

Based on InVEST Model: Analysis of Water Conservation Characteristics in the Yuanjiang-Red River Basin

Bo Tian Jing Cui* Rui Chen Kunrong Chen Anxing Liu

Ecological Branch, Yunnan Forestry Survey and Planning Institute, Kunming, Yunnan, 650031, China

Abstract

Utilizing the InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) model framework, this research conducted a comprehensive quantitative analysis of water conservation dynamics in the Yuanjiang-Red River Basin from 2010 to 2023 through multi-source remote sensing integration. Findings reveal notable fluctuations in the basin's total water yield during the study period, with distinct spatial patterns emerging. Regions exhibiting elevated water conservation values predominantly occur in forested mid-reach zones, whereas diminished capacity characterizes downstream agricultural and urbanized areas. The study identifies precipitation variability as a more influential driver of hydrological changes compared to land use/cover modifications, highlighting clear spatial differentiation in watershed water retention capabilities.

Keywords

water sourceconservation capacity; INVESTmodel; water yield; Yuanjiang-Honghe Lake Basin

基于 InVEST 模型的元江——红河流域水源涵养特征分析

田波 崔静* 陈瑞 陈昆荣 刘安兴

云南省林业调查规划院生态分院, 中国·云南 昆明 650031

摘 要

本研究运用InVEST(生态系统服务综合评估与权衡)模型,整合2010-2023年多源遥感观测数据,综合量化评估元江-红河流域水源涵养功能的时空动态特征。研究发现:在时序演变方面,流域生态系统总产水量呈现显著年际波动特征;空间格局上,中游林区呈现水源涵养高值聚集态势,而下游农业耕作带与城镇扩展区则形成明显低值区域。进一步分析表明,流域产水服务空间异质性主要受气候因子主导,降水量的影响显著超过土地利用类型变化对水文调节功能的驱动作用。

关键词

水源涵养能力; INVEST模型; 产水量; 元江-红河流域

1 研究背景

在水生态系统的核心功能中,水源涵养与水资源供给构成两大重要组成部分。水源涵养依托生态系统的滞留、下渗及储存机制,不仅调节降水分配,还深刻影响着地表径流与水文循环过程,为人类社会持续输出稳定的淡水资源。水资源供给服务常借助产水量的测算来量化评估,因此,水源涵养能力的强弱直接关系到该服务的实际效能。

过去数十年间,全球气候变迁与人类活动持续增强,特别是城市化扩张与经济社会的快速发展,深刻改变了区域土地利用格局与地表覆被特征。这种转变直接作用于流域水文循环机制,对水源涵养功能产生深远影响。以土地利用类

型转换为典型例证,地表植被覆盖度的降低可能削弱生态系统的降水截留与土壤入渗效能,这种连锁反应将显著制约区域水资源的可持续供应能力。例如,森林转化为建设用地后,冠层截留雨水的生态功能随之弱化,同时硬化地表加剧了径流形成速度,双重作用下导致地下水补给量显著缩减。

基于上述现实需求,系统探讨全球气候变迁与土地覆被演变对流域水源调节功能及供水保障的作用机制,成为构建科学化水资源调控方案和协调生态服务功能与社会经济发展需求的关键环节。此类研究既涉及维系自然生态平衡的核心问题,亦深刻影响着区域社会民生福祉与长远发展前景。

学术领域普遍将 InVEST 模型运用于水源涵养功能分析,典型案例如刘菊团队针对岷江上游流域的水源涵养能力进行了系统评估^[1],以及邱问心研究组在水涛庄水库区域开展的模型验证工作^[2]。然而值得注意的是,该模型在元江-红河流域的生态水文研究实践中尚未得到充分关注,相关研究成果相对匮乏。

【作者简介】田波(1982-),男,硕士,工程师,从事生态学、水土保持、林业资源调查监测研究。

【通讯作者】崔静(1987-),女,硕士,高级工程师,从事水土保持、林业资源调查监测研究。

元江-红河作为中国西南重要的跨境水系,在维系中越两国水资源安全与生态保护方面具有战略地位。本研究以该跨境河流全域为地理单元,选取 20 年时间维度,运用 InVEST 模型产水量模块开展时空动态模拟。通过多期遥感数据与水文要素的耦合分析,系统解析了各类土地覆被对水源调节能力的差异化作用。量化解析该流域水资源保持功能的演变规律,既能揭示生态系统服务价值的时空动态特征,也可作为跨境流域综合治理与可持续发展决策提供数据支撑。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

