

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. [Qi Xinxian, Huang Xianjin, Lai Li. An Empirical Study of Meta-analytical Value Transfer of Forest Ecosystem Services in China. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 522-530.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.04.005

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

漆信贤¹, 黄贤金¹, 赖力²

(1. 南京大学地理与海洋科学学院/国土资源部海岸带保护与开发重点实验室,
江苏 南京 210023; 2. 江苏省信息中心, 江苏 南京 210013)

摘要: 构建中国森林生态系统生态服务功能价值的数据库和Meta模型, 分析价值评估的影响因素, 检验模型的有效性。研究表明: ① 研究方法、生态系统生态服务功能、植被类型、所处植被区域、受益人口数量及集聚程度是影响森林生态系统生态服务功能价值变化的主要影响因素; ② 有效性检验证明将基于Meta分析的价值转移运用在森林生态系统生态服务功能价值评估上是一种快速且有效的方法; ③ 中国森林生态系统生态服务功能价值呈现东高西低、南高北低的特征, 价值随时间推移而增加, 涵养水源功能价值最高, 提供林果产品功能价值最低。

关键词: 森林生态系统; 价值转移; Meta分析; 中国

中图分类号: P964

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2018)04-0522-09

森林生态系统储存了约占陆地生物圈地上碳储量的80%和地下碳储量的40%, 是全球碳循环中重要的碳库^[1]和丰富的基因库、蓄水库和能源库。在维护地球生物圈生态平衡和应对全球气候变化方面作用重大, 具有重要的生态效益和经济价值^[2]。计算森林生态系统的生态服务功能价值, 并将其纳入绿色GDP核算体系, 能避免损害生态系统的短视经济行为, 有利于生态系统的保护和人类社会的可持续发展^[3, 4]。

由于中国大部分地区缺乏生态系统服务功能的定位观测和实验^[5], 价值评估一手资料获取的难度, 评估时间和评估成本等因素成为森林生态系统生态服务功能价值评估需求的限制。相较于评估成本较高的实验测算法, 基于研究文献整合的Meta分析法逐渐在国外流行^[6-10]。这种方法又称荟萃分析或元分析, 有客观、系统和定量的特点, 在社会科学和自然科学等领域广泛应用^[11]。该方法运用在生态服务功能价值评估中是以计量经济

学的方法为基础, 将已有的生态服务功能价值评估结果(研究地)转移到待研究地(政策地), 得到政策地的价值^[6]。目前, 国内基于实验测算的生态服务功能价值评估基础^[12, 13], 在湖沼湿地^[14]和土地利用^[11]等生态服务功能价值核算方面运用价值转移方法, 但尚未在森林生态系统生态服务功能价值核算方面运用。价值转移法在森林生态系统生态服务功能价值评估, 将在原有价值评估体系的基础上, 丰富森林生态系统的价值评估方法, 增强森林生态系统生态服务功能价值评估的效率。

本文通过构建中国森林生态系统生态服务功能价值转移的Meta分析模型, 探究影响森林生态系统生态服务功能价值的影响因素; 运用构建的模型对选取的政策地森林生态系统生态服务功能价值进行模拟, 对模型的有效性进行检验; 根据研究结果从中国层面和其它实证研究结果对比, 比较不同研究方法、不同研究时间、不同空间和不同生态服务类型的价值差异。

收稿日期: 2017-06-02; **修订日期:** 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571162)、江苏省自然科学基金项目(BK20141010)、国家社会科学基金重大项目(17ZDA061)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41571162), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20141010), Major Projects of National Social Science Foundation of China (17ZDA061).]

作者简介: 漆信贤(1994-), 男, 四川新津人, 博士研究生, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: qixinxian@sina.cn

