

# 湖北大别山区生态系统水源涵养功能遥感评估<sup>1</sup>

孙翔宇<sup>1,2</sup> 王立辉<sup>2\*</sup> 李扬<sup>3</sup> 杨启池<sup>2,4</sup> 吴兆福<sup>1</sup>

高飞<sup>1</sup> 路利杰<sup>2,4</sup> 肖飞<sup>2</sup> 凌峰<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430077;

3. 湖北省生态环境科学研究院 (省生态环境工程评估中心), 湖北 武汉 430072;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**【摘要】**: 湖北大别山区是长江中游和淮河中下游重要的水源补给区, 也是我国中部地区重要的生态屏障, 开展其水源涵养功能评估可以为区域生态保护和生态规划提供重要基础数据。以湖北大别山区为研究区, 在获取高精度精细生态系统类型数据基础上, 基于水量平衡模型评估水源涵养量, 分析其空间分布特征及生态系统类型、海拔和坡度等因子对水源涵养功能的影响。结果表明: (1) 研究区 2020 年水源涵养深度均值为 292 mm, 水源涵养总量为 438 m<sup>3</sup>, 空间上呈现东强西弱的特征; (2) 水源涵养总量贡献较大的是森林和灌丛, 贡献率占比超过 70%。单位面积水源涵养能力较强的为常绿阔叶林和常绿阔叶灌丛, 分别为 620 和 539 中低海拔(100 ~ 300 m)区域水源涵养总量占比最大, 为 42 高海拔(1 000 ~ 1 700 m)区域单位面积水源涵养量较高, 为 711 缓坡(5° ~ 15°)地区对水源涵养总量贡献最大, 为 47(4)水源涵养极重要区域占研究区总面积的 6 主要集中在东部的九资河镇、温泉镇、青石镇等; 重要区域占 12 主要集中在南部英山县草盘地镇、石头咀镇和罗田县九资河镇的山地。研究结果可为湖北大别山区生态环境保护、生态修复规划与生态空间管制提供重要数据支撑。

**【关键词】**: 水源涵养功能; 湖北大别山区; 水量平衡模型; 生态系统类型; 遥感评估

**【中图分类号】**: X87 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2023)03- 0487- 11

<sup>1</sup> **【收稿日期】**: 2022- 04- 19; **【修回日期】**: 2022- 05- 27

**【基金项目】**: 湖北省重点研发计划项目(2020BCA074); 湖北省自然科学基金创新性群体项目(2019CFA019); 湖北省环保科研项目(2021HB- ZC09); 国家自然科学基金项目(51809250)

**【作者简介】**: 孙翔宇(1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境遥感. E- mail: 2020170754@mail

**【\* 通讯作者 E- mail】**: wanglihui@whigg

【DOI】: 10.11870/cjlyzyyhj202303004

生态系统服务功能是指生态系统和生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[1,2]</sup>。水源涵养功能是生态系统提供的重要服务功能之一,其核心过程是对降雨进行截留、渗透和蓄积,并通过蒸散发来实现水循环、水流的调控。水源涵养的重要作用主要体现在拦蓄降水、减缓地表径流、补充地下水、滞洪补枯、水质保障、缓和河流流量的季节波动等方面<sup>[3]</sup>。通过定量手段评估生态系统水源涵养功能,分析影响水源涵养功能的主要因素,可以了解区域水源涵养功能状况,为生态保护和生态规划提供重要数据基础,对保障地区生态安全,实现区域生态系统可持续发展具有重要意义<sup>[4]</sup>。

目前,水源涵养评估的主要方法包括土壤蓄水能力法<sup>[5]</sup>、综合蓄水能力法<sup>[6]</sup>和水量平衡法<sup>[7]</sup>等。土壤蓄水能力法用土壤层蓄水量(非毛管孔隙度和土壤层厚度的乘积)来表示区域的水源涵养量,该方法简单、便于操作,但由于只考虑了土壤层的水分截留,导致水源涵养量计算结果偏小<sup>[8]</sup>。综合蓄水能力法在土壤蓄水能力法的基础上考虑了林冠层截留量和枯落物层持水量,提高了水源涵养量的估算精度,但由于缺少对蒸散发和降雨过程的考虑,无法反映动态蓄水过程<sup>[9]</sup>,仅适用于静态蓄水量计算。水量平衡法着眼于水量的输入和输出,从降水、蒸发、蒸腾及各种径流等方面考虑区域的水源涵养功能,适用于生态系统基础资料较少、研究区域较大的情况,是目前研究和应用的热点。国外学者基于水量平衡原理对西班牙的 FrancoLi 流域<sup>[10]</sup>、美国明尼达州<sup>[11]</sup>等地产水量进行了评估研究。国内学者采用水量平衡法在三峡库区<sup>[12]</sup>、韶关市<sup>[13]</sup>、张家口市<sup>[14]</sup>、广州市<sup>[15]</sup>、陕西省<sup>[16]</sup>、安徽省<sup>[17]</sup>、江苏省<sup>[18]</sup>、岷江上游<sup>[4]</sup>、三北防护林<sup>[19]</sup>等不同区域和尺度开展了水源涵养评估研究,均取得了较好的结果。

大别山区地处鄂豫皖三省交界地带,物种丰富,森林茂密,森林覆盖率达 75%,湖北大别山国家级自然保护区的森林覆盖率高达 95%<sup>[20]</sup>,被列入中国优先保护生态系统名录,为国家三级生态敏感区、全国涵养水源重要区域,具有重要的生态防护功能,对其水源涵养功能评估具有重要意义。目前有学者对安徽省大别山片区的水源涵养服务功能进行了评估研究,如王勤等<sup>[21]</sup>分析了安徽大别山 5 大水库 7 种不同林分类型的水源涵养功能;王升堂等<sup>[22]</sup>采用水量平衡法计算了皖西大别山森林的水源涵养功能。然而,对于湖北大别山区水源涵养功能的相关研究依然缺乏。湖北大别山区是长江流域与淮河流域的分水岭,是长江中游和淮河中下游重要的水源补给区,是国家重要的水土流失防治功能区,也是中部地区重要的生态屏障、生态功能区,其中黄冈大别山区被誉为“中国中部生态之肺”并被列入世界地质公园网络名录。研究湖北大别山区的水源涵养功能对长江中下游、江汉平原、江淮平原的生态安全具有重要的现实意义<sup>[23]</sup>。

此外,目前采用水量平衡法对水源涵养功能的相关研究,其输入的生态系统类型数据,多采用 1:100 万植被数据集<sup>[16,24]</sup>、中科院资源环境数据中心土地利用数据<sup>[18]</sup>、中科院遥感所 100 m 土地利用数据<sup>[14]</sup>等,这些数据存在空间分辨率和数据精度低、类别不够精细等问题。本文结合大量野外实地调查数据,采用 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 遥感数据解译获取研究区 2020 年高精度精细生态系统类型数据,提高了模型输入数据的空间分辨率和精度,同时具有较强的现势性,可以更精准地对湖北大别山区生态系统水源涵养能力现状进行评估。在此基础上,基于水量平衡模型定量评估湖北大别山区生态系统水源涵养功能,分析了水源涵养空间分布特征、水源涵养功能重要性空间分布以及不同生态系统类型、不同海拔和坡度对水源涵养功能的影响。研究结果可为湖北大别山区生态环境保护、生态修复规划与生态空间管制提供重要的数据支撑,对推动湖北省大别山片区乃至整个大别山区生态文明建设具有重要意义。

