

金沙江上游河谷地区土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响研究

张毅^{1,2,3}, 张婧茹^{1,2}, 刘苏^{3,4}, 熊姁^{3,4}, 崔磊^{5*}, 梅涛^{5*}

(1. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079;

3. 华中师范大学国土空间保护利用与计算治理研究中心, 武汉 430079;

4. 武汉市伊美净科技发展有限公司, 武汉 430070; 5. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 采用土地利用转移矩阵、InVEST 模型等方法对金沙江上游河谷地区 1990—2023 年土地利用变化特征进行了分析, 并从水源涵养、土壤保持、碳储量、生境质量等方面评估分析了金沙江上游河谷地区生态系统服务价值, 进一步探讨了土地利用变化对生态系统服务价值的影响。研究表明: 1) 1990—2023 年, 金沙江上游河谷地区草地与有林地、耕地相互转化, 有林地与草地面积有所减少; 水域主要是由草地、有林地互转与耕地转入, 转出为滩涂与滩地, 面积减少; 2) 有林地对水量贡献率最大, 占全区 33.08% 以上, 呈三峰两谷曲线波动。其次是灌木林, 贡献率为 19.84%, 变化幅度较小。草地保土量占比最大, 占全区 42.20% 以上。有林地次之, 为 27.38%。多种土地利用类型保土量都表现出三峰三谷波动特征, 有下降趋势。有林地碳储量占比最大, 占全区 40.16%。草地次之, 占 27.46%, 构成区域最重要的碳汇区, 固碳能力前期快速下降后微上升。生境质量均值都在 0.83 以上, 随时间波动较小; 3) 1990—2023 年生态系统服务价值具有明显的空间异质性, 土地利用类型转移方向决定了空间异质性变化, 生态系统服务价值空间分异格局基本保持稳定。

关键词: 金沙江上游河谷地区; 土地利用变化; 生态系统服务价值

中图分类号: X171.1; U412.1+4 **文献标识码:** A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



金沙江上游河段地貌以高原、高山为主, 水力资源极为丰富, 是国家水电资源重点开发聚集地, 也是“西电东送”工程最重要的基地, 经济发展和生态环境保护的战略地位十分重要^[1-4]。金沙江上游水电开发是长江经济带高质量发展的重大任务和战略部署。本研究拟在河流干流河谷尺度上对水电开发引起的土地利用类型变化进行分析, 以生态系统服务和权衡综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs, InVEST)为工具对生态服务价值进行评估, 并分析土地利用类型变化对生态服务价值的影响。本研究将有助于理解河谷地段尺度上土地利用变化引起的生态系统演化及其内在机理, 揭示生态系统服务变化及其价值空间演变规律, 为区域环境治理、环境规划提供支撑。

InVEST 模型是用生产函数法来量化和评估生态系统的变化导致人类惠益产生变化的工具, 已广泛被学术界接受与应用^[5-6]。生态系统服务(ecosystem service, ES)是各种生态系统类型、结构、生态过程所产生的直接或间接功能, 提供包括产水、土壤保持、碳固存、生境维持等关键生态过程, 为区域生态环境适应环境变化与抵御自然灾害提供韧性^[7-9]。随着对生态系统服务概念与理论理解的日益深入, 其分类及评估方法被广泛关注与持续探索, 众多学者在生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)及其评估方面的成果已对全球产生了深远影响^[10-12]。ESS 具有多样性、异质的复杂性特征, 大尺度 ESV 研究因关注整体特征而忽略小尺度区域差异及其复杂性, 导致研究成果难以有效支撑区域层管理措施的制定与实施。因此,

收稿日期: 2026-03-09.

基金项目: 水电水利规划设计总院研究项目(20250682).

第一作者简介: 张毅(1966—), 女, 博士, 教授, 研究方向为流域生态.

* 通信联系人. E-mail: 42353565@qq.com; ttmei28whu@163.com.

评估区域生态系统服务价值有助于了解其在不同空间尺度上的分布格局^[13].

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况与数据源

金沙江上游河谷地区指青海玉树巴塘河至四川宜宾河段的河谷区(图1). 处于青藏川滇“歹”字型构造头部向中部转弯段东缘弧形构造区的三江弧形构造带和赠科—稻城反“S”型构造带内. 地势由西北向东南倾斜, 一般山岭海拔 4 500~5 500 m, 气候寒冷干燥, 受地貌及纬度位置综合作用, 气候、土壤与植被分异具明显的垂直地带. 海拔 3 800~4 200 m 以上为亚寒带气候, 海拔 2 500 m 以下河谷具有亚热带气候特征. 降水量具有北多南少的特点, 多年平均年降水量显示, 岗拖以北地区为 240~550 mm, 岗拖以南至奔子为 350~750 mm, 年均蒸发量 1 154.5~1 715.5 mm, 年平均相对湿度 53%~67%. 受横断山脉深切河谷与高大山体对西南季风受的阻挡, 气流下沉形成焚风, 谷底干热. 受干湿交替的气候、蒸发作用与含大量的碳酸钙成土母质影响, 土壤有发育于干旱河谷灌丛植被下的山地褐土且海拔较高山地褐土范围变化大, 有发育在湿润山地暖温带和温带生物气候区森林分布下的山地棕壤及其土壤带之上气候冷湿的山地灰棕壤和山地灰化土, 森林上线有高山灌丛草甸植被下发育的高山灌丛草甸土与高山草甸土. 流域支流与干流属 I~II 类水质. 巴塘河口与石鼓断面多年平均流量分别为 $427 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1 350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 河道全长 984 km, 落差 1 720 m. 金沙江上游河谷地区人口稀少, 人类活动对环境的影响较小, 水电开发利用越来越多. 金沙江上游水资源丰富, 为满足国家“碳减排、碳达峰”目标与能源结构调整战略调整需要, 该区域成为我国能源规划战略布局重要的水电基地. 对该区域土地利用变化及生态系统服务价值进行动态分析, 可为国家层面水能资源开发与区域经济社会、生态环境决策提供参考.

本研究数据来源及其预处理情况如下: 采用粒子系统支持下的地形流模式与海拔最高点确定金沙江上游河谷地带范围, 据此界定河谷地区范围. 土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据库, 空间分辨率为 30 m, 时间为 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年、2023 年; 气候数据涵盖年降水量、最高气温、最低气温、平均气温、