通讯作者: 黄贤金, 教授。E-mail: hxj369@nju.edu.cn

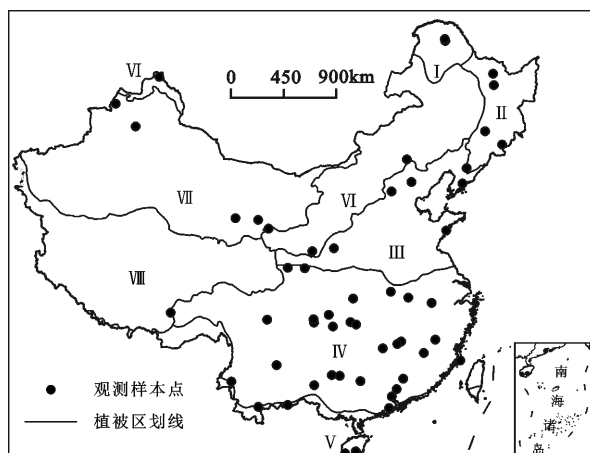
1 研究方法与数据来源

1.1 数据库建立

本研究选取的研究区域为中国(不包括港澳台地区,全文同),研究文献来源于中国学术期刊网络出版总库(CNKI)。以“森林”和“价值评估”为关键词、主题词等方式搜索1990年至今发表的有关中国森林生态系统生态服务功能价值评估的研究文献。文献包含的筛选条件如下:①剔除评估对象为人工林或某一行政区域内森林的文献;②剔除评估对象为森林的某单一价值而非生态系统生态服务功能价值的文献;③剔除使用的研究方法为能值分析法和价值转移法的文献;④相同研究区域被不同研究者研究时将由多个独立的研究者进行筛选和评估,最终确定入选文献。2017年2月13日初次检索到886篇文献,最终54篇相关文献共计322个价值观测值入选森林价值转移研究数据库,其中45篇为期刊论文,9篇为硕士或博士学位论文。这些文献最早发表于1998年,其中1998~2004年5篇,2005~2009年16篇,2010年及以后33篇。根据《中华人民共和国植被图(1:100万)》^[15]的中国植被分区,统计研究文献中研究区域的生态区分布(图1),被评估的森林主要分布于亚热带常绿阔叶林区和暖温带落叶阔叶林区。将入选数据库文献的信息录入Excel中建立Meta分析价值转移数据库,数据将被用统一的提取方式进行提取,包括文献作者、文献名、文献来源、研究时间、研究区域、森林名称、森林面积、森林类型、生态系统服务类型、生态系统系统服务估算价值及评估方法等信息。

森林生态系统的生态服务功能划分参照联合国千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA),森林生态系统的服务功能包括:供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4类。在样本文献中,森林的供给服务通常包括林木产品,调节服务包括涵养水源、固碳释氧和净化空气,支持服务包括营养累积、土壤保持和生物多样性保护,文化服务包括森林休憩。在样本文献中,文化服务还涉及科研教育服务价值,但多是采用价值转移方法,故不纳入本文的研究范围中。

对于生态系统不同的生态服务功能,一般采用不同的评估方法来对其生态系统服务功能价值进行评估。实际上,对于同一生态系统服务类型



I 为寒温带落叶针叶林区;II 为温带针阔混交林区;III 为暖温带落叶阔叶林区;IV 为亚热带常绿阔叶林区;V 为热带雨林区;VI 为温带草原区;VII 为温带荒漠区;VIII 为高寒植被区

图1 研究观测样本点

Fig.1 Sample points in this study

可能采用不同的方法进行评估,例如保护生物多样性价值,既可以使用以全民支付意愿价格为基础的支付意愿法^[16],也可以使用保护生物多样性的机会成本和经费投入的费用支出法和机会成本法^[17]。有些方法由于数据可得性等因素限制导致价值评估难以实现,故本文最终确定了主要的物质质量评价指标和使用频率较高的价值评价方法。综合文献研究,构建起本研究基于Meta分析的森林生态系统生态服务功能价值评估体系(图2)。

由于文献中评估的价值观测值通常不在同一年,为了让数据具有可比性,从而需要将基年不同的文献,运用消费者物价指数(Consumer Price Index, CPI)将不同评估基年的价值观测值调整到2015年的物价水平。

1.2 自变量解释

通过对国外森林生态系统的生态服务功能价值评估研究的梳理^[6-10],评估价值主要受评估方法、生态系统服务功能类型、森林特征、森林周边地理及人类需求等方面影响,其中前一种属于影响评估价值的主观因素,后3种属于影响评估价值的客观因素。结合数据实际的收集情况,评估方法包括机会成本法在内的5种方法,生态系统服务类型包括提供林果产品在外的8种类型,森林特征包括森林植被类型、森林植被地理区划和森林生态系统面积3项指标,森林周边地理及人类需求包括森林的受益人口及集聚效应。以下将对构建Meta回

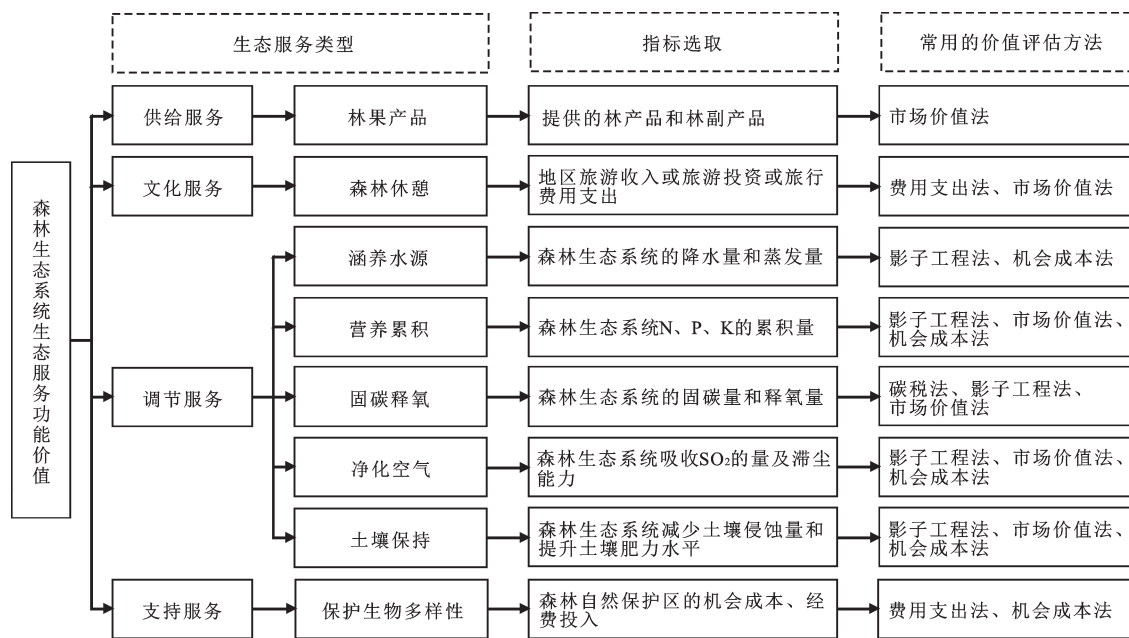


图2 森林生态系统生态服务功能价值评估体系

Fig.2 Evaluation system of forest ecosystem ecological function value

归模型的自变量具体阐述:

1) 评估方法:不同的生态系统生态服务功能价值采取的是不同的评估指标和方法进行评估,且生态系统生态服务功能价值评估结果依赖于评估方法、评估指标的选取^[6]。本文将研究评估方法对生态系统生态服务功能价值的影响。

2) 生态系统服务类型:不同生态系统提供的生态服务存在明显差异,且提供的生态服务功能存在直接价值和间接价值的差异,不同生态系统服务类型之间的差异也会对生态系统生态服务功能价值产生影响。

3) 森林植被类型:不同的森林植被类型由于其周边生态环境、产品提供、物质交换的不同因而其经济价值也会产生差异。

4) 森林植被地理区划:不同的植被地理区划一方面决定的是区域适宜生长的植被类型,另一方面决定植被生长的自然环境。已有学者研究不同植被地理区划森林的价值差异^[18]。

5) 森林生态系统面积:生态系统服务功能价值随着服务面积的增长存在一个阈值,所以在森林生态系统面积阈值的左右会存在价值递增或递减的现象。

6) 受益人口数量:生态系统服务的受益人口数量反映的是区域对于生态系统服务的需求大

小。本文采用区域常住人口作为衡量区域收益人口的指标,将区域界定为森林生态系统所处的地级市,数据来源于各省历年统计年鉴。

7) 森林生态系统的集聚效应:区域森林生态系统的价值具有一定的集聚效应,即周边有同类型甚至有面积更大的森林会增加该森林的价值。借鉴国外森林生态系统价值转移研究采用森林丰度^[6],本研究使用 ArcGIS 软件对评估的森林周边 50 km 范围内的其它森林植被面积进行识别,判断是否有同类型甚至有面积更大的森林,使用的数据来源于 GLASS 二期参量产品 LAI 的成果。

基于文献信息对变量的各类信息按照统计和计量的数据要求进行编码和赋值,统计每个变量的价值观测数量、均值和标准差(表1)。

1.3 Meta模型构建

结合本文研究的森林生态系统生态服务功能价值,构建 Meta 回归模型(公式1)。本文将价值观测值采用对数变换能够减小原始数据的波动程度和非对称性,有效改善森林价值偏移的问题,提高模型的精度,减少异方差。

$$\ln(y_i) = a + b_\alpha X_\alpha + b_\beta X_\beta + b_\gamma X_\gamma + b_\delta X_\delta + \varepsilon \quad (1)$$

式中,因变量 y_i 是调整为以2015年为基期的森林生态系统各个生态服务功能价值向量[元/(hm²·a)]; a 是常数项, ε 为残差项, b_α 、 b_β 、 b_γ 和 b_δ 是各类自变量

表1 Meta 回归模型的变量信息
Table 1 Variable description information of Meta Regression Model

变量	变量描述	均值	标准差	价值观察数量
因变量				
森林价值(元/hm ²)	数值型变量(自然对数)	8.42	1.98	322
自变量				
机会成本法	对照组	8.39	1.80	94
碳税法	如果使用的评估方法是碳税法,取值为1,否则为0	8.98	1.49	19
影子工程法	如果使用的评估方法是影子工程法,取值为1,否则为0	8.64	1.96	134
市场价值法	如果使用的评估方法是市场价值法,取值为1,否则为0	7.96	2.01	84
费用支出法	如果使用的评估方法是费用支出法,取值为1,否则为0	8.40	2.35	57
林果产品	如果生态系统服务类型为林果产品,取值为1,否则为0	7.84	1.46	28
森林游憩	如果生态系统服务类型为森林游憩,取值为1,否则为0	7.60	2.48	39
涵养水源	如果生态系统服务类型为涵养水源,取值为1,否则为0	9.08	1.95	52
营养累积	对照组	6.88	2.12	24
固碳释氧	如果生态系统服务类型为固碳释氧,取值为1,否则为0	8.93	1.54	49
净化空气	如果生态系统服务类型为净化空气,取值为1,否则为0	8.36	1.39	47
土壤保持	如果生态系统服务类型为土壤保持,取值为1,否则为0	8.36	1.93	51
保护生物多样性	如果生态系统服务类型为保护生物多样性,取值为1,否则为0	9.40	1.79	31
寒温带落叶针叶林区	如果生态区位为寒温带落叶针叶林区,取值为1,否则为0	8.86	2.74	12
温带针阔混交林区	如果生态区位为温带针阔混交林区,取值为1,否则为0	8.17	1.55	18
暖温带落叶阔叶林区	如果生态区位为暖温带落叶阔叶林区,取值为1,否则为0	8.23	1.57	54
亚热带常绿阔叶林区	对照组	8.59	1.96	164
热带雨林区	如果生态区位为热带雨林区,取值为1,否则为0	9.46	1.18	25
温带草原区	如果生态区位为温带草原区,取值为1,否则为0	7.06	2.77	28
温带荒漠区	如果生态区位为温带荒漠区,取值为1,否则为0	8.38	1.23	14
高寒植被区	如果生态区位为高寒植被区,取值为1,否则为0	7.77	0.93	7
针叶林	如果森林类型为针叶林,取值为1,否则为0	8.28	2.08	167
针阔混交林	如果森林类型为针阔混交林,取值为1,否则为0	8.47	1.94	127
阔叶林	对照组	8.58	1.94	203
森林面积(hm ²)	数值型变量(自然对数)	9.74	1.87	322
受益人口数量(人)	数值型变量(自然对数)	14.73	1.32	322
周边 50 km 范围内是否有 其它森林聚集	如果是取值为1,否则为0	8.57	1.89	257

