



哀牢山地区生态系统水源涵养功能评估分析

周博奇 段禾祥 李璐 刘彦枫 李林霞 欧光龙

Assessment and Analysis of Water Conservation Function in the Ailao Mountain Ecosystem

Zhou Boqi, Duan Hexiang, Li Lu, Liu Yanfeng, Li Linxia, Ou Guanglong

引用本文:

周博奇, 段禾祥, 李璐, 刘彦枫, 李林霞, 欧光龙. 哀牢山地区生态系统水源涵养功能评估分析[J]. 西南林业大学学报, 2024, 44(2):86–93. doi: 10.11929/j.swfu.202212023

Zhou Boqi, Duan Hexiang, Li Lu, Liu Yanfeng, Li Linxia, Ou Guanglong. Assessment and Analysis of Water Conservation Function in the Ailao Mountain Ecosystem[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2024, 44(2):86–93. doi: 10.11929/j.swfu.202212023

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202212023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

昆明市海口林场栎类林分枯落物层及土壤层水源涵养功能的研究

Study on Water Conservation Function of Litter Layer and Soil Layer of Oak Stand in Haikou Forest Farm of Kunming
西南林业大学学报. 2021, 41(4): 136–143 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202001008>

陕西靖边天保工程森林生态系统服务功能价值评估

Assessment on Forest Ecosystem Services Function Value of Natural Forest Protection Project in Jingbian County of Shaanxi Province
西南林业大学学报. 2017, 37(4): 58–66 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095–1914.2017.04.010>

遵义市生态系统服务价值与土地生态安全协调度分析

Coordination Degree Between Ecosystem Services Value and Land Ecological Security Level in Zunyi
西南林业大学学报. 2017, 37(5): 141–146 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095–1914.2017.05.021>

辽东山区落叶松人工林生态系统碳通量及对气候变化的响应

Carbon Flux and Climate Change Response of *Larix olgensis* Plantation Ecosystem in Eastern Liaoning Mountainous Area
西南林业大学学报. 2020, 40(6): 40–47 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004035>

哀牢山常绿阔叶林木质藤本幼苗的光合特性对光环境变化的响应

Responses of Photosynthetic Characteristics to Different Light Environments of Liana Seedlings in Evergreen Broad-leaved Forest of Ailao Mountains
西南林业大学学报. 2017, 37(2): 1–11 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095–1914.2017.02.001>

云南景迈布朗族古茶园生态系统群落结构研究

Species Composition and Community Structure of the Blang Ancient Tea Garden Ecosystem, Yunnan
西南林业大学学报. 2017, 37(3): 59–65 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095–1914.2017.03.010>

DOI: 10.11929/j.swfu.202212023

引文格式: 周博奇, 段禾祥, 李璐, 等. 哀牢山地区生态系统水源涵养功能评估分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2024, 44(2): 86–93.

哀牢山地区生态系统水源涵养功能评估分析

周博奇¹ 段禾祥² 李璐¹ 刘彦枫¹ 李林霞¹ 欧光龙¹

(1. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650233; 2. 云南省生态环境科学研究院, 云南昆明 650233)

摘要: 以哀牢山区域为研究对象, 基于水量平衡法对 2000 年、2010 年和 2020 年的区域生态系统水源涵养功能变化进行科学评估和重要性评价。结果表明: 哀牢山区域生态系统水源涵养能力在空间分布上呈现出了较高的差异性, 具体表现为, 东南区域最高, 中部次之, 西北区域最低; 2000—2020 年, 总水源涵养量下降了 30%, 降水减少是影响哀牢山区域水源涵养量减少的主要因素, 在气候暖干化的背景下, 哀牢山区域水源涵养功能有进一步下降的可能。林地是哀牢山区域水源涵养的主体, 其水源涵养能力在各生态系统中占比最高, 约占研究区域水源涵养总量的 2/3。2000—2020 年, 哀牢山区域生态系统水源涵养功能主要以一般等级和中等等级为主导, 其中中等等级面积显著降低, 一般等级面积显著增加。掌握区域水源涵养功能时空变异特征, 为科学评估区域制定生态环境保护决策和优化生态系统管理提供科学依据。

关键词: 哀牢山; 生态系统; 水源涵养; 水量平衡; 重要性评价

中图分类号: Q148

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2024)02-0086-08

Assessment and Analysis of Water Conservation Function in the Ailao Mountain Ecosystem

Zhou Boqi¹, Duan Hexiang², Li Lu¹, Liu Yanfeng¹, Li Linxia¹, Ou Guanglong¹

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China; 2. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming Yunnan 650233, China)