元江-红河作为中国西南地区的重要跨境水系,流经中越两国境内。其地理坐标介于北纬 22° 27' 至 25° 32' 与东经 100° 06' 至 105° 40' 之间,涵盖云南省中南部及越南北部部分地区。该流域呈现典型的亚热带季风气候特征,干湿两季分明。每年 5 月至 10 月集中了全年 85% 以上的降水,而 11 月至次年 4 月则仅占不足 15%。受哀牢山脉纵贯

影响,区域地形复杂多变,山地与河谷相间分布,这种特殊地貌深刻影响着区域水文过程及生态服务功能。

区域内生物资源极为丰富,为多种珍稀野生动植物提供了栖息环境,在生物多样性保护方面具有关键意义。该水系拥有充沛的水资源,年均径流量可观,成为支撑区域农业灌溉体系与城市用水需求的重要保障。尽管农业开发历史悠久,耕地面积广阔,但过度垦殖对水源涵养能力造成明显削弱。快速城镇化进程中,部分林地转为建设用地,这种土地利用方式的转变加剧了生态系统的压力。

作为跨境河流系统,其生态保护不仅关乎区域可持续发展,更涉及跨国水资源协调管理。近年来实施的生态保护红线划定与土地集约利用政策,着力寻求经济发展与环境保护的平衡点。气候变化叠加人类活动影响,促使学界与决策层更加重视生态系统服务功能的优化提升。该流域独特的地理气候条件与生态特征,使其成为研究生态安全与协调发展的重要示范区。



图 1 元江-红河流域地理位置及水系分布

2.2 研究方法

2.2.1 产水量模型

INVEST (生态系统服务综合评估与权衡) 水生产评估工具是由斯坦福大学联合世界自然基金会及大自然保护协会共同研发的生态服务量化分析系统。该工具以地理信息系统 (GIS) 为技术支撑,在空间可视化与数据分析方面展现突出优势,被广泛运用于不同空间尺度的生态服务价值评

估。其理论基础源自苏联气候学家 Budyko 提出的水热耦合平衡理论,强调陆地表面长期蒸散过程主要受大气水分供给 (降水) 与蒸发需求 (潜在蒸散) 的动态平衡制约。基于简化的水文平衡原理,该模型将地表径流与地下水补给统称为生态产水,其核心计算式可表述为: 年降水量扣除实际蒸散量即为产水量 ($WY=P-ET$)。该模型通过忽略水体的时空相态转换,构建了简化的水文循环框架。模型运算需要整合多

维度参数体系: 年均降水总量 (P) 作为基础输入参数, 参考蒸散量 (PET) 表征大气蒸发需求, 植被可利用水储量 (AW) 反映土壤持水能力, 根系深度 (RD) 代指植物水分吸收范围, 植被蒸散系数 (ET) 体现不同地表覆盖的水分耗散特性, 以及基于栅格数据的土地利用类型分布。其中实际蒸散量 (ET) 的估算采用 Budyko 水热耦合方程进行近似推导。

$$ET = \frac{PET}{1 + \lambda} - \frac{PET - P}{\lambda}$$

其中, λ 作为经验系数, 表征了自然气候与土壤性质的综合作用, 其取值范围介于 1.25 至 5 区间

2.2.2 数据来源

a 土地利用数据采用国家冰川冻土沙漠科学数据中心发布的土地覆盖及其动态变化数据集 (2010-2023), 通过空间裁剪获取元江-红河流域四期土地利用/覆被专题图 (图 2)。该数据产品基于 2010-2023 年间四个关键年份 (2010/2015/2020/2023) 的多源卫星遥感影像, 通过地面调查与遥感解译技术研发, 经分类系统构建与精度验证流程处理, 最终形成空间精度达 30 米的区域土地利用时空演变序列。

b 降雨量 数据集源自地球资源数据云平台 (www.gis5g.com)。该资料集涵盖了全国范围内的日平均降水信息, 空间精度达到 0.0083333° (约合 1 公里), 存储格式采用 TIFF 标准。基于全国 2472 个气象站点的实测数据, 通过空间插

