

基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估

刘景红^{1,2,3} 郑晓^{1,2*} 樊俊美^{1,2,3} 赵澜林^{1,2,3}

(¹中国科学院森林生态与管理重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院清原森林生态系统观测研究站, 沈阳 110016; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 浑河中上游流域的森林覆盖率达 68%, 是辽宁省饮用水的重要水源保护地。本研究基于 SWAT 模型和影子工程法, 评估 2000—2019 年浑河中上游流域的水源涵养量及其服务价值, 并分析其时空变化的原因, 以为流域内生态补偿和生态恢复提供依据。结果表明: 2000—2019 年浑河中上游水源涵养量及其价值量呈先增加后减少趋势; 年均水源涵养总量和水源涵养服务价值分别为 24.6 亿 m³ 和 150.4 亿元; 研究区水源涵养量存在明显的空间差异, 高值区主要分布在清原县和新宾县, 低值区集中于沈阳市辖区; 不同生态系统的水源涵养服务价值差异较大, 森林的单位面积水源涵养量远高于草地、农田和城市。

关键词 水源涵养; 生态系统服务; SWAT 模型; 浑河

Evaluation of the value of water retention service in the middle and upper reaches of Hunhe River based on SWAT Model. LIU Jing-hong^{1,2,3}, ZHENG Xiao^{1,2*}, FAN Jun-mei^{1,2,3}, ZHAO Lan-lin^{1,2,3} (¹CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²Qingyuan Forest CERN, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: The upper and middle reaches of the Hunhe River, with forest coverage rate up to 68%, is an important water source protection area in Liaoning Province. Based on the SWAT model and shadow engineering method, we aimed to estimate the function and service value of water retention in the upper and middle Hunhe River basin from 2000 to 2019, to analyze the spatial heterogeneity, and to provide a scientific basis for the ecological compensation and ecological restoration of the region. Our results showed that the function and service value of water retention in the upper and middle reaches of the Hunhe increased first, and then decreased from 2000 to 2019. The mean annual amount and service value of water retention were 2.46 billion m³ and 15.04 billion yuan, respectively. The spatial distribution of water conservation service functions in the study area was uneven. The areas of high water retention service value were mainly distributed in Qingyuan County and Xinbin County, while the low-value areas were located in municipal districts of Shenyang City. The value of water retention services was obviously different among the ecosystems, with water retention capacity per unit area of forests being much higher than that of grassland, farmland, and cities.

Key words: water retention; ecosystem service; SWAT model; Hunhe River.

生态系统服务功能指生态系统与生态过程所形成的、维持人类生存的自然环境条件及其效用, 主要

本文由中国科学院战略性先导科技专项(XDA23070101)和国家自然科学基金项目(31770758)资助 This work was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Science (XDA23070101) and the National Natural Science Foundation of China (31770758).

2021-07-21 Received, 2021-09-09 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaozheng@iae.ac.cn

是通过生态系统的功能直接或间接得到的产品和服务, 是人类生产生活、社会经济发展的基础^[1-5], 包括供给、调节、支持和文化四大类^[6-9]。水源涵养功能在生态系统服务调节功能中占据着主体地位。然而, 随着全球气候变化加剧以及人类活动强度大幅增加, 水资源短缺成为世界上不同地区社会发展的限制性因素, 且已经严重影响了人们生产生活。因

此,评估生态系统或区域的水源涵养功能成为当前的国内外研究热点之一^[7]。

水源涵养指生态系统在一定时空范围内,通过其特有的结构对降水进行截留、渗透、蓄积,从而将水分储蓄在生态系统中,实现对降水的再分配。在区域尺度,通常以水源涵养量作为评估水源涵养功能的指标^[10]。水源涵养量的实质是特定时空范围内,生态系统对降水的调蓄能力,即降水与蒸散发、产流之差^[11]。当前,水源涵养量评估的方法主要分为野外试验测定和模型模拟两大类^[12]。野外试验测定法主要有:林冠截留剩余量法、土壤蓄水能力法、水量平衡法等^[13],上述方法由于试验地的局限性,造成研究结果差异巨大,存在较大的不确定性,且无法实现长时间序列、大尺度操作^[14]。而模型模拟法由于操作性强,且可以更好地反映水循环中复杂的物理机制^[15-16],为评价长时间、大尺度的森林水源涵养变化提供了重要途径。