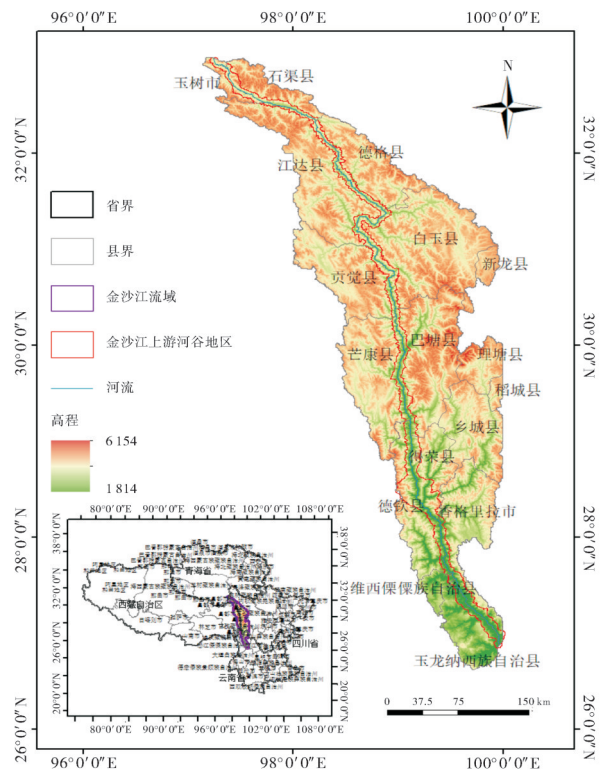


图1 研究区范围图

Fig. 1 The study area

太阳辐射等数据, 来源于国家气象信息中心; 中国 100 m 基岩根系深度数据来源于 Scientific Data 国家科技资源共享服务平台; 土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心的全球土壤数据库 1.2 版本; 高程数据来源于地理空间数据云. 将收集的所有空间数据导入 ArcGIS 软件, 转换为 WGS1984 UTM Zone 48N 投影坐标系, 按照确定的研究区范围批量掩膜并保存, 以土地类型空间分辨 30 m 为标准, 非 30 m 的空间数据重采样到 30 m. 土地利用类型归并、土地利用类型转移矩阵、植被覆盖度计算、地形数据处理、地形指数、生物物理表所用参数值计算、各类缓冲区与土地利用类型胁迫指数确定等操作均在 ArcGIS 软件中完成.

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵可以对研究时段末期相对于研究时段初期的土地利用类型数据变化进行定量分析, 主要采用马尔科夫模型进行研究. 公式如下:

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & \dots & M_{2n} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & \dots & M_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \dots & M_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, M 表示研究区各土地利用类型的面积, n 为

转移前、后土地利用类型的数量, i,j 为转移前、后土地利用类型。

1.2.2 生态系统服务价值评估方法 以1990—2023年土地利用转移矩阵为基础,结合气象、土壤、地形等数据,使用InVEST模型3.17版本定量评估金沙江上游河谷地区的产水能力、土壤保持能

力、生境质量与碳储量等生态系统服务功能。基于研究区水电开发等人类活动相关的土地利用类型变化,选取与水电开发和维持动植物及生态系统保护密切相关的年产水量、泥沙输入比、生境质量和碳储存这4项生态系统服务价值进行评估(表1)。

表1 生态服务价值评估方法及参考文献
Tab.1 Ecological service value calculation methods and references

生态系统服务	指标描述	计算公式
产水量	表示供水能力	<p>产水量是不同土地利用方式下单个栅格单元的降雨量与实际蒸散发量之差^[14-16]。公式如下:</p> $Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x,$ <p>式中,Y_{xj}为土地利用类型j上栅格单元x的年产水量;P_x为栅格单元x的年均降雨量;AET_{xj}为土地利用类型j上栅格单元x的年平均蒸散发量</p>
土壤保持	描述坡面土壤侵蚀和流域输沙空间过程	<p>土壤保持模块即泥沙转移比例模型^[17-18]。以高程数据的空间分辨率为基础,模拟水体汇集区保水保沙的空间特征,公式如下:</p> $E_a = R \times K \times LS \times C \times P,$ $E_p = R \times K \times LS,$ $E = E_p - E_a,$ <p>式中,R为降雨侵蚀力因子;K为土壤可蚀性因子;LS为坡度坡长因子;P为水土保持措施因子;C为植被和经营管理因子</p>
碳储存	指生态系统吸收CO ₂ 和CO ₂ 等气体的能力	<p>InVEST模型碳储量模块根据不同的土地利用方式和碳密度对碳储量进行量化^[19-22]。公式如下:</p> $C_i = C_{i,above} + C_{i,below} + C_{i,soil} + C_{i,dead},$ <p>式中,$C_{i,above}$为土地利用类型i的地上碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$);$C_{i,below}$为土地利用类型$i$的地下生物碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$);$C_{i,soil}$为土地利用类型$i$的土壤碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$);$C_{i,dead}$为土地利用类型$i$的死亡有机物碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)</p>
生境质量	反映区域生境的破坏程度以及对生境退化的干扰能力	<p>InVEST模型生境质量模块基于土地利用类型并考虑其威胁因子敏感性和外部威胁强度的生境质量时空分布^[23]。公式如下:</p> $Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^c}{D_{xj}^c + k^c} \right) \right],$ <p>式中,Q_{xj}为第j种景观类型栅格单元x的生境质量指数;H_j为第j种景观类型的生境适宜性分值;k为半饱和常数;D_{xj}为生境退化程度指数</p>

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

金沙江上游河谷地区建设用地主要分布在主干河道或支流与主干河道交汇处坡度平缓区域;耕地主要分布在中下游地形平坦区;有林地主要位于干流及支流与干流两岸交汇低地至高山坡度大的海拔较高区域;草地分布比较均匀;灌木林、疏林地整个河谷带都有分布,其他用地零星分布,水域和滩涂与滩地主要由金沙江干流与支流水面与周围地势低而平坦的浅滩构成(图2a)。图2a显示了土地利用类型1990—2023年转化及其空间分布格

局,通过土地利用转移流向分析可以具体揭示变化特点和规律(图3)。

研究区1990—2023年面积变化波动较大的是草地与有林地。草地1990—1995年主要转向灌木丛、有林地,有林地、灌木林、其他用地与耕地转向草地,面积有所减少;1995—2000年草地转向有林地和耕地、灌木林及其他用地,有林地与灌木丛及耕地、其他用地、疏林地转化成草地,2000年草地面积增加;2000—2005年主要流向灌木林、疏林地、有林地,其中转向水域的草地面积约3.37%,有林地、灌木林、其他用地转入草地,转入补充不足,总面积减少;2006—2015年,草地流向灌木林、



注:a为土地利用类型,b为产水量,c为保土量,d为碳储量,e为生境质量。

图2 1990—2023年研究区土地利用类型与四项生态系统服务价值空间分布及变化图

Fig. 2 Spatial distribution map of land use types and four ecosystem service values from 1990 to 2023