Abstract: This study focuses on the Ailao Mountain region and aims to scientifically assess and evaluate the changes in the water conservation function of the regional ecosystem in 2000, 2010, and 2020 using the water balance method, and to provide an evaluation of its significance. We found that water conservation capacity was significant spatial different, the specific manifestation is highest in the southeast region, higher in the middle region, and northwest region was the lowest. Total water conservation fell by 30% between 2000 and 2020. The decrease of precipitation is the main factor affecting the decrease of water conservation in Ailao Mountain region. Under the background of climate warming and drying, water conservation function in Ailao Mountain region may decline further. Forest is the main contributor to water conservation in the Ailao Mountain region, with its water conservation capacity accounting for the highest proportion among various ecosystems, approximately two-thirds of the total water conservation in the study area. The grade of water conservation of Ailao mountain's ecosystem was dominated by general grade and medium grade in 2000 to 2020. The area of medium grade decreased signi-

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-03-16

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项 (2019FY101600) 资助; 云南省高层次人才培养计划青年拔尖人才专项 (YNWR-QN-BJ-2018-184) 资助。

第 1 作者: 周博奇 (1999—), 女, 硕士研究生。研究方向: 资源与环境遥感。Email: SWFUzbq@swfu.edu.cn。

通信作者: 欧光龙 (1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 森林可持续经营及森林生态学。Email: ogl2007621@swfu.edu.cn。

ificantly, and the general grade area increased significantly. Understanding the spatiotemporal variability of regional water conservation function provides a scientific basis for assessing the ecological environment and optimizing ecosystem management decisions in the region.

Key words: Ailao Mountain; ecological system; water conservation; water balance; importance evaluation

生态系统服务是人类在生存和发展中,生态系统通过其结构、生态过程,直接或间接为人类提供的生命支持产品和效用^[1-2],主要包括供给、调节、文化和支持服务四大类^[3]。其中,水源涵养在生态系统中处于重要位置,密切影响着系统的生产力、养分循环、区域水资源安全等多种重要功能,其功能具有服务类型多元化以及空间差异多样性等特点,是评估生态系统状况和变化的重要指标^[4-5]。

作为生态系统调节服务中的重要功能,水源涵养服务主要表现为生态系统在一定的时空范围和条件下,通过系统结构和生态过程呈现出的径流调节、拦蓄降水、净化水质、增强土壤下渗和补充地下水的功能^[6]。即生态系统在满足系统内生态组分对水源需求的同时,还能持续向外部提供水源,起到调节河川流量,增加可利用水资源量的作用^[7],对维护和改善人类生存环境有着重要影响。

不同生态系统提供的水源涵养服务间具有明显的差异性,例如,森林生态系统通过林冠、枯落物、根系、土壤对降水及污染物质进行截留、渗透、积蓄、过滤、蒸散发等,实现生态内水循环的调控以及净化输出水质的作用^[8];草地生态系统的水源涵养功能可体现为调节径流、消洪补枯、涵养水分、截留降水^[8];湿地生态系统的水源涵养功能主要体现在储存洪峰水量、延滞洪峰,实现洪水调蓄^[9]等。此外,由于地区间土壤、气候、海拔、地貌、植被覆盖类型等环境因子存在异质性,同一类型的生态系统提供的水源涵养功能间也会表现出十分显著的动态性与差异性^[10],如不同地区的同一森林种类之间、同一区域的不同森林种类之间以及同一区域内各种群内,都会因为群落生物特性与结构的不同而导致水源涵养能力存在差异。

本研究以哀牢山地区为研究区域,利用水量平衡的方法,对哀牢山地区主要生态系统类型的水源涵养能力与价值进行时空变异研究,有助于了解各生态系统服务价值的时间变化特征、空间变化特征,进而为哀牢山区域的有效保护和科学

管理提供依据。

1 研究区概况

研究区为哀牢山山脉,该山脉纵贯云南中南部,呈西北-东南走向,地处云贵高原、横断山脉以及青藏高原三大地理区域的相交处。地理位置特殊、地形地貌类型复杂、气候温凉、矿质土层透水性良好,凋落物分解缓慢,使地表积累了丰富的腐殖层,因此,哀牢山区在我国西南生态安全屏障区中发挥着重要的水源涵养作用^[11]。

该地区受西南季风的影响较大,区域内雨量丰沛且干湿季节交替明显^[12],山地垂直气候带谱明显,是云南亚热带北部与亚热带南部的过渡区,属于典型的亚热带山地气候^[13]。独特的自然条件形成了研究区内自然资源丰富、动植物区系复杂多样且植被覆盖率高的特点,区域内保存着我国面积最大的亚热带原生山地湿性常绿阔叶林,具有十分重要的保护和研究价值。同时该区域也是青藏高原东部边缘生态样带研究的理想场所,其生态系统服务功能的探究,对监测、研究和保护该地区生态系统及资源可持续利用具有重要意义^[14]。