基于水量平衡的水源涵养量模拟法主要有分布式水文-土壤-植被模型(distributed hydrology soil vegetation model, DHSVM)、水土评价工具模型(soil and water assessment tool, SWAT)、水文变量渗透能力模型(variable infiltration capacity, VIC)、生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs, InVEST)等,其中,InVEST 和 SWAT 模型已广泛应用于水源涵养功能评估的相关研究中。InVEST 模型以降水量减去潜在蒸散发后的水量作为产水量^[17],并利用土壤特性及地表径流流速系数最终计算水源涵养量^[18];然而,该模型忽略了地下水等水文要素,对于水源涵养量的计算存在较大偏差。SWAT 模型基于植被、土壤和坡度等组合特征,将目标流域细分为若干个面积相对较小的水文响应单元(hydrological response unit, HRU),模拟 HRU 中的水文物理过程(降水、蒸散发、地下水、壤中流等);该模型对每个 HRU 进行单独模拟,从而实现水源涵养量精准计算^[19-21]。例如, Fan 等^[22]通过 SWAT 模拟 Teshio River 流域的产蓄水量;乔飞等^[23]使用 SWAT 模型评估了三江源地区的水源涵养功能;林峰等^[24]在晋江流域基于 SWAT 模型分析了不连续流域内森林的日、月、年尺度的水源涵养量。诸多研究表明,在不同地区, SWAT 模型均具有良好的适用性。

浑河中上游流域是辽宁省中部城市群的主要用水来源,尤其是在该流域的大伙房水库,为沈阳市和抚顺市 2000 多万人提供了生产、生活的基本用水。

然而,由于人类活动和全球气候变化的影响,该地区的水源涵养服务功能尚不明确^[25-28]。随着国家生态恢复政策的落地,评估该区域准确的水源涵养量及其服务价值,有助于加强不同行政区域之间资源共享,以实现水资源的有效配置。据此,本研究利用多源遥感数据,基于 SWAT 模型评估 2000—2019 年浑河中上游水源涵养量及其价值变化,分析了不同县区、不同土地利用类型的水源涵养服务价值分异规律,以期为浑河流域的水资源合理开发及跨区域之间的生态补偿机制提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

浑河发源于我国辽宁省抚顺市清原满族自治县湾甸子镇滚马岭,自东北向西南汇入大辽河,主要流经沈阳和抚顺两市。本研究以浑河中上游流域(41°28′—42°16′ N, 123°22′—125°17′ E)为研究区,面积约 8000 km²。该区属温带季风气候,年均温 9℃,年均降水量 686.4 mm;典型植被为针阔混交林,地带性土壤类型为棕壤。浑河中上游最突出的生态服务功能是水源涵养功能,担负着为沈阳、抚顺等城市提供用水的任务,是重要的水源保护地。根据高程数据及河流特征,将研究区划分为上、下游。上游范围主要包括清原满族自治县(简称清原县)、抚顺县的东部及新宾满族自治县(简称新宾县),下游包括抚顺县的西部、抚顺市市辖区(顺城区、新抚区、望花区和东洲区统称为抚顺市市辖区)及沈阳市市辖区(浑南区、大东区、沈河区、和平区统称为沈阳市市辖区)(图 1)。

1.2 数据来源

本研究主要利用 SWAT 模型计算研究区的水源涵养量,因此,数据来源按照模型运行所需的空间

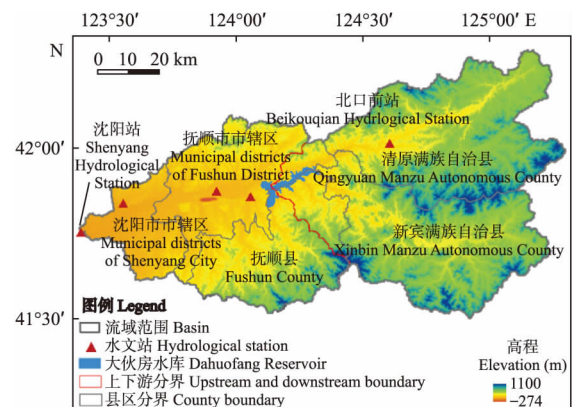


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area.

数据库、属性数据库以及模型校准与验证所需的水文数据进行介绍,具体如下:

1) 空间数据库: 数字高程模型 (DEM) 使用空间分辨率为 90 m 的 SRTM 数据,来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>),对下载的 DEM 数据在 ArcGIS 中进行拼接、裁剪,最后进行填洼处理。土地利用数据采用 landsat 系列影像 (<http://www.gscloud.cn/>),通过目视解译得到研究区 2000、2010、2019 年的土地利用图,其分辨率为 30 m,结合中国土地利用类型划分标准与 SWAT 模型中的分类标准化建立 landuse 查询表,对土地利用图进行重分类。土壤类型空间分布图来源于国家青藏高原数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),空间分辨率为 1 km。

2) 属性数据库: 研究区各类土壤的土壤属性查阅于中国土壤数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>),利用土壤水特性计算程序 SPAW (Soil-Plant-Air-Water Field & Pond Hydrology) 估算土壤可利用有效水、饱和水力传导系数等参数,最终将算得的每层土壤参数输入 SWAT 模型参数库中,建立研究区内 SWAT 模型土壤数据库。气象数据使用 1998—2019 年间每日的降雨量、最高和最低气温、风速、相对湿度、日照时数,该数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),需要对下载的气象数据进行单位转化,并使用日照时数计算太阳辐射。

