

DOI: 10.5846/stxb202006231639

邬紫荆, 曾辉. 基于 meta 分析的中国森林生态系统服务价值评估. 生态学报, 2021, 41(14): 5533-5545.

Wu Z J, Zeng H. Evaluation of forest ecosystem services value in China based on meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5533-5545.

# 基于 meta 分析的中国森林生态系统服务价值评估

邬紫荆, 曾 辉\*

北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055

**摘要:** meta 分析作为价值转移方法中最有效的手段之一, 已在生态系统服务价值评估中得到了较为广泛的应用。然而国内相关研究的 meta 回归模型大多依据传统的最小二乘法建立, 忽略了原始数据的层次结构特征。通过收集关于中国森林生态系统服务已有实证研究的价值评估结果, 建立 meta 分析数据库; 通过面板数据回归方法构建 meta 回归模型, 对模型的价值转移有效性进行评估; 在构建的 meta 回归模型基础上, 根据 IPCC SRES 中的四类情景——A1B、A2、B1、B2, 计算中国森林生态系统 2010—2100 年的生态系统服务价值。研究结果表明: (1) 相较基于普通最小二乘法和加权最小二乘法建立的回归模型, 基于面板数据回归方法建立的模型平均转移误差最小 (11.57%), 模型有效性较高, 因此为适合本研究的 meta 回归方法; 对于不同价值观察值, 转移误差存在较大差异, 随着观察值的增大, 模型预测值由高估逐渐转变为低估, 转移误差趋向减小。(2) 基于面板数据回归方法建立的 meta 回归模型能够有效揭示中国森林生态系统服务的价值转移规律, 生态系统服务类型、植被区划、森林面积、森林丰度、人均 GDP 和铁路长度是中国森林生态系统服务价值的重要影响因素。(3) 中国森林生态系统 2010—2100 年价值变化的情景分析表明, 情景 A1B 和 B1 下森林面积和生态系统服务总价值持续增加, 情景 A2 下森林面积和生态系统服务总价值持续下降, 情景 B2 下森林面积和生态系统服务总价值先上升后下降; 其中情景 B1 下中国森林生态系统服务总价值增长最大, 至 2100 年达到 41.58 万亿元, 情景 B2 下价值损失最为显著, 至 2100 年降至 22.97 万亿元。

**关键词:** 中国; 森林生态系统; 价值转移; meta 分析; 面板数据回归

## Evaluation of forest ecosystem services value in China based on meta-analysis

WU Zijing, ZENG Hui\*

School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** As one of the most effective methods of value transfer, meta-analysis has been widely used in ecosystem services evaluation in recent years. However, most of the meta-regression models used in relevant studies in China are based on the traditional least squares method, which ignores the hierarchical structure of the original data. In this research, considering the data correlation and hierarchy in relevant studies, we established a meta-analysis database by collecting the results of forest ecosystem services evaluation of existing empirical studies in China from 1990 to 2019. Then we used the panel data regression method to build a meta-regression model and assessed the model's effectiveness for value transfer. Finally, on the basis of the established meta-regression model, we calculated the forest ecosystem services value in China from 2010 to 2100 under the four scenarios in the IPCC SRES: A1B, A2, B1, and B2. The results showed the following: (1) The model based on the panel data regression method was the most effective with the average transfer error of 11.57%, compared with the model based on the ordinary least squares method and the weighted least squares method. Therefore, the panel data regression was considered the most suitable method for this research. What's more, this model performed better for higher observed values. When the observed value was small, the predicted value of the model was mostly higher than the observation and the transfer error was relatively high; when the observed value was large, the predicted value of the model

**基金项目:** 深圳市科创委稳定支持计划项目“区域生态修复的基础理论与技术支撑体系”资助

**收稿日期:** 2020-06-23; **网络出版日期:** 2021-05-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengh@pkusz.edu.cn

was mostly lower than the observation and the transfer error was relatively low. (2) The meta-regression model based on the panel data regression method could effectively reveal the law of value transfer of forest ecosystem services in China. It affirmed that ecosystem service types, vegetation zoning, forest area, forest abundance, per capita GDP, and railway length were important factors affecting forest ecosystem services value in China. (3) The scenario analysis of the forest ecosystem services value in China from 2010 to 2100 revealed that the forest area and the total ecosystem services value continued to increase (decrease) under scenario A1B and scenario B1 (scenario A2), which both increased first and then decreased under scenario B2. Among these four scenarios, the total ecosystem services value in China showed the most significant increase under scenario B1, reaching 41.58 trillion yuan by 2100. On the contrary, the total ecosystem services value lost most under scenario B2, which decreased to 22.97 trillion yuan by 2100.

**Key Words:** China; forest ecosystem; value transfer; meta-analysis; panel regression method

森林生态系统是我国重要的陆地生态系统<sup>[1]</sup>,能够提供水源涵养、土壤保持、固碳释氧、营养累积、空气净化、森林防护、林果产品、生物多样性保护、森林游憩等多种生态系统服务<sup>[2]</sup>。2000年以来,国内学者在中国森林生态系统服务及其价值评估方面已取得了一定的研究成果<sup>[3]</sup>。2008年,《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)(以下简称《规范》)<sup>[4]</sup>的颁布进一步完善了中国森林生态系统服务价值的评估体系,为研究结果的横向比较和纵向整合提供了可能。

随着我国正式将森林资源纳入绿色 GDP 核算体系,森林资源核算尤其是森林生态服务价值核算对相关的价值评估工作提出了更高的要求;而与此同时,日益扩大的评估需求使得成本、时间、空间等限制因素对实证研究的约束作用越发显著。在此背景下,国内学者开始从实证研究逐渐转向价值转移研究。价值转移(也称效益转移)是在已有实证研究(研究地)的价值评估结果基础上,定量评估待研究地(政策地)生态系统服务价值的一种方法<sup>[5]</sup>,在国外研究中的应用已较为成熟。其中,meta 分析运用计量经济学的方法,通过构建价值转移函数,有效控制了研究地和政策地在自然地理环境、社会经济环境、评估流程等方面的差异<sup>[6]</sup>,节约了评估成本和评估时间<sup>[7]</sup>,同时也保证了评估结果的一致性<sup>[8]</sup>。

目前,国内已有部分学者利用 meta 分析的方法进行生态系统服务价值转移研究,如土地利用类型生态系统<sup>[9]</sup>、森林生态系统<sup>[10]</sup>、湿地生态系统<sup>[6,11-14]</sup>等,并取得了较好的模拟结果。尽管如此,这些研究在模型构建方面仍存在明显的问题。一般而言,一篇价值评估的文献中往往包含若干个价值观察值,这些观察值之间并不独立<sup>[15]</sup>。而现有研究中的 meta 回归模型大多基于传统的最小二乘法建立,并未考虑同一研究中不同观察值之间的相关性,从而容易导致有偏估计<sup>[16]</sup>。针对这一问题,国外研究提出了若干解决方法,包括以观察值个数的倒数为权重的加权最小二乘法<sup>[16-18]</sup>、面板数据回归模型<sup>[19-20]</sup>、多层线性回归模型<sup>[19]</sup>等。其中,面板数据回归模型和多层线性回归模型因考虑了数据的层次结构和不同研究间的随机性差异,在价值转移研究中得到了更为广泛的应用<sup>[20]</sup>。

