	集安	2010	17	3.08	8.60	12.56
梅州	2007	15	6.08	10.16	12.81	西安	2009	17	6.74	10.40	13.04
南阳	2007	17	6.90	9.56	13.90	湖州	2010	18	5.56	10.79	12.47
建阳	2011	16	4.36	10.21	12.47	延安	2015	18	5.40	10.89	11.49
上海	2013	16	7.79	11.42	11.52	厦门	2010	14	5.87	10.94	11.24
乐山	2012	13	5.87	10.26	13.37	大连	2003	17	6.32	10.71	12.84
秦皇岛	2007	18	5.65	10.00	12.66	恩施	2013	15	5.80	9.70	12.54
沈阳	2004	14	6.54	9.84	11.88	大连	2004	14	6.40	10.26	10.66
普洱	2016	15	5.56	9.97	14.88	建阳	2010	16	4.36	10.18	12.47
苏州	2007	18	6.44	11.38	11.07	梅州	2007	15	6.08	10.12	12.81
玉溪	2009	17	5.43	10.26	13.85						

*注:其中,人口数量、人均GDP、研究区总面积数据为自然对数形式.

以上相关文献研究所涵盖的研究样本(即样本城市)的分布情况如图1所示。其中,东部地区城市包括沈阳、苏州、上海、深圳、鹤山、北京、秦皇岛、江山、梅州、建阳、苏州、广州、邵武、湖州、大连、厦门、晋江,中部地区城市包括黄冈、灵宝、禹州、崇左、南阳、恩施、池州、集安,西部地区城市包括乐山、楚雄、玉溪、普洱、重庆、西安、延安。可见,被评估的城市森林生态系统在全国范围内呈现出东、中、西部均衡分布的态势。

此外,本研究的样本文献和观察值数量与已有研究存在一定相似性(表2)。综上,本研究基于相关文献所构建的Meta分析数据库及其观察值数量满足进行Meta分析的要求。

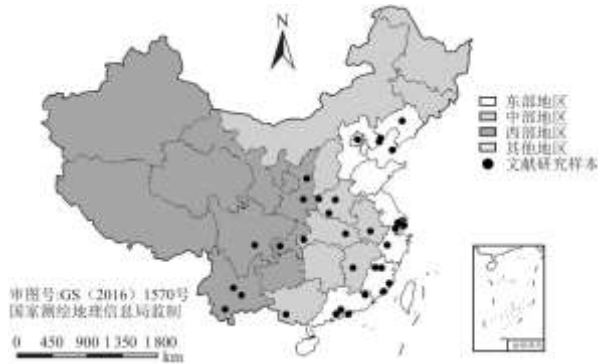


图 1 本研究相关文献的样本点分布

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载审图号为 GS(2016)1570 号标准地图制作,底图无修改

2.2 城市森林生态系统服务功能价值体系的建立

城市森林生态系统服务功能价值评价指标体系的建立,是估算城市森林生态系统服务功能价值的基础^[49]。根据国家林业局颁布的《LY/T1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范》,结合城市森林生态系统的特点和本研究 Meta 分析数据库的文献信息,确定了用于分析的 7 类城市森林生态系统服务功能价值类型(即涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护和森林游憩的功能价值)和 6 类使用频率较高的价值评价方法(即替代工程法、影子价格法、生产成本法、机会成本法、费用支出法和碳税率法),构建了用于 Meta 分析的城市森林生态系统服务功能价值评估体系,如表 3 所示^[51,52]。此外,需要指出的是:城市森林生态系统在某些价值类型方面体现得并不明显,即本研究的 Meta 价值转移数据库所包含的价值类型信息决定了本研究的分析仅包括整个生态系统服务功能价值的一部分,这一点与已有研究的思路相一致^[50]。

参考已有研究成果,本研究采用消费者物价指数(Consumer Price Index,CPI)将 Meta 分析数据库中不同年份的文献研究的城市森林生态系统服务功能价值观察值调整到以 2000 年为基期的水平,从而避免时间因素对价值观察值的影响,使不同研究的结果具备可比性^[53~55]。综上,对收集到的 35 篇文献研究的价值计算结果进行统计,可以得到各项生态系统服务功能的平均单位面积价值(图 2)。