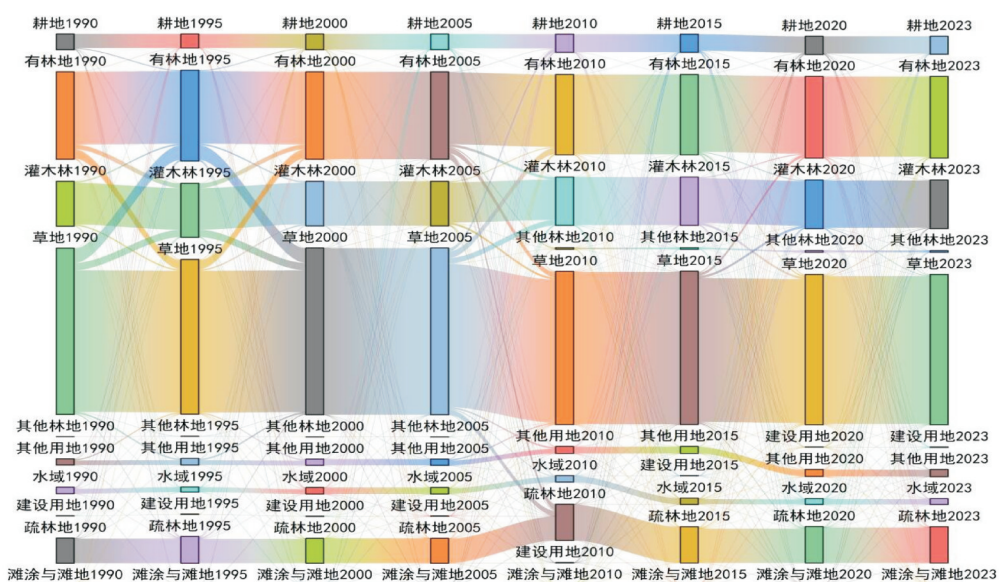


图3 研究区土地利用类型转移矩阵

Fig. 3 Land use type transition matrix in the study area

有林地、疏林地等六种类型,灌木林与有林地转入草地;2015年以后草地转向灌木林、疏林地、有林

地,耕地、灌木林、疏林地、有林地转向草地,草地增加1.46%。整体表现为2015年前波动变化大,后趋

平缓.有林地1990—1995年主要表现为转向灌木林、其他用地、耕地、草地.同时,草地、灌木丛与其他用地转向有林地,面积增加了3.92%;2010年前有林地流向草地、耕地、灌木丛、疏林地、水域,草地、灌木林转化成有林地,转出大于转入,面积减少;2010年后,主要表现为与草地、灌木丛互转,转入转出的面积差异较小,仅增加1.77%,表明2010年前变化起伏较大,后趋平缓.

研究区1990—2023年灌木林、疏林地面积前期波动大,后缓慢波动上升.前五年灌木林主要流向草地、有林地、其他用地,同时草地与有林地转入灌木林,面积增加20%;第二个五年主要转向草地、有林地与草地,有林地、其他用地转入灌木林,转入少于转出,面积减少了17.61%;2000年至2010年主要表现为流向草地、其他用地、疏林地、有林地与草地、有林地转入,面积增加8.85%;2010年以后,灌木林主要表现为与草地、有林地互转,转入与转出差别较小,面积变化不大.疏林地表现与其有相似性,体现在前五年主要转出为草地与灌木林,转入为草地与有林地,面积增加6.72%;第二个五年主要转为草地与有林地,面积减少了7.45%;2015年后转向草地与有林地,但同时草地、灌木林、有林地、耕地转入,总体面积增加.

水域与水电开发相关性较强,有以下变化:前5年主要流向草地、有林地,转入大于转出,面积减

少18.10%;第二个五年间表现为草地、灌木林、有林地转为水域,转出少,面积增加了8.56%;2000—2015年,主要表现为从草地、耕地、灌木林、滩地与滩涂、有林地转入,转出为草地、滩地与滩涂、耕地,面积增加;2015年后流向草地、耕地、有林地、灌木林及草地、耕地、有林地,面积减少.

2.2 生态系统服务价值变化及土地利用对其变化的影响

2.2.1 年产水量变化及土地利用对其变化的影响

由于地处金沙江上游,与水源涵养有关的产水功能非常重要. InVEST模型年产水量模块是依据降雨、蒸发量及植物吸水蒸腾平衡原理来计算产水量,利用土地利用类型与气象、土壤、地形等数据来模拟河谷区产水量与水源涵养能力.与土壤蓄水法相比,该方法更具空间化与可视化特征,且参数获取便捷、易于量化.采用表1中产水量公式计算出各类土地利用类型各时期年产水量(表2),显示年产水量均值为5.3997亿t.其中,有林地贡献率最大,占总量的33.08%,波动也大,其波动与全区变化一致,影响着区域产水量的变化.灌木林贡献率为19.84%,波动较小;草地贡献率为17.74%,波动与总产水量变化有一定差异;疏林地占14.52%,其他用地、水域、其他林地、滩地与建设用地,贡献占比分别为7.67%、2.99%、2.83%、0.72%、0.59%、0.28%.

表2 1990—2023年不同土地利用类型产水量

Tab. 2 Water yield in different land use types from 1990 to 2023

×10⁸ t

土地利用类型	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
耕地	4.634 7	4.236 0	3.935 6	4.228 6	4.234 4	3.988 9	4.546 9	3.344 9
有林地	19.486 7	18.997 1	15.990 3	17.958 8	18.348 9	16.743 2	19.451 6	15.344 1
灌木林	10.638 7	11.346 4	9.993 9	10.717 0	10.841 2	10.563 0	10.392 9	10.866 5
疏林地	8.707 6	8.299 1	6.275 3	8.166 2	8.318 6	7.464 3	8.848 0	6.388 9
其他林地	0.667 1	0.389 0	0.247 9	0.256 8	0.480 5	0.205 4	0.702 2	0.159 3
草地	10.340 2	9.422 9	7.979 7	9.467 3	10.480 8	9.193 4	10.726 5	9.043 6
水域	1.580 0	1.531 6	1.643 5	1.677 7	1.531 6	1.643 5	1.615 1	1.008 8
滩地	0.175 6	0.180 2	0.137 0	0.137 0	0.180 2	0.137 0	0.175 6	0.070 8
建设用地	0.052 7	0.064 8	0.062 0	1.866 1	0.210 2	0.102 7	0.105 3	0.123 9
其他用地	1.702 9	1.383 2	1.239 6	1.763 3	1.982 0	1.609 3	1.825 8	1.398 1
全区	57.986 0	55.850 3	47.504 7	56.238 8	56.608 4	51.650 7	58.389 8	47.749 0

图2b是按分位数对1990—2023年年产水量进行分类的空间分布图.时空系列图显示产水量各等级空间分布呈现显著的分异特征,分异与土地利用类型分布有极强的吻合性,多年来格局基本稳

定.产水量等级与地类空间分异特征体现如下:产水量最高值较集中分布在河谷上香格里拉市南部与维西傈僳族自治县交界河流右岸,呈小片状连续斑块聚集集中分布.在香格里拉市南部河谷右岸

呈大面积连续分布,在乡城县南部干支流交汇地带,低海拔缓坡与平坦谷地过渡带则连续片状聚集分布,在干支流交汇滩地现小范围连续斑块聚集,主要由有林地、灌木林、疏林地构成;较高值主要分布在乡城县南部的金沙江右岸、德钦县西部的支流河谷下游及其支流地带中等海拔缓坡,呈间歇条带状沿河谷延伸,有一定的连续性,乡城县南部有零散斑块状聚集,德钦县境内支流下游有零星分布,主要由耕地、草地、疏林地构成;产水量中值广泛分布于巴塘县中南部、乡城县北部的干流及白玉县中部的河谷左岸高海拔缓坡与陡坡过渡带地带,呈现断续条带状分布,巴塘县境内沿干流右岸呈间歇延伸,乡城县北部右岸及白玉县中部左岸地带呈条带状连续分布,主要由水域、耕地、灌木林、草地等类型构成;产水量较低值主要在白玉县北部、德格县南部左岸呈斑块状间断性延伸分布,新龙县与白玉县交界河道两侧呈零散斑块状分布,主要由其他林地、耕地、水域构成;产水量最低值在江达县、石渠县交界河谷右岸及新龙县境内的高海拔陡坡,此处有较多土层薄或裸露地带,主要由其他林地、建设用地、水田、滩地与滩涂构成。