针对以上问题,本文旨在利用 meta 分析方法,基于改良的模型形式研究中国森林生态系统服务的价值转移规律,并在此基础上计算中国森林生态系统 2010—2100 年的价值变化情况。首先建立中国森林生态系统的 meta 分析数据库,通过比较几类常见模型的回归结果,选择面板数据回归模型构建 meta 回归方程,并进行影响因素分析和模型误差评估;在此基础上,根据 IPCC SRES 中的四类情景,计算了中国森林 2010—2100 年的价值变化情况。相比已有的 meta 分析价值转移研究,本文通过使用面板数据回归模型规避了传统模型的缺陷,同时对模型自变量进行了修改和补充,从而有效降低了价值转移误差。研究结果丰富了中国生态系统的 meta 分析价值转移体系,对于未来的价值转移研究和价值评估实践工作具有重要的指导意义。

## 1 研究方法和数据源

### 1.1 数据库建立

本文的研究区域为中国(中国港澳台地区相关数据欠缺,未统计),文献来源为中国知网(CNKI)。以“森

林”和“价值评估”为主题词检索 1990 年至今发表的所有关于中国森林生态系统服务价值评估的文献。文献筛选过程中,具有以下任一情况的将被排除:

(1) 评估对象为某一行政区域内的森林:本文选取原始实证研究时注重森林生态系统的独立性、完整性和连续性,例如自然保护区、森林公园、林场等;当研究对象为某一行政区域内的森林时,可能存在人为分割边界之嫌;

(2) 评估对象为人工林:本文在选取模型自变量时,主要考虑森林生态系统所处地理区位、周边环境条件等影响森林生长和分布的自然或人为因素,而人工林主要根据人为要求或目的进行经营建设,可能影响样本点的代表性;

(3) 评估对象非生态系统服务价值:本文的研究对象为森林生态系统服务价值,部分文献重点关注生态系统提供的经济效益或社会效益,故在此不予考虑;

(4) 使用能值分析法进行价值评估:目前大部分价值评估研究工作是基于物质质量分析进行的,故对使用能值分析法的文献予以剔除;

(5) 使用价值转移法进行价值评估:由于本文采用价值转移法进行价值评估,故对使用价值转移法的文献予以剔除。

森林生态系统具有林果产品供给、水源涵养、固碳释氧、空气净化、土壤保持、营养累积、森林防护、生物多样性保护、森林游憩、科研教育等多种服务类型。在查阅的文献中,只有极少数研究评估了森林生态系统的森林防护价值和科研教育价值,因此本文未将其纳入评估范围。本文参照《规范》和已有文献的价值评估流程,建立了 meta 分析的森林生态系统服务价值评估体系(图 1)。

依据图 1 所示的森林生态系统服务价值评估体系,从文献中统一提取题目、作者、研究时间、研究区域、森林面积、评估方法、生态系统服务类型、生态系统服务价值等研究信息,将其录入 Excel 表格中。最终,共 96 篇文献、552 个价值观察值被纳入 meta 分析数据库。其中 67 篇为期刊论文,23 篇为硕士论文、6 篇为博士论文,大多数文献的发表时间集中于 2005 年后。从研究样本点的植被区划分布可以看出,被评估的森林生态系统主要分布于亚热带常绿阔叶林区和暖温带落叶阔叶林区,高寒植被区和寒温带针叶林区的研究数量相对较少(图 2)。

由于文献中的价值评估通常是基于不同年份进行的,为了使数据具有可比性,通过消费者物价指数(Consumer Price Index, CPI)将不同评估基年的价值调整到 2015 年的物价水平;用统一基年后的价值(元/a)除以研究区的森林面积( $\text{hm}^2$ ),得到不同研究区森林生态系统的单位面积价值(元  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ),将其作为 meta 回归模型的因变量。

分别按照生态系统服务类型、植被区划、评估方法统计相应的价值观察数和生态系统服务价值均值(图 3)。从价值观察数来看,固碳释氧和土壤保持的价值观察数量最多,林果产品和营养累积的价值观察数量相对较少;大多数研究采用市场价值法和影子工程法进行价值评估,支付意愿法和旅行费用法的使用频数较低。从生态系统服务价值来看,生物多样性保护和水源涵养提供的价值最高,营养累积提供的价值最低;亚热带常绿阔叶林区的森林生态系统服务价值最高,其他地区未见显著差异;在不同评估方法中,利用支付意愿法评估的平均价值最高,而利用费用支出法和碳税法评估时平均价值相对较低。

值得注意的是:(1)不同生态系统服务类型、植被区划、评估方法之间的价值差异并未考虑其他因素的影响,具体的影响因素及影响程度需通过 meta 回归模型进行检验;(2)不同评估方法之间的价值差异很大程度上源于其评估的生态系统服务类型,例如机会成本法和支付意愿法主要用于生物多样性保护的价值评估,从而造成这两类评估方法的平均价值远高于其他类型。

## 1.2 自变量选取

根据国内外已有的生态系统服务价值转移研究,并结合图 3 中的结果,本文将评估价值的影响因素分为四类:生态系统服务类型;研究区特征,包括植被区划、森林面积;周边环境,包括森林丰度、铁路长度;社会经