总体上,各城市的森林生态系统服务功能平均价值为 5.868 万元/hm²·a,这一价值与一般的森林生态系统、湖沼湿地生态系统相比仍然存在一定差距^[56,57],这也是城市森林生态系统的特点之一。总体上,各服务功能价值类型按照价值由高到低进行排序依次为:涵养水源(2.278 万元/hm²·a)>固碳释氧(0.881 万元/hm²·a)>保育土壤(0.809 万元/hm²·a)>生物多样性保护(0.762 万元/hm²·a)>净化大气环境(0.615 万元/hm²·a)>森林游憩(0.301 万元/hm²·a)>积累营养物质(0.221 万元/hm²·a)。其中,在价值较高的城市森林生态系统服务功能类型中,涵养水源的价值高达 2.278 万元/hm²·a,占总服务功能价值的 38.821%。可见,涵养水源功能依然是当前中国城市森林生态系统最为重要的功能,这也是城市森林生态系统和湿地、草地等其他自然生态系统在服务功能价值方面存在的共同点。

表 2 相关研究的样本文献及观察值数量

年份	作者	发表刊物	评价对象	样本文献数量	观察值数量
2019	颜俨等	地理学报	中国内陆河流域生态系统服务价值	20	111
2018	漆信贤等	地理科学	中国森林生态系统生态服务功能价值	54	322

2017	朱晓磊等	自然资源学报	矿业城市生态服务价值	31	120
2017	杨玲等	生态学杂志	青岛市湿地生态系统服务价值	35	565
2016	张雅昕等	北京大学学报(自然科学版)	土地利用类型生态系统服务价值	38	197
2015	张玲等	生态学报	中国湖沼湿地生态系统服务价值	52	281
2019	本研究	-	中国城市森林生态系统服务功能价值	35	555

表 3 城市森林生态系统服务功能价值评估体系

服务功能类型	具体内容	常用评估方法
涵养水源	调控降水、蒸发量等	替代工程法
保育土壤	保肥、固土等	影子价格法、机会成本法
固碳释氧	固定 CO ₂ 、释放 O ₂ 等	生产成本法、碳税率法
积累营养物质	累积 N、P、K 等元素等	影子价格法
净化大气环境	吸收 SO ₂ 、滞尘、消除污染等	替代工程法、机会成本法、生产成本法
生物多样性保护	保护资金投入及机会成本等	费用支出法、机会成本法
森林游憩	旅游收入、投资, 旅行费用等	费用支出法

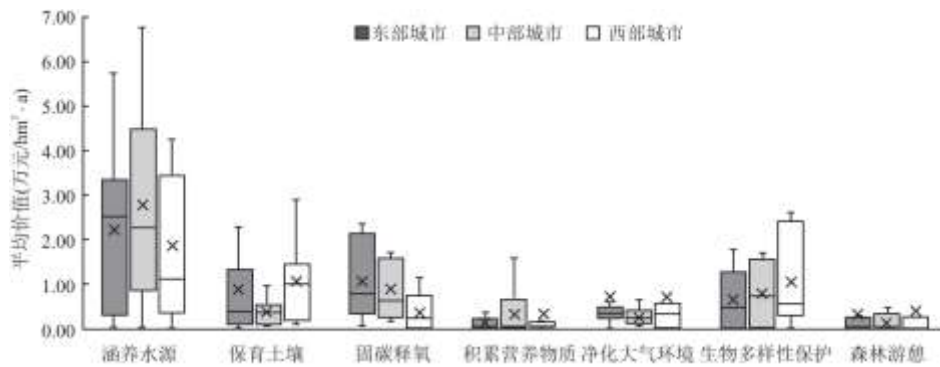


图 2 城市森林生态系统服务功能平均价值

就城市森林生态系统所处的不同区位而言, 中国城市森林生态系统服务功能总体呈现出西部地区(5.809 万元/hm²·a)>东部地区(5.724 万元/hm²·a)>中部地区(5.565 万元/hm²·a)的区位分布特征。具体来说, 东部城市森林生态系统的固碳释氧功能最高, 中部城市森林生态系统的涵养水源功能最高, 而西部城市森林生态系统在保育土壤、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护和森林游憩方面的功能都很高, 这与我国森林资源的区域分布情况以及社会经济发展状况密切相关。