3) 模型校准与验证数据: 使用 2010—2013 年间沈阳和北口前水文站的月径流量数据进行模型校准和验证,该数据来源于当地水文局。

1.3 基于 SWAT 模型的水源涵养量计算

SWAT 模型是由美国农业部开发的、能够模拟连续时间内复杂大流域中的多种不同水文物理过程的分布式水文模型^[22-23],输出结果包括降水量、地表径流量、蒸散发等。本研究基于水量平衡公式和模型输出结果,分别计算研究区内各子流域的水源涵养量,公式如下:

$$C = R - E - Y - G \quad (1)$$

式中: C 、 R 、 E 、 Y 、 G 分别为水源涵养量、降水量、实际蒸散发、地表径流量及地下径流量 (mm)。

将 SWAT 模型径流量模拟结果与实测径流量数据进行对比,利用决定系数 (R^2) 和效率系数 (NSE) 综合评价模拟效果。计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: x_i 为实测径流量; y_i 为模拟流量; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为实测和模拟平均值; n 为时间序列长度。 R^2 无限接近 1 时, SWAT 的模拟效果最好。NSE 越接近 1,表明 SWAT 模型模拟效果越佳。通常 R^2 和 NSE 大于 0.5,认为 SWAT 模型可用于该区域的水文相关研究。

1.4 水源涵养价值量的计算

本研究采用影子工程法评估浑河中上游的水源涵养服务价值,公式如下:

$$M = WP/S \quad (4)$$

式中: M 为单位公顷内水源涵养服务价值 (元); W 为子流域水源涵养量 (mm); S 为子流域面积 (hm^2); P 为单位库容造价 ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$),本研究参考 DB11/T 1099—2014《林业生态工程生态效益评价技术规程》, P 值为 $6.1107 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型模拟结果验证

本研究以 1998—1999 年为模型预热期,2010—2011 年和 2012—2013 年分别为校准期、验证期,根据 SWAT 模拟得到每个子流域的月径流量与实测月径流量的关系,通过 SWAT-CUP 软件进行参数敏感性分析和率定。本研究使用全局敏感性分析方法,在手动调参的基础上结合 SWAT-CUP 软件的自动率定功能,对影响浑河流域径流的参数进行率定。根据 R^2 和 NSE 评价不同参数的率定效果,当校准期与验证期的 R^2 和 NSE 均大于 0.5 时,即认为该模型适用于研究区。选取北口前水文站和沈阳水文站进行参数率定,结果表明,SWAT 模型月径流模拟结果与水文站径流量实测值拟合度较好 (图 2),率定期、验证期的 R^2 和 NSE 均大于 0.6 (表 1),说明模型在

表 1 SWAT 模型在浑河中上游的模拟精度评价

Table 1 Accuracy evaluation of SWAT Model in middle and upper reaches of Hunhe River

水文站 Hydrological station	率定期 Calibration period		验证期 Validation period	
	决定系数 R^2	效率系数 NSE	决定系数 R^2	效率系数 NSE
沈阳站 Shenyang Station	0.85	0.83	0.84	0.66
北口前站 Beikouqian Station	0.94	0.90	0.87	0.67

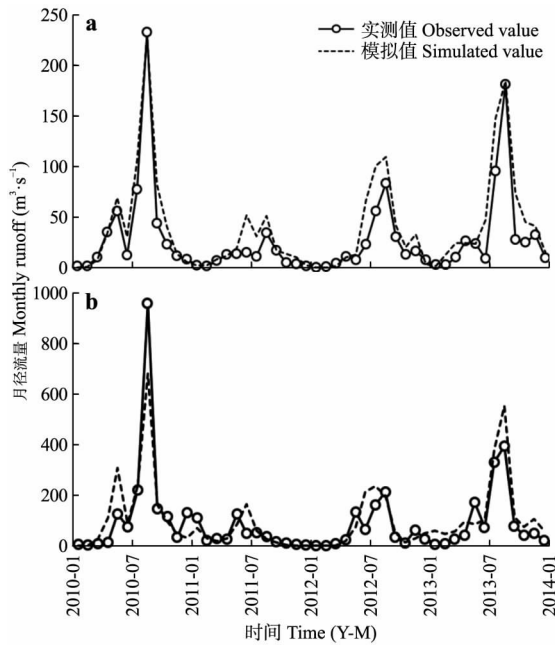


图2 浑河中上游月径流量的模拟结果

Fig.2 Simulation results of monthly average runoff of study area. a) 北口前站 Beikouqian Station; b) 沈阳站 Shenyang Station.