从产水量年际变化来看,研究区 1990—2023 年年产水量呈三峰两谷波动性变化。波谷出现在 2000 年和 2015 年,2005—2010 年为平台期,最高值在 2020 年。变化主要原因是:高值区有林地、灌木林、草地、疏林地相互流转,在河谷两侧中高海拔山地,中上游玉树至巴塘段和下游德钦至玉龙段有林地面积显著向高海拔区收缩,转为灌木林、草地、疏林地;中等值面积增加,波动性较大,具有明显阶段

性。干流中游河谷开阔处水域面积有所收缩,部分转化为滩涂与滩地、草地与灌木丛,在中游巴塘至得荣段及与下游德钦至维西段的山坡地平缓坡地,草地、有林地、灌木林转为疏林地;在德钦县、香格里拉市南部、维西县北部及德钦县与香格里拉市交界的中段河谷阶地平缓地带,其他用地、建设用地转入耕地,耕地面积增加,河谷阶地村镇周边其他林地、滩地与滩涂、建设用地、其他土地相互转化,面积变化幅度小,低水平值面积处于稳定状态。上述结果表明,产水量空间分布格局基本稳定,产水功能高低空间位置受地形、水域共同影响,显示南高北低与梯度分布及干流右岸明显优于左岸的特征,表明土地利用类型不是影响产水量高低的唯一因素,地形的水热土壤配置差异会通过形成不同生态系统群系与覆盖度分化来影响产水量,减弱了土地利用类型变化对生态服务价值的影响程度。

2.2.2 保土量变化及土地利用对其变化的影响
利用 InVEST 模型泥沙输移比模块功能,将 DEM、流域、土壤侵蚀性因子、CSVD 导入模型,采用表 1 中土壤保持公式计算各类土地利用类型各时期年保土量(表 3)。从表 3 可知,金沙江上游河谷地区年均保土量为 3.023 2 亿 t。其中,草地贡献率最大,占 42.20% 以上,其保土量与全区变化有一致性,对总保土量变化影响大,具三峰两谷呈波动性下降趋势。有林地、疏林地、耕地、灌木林对保土量的贡献率分别为 27.38%、10.51%、3.48%、13.66%,水域、滩地、滩涂分别占 0.75%、0.10%,表现为三峰三谷波动变化。

表 3 1990—2023 年不同土地利用类型保土量

Tab. 3 Soil conservation capacity of different land use types from 1990 to 2023

× 10⁸ t

地类	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年
耕地	102.238 5	88.660 0	114.961 6	88.826 5	135.293 9	82.031 6	133.969 3	97.213 0
有林地	852.756 2	900.839 6	982.890 5	780.520 2	922.801 6	572.910 3	950.919 3	658.446 9
灌木林	376.550 5	488.866 9	441.108 9	359.160 9	485.755 0	307.803 4	519.019 7	324.566 7
疏林地	281.637 6	293.497 3	312.820 5	240.505 5	410.375 6	262.460 1	419.796 1	320.651 2
其他林地	0.161 6	0.299 3	0.200 3	0.122 2	13.285 8	9.613 7	13.668 8	7.752 4
草地	1 346.418 2	1 324.717 5	1 566.945 6	1 294.295 5	1 417.517 2	883.274 0	1 455.703 0	918.441 7
水域	23.487 8	17.542 0	27.744 3	22.664 4	25.310 0	15.951 2	30.372 4	18.892 1
滩涂与滩地	3.115 1	2.678 5	3.067 8	2.322 7	3.452 0	2.548 3	3.517 5	3.013 0
建设用地	1.432 4	1.365 0	1.425 7	1.295 8	1.749 5	1.335 1	2.034 5	1.449 7
其他用地	43.021 4	52.327 1	55.595 5	39.592 4	70.812 1	34.908 8	66.071 4	43.888 0
全区	3 030.819 3	3 170.793 1	3 506.760 8	2 829.306 1	3 486.352 7	2 172.836 5	3 595.071 8	2 394.314 8

图2c显示,1990—2023年保土量的空间分布特征。保土量高值集中在阿洛贡—石鼓段和果通—拉哇段,在石鼓站上游的“长江第一湾”附近及阿洛贡段的支流峡谷中呈现明显的聚集分布,从直门达、晒拉几乎贯穿到石鼓,在岗托、波罗、岩比等地高海拔斜坡与山顶平坦之地,呈大面积连续覆盖,主要由疏林地、灌木林、有林地、草地构成;保土量中值部分极其稀疏且分散,出现在德钦县的低山缓坡、主要支流干流交汇处、两岸山地的陡坡或岩石裸露较多的森林边缘区及高寒荒漠边缘地带,在巴塘、苏洼龙至旭龙的干流两岸呈长条状连续分布或局部聚集分布,主要由其他林地、疏林地与灌木林构成;保土量低值区在低海拔、平坦或缓坡之地及地势低的河道或主支流交汇三角地带,其中石鼓站附近较为密集,主要由其他土地、建设用地、滩涂与滩地、耕地、高寒荒漠边缘草地构成。保土量减少核心区在白玉县、德格县等靠近河谷区域,该区域有林地、草地转为灌木林,使其面积增加;河谷两侧低中山坡地、中游巴塘至得荣段有林地扩张,保土量有所下降;德格县、白玉县等主河道冲刷严重的坡底地带与中游巴塘—得荣至下游德钦,由草地、有林地、灌木林转化为疏林地,疏林地保土量增加。在巴塘县、芒康县、德钦县境内的中高海拔坡地草地转化为疏林地、灌木林、有林地,保土量减少。德钦县与香格里拉市交界的中段河谷阶地,沿河谷两岸向平缓坡地由其他林地、高寒荒漠边缘草地、耕地、水域、滩涂与滩地流转,耕地因其他用地、建设用地的转入,在空间上延伸扩张,但整体保有量减少;中游河谷开阔区域水域面积的收缩,巴塘县阿洛贡、德钦县奔子栏等河道曲折处的凸岸或边滩滩涂与滩地与水域互转及水域转化为滩涂与滩地,面积略有减少,江达县岗托、巴塘县城以及苏洼龙、拉哇、叶巴滩等重要枢纽施工区呈现强烈的点状聚集。巴塘县、江达县等城镇聚落外围的低海拔平缓台地有建设用地、耕地、其他林地互相转化,保土量微减。以上表明土地利用类型面积的大小与变化直接影响区域保土量的总量与变化。

2.2.3 碳储存变化及土地利用对其变化的影响
基于土地利用和土地覆盖类型数据及其转移,将碳储量划分为地上部分、地下部分、土壤和死亡有机物、封存这5个碳库进行评估。按照表1中碳储存公式计算10种土地利用类型地上、地下、土壤与枯萎有机质,按土地利用类型统计各期碳储量(图4)。利用ArcGIS分位数法将碳储量分为5个等级,图4

显示1990—2023年土地利用类型年碳储量及各土地利用类型在5个等级的储量。年碳储量均值为12.929 2亿t。有林地对碳储量贡献率最大,占40.16%,变化与整体年碳储量相似。表明有林地是研究区核心碳库,是固碳功能的核心载体,其值大小与森林覆盖率及林分类型高度关联,与其面积变化共同影响区域固碳能力的变化;草地碳储量次之,占碳储量占全区27.46%,像元主要处于碳储量中等区,前十年呈小幅波动上升,后段又略回落,因其面积大,草地是碳汇主要区域;灌木林贡献率占总量的20%,像元基本都在最高等碳储量范围中,前10年波动大,后趋于平稳,表明灌木林是重要碳汇地类;疏林地碳储量占比为11.30%,像元基本在较高等碳储量区,2005年前波动下降,后进入2010年高平台期,2005年至2010年表现为增长期;耕地占总量的0.80%,像元位于碳储量较低区,与疏林地变化趋势相似。水域、滩涂、建设用地、其他用地像元基本处于年碳储量较低水平,随时间变化波动小。