2.3 Meta 价值转移模型的变量选取

国外价值转移研究的相关案例所选取的变量数量较多,即使回归过程中一些变量被剔除,最终也会保留较多变量,从而反映不同变量对资源价值的影响程度^[8]。基于已有研究成果,本研究从评估方法、功能类型,城市区位、人口、经济,以及研究区面积等方面选取 Meta 价值转移模型变量。

(1) 评估方法变量:本研究的分析重点之一是不同类型的价值评估方法利用情况对城市森林生态系统服务功能价值的影响,考虑到评估结果对于评估方法应用及指标选取的依赖性、城市森林生态系统的特点和本研究 Meta 分析数据库的具体文献信息,本研究以替代工程法、影子价格法、生产成本法、机会成本法、费用支出法和碳税率法 6 类价值评估方法作为评估方法变量指标^[50]。

(2) 功能类型变量:基于国家林业局颁布的《LY/T1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范》,结合本研究 Meta 分析数据库的文献信息,最终确定了本研究用于分析的 7 类森林生态系统服务功能价值类型,即涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护和森林游憩的服务功能价值,以上价值形式反映了本研究主题下最重要的功能类型。

(3) 城市区位变量:我国东、中、西部城市在地理特征、资源特点、社会经济条件等多方面均存在较大差异,因此城市所处的地理位置及其社会经济发展情况等因素都会对城市森林生态系统的服务功能价值产生影响。本研究基于入选 Meta 分析数据库的文献信息,将城市区位变量定义为东部地区、中部地区和西部地区,从而体现城市区位因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。

(4) 城市人口变量:城市森林生态系统在城市生态环境公共物品的供给中发挥着重要作用,而作为城市生态环境公共物品的需求方和城市森林生态系统服务功能的受益者,城市居民又成为城市森林生态系统服务功能实现过程中的重要主体。有研究指出:城市人口数量可以体现城市森林生态系统的获益人群数量,进而反映人口对生态系统服务价值的需求^[50,58]。因此,本研究以各城市常住人口数量来衡量城市人口变量指标,相关数据来源于各类统计年鉴资料。

(5) 城市经济变量:城市森林生态系统是在自然生态系统和社会经济系统叠加和相互作用下所形成的复合体,其服务功能价值的大小与整体城市的经济发展水平关系密切^[9]。参考已有研究的处理方式,本研究选取各市的人均 GDP 作为衡量区域经济发展状况的指标,并采用消费者物价指数(Consumer Price Index, CPI)将不同评估年的价值观察值调整到以 2000 年为基期的水平^[53,54]。其中,各城市的人均 GDP 数据来源于各类统计年鉴资料。

(6) 研究区面积变量:城市森林生态系统的面积大小是其产生服务功能的基础,而城市森林生态系统服务功能价值会随着面积的不同而体现出差异。本研究以森林面积作为研究区面积变量,数据来源于各类统计年鉴资料以及国家林业和草原局网站。

基于此,本研究对上述确定的 Meta 价值转移模型变量进行相应的编码及赋值操作,变量的描述统计信息如表 4 所示。

表 4 Meta 价值转移模型的变量编码及赋值

变量名称	赋值	变量描述	均值	标准差	观察值
因变量					
生态系统服务价值	/	数值型变量,单位:元/hm ² ·a(取自然对数)	10.67	1.18	35
自变量					