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 土地覆被数据

研究使用的2000年、2010年、2020年土地覆被数据均来自于30 m空间分辨率全球地表覆盖数据GlobeLand30。根据土地利用特点,将研究区土地覆被数据归类为耕地、林地、草地、灌木地、水体和其他6种类型。

2.1.2 降雨量数据

获取自国家青藏高原科学数据中心(tpdc.ac.cn)的中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2020年)。依据数据集进行逐月降水量的提取,叠加月值数据并处理合成为年值数据,利用三次卷积方法对年值数据进行重采样处理,将分辨率提升至30 m,并利用相近10年降水量的平均值,分别作为2000年、2010年、2020年

的降水量数据,以此达到消除可能存在于个别年份中极端天气影响的目的。基础数据统计见图1。

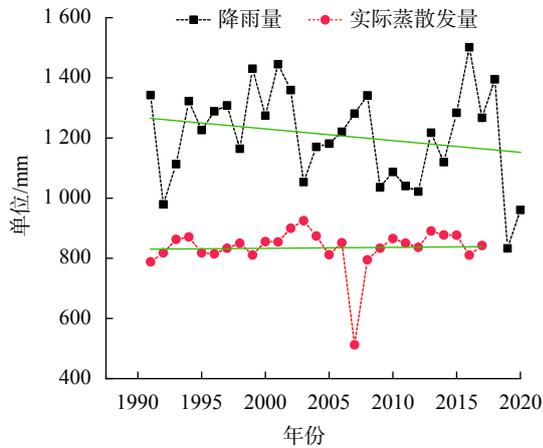


图1 1990—2020年降水量及实际蒸散发量

Fig. 1 Trend chart of precipitation and actual evapotranspiration from 1990 to 2020

2.1.3 蒸散发数据集

来源于国家青藏高原科学数据中心 (tpdc.ac.cn) 的中国 1 km 逐月实际蒸散发数据集 (1990—2020 年)。对数据集进行月值数据提取并处理,使用三次卷积方法对叠加得到的年值数据进行重采样处理,得到分辨率为 30 m 的年值蒸散发数据,并利用相近 10 年实际蒸散发数据的平均值,消除某些年份中可能存在的极端天气的影响后,分别作为 2000 年、2010 年、2020 年的实际蒸散发数据。其中因 2007 年 10 月及 12 月的源数据存在缺失现象,实验中剔除了该月份。基础数据统计见图 1。

2.2 研究方法

2.2.1 水量平衡方程

降水贮存量法、径流系数法和水量平衡法是评估陆地生态系统水源涵养服务时最常使用的 3 种方法^[15-16]。其中水量平衡法将大气降水、蒸散量以及径流量间的差值,即生态系统中水分输入量与输出量的差值视作生态系统的水源涵养能力^[17],是目前评估水源涵养服务最有效和应用最广泛的基础公式和原理,具有适用性强、操作简单的优点^[18-19]。该方法公式如下:

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

式中: Q_{wr} 表示水源涵养量 (m^3/a); i 表示第 i 类生态系统类型; n 表示生态系统类型总数; A_i 表示 i 类生态系统的面积 (m^2); P_i 表示降雨量 (mm/a); R_i 表示地表径流量 (mm/a); ET_i 表

示蒸散发量 (mm/a)。

2.2.2 地表径流量

地表径流量由降雨量与地表径流系数的乘积得到。地表径流系数是指地表径流量 (mm) 与降雨量的比值,在一定程度上反映了生态系统水源涵养的能力。地表径流系数通过查阅文献资料并结合研究区域实际情况获得^[9]。公式如下:

$$R = P \times \alpha \quad (2)$$

式中: R 为地表径流量 (mm); P 为年降雨量 (mm); α 为平均地表径流系数。地表径流系数详见表 1。

表 1 各类型生态系统地表净流系数均值

Table 1 Average runoff coefficient for each ecosystem type

生态系统类型	平均径流系数/%
耕地	9.57
林地	4.52
草地	9.37
灌木地	4.22
水体	0
其他	0

2.2.3 土地利用变化幅度

采用土地利用类型构成比例和动态度来度量哀牢山区域的变化情况,动态度可以较好地反映生态空间在某一区域某一时段变化的速率和强度^[15,20]。公式如下:

$$R = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R 为研究区内某地类在研究时段内的变化幅度; S_1 为研究初期某地类面积; S_2 为研究末期某地类面积; T 为研究时段长。

2.2.4 水源涵养服务价值估算模型

采用当量因子法计算不同年份的生态系统水源涵养服务价值量^[1,21],公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^n (F_i \times A_i) \quad (4)$$

式中: V 表示水源涵养服务的价值总量 (元); i 表示土地利用类型; n 表示生态系统类型总数; F_i 表示第 i 种土地利用类型的单位面积生态系统服务价值 (元/ hm^2); A_i 表示第 i 类土地利用类型的面积 (hm^2)。