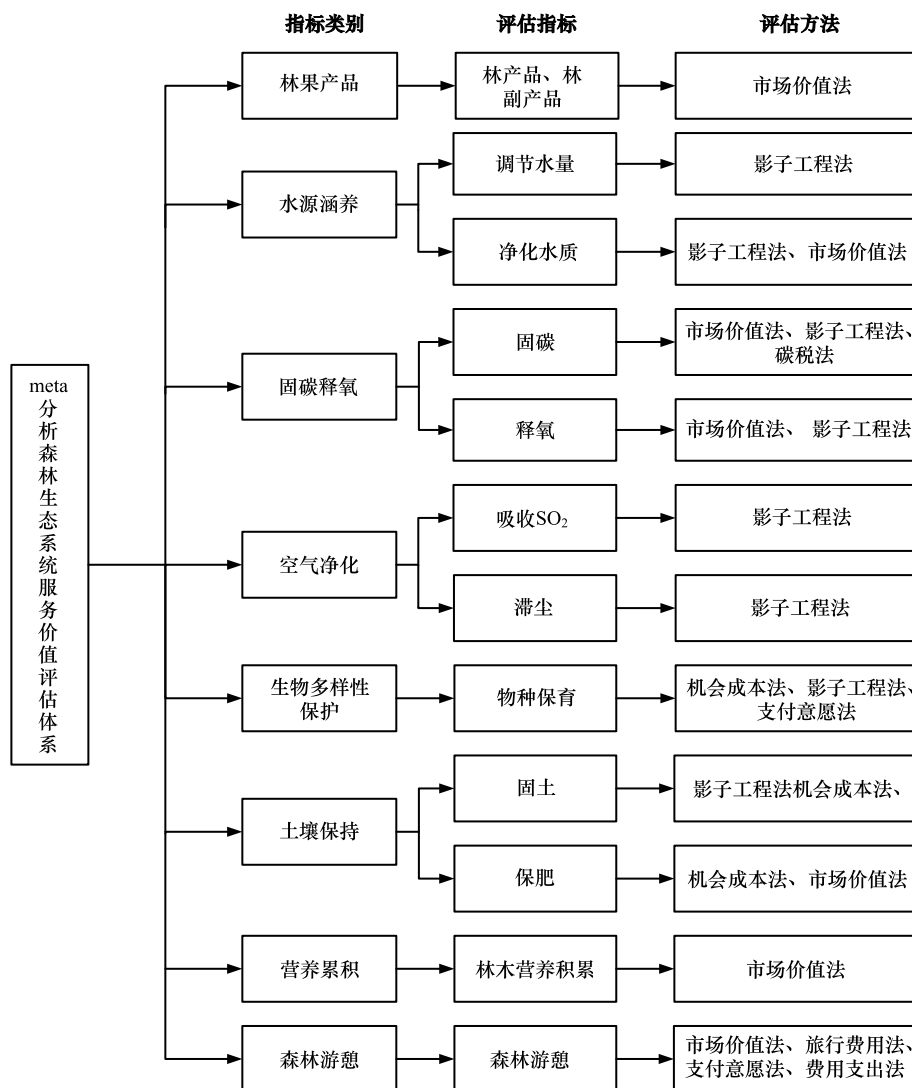


图1 meta 分析的森林生态系统服务价值评估体系

Fig.1 The evaluation system of forest ecosystem services of meta-analysis

济条件,包括人口数量、人均 GDP。尽管大多数研究将评估方法视为一个重要的解释变量,但本文与 Brander 等人<sup>[5]</sup>的观点一致:一方面,在评估某一种生态系统服务的价值时通常使用不止一种方法,违背了回归分析中对虚拟变量取值的互斥要求;另一方面,某一种生态系统服务的价值评估方法一般是确定的,尤其是在《规范》颁布之后,例如利用影子工程法评估涵养水源的价值、利用机会成本法评估生物多样性保护的的价值等,因此评估方法变量与生态系统服务类型变量之间可能存在多重共线性,影响回归结果。综合以上两点原因,本文不将评估方法纳入回归模型。现对本文选取的自变量说明如下:

(1)生态系统服务类型:依据图 1 可分为林果产品、水源涵养、固碳释氧、空气净化、森林游憩、生物多样性保护、土壤保持、营养累积八类。生态系统服务类型不同,价值评估结果也存在明显差异。

(2)植被区划:依据中华人民共和国植被图(1:100 万)可分为寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区、暖温带落叶阔叶林区、亚热带常绿阔叶林区、热带(季)雨林区、温带草原区、温带荒漠区、高寒植被区八类。植被区划决定了森林生长的自然环境条件,影响生态系统服务的供给。

(3)森林面积:依据文献中提供的信息确定。随着森林面积的增加,生态系统服务价值可能存在边际效益递增或递减的现象。

(4)森林丰度:以研究区中心为圆心、50 km 为半径的区域内其他森林的面积。当周边森林提供的生态系统服务类型与研究区相同,即二者可互为替代,此时随着其他森林面积的增加,研究区的生态系统服务价值可能会降低;反之,若二者可互为补充,则研究区的生态系统服务价值与其他森林面积之间可能存在正向关系。

(5)铁路长度:以研究区中心为圆心、50 km 为半径的区域内铁路长度。铁路的建设造成了景观的破碎化,例如阻碍种群迁徙、造成种群的地理隔离等,同时增加了外部干扰的可能性。因此,生态系统服务价值与铁路长度之间可能存在负向关系。

(6)人口数量:以研究区中心为圆心、50 km 为半径的区域内的人口数量。一方面,人口的增加意味着市场和需求的扩大,从而促进森林生态系统的开发与利用;另一方面,人口集聚和资源的不合理利用使得环境破坏的风险增加,造成生态系统的衰退。因此,生态系统服务价值与人口数量之间并没有确定的先验关系。

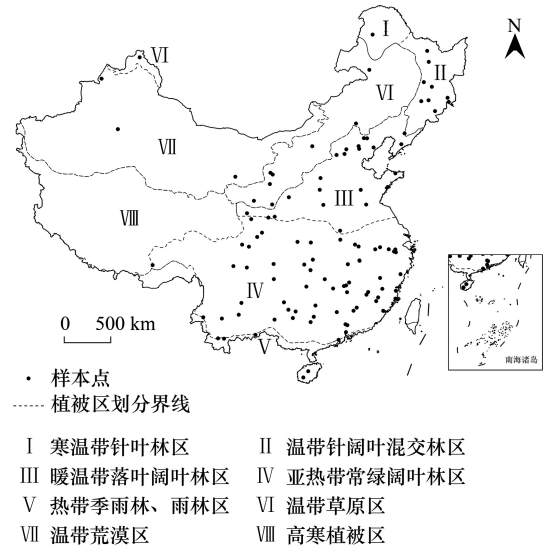


图2 研究样本点

Fig.2 Sample points of this research

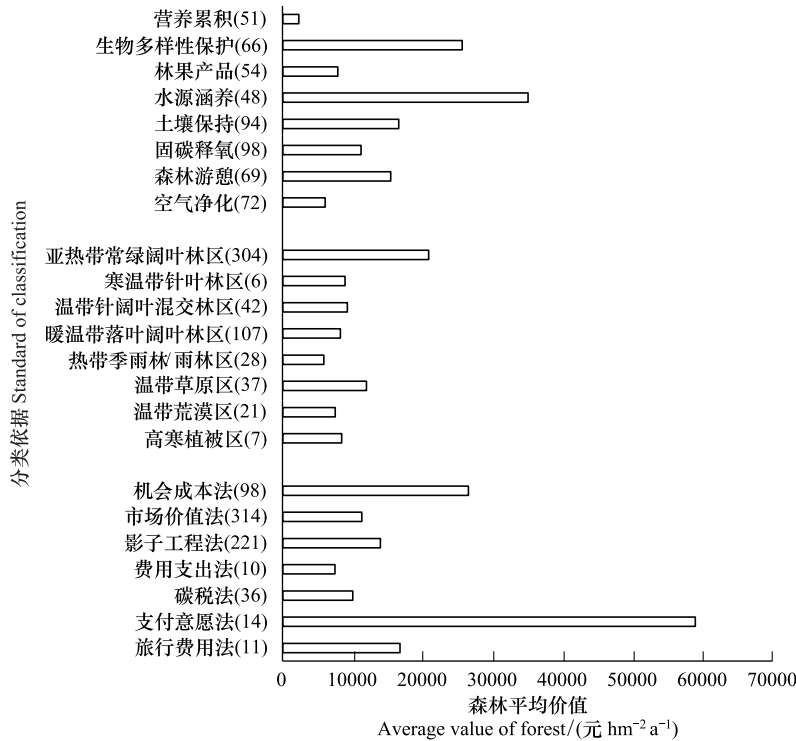


图3 不同生态系统服务类型、植被区划、评估方法的平均价值及观察数量(括号内的数字)

Fig.3 Average values and number of observations (in the parentheses) for each ecosystem service type, vegetation zone and evaluation method

(7)人均 GDP:研究区所在地级市 2015 年的人均 GDP。人均 GDP 反映了当地的经济状况和人民生活水平。与人口数量的影响类似,一方面经济的发展可以推动森林生态系统的利用和保护,另一方面也可能导致资源过度开采和生态环境退化。因此生态系统服务价值与人均 GDP 之间也没有确定的先验关系。数据来源

于各省、自治区、直辖市的统计年鉴。

(森林丰度、铁路长度、人口数量的数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台(<http://geodata.pku.edu.cn>))