(1) 评估方法变量					
替代工程法	0	(对照组)	0.971	0.169	34
影子价格法	1/0	如果使用的评估方法是影子价格法, 取值为 1, 否则为 0	0.886	0.323	31
生产成本法	1/0	如果使用的评估方法是生产成本法, 取值为 1, 否则为 0	0.914	0.284	32
机会成本法	1/0	如果使用的评估方法是机会成本法, 取值为 1, 否则为 0	0.914	0.284	32
费用支出法	1/0	如果使用的评估方法是费用支出法, 取值为 1, 否则为 0	0.800	0.406	28
碳税率法	1/0	如果使用的评估方法是碳税率法, 取值为 1, 否则为 0	0.371	0.490	13
(2) 功能类型变量					
保育土壤	0	(对照组)	0.943	0.236	33
涵养水源	1/0	如果生态系统服务类型为涵养水源, 取值为 1, 否则为 0	0.971	0.169	34
固碳释氧	1/0	如果生态系统服务类型为固碳释氧, 取值为 1, 否则为 0	0.914	0.284	32
积累营养物质	1/0	如果生态系统服务类型为积累营养物质, 取值为 1, 否则为 0	0.686	0.471	24
净化大气环境	1/0	如果生态系统服务类型为净化大气环境, 取值为 1, 否则为 0	0.914	0.284	32
生物多样性保护	1/0	如果生态系统服务类型为生物多样性保护, 取值为 1, 否则为 0	0.829	0.382	29
森林游憩	1/0	如果生态系统服务类型为森林游憩, 取值为 1, 否则为 0	0.743	0.443	26
(3) 城市区位变量					
东部城市	0	(对照组)	0.571	0.502	20
中部城市	1/0	如果该城市为中部城市, 取值为 1, 否则为 0	0.229	0.426	8
西部城市	1/0	如果该城市为西部城市, 取值为 1, 否则为 0	0.200	0.406	7
(4) 城市人口变量					
常住人口数量	/	数值型变量, 单位: 万人 (取自然对数)	5.671	1.224	35
(5) 城市经济变量					
人均 GDP	/	数值型变量, 单位: 元/人 (取自然对数)	10.378	0.686	35
(6) 研究区面积变量					
森林面积	/	数值型变量, 单位: hm^2 (取自然对数)	12.338	1.319	35

4 结果分析

4.1 选择性偏倚检验结果

在本研究的 35 篇相关文献共计 555 个价值观察值中, 平均每篇文献有 16 个观察值, 最多 18 个、最少 13 个。经计算, 基于普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)和加权最小二乘法(Weighted Least Squares, WLS)的 FAT-PET 检验结果。

有研究指出“样本量越大、研究精度越高”^[59]。因此, 为保证精度高的观察值被赋予较大权重, 本研究在进行加权最小二乘回归分析时使用样本量的平方根作为权重, 且标准差系数在两个模型中均不显著, 表明价值转移数据库中没有出现选择性偏倚, 即研究文献满足 Meta 回归分析的要求。

4.2 Meta 回归结果

考虑到同一文献中城市森林生态系统服务功能价值观察值之间可能存在的相关性, 已有研究多采用加权最小二乘模型拟合的方式来规避此类问题, 即在建模时以某观察值总数的倒数作为权重赋予该观察值^[60,61]。经计算, 剔除标准化残差绝对值异常的价值观察值后的 Meta 回归结果如表 5 所示。

表 5 城市森林生态系统服务功能价值 Meta 回归结果

Meta 回归变量	非标准化系数	标准误差	标准系数	t	Sig.
常数项	-22.888	12.662	-	-1.808	0.145
替代工程法(对照组)	-	-	-	-	-
影子价格法	10.677**	2.492	3.200	4.284	0.013
生产成本法	-2.371	1.201	-0.668	-1.975	0.120
机会成本法	1.123	1.226	0.241	0.916	0.412
碳税率法	-1.098	0.783	-0.367	-1.401	0.234
保育土壤(对照组)	-	-	-	-	-
涵养水源	-4.677*	2.167	-0.849	-2.159	0.097
固碳释氧	-1.569	2.271	-0.455	-0.691	0.528
积累营养物质	-8.591**	2.109	-2.844	-4.073	0.015
净化大气环境	1.429	1.603	0.372	0.891	0.423
生物多样性保护	-6.275*	1.740	-1.743	-3.605	0.023
森林游憩	2.162	1.339	0.657	1.615	0.182
东部城市(对照组)	-	-	-	-	-
中部城市	-5.737**	1.487	-2.090	-3.857	0.018
西部城市	-5.756**	1.599	-1.700	-3.600	0.023
常住人口数量	-1.625***	0.350	-1.437	-4.649	0.010

人均 GDP	2.249**	0.805	1.151	2.792	0.049
森林面积	2.377**	0.731	2.286	3.252	0.031

(1) 评估方法因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。Meta 回归模型的计算结果显示, 影子价格法的回归系数在 0.01 的水平上显著, 表明在其他影响因素不变的情况下, 采用影子价格法得到的价值估计值与对照组替代工程法的价值估计值呈现出显著性差异, 表明采用不同的价值估计方法所得到的价值估计值存在差异, 应当根据实际情况采用适合的方法; 其次, 影子价格法的回归系数显著为正, 也表明影子价格法和对照组替代工程法得到的价值估计值要高于其他评估方法。