值算法生成, 经检验, 数据质量可靠, 具有较高的可信度。具体空间分布特征可参考 (图 3)

c 蒸散发数据源自地球资源数据云平台 (www.gis5g.com)。蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 主要涵盖土壤蒸发与植被蒸腾的综合过程, 构成了土壤-植被-大气连续系统 (SPAC) 中物质交换的关键环节。作为农作物生长不可或缺的水分与能量供给基础, 该过程同时承担着陆地生态系统与水文循环间的核心纽带作用。其强度特征与地表覆盖状况、生物群落等要素存在显著关联性, 在水文循环机制中占据重要地位。区域水平衡研究的核心环节在于 ET 的精确测算, 具体而言, 该参数由两部分构成: 植被覆盖区域的蒸腾量与裸露地表的蒸发量。

d 根系限制深度的基础数据源自国家资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 的土壤类型空间分布资料, 该参数表征土壤理化特性对植物根系延伸产生的显著阻碍作用时所达到的临界深度。研究中采用土壤剖面深度作为替代指标, 相关数据来源于中国陆面过程模拟专用土壤数据集中的土层深度文件 (soil profile depth PDEP.nc), 该栅格数据集具有 30 角秒的空间分辨率。该数据集的基础资料来源于全国第二次土壤普查的 1:100 万比例尺土壤图及 8595 份土壤剖面样本, 系统整合了土壤层厚度、容重、质地结构以及有机质含量等关键参数的空间分布信息^[3]。