2.2.5 单位面积生态系统服务价值

为了更好地体现出生态系统对生态服务贡献相对大小的潜在能力,谢高地等^[22]以全国农田每年自然平均粮食产量的经济价值作为参考标准,

将 1 个标准生态系统生态服务价值当量因子定义为 1 hm² 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值。根据谢高地等^[1] 计算得出的 2010 年标准生态系统服务价值当量因子的价值量 3406.5 元/hm²，参照文献^[23] 利用经济学上的可比价概念，修正 2000 年与 2020 年的标准生态系统服务价值当量因子经济价值量。具体公式如下：

$$ESV_a = ESV_z \times \left(1 + \frac{CPI_a - CPI_z}{CPI_z} \times 100\% \right) \quad (5)$$

式中：ESV_a为目标年份的生态系统服务价值（元/hm²）；ESV_z为 2010 年的生态系统服务价值（元/hm²）；CPI_a为目标年份的居民消费价格指数；CPI_z为 2010 年居民消费价格指数。

2020 年的标准生态系统服务价值当量因子经济价值量分别为 3215.97、3403.22 元/hm²，结合中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表^[1] 得出的各地类单位面积水源涵养服务价值如表 2。

表 2 单位面积水源涵养服务价值

Table 2 Water conservation services value per unit area

时间	耕地	林地	草地	灌木地	水体	其他
2000年	868.31	15243.70	3151.65	10773.50	328800.77	96.48
2010年	919.76	16146.81	3338.37	11411.78	348280.56	2.89
2020年	918.87	16131.26	3335.16	11400.79	347945.21	102.10

2.2.6 水源涵养功能重要性评价

根据国内相关研究发现，目前水源涵养功能重要性等级划分多依据于对单位面积水源涵养量的分级进行评估。本研究参照《国家生态保护红线—生态功能红线划定技术指南（试行）》及相关文献，结合水源涵养功能评估结果，将哀牢山区域水源涵养功能划分为 5 个等级（表 3）^[24-26]。

表 3 基于单位面积水源涵养的分级标准

Table 3 Grading standard of water conservation services per unit area

等级	水源涵养量/mm
弱	<150
一般	150 ~ 300
中等	300 ~ 440
重要	440 ~ 550
极重要	>550

3 结果与分析

3.1 土地利用动态变化分析

哀牢山区域内土地利用以林地、耕地为主，2000—2020 年哀牢山区域土地利用及其变化如图 2 及表 4 所示。总体而言，区域内土地利用类型以林地和耕地为主。时间上，耕地、水体及其

他地类（主要为建设用地）的面积呈现波动上升趋势。其中，耕地面积上涨了 1.34%，共计 680 km²，水体从 2000 年的 53 km² 增长到了 2020 年的 86 km²，其他地类在 20 年间由 19 km² 增长至 86 km²，上涨了 35.26%，这在一定程度上反映了人类社会的发展建设对自然环境的侵蚀。另一方面，林地作为覆盖率最高的地类，在研究区间内的面积变化相对稳定，波动幅度最小，呈现微弱的下降趋势，下降了 1.8%，共 132 km²；除此之外，草地、灌木地的面积也呈现波动下降的趋势，分别降低了 1.89% 和 1.80%，灌木地也是研究区间内唯一持续减少的地类，共减少了 132 km²。

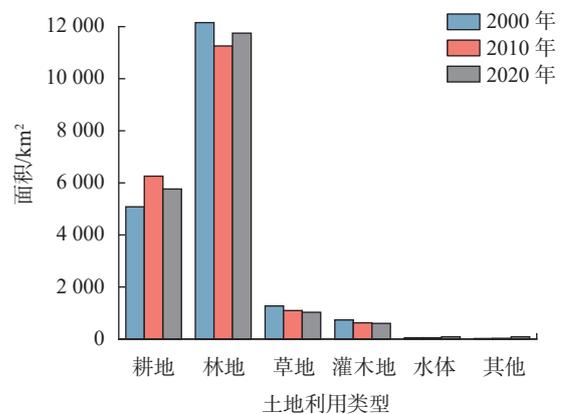


图 2 2000—2020 年哀牢山区域土地利用类型变化趋势

Fig. 2 Trend chart of land use types in Ailao Mountains from 2000 to 2020

表4 哀牢山区域2000—2020年土地利用变化

Table 4 Changes of land use type in Ailao Mountains from 2000 to 2020

土地类型	2000年		2010年		2020年		2000—2010年		2010—2020年		2000—2020年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	变化量/km ²	动态度/%	变化量/km ²	动态度/%	变化量/km ²	动态度/%
耕地	5083	26.32	6258	32.40	5763	29.84	1175	2.31	-495	-0.79	680	1.34
林地	12154	62.93	11260	58.30	11747	60.82	-894	-0.74	487	0.43	-407	-0.33
草地	1273	6.59	1098	5.68	1032	5.34	-175	-1.37	-66	0.60	-241	-1.89
灌木地	733	3.79	622	3.22	601	3.11	-111	-1.51	-21	-0.34	-132	-1.80
水体	53	0.27	51	0.26	86	0.45	-2	-0.38	35	6.86	33	6.23
其他	19	0.10	26	0.13	86	0.45	7	3.68	60	23.08	67	35.26