## 1 研究区概况

大别山位于湖北、河南和安徽三省交界,介于 30° 10' N~32° 30' N, 112° 40' E~117° 10' E,是长江-淮河的天然分水岭,也是连接长江经济带、黄河流域高质量发展和生态保护、淮河生态经济带和“一带一路”的重要战略支点<sup>[25]</sup>。根据国务院扶贫开发领导小组办公室、国家发展和改革委员会 2012 年 12 月发布的《大别山片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011-2020)》,湖北大别山区行政区域范围包括孝感市大悟县、孝昌县和黄冈市红安县、罗田县、英山县、麻城市、团风县、蕲春县<sup>[26]</sup>,经纬度范围为 29° 59' N~31° 50' N, 113° 45' E~116° 5' E,如图 1 所示。区域总面积约为 1.54 万 km<sup>2</sup>,占大别山区总面积的 22.99%,占湖北省总面积的 8.28%。

湖北大别山区平均海拔约 203 m，最高海拔 1 685 m，最低海拔为 8 m。地势整体东、北高，西、南低，地貌包含低山、中山、丘陵、平原，地形复杂。气候类型属北亚热带湿润季风气候、雨量充沛、光热资源丰富，具有明显的南北过渡性气候特征，同时具有典型的森林小气候和山地气候特征，水热时空分布与自然植被和作物生长发育节律同步。年均温在 15℃~18℃，年均降水量在 1 100~1 800 mm，4~7 月占全年降水量的 70%~75%，无霜期在 210~250 d。区域河流众多、水系发达、径流资源丰富，其中注入长江的河流主要有蕲河、浠河、大悟河、淝水等，注入淮河的水系为竹竿河。土壤成土母质主要以片麻岩及其坡积物等发育起来的山地黄棕壤为主，主要植被类型为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林，针阔混交林、灌丛、草丛等，具有较为明显的植被垂直带谱<sup>[27]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 数据与预处理

#### 2.1.1 生态系统类型野外调查样点数据

为了获取生态系统类型遥感解译数据并验证解译精度，需要获取生态系统类型样本数据。研究于 2020 年 9~10 月在湖北大别山区开展生态系统类型野外调查工作，调查范围涵盖整个研究区。在研究区共采集各类生态系统类型样点 600 余个，样点类型包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、常绿阔叶灌丛、落叶阔叶灌丛、草丛、河流、湖泊、水库/坑塘、水田、旱地、建设用地、交通用地、采矿场、裸地等。其中，植被类型主要采用野外实地调查并拍摄景观照片的采样方式，景观照片如图 2 所示。建设用地、交通用地、采矿场、裸地、湖泊、水库/坑塘、河流、裸地等在影像上易于识别的生态系统类型采用基于高分辨率遥感影像方式采集样点。

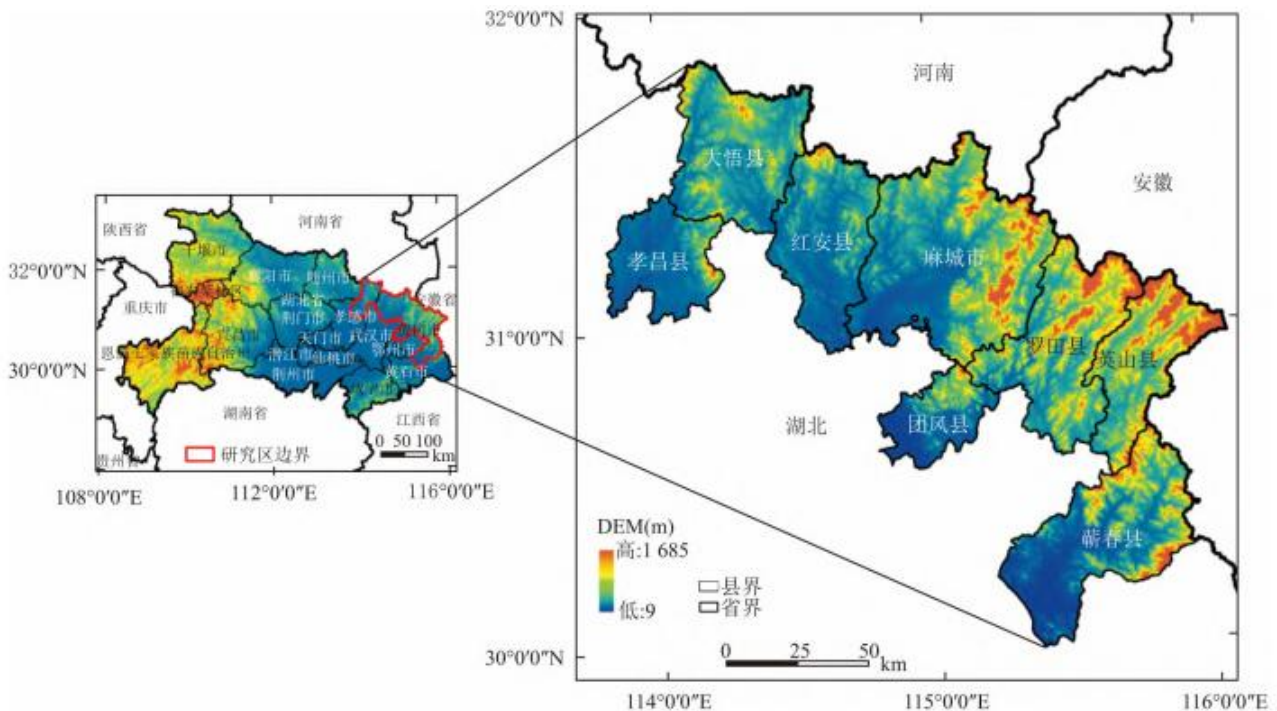


图 1 湖北大别山区位置图

Fig. 1 Location of Dabieshan Mountain Area, Hubei Province

### 2.1.2 生态系统类型 2020 年遥感解译数据

利用湖北大别山区 2020 年多期 Sentinel-2 遥感影像, 结合野外地面调查与高分辨率遥感影像采集的生态系统类型样本数据, 参考地形、植被等专题数据, 采用 eCognition 软件, 基于面向对象影像分类技术, 获取湖北大别山区 2020 年生态系统类型遥感解译数据, 其结果如图 3 所示。其中, I 级生态系统类型包括森林、灌丛、草地、耕地、湿地、人工表面和其他; II 级生态系统类型包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、常绿阔叶灌丛、落叶阔叶灌丛、灌木园地、草丛、水田、旱地、草本湿地、水库/坑塘、河流、湖泊、建设用地、交通用地、采矿场、裸土、裸岩等。基于野外调查与高分辨率遥感影像采集的样点对生态系统类型遥感解译结果进行精度验证, 一级生态系统类型遥感解译总体精度为 93.63%, 二级生态系统类型总体精度达到 87.38%, 满足研究需要。



