

DOI: 10.5846/stxb202003210632

刘业轩, 石晓丽, 史文娇. 福建省森林生态系统水源涵养服务评估: InVEST 模型与 meta 分析对比. 生态学报, 2021, 41(4): 1349-1361.

Liu Y X, Shi X L, Shi W J. Evaluation of water retention services of forest ecosystems in Fujian Province: Comparison between results from the InVEST model and meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1349-1361.

福建省森林生态系统水源涵养服务评估: InVEST 模型与 meta 分析对比

刘业轩^{1,2,4}, 石晓丽^{2,4}, 史文娇^{1,3,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

4 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024

摘要: 生态系统水源涵养服务评估已存在基于不同原理和数据源的多种评价方法, 然而, 不同方法造成的评估结果异同尚缺乏系统性量化比较。为了揭示不同评估机制对同一地区产生的影响, 分别采用“点数据-综合蓄水能力法-meta 分析”和“面数据-水量平衡法-InVEST 模型”两套方法体系对福建省森林水源涵养服务状况进行对比评估。结果显示: InVEST 模型模拟的水源涵养能力年均值为 529.62 mm, 涵养总量 $236.18 \times 10^8 \text{ m}^3$; meta 分析法估算的能力均值为 653.68 mm, 涵养总量 $291.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水源涵养能力表现出相当大的空间差异, 随海拔升高呈递增趋势, 西部、北部山地高于东南沿海平原。InVEST 模型侧重气象、地形和土坡覆被因素, meta 分析侧重林分条件, 因此同一森林类型不同方法的涵养能力存在显著差异。结合点尺度分析, 造成结果差异的不确定性包括水源涵养相关参数定义的多样化、测量方法及误差以及系数本地化水平。分析自上而下的 InVEST 模型与自下而上的 meta 分析两类方法的特点和机理, 为不同区域研究选择适宜的评估方法提供借鉴, 有助于完善生态系统水源涵养服务评估的理论和技術。

关键词: 福建; 森林; 水源涵养; InVEST 模型; meta 分析

Evaluation of water retention services of forest ecosystems in Fujian Province: Comparison between results from the InVEST model and meta-analysis

LIU Yexuan^{1,2,4}, SHI Xiaoli^{2,4}, SHI Wenjiao^{1,3,*}

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang 050024, China

Abstract: Water retention (WR) services of ecosystems can be evaluated using various methods based on different theories and data sources. However, there was still no quantitative comparison to comprehensively evaluate the variations and consistencies of results from different methods. To determine the influences of different methods, we used two methods,

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604703); 河北省自然科学基金(D2019205123); 中国科学院青年创新促进会(会员号:2018071); 自然资源部调查监测项目(JCQQ191504-06)

收稿日期: 2020-03-21; **网络出版日期:** 2020-12-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiwj@lreis.ac.cn

including ‘site data-comprehensive storage capacity method-meta-analysis’ and ‘spatial data-water balance method-InVEST model’, to compare forest WR services in Fujian Province, China. The results showed that the mean annual capacity of WR was 529.62 mm (653.68 mm), and the total amount of WR was $236.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ ($291.07 \times 10^8 \text{ m}^3$) from the InVEST model (meta-analysis). The WR capacities showed a large spatial variation, which were higher in the western and northern mountains than in the southeastern coastal plain. Meteorological, topographical and land cover factors were considered in the InVEST model, whereas specific stand conditions were applied in the meta-analysis. Therefore, the results of WR capacities from different methods in the same forest cover were different. In addition, we also conducted a site-scale analysis, and found the uncertainty sources of results were from multiple definitions of WR parameters, inconsistent measurement methods, measurement errors, and differences of coefficient localization. Our findings provide references for selecting appropriate evaluation methods in different regional studies and improving the theory and technology of evaluation in ecosystem WR services.

Key Words: Fujian; forest; water retention; InVEST model; meta-analysis

由于人类过度开发活动的影响,生态问题日益严峻,生物多样性和生态系统服务政府间科学平台(IPBES)提出,生态系统服务是人类赖以生存和发展的基础,如何将生态系统服务纳入管理决策是目前保障区域生态安全面临的重大科学问题^[1]。水源涵养服务属于生态系统服务中的调节服务,生态系统对降水进行时空再分配,减少无效水,增加有效水,体现植被对水资源的养护。森林生态系统是以乔木为主体的生物群落及其非生物环境(光、热、水、气、土壤等)组成的复杂系统,是涵养水源能力最强的陆地自然生态系统,对改善局地气候、调节水资源、净化水质、保持水土、以及人类健康都具有重要意义^[2]。具体来讲,森林乔木及其地被物的水文作用主要体现在拦截降水和增加地表粗糙度,从而减缓流速、减少径流;森林根系层的水文作用体现在增加下渗,从而为森林生态系统贮存更多的水量。

生态系统水源涵养服务评估原理主要有水量平衡法、降雨贮存法、蓄水能力法等。水量平衡法适用于所有时空尺度,数据处理方法简单易于操作,是目前评估水源涵养服务最有效和应用最广泛的方法^[3]。该方法将降水量与蒸散量、径流量的差视为水源涵养量,缺点是忽略了地表水和地下水的相互作用^[4]。采用降雨贮存法的研究较少,该方法是以前森林生态系统比裸地增加的涵养水分来表示水源涵养能力^[5],所需数据包括降雨量、产流降雨量、林地降雨径流率、裸地降雨径流率,邵全琴等^[6]以极度退化状态下残留植被的降雨径流率代替裸地降雨径流率,更接近自然条件下的实际植被状态。蓄水能力法包括土壤蓄水能力法、林冠截留剩余量法和综合蓄水能力法等。土壤蓄水能力法假设水源涵养量是雨水降落到林地后渗入土壤的蓄水量,忽视了森林其他作用层的水源涵养能力,可能造成评估结果偏低;林冠截留剩余量法假设水源涵养量等于降水量和林冠截留量之差,忽视蒸散及径流因素,高估了实际水源涵养量^[7];综合蓄水能力法则综合考虑了森林冠层最大截留能力、枯落物层最大持水能力、土壤层最大蓄水能力,在传统计量方法中效果最为理想^[8]。此外,还有一些研究侧重森林冠层水量平衡关系,探究森林结构、林分类型、不同生长阶段、不同疏伐条件等对冠层截留量、穿透量、茎流量和蒸腾量的动态变化^[9-11]。

不同评估原理以不同的数据源、技术作为支撑。土壤蓄水能力法、林冠截留剩余量法、综合蓄水能力法利用生态水文站点实测数据,自下而上地分析森林水源涵养状况。由于人力物力的限制,无法在大范围内建立密集的监测站点,仅适用于小尺度区域研究。针对这一问题,一些研究借鉴了 meta 分析法,从大量文献资料中广泛收集具备特定条件、相同研究领域的诸多研究结果,在全国尺度^[12]和区域尺度^[13-14]进行综合统计分析,弥补蓄水能力法在适用尺度方面的缺陷。水量平衡法和降雨贮存法可采用空间栅格数据,自上而下地研究大尺度区域水源涵养服务;基于水量平衡法的水源涵养服务评估还可以运用生态系统服务和权衡综合评估(InVEST)模型的产水量(Water Yield)模块来实现,模型使用现有数据产品中的空间数据和文献、研究成果中的非空间生物物理数据,能够将土地覆被数据与不同空间尺度的服务数据相结合^[15],已在国家、流域等尺度