的回归系数矩阵; X_{α} 、 X_{β} 、 X_{γ} 和 X_{δ} 为自变量矩阵,其中 X_{α} 为评估方法变量矩阵, X_{β} 为生态系统服务功能类型矩阵, X_{γ} 为森林特征矩阵, X_{δ} 森林周边地理及人类需求特征矩阵。

1.4 有效性检验方法

在使用价值转移方法进行实证研究的时候,需要对结果的有效性进行检验,以实验采集所得的森林生态系统生态服务功能价值(通常称为真实值)和通过价值转移模型所得的森林生态系统生态服务功能价值(通常称为预测值)作为检验对象。为了进行效益转移的有效性分析,在54个样本中采用“留出法”,按照各个植被区划所占比例挑选出14个作为政策地(Policy Site),将剩下的40

个作为实验地(Research Site)共计243个价值观测值进行Meta函数效益转移的模型估计,样本地数据库被划分为两个互斥的集合。本文将主要从3个方面来检验效益转移的有效性:① 效益转移误差检验,检验真实值与预测值之间的一致性,用TE来表示(公式2),TE值越小表示效益转移的有效性越好;② 配对T检验,效益转移的有效性检验要求配对T检验不能拒绝效益转移的真实值与预测值相等的原假设;③ 单样本K-S检验,效益转移的有效性检验要求单样本K-S检验假设真实值和预测值来自的总体分布和正态分布无显著差异。

$$TE = \left[\frac{CS_{PV} - CS_{AV}}{CS_{AV}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中, TE 为效益转移误差; CS_{PV} 为效益转移预测值; CS_{AV} 为效益转移真实值。

2 结果分析

2.1 Meta 回归模型结果

本文的模型建立是基于 SPSS23.0 软件, 因为大多数样本文献中提供的生态服务价值的观察值有多个, 而这些出自于同一篇文献的观察值可能存在较大的相关性。针对这一问题, 国外的相关研究通常采用加权最小二乘法 (Weighted Least Squares) 来进行模型拟合来规避同一篇文献观察值的相关性, 即将来源文献中观察值总数的倒数作为权重赋予该观察值, 进而构建 Meta 回归模型。在模型构建的过程中, 剔除了标准化残差绝对值大于 1.5 的价值观测值 (表 2)。

表2 森林生态系统生态服务价值 Meta 回归结果

变量	非标准化 回归系数	标准 误差	95.0% 置信区间	
			下限	上限
常数项	-0.107	0.376	-0.848	0.634
碳税法	-0.081	0.081	-0.240	0.078
影子工程法	-0.037	0.040	-0.116	0.042
市场价值法	-0.075*	0.047	-0.168	0.019
费用支出法	0.091	0.072	-0.050	0.232
林果产品	0.273***	0.075	0.125	0.422
森林游憩	0.152*	0.087	-0.019	0.324
涵养水源	0.448***	0.069	0.313	0.584
固碳释氧	0.429***	0.074	0.283	0.574
净化空气	0.309***	0.069	0.173	0.444
土壤保持	0.309***	0.068	0.175	0.442
保护生物多样性	0.302***	0.080	0.144	0.459
针叶林	0.110***	0.036	0.038	0.181
针阔混交林	0.059*	0.039	-0.017	0.136
寒温带落叶针叶林区	0.118	0.085	-0.050	0.286
温带针阔混交林区	0.105*	0.059	-0.011	0.221
暖温带落叶阔叶林区	0.110*	0.044	0.023	0.198
热带雨林区	0.251***	0.059	0.134	0.367
温带草原区	0.093	0.071	-0.046	0.233
温带荒漠区	0.060	0.079	-0.096	0.216
高寒植被区	0.104	0.106	-0.106	0.313
森林面积	0.014	0.015	-0.015	0.044
受益人口数量	0.046**	0.019	0.009	0.084
周边 50 km 范围内是 否有其它森林聚集	0.213***	0.072	0.072	0.355