3.2 生态系统水源涵养服务的时空变化特征及分析

从空间分布来看, 评估期内研究区域水源涵养量的分布为, 东南区域最高, 中部次之, 西北

区域最低, 总体呈现东南高, 西北低的空间格局, 空间差异显著, 近一半地区水源涵养能力高于平均值。2000年、2010年、2020年水源涵养量空间分布情况见图3。

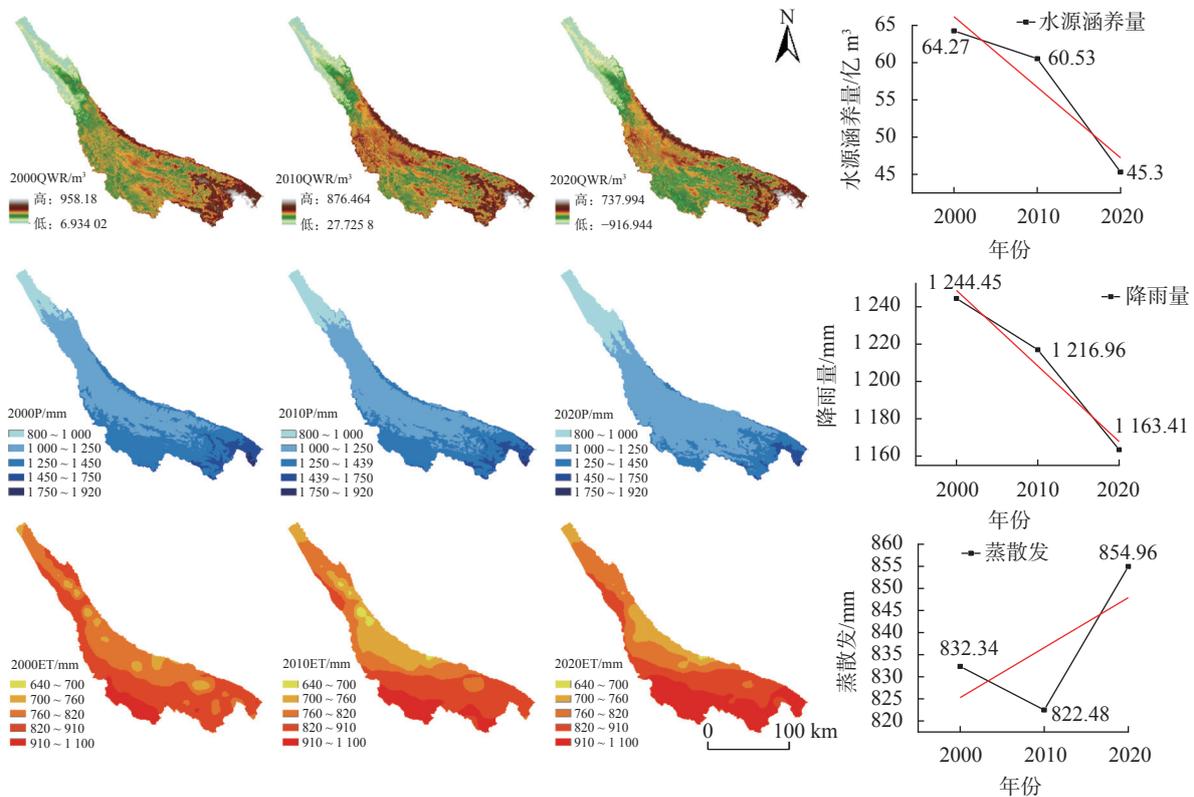


图3 2000年、2010年、2020年水源涵养量、降水量、蒸散发量时空特征

Fig. 3 Temporal and spatial characteristics of water conservation, precipitation, and evapotranspiration in 2000, 2010, and 2020

从地理位置来看, 位于东南部的元江流域以及干热河谷地区是哀牢山区域水源涵养功能的主要供给区。定量测算哀牢山地区水源涵养量多年数值及变化趋势, 见图3和表5。结果表明, 研究区域的水源涵养能力呈现持续下降的趋势, 水源涵养总量由2000年的64亿m³下降至2020年的45亿m³, 共减少19亿m³, 降低了约30%。降低