成功应用于产水量分析^[16]、水源涵养服务时空变化^[17-20]及其影响因素^[21]、功能价值评估及其调控等方面^[22]。目前已存在对各原理的综述性文献^[7],但缺乏对不同评价方法^[22-23]和不同尺度^[17-20]的研究成果之间的定量对比。由于每个方法纳入的参数不尽相同,参考单一方法研究结果的不确定性大,亟待讨论不同评价方法的结果差异其原因。

福建省森林覆盖率居全国之首,是我国降水量、水资源量最丰沛的地区之一,也是我国水源涵养重点保护区。2017年,福建省新增9个水源涵养国家重点生态功能区,分别为永泰县、泰宁县、永春县、华安县、武夷山市、屏南县、寿宁县、周宁县、柘荣县,因此选择福建省作为评估森林水源涵养服务的研究区。本文应用气象、土壤等空间栅格数据和站点实测数据两种数据,采用 InVEST 模型和 meta 分析两种技术手段,对水量平衡法和综合蓄水能力法的水源涵养服务进行定量对比研究,旨在探寻不同评估方法下的水源涵养服务评估差异与一致性,明确不同评估方法侧重的环境影响因素,分析各方法特点及相互关系,在具体的森林水源涵养研究中,对从两套方法体系中选择合适的评估方法原理提供参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区

福建省位于中国东南沿海(23°33'—28°20' N, 115°50'—120°40' E)。地形以山地丘陵为主,闽西的武夷山以及闽中的鹞峰山、戴云山、博平岭构成了福建省的地形骨架(图1),闽东沿海地区分布有小块平原,包括福州平原、莆田平原、泉州平原、漳州平原^[24],形成了“八山一水一分田”的地貌特征。受地形和东南季风的影响,福建省形成了暖热湿润的亚热带海洋性季风气候,年平均气温 17—21℃,年平均降水量 1400—2000 mm。福建省水系密布,河流众多,流域面积在 5000 km² 以上的河流有闽江、九龙江、晋江、交溪、汀江。该地区地带性植被主要以亚热带季雨林和中亚热带常绿林为主;常绿针叶林多为中国特有树种,包括马尾松、黄山松、柳杉、福建柏、油杉等;常绿阔叶林以壳斗科和樟科种类最多,金缕梅科、木兰科、蝶形花科、桑科、桃金娘科、夹竹桃科、山龙眼科、石楠科等也占有相当重要的地位,其中许多种类是福建省森林植被的建群种、优势种。该地区土壤按发生学分类分为赤红壤、红壤、黄壤等 14 个土类^[25],适宜林木生长。

福建省森林资源丰富,保护地体系健全。根据国家林业和草原局公布的第九次全国森林资源清查结果,截至 2018 年,福建省森林面积 1.21 亿 hm²,森林蓄积量 7.29 亿 m³,森林覆盖率已达 66.80%,远远超过全国森林覆盖率 22.96%,连续 40 年居全国首位^[26]。现有自然保护区 93 个(其中国家级 17 个),世界遗产名录 2 个(武夷山世界文化与自然双遗产和泰宁世界自然遗产),全国首批国家公园体制试点 1 个(武夷山国家公园)。

1.2 数据

本文数据可归纳为点数据(站点观测数据、室内测试数据)和空间数据(数字制图数据、遥感数据)。

1.2.1 InVEST 模型数据

InVEST 模型所需空间数据用于产水量模拟、系数赋值以及水源涵养能力空间化,具体见表 1。本文利用 2010—2017 年福建省 38 个气象台站的日值温度、降水、风速、日照时数、大气压、相对湿度数据,根据 Penman-Monteith 公式(见 1.3.1 部分)计算出年均潜在蒸散,与通常采用的 Hargreaves 公式相比,考虑了更多的气象

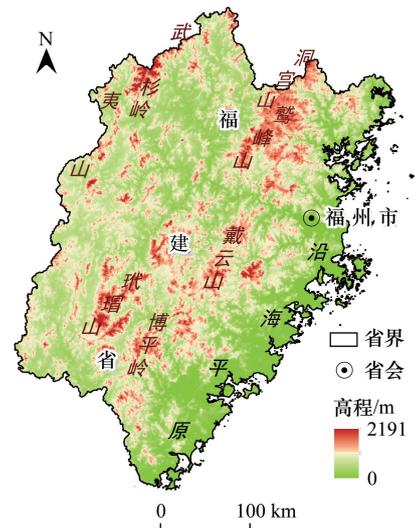


图1 研究区高程分布

Fig.1 Elevation distribution of the study area

要素;再利用 ANUSPLIN 工具将年均降水及年均潜在蒸散插值为空间栅格数据。MCD12Q1 土地覆被数据显示(图 2),福建省森林类型中常绿阔叶林的分布面积最大,占全省森林面积的 87.4%,混交林占比 10.8%,常绿针叶林占比 1.8%,落叶阔叶林分布面积积极小。InVEST 模型所需流速系数^[20]及蒸散系数^[27]根据土地覆被类型赋值为空间数据。

1.2.2 meta 分析数据

meta 分析所需数据来源于已发表的文献资料中的站点实测数据,主要包括研究区森林立地信息(经纬度、年均温、蒸散发、林分类型、林分密度、林龄、土壤类型等)和森林水源涵养关键参数(林冠截留率、枯落物蓄积量、枯落物最大持水率、土壤厚度、土壤非毛管孔隙度等)。本文搜集整理了以福建森林生态系统水源涵养服务为研究对象,且基于综合蓄水能力法的文献数据集^[28-29]。最终筛选出符合数据要求的文献 134 篇,发表时间 1992—2019 年;观测试验 506 个观测时间 1988—2017 年,其中 2000—2017 年进行观测的站点占 90.78%,2010—2017 年进行观测的站点占 68.63%。林层结构包括森林冠层、枯落物层、土壤层,一些站点观测了两层或三层数据,其中森林冠层 71 条,枯落物层 285 条,土壤层 381 条(图 2)。

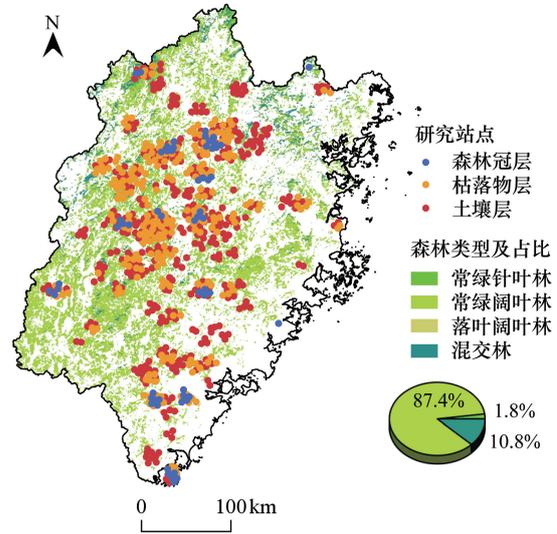


图 2 研究区森林类型及文献提取的站点分布

Fig. 2 Forest cover types in the study area and site distributions extracted from the literature