图2d空间分布图显示区域碳储量空间异质性强。碳储量高值区从下游的德格县、白玉县,经中游巴塘县、得荣县,一直延伸至南部的香格里拉市、玉龙县,沿岸呈连续条带状分布,连通性强,在下游德格县、白玉县境河干两岸高海拔的山地聚集并延伸至上游香格里拉市、玉龙县的高山及中游巴塘县、得荣县;碳储量中高值区从德格县、白玉县,经中部的巴塘县、得荣县延伸至香格里拉市、玉龙县,沿金沙江干流两岸呈断续条带状分布,在南部河谷地带表现更聚集,在德格县、白玉县境内金沙江上游河谷两侧呈零星条带状,在巴塘县、得荣县境内呈断续条带状,范围广,与高值区交错分布;碳储量中值区在中海拔山地与丘陵区分布广泛,中部巴塘县、得荣县及南部的香格里拉市、玉龙县最为集中,呈面状或斑块状,覆盖范围广,连续性较弱,多为金沙江上游山地的草地与次生林地,受植被覆盖度影响;碳储量中低值在平缓及支流阶地,在香格里拉市、玉龙县境内聚集呈连续条带状分布,植被覆盖度较低;碳储量低值区呈零星斑块状分布在干流及支流,在德格县、白玉县,中部的巴塘县、得荣县及香格里拉市、玉龙县有分布,不够集中与连续。从年际变化上看,耕地由其他用地、建设用地相互转化,面积增加,年固碳能力增加;有林地向灌木林、草地、疏林地转化,面积下降,碳汇能力减弱;灌木林由有林地、草地的转入,面积增加,碳汇功能增

强,变化在河道两侧中高海拔山地及低中山坡.其他林地因其他用地、建设用地转入,面积大幅增加,固碳功能增强,发生在德钦县境内河谷中段平缓地

带,呈零星点状.上述结果表明土地流转方向是导致区域固碳能力的主要因素.

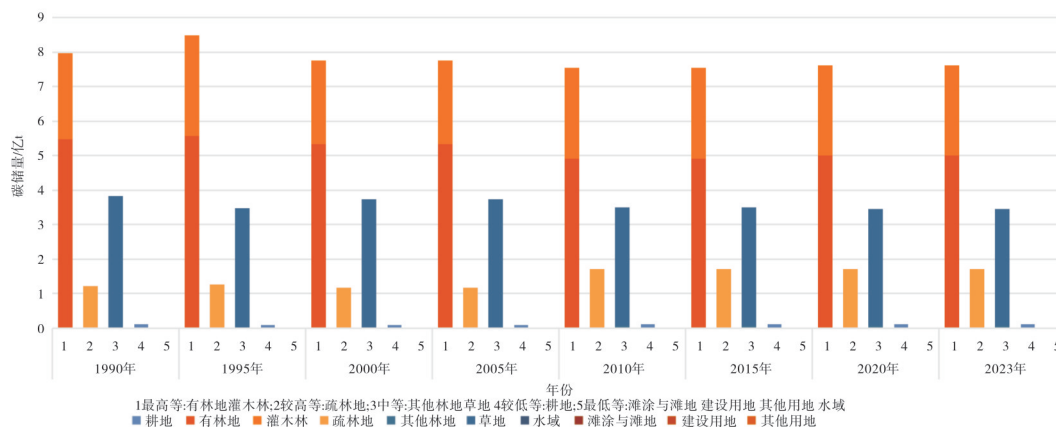


图4 1990—2023年土地利用类型在不同等级碳储量柱状图

Fig. 4 Carbon storage histogram of land use types on different levels from 1990 to 2023

2.2.4 生境质量变化及土地利用对其变化的影响 生境质量是为生物生存、繁殖及数量生态系统提供适于个体和种群可获得性资源与条件的质量性、完整性. InVEST模型是依据土地利用覆被类型、生物转移及其与人类威胁可达性与敏感性等满足生物资源与条件的质量性、完整性结构和功能的能力及历史范围进行模拟评估^[24]. 利用InVEST模型生境质量模块功能,由表1中生境质量公式计算获取研究区生境质量指数值(表4、图5). 按分位数法在ArcGIS软件中将生境质量划为5个等级. 图5显示1990—2023年各土地利用类型在5个生境质量等级上的面积. 研究区1990—2023年绝大部分地区生境质量指数都高于0.7,均值在0.83以上,最高年份与最低年份仅差0.0272,表明区域整体生境质量高并保持平稳. 从影响看,有林地像元基本在最高等区,指数0.94以上,水域像元大都处于较高等区,生境质量指数在0.8944~0.9400,灌木林几乎都处在中等区,指数在0.7745~0.8944间,疏林地与草地大都处较低等区,指数在0.728~0.7745间;耕地与其他林地、滩涂与滩地、建设用地、其他用地基本处于较低等,生境质量小于0.728. 1990—2023年,最高等生境质量面积出现先波动下降再进入缓慢略微上升进入平台期,具体表现为:前五年面积快速上升到3401.9838 km²,净增250.8799 km²,后跌至2015年谷期,后略上升,至2023年达到3100.8429 km².

图2e显示1990—2023年生境质量具有明显空间分异特征. 最高等生境质量主要在金沙江干流

表4 不同土地利用类型生境质量对不同胁迫因子敏感度表

Tab. 4 Habitat quality sensitivity table of different land use types to different stress factors

土地利用类型	生境适宜度	胁迫因子		
		耕地	建设用地(城乡工矿、居民用地)	其他用地
耕地	0.5	0.3	0.5	0.4
有林地	1.0	0.5	0.8	0.3
灌木林	0.8	0.45	0.5	0.25
疏林地	0.6	0.4	0.7	0.2
其他林地	0.4	0.35	0.7	0.25
草地	0.6	0.45	0.6	0.25
水域(河渠、湖泊、水库坑塘)	0.9	0.6	0.75	0.3
滩涂与滩地	0.2	0.2	0.2	0.2
建设用地(城乡工矿、居民用地)	0	0	0	0
其他用地	0	0	0	0

及支流河谷两侧的山坡及山麓地带,呈线性延伸,缓坡处呈条带状、片状,包括上游的玉树市、石渠县、德格县、江达县、贡觉县、白玉县、巴塘县、得荣县,中游的新龙县、理塘县、乡城县、稻城县、芒康县、察雅县及德钦县、香格里拉市、维西傈僳族自治县及玉龙纳西族自治县河谷两侧海拔较高的山地,总体呈连续片状、条带状分布;次高等生境质量在河谷两侧的山坡地带、盆地,呈狭长状,在中上游和

中游的河谷阶地以上的缓坡和山间地带比较集中,呈条带状、片状,贯穿河谷两侧海拔高于耕地和建设用地的部分山坡地带,无核心聚集,范围广,沿河谷线延伸,主要由水域、疏林地构成;中等生境质量在金沙江干流河谷沿岸低海拔平缓地带、河谷阶地及其与主要支流交汇地带平缓地带,紧邻河谷平坦处.在德钦县与香格里拉市交界地带表现尤为明显,整体分布具分散特点,条带或斑块状沿主河道延展在德钦县与香格里拉市交界的河谷展宽处呈小片状聚集,上游区域则呈零星点状分布,依附于河谷地形与其他林地相邻呈零星点状、小斑块状

分布,比较分散,难以连续成片,范围极小,仅占5.05%,限于在河谷平缓局部地带;较低级生境质量分布在干道及其与支流的海拔低值区平缓地带,呈线性点状紧邻河道分布,不连续,仅限河道浅滩区域,与水域相邻,严格局限于河谷地形的浅滩与河漫滩地带,由疏林地、草地构成;最低等生态质量分布在主河道沿岸或主支流交汇的低海拔平缓地带河谷阶地地区,呈条带状、稀疏点状沿主河道线性延展,在河谷开阔地局部区域呈零星聚集分布,与河谷地形具强烈的依附关系,由耕地、其他林地、滩涂与滩地、建设用地、其他用地构成.

