

# 2005—2018年澜沧江下游流域景观生态安全 时空变化及其驱动因素

和春兰<sup>1</sup>, 普军伟<sup>2</sup>, 沈金祥<sup>1</sup>

(1. 云南国土资源职业学院, 云南 昆明 652501; 2. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** [目的] 分析澜沧江下游流域景观生态安全时空变化规律和驱动机制, 为该流域及流经国家的人与自然协调可持续发展提供科学依据。[方法] 以2005, 2010, 2015和2018年4期遥感影像为数据源, 通过景观指数和GIS空间分析方法评价流域景观生态安全, 采用双变量空间自相关方法明确城市、道路、河流、高程、坡度、气温和降水等因素对景观生态安全的驱动作用。[结果] ①2005—2018年, 澜沧江下游流域的整体景观生态安全度呈先升后降的变化特征。其中, 北部和中西部景观生态安全较差, 东部、南部和东南部较好, 但也有恶化趋势; ②各景观类型中, 景观生态安全度从大到小为: 水域>林地>草地>耕地>建设用地>裸地。其中, 林地和草地的景观生态安全度存在波动, 耕地和水域的景观生态安全度一直上升, 而建设用地和裸地的景观生态安全度持续下降; ③距城市距离、距道路距离、气温和降水等社会和气象因素对景观生态安全时空变化的驱动作用最强, 距河流距离也对景观生态安全的时空变化有一定解释作用, 而高程和坡度等地形因素并非澜沧江下游流域景观生态安全时空变化的主要驱动因素。[结论] 应尽量降低由人类活动引起的生态环境负荷, 积极发挥气象因素对生态安全的正向效应, 促进澜沧江下游流域的人与自然协调可持续发展。

**关键词:** 景观生态安全; 时空变化; 驱动因素; 澜沧江下游流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2020)04-0219-09

**中图分类号:** P901, X82

**文献参数:** 和春兰, 普军伟, 沈金祥. 2005—2018年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 219-227. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.030; He Chunlan, Pu Junwei, Shen Jinxiang. Spatial-temporal changes and driving mechanisms of landscape ecological security in lower reaches of Lancang River during 2005—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 219-227.

## Spatial-temporal Changes and Driving Mechanisms of Landscape Ecological Security in Lower Reaches of Lancang River During 2005—2018

He Chunlan<sup>1</sup>, Pu Junwei<sup>2</sup>, Shen Jinxiang<sup>1</sup>

(1. Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming, Yunnan 652501,

China; 2. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial-temporal changes and the driving mechanisms of landscape ecological security (LES) in the lower reaches of the Lancang River were analyzed to provide scientific basis for the coordinate and sustainable development of human and nature in the basin and the downstream countries. [Methods] By using the remote sensing images of 2005, 2010, 2015, and 2018, this study assessed the LES of the lower reaches of Lancang River by landscape index and GIS technology. The bivariate spatial autocorrelation was used to simulate the driving mechanism of regional factors (including cities, roads, rivers, elevation, slope, temperature and precipitation) on spatial-temporal changes of LES. [Results] ① From 2005 to 2018, the LES increased firstly and then decreased in the lower reaches of Lancang River. The LES in the northern and mid-west regions was relatively poor, which in the eastern, southern, and southeastern regions was better

收稿日期: 2020-03-25

修回日期: 2020-05-24

资助项目: 云南省地矿局科技创新项目“基于CASA模型的澜沧江下游流域植被NPP时空变化研究”(2017JJ05); 云南省教育厅科学研究基金项目“基于高频次遥感的滇池草海片区凤眼莲时空演变与邻近水域叶绿素响应研究”(2019J0481)

第一作者: 和春兰(1987—), 女(白族), 云南省昆明市人, 硕士, 讲师, 主要从事土地评价与景观格局分析方面的工作。Email: hclan68128600@163.com.

but also showed a tendency of deterioration. ② The LES of various landscape types was as: waters > forestland > grassland > cultivated land > construction land > bare land. Among them, the LES of forestland and grassland fluctuated, the LES of the cultivated land and waters increased, while the LES of construction land and bare land decreased. ③ Social and meteorological factors, such as distance from cities, distance from roads, temperature and precipitation, showed the strongest influence on spatial-temporal changes of the LES. And the distance from rivers also explained the spatial-temporal change of the LES at certain extent. The topographical factors such as elevation and slope showed no influence on spatial-temporal changes of LES in the lower reaches of Lancang River. [Conclusion] In the future, the eco-environmental load caused by human activities should be reduced as much as possible, and the positive effects of meteorological factors on ecological security should be brought into full play, to promote the coordinate and sustainable development of human and nature in the lower reaches of Lancang River.