(2) 服务功能类型因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。在森林生态系统的各服务功能类型中, 涵养水源、积累营养物质和生物多样性保护 3 种服务功能类型在 0.1~0.01 的水平上显著, 表明在其它条件不变的情况下, 涵养水源、积累营养物质和生物多样性保护功能与对照组保育土壤功能呈现显著性差异; 同时, 保育土壤功能的价值要显著高于涵养水源、积累营养物质和生物多样性保护功能, 积累营养物质功能的价值最低。

(3) 城市区位因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。在东、中、西部城市中, 中部城市和西部城市的回归系数在 0.05 的水平上显著, 即在其它条件不变的情况下, 西部城市和中部城市与对照组东部城市呈现出显著性差异。这一结果表明: 不同城市的城市化程度和影响程度不同, 在进行城市森林生态系统服务功能价值分析的时候需要将区位差异纳入考虑范围; 此外, 在不同区域的城市之间进行比对分析同样具有重要的研究意义。

(4) 城市人口因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。城市常住人口数量变量的回归系数为负向显著, 表明城市森林生态系统服务功能的价值会随着受益人数的增加而呈现降低的趋势, 这一结果与部分已有研究结果相反^[56]。关于这一点, 有研究认为生态系统服务价值的正向影响与市场规模或服务需求有关^[57, 62]。但是, 与湿地、湖沼等生态系统不同, 城市森林生态系统是在自然生态系统和社会经济系统叠加和相互作用下所形成的复合体, 它的服务功能价值随着受益人数 (即需求) 的增加存在一个阈值, 即城市森林生态系统服务功能的承载能力是有限的, 这是城市森林生态系统的突出特点之一。就影响的程度而言, 对数连续变量的回归系数表示在其它影响因素不变的情况下, 自变量变化的比重所引起的因变量变化的比重^[56]。因此, 本研究中常住人口变量的系数为-1.625, 表明城市的常住人口每增加 1%, 相应的城市森林生态系统服务功能的单位面积价值会降低 1.625%。

(5) 城市经济因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。人均 GDP 的回归系数在 0.05 的水平上显著为正, 该结果遵循先前的预期, 表明人均 GDP 较高的城市其城市生态系统服务功能价值较高。原因在于: 社会经济发展状况越好的城市, 其城市居民的物质资本、社会资本和文化水平也会相对较高, 因而这该城市居民对城市森林生态系统服务功能的需求和对其价值的评价也较高。

(6) 研究区面积因素对城市森林生态系统服务功能价值的影响。研究区面积变量 (即森林面积) 的回归系数在 0.05 水平上显著为正, 表明单位面积森林的价值会随其面积的增加而显著增加。这一结果与部分已有研究结果相反, 即单位面积森林价值存在规模收益递减效应^[60, 62]。事实上, 张玲等 (2015) 和漆信贤等 (2018) 基于 Brander et al. (2012) 的研究成果指出: 单位面积森林价值的规模收益递减效应会随森林面积的增加而逐渐减弱, 也就是说森林生态系统的价值仍然会随森林面积的增加而增加, 即与本研究的计算结果达成一致^[50, 56, 57]。

4.3 有效性检验结果

国外相关研究表明, 实践中自然资源价值转移的平均转移误差的可接受范围介于 20%~40%之间^[7, 63]。由本研究 Meta 价值转移模型的检验结果可知: 在样本外价值转移的转移误差的计算结果中, 68.57%的转移误差小于 20%, 14.29%的转移误差 20%~40%之间,

仅有 2.86% 的转移误差大于 100%。就不同区域而言, 样本外价值转移的总体平均转移误差为 18.54%, 小于平均转移误差的可接受范围下限 20%; 东部地区、中部地区和西部地区的平均转移误差也都在可接受范围之内(表 6)。以上检验结果表明, 本研究所构建的 Meta 价值转移模型用于样本外价值转移估计的有效性较好。