图 2 湖北大别山区生态系统类型调查样点景观照片

Fig. 2 Landscape photos of sample sites in Dabieshan Mountain Area, Hubei Province

### 2.1.3 降水数据

研究使用的降水数据来源于国家气象科学数据中心-中国气象数据网(data.cma.cn)。在中国地面气候资料日值数据集中选择湖北大别山区及周边地区共 31 个气象站的 2015~2020 年每日 20~20 时降水量数据, 去除无效填充值, 将每个站点的每日数据统计为年降水量数据, 采用 Kriging 插值方法得到区域 2015~2020 年每年降水量数据, 空间分辨率为 250 m, 对六年数据进行平均, 获取区域多年平均降水量, 其结果如图 4 所示。

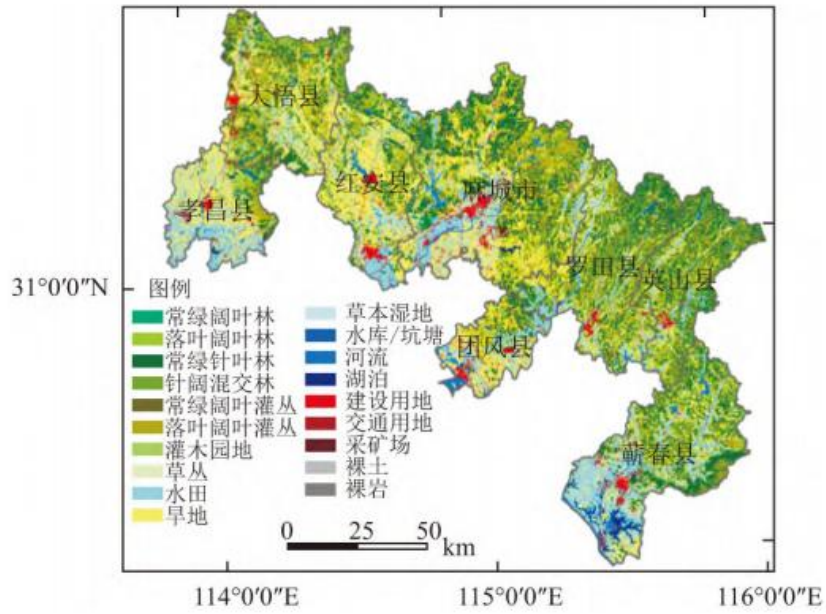


图3 湖北大别山区 2020 年生态系统类型  
遥感解译数据

Fig. 3 Ecosystem types classification of Dabieshan Mountain Area, Hubei Province in 2020

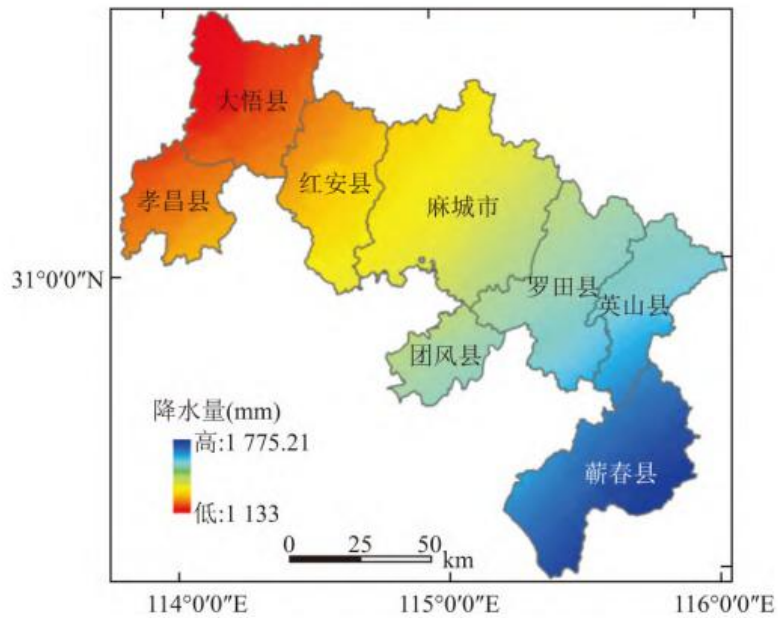


图4 湖北大别山区 2015~2020 年年平均降水量  
Fig. 4 Average precipitation in Dabieshan Mountain Area, Hubei Province from 2015 to 2020

#### 2.1.4 蒸散发数据

蒸散发数据来源于 Terra/MODIS 陆地表层水汽通量数据产品，即 MODIS 全球蒸散发产品 (MOD16A3) 数据 (<https://www.nasa.gov/>)。该数据集利用 Penman-Monteith 公式进行蒸散算法计算，综合考虑了包括陆地蒸发和植物蒸腾<sup>[28]</sup>。数据通过了全球通量塔的验证，模拟精度达到 86%。选择的卫星轨道号为 h27v05、h27v06、h28v05 和 h28v06，时相为 2015 年至 2020 年。将原始 HDF 文件转换为 Geo-Tiff 格式并进行重投影，重采样为 250 m 空间分辨率。裁剪得到湖北大别山区 2015~2020 年每年蒸散发数据，计算六年平均蒸散发 ET 因子空间分布，如图 5 所示。

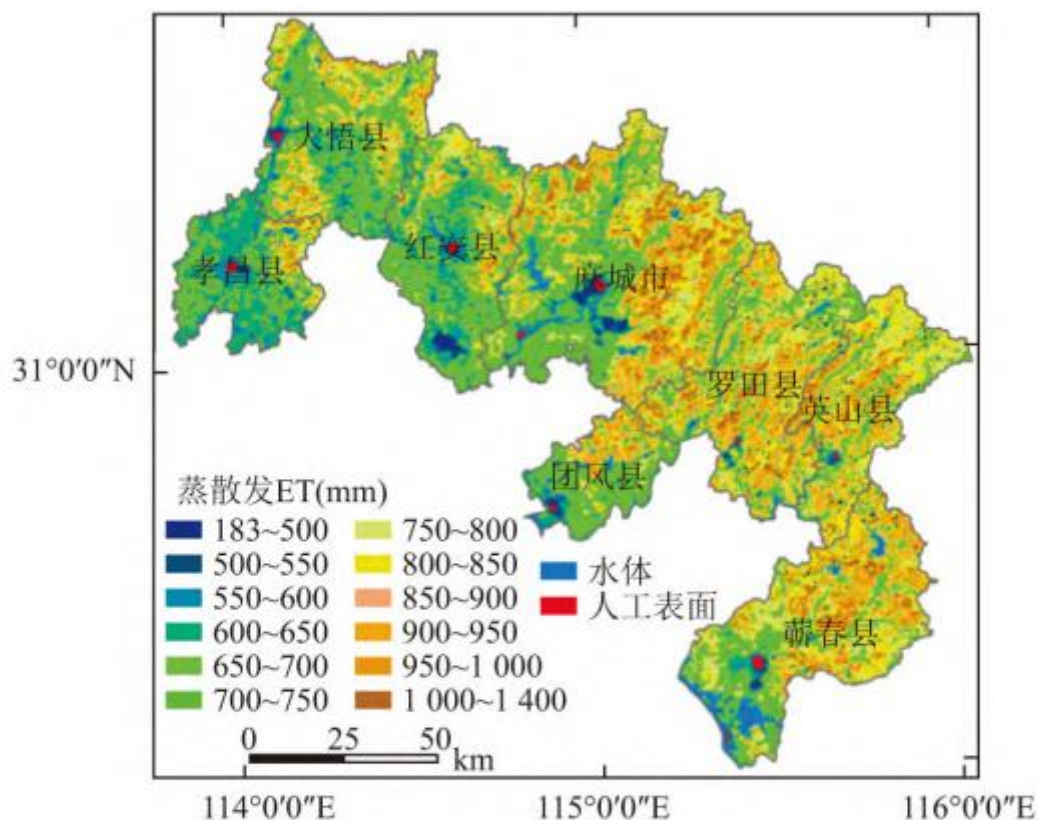


图 5 湖北大别山区 2015~2020 年平均蒸散发量

Fig. 5 Average evapotranspiration in Dabieshan Mountain of Hubei Province from 2015 to 2020