**Keywords:** landscape ecological security; spatial-temporal change; driving factors; the lower reaches of Lancang River

生态系统为人类的生存与发展提供了必不可少的物质资源,景观则是由不同生态系统组成的地表综合体。生态安全是生态系统健康和完整状况的表征<sup>[1]</sup>。近半个世纪以来,随着人口持续增长、城市快速扩张,人类活动已造成了全球与区域的植被减少、土地退化、气候变暖、生产力减弱、生物多样性下降等问题,严重威胁着生态系统的健康发展<sup>[2]</sup>,生态安全难以有效保障。景观生态安全,是指一定时空范围内,由不同景观类型空间镶嵌而成的地表综合体,在维持自身健康的前提下,提供生态服务功能的稳定性和可持续性<sup>[3]</sup>。景观生态安全是生态安全概念在尺度上的进一步细化,强调不同景观类型的空间镶嵌格局和邻接关系,是从景观质量、数量和空间角度对生态安全评价的综合。景观生态结构和功能的演变是影响生态安全的关键<sup>[4-5]</sup>,是生态学、地球科学及相关领域研究的基本前提。因此,在社会经济发展影响生态系统健康的背景下,景观生态安全时空变化研究为了解区域生态系统健康状态提供了重要的基础信息<sup>[6]</sup>,成为促进景观生态结构稳定与加强生态服务功能的直接有效途径<sup>[7]</sup>。目前景观生态安全已经受到学者们的重视,分别在城市群<sup>[8-9]</sup>、海岸带<sup>[10-11]</sup>、水系流域<sup>[12-13]</sup>、高原山区<sup>[14-15]</sup>及其他重要区域<sup>[16-17]</sup>开展了相关研究,奠定了较好的理论基础。在方法上,目前研究多采用各类景观指数评价区域的景观生态安全,其中以景观格局的干扰度和脆弱度分析为主<sup>[6,16]</sup>。这些研究强调了景观生态安全的稳定性,但往往忽视了景观所发挥的生态服务功能<sup>[18-19]</sup>。并且当前研究大多分析土地利用变化情况下景观生态安全的响应<sup>[20]</sup>,而忽视了其他因素对景观生态安全的影响状况,不能较好地识别区域景观生态安全变化的驱动机制。同时,流域是生态安全研究的一个重要尺

度,流域内景观生态安全具有明显的地域特征和空间外溢性<sup>[18]</sup>。尤其澜沧江作为国际河流,其生态安全对流经国家的生态系统管理、资源环境保护至关重要。澜沧江下游流域地处云贵高原西南部,生物多样性丰富,但高原山区生态环境脆弱,一旦遭到破坏就难以恢复。随着中国西部开发战略的实施,区域发展与环境保护的矛盾日益突出。目前各级政府部门已经认识到生态系统的重要性,提出“生态文明”理念并大力加强生态保护;同时云南省是中国构建西南生态安全屏障的重要省份,其中澜沧江下游流域又处于西南边境,更是这一屏障的先决战略地点<sup>[21]</sup>。但当前关于澜沧江流域景观生态安全的研究较少,以往研究的时间尺度仍停留在上个世纪,难以对今后的生态系统健康发展提供支持;并且流域尺度下景观生态安全的影响机制研究鲜有见到,难以支持河流流域生态系统和景观格局的科学管理。因此,本文进行澜沧江下游流域的景观生态安全时空变化及驱动因素分析,旨在有效解决这一问题,为该区及其他流经国家的人与自然协调可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

澜沧江下游流域位于中国西南地区(21°11'—26°47'N,99°42'—101°50'E),面积为73 221.30 km<sup>2</sup>,占澜沧江流域总面积的43.74%;涉及18个县市,占云南省国土总面积的18.77%(见图1)。区域为典型的高山峡谷到低山盆地过渡区,地势由北向南逐渐下降;受西风带环流控制,气候类型多样,大部分地区的年降雨量在1 000 mm以上,且季节分配不均,5—10月份雨量集中。同时,该区也是云南少数民族分布最有代表性的地区,有傣族、白族、彝族、哈尼族等18个少数民族沿河谷聚居,产业结构以农业为主,经济发展相对落后。