表 6 Meta 价值转移模型的有效性检验结果

检验区域	东部地区	中部地区	西部地区	样本外总价值
平均转移误差	18.39%	11.93%	26.53%	18.54%

5 结论与讨论

随着各类型生态系统服务功能价值研究的不断涌现, 国内外已经有了充足的研究成果积累, 对于已有研究成果的整合性研究成为一项研究重点^[56]。本研究在综合城市生态系统服务功能价值实证研究相关的 35 篇相关文献, 共计 555 个价值观察值的基础上, 构建了中国城市森林生态系统服务功能价值转移数据库和相应的 Meta 分析模型, 对价值转移评估的影响因素以及价值转移模型的样本外价值转移有效性进行了全面探讨。本研究的主要结论如下: (1) 中国城市森林生态系统服务功能的平均价值为 5.868 万元/hm²·a, 且涵养水源>固碳释氧>保育土壤>生物多样性保护>净化大气环境>森林游憩>积累营养物质, 涵养水源功能依然是当前中国城市森林生态系统最为重要的功能; (2) 中国城市森林生态系统服务功能价值总体呈现出西部地区>东部地区>中部地区的区位分布特征。其中, 东部城市森林生态系统的固碳释氧价值最高, 中部城市森林生态系统的涵养水源价值最高, 西部城市森林生态系统在保育土壤、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护和森林游憩方面的价值都很高; (3) 城市森林生态系统服务功能的价值评估方法、功能类型, 城市区位、人口、经济因素, 以及研究区面积因素都是影响其价值变化的主要因素; (4) 本研究所构建的 Meta 价值转移模型的样本外价值转移的平均转移误差为 18.54%, 其中 68.57% 的转移误差小于 20%, 14.29% 的转移误差 20%~40% 之间, 即本研究的 Meta 价值转移模型用于研究样本外价值转移分析的有效性较好。

需要特别指出的是: 本研究对于“城市森林生态系统服务功能价值”的研究是在国家林业局《LY/T1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范》的框架下展开的。因此, 本研究样本文献中关于“城市森林生态系统服务功能类型和价值大小”的影响因素是有明确规范加以界定的, 即 7 类城市森林生态系统服务功能价值类型和 6 类使用频率较高的价值评价方法, 本研究以此增强了 Meta 分析的科学性和规范性。此外, 考虑到不同城市的城市化程度和影响程度不同, 本研究在样本选取时着重考虑了东、中、西部城市的特点, 并将城市区位因素作为一个重要的影响因素进行分析, 在研究结果的检验环节同样着重考察了不同区域的 Meta 价值转移模型的有效性检验结果, 即不同区域城市之间的对比分析贯穿本文的始终, 目的在于体现出城市特点、充分覆盖和突出森林生态系统在“城市区域”的特殊性。在比较不同区域生态系统服务价值评估结果方面, Meta 价值转移模型的计算结果也明确体现出了西部城市和中部城市与对照组东部城市在城市森林生态系统服务功能价值方面的显著性差异。这一研究结果弥补了传统的、基于案例分析的价值评价研究在效率和成本方面的不足, 拓展了森林生态系统服务功能价值评估的方法体系, 也为当前生态环境领域的大数据处理和相关问题的分析提供了一种可行的解决思路。

总体上, 本研究验证了 Meta 价值转移方法在评估城市森林生态系统服务功能价值方面的可行性, 并通过有效性检验结果体现了该方法的准确性和推广应用价值。另一方面, 虽然本研究的 35 篇样本文献具有 555 个观察值, 在很大程度上消除了样本文献数量对研究结果的影响, 但是考虑到 Meta 价值转移模型对基础文献数量及质量的依赖性, 在日后的研究中仍然有必要在聚焦研究主题的前提下扩大研究的基础文献数据库规模, 同时全面考虑森林生态系统受地理区位、资源禀赋、环境质量、气候特征和人类活动等因素的影响, 从而提升本研究的模型拟合精度, 得到更加精确的价值转移估计结果。因此, 通过对方法的完善和模型的改进来降低 Meta 价值转移方法的评估结果的不确定性, 将是日后相关研究实施改进的重要方向。

参考文献:

- [1]姚先铭,康文星.城市森林社会服务功能价值评价指标与方法探讨[J].世界林业研究,2007,20(4):67-71.
- [2]郭清和.广州市城市森林服务功能及价值研究[D].中南林学院,2005.
- [3]国家林业局.LY/T1721-2008 森林生态系统服务功能评估规范[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [4]STANLEY T D.Wheat from chaff:Meta-analysis as quantitative literature review[J].Journal of Economic Perspectives,2001,15(3):131-150.
- [5]GLASS G V.Primary,secondary,and meta-analysis of research1[J].Educational Researcher,1976,5(10):3-8.
- [6]NELSON J P,KENNEDY P E.The use (and abuse) of meta-analysis in environmental and natural resource economics:An assessment[J].Environmental & Resource Economics,2009,42(3):345-377.
- [7]BROUWER R.Environmental value transfer:State of the art and future prospects[J].Ecological Economics,2000,32(1):137-152.
- [8]NAVRUD S,READY R.Review of methods for value transfer[M].Environmental Value Transfer:Issues and Methods.Springer,2007:1-10.
- [9]BERGSTROM J C,TAYLOR L O.Using meta-analysis for benefits transfer:Theory and practice[J].Ecological Economics,2007,60(2):351-360.
- [10]JOHNSTON R J,ROSENBERGER R S.Methods,trends and controversies in contemporary benefit transfer[J].Journal of Economic Surveys,2010,24(3):479-510.
- [11]ROSENBERGER R,PHIPPS T.Correspondence and convergence in Benefit Transfer Accuracy:Meta-analytic review of the literature[M].Environmental Value Transfer:Issues and Methods.2007.
- [12]李庆波,敖长林,袁伟,等.基于中国湿地 CVM 研究的 Meta 分析[J].资源科学,2018,40(8):1634-1644.
- [13]CHEN D R.Essays on improving the econometric estimation of wetlands values via meta-analysis[D].Columbus,OH,USA:Ohio State University,2010.
- [14]孙莹,曾伟,李峰,等.北京市森林生态系统服务功能价值动态分析[J].河北林业科技,2013(2):20-24.
- [15]姜刘志,杨道运,梅岑岑,等.城市绿地生态系统服务功能及其价值评估——以深圳市福田区为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2018,52(3):138-145.
- [16]张乐勤,方宇媛,许杨,等.池州森林生态系统服务价值评估与分析[J].广西植物,2011,31(4):463-468.

-
- [17] 邱世平, 刘建敏, 苏全. 崇左市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2016, 33(4): 93-103.
- [18] 黄翠先, 席武俊, 白丽青, 等. 楚雄市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 科技视界, 2014(8): 40-44.
- [19] 张佩霞, 侯长谋, 胡成志, 等. 广东省鹤山市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 热带地理, 2010, 30(6): 628-632.
- [20] 黎武, 贺春明, 冯玉祥, 等. 黄冈市森林生态系统服务价值评估研究[J]. 四川林勘设计, 2015(4): 14-19.
- [21] 肖建武, 康文星, 尹少华, 等. 广州市城市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 中国农学通报, 2011, 27(31): 27-35.
- [22] 陈志云, 林媚珍, 许阳萍, 等. 梅州市森林生态系统服务价值评估[J]. 生态经济, 2009(1): 343-346.
- [23] 王志杰, 李鹏, 王彦芳, 等. 南阳市森林生态系统服务价值评估及分析[J]. 中国城市林业, 2012, 10(2): 29-31.
- [24] 苏少川, 廖旺顺, 刘剑斌, 等. 建阳市森林生态系统服务价值评估[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2014(1): 73-77.
- [25] 张桂莲, 郝瑞军, 郑思俊, 等. 上海市森林生态系统服务价值评估[J]. 园林科技, 2016(1): 1-5.
- [26] 邓地娟, 苗放, 叶成名, 等. 乐山市森林生态系统服务价值评估[J]. 四川环境, 2017, 36(3): 45-49.
- [27] 赵忠宝, 李克国, 曾广娟, 等. 秦皇岛市森林生态系统服务功能评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 31-36.
- [28] 高琼, 李月辉, 肖笃宁, 等. 沈阳市域森林生态系统服务功能价值评估[J]. 东北林业大学学报, 2008(2): 69-72.
- [29] 吴婧, 杨东, 杨国伟. 云南省普洱市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 科技资讯, 2018, 16(10): 250-251, 253.
- [30] 冯育青, 陈月琴, 陶隽超. 苏州森林生态服务功能价值评估[J]. 华东森林经理, 2009, 23(1): 37-43.
- [31] 赵元藩, 宋东华, 温庆忠, 等. 玉溪市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 林业调查规划, 2011, 36(1): 12-18.
- [32] 杨帆, 张瑞桓. 灵宝市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(6): 3475-3476.
- [33] 董洋洋, 朱春燕, 高畅, 等. 禹州市森林生态系统服务功能价值评估研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(32): 186-191.
- [34] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.
- [35] 王碧英. 晋江市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 绿色科技, 2016(4): 28-31.
- [36] 马鹏嫣, 王智超, 李晴, 等. 秦皇岛市北戴河区森林生态系统服务功能价值评估[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 286-292.
- [37] 薛沛沛, 王兵, 牛香, 等. 武宁县、江山市和邵武市森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 249-254.