本文对所有连续变量都进行了自然对数变换。已有研究表明,生态系统服务价值观察值和研究面积等自变量通常呈右偏分布<sup>[5]</sup>,对数变换能够有效减小原始数据的波动程度和异方差性,降低高异常值的影响<sup>[6]</sup>。在双对数模型中,连续变量的系数可视为弹性系数。对各类变量进行必要地处理后,分别计算其均值、标准差并统计观察数量(表 1)。

表 1 meta 分析的变量信息

Table 1 Variable information of meta-analysis

| 变量<br>Variables                                                     | 描述<br>Description                                            | 均值<br>Average value | 标准差<br>Standard deviation | 观察数量<br>Number of observations |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 因变量 Dependent variable                                              |                                                              |                     |                           |                                |
| 森林价值<br>Forest ecosystem services value                             | 数值变量;研究区的森林生态系统服务价值(元 hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> , ln) | 8.29                | 1.86                      | 552                            |
| 自变量 Independent variable<br>(生态系统服务类型 Ecosystem service types)      |                                                              |                     |                           |                                |
| 营养累积<br>Nutrient storage                                            | 对照组                                                          |                     |                           | 51                             |
| 生物多样性保护<br>Biodiversity conservation                                | 虚拟变量;生态系统服务类型为生物多样性,取值为 1,否则为 0                              | 0.12                | 0.32                      | 66                             |
| 林果产品<br>Forest products                                             | 虚拟变量;生态系统服务类型为林果产品,取值为 1,否则为 0                               | 0.10                | 0.30                      | 54                             |
| 水源涵养<br>Water conservation                                          | 虚拟变量;生态系统服务类型为水源涵养,取值为 1,否则为 0                               | 0.09                | 0.28                      | 48                             |
| 土壤保持<br>Soil conservation                                           | 虚拟变量;生态系统服务类型为土壤保持,取值为 1,否则为 0                               | 0.17                | 0.38                      | 94                             |
| 固碳释氧<br>Carbon fixation and oxygen production                       | 虚拟变量;生态系统服务类型为固碳释氧,取值为 1,否则为 0                               | 0.18                | 0.38                      | 98                             |
| 森林游憩<br>Forest recreation                                           | 虚拟变量;生态系统服务类型为森林游憩,取值为 1,否则为 0                               | 0.13                | 0.33                      | 69                             |
| 空气净化<br>Air purification                                            | 虚拟变量;生态系统服务类型为空气净化,取值为 1,否则为 0                               | 0.13                | 0.34                      | 72                             |
| (植被区划 Vegetation zoning)                                            |                                                              |                     |                           |                                |
| 亚热带常绿阔叶林<br>Subtropical evergreen broadleaf forest region           | 对照组                                                          |                     |                           | 304                            |
| 寒温带针叶林区<br>Cold temperate deciduous needleleaf forest               | 虚拟变量;植被区划为寒温带针叶林区,取值为 1,否则为 0                                | 0.01                | 0.10                      | 6                              |
| 温带针阔叶混交林区<br>Temperate mixed needleleaf and broadleaf forest region | 虚拟变量;植被区划为温带针阔叶混交林区,取值为 1,否则为 0                              | 0.08                | 0.27                      | 42                             |
| 暖温带落叶阔叶林区<br>Warm temperate deciduous broadleaf forest              | 虚拟变量;植被区划为暖温带落叶阔叶林区,取值为 1,否则为 0                              | 0.19                | 0.40                      | 107                            |
| 热带季雨林、雨林区<br>Tropical monsoon rain forest and rain forest region    | 虚拟变量;植被区划为热带季雨林、雨林区,取值为 1,否则为 0                              | 0.05                | 0.22                      | 28                             |
| 温带草原区<br>Temperate steppe region                                    | 虚拟变量;植被区划为温带草原区,取值为 1,否则为 0                                  | 0.07                | 0.25                      | 37                             |
| 温带荒漠区<br>Temperate desert region                                    | 虚拟变量;植被区划为温带荒漠区,取值为 1,否则为 0                                  | 0.04                | 0.19                      | 21                             |
| 高寒植被区<br>Plateau high-cold region                                   | 虚拟变量;植被区划为高寒植被区,取值为 1,否则为 0                                  | 0.01                | 0.11                      | 7                              |
| 森林面积<br>Forest area                                                 | 数值变量;研究区的森林面积(hm <sup>2</sup> , ln)                          | 9.39                | 1.96                      | 552                            |

| 续表                           |                                                  |                     |                           |                                |
|------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 变量<br>Variables              | 描述<br>Description                                | 均值<br>Average value | 标准差<br>Standard deviation | 观察数量<br>Number of observations |
| 森林丰度<br>Forest abundance     | 数值变量;研究区 50 km 范围内其他森林的面积 (hm <sup>2</sup> , ln) | 11.78               | 3.25                      | 552                            |
| 铁路长度<br>Railway length       | 数值变量;研究区 50 km 范围内的道路长度 (km, ln)                 | 4.49                | 2.28                      | 552                            |
| 人口数量<br>Number of population | 数值变量;研究区 50 km 范围内的人口数量 (万人, ln)                 | 4.69                | 1.25                      | 552                            |
| 人均 GDP<br>Per capita GDP     | 数值变量;研究区所在地级市的人均 GDP (元, ln)                     | 10.69               | 0.57                      | 552                            |

### 1.3 模型构建

目前使用最为广泛的一类 meta 回归模型为基于最小二乘法的多元线性回归:

$$\ln y_{ij} = \alpha + \beta^e X^e + \beta^c X^c + \beta^s X^s + u_{ij}$$

式中,  $y_{ij}$  为森林生态系统服务价值 (元 hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>);  $\alpha$  为常数项;  $X$  为自变量矩阵, 其中  $X^e$  代表生态系统服务类型,  $X^c$  代表研究区特征 (即植被区划和森林面积),  $X^s$  代表周边环境 (即森林丰度和铁路长度),  $X^s$  代表社会经济条件 (即人口数量和人均 GDP);  $\beta$  为相应的系数矩阵;  $u_{ij}$  为随机误差项。

最小二乘法的潜在假设是不同观察值之间不相关。而在本文建立的 Meta 分析数据库中, 一篇文献提供的价值观察数量最多为 8, 最少为 1, 有 96% 的文献提供了多个价值观察值。由于来自同一篇文献的观察值并不独立, 不同研究之间也可能存在相关性<sup>[21]</sup>, 在模型构建过程中有必要对此加以考虑。部分研究使用以观察值个数的倒数为权重的加权最小二乘法, 在一定程度上减小了样本相关性的影响<sup>[16-18]</sup>。

加权最小二乘法对模型的异方差性进行了校正, 但并没有考虑数据集的层次结构和不同研究间的随机性差异。面板数据回归模型明确考虑了不同研究对象之间异质性, 削弱了变量的共线性影响, 提高了模型的有效性, 其具体形式如下:

$$\ln y_{ij} = \alpha + \beta^e X^e + \beta^c X^c + \beta^s X^s + w_{ij}$$

式中,  $w_{ij}$  为误差项, 可分解为  $\varepsilon_i$  和  $u_{ij}$  两个部分, 前者代表第  $i$  个研究的误差成分, 后者代表随机观测误差。由于不同研究提供的价值观察数量不完全相同, 因此这是一个非平衡面板。面板数据回归模型包括混合最小二乘法模型、固定效应模型和随机效应模型, 本文采用 Breusch-Pagan 拉格朗日乘数检验 (LM 检验) 判断个体随机效应是否存在, 并采用豪斯曼检验判断固定效应模型与随机效应模型的优劣。