浑河中上游具有较好的适用性,可应用于该地区的水源涵养功能评估。

2.2 水源涵养量及其服务价值的时间变化特征

2000—2019年间,浑河中上游水源涵养总量及其服务价值变化规律一致,均呈先增加后减少趋势。2010年,水源涵养总量及其服务价值达到最高,分别为54.7亿 m^3 、334.5亿元;2011年水源涵养总量及其服务价值最低,分别为5.2亿 m^3 、31.6亿元。流域内水源涵养量及服务价值以2010年为分界点,2010年前呈波动增长,但其变幅相对平缓,流域水源涵养服务价值基本稳定在164.3亿元左右;2010年后水源涵养量及服务价值呈减少趋势,并且年际变化剧烈,如:2013年水源涵养服务价值为287.0亿元,而2014年骤降为51.4亿元,下降率高达82.1%(图3)。

降水量是直接影响水源涵养量及其服务价值时间变化的重要因素^[29]。流域内年均水源涵养服务价值为150.4亿元,年均水源涵养量为24.6亿 m^3 ,年均降水总量约为57.0亿 m^3 ,约43.2%的降水被生态系统所截留、储存,因此,浑河中上游发挥着不可忽视的水源涵养作用。基于流域内降水量与水源涵养量的关系发现:2000—2019年,研究区水源涵养总量与其空间范围内年均降水量呈显著正相关(图4),两者的皮尔森相关系数为0.49。

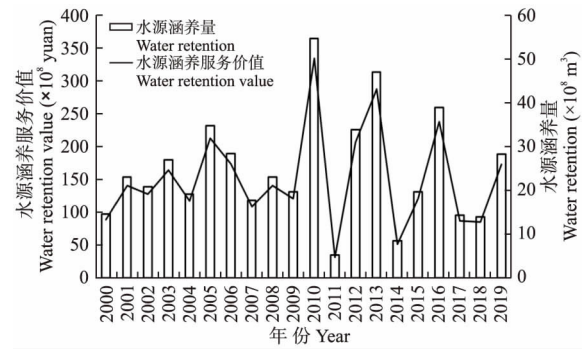


图3 浑河中上游水源涵养量及水源涵养服务价值

Fig.3 Water retention and water retention value in middle and upper reaches of Hunhe River.

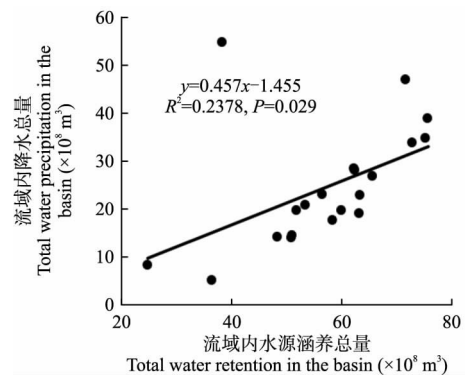


图4 2000—2019年浑河中上游水源涵养总量与降水量关系

Fig.4 Relationship between total water retention and precipitation in middle and upper reaches of Hunhe River from 2000 to 2019.

2.3 水源涵养量及服务价值的空间分布特征

在气候、土地覆被和地形等因素的综合影响下,流域内水源涵养量及水源涵养服务价值均呈自西向东增加的空间分布特征。浑河上游年水源涵养总量在6~38亿 m^3 ,水源涵养服务价值在37~231亿元,单位面积水源涵养服务平均价值为22686元 $\cdot\text{hm}^{-2}$;下游水源涵养总量在-1~17亿 m^3 ,水源涵养服务价值在-6~104亿元,单位面积水源涵养服务平均价值为11468元 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。上游单位面积水源涵养价值是下游的2倍(图5),主要原因为浑河流域的上游地区森林覆盖率高,由于森林生态系统具有较强的截留和蓄水能力,因而水源涵养量及其服务价值高;而下游地区,由于城市化的不断推进,建设用地面积占比较大,地表储水能力低,降水大多以径流或蒸散发的形式流失,因而水源涵养量低。