注: 实验样本数 $N=217$; $R^2=0.40$; $F=5.51$; ***, **, * 分别表示在 0.01、0.05、0.1 的水平上显著。

2.2 影响森林服务价值变化的因素分析

1) 评估方法对生态服务功能价值的影响。Meta 模型的回归结果显示, 市场价值法的回归系数在统计上显著, 说明在其它条件不变的情况下, 使用市场价值法评估所得的价值估计值比其它方法更容易呈现出显著差异。而费用支出法得到的得到的价值估计值要高于其它价值评估方法, 这与 Marwa 和 Evan 对红树林的价值转移研究结果一致^[9]。

2) 生态系统服务类型对生态服务功能价值的影响。在森林生态系统服务类型中, 林果产品、森林游憩、涵养水源、固碳释氧、净化空气、土壤保持、保护生物多样性 7 种生态服务类型在统计上都显著, 说明在其它条件不变的情况下, 林果产品、森林游憩、涵养水源、固碳释氧、净化空气、土壤保持、保护生物多样性与对照组保护生物多样性呈现显著差异。并且涵养水源和固碳释氧的经济价值要显著高于其它生态服务类型, 森林游憩服务的价值最低。涵养水源、固碳释氧、林果产品和森林休憩的价值评估结果和国外研究大致相似。土壤保持的生态服务价值较低, 这与 Marwa 和 Evan 的研究结果有明显的差异^[9], 可能的原因是国内对于土壤保持生态服务价值的评估方法存在缺陷, 且相关研究资料及数据难以获得导致森林土壤保持的价值被低估。

3) 植被类型对生态服务功能价值的影响。在植被类型中, 针叶林和针阔混交林的回归系数都显著为正, 说明在其它条件不变的情况下, 针叶林和针阔混交林与对照组阔叶林的单位面积森林价值存在显著差异。针叶林的回归系数显著大于针阔混交林, 说明针叶林的经济价值要高于针阔混交林的价值, 研究结果与冯宜明等^[19]对于区域森林主要森林类型的价值评估结果相同。

4) 生态区位对生态服务功能价值的影响。在 8 个植被分区中, 温带针阔混交林区、暖温带落叶阔叶林区、热带雨林区的回归系数更加显著, 说明在其它条件不变的情况下, 温带针阔混交林区、暖温带落叶阔叶林区、热带雨林区与对照组亚热带常绿阔叶林区的单位面积森林价值存在显著差异, 寒温带落叶针叶林区、温带草原区及温带荒漠区与对照组亚热带常绿阔叶林区的单位面积森林价值无显著差异。本研究中热带雨林区单位面积的森林生态系统所提供的年平均价值量最大和余新晓等^[18]全国森林生态系统服务功能价值评估结

果相同,其它区域也有较大相似性,造成差异的原因可能是这些区域研究样本较少,缺乏代表性。

5) 森林面积对生态服务功能价值的影响。森林生态系统面积变量的回归系数为正,说明单位面积森林价值存在规模效益,单位面积森林价值会随面积的增加而增加,但是并不显著。这个结果与 Marwa 和 Evan 及 Luke 等的研究恰好相反^[6,9],他们的结果显示单位面积森林价值存在规模收益递减的现象,但进一步对他们的结果进行分析可以得出,他们结果得出的单位面积森林价值的规模收益递减效应会随着森林面积的增加而以几何级数减弱,最终森林生态系统的总经济价值仍然会随森林面积的增加而增加。

6) 受益人口数量对生态服务功能价值的影响。受益人口数量变量的回归系数为正,说明森林生态系统服务的受益人口数量越多,对森林生态系统服务的需求随之增长,从而森林生态系统的单位价值也会增长,这也说明森林生态系统是区域人居环境的重要组成。对数形式的连续变量回归系数的意义表示在其它影响因素不变的情况下,自变量的百分比变化所引起的因变量百分比的变化。受益人口变量的系数为 0.046,表示区域的常住人口每增加 1%,单位面积森林价值会增加 4.6%。

7) 森林的集聚效应对生态服务功能价值的影响。周边 50 km 范围内是否有同类型甚至有面积更大的森林在统计上显著为正,且与单位面积森林生态系统生态服务功能价值存在正相关关系。说明森林生态系统具有明显的集聚效应,周边一定范围内同类甚至面积更大的森林生态系统越多,被评估的森林生态服务价值越高,研究结果与 Marwa 和 Evan 及 Luke 等对红树林森林丰度影响价值转移的研究结果一致^[6,9]。

2.3 Meta 分析价值转移模型的有效性检验

根据 SPSS23.0 的结果看,效益转移误差范围在 0.58%~43.06%之间,平均误差为 16.94%。国外自然资源效益转移研究表明,平均误差范围在 20%~40%属合理区间^[20],本研究平均误差小于 20%,说明效益转移的有效性较好。从配对 T 检验的结果看,*t*值为 1.790,*P*=0.097>0.050,不能拒绝原假设,说明在 95%的置信区间内,预测值和真实值在统计上没有显著不同。从单样本 K-S 检验的结果来看,真实值和预测值的 Asymp.sig. 值均为 0.200,都大于 0.05 的显著性水平,说明真实值和预测值的分布相同,均服从正态分布。