#### 2.1.5 地表径流量数据

地表径流量由地表径流系数与降水量相乘而来，公式为：

$$R = P_i \times \alpha_i \quad (1)$$

式中： $R$  为地表径流量，单位为 mm； $P_i$  为多年平均降水量，单位为 mm； $\alpha_i$  为平均地表径流系数。平均地表径流系数参考生态环境部《生态保护红线划定指南》<sup>[29]</sup>。利用生态系统类型 2020 年遥感解译数据计算湖北大别山区地表径流量空间分布，结果如图 6 所示。

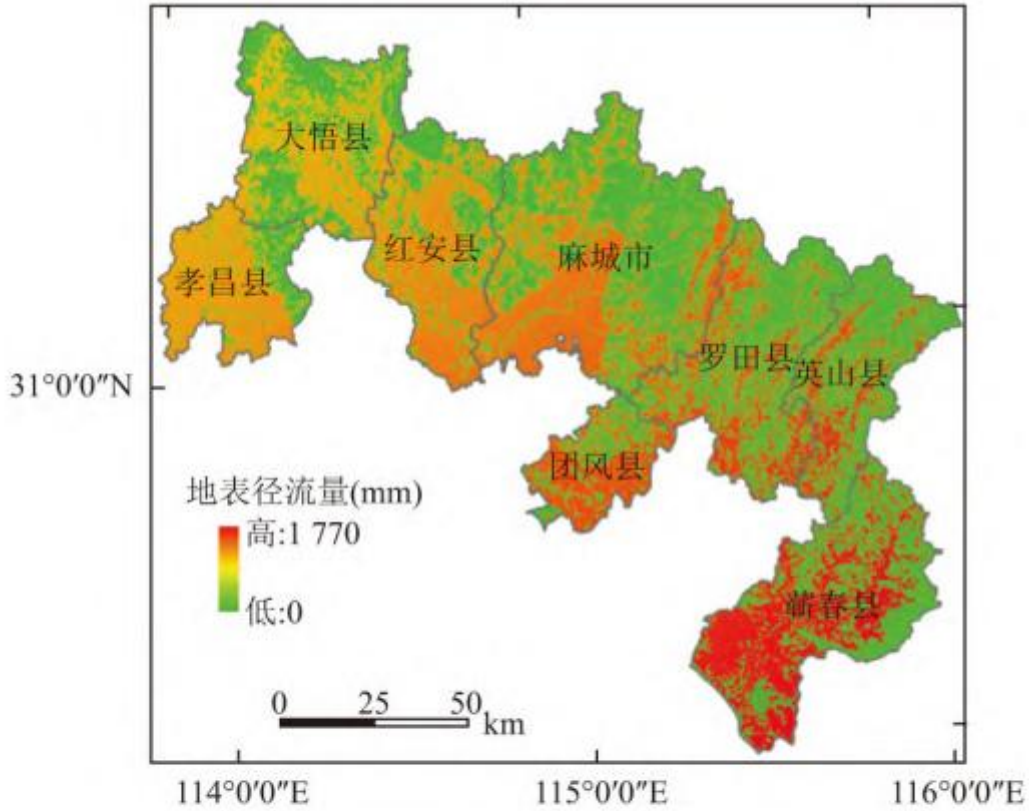


图 6 湖北大别山区地表径流量空间分布图  
 Fig. 6 Spatial distribution of surface runoff in Dabieshan Mountain Area, Hubei Province

### 2.1.6 DEM 与坡度数据

研究使用的 DEM 来源于日本经济产业省 (METI) 和美国航空航天局 (NASA) 联合研发的 ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), 下载于美国地质调查局 (<http://glovis.usgs.gov/>), 该数据空间分辨率为 30 m。基于 DEM 数据计算研究区坡度, 结果如图 7 所示。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 水源涵养功能评估模型

水量平衡法将生态系统视为一个整体, 着眼于水量的输入和输出, 从质量守恒的角度将降水量 (输入量) 与生态系统蒸发、蒸腾及各种径流消耗 (输出量) 的差值作为水源涵养量, 所需数据主要包括降水、蒸散发和生态系统类型等。其计算公式为<sup>[29]</sup>:

$$Qwr = \sum_{i=1}^n A_i \times (P_i - R_i - ET_i) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中：Qwr 为水源涵养量，单位为  $m^3/a$ ；i 为第 i 类生态系统的类型；n 为生态系统类型总数； $A_i$  为第 i 类生态系统的面积，单位为  $m^2$ ； $P_i$  为多年平均降水量，单位为  $mm/a$ ； $R_i$  为多年平均地表径流量，单位为  $mm/a$ ； $ET_i$  为多年平均蒸散发，单位为  $mm/a$ 。其中，多年平均数据本文选择年份为 2015~2020 年。