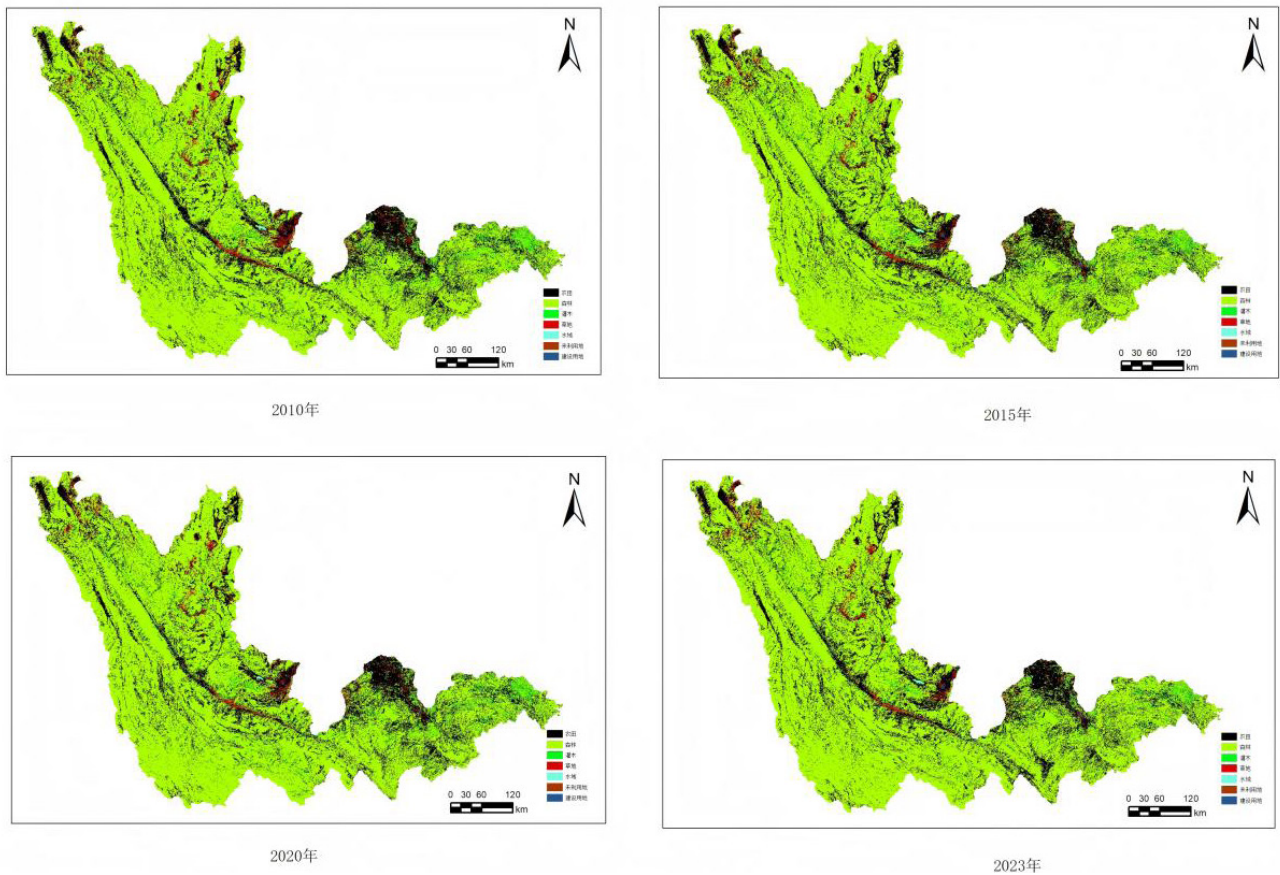


图 2 元江-红河流域土地利用/覆盖分布情况

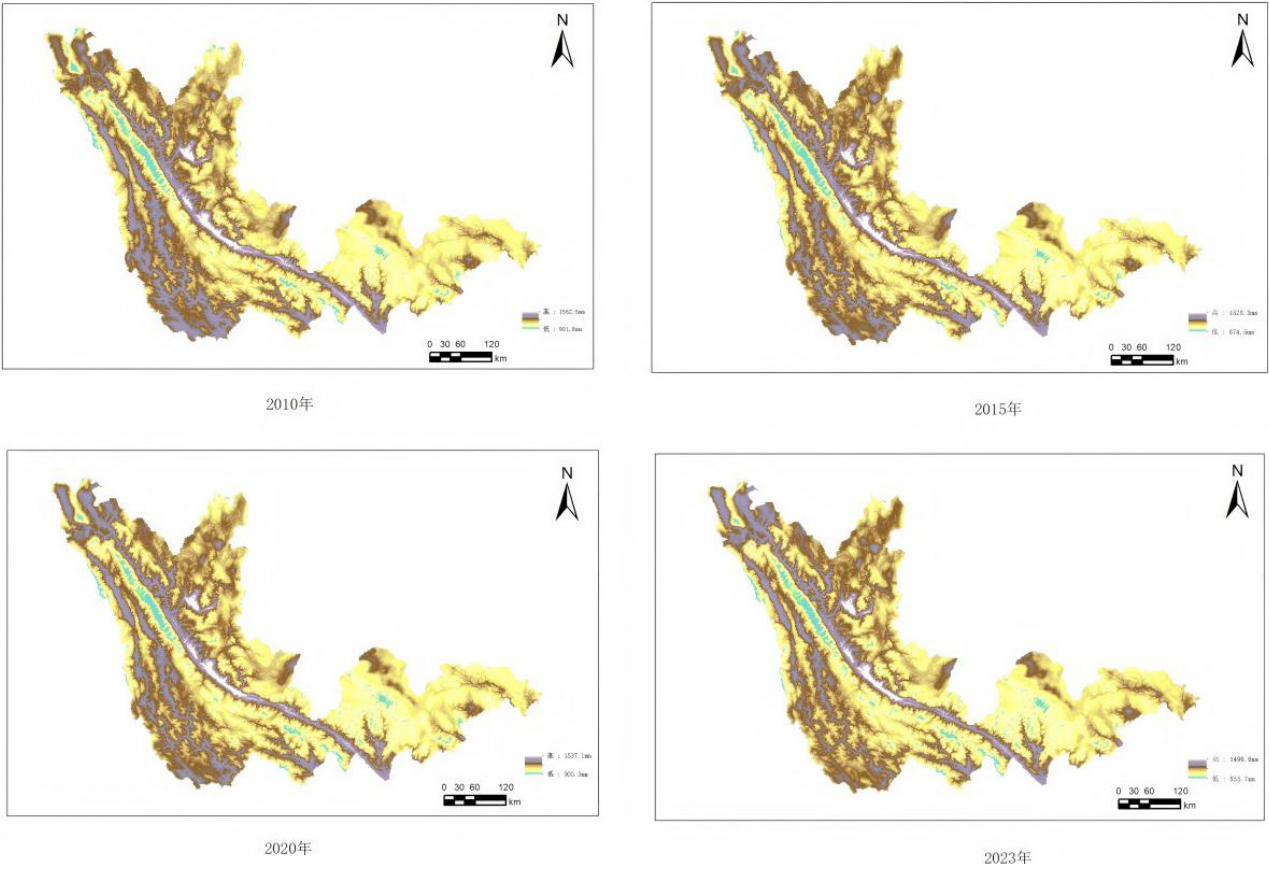


图 3 元江 – 红河流域降水量（单位：mm）

e 植被可利用水分表征特定土层范围内可供植物吸收利用的液态水储量。该指标通常通过田间持水量与永久萎蔫点之间的水分差值进行定量评估，在 INVEST3.14.1 模型中该参数被量化为 0 至 1 之间的无量纲数值。本研究参考周文佐^[4]提出的整合土壤机械组成与有机质含量的非线性回归模型进行计算，该模型通过建立土壤物理特性与持水能力之间的非线性关系实现精准估算。

f 生物物理参数。土地利用与覆被类型的生物物理属性涵盖编码、类别名称、植被根系最大穿透深度及蒸散调节系

数等要素。其中蒸散调节系数用于修正基准蒸散量以确定潜在蒸散量，针对农作物类型，该参数可依据联合国粮农组织发布的《灌溉与排水指南》进行检索，其有效区间为 0-1.5。地表覆盖物蒸散计算标识码用于判定地类是否具有植被覆盖特征，作为蒸散量核算的依据。INVEST 产水模块关键参数详见表 1。模型还需输入表征土壤蓄水能力的张力系数，该参数理论区间为 1-20，结合元江 - 红河流域地貌特征及既有研究成果，本研究采用文献^[5]推荐的 6.5 作为参数取值。

表 1 INVEST 产水量模型部分参数

编号	土地利用 / 覆被类型	植被蒸发散系数	最大深根系数	实际蒸发散计算代码
1	农田	0.48	1000	1
2	森林	0.67	3500	1
3	灌木	0.48	1850	1
4	草地	0.6	2000	1
5	水域	0.4	10	0
6	裸土地	0.26	500	0
7	建设用地	0.26	0	0

3 结果与分析