-
- [38]严妍,万福绪,申斓,等.苏州城市森林生态环境监测及服务功能价值评估[J].安徽农业科学,2014(18):5847-5849.
- [39]唐金雁,刘希芬,张礼瑶.集安市森林生态系统服务功能价值及林木资源和林副产品价值评估分析[J].农民致富之友,2013(22):100.
- [40]周金明.建阳市森林生态系统服务价值动态评估[J].福建林业科技,2015(1):80-83.
- [41]林媚珍,陈志云,蔡砥,等.梅州市森林生态系统服务功能价值动态评估[J].中南林业科技大学学报,2010,30(11):54-59.
- [42]田石磊.西安市森林生态系统服务价值研究[D].西北农林科技大学,2009.
- [43]王留林.湖州市森林生态系统服务功能及价值评价研究[D].华中师范大学,2016.
- [44]胡有宁.延安城市森林生态系统服务功能价值评估[D].西北农林科技大学,2015.
- [45]王玉芹.厦门城市森林生态系统服务功能及价值评价[D].福建农林大学,2011.
- [46]田卓林.大连市森林生态系统服务功能价值评价[D].辽宁师范大学,2010.
- [47]张金龙.恩施市森林生态系统服务价值评估及其时空变异分析[D].湖北民族学院,2017.
- [48]张宏芝.大连城市森林生态系统服务功能价值动态仿真研究[D].河北农业大学,2006.
- [49]康文星,吴耀兴,何介南,等.城市森林生态系统服务价值指标体系与评价方法[J].林业科学,2008,44(12):129-134.
- [50]BRANDER L M,WAGTENDONK A J,HUSSAIN S S,et al.Ecosystem service values for mangroves in Southeast Asia:A meta-analysis and value transfer application[J].Ecosystem Services,2012,1(1):62-69.
- [51]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.
- [52]LI W H.Theories,methods and applications in valuing the ecosystem services[M].Beijing:China Renmin University Press,2008.
- [53]JOHNSTON R J,BESSEDIN E Y,IOVANNA R,et al.Systematic variation in willingness to pay for aquatic resource improvements and implications for benefit transfer:A meta-analysis[J].Canadian Journal of Agricultural Economics/revue Canadienne D'agroeconomie,2010,53(2-3):221-248.
- [54]KOCHI I,HUBBELL B.An empirical bayes approach to combining and comparing estimates of the value of a statistical life for environmental policy analysis[J].Environmental & Resource Economics,2006,34(3):385-406.
- [55]赵玲,王尔大.基于 Meta 分析的自然资源效益转移方法的实证研究[J].资源科学,2011,33(1):31-40.

-
- [56]漆信贤,黄贤金,赖力. 基于 Meta 分析的中国森林生态系统生态服务功能价值转移研究[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 522-530.
- [57]张玲,李小娟,周德民,等. 基于 Meta 分析的中国湖沼湿地生态系统服务价值转移研究[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5507-5517.
- [58]DE GROOT R, BRANDER L, VAN D P S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.
- [59]STANLEY T D, DOUCOULIAGOS H. Picture this: A simple graph that reveals much ado about research[J]. *Journal of Economic Surveys*, 2010, 24(1): 170-191.
- [60]SALEM M E, MERCER D E. The economic value of mangroves: A meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2012, 4(3): 359-383.
- [61]GHERMANDI A, BERGH, J. C. J. M. VAN DEN, BRANDER L M, et al. Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis[J]. *Water Resources Research*, 2014, 46(12): 137-139.
- [62]MOELTNER K, BOYLE K J, PATERSON R W. Meta-analysis and benefit transfer for resource valuation-addressing classical challenges with Bayesian modeling[J]. *Journal of Environmental Economics & Management*, 2007, 53(2): 250-269.
- [63]READY R, NAVRUD S. International benefit transfer: Methods and validity tests[J]. *Ecological Economics*, 2007, 60(2): 429-434.