2.4 全国尺度森林生态系统生态服务功能价值比较与模拟

根据本研究可以计算得出,全国森林生态系统生态服务功能单位面积价值量为 98 773.17 元。将本研究与其它全国尺度的森林生态系统单位面积生态服务价值相对比可以发现,森林生态系统单位面积生态服务价值因为研究方法、研究年份的不同会有一些差异(表 3)。一方面,吴霜等通过生态系统能值与价值之间的转化得出的结果明显低于其他研究者运用价值评估体系的研究结果,体现评估方法不同而引起的价值差异。另一方面,除去因为研究方法造成的异常差异,全国森林生态系统单位面积生态服务价值随着年份的增加而增加,这一结果与多位学者^[21~23]基于多个时间段的森林生态系统单位面积生态服务价值研究结果相同。

全国层面各个植被分区的森林生态服务功能价值来看,热带雨林区的单位面积森林生态服务功能价值最高,其次为暖温带落叶阔叶林区、温带针阔混交林区、寒温带落叶针叶林区,温带荒漠区的单位面积森林生态服务功能价值最低(图 3a)。全国森林生态系统生态服务功能价值亚热带常绿

表3 全国森林生态系统单位面积生态服务价值比较(元/hm²)

Table 3 Comparison of ecological service value of forest ecosystem in China per unit area (Yuan/hm²)

作者	王斌等 ^[22]	吴霜等 ^[21]	王斌等 ^[22]	赵同谦等 ^[24]	余新晓等 ^[18]
研究年份	1973	1990	2003	2004	2005
平均价值	19360	1326.29	20280	12176.54	31802.16
作者	靳芳等 ^[25]	吴霜等 ^[21]	王兵等 ^[26]	冯继广等 ^[27]	本研究
研究年份	2005	2009	2011	2016	2015
平均价值	26501.8	2329.69	69944.08	61100	98773.17

注:为了便于比较,首先将美元(USD)根据当年汇率换算成人民币(RMB),其次将比较文献中所有研究基期通过 CPI 统一换算成以 2015 年为基期。

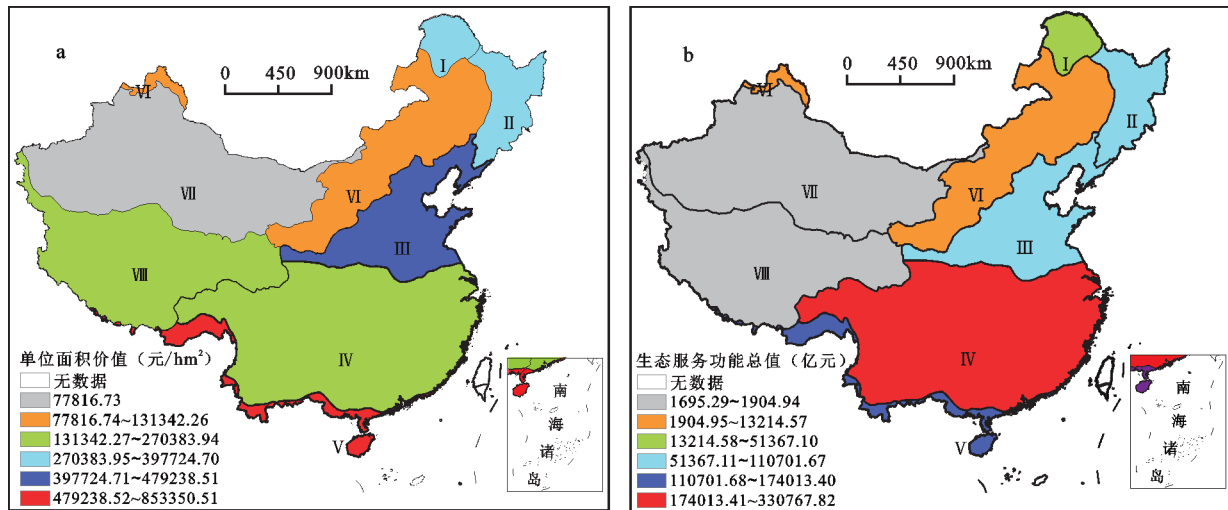


图3 中国森林生态系统生态服务功能价值

Fig.3 Forest ecosystem ecological service function value in China

阔叶林区>热带雨林区>暖温带落叶阔叶林区>温带针阔混交林区>寒温带落叶针叶林区>温带草原区>温带荒漠区>高寒植被区。大致呈现东高西低,南高北低的特征(图3b),胡焕庸线东南侧的森林生态系统生态服务功能价值大致占全国总价值的91.21%,这也说明森林生态系统生态服务功能价值与所在区域的经济社会发展需求存在密切关系,工业化、城镇化发展达到一定阶段,也需要在更高层次上推进森林生态系统建设与保护。

全国层面各个生态系统服务功能价值来看,除作为参照组的营养物质累计功能,各个生态系统服务功能单位面积平均价值量呈现涵养水源[86 655.55 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]>保护生物多样性[65 725.25 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]>固碳释氧[51 901.37 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]>森林游憩[40 935.26 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]>净化空气[28 523.39 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]>土壤保持[28 430.12 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)]>林果产品[27 772.98 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)](图4)。

3 结论与讨论

本文基于中国森林生态系统生态服务功能价值评估研究的54篇研究文献共计322个价值观测值,建立价值转移数据库,应用Meta分析的方法构建起中国森林生态系统生态服务功能价值评估的Meta分析价值转移模型,并基于该模型对政策地价值转移的有效性进行检验。主要得出以下结论:

1) 从影响森林生态系统生态服务功能价值的影响因素看,研究方法、生态系统生态服务功能、植

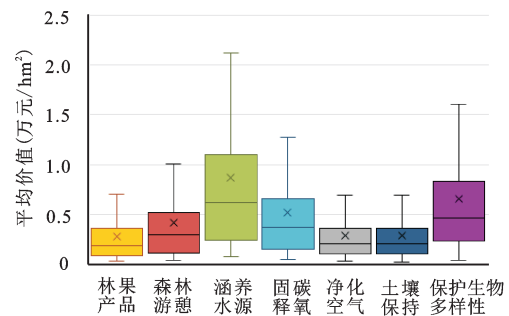


图4 中国层面森林生态系统各个生态服务功能平均价值比较

Fig.4 Comparison of types value of ecological service function in forest ecosystem at national level

被类型、所处植被区域、受益人口数量及集聚程度都会影响森林生态系统生态服务功能价值的变化。

2) 从Meta分析价值转移结果的有效性检验结果来看,政策地价值转移的误差范围在0.58%~43.06%范围之间,平均误差为16.94%,结果结合国外相关效益转移研究误差值相比,误差范围在合理区间,并且通过了配对T检验和单样本K-S检验。将Meta分析的价值转移运用在森林生态系统生态服务功能价值评估上是一种快速且有效的方法。

3) 基于Meta分析的价值转移揭示森林生态系统生态服务功能价值的时空差异和类型差异,森林生态系统生态服务功能价值呈现东高西低、南高北低的特征,价值随时间推移而增加,涵养水源功能价值最高,提供林果产品功能价值最低。

中国森林生态系统生态服务功能价值评估较国外研究来说起步较晚,近年来中国关于森林生态系统生态服务功能价值评估的研究文献逐年增加。在寒温带落叶针叶林区、温带荒漠区和青藏高原区的研究还较少,所以不断扩充数据库建立森林生态系统生态服务功能价值转移模型对于实验困难、数据难获取区域进行价值评估有积极的意义。

目前,国内外对于生态服务功能价值的研究已逐步从资源调查的实验性转变为基于已有研究成果的整合性研究。国外学者基于全球^[8]、东南亚^[6]、美国^[10]的森林、红树林开展的基于Meta分析的价值转移应用研究为多个尺度的森林生态系统生态服务功能价值的整合研究积累了方法和案例。和国外研究相比,本研究使用的解释变量仍然较少,未考虑到森林生态系统受环境质量、气候变化及人类活动等影响因素,导致模型拟合精度较低,国外相关研究也表明,数据集的大小可能是造成区域价值差异的原因^[9],为本研究中高寒植被区单位面积生态服务功能价值估计偏高提供合理的解释。基于Meta分析的生态服务功能价值转移研究在森林生态系统的应用,弥补了传统观测与实验价值评估研究在效率和成本方面的不足,丰富了森林生态系统生态服务功能价值评估的方法,在大数据时代为海量生态环境数据的处理以及面对全球变化的生态环境问题监测、分析和预测提供思想和方法支撑^[6, 8, 28]。

参考文献(References):

- [1] 陈诗一, 邓祥征, 章奇, 等. 应对气候变化: 用市场政策促进二氧化碳减排[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Chen Shiyi, Deng Xiangzheng, Zhang Qi et al. Against climate change: Abating carbon emission through market mechanism based environmental policies. Beijing: Science Press, 2014.]
- [2] 江泽慧. 中国可持续发展总纲(第6卷): 中国森林资源与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [Jiang Zehui. China sustainable development (Volume 6): China's forest resources and sustainable development. Beijing: Science Press, 2007.]
- [3] 张明军, 周立华. 气候变化对中国森林生态系统服务价值的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 40-43. [Zhang Mingjun, Zhou Lihua. The influence of climate change on the value of chinese forest ecosystem services. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(2): 40-43.]
- [4] 沈晓艳, 王广洪, 黄贤金. 1997-2013年中国绿色GDP核算及时空格局研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1639-1650. [Shen Xiaoyan, Wang Guanghong, Huang Xianjin. Green GDP accounting and spatio-temporal pattern in China from 1997 to 2013. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10): 1639-1650.]
- [5] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10. [Li Wenhua, Zhang Biao, Xie Gaodi. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 1-10.]
- [6] 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.
- [7] Chaikumbung M, Doucouliagos H, Scarborough H. The economic value of wetlands in developing countries: A meta-regression analysis[J]. Ecological Economics, 2016, 124: 164-174.
- [8] Ojea E, Loureiro M L, Alló M et al. Ecosystem services and REDD: Estimating the benefits of Non-Carbon Services in worldwide forests[J]. World Development, 2016, 78: 246-261.
- [9] Salem, Marwa E, Mercer et al. The Economic Value of Mangroves: A Meta-Analysis[J]. Sustainability, 2012, 4(3): 359-383.
- [10] Siriwardena S D, Boyle K J, Holmes T P et al. The implicit value of tree cover in the U.S.: A meta-analysis of hedonic property value studies[J]. Ecological Economics, 2016, 128: 68-76.
- [11] 张雅昕, 刘娅, 朱文博. 基于Meta回归模型的土地利用类型生态系统服务价值核算与转移[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 493-504. [Zhang Yaxin, Liu Ya, Zhu Wenbo. Ecosystem service valuation and value transfer of land use types: A comprehensive Meta-analysis of the literature. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(3): 493-504.]
- [12] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 等. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1546-1554. [Chen Shanshan, Liu Kang, Bao Yubin et al. Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(10): 1546-1554.]
- [13] 黄润, 王升堂, 倪建华, 等. 皖西大别山五大水库生态系统服务功能价值评估[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1270-1274. [Huang Run, Wang Shengtang, Ni Jianhua et al. Ecosystem service functions of the Five Reservoirs in Dabie Mountain, West Anhui Province. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(10): 1270-1274.]
- [14] 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. [Zhang Ling, Li Xiaojuan, Zhou Demin et al. An empirical study of meta-analytical value transfer of lake and marsh ecosystem services in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5507-5517.]
- [15] 张新时. 中华人民共和国植被图(1:100万)[M]. 北京: 地质出版社, 2006. [Zhang Xinshi. Vegetation map of the People's Republic of China (1:1 million). Beijing: Geological Press, 2006.]
- [16] 薛沛沛, 周强, 王正春, 等. 彭水县乌江沿岸森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(2): 258-261. [Xue Peipei, Zhou Qiang, Wang Zhengchun et al. Forest ecosystem services and its valuation in Wujiang River along Pengshui County. Zhejiang Agricultural Sciences, 2016, 57(2): 258-261.]
- [17] 吕弼顺, 佟守正, 朱卫红, 等. 长白山白河林区森林资源间接经济价值评估[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 331-336. [Lyu Bishun, Tong Shouzheng, Zhu Weihong et al. Method for indirect