表 1 空间数据及其来源

Table 1 Spatial data and their sources

空间数据 Spatial data	分辨率 Resolution	数据来源 Data source
降水及潜在蒸散 Precipitation and potential evapotranspiration	250 m	国家气象科学数据中心 / 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)
土壤厚度 Soil depth	250 m	World Soil Information Service / Soil Profile Database 数据库
土壤砂粒含量、土壤粉粒含量、土壤黏粒含量、土壤有机质含量 Sand, Silt, Clay, Soil organic matter	250 m	World Soil Information Service / Soil Profile Database 数据库
土地覆被 Land cover	500 m	NASA / MODIS 产品 MCD12Q1 土地覆被数据
流域 Watershed	三级流域	中国科学院资源环境科学数据中心 / 中国三级流域空间分布数据
高程 Elevation	30 m	地理空间数据云 / GDEMDEM 数字高程数据
百分比坡度 Percentage slope	30 m	利用 ArcGIS 软件根据 GDEMDEM 数字高程数据转换得到
行政区划 Administrative boundary	市级	中国科学院资源环境科学数据中心 / 2015 年中国地市级行政边界数据

1.3 技术与方法

基于上述空间数据及文献数据,本文采用两条技术路线评估福建省森林地区水源涵养服务(图 3)。

1.3.1 InVEST 模型

产水量为降水量减去实际蒸发量后地表及地下的剩余水量,水源涵养能力为产水量减去土壤水分饱和后流失的径流量的剩余部分。首先利用气象、土壤和土地覆被数据计算产水量,再结合流速、地形和土壤渗透性

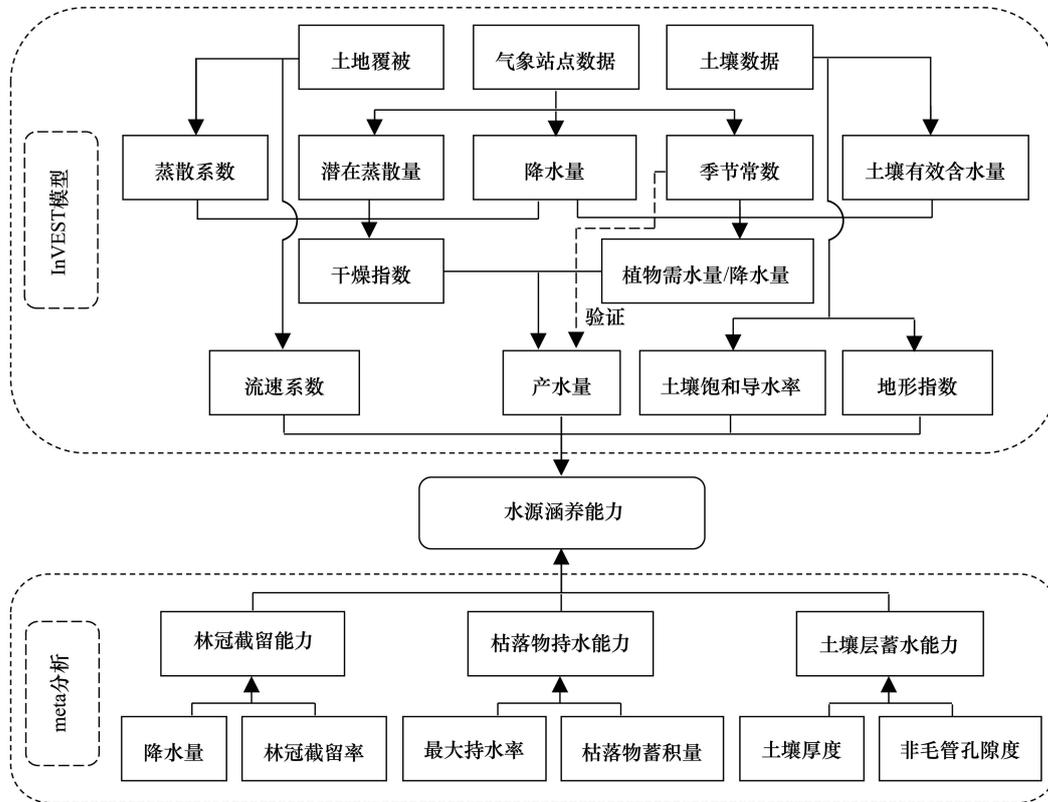


图3 基于两种方法的水源涵养服务评估技术路线

Fig. 3 Technical route of water retention service evaluation based on two methods

因素对产水量进行修正,从而得到水源涵养能力值,计算公式为:

$$WR_{jx} = \text{Min}(1, \frac{249}{\text{Velocity}_j}) \times \text{Min}(1, \frac{0.9 \times TI_x}{3}) \times \text{Min}(1, \frac{K_{\text{sat}x}}{300}) \times Y_{jx}$$

式中, WR_{jx} 为土地覆被类型 j /像元 x 处的年均水源涵养能力 (mm); Velocity_j 为土地覆被类型 j 处的流速系数,无量纲,表示不同土地利用类型对地表径流的影响; TI_x 为像元 x 处的地形指数,利用集水区栅格数、土层厚度 (mm) 及百分比坡度 (%) 计算得到; $K_{\text{sat}x}$ 为像元 x 处的土壤饱和导水率 (%),利用土壤砂粒含量 (%),土壤粘粒含量 (%),根据土壤传递函数 Cosby 模型计算得到; Y_{jx} 为土地覆被类型 j /像元 x 处的年均产水量 (mm)。

$$Y_{jx} = (1 - \frac{\text{AET}_{jx}}{P_x}) \times P_x$$

式中,产水量 Y_{jx} 利用 InVEST 3.8.0 产水量模块计算,即年均降水量 P_x (mm) 与年均实际蒸散量 AET_{jx} (mm) 之差。

$$\frac{\text{AET}_{jx}}{P_x} = 1 + \frac{k_j \times \text{PET}_x}{P_x} - [1 + (\frac{k_j \times \text{PET}_x}{P_x})^\omega]^\frac{1}{\omega}$$

蒸散部分根据干燥指数计算得出。其中, k 为土地覆被类型 j 处的蒸散系数; PET_x 为像元 x 处的年潜在蒸散量 (mm); ω 为植物需水量与降水量的比值,是描述自然气候与土壤性质的参数。

$$\text{PET}_x = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

PET_x 根据 Penman-Monteith 公式计算,所需数据包括地表净辐射 R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),土壤热通量 G ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