不同县域年际水源涵养量及价值呈现明显的空间差异,各县单位面积水源涵养服务价值由高到低的顺序依次为清原县、新宾县、抚顺县、抚顺市辖区

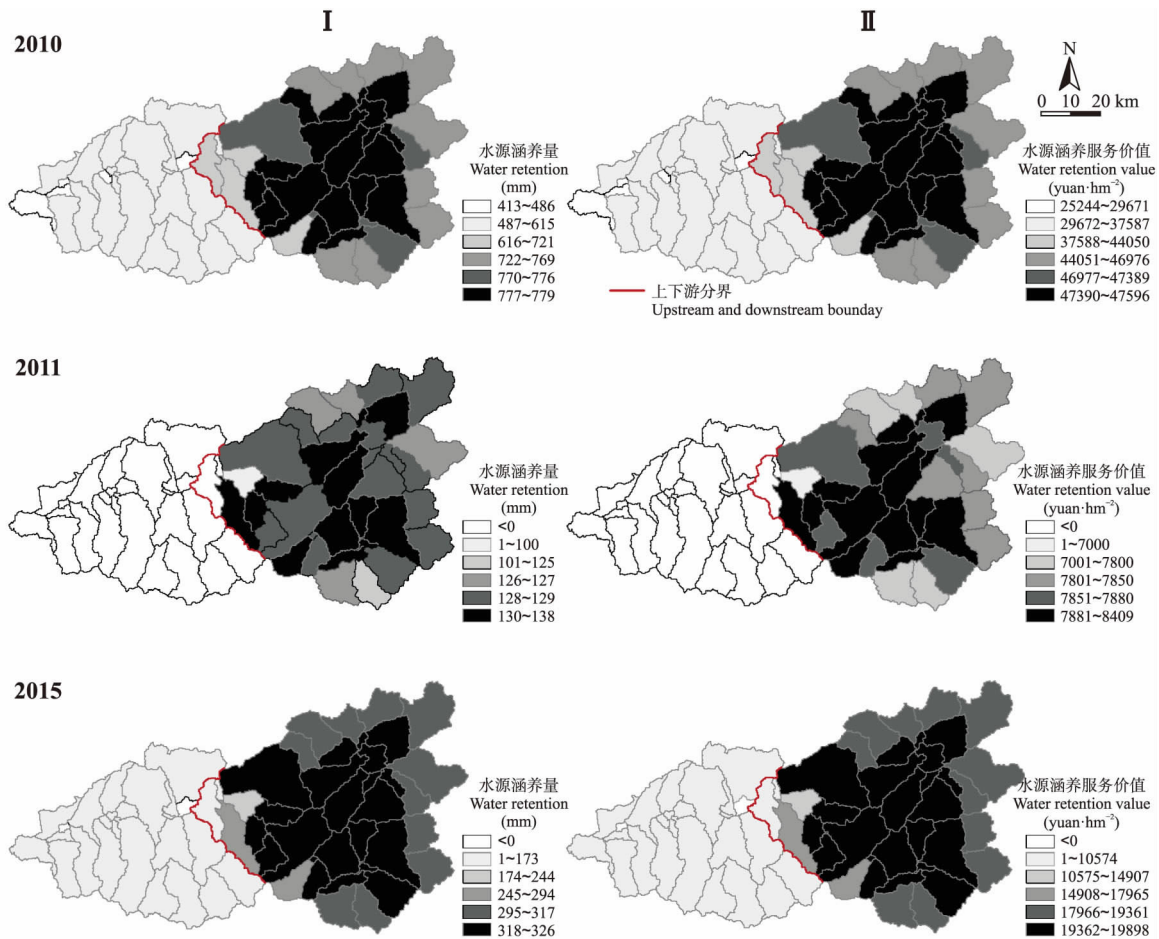


图 5 浑河中上游水源涵养量 (I) 和水源涵养服务价值 (II) 的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water retention (I) and its value (II) in middle and upper reaches of Hunhe River.

(顺城区、新抚区、望花区和东洲区)、沈阳市市辖区 (主要包括沈河区、和平区、大东区、浑南区) (表 2)。其中,清原县和新宾县的单位面积水源涵养价值为 23496.8 和 22287.8 元 · hm⁻², 远高于流域水源涵养服务价值平均值 (18479.4 元 · hm⁻²), 约为年均水源涵养服务价值的 1.3 倍; 主要是由于清原县

和新宾县内植被覆盖度高, 水源涵养条件良好。除上述 2 县以外, 其他县区均低于流域水源涵养服务价值的平均值, 尤其是沈阳市市辖区, 其单位面积水源涵养价值仅为 9631.5 元 · hm⁻², 约为流域平均水源涵养服务价值的 1/2。同为城市用地集中区, 沈阳市市辖区水源涵养服务价值约为与抚顺市市辖区的 75.4%, 这与沈阳市辖区城市化发展水平高于抚顺市辖区有关。

表 2 浑河中上游不同县区水源涵养服务能力及价值
Table 2 Water retention and water retention value in different counties of middle and upper reaches of Hunhe River

县区 County	水源涵养量 Water retention (mm)	占平均水源涵 养量的比例 Proportion in averagewater retention amount (%)	单位面积水源 涵养价值 Wter retention value per area (yuan · hm ⁻²)
沈阳市市辖区 Municipal districts of Shenyang City	157.6	52.1	9631.5
抚顺市市辖区 Municipal districts of Fushun City	209.1	69.1	12778.4
抚顺县 Fushun County	231.4	77.0	14137.2
新宾县 Xinbin County	364.7	120.6	22287.8
清原县 Qingyuan County	383.9	127.0	23496.8

2.4 不同生态系统的水源涵养量及服务价值

土地利用类型是影响水源涵养量的主要影响因素之一, 因此, 本研究提取浑河中上游的土地利用类型 (森林、农田、草地、水域、建设用地和其他 6 种生态系统类型) 的空间分布状况进行分析。结果发现, 森林和农田是研究区主要的生态系统类型 (图 6), 二者面积之和占总面积的 90.6% (表 3)。不同生态系统的水源涵养服务价值具有明显差异, 单位面积水源涵养服务价值由高到低的顺序依次为森林、草地、农田、城市 (表 3)。森林的单位水源涵养服务价值最高, 这是由森林生态系统独特的结构特

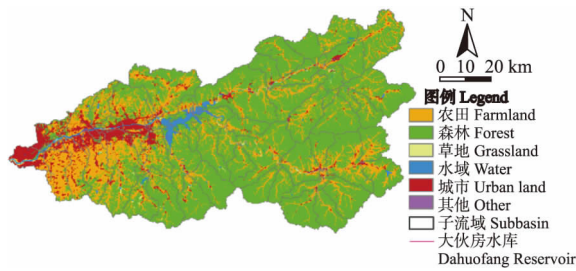


图 6 浑河中上游生态系统类型的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ecosystem types in middle and upper reaches of Hunhe River.