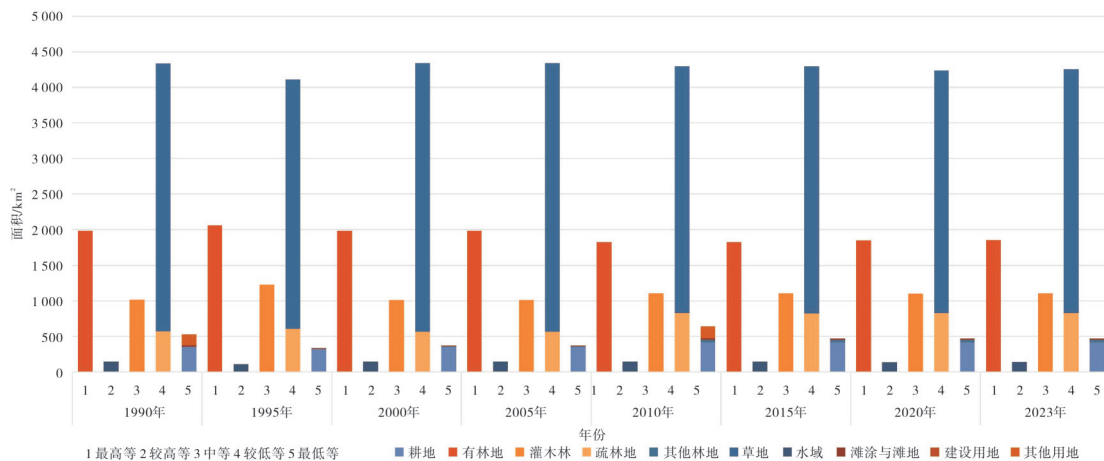


图5 1990—2023年研究区土地利用类型在各生境质量等级的面积柱状图

Fig. 5 Area histogram of land use types in each habitat quality grade in the study area from 1990 to 2023

土地利用类型变化方向影响生境质量等级下降与提高.生境质量下降的主要原因如下:1)最高等生境质量转为中等、较低、最低等生境质量.表现在构成有林地的天然、人工乔木林植被被农田、草地、人工建筑或零星林地替代,变化发生在中上游玉树至巴塘段和下游德钦至玉龙段两侧有林地向高海拔区收缩;2)较高等生境质量转为中等、较低等、最低等类型.表现在水域向耕地、建设用地转入,水生植物转变为农田作物或无植被,发生在河谷两侧阶地与海拔低值区平缓地带,中游河谷开阔处水域段与上游及中游河道浅滩与河漫滩扩张或收缩;3)高、中等质量向较低等、最低等转化.表现为有林地向疏林地、耕地转换,植被从次生林转变为稀疏乔木或农田作物,变化位于河谷两侧中高海拔山地缓坡区有林地分布明显收缩及德钦县与香格里拉市交界的中段河谷阶地和河谷向阳平缓坡地延伸区.

生境质量提高的主要表现是:1)最低等向中等、较高等、最高等转化,主要表现为耕地、建设用

地、其他用地向有林地、水域转化,植被从农田作物、无植被、零星人工林转变为乔木林、水生植被;2)较低等生境质量转为中等、较高等、最高等.主要表现为疏林地、草地向有林地、水域转化,植被从中低覆盖度草本、稀疏乔木转变为乔木林、水生植被;3)中等生境质量转为最高等.主要表现为有林地内部质量提升及地表转化,植被为乔木林.发生在巴塘至得荣段河谷两侧低中山坡地草地、灌木林逐步被有林地代替.生境质量提高大于生境质量下降,表现研究区整体质量有所提升.从变化的时间节点看,前20年波动较大,在2010—2015年平台期后则平缓上扬,表明最低等生境质量变化主要由土地利用变化及其土地利用类型植被类型上变化综合决定.

3 结论与讨论

1)研究区土地利用类型以草地、有林地为主,前期变化波动大.草地与有林地占比超过60.00%,灌木林、疏林地占比超过20%,耕地与建设用地仅

为 4.83%。有林地位于干流及支流与干流两岸交汇低地至高山坡度大的海拔较高区域;草地大都在耕地与有林地间,分布比较均匀;灌木林、疏林地分布在河谷地带,具有垂直梯度分异。说明土地利用空间分布受地形限制较强,土地类型分布格局与地形有很强的相关性。30 多年来,有林地向耕地、草地、建设用地、其他林地等类型转换,天然、人工乔木林被农田、灌木林、草地替代,草地、灌木林与其他类型转入有林地;耕地向有林地、草地、疏林地、水域等类型转换,表现为农田转化为乔木林、草本或水生植被,转入与转出面积基本持平;草地变化大,主要是 2010 年前呈现先升后降的波动,后趋于平缓,总体面积减少,主要向耕地、有林地、建设用地等类型转换,表现为草本植物被农田、乔木林替代。表明土地利用变化基本发生在金沙江上游水流截断、修坝建库进行水利水电开发之前,说明区域水电梯级开发实施后对土地利用调整影响不大,土地利用流转方向与武陵山区、泛长三角地区、华北平原西北部等地区表现一致^[25]。2015 年截流建坝建库进行水利开发后,水域面积呈现先增加后缩减的变化,表现为水域与灌木林、草地、耕地、滩涂与滩地间互转,面积变化减少,在中游河谷开阔段水域与河道上游及中游浅滩区浅滩与河漫滩表现明显,零星草地、灌木林、滩涂与滩地转为水域,表明水域和滩涂与滩地出现错位与空间置换外,水利水电开发与建设对陆地生态系统影响不大。

2) 产水量空间分异显著,土地利用类型贡献率差异明显,大都呈三峰两谷波动下降变化。有林地对全区年产水量贡献率虽最大,对研究期产水量变化影响并不大。有林地面积 2010 年前波动大后趋于平缓与区域产水量变化波动不一致,主要因 2005—2010 年有林地与草地、灌木林、疏林地互转,虽面积大幅减少,由于产水量高值区主要由有林地、灌木林、疏林地构成,互转对产水量影响不大;较高值区主要由耕地、草地、疏林地构成,中值区主要由其他林地、耕地、水域构成,较低值主要由其他林地、耕地、水域构成;最低值由其他林地、建设用地、水田、滩地与滩涂组成。疏林地、其他林地、水域变化是影响产水量变化的因素。体现在水域由草地、耕地、有林地、滩地与滩涂转入,水生植物被零星林地、草本植物取代,水域转化为草地、耕地、滩地与滩涂、其他林地,引起较高、中值区面积变化,产水量随之波动。土地利用类型调整对产水量影响不敏感,变化主要取决于构成等级间土地类