湿度常数 γ (kPa/°C)、日平均温度 T (°C)、2m 处风速 U_2 (m/s)、饱和水汽压 e_s (kPa)、实际水汽压 e_a (kPa)、饱和水汽压-温度曲线斜率 Δ (kPa/°C)。

$$\omega = Z \times \frac{AWC_{jx}}{P_x} + 1.25$$

式中, AWC_{jx} 为土地覆被类型 j /像元 x 处的土壤有效含水量 (mm), 由土壤厚度 (mm)、根系深度 (mm)、土壤砂粒含量 (%)、土壤粉粒含量 (%)、土壤黏粒含量 (%)、土壤有机质含量 (%) 计算得到^[30]; Z 为季节常数, 代表降水时间的季节分布, 与年降水次数成正比。季节常数对模拟产水量的影响不可忽视, Budyko 曲线理论表明, 在干旱指数非常低或非常高的地区, 模型对常数的敏感性较低; 且常数值越高, 模型敏感性越低。

本文采用季节常数对产水量模拟结果进行校对, 遵循模拟结果最接近水资源总量的原则。水资源总量为降水所形成的地表和地下的总水量, 即河川径流量和降水入渗补给量之和, 与本文模型中的产水量概念一致。2010—2017 年, 福建省水资源公报^[31] 中的年均水资源总量为 $1349.211 \times 10^8 \text{ m}^3$; 经验证, 当季节常数为 11.5285 时, 年均产水量为 $1349.211 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 2), 最接近实际年均水资源总量。产水量模拟结果中, 厦门市、莆田市年均产水量低于 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$, 南平市、三明市年均产水量高于 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这与实际水资源量相符; 以年均水资源总量为基准, 全省除莆田市、漳州市外, 其他七市产水量模拟值误差在 9% 以内。

表 2 季节常数及产水量

Table 2 Seasonal constant and water yield

季节常数 Season constant	11.0000	11.5000	11.5200	11.5285	11.5300	11.6000	12.0000
产水量 Water yield/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	1351.665	1349.334	1349.248	1349.211	1349.205	1349.909	1347.343

1.3.2 meta 分析

该方法基于综合蓄水能力法原理, 从森林保水蓄水能力角度估算生态系统水源涵养能力, 综合考虑了植被与土壤对降水的拦蓄作用。垂直方向上由高到低纳入森林冠层、枯落物层、土壤层 3 个林层的涵养能力, 森林冠层截留能力、枯落物层持水能力和土壤层蓄水能力之和视为森林水源涵养能力 (图 3)。综合蓄水能力法计算公式如下:

$$WR_{jx} = CIC_{jx} + LWHC_{jx} + SSC_{jx}$$

式中, WR_{jx} 为土地覆被类型 j /像元 x 处的水源涵养能力 (mm); CIC_{jx} 为土地覆被类型 j /像元 x 处的森林冠层截留能力 (mm), 以年均降水量 (mm) 与年均林冠截留率 (%) 的乘积表示; $LWHC_{jx}$ 为土地覆被类型 j /像元 x 处的枯落物层持水能力 (mm), 以枯落物蓄积量 (t/hm^2) 与最大持水率 (%) 的乘积表示; SSC_{jx} 为土地覆被类型 j /像元 x 处的土壤层蓄水能力 (mm), 以土壤厚度 (mm) 与土壤非毛管孔隙度 (%) 的乘积表示。

meta 分析法水源涵养能力评估采用由数据点到栅格面的方式实现。首先, 按照流域及土地覆被类型将福建省进行分区, 保证每个区域内部具有较为相似的地形、水文、下垫面等环境要素条件; 其次, 本文提取的福建省观测站点数据在空间上分布较分散 (图 2), 保证每个区域都存在一定数量的观测数据。计算各区域的林冠截留率、枯落物最大持水能力及土壤非毛管孔隙度 3 项参数的多年平均值, 分别按照分区进行赋值, 得到参数空间化栅格图。进而依照综合蓄水能力法公式分别计算森林 3 个作用层的涵养能力, 在空间上叠加得到森林水源涵养能力空间化栅格图, 实现 meta 分析法水源涵养服务评估的空间化。

2 结果

2.1 不同地级市的水源涵养服务对比

两种方法估算的水源涵养服务能力空间分布趋势一致, 呈现由西部、北部向东南部沿海逐渐降低的空间格局 (图 4)。对比福建省地形可知, 南平市 (森林覆盖率 FC: 75.3%) 西部的武夷山、南平市与宁德市 (FC: 75%) 交接处的鹞峰山及洞宫山、龙岩市 (FC: 78%) 的玳瑁山是水源涵养服务能力高值区, 受地势起伏影响形成山地地形雨, 影响水源涵养能力值的大小; 福州市 (FC: 54.7%)、莆田市 (FC: 58.1%)、泉州市 (FC: 61%)、

厦门市(FC:45%)、漳州市(FC:63.4%)则位于沿海平原城市经济带,城市化极大地改变了下垫面,森林覆盖率低于西部北部市,是水源涵养服务能力低值区。

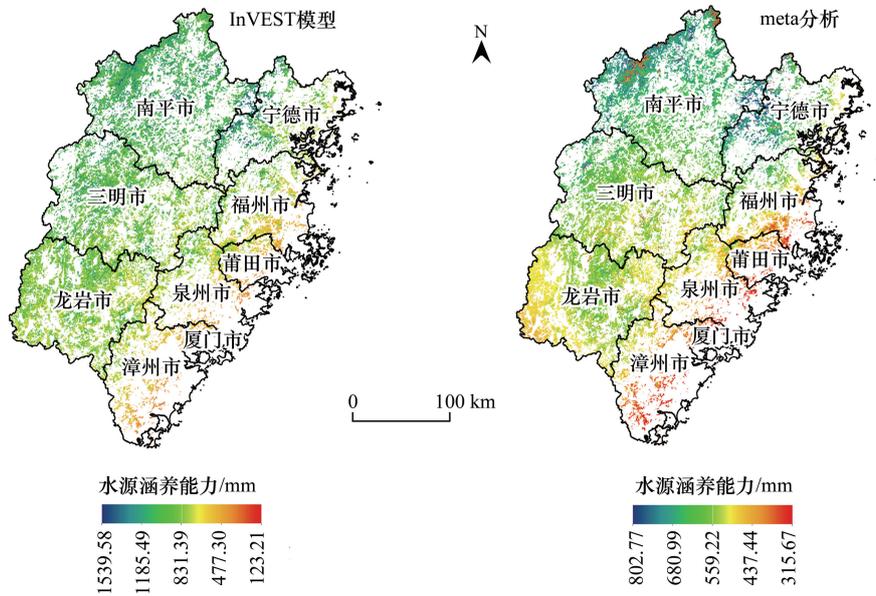


图 4 基于两种方法的水源涵养能力空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of water retention capacity based on two methods