表 3 不同生态系统的水源涵养服务价值

Table 3 Service value of water retention value in different ecosystems

生态系统类型 Ecosystem type	面积占比 Area ratio (%)	单位面积 水源涵养量 Water retention per hectare ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单位面积水源 涵养服务价值 Water retention value per hectare ($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)
森林 Forest	67.8	4316.3	26375.5
农田 Farmland	22.8	1969.6	12035.9
城市 Urban	6.9	1119.2	6838.9
草地 Grassland	0.4	2619.0	16003.7

征决定。降水经过林冠层后,14%~40%降水被截留,同时,枯枝落叶层及土壤层截持、蓄积剩余部分的降水量,使得大部分降水被存蓄在森林生态系统中^[13-14]。研究区内农田面积为1828 km²,约占流域面积的22.8%,但单位水源涵养服务价值仅为森林生态系统的45.6%,尤其是坡耕地,水源涵养能力低下。研究区内坡度大于6°的农田面积为501 km²,主要位于流域的东北和东南部,该地区地形条件复杂,且夏季降水集中,同时,较低的水源涵养能力导致水土流失频发,恶化的生态环境给辽东地区的生态安全造成巨大威胁。对坡耕地进行科学退耕还林还草,有利于改善人们的生存环境、提升地区水源涵养功能。草地的单位水源涵养服务价值为16003.7元·hm⁻²,是农田生态系统的1.3倍,但在流域范围内草地只占0.4%左右,因而,其对于流域的水源涵养功能贡献率远低于农田和森林。城市生态系统的水源涵养服务价值最低,仅为6838.9元·hm⁻²,为了维持区域水源涵养能力,须对城市内建设用地面积及布局等进行合理规划。

3 讨 论

本研究采用SWAT模型模拟了2001—2019年浑河中上游水源涵养量及其服务价值变化。结果表

明,受降水量影响,2000—2019年浑河中上游水源涵养量及服务价值呈波动变化,土地利用类型的不同造成上下游之间水源涵养服务价值差异明显。降水量与水源涵养量及服务价值呈显著正相关,即降水量增加,水源涵养量及服务价值相应增加,这与龚诗涵等^[29]对我国生态系统水源涵养量影响因素的研究结论一致。除降水量外,土地利用类型差异也对流域内的水源涵养量及服务价值产生影响^[18]。主要表现为:森林覆盖度较高的流域上游单位面积水源涵养服务价值是下游的2倍;新宾县的单位面积水源涵养服务价值高达23496.8元·hm⁻²,是城市用地面积较大的沈阳市市辖区的2.4倍,表明不同土地利用类型的水源涵养能力存在显著差异。

本研究发现,浑河中上游流域内森林的单位面积水源涵养服务价值远高于农田、城市及草地,巩飞等^[30]相关研究结果也证实了这一结论。但是,同一生态系统在不同区域内,其水源涵养量及服务价值也具有差距,如刘菊等^[31]在岷江中上游的研究发现,森林和农田的水源涵养量分别为2695.77、683.85 m³·hm⁻²;陈姗姗等^[32]在陕西省商洛市的研究发现,森林和农田的水源涵养量分别为2966.0、1202.1 m³·hm⁻²;本研究中,浑河中上游森林和农田的水源涵养量分别为4316.3、1969.6 m³·hm⁻²。这主要是由于不同区域内森林类型、立地条件、草地覆盖度、农田质量、土壤质地等因素差距较大,进而导致同一生态系统类型的水源涵养量的研究结果存在分歧。同时,研究方法与数据源的不同也是导致同一地区水源涵养量结果互异的原因,例如,姜海燕等^[33]通过水量平衡法、非毛管孔隙度蓄水量法、年径流量法估算得到辽东山区森林的水源涵养量分别为840、2703.6和5857.8 m³·hm⁻²。3种方法评估结果迥异,但其大致确定了辽东地区森林水源涵养量的范围为840~5858 m³·hm⁻²,这也说明了本研究中浑河中上游森林水源涵养量的相关结果具有合理性。

以往的水源涵养量相关研究,大多采用InVEST模型模拟不同地区或生态系统的产水量,将其作为水源涵养量,忽略了地表径流、地下径流等中间水文过程,对于水源涵养量存在高估现象^[17]。而本研究基于机理过程模型——SWAT模拟浑河中上游流域的降水、蒸发、地表径流、地下径流等水文过程,结合水量平衡公式,进而计算2000—2019年浑河中上游水源涵养量及其服务价值,其结果更加科学。但本研究仅将土地利用类型划分为森林、草地、农田、城市、水域和其他6大类评估其水源涵养功能,未考虑森林类