### 1.4 模型误差评估

转移误差用于检验模型预测值与价值观察值之间的一致性<sup>[6,10]</sup>, 相当于平均绝对百分比误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE), 其定义为:

$$TE = \frac{|\text{value}_{\text{est}} - \text{value}_{\text{obs}}|}{\text{value}_{\text{obs}}}$$

式中,  $TE$  为转移误差 (Transfer Error),  $\text{value}_{\text{est}}$  为模型预测值,  $\text{value}_{\text{obs}}$  为价值观察值。通常而言, 转移误差越小, 说明价值转移模型的有效性越高<sup>[6]</sup>。

本文采取留一法交叉验证 (Leave-One-Out Cross Validation), 即依次选择每一个观察值作为测试集、其余观察值作为训练集, 分别计算测试集中相应观察值的转移误差。相对于普通的  $k$  折交叉验证 ( $k$ -fold cross validation,  $k > 1$ ), 留一法的计算虽然最为繁琐, 但样本利用率最高, 不仅能够更为准确地评估模型整体误差, 而且便于分析误差随观察值的变化特征。

## 2 Meta 分析结果

### 2.1 Meta 回归模型结果

为了选择适合本数据集的模型, 本文分别计算了三种模型的回归结果。对于面板数据回归模型, LM 检

验的结果表明,不同研究之间存在随机效应( $P=0.0839$ ),因此混合模型不适用;豪斯曼检验的结果表明,可以接受随机效应与解释变量无关的原假设( $P=0.5859$ ),在这种情况下优先选择随机效应模型。模型构建过程中,均剔除了标准化残差大于 1.5 的观察值。回归结果如表 2 所示。对比不同回归方法的结果可知,面板数据回归模型的总体拟合效果最优,因此本文采用面板数据回归方法中的随机效应模型构建 meta 回归方程。

表 2 meta 回归模型结果  
Table 2 Results of meta regression model

| 变量<br>Variables                                                     | 系数 Coefficients  |                  |                  |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                                                     | OLS              | WLS              | RE               |
| 常数项 Constant                                                        | 13.21 *** (1.45) | 13.55 *** (1.44) | 12.86 *** (1.79) |
| 生物多样性保护 Biodiversity conservation                                   | 2.41 *** (0.21)  | 2.38 *** (0.20)  | 2.46 *** (0.20)  |
| 林果产品 Forest products                                                | 1.34 *** (0.22)  | 1.32 *** (0.22)  | 1.43 *** (0.21)  |
| 水源涵养 Water conservation                                             | 3.46 *** (0.23)  | 3.45 *** (0.21)  | 3.46 *** (0.21)  |
| 土壤保持 Soil conservation                                              | 1.68 *** (0.20)  | 1.71 *** (0.19)  | 1.74 *** (0.19)  |
| 固碳释氧 Carbon fixation and oxygen production                          | 2.34 *** (0.19)  | 2.34 *** (0.19)  | 2.40 *** (0.18)  |
| 森林游憩 Forest recreation                                              | 1.17 *** (0.22)  | 1.08 *** (0.20)  | 1.24 *** (0.21)  |
| 空气净化 Air purification                                               | 1.54 *** (0.21)  | 1.47 *** (0.20)  | 1.63 *** (0.20)  |
| 寒温带针叶林区<br>Cold temperate deciduous needleleaf forest               | 0.17 (0.52)      | 0.14 (0.47)      | 0.20 (0.67)      |
| 温带针阔叶混交林区<br>Temperate mixed needleleaf and broadleaf forest region | -0.69 *** (0.20) | -0.69 *** (0.20) | -0.69 *** (0.25) |
| 暖温带落叶阔叶林区<br>Warm temperate deciduous broadleaf forest              | -0.37 ** (0.14)  | -0.42 ** (0.13)  | -0.36 ** (0.18)  |
| 热带季雨林、雨林区<br>Tropical monsoon rain forest and rain forest region    | -0.74 *** (0.22) | -0.92 *** (0.23) | -0.65 ** (0.27)  |
| 温带草原区 Temperate steppe region                                       | -0.79 ** (0.24)  | -0.82 *** (0.24) | -0.77 *** (0.29) |
| 温带荒漠区 Temperate desert region                                       | -1.44 *** (0.27) | -1.48 *** (0.25) | -1.42 *** (0.36) |
| 高寒植被区 Plateau high-cold region                                      | -0.96 *** (0.29) | -1.01 *** (0.29) | -0.92 *** (0.36) |
| 森林面积 Forest area                                                    | -0.17 *** (0.04) | -0.17 *** (0.04) | -0.17 *** (0.05) |
| 森林丰度 Forest abundance                                               | -0.06 ** (0.02)  | -0.06 ** (0.02)  | -0.06 ** (0.03)  |
| 铁路长度 Railway length                                                 | -0.07 * (0.03)   | -0.07 * (0.03)   | -0.06 * (0.04)   |
| 人口数量 Number of population                                           | -0.09 (0.06)     | -0.09 (0.06)     | -0.09 (0.08)     |
| 人均 GDP Per capita GDP                                               | -0.29 ** (0.11)  | -0.32 ** (0.10)  | -0.27 ** (0.13)  |
| 样本数 Number of observations                                          | 495              | 495              | 495              |
| Adjusted $R^2$                                                      | 0.43             | 0.47             | 0.48             |
| $P$                                                                 | 0.00             | 0.00             | 0.00             |

OLS:普通最小二乘法 Ordinary Least Square,WLS:加权最小二乘法 Weighted Least Square(以观察值个数的倒数为权重),RE:面板数据回归方法中的随机效应模型 Random Effect;显著性水平:0.01 ‘\*\*\*’;0.05 ‘\*\*’;0.1 ‘\*’

生态系统服务类型、植被区划、森林面积、森林丰度、铁路长度、人口数量和人均 GDP 总共可以解释约 48%的价值变化。在回归结果中,虚拟变量(生态系统服务类型、植被区划)的回归系数反映了特定变量相对于对照组的偏离方向及偏离程度;连续变量(森林面积、森林丰度等)的回归系数则代表弹性系数,即因变量与自变量的变化率之比。回归结果的具体分析如下:

(1)生态系统服务类型:生物多样性保护、林果产品、水源涵养、土壤保持、固碳释氧、森林游憩、空气净化的回归系数都显著大于 0( $P<0.01$ ),说明在其他条件保持不变的情况下,以上七种生态系统服务类型的价值均与对照组(营养累积)有显著差异,因此营养累积的价值最低。对比回归系数可以看出,生物多样性保护、水源涵养的生态系统服务价值明显高于其他类型,森林游憩的生态系统服务价值较低。

(2)植被区划:除寒温带针叶林区外,其余六个植被分区的回归系数都显著小于 0,说明在其他条件保持不变的情况下,这些植被分区的森林生态系统服务价值均与对照组(亚热带常绿阔叶林区)有显著差异,因此

亚热带常绿阔叶林区的单位面积价值最高。寒温带针叶林区的回归系数为正但不显著,可能原因在于其研究样本数过小(仅有 6 个价值观察值)。对比各回归系数可知,温带荒漠区和高寒植被区的单位面积价值明显低于其他类型。

(3)森林面积:森林面积的回归系数显著小于 0( $P<0.01$ ),说明森林生态系统服务价值随面积增加存在边际效应递减的现象。在其他条件不变的情况下,森林面积增加,总价值也增加,但单位面积价值减小。森林面积每增加 10%,单位面积价值减少 1.7%。