的主要原因是研究区域内降水量、林地面积以及植被覆盖度都呈现减少的趋势。研究区间内的降水量由2000年的1244mm下降为2020年的1163mm, 而实际蒸散发量则由2000年的832mm上升至854mm, 呈微弱的上升趋势, 具体见图3。降水量减少和蒸散发的增加, 是直接导致水源涵养量大幅降低的最主要原因。

表 5 哀牢山区域 2000—2020 年各生态系统水源涵养量变化

Table 5 Changes in water conservation of ecosystem in Ailao Mountains from 2000 to 2020

土地类型	水源涵养量/亿m ³			贡献率/%			变化量/亿m ³				变化率/%	
	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000— 2010年	2010— 2020年	2000— 2020年	2000— 2010年	2010— 2020年	2000— 2020年
耕地	13.90	17.41	11.04	21.62	28.76	24.52	3.51	-6.36	-2.85	25.27	-36.56	-20.53
林地	43.04	37.03	29.24	66.96	61.17	64.94	-6.01	-7.78	-13.79	-13.97	-21.02	-32.05
草地	4.53	3.56	2.50	7.04	5.88	5.54	-0.97	-1.06	-2.03	-21.36	-29.89	-44.86
灌木地	2.47	2.19	1.60	3.84	3.62	3.56	-0.28	-0.59	-0.86	-11.16	-26.85	-35.01
水体	0.26	0.24	0.33	0.40	0.39	0.73	-0.02	0.09	0.07	-8.53	38.98	27.13
其他	0.09	0.11	0.32	0.14	0.18	0.71	0.02	0.21	0.23	21.35	195.37	258.43
小计	64.27	60.53	45.03	100.00	100.00	100.00	-3.74	-15.50	-19.24	-5.83	-25.60	-29.94

3.3 水源涵养服务价值的时间演变特征

研究发现，2000 年、2010 年、2020 年研究区域的水源涵养服务价值分别为 219.039、216.098、235.015 亿元，研究区间内共增长了 15.976 亿元，增幅为 7.294%，整体上呈现先下降、后上升的趋势（表 6）。具体而言：1）2000—2010 年间水源涵养服务价值减少了 2.941 亿元，降幅为 1.343%，其中，因为林地的面积大幅减少，且该地类的单位面积生态系统服务价值当量较高，意味着在水源涵养服务总值中的贡献度较高，10 年内损失的价值占损失总量的 117.613%，共损失 3.459 亿元。2）2010—2020 年间水源涵养服务总额增加了 18.917 亿元，其中，只有林地、水体和其他地类的水源涵养服务价值呈现增长趋势，其余几种

土地利用类型的水源涵养服务价值均呈现为负增长趋势。3）各类土地利用对哀牢山区域水源涵养服务的贡献率排序为林地>水体>灌木地>耕地>草地>其他。4）研究区间内的各类土地利用水源涵养服务价值变化程度排序为水体>其他>耕地>草地>灌木地>林地，其中水体、耕地与林地的水源涵养服务价值呈现正向波动，草地、灌木地及其他呈现负向波动趋势。5）地表属性的改变会对土地的水源涵养能力产生显著影响，统计结果表明，草地和灌木地的持续下降导致其对应的水源涵养服务价值一直处于下降趋势，分别减少 0.57 亿元和 1.045 亿元；林地的土地面积虽略有下降，但其水源涵养的服务价值却呈现出上升的趋势，增加了 4.222 亿元。

表 6 哀牢山区域 2000—2020 年生态系统水源涵养服务价值变化

Table 6 Changes of ecosystem water conservation service value in Ailao Mountains from 2000 to 2020

土地类型	水源涵养服务价值/亿元			贡献率/%			变化量/亿元				变化率/%	
	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年	2000— 2010年	2010— 2020年	2000— 2020年	2000— 2010年	2010— 2020年	2000— 2020年
耕地	4.414	5.756	5.295	2.015	2.664	2.253	1.342	-0.461	0.881	30.403	-8.009	19.959
林地	185.272	181.813	189.494	84.584	84.135	80.631	-3.459	7.681	4.222	-1.867	4.225	2.279
草地	4.012	3.666	3.442	1.832	1.696	1.464	-0.346	-0.224	-0.570	-8.624	-6.11	-14.207
灌木地	7.897	7.098	6.852	3.605	3.285	2.916	-0.799	-0.246	-1.045	-10.118	-3.466	-13.233
水体	17.426	17.762	29.923	7.956	8.219	12.732	0.336	12.161	12.497	1.928	68.466	71.715
其他	0.018	0.003	0.009	0.008	0.001	0.004	-0.015	0.006	-0.009	-83.333	200.000	-50.000
小计	219.039	216.098	235.015	100.000	100.000	100.000	-2.941	18.917	15.976	-1.343	8.754	7.294