型、林龄、草地覆盖度、农田质量等因素对于水源涵养功能的影响^[32], 未来有必要进一步改进模型, 以期实现不同生态系统水源涵养功能的精细评估。

4 结 论

本研究基于遥感数据、统计数据 and SWAT 分布式水文模型, 通过北口前和沈阳水文站的径流实测值对模型进行率定和验证, 基于水量平衡公式计算出浑河中上游 2000—2019 年的水源涵养量; 同时, 结合影子工程法, 估算出其服务价值, 结论如下: 1) 研究区年均水源涵养总量和水源涵养服务价值分别为 24.6 亿 m³、150.4 亿元, 年均降水总量约为 57.0 亿 m³, 浑河流域发挥着重要的水源涵养功能, 同时, 降水的高低影响水源涵养量及服务价值。2) 2000—2019 年, 浑河中上游水源涵养服务价值呈明显的时空特征: 时间上, 整体呈先增加后减少; 空间上, 自西向东增加, 水源涵养服务价值的高值区集中于流域上游, 即清原县和新宾县。降水、土地利用影响水源涵养功能与其空间分布规律。3) 浑河中上游生态系统单位面积水源涵养服务价值由高到低依次为森林、草地、农田、城市。由于森林特有的结构和组分, 其水源涵养量远高于草地、农田及城市。

尽管本研究实现了对不同子流域的差异调参, 但调参过程仅依据每月的径流实测数据, 未来有必要结合野外试验、遥感监测等途径对影响水源涵养量的降水、蒸发等过程进一步率定和验证, 以提高 SWAT 模型对于水源涵养量的模拟精度, 为地区水资源开发提供准确、详实的数据。

参考文献

- [1] Daily GC. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC, USA: Island Press, 1997
- [2] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. 资源科学, 2001, **23**(6): 5-9 [Xie G-D, Lu C-X, Cheng S-K. Progress in evaluating the global ecosystem services. *Resources Science*, 2001, **23**(6): 5-9]
- [3] 于书霞, 尚金城, 郭怀成. 生态系统服务功能及其价值核算. 中国人口·资源与环境, 2004, **14**(5): 42-44 [Yu S-X, Shang J-C, Guo H-C. The economical assessment of ecosystem services and natural capital. *China Population, Resources and Environment*, 2004, **14**(5): 42-44]
- [4] 阎水玉, 王祥荣. 生态系统服务研究进展. 生态学杂志, 2002, **21**(5): 61-68 [Yan S-Y, Wang X-R. Advances on research of ecosystem service. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(5): 61-68]
- [5] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值

- 核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, **33**(21): 6747-6761 [Ouyang Z-Y, Zhu C-Q, Yang G-B, et al. Gross ecosystem product: Concept, accounting framework and case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(21): 6747-6761]
- [6] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-260
- [7] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, **10**(5): 635-640 [Ouyang Z-Y, Wang R-S, Zhao J-Z. Ecosystem services and their economic valuation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(5): 635-640]
- [8] de Groot R, Wilson MA, Boumans RMJ. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, **41**: 393-408
- [9] MA. Ecosystems and Human Well-being. Washington DC, USA: Island Press, 2005
- [10] 刘世荣, 常建国, 孙鹏森. 森林水文学: 全球变化背景下的森林与水的关系. 植物生态学报, 2007, **31**(5): 753-756 [Liu S-R, Chang J-G, Sun P-S. Forest hydrology: Forest and water in a context of global change. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(5): 753-756]
- [11] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述 [EB/OL]. (2021-03-22) [2021-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.2021-0728.1026.002.html> [Wang Y-F, Ye A-Z, Qiao F, et al. The Review on Service of Water Retention and Computing Method. [EB/OL]. (2021-03-22) [2021-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210728.1026.002.html>]
- [12] 马文静, 王晓燕, 耿润哲. 我国森林生态系统水量调节研究综述. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2016, **37**(2): 87-92 [Ma W-J, Wang X-Y, Geng R-Z. An overview of research on forest water conservation in China. *Journal of Capital Normal University: Natural Science*, 2016, **37**(2): 87-92]
- [13] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, 2009, **28**(3): 529-534 [Zhang B, Li W-H, Xie G-D, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(3): 529-534]
- [14] 王尧, 徐佩, 傅斌, 等. 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展. 生态经济, 2018, **34**(2): 158-164 [Wang Y, Xu P, Fu B, et al. Water conservation function assessment models of forest ecosystem: A review. *Ecological Economy*, 2018, **34**(2): 158-164]
- [15] 陆文, 唐家良, 章熙锋, 等. 山地流域水文模拟研究进展与展望. 山地学报, 2020, **38**(1): 50-61 [Lu W, Tang J-L, Zhang X-F, et al. Hydrological simulation in mountainous region: Present state and perspectives. *Mountain Research*, 2020, **38**(1): 50-61]
- [16] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近 15a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(11): 2453-2462 [Gu Z-M, Jin X-B, Shen C-Z, et al. Variation and influence factors of water conservation service function in Jiangsu province from 2000 to 2015. *Resources and Environment in the Yangtze*