基于模型模拟与区域地理特征分析,研究发现降水格局和地表覆被类型是水源涵养功能的核心影响因子。表 2 统计数据显示了元江-红河流域各分区不同年份的降水总量,结合图 3 的时空分布特征可见,该流域降水量的时序演变规律具有同步性特征。分析结果显示,2015 与 2023 年度该流域降水总量均呈现缩减态势,其中 2023 年下降幅度达到峰值,反映出气候不稳定性处于极值状态。2020 年降水状况与 2015 年基本持平,但受区域地理环境的特殊性影响,该年度成为研究区段内降水量最丰沛且趋势震荡最为剧烈的时期。

从地理分布格局分析,年降水量总体呈现出由东南部向西北部逐渐递增的态势,但各年份间存在显著差异。具体而言,2010 年的降水空间格局显示为从南部向北部梯度增强的特征,而 2015、2020 及 2023 年的数据则延续了东南至西北方向的递增规律。这种年际间的空间分异特征,充分揭示了区域降水格局的动态变化特性。

表 2 元江-红河流域不同年份降水量 单位 mm

流域名称	降雨量			
	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年
元江-红河流域	1201.58	1172.44	1184.65	1133.08

表 3 元江-红河流域不同年份土地利用 / 覆盖类型比例变化情况 %

类型	变化比例			
	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年
农田	20.86	21.82	21.45	21.90
森林	68.55	68.76	68.39	69.43
灌木	2.65	2.51	2.57	2.10
草地	7.05	5.80	6.56	5.46
水域	0.55	0.64	0.63	0.62
未利用地	0.09	0.10	0.11	0.09
建设用地	0.25	0.36	0.28	0.38

从时序维度分析,土地利用 / 覆被类型的演变过程可划分为三个不同时期:2010-2015 年为初始演变期,2015-2020 年进入转型发展期,2020-2023 年则属于剧烈调整期。值得注意的是,2020-2023 年间的第三阶段呈现出最为显著的波动特征,该时期土地利用 / 覆被类型间的转化与调整更为频繁,这种动态演变过程对流域生态系统服务功能特别是水文调节能力形成了实质性冲击。