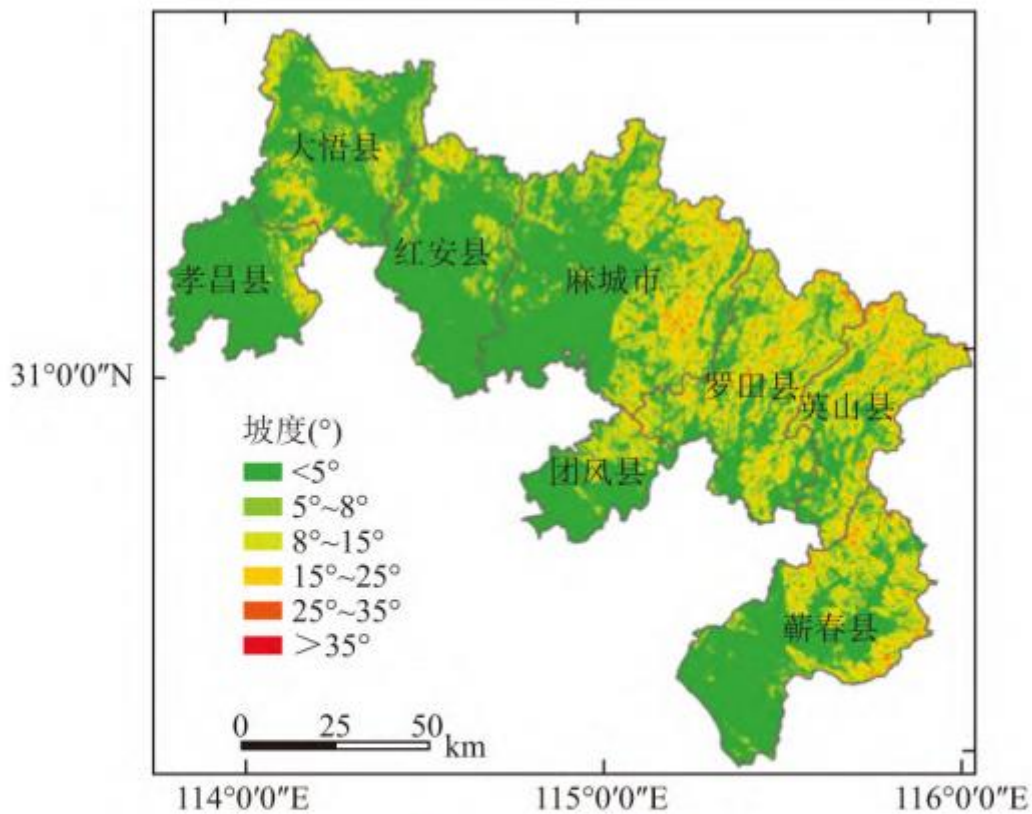


图 7 湖北大别山区坡度图

Fig. 7 Slope map of Dabieshan Mountain Area, Hubei Province

### 2.2.2 水源涵养重要性评价

水源涵养重要性在于整个区域对于评价地区水资源的依赖程度。依据《生态保护红线划定技术指南》，将累加服务值占生态系统服务总值比例的 50% 和 80% 对应的栅格值作为研究区评估分级的分界点，即累计服务功能量占 50%、50%~80%、80%~100% 的栅格，将湖北大别山水源涵养重要性分为极重要、重要和一般重要 3 个等级<sup>[29]</sup>，评估分级设定情况见表 1。

表 1 生态系统水源涵养服务功能评估分级表

重要性等级	极重要	重要	一般重要
累积服务值占服务总值比例 (%)	>80	50~80	<50

### 3 结果与分析

#### 3.1 降水和蒸散发空间分布特征

湖北大别山区降水时空分布不均，年均降水量有由西北至东南递增的趋势。西北地区的大悟县降水量最低，多年平均降水量为 1 128 mm，东南地区蕲春县降水充沛，多年平均降水量为 1 694 mm。多年平均蒸散量为 759 mm，在空间上有由西至东递增的特点，高值主要集中在罗田县、英山县、麻城市东部和蕲春县南部。研究区蒸散发量呈现的分布特征与区域植被、降雨分布有相关性。研究区东部地区植被覆盖率高，蒸腾作用大，使该区域蒸散发较高。此外，东部降雨充沛，气候温暖湿润，也是导致蒸散发量高于其他区域的重要原因<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 水源涵养特征分析

##### 3.2.1 水源涵养深度空间分布

利用水源涵养功能评估模型计算湖北大别山区 2020 年水源涵养空间分布。存在负值表明局部的降水量小于陆地蒸散发和地表径流之和，不能涵养水源，将其归 0。此外，水体和城镇水源涵养不在评估范围之内，也将其归 0，结果如图 8 所示。湖北大别山区 2020 年水源涵养深度值在 0~1 743.17 mm 范围波动，空间差异明显，均值为 292 mm，水源涵养总量为  $43.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。空间上呈现东强西弱的特征，水源涵养能力较好的区域主要位于研究区东部，如蕲春县太平林场、湖北大别山国家级自然保护区等地，这些区域生态系统类型以森林为主，植被覆盖度较高，人类活动少，降水较多，地表径流较小，水源涵养能力较强。水源涵养能力较低的区域主要位于澠河流域下游以及淅水上游，这些区域降水较少，而蒸散发能力与其他地区相当，导致水源涵养功能较差。水源涵养能力最差的区域位于西部红安县八里湾镇和孝昌县白沙镇等地，这些区域人口聚集，人类生产活动密集，主要生态系统类型为农田、城镇和湿地，植被覆盖度较低，地表径流较大，导致水源涵养能力差。

统计湖北大别山区各县(市)水源涵养深度均值和水源涵养总量，结果如图 9 所示。由图可知，各县(市)之间水源涵养总量及水源涵养深度均值都存在较为显著的差异。其中英山县、罗田县水源涵养深度均值都大于 400 mm，孝昌县、红安县水源涵养深度均值都小于 200 mm，低于研究区平均水平。由于各县(市)的面积差异较大，对研究区水源涵养总量贡献不同，孝昌县、团风县水源涵养总量均不超过  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，麻城市、蕲春县、英山县水源涵养总量都超过了  $7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中麻城市的水源涵养总量最大。

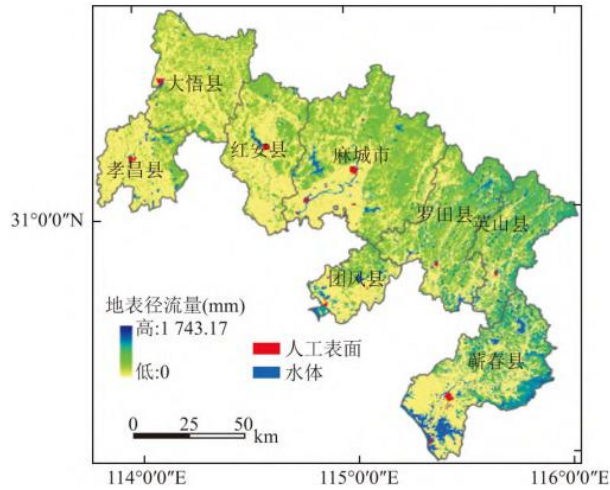


图 8 湖北大别山区 2020 年水源涵养深度空间分布图  
 Fig. 8 Spatial distribution map of water conservation depth in Dabieshan Mountain Area, Hubei province in 2020