(4)森林丰度:森林丰度的回归系数显著小于 0( $P<0.05$ ),说明在其他条件不变的情况下,周边其他森林面积的增加会造成研究区单位面积价值的降低,这可能与生态系统服务供给的替代效应有关。50 km 范围内其他森林的面积每增加 10%,研究区的单位面积价值减少 0.6%。

(5)铁路长度:铁路长度的回归系数显著小于 0( $P<0.1$ ),说明在其他条件不变的情况下,铁路修建对研究区单位面积的生态系统服务价值存在显著的负面效应。50 km 范围内的铁路长度每增加 10%,单位面积价值将减少 0.6%。

(6)人口数量:人口数量的回归系数为负,但与 0 没有显著差异。人口数量的持续增加可能造成生态系统功能的退化,使得森林单位面积的价值降低。

(7)人均 GDP:人均 GDP 的回归系数显著小于 0( $P<0.05$ ),说明在其他条件不变的情况下,研究区所在地级市的人均 GDP 越高,森林单位面积价值越低,经济的发展可能造成生态系统功能的衰退。人均 GDP 每增加 10%,单位面积价值减少 2.7%。

## 2.2 模型误差评估

首先计算样本内误差。根据公式计算得到,样本内误差的范围为 0—38.6%,平均误差为 9.92%。其中,11%的观察值的转移误差大于 20%,59%的观察值的转移误差小于 10%。

然后利用留一法交叉验证对样本外误差进行评估,得到误差范围为 0.015%—59.08%,平均误差为 11.57%,均大于样本内误差。这种情况与预期相符<sup>[22]</sup>。其中,55%的观察值的转移误差小于 10%,仅有 2%的观察值的转移误差大于 40%。国外研究表明,价值转移的平均误差在 20%—40%之间是可以接受的<sup>[23-24]</sup>。对于本文而言,样本外转移误差的平均值为 11.57%,说明通过面板数据回归方法构建的 meta 分析价值转移方程的整体模拟精度较高<sup>[10]</sup>。

将价值观察值按升序排列,得到模型预测值和转移误差的变化情况如图 4 所示。上图反映了模型预测值相对价值观察值的变化情况,可以看出当价值观察值较小时,模型预测值偏高,且偏离程度较大;而价值观察值较大时,模型预测值偏低,偏离程度和数据波动幅度逐渐降低。从下图可以看出,随着价值观察值的增大,转移误差呈现下降趋势。

将样本外转移误差分别对生态系统服务类型和植被区划进行回归(常数项为 0)(表 3、表 4)。对于不同的生态系统服务类型,水源涵养的转移误差最小,森林游憩、营养累积的转移误差较大;在各植被区划中,亚热带常绿阔叶林区的转移误差最小,寒温带针叶林区和温带荒漠区的转移误差最大。对照 meta 回归模型的结果可知,生态系统服务价值高的类型转移误差较小,而生态系统服务价值低的类型转移误差较大,这也进一步证实了转移误差与价值观察值之间的关系。

## 3 中国森林 2010—2100 年价值变化评估

本文采用黎夏等<sup>[25]</sup>构建的 2010—2100 年全球 1 km 土地覆被变化数据集。此套数据集基于 IMAGE 模型和细胞自动机模型建立,并根据 IPCC SRES 中的四类情景——A1B、A2、B1、B2<sup>[25]</sup>对 2010—2100 年间不同土地利用类型的演化过程进行模拟,其中基线情景为 2010 年。A1B 属于 A1 情景中各类能源均衡发展的子情景。

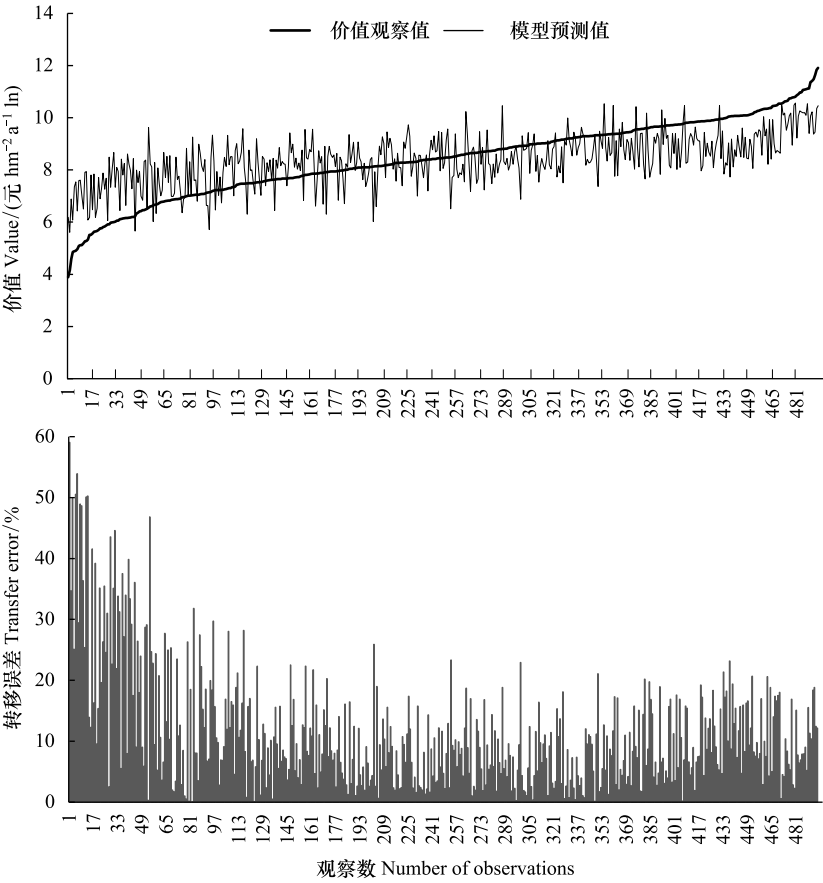


图 4 价值观察值、预测值和转移误差(价值观察值按升序排列)  
Fig.4 Observed value, predicted value and transfer error (ranked in ascending order of observed value)

表 3 转移误差对生态系统服务类型的回归结果

Table 3 Regression results of transfer error on ecosystem service types

| 变量<br>Variable                             | 系数 <sup>a</sup><br>Coefficient | 标准差<br>Standard deviation |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 营养累积 Nutrient storage                      | 0.141 ***                      | 0.014                     |
| 生物多样性保护 Biodiversity conservation          | 0.099 ***                      | 0.013                     |
| 林果产品 Forest products                       | 0.129 ***                      | 0.014                     |
| 水源涵养 Water conservation                    | 0.086 ***                      | 0.014                     |
| 土壤保持 Soil conservation                     | 0.141 ***                      | 0.011                     |
| 固碳释氧 Carbon fixation and oxygen production | 0.096 ***                      | 0.010                     |
| 森林游憩 Forest recreation                     | 0.153 ***                      | 0.013                     |
| 空气净化 Air purification                      | 0.089 ***                      | 0.012                     |

$R^2=0.6046, F=93.0956 (P<0.01)$ ; a显著性水平: 0.01 ‘\*\*\*’