通过对比三个时期土地利用类型的动态转换特征,研究发现灌木林地和草甸生态系统呈现显著缩减趋势,其中城乡建设用地扩张最为突出。区域经济快速增长与人口规模扩大共同驱动了城镇化加速发展,特别是工业用地和居住用地的持续增长成为植被覆盖减少的关键诱因。耕地面积的增加主要归因于农业政策调整和粮食需求上升,而水域范围的扩展则与水利工程投资加大及生态保护区域划定密切相关。研

究证实,区域产业扩张和资源需求增长是引发各类土地覆被格局演变的核心驱动力。

基于 INVEST3.3.2 模型模拟结果显示(图 4),元江-红河流域产水时空格局呈现显著动态变化。2010 年流域总产水量达 580.1 亿立方米,单位面积产水能力空间异质性显著(176.5-1530.3 毫米),区域平均值为 749.81 毫米。空间分布特征显示,产水能力梯度呈现自南向北逐步提升的态势,地形差异分析表明丘陵山地较冲积平原具有更强的产水能力。

2015 年监测数据显示,流域产水总量下降至 506.4 亿立方米,单位面积产水能力区间收窄为 125.1-1472.0 毫米,均值降至 654.61 毫米。空间格局分析揭示产水能力呈现西低东高的分布特征,值得注意的是,相较于 2010 年,南部区域产水效率提升显著,单位面积产水能力指标出现明显

优化。

2020 年流域产水总量回升至 517.02 亿立方米，单位面积产水能力波动范围扩大（59.02-1477.4 毫米），均值小幅上升至 668.33 毫米。空间分布模式恢复为南北向递增格局，产水能力较前一期提升超过 5%，特别是北部高值区增幅显著。至 2023 年，产水总量缩减至 493.13 亿立方米，单位面积产水能力区间调整为 146.3-1436.1 毫米，均值持续下降至 637.45 毫米。最新监测数据表明，产水能力空间分布转为东南 - 西北递增模式，较历史各时期均呈现明显衰减态势。

2010-2023 年间，元江 - 红河流域的产水规模呈现显著的年际波动特征。从空间格局分析，中游林区的产水能力始终优于下游的农业与城镇区域，这一规律在单位面积产水量和总量指标上均得到验证。值得注意的是，产水能力的空间异质性与降水格局存在显著耦合关系，其数值波动与区域降水量的时空分异呈现显著正相关。

对流域内降水与产水关系的实证研究发现，除气候要素外，人类活动已成为影响水文过程的关键驱动因子。在元江 - 红河流域，伴随人口集聚和城镇化进程加速，耕地垦殖与建设用地蔓延显著改变了区域产水格局。研究揭示该流域产水能力的空间异质性呈现加剧态势，这种地理分异特征与地形梯度、森林群落结构及山地微地貌存在显著关联。值得注意的是，复合型土地利用模式的演变不仅提升了单位面积产水效率，更通过优化地表覆被结构增强了生态系统的水源调控能力。

综合分析表明，相较于土地利用 / 覆被类型的变化，降水量的波动对产水量形成具有更显著的驱动效应。基于这一发现，在规划自然资源管理策略时，需要系统评估不同生态系统服务功能之间的相互作用关系及其协同效应。元江 - 红河流域的长期观测数据进一步印证了这一规律，该区域水文过程中降水要素持续发挥着决定性作用