型的转移。产水量高低受地形影响较大,具有南高北低、右岸优于左岸及梯度分布的特征。30 多年来,空间分布格局基本稳定,土地利用类型流转对产水量有明显影响。体现在以耕地、疏林地、水域为主中等产水区面积具明显的阶段性变化,如中游河谷开阔处水域段面积收缩,在中游巴塘至得荣段及与下游德钦至维西段的山坡地疏林地外围平缓坡地草地、有林地、灌木林转为疏林地,河谷两岸向平缓坡地其他用地、建设用地转入耕地。

3) 草地与有林地保土量占比接近 70%,呈三峰三谷波动下降变化,空间分异受地形与土地类型共同制约。草地保土量占全区 42.20% 以上,呈三峰三谷波动性下降,变化较大。保土量高值区主要由疏林地、灌木林、有林地、草地组成,集中在阿洛贡—石鼓段和果通—拉哇段,在石鼓站上游的“长江第一湾”附近及阿洛贡段的支流峡谷中有明显的聚集,从直门达、晒拉至石鼓,几乎贯穿全线,特别是在岗托、波罗、岩比等地高海拔斜坡与山顶平坦之地,呈大面积连续分布;中值区由其他林地、陡坡区域疏林地与灌木林构成,见于德钦县的低山缓坡与两岸山地的陡坡处,或在主要支流汇入金沙江干流的交汇处,分布极其稀疏且分散;低值区由其他土地、建设用地、滩涂与滩地、耕地、高寒荒漠边缘草地构成。在低海拔、平坦或缓坡之地及地势低地的水域及主河道与分支河道交叉的三角地带,石鼓站附近较为密集。多为森林边缘的过渡地带,干流两岸呈长条状连续分布,河底低地呈线性或局部聚集分布。说明保土量分布格局受地形与土地类型共同制约的特点,生态系统保土量功能及生态环境变化由林地或疏林地、灌木林的林分与覆盖度决定,土地利用类型流转对林地保土量的影响减弱。本区保土量变化主要由有林地、灌木林、疏林地、草地土地利用类型流转,灌木林、草地、疏林地面积减少,导致保土量减少,变化发生在巴塘县、芒康县、德钦县境内的中高海拔坡地。

4) 有林地碳储量占比最大、前期波动大,空间分异明显。土地利用变化驱动生态系统类型变化,致陆地生态系统碳储量变化。有林地、灌木林碳储量最高,有林地对碳储量贡献率最大,草地、其他林地居中等,因面积大,在区域固碳功能上发挥重要的作用。几种土地利用类型碳储量都表现为 2010 年前波动变化大,有一定降幅,后趋于平稳的现象。从碳密度大小看,土地利用类型间有明显差异。有林地、灌木林,疏林地次之,草地、其他林地居中,耕地居较低水平,其他类型则处最低水平。年碳储量

高值、中值、低值区呈镶嵌交错分布。土地利用类型流向对区域碳储量变化有一定的影响。如耕地由其他用地、建设用地相互转化,低值区向中值区转移,年碳储量随之增加;有林地向灌木林、草地、疏林地转化,区域碳汇能力有减弱;灌木林由有林地、草地的转入,碳汇功能增强。

5) 研究区整体生境质量高,变动小,具有一定空间异质性。生境质量变化对区域生态系统与动植物物种维护与保护产生重要影响。土地类型与土地类型分布的植被共同影响区域生境质量。首先,像元点生境质量指数高低具有土地类型差异。如最高指数区主要由有林地构成,次之由水域构成,再次之主要由灌木林构成,指数较低值区主要由疏林地与草地组成,最低区则由其他土地利用类型组成;其次,跨指数等级间土地类流转影响区域生境质量的变化。如2015年前最高等、较高等面积波动下降,源于草地转化为灌木林、草地、疏林地,有林地转化为灌木林、草地、疏林地,有林地与草地面积较少,体现在中上游玉树至巴塘段和下游德钦至玉龙段高海拔山分布面积显著收缩。最低等区向中等、较高等、最高等转化,表现在耕地、建设用地、其他用地向有林地、水域转化,农田作物、无植被或零星人工林转变为乔木林、水生植被,中、高等生境质量面积上升。从年际变化上看,2010年波动较大,源于封山育林及对林分改造。从植被类型分布变化看,2015年前耕地、建设用地、其他用地、水域转向有林地,草地,植被从农田作物、无植被、零星人工林转变为乔木林、水生植被,水域互转。疏林地、草地向有林地、水域转换,植被从中低覆盖度草本、稀疏乔木转变为乔木林、水生植被,生境质量提高。其中,农田作物、无植被、灌木林、针叶林、阔叶林等不同植被作为生物栖息地,为生物生存创造条件差异悬殊^[26]。表明研究区生境质量与其他区域有差异^[27]。从评估结果看,该区整体生态质量较其他地区高^[28]。在人类活动与气候变化下,生境质量较为稳定,变化较其他区域小,表明该区域生境质量较其他区域更具韧性。

致谢:感谢熊芯、李立、洪宇婷、马钡钡对论文数据提供的支持。

参考文献:

- [1] 李泽林, 龚家国, 范严伟, 等. 高山峡谷型河流形态特征识别与分析: 以金沙江上游为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(12): 113-126.
- [2] 胥洪远, 赵启道, 韩培东, 等. 金沙江上游水光互补中长期协调运行方法研究[J]. 水力发电, 2024, 50(6): 84-90;116.
- [3] 夏勇, 祝海霞. 金沙江上游叶巴滩水电站下闸蓄水方案优化研究[J]. 四川水力发电, 2025, 44(5): 7-11.
- [4] 雷保瞳, 郑付刚. 金沙江上游波罗水电站枢纽布置设计研究[J]. 水电站设计, 2025, 41(1): 35-38.
- [5] 贾天朝, 胡西武. 基于PLUS-InVEST-Geodector模型的三江源国家公园碳储量时空变化及驱动力[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5931-5942.
- [6] 高雅玲, 黄河, 朱里莹, 等. 基于InVEST模型和地形多样性的山地丘陵区生境质量综合评价——以福州市为例[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(6): 261-272.
- [7] LI Y, QIU L, LUO G J, et al. Zoning optimization of ecosystem service value and landscape ecological risk in typical karst areas in southwest China [J/OL]. Scientific Reports, 2025, 15[2026-03-11]. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17904-3>.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] LI Z L, GONG J G, FAN Y W, et al. Identification and analysis of morphological characteristics of alpine-gorge rivers: a case study of upper reaches of Jinsha River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(12): 113-126. (Ch).
- [11] XU H Y, ZHAO Q D, HAN P D, et al. Research on medium and long term coordinated operation method of hydro-photovoltaic complementary system in upper reaches of Jinsha River [J]. Water Power, 2024, 50(6): 84-90;116. (Ch).
- [12] XIA Y, ZHU H X. Optimization study on the impoundment of Yebatan Hydropower Project in the upstream of the Jinsha River [J]. Sichuan Water Power, 2025, 44(5): 7-11. (Ch).
- [13] LEI B T, ZHENG F G. General layout design of Boluo hydropower station in the upper reach of Jinsha River [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2025, 41(1): 35-38. (Ch).
- [14] JIA T C, HU X W. Spatial-temporal change and driving force of carbon storage in three-river-source national park based on PLUS-InVEST-geodector model [J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 5931-5942. (Ch).
- [15] GAO Y L, HUANG H, ZHU L Y, et al. Comprehensive assessment of habitat quality in mountainous urban areas based on the InVEST model and terrain diversity: a case study of Fuzhou City [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025, 40(6): 261-272. (Ch).
- [16] XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China [J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746. (Ch).
- [17] XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on