表 3 各地级市水源涵养数值统计

Table 3 Statistics of water retention values of each prefecture-level city

城市 City	InVEST 模型 (I)				meta 分析 (M)				能力均值差(M-I) Mean difference/mm
	最小值 Min/mm	最大值 Max/mm	能力均值 Mean/mm	涵养量 Volume/ (10 ⁸ m ³)	最小值 Min/mm	最大值 Max/mm	能力均值 Mean/mm	涵养量 Volume/ (10 ⁸ m ³)	
南平市	371.13	1539.58	615.58	68.54	365.37	802.77	690.76	77.16	75.18
宁德市	277.42	1394.30	586.45	19.44	341.50	764.44	686.53	22.83	100.08
三明市	316.61	1270.49	551.30	55.70	342.06	755.62	654.80	66.26	103.50
龙岩市	299.00	1181.99	507.16	53.05	338.26	721.90	640.88	67.26	133.72
福州市	123.21	1184.29	448.27	13.97	323.08	731.61	631.16	19.67	182.89
泉州市	188.75	1021.08	436.91	11.18	323.30	696.25	617.93	15.81	181.02
莆田市	207.44	922.00	398.35	4.35	359.46	695.75	603.02	6.59	204.67
漳州市	149.29	1009.65	391.02	9.22	315.67	675.71	601.68	14.20	210.66
厦门市	173.90	860.27	323.99	0.73	347.99	619.48	572.64	1.29	248.65

在数值分布上(图 5),两种方法得到的水源涵养能力值差异较大,InVEST 模型(I)结果区间的跨度较大,约为 meta 分析(M)的 2.9 倍。InVEST 模型数值曲线和缓,meta 分析峰值突出,两者峰值相差约 150 mm; InVEST 模型估算的福建省森林水源涵养服务能力 97.72% 集中在 200—800 mm,99.44% 的 meta 分析估值集中在 500—750 mm。表 3 统计了各地级市水源涵养值分布,南平市的能力均值(I:615.58 mm, M:690.76 mm)为全省最高,厦门市能力均值(I:323.99 mm, M:572.64 mm)为全省最低,但能力最小值 123.21 mm 出现在 InVEST 模型的福州市。各市 meta 分析与 InVEST 的能力均值之差均为正值(75.18—248.65 mm),涵养能力均值越高的地级市,差值反而越小。InVEST 模型估算的水源涵养总量为 236.18×10⁸ m³,meta 分析法水源涵养总量为 291.07×10⁸ m³。各市 meta 分析涵养量均大于 InVEST 模型涵养量,市域面积越大,方法间评估差异越小。

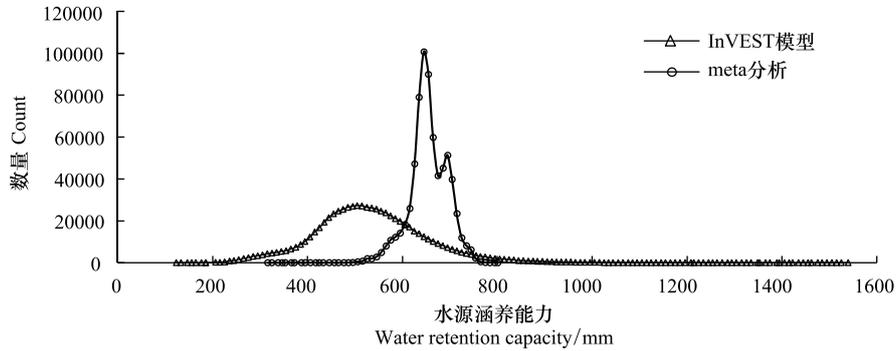


图5 基于两种方法的水源涵养能力数值分布

Fig.5 Numerical distributions of water retention capacity based on two methods

2.2 不同环境条件的水源涵养服务对比

从不同森林类型的水源涵养能力值来看(图6),InVEST模型中常绿针叶林能力值最高。常绿针叶林多分布在海拔较高的山地,而InVEST模型考虑了地形对涵养能力的影响,对海拔、坡度的敏感度高。相反,在meta分析中,常绿针叶林涵养能力均值最低,根据本文整理的文献数据集,常绿针叶林郁闭度76.95%,针叶对降水的截留率19.25%;而针阔混交林的郁闭度及截留率分别为84.45%和25.72%,涵养能力值最高。此外,在海拔0—2100 m之间,两种方法的涵养能力均值都随海拔升高而递增,InVEST模型涵养能力均值的增长率随海拔升高而增大,meta分析的增长率则随海拔升高逐渐减缓(图6)。InVEST模型在不同海拔区间的增长率都高于meta分析,其涵养能力均值在海拔1600—2100 m区间内超过meta分析。

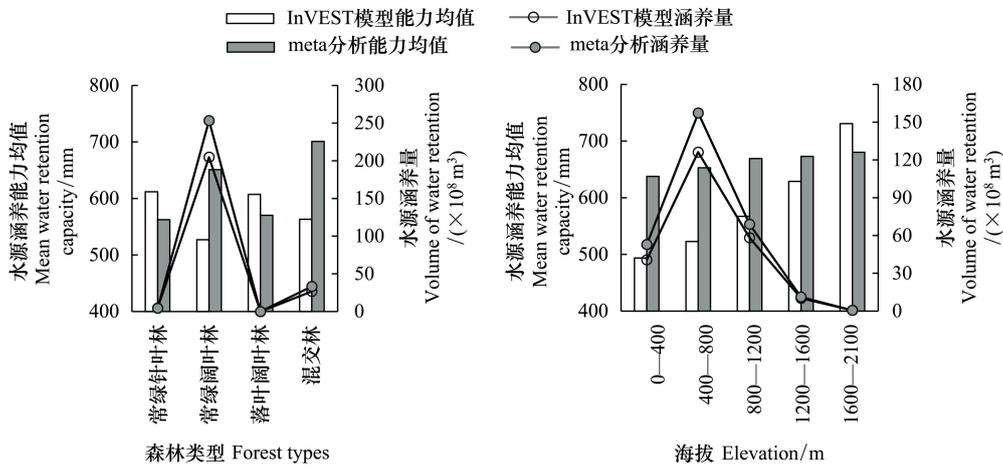


图6 不同环境条件的水源涵养统计值对比

Fig.6 Comparison of water retention statistics under different environmental conditions

从不同森林类型的水源涵养量来看,两种方法的结果趋势相同,均与各森林类型面积所占比例相符,为常绿阔叶林>混交林>常绿针叶林>落叶阔叶林(图6)。常绿阔叶林是福建省地带性植被类型,占森林总面积的87.4%,因此两种方法的水源涵养量都为常绿阔叶林最大,分别为 $204.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ (I)和 $253.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ (M)。海拔在400—800 m区间的面积占全省土地面积的41.59%,此海拔区间内的森林面积占47.82%,是涵养量最大的海拔区间,分别为 $126.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ (I)和 $157.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ (M)(图6)。0—400 m海拔占全省面积的42.83%,略高于400—800 m;但森林面积仅占15.03%,远低于400—800 m,而城镇建设用地、农用地、草原面积分别占到10.24%、10.94%、57.34%;因此水源涵养量低于400—800 m区间,涵养量分别为 $40.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ (I)和