3.4 水源涵养服务功能重要性评价结果与分析

从综合评价结果来看，2000—2020 年评估结果整体呈现东南高、西北低的分布格局（图 4），这与水源涵养量的计算结果一致。其原因是基于水量平衡原理得到的单位面积生态系统水源涵养量主要受区域年降水量制约，即区域单位面积水源涵养量愈高，其水源涵养功能愈优良；反之也愈低，致使区域评价结果空间可比性较低，其实质是没有考虑区域气候、植被、土壤等空间异质性的影响。

对各年份的水源涵养功能重要性进行统计，2000—2020 年哀牢山区域生态系统水源涵养功能均以一般等级和中等等级为主体，两者之和超过总面积的 3/4（图 5~6），说明研究区内整体水源涵养生态服务价值较低。波动最大的是中等等级区域，2010—2020 年显著下降，空间上表现出一般等级区域向中部区域扩展的趋势。总体来看，弱等级区域主要分布在西北区域；一般等级和中等等级交叉分布在中部区域；重要等级和极重要等级分布较为集中，分别分布在元江流域及东北部地区。

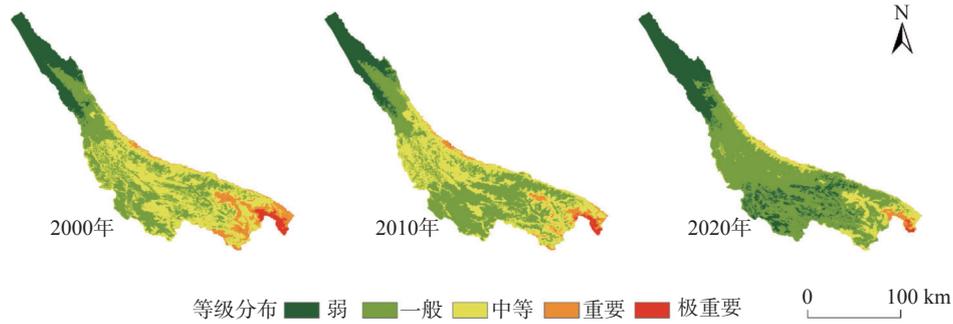


图4 2000年、2010年、2020年水源涵养功能重要性分布格局

Fig. 4 Water conservation importance of 2000, 2010 and 2020

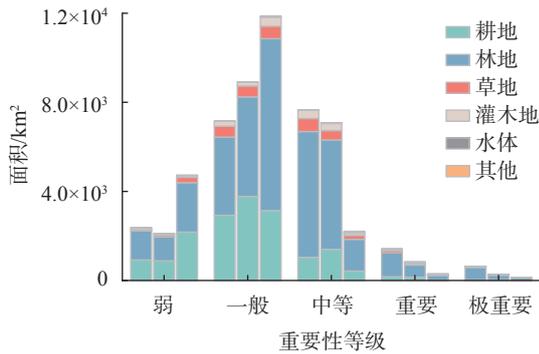


图5 2000—2020年哀牢山区域各等级面积

Fig. 5 The area of each level in the Ailao Mountains from 2000 to 2020

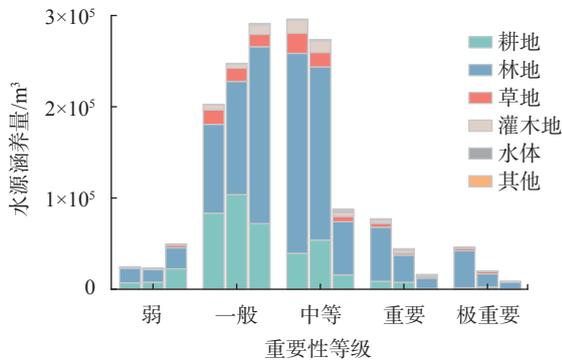


图6 2000—2020年哀牢山区域各等级水源涵养量

Fig. 6 Water conservation capacity at various levels in the Ailao Mountains from 2000 to 2020

4 结论与讨论

现有的研究中大多是以哀牢山国家自然保护区为评估范围,或是以保护区内森林生态系统、土壤理化性质等为主体进行的研究。如唐安齐从物质质量、价值量及能值量3个方面进行哀牢山国家级自然保护区内森林生态系统服务价值的评估^[27],杞金华等^[11]以哀牢山中山湿性常绿阔叶林为研究主体验证了其在水源涵养中不可替代的作用,甘健民等^[28]评估了哀牢山常绿阔叶林土壤水源涵养效能。