- per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. (Ch).
- [10] LI Z T, ZHANG B, LUO J, et al. Research on the synergistic evolution of land use transformation and ecosystem service value in the Anning River Basin[J/OL]. *Scientific Reports*, 2025, 15 [2026-03-11]. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12657-5>.
- [11] COSTANZA R, FARBER S. Introduction to the special issue on the dynamics and value of ecosystem services: integrating economic and ecological perspectives [J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 367-373.
- [12] SERNA-CHAVEZ H M, SCHULP C J E, VAN BODEGOM P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [13] 汪勇政, 余浩然, 陆林. 基于空间约束K-means模型的长三角地区生态系统服务时空格局及功能分区研究[J]. *生态学报*, 2024, 44(16): 7087-7104.
WANG Y Z, YU H R, LU L. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the Yangtze River delta region based on spatially constrained K-means [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 7087-7104. (Ch).
- [14] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 789-797.
FU B, XU P, WANG Y K, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 789-797. (Ch).
- [15] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 15-19.
YU X X, ZHAO Y T, ZHANG Z Q, et al. Characteristics of soil water infiltration in sub-alpine dark coniferous ecosystem of upper reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 15-19. (Ch).
- [16] 张文旭, 王根绪, 胡兆永. 三种蒸散发测算方法的比较——以青藏高原原火山地区为例[J]. *冰川冻土*, 2023, 45(1): 130-139.
ZHANG W X, WANG G X, HU Z Y. Comparison of three evapotranspiration calculation methods: a case study of Fenghuoshan area in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(1): 130-139. (Ch).
- [17] 朱虹, 唐婷婷, 蔡艳蓉. 土壤侵蚀预报模型中的水土保持措施因子研究进展[J]. *科技展望*, 2015, 25(21): 222; 224.
ZHU H, TANG T T, CAI Y R. Research progress on factors of soil and water conservation measures in soil erosion prediction model [J]. *Science and Technology*, 2015, 25(21): 222; 224. (Ch).
- [18] 杨子生, 梁洛辉. 云南金沙江流域水土保持型可持续土地利用规划研究[J]. *山地学报*, 2002, 20(S1): 18-30.
YANG Z S, LIANG L H. Study on sustainable land use planning with soil and water conservation in Jinsha River Basin of Yunnan Province [J]. *Mountain Research*, 2002, 20(S1): 18-30. (Ch).
- [19] 梁二, 蔡典雄, 张丁辰, 等. 中国陆地土壤有机碳储量估算及其不确定性分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(6): 75-79.
LIANG E, CAI D X, ZHANG D C, et al. Terrestrial soil organic carbon storage in China: estimates and uncertainty [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2010(6): 75-79. (Ch).
- [20] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 533-544. (Ch).
- [21] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 933-942.
TIAN Y Q, OUYANG H, XU X L, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and density on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 933-942. (Ch).
- [22] 柳领君, 张宏, 罗岚. 青藏高原东缘高寒地区土壤水分的空间异质性[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2008, 54(4): 414-420.
LIU L J, ZHANG H, LUO L. Spatial heterogeneity of soil water of alpine area in eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2008, 54(4): 414-420. (Ch).
- [23] 郭佳晖, 刘晓煌, 李洪宇, 等. 2000—2030年云贵高原碳储量和生境质量时空格局演变[J]. *地质通报*, 2024, 43(9): 1485-1497.
GUO J H, LIU X H, LI H Y, et al. Evolution of spatial and temporal patterns of carbon stocks and habitat quality on the Yunnan-Guizhou Plateau during 2000-2030 [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1485-1497. (Ch).
- [24] RIEDLER B, LANG S. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 128-141.
- [25] 孙定钊, 汪发勇, 张磊. 地形梯度驱动下贵州武陵山区 2000—2023 年土地利用变化及其生态环境效应[J/OL]. *环境科学*, 2025 [2026-03-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202507274>. (Ch).
SUN D Z, WANG F Y, ZHANG L. Land use change and its eco-environmental effects in Wuling Mountain area of Guizhou Province driven by topographic gradient from 2000 to 2023 [J/OL]. *Environmental Science*, 2025 [2026-03-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202507274>. (Ch).
- [26] HADDAD N M, BRUDVIG L A, CLOBERT J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems[J/OL]. *Science Advances*, 2015, 1(2) [2026-03-20]. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1500052>.
- [27] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.

- ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178. (Ch).
- [28] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究——以北京为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 553-562.
- CHEN Y, QIAO F, JIANG L. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: a case study in Beijing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2016, 52(3): 553-562. (Ch).

Study on land use change and its impact on ecosystem service value in the upper Jinsha River Valley

ZHANG Yi^{1,2,3}, ZHANG Jing ru^{1,2}, LIU Su^{3,4}, XIONG Xu^{3,4}, CUI Lei⁵, MEI Tao⁵

- (1. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
 2. Key Laboratory for Geographical Process Analysis and Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
 3. Research Center for Territorial Spatial Conservation, Utilization and Computational Governance, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;
 4. Wuhan Imagination Science and Technology Development Co. Ltd, Wuhan 430070, China;
 5. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Using the land use transfer matrix and the InVEST model, this study analyzed the characteristics of land use change in the upper Jinsha River valley from 1990 to 2023. Evaluating ecosystem service values (ESV) includes water yield, soil conservation, carbon storage, and habitat quality, and further explores the impacts of land use change on ESV. Results are shown as follows. 1) During the period of 1990-2023, the grassland was mainly converted to and from forest land and cropland, with both forest land and grassland showing a decreasing trend. Water bodies were mainly converted from grassland, forest land, and cropland, and partly transformed into tidal flats and shoals, resulting in decrease in area. 2) Forest land contributed the most to water yield, accounting for more than 33.08% of the total, showing a fluctuating pattern with three peaks and two troughs; shrubland ranked second with a contribution rate of 19.84% and relatively small fluctuations. Grassland accounted for the largest share of soil conservation, exceeding 42.20% of the total, followed by forest land at 27.38%. Soil conservation of various land use types exhibited a fluctuating trend with three peaks and three troughs, showing an overall decreasing tendency. Forest land had the largest carbon storage, accounting for 40.16%, followed by grassland at 27.46%, forming the most important regional carbon sink. Carbon sequestration capacity showed a rapid decline in the early stage followed by a slight increase. The mean habitat quality index remained above 0.83 with small fluctuations over time. 3) From 1990 to 2023, the spatial distribution of ecosystem service values showed significant heterogeneity. The direction of land use conversion determined the changes in spatial heterogeneity, while the overall spatial differentiation pattern of ecosystem service values remained relatively stable.

Key words: upper Jinsha River Valley; land use change; ecosystem service value