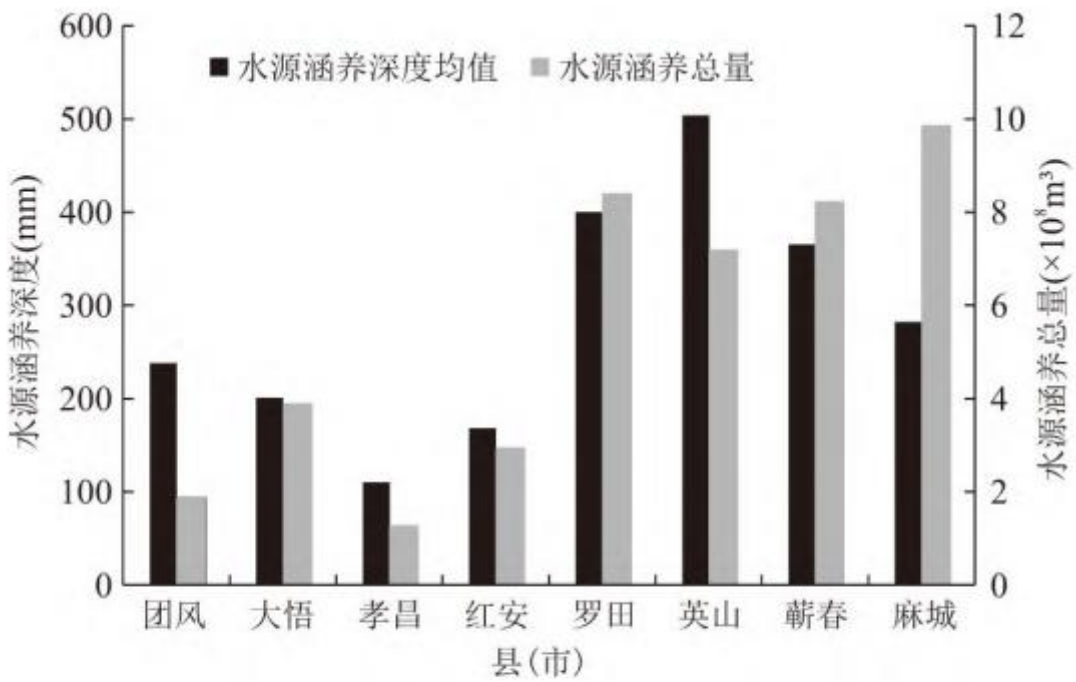


图 9 研究区各县(市)水源涵养深度均值和水源涵养总量

Fig. 9 Average water conservation depth and total water conservation in different counties (cities) in study area

3. 2. 2 不同生态系统类型水源涵养量

统计 2020 年生态系统类型遥感解译结果, 湖北大别山区一级生态系统类型占比: 草地、耕地、森林、灌丛、人工表面、湿地和其他占比依次为 1.86%、46.13%、27.31%、18.05%、3.50%、3.14%和 0.01%。其中占比最大的为耕地生态系统, 占总面积的 46.13%, 但其水源涵养量仅占区域的 13.71%, 森林和灌丛占总面积的 45.36%, 其水源涵养量占总水源涵养量的 77.15%。在水源涵养功能评估中, 森林和灌丛在研究区水源涵养总量中占主导地位, 主要由于植被对于蒸发、蓄水等具有积极作用, 地表径流较小<sup>[30]</sup>。

研究区生态系统二级类型单位面积水源涵养较好的为常绿阔叶灌丛和常绿阔叶林, 其中常绿阔叶灌丛单位面积水源涵养达到 620.63 mm, 主要由于阔叶灌丛土壤蓄水能力较好, 枯落物蓄积能力强, 枯落物不仅能很好地让降雨不直接落至地面, 增加土壤粗糙度, 同时枯落物自身具有很好的吸水特性, 更加有利于涵养水源<sup>[31]</sup>;常绿阔叶林单位面积水源涵养达到 539.51 mm, 主要是因为其独特的林冠和根系, 使其具有良好的林冠层截留率、土壤非毛管持水率和枯落物持水能力<sup>[32]</sup>。研究区森林类型以马尾松、杉木和栎为主, 其中马尾松和杉木等常绿针叶林占比较大, 而常绿针叶林持水、蓄水、截留能力弱于阔叶林, 导致研究区总体水源涵养能力不足<sup>[21]</sup>。因此提升森林覆盖率和改善林地类型对于涵养水源能力及生态系统的可持续发展至关重要。

### 3.2.3 不同海拔和坡度水源涵养功能差异

将研究区海拔分为五级: 低海拔 (<100 m)、中低海拔 (100~300 m)、中海拔 (300~500 m)、中高海拔 (500~1 000 m) 和高海拔 (1 000~1 700 m)<sup>[32]</sup>, 统计不同海拔等级面积及其水源涵养量占比, 结果如图 10 所示。由图可知, 研究区以低海拔和中低海拔区域为主。其中, 中低海拔区域水源涵养量最大, 其次是中海拔、中高海拔和低海拔区域, 高海拔区域最少。中低海拔区域水源涵养能力大于低海拔区域, 导致中低海拔区域水源涵养量占比最大。低海拔区域面积占比大, 但其水源涵养量占比并不高, 主要因为低海拔区域人类活动频繁导致水源涵养能力较差。中高海拔、高海拔区域主要位于研究区东部, 包括蕲春县青石镇、英山县草盘地镇、罗田县九资河镇等区域, 这些区域单位面积水源涵养能力较高。主要由于其受人类活动影响小, 森林覆盖率高, 森林质量较好。

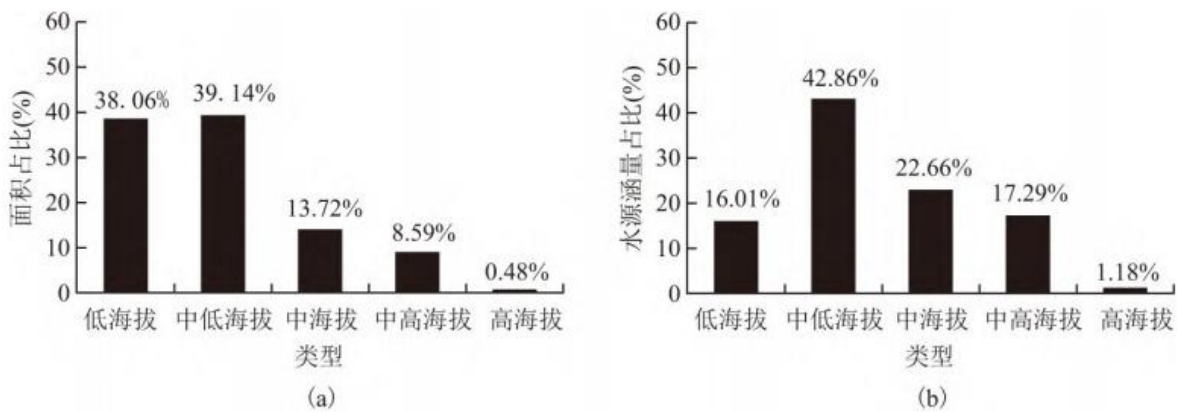


图 10 不同海拔类型面积占比 (a) 及水源涵养量占比 (b) 分布

Fig. 10 Proportion of area (a) and water conservation (b) of different elevation types

将研究区坡度分为平坡 (<5°)、缓坡 (5°~15°)、斜坡 (15°~25°) 和陡坡 (≥25°), 不同坡度和水源涵养量占比如图 11。从图中可以看出, 研究区以平坡为主, 其次是缓坡, 斜坡和陡坡地区占比较小, 其中陡坡面积占比不足 1%。缓坡地区对研究区水源涵养贡献最大, 主要是因为其面积占比较大且水源涵养能力较好, 其次是平坡和斜坡地区, 陡坡地区虽然水源涵养能力强, 但由于面积占比很小, 其水源涵养量占比最少。平坡地区类型面积占比最大, 但水源涵养量占比不如缓坡地区, 主要是因为平坡地区的水源涵养能力受人类活动影响较大, 如耕地开发、建设用地开发、乱砍滥伐等行为导致水源涵养能力最弱。因此, 对