本文从中提取了中国森林数据集,利用 meta 回归模型计算不同情景下生态系统服务价值的变化情况,结果如表 5 所示。2010 年,全国森林面积为 1.66 亿公顷,生态系统服务总价值为 26.26 万亿元。对于四类情景,森林面积和生态系统服务总价值随时间的变化呈现相同的趋势。在情景 A1B 和 B1 下,森林面积和生态系统服务总价值持续增加,至 2100 年,总价值分别达到 41.06 万亿元和 41.58 万亿元。在情景 A2 下,森林面积和生态系统服务总价值则持续下降,2010—2050 年总价值平均每年减少 67.85 亿元,而 2050—2100 年平均每年减少 75.51 亿元。而在情景 B2 下,森林面积和生态系统服务总价值先上升后下降,2100 年的森林总价值

仅为 22.97 万亿元。总的来说,对于中国森林生态系统而言,B1 情景为最优发展路径,而 B2 情景下生态系统服务总价值的损失最大。

表 4 转移误差对植被区划的回归结果  
Table 4 Regression result of transfer error on vegetation zoning

| 变量<br>Variable                                                   | 系数 <sup>a</sup><br>Coefficient | 标准差<br>Standard deviation |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 亚热带常绿阔叶林区 Subtropical evergreen broadleaf forest region          | 0.106 ***                      | 0.006                     |
| 寒温带针叶林区 Cold temperate deciduous needleleaf forest               | 0.159 ***                      | 0.040                     |
| 温带针阔叶混交林区 Temperate mixed needleleaf and broadleaf forest region | 0.140 ***                      | 0.016                     |
| 暖温带落叶阔叶林区 Warm temperate deciduous broadleaf forest              | 0.117 ***                      | 0.010                     |
| 热带季雨林、雨林区 Tropical monsoon rain forest and rain forest region    | 0.109 ***                      | 0.018                     |
| 温带草原区 Temperate steppe region                                    | 0.115 ***                      | 0.016                     |
| 温带荒漠区 Temperate steppe region                                    | 0.144 ***                      | 0.020                     |
| 高寒植被区 Plateau high-cold region                                   | 0.137 ***                      | 0.019                     |

$R^2 = 0.5860, F = 86.1544 (P < 0.01)$ ; a显著性水平:0.01 ‘\*\*\*’

表 5 不同情景下中国森林面积和生态系统服务价值变化情况(2010—2100 年)  
Table 5 Change in forest area and value in China under different scenarios (2000—2050)

| 情景 Scenarios         | 年份 Year | 面积 Area/(亿 hm <sup>2</sup> ) | 总价值 Value/(万亿元) |
|----------------------|---------|------------------------------|-----------------|
| 基线 Baseline scenario | 2010    | 1.66                         | 26.26           |
| A1B 情景               | 2050    | 2.02                         | 30.85           |
| Scenario A1B         | 2100    | 3.16                         | 41.06           |
| A2 情景                | 2050    | 1.55                         | 25.98           |
| Scenario A2          | 2100    | 1.17                         | 23.58           |
| B1 情景                | 2050    | 2.26                         | 33.53           |
| Scenario B1          | 2100    | 3.29                         | 41.58           |
| B2 情景                | 2050    | 1.75                         | 27.41           |
| Scenario B2          | 2100    | 1.50                         | 22.97           |

A1B 情景:人口低速增长;蔓延型城市;经济超高速增长;技术革新迅速;生物燃料需求强,各种能源均衡发展。A2 情景:人口高速增长;蔓延型城市;经济中速增长;技术革新缓慢;生物燃料需求较低。B1 情景:人口低速增长;紧凑型城市;经济高速增长;技术革新较慢;能源整体消耗少,生物燃料需求低。B2 情景:人口中速增长;紧凑型城市;经济中速增长;技术革新较慢;能源整体消耗较少,生物燃料消耗低

4 结论与讨论

4.1 讨论

根据 meta 回归模型的结果,各生态系统服务类型的价值大小为涵养水源>生物多样性保护>固碳释氧>土壤保持>空气净化>林果产品>森林游憩>营养累积,与王兵等<sup>[2]</sup>对中国森林生态系统的价值评估结果一致(没有考虑林果产品和森林游憩)。对于各植被区划,森林单位面积价值大小为亚热带常绿阔叶林区>暖温带落叶阔叶林区>热带季雨林、雨林区>温带针阔叶混交林区>温带草原区>高寒植被区>温带荒漠区(未考虑寒温带针叶林区)。对照余新晓等<sup>[26]</sup>的研究结果,本文中除热带季雨林、雨林区的价值偏小,其他区域的森林单位面积价值大致符合“南高北低、东高西低”的特征。造成这一差异的原因可能在于前者仅计算了水源涵养、固碳释氧、营养累积、空气净化和土壤保持五类服务的价值,而本文同时还考虑了生物多样性保护、林果产品和森林游憩提供的生态系统服务价值。因此综合而言,本文选取的样本点具有较好的代表性,meta 回归结果与中国森林生态系统的整体情况大体相符。

森林生态系统服务供给的替代效应会影响森林的价值,附近其他森林的面积越大,研究区森林的单位面积价值越小。此结论与漆信贤等<sup>[10]</sup>的研究结果相反,可能原因在于其采用虚拟变量表示周边区域其他森林

的存在性(若存在为 1, 否则为 0), 而没有考虑森林面积的变化对价值评估的影响。此外, 对于不同的生态系统, 同类集聚所产生的效应方向及大小也存在差异。例如 Brander 等<sup>[5]</sup>的研究结果表明红树林的互补效应使得同类生态系统的集聚有利于提高单位面积价值, 弹性系数为 0.248; Brander 等<sup>[27]</sup>和张玲等<sup>[6]</sup>则发现淡水湿地和湖沼湿地的集聚均呈现替代效应, 弹性系数分别为-0.3 和-0.2。

道路修建加速了森林景观的破碎化, 对生态系统服务价值存在显著的负面影响, 这与 Brander 等<sup>[5]</sup>的结论一致。近年来, 随着森林旅游行业的蓬勃发展, 各类交通基础设施的修建一方面为当地政府和林业管理部门带来了巨大的经济效益, 另一方面也造成了生态环境的退化和生态系统服务价值的损失。对于生物多样性保护而言, 这种影响尤为显著, 主要表现为栖息地破碎化阻碍物种的散布和迁移<sup>[28]</sup>、森林斑块面积缩小制约物种分布<sup>[29-30]</sup>、动植物资源的过度开发利用等<sup>[31]</sup>。因此, 在道路修建过程中应尽可能地降低景观破碎化的影响, 平衡生态保护与发展需求, 维持生态系统的完整性。

通过将价值观察值按升序排列, 注意到随着观察值的增大, 模型预测值由高估逐渐过渡为低估, 转移误差趋向减小。这一结果与 Chaikumbung 等<sup>[16]</sup>(湿地生态系统)、Salem 等<sup>[18]</sup>(红树林生态系统)和 Brander 等<sup>[22]</sup>(湿地生态系统)的研究结果一致。目前对于这一现象尚没有合理的解释, 但可作为价值转移过程中的参考。例如, 根据转移误差对生态系统服务类型和植被区划的回归结果可知, 当利用 meta 回归模型评估亚热带常绿阔叶林区的森林价值或水源涵养的价值时, 转移误差较小, 估算结果较为准确; 而当评估温带荒漠区的森林价值或营养累积、森林游憩的价值时, 转移误差较大, 对待估算结果应多加谨慎。