$52.89 \times 10^8 \text{ m}^3(\text{M})$ 。由此可见,不同海拔的水源涵养量与森林面积、海拔分布占比有关。海拔 800 m 以上水源涵养量呈现递减趋势,海拔 1200—2100 m 的土地面积仅占 1.64%,水源涵养量分别为 $10.80 \times 10^8 \text{ m}^3(\text{I})$ 和 $11.71 \times 10^8 \text{ m}^3(\text{M})$ 。

2.3 点尺度水源涵养服务能力对比

图 7 中绿色区域代表 meta 分析结果高于 InVEST 模型;红色区域代表 meta 分析结果低于 InVEST 模型。两种方法的能力差值由东南向西北逐渐由正过渡为负,仅西部、北部存在少量负值,meta 分析涵养能力普遍高于 InVEST 模型涵养能力。

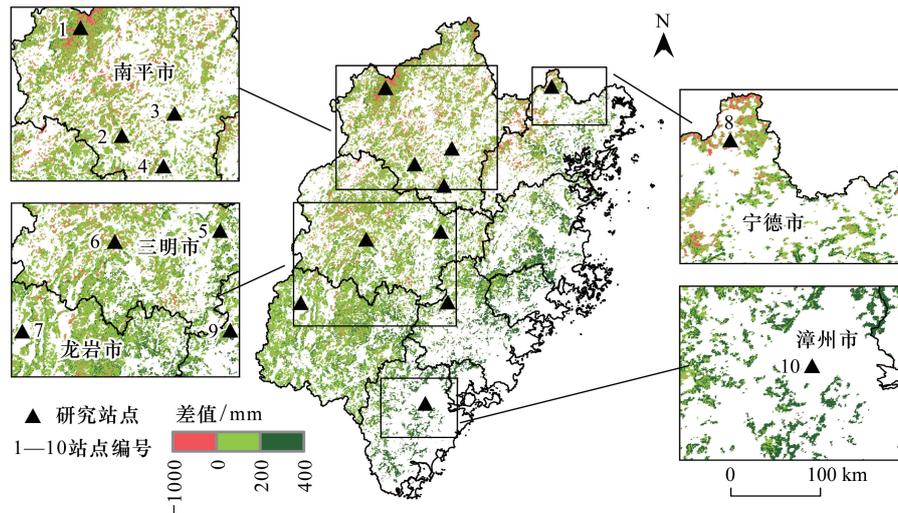


图 7 基于两种方法的点尺度水源涵养能力差值

Fig. 7 Difference values of site-scale water retention capacity based on two methods

本文从采用 meta 分析方法搜集到的 506 条文献数据中,选择了 10 个分布于不同经纬度、不同海拔的研究站点,分别与 InVEST 模型结果进行比较。站点 1 位于武夷山国家级自然保护区,海拔 1220 m,1993 年降水量 2679 mm,该地区属常绿阔叶林区,森林类型为 70 年林龄的甜槠林,InVEST 模型水源涵养能力值为 676.75 mm(表 4),meta 分析能力值为 656 mm(表 5)。meta 分析结果中混交林涵养能力大(图 6),站点 2 位于南平市顺昌县洋口国有林场,海拔约 368 m,森林类型主要为毛竹、杉木、常绿阔叶林,其涵养能力最高可达 801 mm,为 meta 分析 10 个站点中的最大值。对比站点 1、2 发现,在 InVEST 模型中,站点 1 年均降水量 2218.10 mm、年均产水量 1780.92 mm 均高于站点 2 的 1947.64 mm 和 1505.56 mm,但站点 2 地形平缓、土壤质地黏土含量高,具有最高的产水量修正系数 0.50,大于站点 1 的 0.38,最终求得的 InVEST 涵养能力最大值为站点 2 的 752.78 mm。再如,站点 8 位于宁德市寿宁县大安乡半岭亭,海拔约为 995 m,森林类型是为以马尾松、黄山松、木荷为主的针阔叶混交林。站点 1、8 为降水量、产水量最大的两个站点,两站点附近存在较大的海拔落差,山体坡度大,区域产生的部分水资源量随径流向低处,产水能力强而保水能力弱。站点 8 修正系数 0.34 与站点 1 相近,涵养能力值(577.38 mm)也低于站点 2。由此可见,产水量修正系数区分了区域的产水能力和保水能力。

站点 2、10 的森林类型以竹林为主,站点 2 为毛竹林与针叶林或阔叶林组成的混交林,站点 10 为纯竹林。站点 2 包含对同一林场两个时段的研究,刘蔚漪等^[33]的研究结论表示,2007—2010 年年均水源涵养能力为常绿阔叶林 801 mm>竹杉混交林 707 mm>竹阔混交林 611 mm>杉木纯林 584 mm>毛竹纯林 575 mm,这与张昌顺^[34]2007 年在此林场的研究结论一致。由于毛竹林的叶片面积、生物量均小于其他森林类型,因此截留量小于其他林分;且毛竹林枯落物分解较快,枯落物蓄积量较低,持水能力也较小。该地阔叶林多为幼龄人工次生林,其郁闭度、叶面积指数不如天然阔叶林高大浓密^[33];而杉木针叶林生长时间长,树木高、胸径大,可与毛

竹林组成两层垂直林冠结构,因此竹杉混交林的水源涵养能力高于竹阔混交林。站点 10 研究了漳州市东山县赤山林场的沿海不同竹林生态系统,该林场位于海拔约 22 m 的沿海平原区,年均降水量最少(1556.74 mm),受流速系数影响,修正系数很小(0.08),水源涵养能力(M:201—234 mm,I:114.08 mm)远低于站点 2。

表 4 InVEST 模型点尺度水源涵养能力

Table 4 Site-scale water retention capacity based on InVEST model

站点 Sites	经纬度 Coordinates	海拔 Elevation/m	降水量 Precipitation/ mm	蒸散量 Evaporation/ mm	产水量 Water yield/mm	修正系数 Correction coefficient	水源涵养能力 Water retention capacity/mm	参考文献 References
1	117°39'00"E, 27°43'30"N	1220	2218.10	434.30	1780.92	0.38	676.75	[32]
2	117°52'00"E, 26°55'30"N	368	1947.64	550.89	1505.56	0.50	752.78	[33-34]
3	118°18'30"E, 27°2'00"N	137	1944.43	119.48	1916.00	0.07	134.12	[35]
4	118°9'48"E, 26°40'19"N	93	1861.27	127.12	1775.40	0.05	88.77	[36]
5	118°3'30"E, 26°13'N	213	1787.47	499.87	1283.58	0.38	487.76	[37]
6	117°13'7.5"E, 26°14'N	503	1845.55	463.16	1386.72	0.43	596.29	[38]
7	116°24'30"E, 25°40'30"N	399	1799.84	477.35	1333.61	0.23	306.73	[39]
8	119°41'24"E, 27°19'12"N	995	2050.17	348.51	1698.18	0.34	577.38	[40]
9	118°2'E, 25°30'N	740	1791.74	494.36	1305.03	0.31	404.56	[41]
10	117°38'24"E, 24°30'36"N	22	1556.74	170.40	1426.00	0.08	114.08	[42]