研究区 25° 以上的坡耕地有计划地还林还草，不仅有利于增强研究区水源涵养功能，而且对优化研究区生态系统类型、预防自然灾害有着积极的意义。

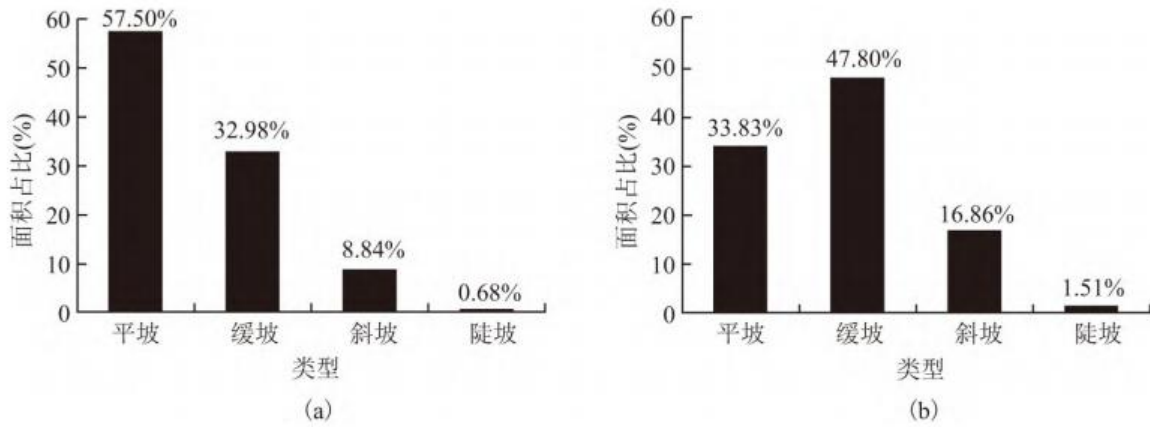


图 11 不同坡度类型面积占比 (a) 及水源涵养量占比 (b) 分布

Fig. 11 Proportion of area (a) and water conservation (b) of different slope types

### 3.2.4 水源涵养重要性空间特征分析

基于 2020 年生态系统水源涵养量空间分布和水源涵养服务功能评估分级标准，计算研究区水源涵养功能重要性，结果如图 12 所示。统计各重要性等级面积，其中极重要区域 976.94 km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 6.56%，主要分布在研究区东部，包括罗田县九资河镇、英山县温泉镇、蕲春县蕲水东部的青石镇等，生态系统类型以森林和灌丛为主；重要区域 1 800.38 km<sup>2</sup>，占研究区总面积的 12.08%，主要集中于研究区南部，包括英山县草盘地镇、石头咀镇和罗田县九资河镇的山地。一般重要区域占 12 120.56 km<sup>2</sup>，占总研究区域的 81.36%，分布在广大平原和丘陵区，包括大悟县、孝昌县、红安县平原的大部分区域，这些区域水源涵养功能相对较差。

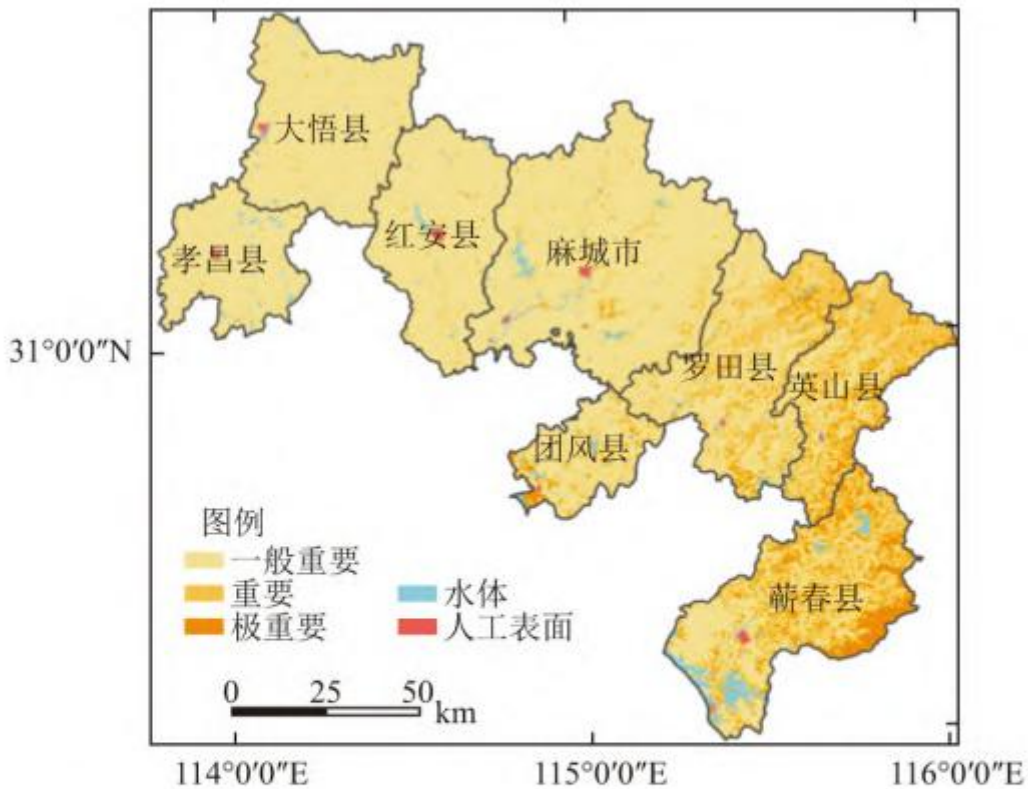


图 12 湖北大别山区水源涵养重要性等级空间分布图  
 Fig. 12 Spatial distribution map of water conservation importance grades in Dabieshan Mountain Area, Hubei Province

《国务院关于新时代支持革命老区振兴发展的意见》(国发[2021]3号)中指出,湖北大别山区是重要的生态屏障区域。然而,其水源涵养功能极重要区域和重要区域的面积之和占研究区面积的比例不足 20%,水源涵养能力亟需提高。加强研究区水源涵养能力建设应从恢复生态系统类型入手,以自然恢复和保护保育为主,采用人工恢复与自然恢复相结合的方式。加强现有植被保护,合理规划自然资源的开发,限制开发建设活动,最大程度减少人为因素造成的水土流失,同时推进森林总量和森林质量双提升,因地制宜地开展宜林地造林计划,大力推进森林质量精准提升,着力实施大别山区森林质量精准提升示范项目。

#### 4 结论

本文以湖北大别山区为研究区,基于水量平衡模型评估研究区 2020 年生态系统水源涵养功能,结果表明:

(1)研究区 2020 年水源涵养深度均值为 292 mm,水源涵养总量为  $43.57 \times 108 \text{ m}^3$ 。空间上呈现东强西弱的特征,主要由于东部降水较多、人类活动少、植被覆盖率高,而地表径流较小,水源涵养能力较强。水源涵养能力较低的区域主要位于人口密集区域,主要生态系统类型为农田、城镇和湿地,植被覆盖度较低,地表径流较大,导致水源涵养能力差。

(2)从一级生态系统类型来看,水源涵养总量贡献较大的是森林和灌丛,贡献率占比超过 70%。耕地生态系统在研究区面积占比最大,但其水源涵养量占比不足 14%。从二级生态系统类型来看,水源涵养能力较好的是常绿阔叶灌丛和常绿阔叶林,水源