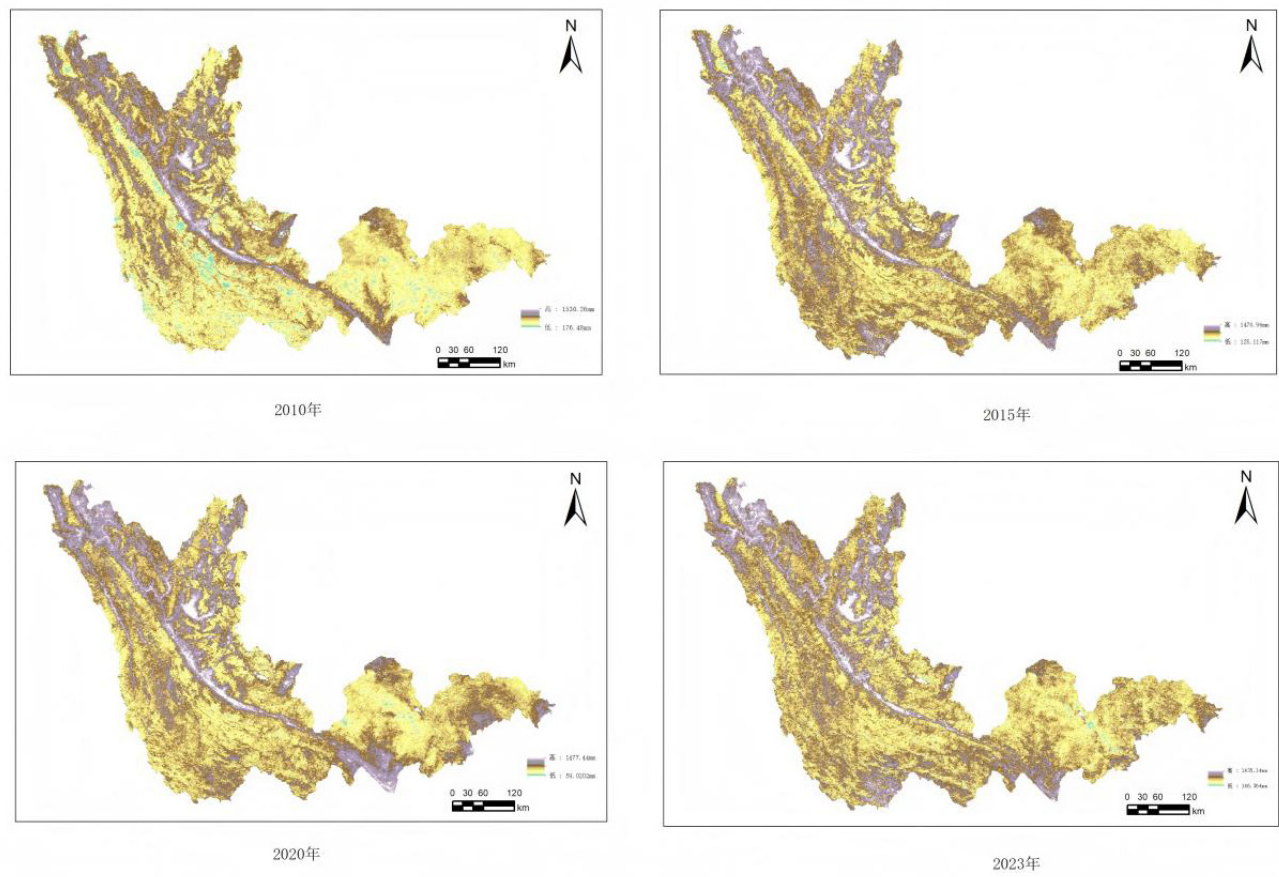


图 4 元江 - 红河流域不同年份产水量

表 4 元江 - 红河流域不同年份产水量统计 单位：mm

流域名称	产水量			
	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年
元江 - 红河流域	749.81	654.61	668.33	637.45

4 结论

通过引入 INVEST 产水量模型对元江 - 红河流域进行模拟, 获取了 2010 至 2023 年间以五年为间隔的四期水源涵养能力及产水量演变数据。研究显示, 该流域总产水量介于 493.13 至 580.01 亿立方米区间, 呈现显著波动特征。从空间分布来看, 山区丘陵地带的单位面积产水量和总量均高于平原地带, 西部区域相较东部表现出更强的产水能力, 这种空间异质性源于自然地理条件与人类活动的综合影响。综合分析表明, 降水因子对产水量的调控作用显著强于土地利用 / 覆被类型的影响。

参考文献

[1] 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.

[2] 邱问心,郑超超,俞佳骏,等. 应用InVEST模型对水库集水区水源涵养功能优化方案[J]. 东北林业大学学报,2018,46(6):50-55. .

[3] SHANGG, DAIWY, LIU B, et al. A China data set of soil properties for landsurface modeling[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212—224.

[4] 周文佐. 基于GIS的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究 [D].南京: 南京农业大学, 2003.

[5] ZHANG Canqiang, LIWenhua, ZHANG Biao, et al. Water yield of Xitiaoxi River Basin based on INVEST modeling [J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 50— 54.