## 4.2 结论

本文通过文献检索与筛选、评估体系建立、研究信息提取、基年校准等步骤, 建立了中国森林生态系统的 meta 分析价值转移数据库; 在此基础上, 通过比较不同回归方法的结果, 选择面板数据回归方法建立了 meta 分析价值转移模型, 对森林价值的影响因素和模型有效性进行评估, 并对中国森林生态系统的价值变化进行实证分析。主要结论如下:

(1) 面板数据回归模型能够有效揭示中国森林生态系统服务的价值转移规律。根据 meta 回归结果, 本文选取的自变量可以解释约 48% 的价值变化, 其中生态系统服务类型、植被区划、森林面积、森林丰度、人均 GDP 和铁路长度均对森林生态系统服务价值存在显著影响。

(2) 利用留一法交叉验证得到价值转移误差的范围为 0.015%—59.08%, 平均误差为 11.57%, 模型的整体有效性较高。但对于不同的价值观察值, 转移误差存在较大差异。若森林生态系统服务价值较低, 则模型预测值偏大, 且转移误差较大; 反之, 则模型预测值偏小, 转移误差也较小。

(3) 中国森林生态系统 2010—2100 年的价值转移研究表明, 森林面积和总价值的变化趋势一致, 但不同情景下的具体情况有所差异。其中情景 B1 下总价值的增长最为显著, 而情景 B2 下的价值损失量最大。

meta 分析是对已有的研究结果进行定量综合和变异来源分析<sup>[32]</sup>的一种方法, 因此基于 meta 分析的价值转移方法的有效性很大程度上取决于已有实证研究的数量和质量<sup>[6, 33]</sup>。中国的森林生态系统服务价值评估相对于国外研究而言起步较晚<sup>[10]</sup>, 2005 年后相关文献的发表数量迅速增加, 但寒温带针叶林区和高寒植被区的研究数量仍相对较少。此外, 在《规范》颁布前, 中国森林生态系统服务价值评估的指标体系、评估公式等尚未统一, 导致评估结果不具有可比性<sup>[2]</sup>, 或在筛选过程中因信息不足而被剔除<sup>[33]</sup>。为了促进 meta 分析在中国生态系统服务价值评估中的应用, 未来除了进一步提高实证研究的数量和质量, 还应推动 meta 分析数据共享平台的建立, 为生态系统价值转移研究和价值评估提供数据支撑。

## 参考文献 (References):

- [1] 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. 地理学报, 2014, 69(3): 334-342.
- [2] 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. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153.
- [3] 韦惠兰, 祁应军. 森林生态系统服务功能价值评估与分析. 北京林业大学学报, 2016, 38(2): 74-82.
- [4] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- [ 5 ] Brander L M, Wagtendonk A J, Hussain S S, McVittie A, Verburg P H, de Groot R S, van der Ploeg S. Ecosystem service values for mangroves in Southeast Asia: A meta-analysis and value transfer application. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 62-69.
- [ 6 ] 张玲, 李小娟, 周德民, 张翼然. 基于 Meta 分析的中国湖沼湿地生态系统服务价值转移研究. *生态学报*, 2015, 35(16): 5507-5517.
- [ 7 ] Brander L M, Bräuer I, Gerdes H, Ghermandi A, Kuik O, Markandya A, Navrud S, Nunes P A L D, Schaafsma M, Vos H, Wagtendonk A. Using meta-analysis and GIS for value transfer and scaling up: valuing climate change induced losses of European wetlands. *Environmental and Resource Economics*, 2012, 52(3): 395-413.
- [ 8 ] Rosenberger R S, Stanley T D. Measurement, generalization, and publication: Sources of error in benefit transfers and their management. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 372-378.
- [ 9 ] 张雅昕, 刘娅, 朱文博, 李双成. 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. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 493-504.
- [ 10 ] 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. *地理科学*, 2018, 38(4): 522-530.
- [ 11 ] 李庆波. 基于效益转移法的三江平原湿地生态保护价值评估[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [ 12 ] 李庆波, 敖长林, 袁伟, 高琴. 基于中国湿地 CVM 研究的 Meta 分析. *资源科学*, 2018, 40(8): 1634-1644.
- [ 13 ] 徐贤君. 基于 meta 分析法的滇池湿地价值评估[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- [ 14 ] 杨玲, 孔范龙, 郝敏, 李悦, 王森. 基于 Meta 分析的青岛市湿地生态系统服务价值评估. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 1038-1046.
- [ 15 ] Schägner J P, Brander L, Paracchini M L, Maes J, Gollnow F, Bertzky B. Spatial dimensions of recreational ecosystem service values: a review of meta-analyses and a combination of meta-analytic value-transfer and GIS. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 395-409.
- [ 16 ] Chaikumbung M, Doucouliagos H, Scarborough H. The economic value of wetlands in developing countries: a meta-regression analysis. *Ecological Economics*, 2016, 124: 164-174.
- [ 17 ] Ghermandi A, van den Bergh J C J M, Brander L M, de Groot H L F, Nunes P A L D. Values of natural and human-made wetlands: a meta-analysis. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12516.
- [ 18 ] Salem M E, Mercer D E. The economic value of mangroves: a meta-analysis. *Sustainability*, 2012, 4(3): 359-383.
- [ 19 ] De Salvo M, Signorello G. Non-market valuation of recreational services in Italy: a meta-analysis. *Ecosystem Services*, 2015, 16: 47-62.
- [ 20 ] Reynaud A, Lanzaova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. *Ecological Economics*, 2017, 137: 184-194.
- [ 21 ] Nelson J P, Kennedy P E. The use (and abuse) of meta-analysis in environmental and natural resource economics: an assessment. *Environmental and Resource Economics*, 2009, 42(3): 345-377.
- [ 22 ] Brander L M, Florax R J G M, Vermaat J E. The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. *Environmental and Resource Economics*, 2006, 33(2): 223-250.
- [ 23 ] Brouwer R. Environmental value transfer: state of the art and future prospects. *Ecological Economics*, 2000, 32(1): 137-152.
- [ 24 ] Ready R, Navrud S. International benefit transfer: methods and validity tests. *Ecological Economics*, 2006, 60(2): 429-434.
- [ 25 ] Li X, Chen G Z, Liu X P, Liang X, Wang S J, Chen Y M, Pei F S, Xu X C. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5): 1040-1059.
- [ 26 ] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [ 27 ] Brander L, Brouwer R, Wagtendonk A. Economic valuation of regulating services provided by wetlands in agricultural landscapes: a meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2013, 56: 89-96.
- [ 28 ] 林世滔, 谢弟炳, 刘郁林, 陈文波. 景观格局特征与区域生物多样性的关系研究. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1681-1688.
- [ 29 ] Horak J, Peltanova A, Podavkova A, Safarova L, Bogusch P, Romportl D, Zasadil P. Biodiversity responses to land use in traditional fruit orchards of a rural agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 178: 71-77.
- [ 30 ] Matthews T J, Cotee-Jones H E W, Whittaker R J. Quantifying and interpreting nestedness in habitat islands: a synthetic analysis of multiple datasets. *Diversity and Distributions*, 2015, 21(4): 392-404.
- [ 31 ] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 人类周期性活动对物种多样性的影响及其预测. *生态学报*, 2005, 25(7): 1635-1641.
- [ 32 ] Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, Stewart G. Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature*, 2018, 555(7695): 175-182.
- [ 33 ] 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. *资源科学*, 2011, 33(1): 31-40.