修正系数:见 1.3.1 部分水源涵养能力计算公式,表示除产水量外,其他部分的乘积

表 5 meta 分析法点尺度水源涵养能力

Table 5 Site-scale water retention capacity based on meta-analysis

站点 Sites	实测降水量 Measured precipitation/ mm	林分类型 Forest stand types	土壤厚度 Soil depth/cm	水源涵养能力 Water retention capacity / mm				参考文献 References
				林冠层(测量方法) Canopy layer (Measurement Method)	枯落物层 Litter layer	土壤层 Soil layer	总和 Sum of three layers	
1	2679	甜槠林	110	497(雨量筒收集法)	5.20	154	656	[32]
2	2409	毛竹+杉木/常绿阔叶林	60	537—755(雨量筒收集法)	0.92—2.68	23—44	575—801	[33-34]
3	1666	杉木+观光木	40	66—126(浸水称重法)	0.30—0.74	18—43	84—155	[35]
4	1860	杉木+桉木	40	57—114(浸水称重法)	0.27—0.35	17—42	75—141	[36]
6	1744	凹叶厚朴+杉木	60	74—139(浸水称重法)	0.37—1.05	12—18	89—155	[38]
10	1404	竹林	100	135—164(雨量筒收集法)	0.39—0.98	62—76	201—234	[42]

3 讨论

3.1 与以往评估结果的对比

本文评估结果表明,福建省森林地区水源涵养能力随海拔升高而增加,这与刘璐璐等^[43]研究结果相同。唐玉芝等^[14]对乌江上游地区的研究结果与本文相反,水源涵养能力随林地海拔的升高呈波动下降趋势。这是由于福建省平原地区集中分布城市、农田及人口,森林覆盖率比山地低,因此本研究中的低海拔地区水源涵养能力低;而乌江上游地势陡峭,高海拔地区不易生长成林,石漠化土地面积占比达 26.27%,因此海拔越高水源涵养能力越低。陈花丹等^[44]评估的福建省森林生态系统水源涵养量为 $387.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,由于将经济林、灌木林也纳入了森林生态系统范畴,其结果高于本文的 $291.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。本文森林区域水源涵养总量由高到低依次为常绿阔叶林>混交林>常绿针叶林>落叶阔叶林,这与李佳等^[13]对江西省森林区域的研究结果较为一致,江西、福建两省相邻,以武夷山脉为界,相似的环境条件可能是造成两结果相符的原因。此外,有研究指出落叶阔叶林的秋冬季落叶向土壤输送养分,有机质含量高,土壤孔隙度高,蓄水能力强,土壤层蓄水能力大于其他森林类型^[45],由于福建省落叶树种分布极少,这一现象在本文中不明显。

3.2 不同方法的结果差异原因分析

在数据方面,本文将所有参与计算的数据处理为年值。造成两种结果间差异的原因有:首先,在点尺度分析对比中,InVEST 模型采用的降水数据为气象数据插值得到的多年平均值,meta 分析则是从不同文章提取了不同研究年份的站点实测值。其次,InVEST 模型主要通过栅格数据的计算来区分水源涵养能力,即一个栅格尺寸的地块上数值相同。在与某个实地观测站点的多组控制试验进行比较时,常常无法更加细致地区分,因此提高模型数据的精度和准确性至关重要。meta 分析法综合了前人的诸多研究成果,解决了无法大面积开展实地观测的弊端,但在实现空间化时存在不确定性。此外,就 InVEST 模型自身而言,通过产水能力求水源涵养能力主要有两种途径:一是在产水能力的基础上减去地表径流,这种方法的误差主要体现在地表径流系数的本地化;二是通过流速系数、地形指数、土壤饱和导水率等参数的计算求得产水能力的修正系数,产水能力与修正系数的乘积为水源涵养能力。本文尝试了上述两种方法,鉴于第二种方法考虑因素更多、数据分辨率更高、结果区分度更好,最终采用了第二种方法。就 meta 分析自身而言,福建省水源涵养相关文章的研究年代跨度较大,观测时长也不一致,有单次、天、月、季、年、多年平均不等,单次研究结果不具有代表性。例如,本文统计的针叶林和阔叶林的年均林冠截留率分别为 19.25% 和 23.23%,林冠截留量随降水量的增加先增加而后逐渐趋于稳定^[46]。如果仅采用暴雨截留率,两者的截留率仅为 8.2% 和 14.5%^[47],即受季风区降水及落叶、半落叶树种郁闭度的季节变化影响,造成林冠层涵养能力估值偏差。

在原理方面,水量平衡法考虑的是理想状态下的水源涵养能力,而综合蓄水能力法采用实测值,且后者在不同研究中对一些参数的定义不同。例如,毛管孔隙中的水分可以长时间保持在土壤中,主要用于植物根系吸收和土壤蒸发;非毛管孔隙能较快容纳降水并及时下渗,是土壤重力水移动的主要通道,更加有利于水源涵养。土壤毛管贮水量大于非毛管贮水量,两者都可作为评价森林土壤涵养能力的指标^[34],会造成土壤层涵养能力差异。

在技术方法方面,本研究 InVEST 模型根据研究区土地覆被类型面积占比实现蒸散系数、流速系数本地化,还有较大的改进空间。季节常数受降水量、降水次数、降水季节分布的影响,该模型尚不能很好地确定不同区域的常数值,本文根据模拟年产水量与实际年水资源量的对比,设置了适用于本省的季节常数。未来可借助 SWAT 等辅助工具及更精细的观测数据进一步提高模型的本地化水平,以验证模型预测精度^[15]。此外,生态系统服务人工智能(ARIES)已开发了生态系统淡水供给服务模拟模块,Bagstad 等^[48]则结合了 ARIES 和 InVEST 进行生态系统服务空间建模,对比分析产水量及其变化,指出与碳指标相比,水研究相关的建模方法和生态系统服务指标更加复杂多变,结果也更难以比较,这也是本研究领域难以制定统一评估标准的原因。从测定方法来讲,测定冠层涵养能力的方法有雨量筒收集法和浸水称重法。图 7 中站点 1、2、10 采用雨量筒收集法,通过测量一年或多年降水量、穿透量、茎流量计算林冠截留量;站点 3、4、6 为杉木与不同阔叶林组成的混交林,采用浸水称重法,以林冠层生物量和持水率的乘积计算林冠层涵养量^[35-36],其结果为野外测量及室内分析得到的林冠持水量,通过雨量筒收集法得到的冠层截留量大于浸水称重法得到的冠层持水量(表 5)。在测量各森林作用层的降水量过程中,不可避免地由于蒸发和在收集环节中损失一部分水量。环刀法测定土壤层蓄水能力时,由于不同地区的土壤层厚度存在差异,采集的土壤厚度不一致,也影响着 meta 分析法的土壤层水源涵养能力统计。