研究采用水量平衡方程对哀牢山大范围区域的生态系统水源涵养功能进行定量评估,在此基础上开展的水源涵养重要性评价能够较为直观地反映水源涵养功能的空间差异。结果表明,哀牢山区域内土地利用以林地和耕地为主体,值得注意的是,其他地类(主要为建筑用地)的面积占比虽然不大,但却一直处于上升趋势。研究区间内,哀牢山区域的生态系统水源涵养能力呈现下降趋势。因研究区域较大,部分数据空间分辨率较低,可能存在遥感影像对人类活动影响刻画不足的现象,基于现有分辨率下,降水总量与蒸散总量差值的降低是哀牢山区域生态系统水源涵养减少的主要原因。位于东南部的元江流域以及干热河谷地区,是哀牢山区域水源涵养功能的主要供给区。生态系统变化是一个长期、复杂的动态过程,人类无法控制大的气候变化,但在人类活动的可控范围内,可以采用增加植被覆盖面积、控制城市扩张、改善自然生态系统结构等方式,避免生态系统服务功能的退化。研究区间内,生态系统的水源涵养服务价值总体增加。

水源涵养重要性的科学评价首先依赖水源涵养功能的准确评估,由于问题的复杂性,未来在以下方面还需要深入研究:水量平衡法虽然在理论上是非常完美的方法,也是目前使用最广泛、最容易操作的方法,但其主要依靠的蒸散发量数据依旧难以被精确测量,特别是大范围高精度的数据获取,因此存在着一定的不确定性;除此之外,因为自然环境中存在非常高的异质性和复杂性,加之地表径流系数的确定存在人为确定因素,这使得同一区域内同一生态系统类型采用同一个地表径流系数存在着较难计算及消除的误差,因此如何用更易获取的数据精确得到地表径流系数是未来提高水量平衡方法下水源涵养能力估算精度的难点之一。

除定量分析以外,对哀牢山区域的生态系统

水源涵养服务评价还应开展科学量化。即针对区域生态系统复杂性及多元化的特点, 权衡与协同水源涵养服务与政策、经济、人类活动等多变量间进行定量化分析, 在宏观层面分析驱动因素, 定量识别主导生态服务的关键驱动因素, 为生态保护及区域可持续发展提供更有力的支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [2] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值 [J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [3] 殷楠, 王帅, 刘焱序. 生态系统服务价值评估: 研究进展与展望 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 233-244.
- [4] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达 [J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [5] 胡雄蛟, 宋昌素, 范馨悦, 等. 中国灌丛生态系统主要调节服务及价值评估 [J]. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 2021, 20(3): 58-64.
- [6] 刘征, 赵旭阳. 河北省水源涵养生态功能保护区划分研究 [J]. *水土保持通报*, 2008, 28(2): 180-183.
- [7] 刘娅, 朱文博, 韩雅, 等. 基于 SOFM 神经网络的京津冀地区水源涵养功能分区 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 369-376.
- [8] 孔令桥, 郑华, 欧阳志云. 基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复: 以洞庭湖流域为例 [J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8903-8910.
- [9] 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 [J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [10] 宋慈. 基于“两山”理论的水源涵养价值动态优化研究: 以张家口市为例 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [11] 纪金华, 章永江, 张一平, 等. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1692-1702.
- [12] 张婷婷, 刘文耀, 胡涛. 哀牢山常绿阔叶林常见兼性附生植物的化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(15): 6265-6273.
- [13] 赵双梅, 刘宪斌, 李红梅, 等. 云南哀牢山湿性常绿阔叶林土壤碳分布特征 [J]. *中国农学通报*, 2022, 38(8): 88-95.
- [14] 杨礼攀. 哀牢山山地湿性常绿阔叶林木质物残体的贮量、组成和生态学功能研究 [D]. 西双版纳: 中国科学院研究生院(西双版纳热带植物园), 2007.
- [15] 祝汉收, 翟俊, 侯鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同视角下的重点生态功能区保护特征 [J]. *地理学报*, 2022, 77(5): 1275-1288.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 侯晓臣, 孙伟, 李建贵, 等. 森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 121-127.
- [19] 王丹妮, 郭青云, 王志浩, 等. 生态系统水供给服务空间流动研究进展 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 1-8.
- [20] 刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析 [J]. *地理学报*, 2016, 71(3): 355-369.
- [21] 耿鑫, 胡实, 肖玉, 等. 基于生态系统服务价值的东北农牧交错区土地利用格局优化与评价 [J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1799-1814.
- [22] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [23] 徐子蒙, 李广泳, 周旭, 等. 基于地理国情普查成果的生态系统服务价值核算方法 [J]. *测绘学报*, 2018, 47(10): 1396-1405.
- [24] 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.
- [25] 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 [J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- [26] 张昌顺, 谢高地, 刘春兰, 等. 基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估 [J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9250-9260.
- [27] 唐安齐. 哀牢山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [28] 甘健民, 薛敬意, 谢寿昌, 等. 云南哀牢山常绿阔叶林下土壤涵养水能力分析 [J]. *林业科技*, 1997, 22(6): 9-11.

(责任编辑 陆 驰)