- Basin, 2018, **27**(11) : 2453-2462]
- [17] 唐尧, 祝炜平, 张慧, 等. InVEST 模型原理及其应用研究进展. 生态科学, 2015, **34**(3) : 204-208 [Tang Y, Zhu W-P, Zhang H, *et al.* A review on principle and application of the In VEST model. *Ecological Science*, 2015, **34**(3) : 204-208]
- [18] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. 地理研究, 2016, **35**(4) : 664-676 [Bao Y-B, Li T, Liu H, *et al.* Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province by InVEST model. *Geography Research*, 2016, **35**(4) : 664-676]
- [19] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, **22**(1) : 79-86 [Wang Z-G, Liu C-M, Huang Y-B. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin. *Progress in Geography*, 2003, **22**(1) : 79-86]
- [20] Kinyiry JR, Williams JR, King KW. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Theoretical Documentation: Version 2000 [EB/OL]. (2005-05-05) [2021-03-06]. [https://xueshu. baidu. com/usercenter/paper/show?paperid=899492af9b22dc49ee6602dc361c53f1](https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=899492af9b22dc49ee6602dc361c53f1)
- [21] 林峰. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析. 博士学位论文. 福州: 福建师范大学, 2019 [Lin F. Multi-time Temporal Scales Analysis for Forest Water Conservation in Discontinuous Watershed Based on SWAT Model. PhD Thesis. Fuzhou: Fujian Normal University, 2019]
- [22] Fan M, Shibata H, Chen L. Spatial conservation of water yield and sediment retention hydrological ecosystem services across Teshio watershed, northernmost of Japan. *Ecological Complexity*, 2018, **33**: 1-10
- [23] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估. 环境科学研究, 2018, **31**(6) : 1010-1018 [Qiao F, Fu G, Xu X-Q, *et al.* Assessment of water conservation function in the Three-Rivers. *Environmental Science Research*, 2018, **31**(6) : 1010-1018]
- [24] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析. 地理学报, 2020, **75**(5) : 1065-1078 [Lin F, Chen X-W, Yao W-Y, *et al.* Multi-time temporal scales analysis for forest water conservation in discontinuous watershed based on SWAT model. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(5) : 1065-1078]
- [25] 战云健, 任国玉, 任王玉, 等. 1951—2009 年东亚地区日降水趋势特征分析. 气候与环境研究, 2013, **18**(6) : 767-780 [Zhan Y-J, Ren G-Y, Ren Y-Y, *et al.* Changes in daily precipitation over East Asia during 1951-2009. *Climatic and Environmental Research*, 2013, **18**(6) : 767-780]
- [26] Su CH, Fu BJ. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 2013, **101**: 119-128
- [27] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. 地理研究, 2016, **35**(1) : 49-57 [Yi Y-H, Wu S-H, Zhao D-S, *et al.* Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010. *Geographical Research*, 2016, **35**(1) : 49-57]
- [28] 张爱静. 东北地区流域径流对气候变化与人类活动的响应特征研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2013 [Zhang A-J. Research on the Streamflow Responses to Climate Variability and Human Activities in Northeast China. PhD Thesis. Dalian: Dalian University of Technology, 2013]
- [29] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 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 [Gong S-H, Xiao Y, Zheng H, *et al.* Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(7) : 2455-2462]
- [30] 巩飞, 罗勇, 田犀, 等. 张家口坝上地区水源涵养功能的重要性评估. 草业科学, 2020, **37**(7) : 1337-1344 [Gong F, Luo Y, Tian X, *et al.* Evaluating the importance of water conservation function in Bashang area, Zhangjiakou. *Pratacultural Science*, 2020, **37**(7) : 1337-1344]
- [31] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 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 [Liu J, Fu B, Zhang C-H, *et al.* Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST Model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(3) : 577-585]
- [32] 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. 地理科学, 2016, **36**(10) : 1546-1554 [Chen S-S, Liu K, Bao Y-B, *et al.* Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City. *Geographical Science*, 2016, **36**(10) : 1546-1554]
- [33] 姜海燕, 蒋春英, 徐东艳, 等. 辽宁东部山区森林涵养水源的生态服务功能价值估算. 辽宁林业科技, 2005(3) : 6-9 [Jiang H-Y, Jiang C-Y, Xu D-Y, *et al.* Evaluation of values of eco-service function of water source regulation by forests in mountainous areas in eastern Liaoning. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2005(3) : 6-9]

作者简介 刘景红, 女, 1997 年生, 硕士研究生。主要从事水文生态学研究。E-mail: liujinghong19@mails.ucas.ac.cn

责任编辑 杨弘

刘景红, 郑晓, 樊俊美, 等. 基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估. 应用生态学报, 2021, **32**(11) : 3905-3912

Liu J-H, Zheng X, Fan J-M, *et al.* Evaluation of the value of water retention service in the middle and upper reaches of Hunhe River based on SWAT Model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(11) : 3905-3912