4 结论

本文基于两套方法体系,评估了 1988—2017 年福建省森林地区水源涵养服务,整合了两套方法体系间的区别及联系,辨析适用的数据及方法,对研究者选择和使用两种方法提供了具体参考。结果表明,水源涵养能力与海拔高度成正比;不同森林类型的水源涵养能力差异显著,InVEST 模型侧重地形、气象和土地覆被因素,水源涵养能力为常绿针叶林最高,对应了高海拔、多降水区域;meta 分析法侧重森林水平结构和垂直结构,即森林林分密度和郁闭度,水源涵养能力为混交林最高。meta 分析评估的水源涵养能力均值大于 InVEST 模

型,但 InVEST 模型涵养能力的高值更高、低值更低,数值区间跨度是 meta 分析法的近 3 倍。

meta 分析通过自下而上、由点到面的分析思路实现对水源涵养试验站点数据的整合,InVEST 模型则是自上而下的模拟,都可应用于大尺度研究。对比评估结果发现,造成 meta 分析结果差异的原因包括参数定义及测量方法的多样性,今后的重点应落在统一参数概念及测量标准;meta 分析的试验站点观测信息如何与机器学习等方法结合,更准确地实现由点到面的拓展是今后重要研究方向;InVEST 模型系数本地化水平需进一步提升。对于生态系统水源涵养服务评估,应尽快建立更科学、更精确的评估体系,不同方法原理之间相互关联才能更好地辨别优劣异同,从而为研究者选择不同的研究方法以达到不同的研究目的提供明确的选择依据。

参考文献 (References):

- [1] Shoyama K, Kamiyama C, Morimoto J, Ooba M, Okuro T. A review of modeling approaches for ecosystem services assessment in the Asian region. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 316-328.
- [2] 赵士洞, 张永民. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. *地球科学进展*, 2006, 21(9): 895-902.
- [3] Xu J, Xiao Y, Xie G D. Analysis on the spatio-temporal patterns of water conservation services in Beijing. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(4): 362-372.
- [4] Xiao Y, Ouyang Z Y. Spatial-temporal patterns and driving forces of water retention service in China. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(1): 100-111.
- [5] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.
- [6] 刘纪远, 邵全琴, 于秀波, 黄河清. 中国陆地生态系统综合监测与评估. 北京: 科学出版社, 2016: 253-258.
- [7] 侯晓臣, 孙伟, 李建贵, 李全胜. 森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 121-127.
- [8] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 330-336.
- [9] Aydın M, Güneş Şen S, Celik S. Throughfall, stemflow, and interception characteristics of coniferous forest ecosystems in the western black sea region of Turkey (Daday example). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(5): 316.
- [10] Pérez-Suárez M, Arredondo-Moreno J T, Huber-Sannwald E, Serna-Pérez A. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 532-543.
- [11] Mazza G, Amorini E, Cutini A, Manetti M C. The influence of thinning on rainfall interception by *Pinus pinea* L. in Mediterranean coastal stands (Castel Fusano-Rome). *Annals of Forest Science*, 2011, 68(8): 1323-1332.
- [12] Wu X, Shi W J, Guo B, Tao F L. Large spatial variations in the distributions of and factors affecting forest water retention capacity in China. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106152.
- [13] 李佳, 邵全琴, 刘纪远. 基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算——以江西兴国县为例. *西北林学院学报*, 2012, 27(4): 83-87.
- [14] 唐玉芝, 邵全琴. 乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究. *地球信息科学学报*, 2016, 18(7): 987-999.
- [15] Mokondoko P, Manson R H, Ricketts T H, Geissert D. Spatial analysis of ecosystem service relationships to improve targeting of payments for hydrological services. *PLoS One*, 2018, 13(2): e0192560.
- [16] Zhang C Q, Li W H, Zhang B, Liu M C. Water Yield of Xitiaoxi River Basin Based on InVEST Modeling. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 50-54.
- [17] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 刘玉洁. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 183-189.
- [18] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [19] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [20] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. *生态学报*, 2013, 33(3): 789-797.
- [21] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [22] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.
- [23] 罗叶琴. 基于 MATLAB 的森林水源涵养功能评估系统的研建[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [24] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估. 北京: 科学出版社, 2014: 597-600.
- [25] 唐红娟. 福建省典型土壤的系统分类研究及土系数据库的建设[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [26] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018). 北京: 中国林业出版社, 2019: 2-11.
- [27] Woods Institute for the Environment, Stanford University, The Nature Conservancy, Institute of the Environment, University of Minnesota, World

- Wide Fund For Nature. InVEST 3.2.0 User Guide (Chinese Version). (2017-10-08) [2020-03-01]. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>.
- [28] 何文华. 重庆四面山 5 种人工林森林水文效应对比研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [29] 余蔚青. 缙云山典型水源林生态水文功能评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [30] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 胡治鹏, 王玉宽. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 577-585.
- [31] 福建省水利厅. 2017 福建省水资源公报. (2018-08-06) [2020-03-01]. <http://slt.fujian.gov.cn/xxgk/tjxx/jbgb>.
- [32] 李凌浩, 林鹏, 王其兵, 贺金生, 何建源, 刘初钿, 金昌善, 陈仁华. 武夷山甜槠林水文学效应的研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 393-402.
- [33] 刘蔚漪. 闽北不同类型毛竹林水文生态功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2011.
- [34] 张昌顺. 闽北不同类型毛竹林生态功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2008.
- [35] 郑郁善, 张炜银. 观光木杉木混交林水文特征研究. 福建林学院学报, 1998, 18(3): 215-218.
- [36] 郑兆飞. 桫木杉木混交林水源涵养能力研究. 西南林学院学报, 2008, 28(3): 8-10.
- [37] 吴擢溪, 陈礼光, 吴擢城, 吴淑平, 陈鸿, 张宏梓. 杉木与米老排等阔叶树混交林的水源涵养功能. 福建林业科技, 2017, 44(3): 43-46, 89.
- [38] 刘寿强. 凹叶厚朴杉木混交林的水文特征. 福建林学院学报, 2001, 21(3): 245-248.
- [39] 谢锦升, 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水. 侵蚀红壤人工恢复的马尾松林水源涵养功能研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(2): 48-51.
- [40] 刘钦. 木荷人工混交林涵养水源的功能. 福建农林大学学报:自然科学版, 2004, 33(4): 481-484.
- [41] 吕德文. 马尾松多树种混交林水文效应和土壤性质研究. 江西林业科技, 2011, (6): 7-9.
- [42] 王新屯. 吊丝竹等滨海沙地竹林生态系统特性的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2006.
- [43] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 杨存建. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算. 生态环境学报, 2013, 22(3): 451-457.
- [44] 陈花丹, 郭国英, 岳新建, 严洪, 肖君, 刘海, 朱洪如, 王如均. 福建省森林生态系统服务功能价值评估. 林业勘察设计, 2018, 38(1): 5-10.
- [45] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 王晓学. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [46] 张焜, 张洪江, 程金花, 张静雯, 王贤, 宋楠. 重庆四面山暖性针叶林林冠截留及其影响因素. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 32-35.
- [47] 邹志谨, 陈步峰. 广州市帽峰山两种主要林型的暴雨水文特征. 生态环境学报, 2017, 26(5): 770-777.
- [48] Bagstad K J, Semmens D J, Winthrop R. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro River, Arizona. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 40-50.