- economic values of forest of baihe in the Changbai Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 331-336.]
- [18] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2096-2102. [Yu Xinxiao, Lu Shaowei, Jin Fang et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102.]
- [19] 冯宜明, 车克钧, 曹秀文, 等. 甘肃省白龙江林区主要森林类型生态服务功能价值评估[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(10): 102-106. [Feng Yiming, Che Kejun, Cao Xiuwen et al. Valuation of eco-service functions of major forest types in Bailongjiang forest region of Gansu province. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2014, 34(10): 102-106.]
- [20] Ready R, Navrud S. International benefit transfer: Methods and validity tests[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 429-434.
- [21] 吴霜, 延晓冬, 张丽娟. 中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 334-342. [Wu Shuang, Yan Xiaodong, Zhang Lijuan. The relationship between forest ecosystem emergy and forest ecosystem service value in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 334-342.]
- [22] 王斌, 杨效生, 张彪, 等. 1973~2003年中国森林生态系统服务功能变化研究[J]. 浙江农林大学学报, 2009, 26(5): 714-721. [Wang Bin, Yang Xiaosheng, Zhang Biao et al. Dynamics of ecosystem services in China during 1973-2003. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2009, 26(5): 714-721.]
- [23] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 603-611. [Liu Lulu, Cao Wei, Shao Quanqin. Water Conservation Function of Forest Ecosystem in the Southern and Northern Pan River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 603-611.]
- [24] 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 Tongqian, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua et al. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480-491.]
- [25] 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 Fang, Lu Shaowei, Yu Xinxiao et al. Forest ecosystem service and its evaluation in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1531-1536.]
- [26] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153. [Wang Bing, Ren Xiaoxu, Hu Wen. Assessment of forest ecosystem services value in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(2): 145-153.]
- [27] 冯继广, 丁陆彬, 王景升, 等. 基于案例的中国森林生态系统服务功能评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1375-1382. [Feng Jiguang, Ding Lubin, Wang Jingsheng et al. Case-based evaluation of forest ecosystem service function in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1375-1382.]
- [28] 赵芬, 张丽云, 赵苗苗, 等. 生态环境大数据平台架构和技术初探[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 824-832. [Zhao Fen, Zhang Liyun, Zhao Miaomiao et al. Architecture and technical exploration of big data platform for ecological environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 824-832.]

An Empirical Study of Meta-analytical Value Transfer of Forest Ecosystem Services in China

Qi Xinxian¹, Huang Xianjin¹, Lai Li²

(1. Key Laboratory of the Ministry of Land for Coastal Protection and Development, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Information Center of Jiangsu Province, Nanjing 210013, Jiangsu, China)

Abstract: By constructing the database and Meta Model of the ecological service function of the forest ecosystem in China, the factors influencing the value evaluation and the validity of the model were analyzed. The research showed that: 1) The research method, the ecosystem ecological service function, the vegetation type, the vegetation area, the population and the agglomeration degree were the main factors affecting the change of the ecological service function of the forest ecosystem; 2) It was validly testified that the application of the transfer of value based on Meta-analysis in the evaluation of the ecological service function of the forest ecosystem was a quick and effective method; 3) In the ecological service function of the forest ecosystem, there were some characteristics such as high in the east and low in the west, and high in the north and low in the south. The value increased as the time went by. The value of water conservation was the highest, and the value of providing forest fruit products was the lowest.

Key words: forest ecosystem; value transfer; Meta-analysis; China