---

涵养深度均值分别为 620.63 和 539.51 mm。

(3) 从不同海拔来看, 研究区中低海拔区域面积占比最多, 水源涵养量占比最大, 高海拔区域单位面积水源涵养能力较高, 但由于面积占比低, 导致其水源涵养量最小。从不同坡度来看, 缓坡地区对水源涵养总量贡献最大, 平坡占地面积最大, 但受人类活动的影响, 其水源涵养量占比不如缓坡地区, 陡坡地区水源涵养能力较强, 但由于面积占比不足 1%, 其水源涵养量最少。

(4) 从水源涵养重要性空间特征上看, 极重要区域占研究区总面积的 6.56%, 主要集中在东部的罗田县九资河镇、英山县温泉镇、蕲春县蕲水东部的青石镇等; 重要区域占研究区总面积的 12.08%, 主要集中在研究区南部英山县草盘地镇、石头咀镇和罗田县九资河镇的山地; 一般重要区域占研究区总面积的 81.36%, 分布在西部的广大平原和丘陵区。

## 参考文献

- [1] SINYOLO S, MUDHARA M, WALE E. Water security and rural household food security: Empirical evidence from the Mzinyathi district in South Africa[J]. Food Security, 2014, 6(4): 483-499.
- [2] 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 45-50. OUYANG Z Y, WANG R S. Ecosystem services and their economic valuation[J]. World Sci-Tech R & D, 2000, 22(5): 45-50.
- [3] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 835-843. KONG L Q, WANG Y Q, ZHENG H, et al. A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 835-843.
- [4] 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[J]. 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[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3): 577-585.
- [5] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 91-132. MA X H. Forest hydrology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 91-132.
- [6] ZHANG B, LI W, XIE G, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [7] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484. XIAO H, OUYANG Z Y, ZHAO J Z, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan Island[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 481-484.
- [8] 姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 34-36, 40. JIANG W L. Theory and method to accounting value of forest water conservative[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(2): 34-36, 40.
- [9] 张灿强, 李文华, 张彪, 等. 基于土壤动态蓄水的森林水源涵养能力计量及其空间差异[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 697-704. ZHANG C Q, LI W H, ZHANG B, et al. Water conservation of forest ecosystem and its spatial differences based on dynamics of soil water storage in Anji County[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(4): 697-704.

---

[10] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165:6-18.

[11] MOMBLANCH A, PAREDES-ARQUIOLA J, ANDREU J. Improved modelling of the freshwater provisioning ecosystem service in water scarce river basins[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 94:87-99.

[12] 邓伟, 刘红, 袁兴中, 等. 三峡库区水源涵养重要区生态系统格局动态演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(4):661-668. DENG W, LIU H, YUAN X Z, et al. Spatial-temporal changes of ecosystem pattern in the Three Gorges Reservoir water conservation area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(4):661-668.

[13] 王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):381-388. WANG X M, LIU X C, LONG Y X, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan city based on improved InVEST[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):381-388.

[14] 黄菁, 范继辉, 何晓蓉. 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究[J]. *山地学报*, 2021, 39(3):327-337. HUANG J, FAN J H, HE X R. InVEST-model based evaluation of water conservation function in Zhangjiakou area, China[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(3):327-337.

[15] 陈德权, 兰泽英, 陈晓辉, 等. InVEST 模型在市县级水源涵养功能评价中的应用——以广东省广州市为例[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4):196-206. CHEN D Q, LAN Z Y, CHEN X H, et al. Application of InVEST model in evaluation of water conservation function at city and County-level:A case study in Guangzhou city, Guangdong Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4):196-206.

[16] 曹叶琳, 宋进喜, 李明月, 等. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):217-223. CAO Y L, SONG J X, LI M Y, et al. Evaluation of ecosystem water conservation function of Shaanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4):217-223.

[17] 李莹莹, 马晓双, 祁国华, 等. 基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省水源涵养功能研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(2):313-325. LI Y Y, MA X S, QI G H, et al. Studies on water retention function of Anhui Province based on InVEST model of parameter localization[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(2):313-325.

[18] 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[J]. *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[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11):2453-2462.

[19] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(16):5847-5856. WANG Y, ZHANG C S, LIU C L, et al. Research on the pattern and change of forest water conservation in Three-North Shelterbelt Forest Program region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16):5847-5856.

[20] 景丽, 张伟, 上官彩霞, 等. 大别山区油茶产业高质量发展研究[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(7):153-158. JING L, ZHANG W, SHANGGUAN C X, et al. High-quality development of *Camellia oleifera* industry in dabie mountain area[J]. *Chinese*

---

Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(7):153-158.

[21] 王勤, 张宗应, 徐小牛. 安徽大别山库区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3):59-62. WANG Q, ZHANG Z Y, XU X N. Soil properties and water conservation function of different forest types in Dabieshan district, Anhui[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(3):59-62.

[22] 王升堂, 孙贤斌, 夏韦, 等. 生态系统水源涵养功能的重要性评价——以皖西大别山森林为例[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(10):1252-1257. WANG S T, SUN X B, XIA W, et al. Evaluating on significance function of water conservation in forest ecosystem: Taking Dabieshan Mountain in western Anhui Province as an example[J]. Resource Development & Market, 2019, 35(10):1252-1257.

[23] 吴丽慧, 马达. 湖北省大别山区文化生态旅游发展策略研究——以黄冈市为例[J]. 当代经济, 2020(11):80-82. WU L H, MA D. Study on the development strategy of cultural eco-tourism in dabie mountain area of Hubei Province: A case study of Huanggang city[J]. Contemporary Economics, 2020(11):80-82.

[24] 范建忠, 李登科, 高茂盛. 基于MOD16的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9):1536-1543. FAN J Z, LI D K, GAO M S. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9):1536-1543.

[25] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4):771-784. HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi County of the Dabie Mountain Area[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4):771-784.

[26] 国务院扶贫办, 国家发展改革委. 大别山片区区域发展与扶贫攻坚规划[2011-2020年][Z]. 2013. STATE COUNCIL POVERTY ALLEVIATION OFFICE, NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. Regional development and poverty alleviation plan for Dabieshan Mountain Area[2011-2020][Z]. 2013.

[27] 王映明. 湖北大别山植被[J]. 武汉植物学研究, 1989, 7(1):29-38. WANG Y M. The vegetation of Dabieshan Mountain in Hubei Province[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1989, 7(1):29-38.

[28] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8):1781-1800.

[29] 环境保护部, 国家发展和改革委员会. 国家生态保护红线划定指南[Z]. 2017. MINISTRY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. National ecological protection red line delineation guide[Z]. 2017.

[30] ZENG L, LI J. A Bayesian belief network approach for mapping water conservation ecosystem service optimization region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6):1021-1038.

[31] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2):106-109. SUN Y H, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest

---

types in Jinyun Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2):106-109.

[32] 孙清琳, 李延森, 郭继凯, 等. 云和县森林生态系统水源涵养功能评估[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(5):888-896. SUN Q L, LI Y S, GUO J K, et al. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Yunhe County, Zhejiang Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(5):888-896.