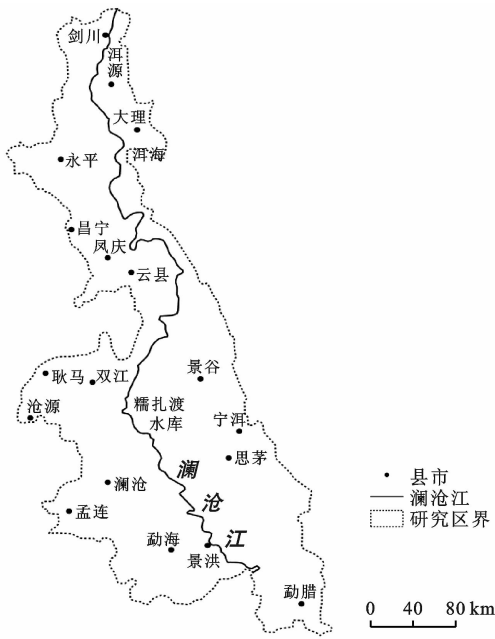


图 1 澜沧江下游流域位置

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源及处理

本研究共收集了澜沧江下游流域 2005, 2010, 2015 和 2018 年 4 期遥感影像(分辨率 30 m), 其中 2005 年, 2010 年采用 Landsat 5-TM 卫星影像, 2015 年, 2018 年采用 Landsat8-OLI 卫星影像, 数据均来源于中科院地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。为保障数据质量, 尽量下载使用云量在 5% 以内、拍摄时间在雨季(5—7 月)的影像, 并运用 ENVI5.1 软件对筛选好的影像进行多波段合成、大气校正、几何校正以及图像镶嵌、裁剪、增强等数据处理。根据土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017), 结合研究区特点与研究目的, 将研究区的景观划分为林地、草地、耕地、水域、建设用地和裸地 6 种类型。在实地考察的基础上, 参考 Google Earth 软件建立解译标志, 采用监督分类及人工目视解译相结合的方法分别对 4 期遥感影像进行解译。经野外实地验证、高空间分辨率 Google 影像以及局部高比例尺景观现状分类图检验, 采用误差矩阵法对分类结果进行精度评价, 4 期遥感影像的总体分类精度(overall accuracy)在 90% 以上, 结果可靠, 满足本研究的分析要求<sup>[22-23]</sup>。从政府部门收集了澜沧江下游流域的城市行政中心、主要道路和水系数据, 通过 ArcGIS 10.5 软件中欧氏距离分析工具计算得到研究区距城市距离、距道路距离、距河流距离空间数据; 区域数字高程模型 DEM(分辨率 30 m)数据由中科院地理空间数据云网站下载, 通过镶嵌、裁剪等处理后得到研

究区范围的高程数据, 并通过 ArcGIS 10.5 软件空间分析功能计算得到坡度数据; 基于全球气象数据网站(<https://en.tutiempo.net/climate>), 收集了流域及附近区域的 21 个气象站 2005, 2010, 2015 和 2018 年降水和气温数据, 通过 ArcGIS 10.5 软件的 Kriging 插值功能计算得到整个流域降水和气温的空间分布数据。所有数据处理后统一到 30 m×30 m 栅格尺度, 根据澜沧江下游流域 2005, 2010, 2015 和 2018 年景观分类数据, 研究运用 Fragstats 4.2 软件提取各景观类型的景观指数; 按照景观生态安全评价模型, 运用 ArcGIS 10.5 软件进行景观生态安全度的叠加计算分析; 由于整个流域数据量较大, 因此通过采样得到 3 000 m×3 000 m 网格的景观生态安全度和驱动因素空间数据, 并使用 GeoDa 1.14 软件计算双变量空间自相关的 Moran's  $I$  指数, 进行驱动因素分析。

### 2.2 景观生态安全评价模型构建

借鉴前人的研究成果<sup>[18-20]</sup>, 选用景观生态安全结构指数和功能指数构建景观生态安全度指标, 对景观生态安全进行综合性评价。

**2.2.1 景观生态安全结构指数** 景观生态安全结构指数通过景观干扰度与景观脆弱度来表示。景观干扰度指景观所受到自然和人类活动的影响程度, 与景观破碎度、分离度、优势度有关; 景观脆弱度指景观受外界干扰时的敏感程度, 值越大说明抗干扰能力越弱。景观生态安全结构指数公式为:

$$EI_i = 1 - 10 \times U_i \cdot V_i \quad (1)$$

$$V_i = aF_i \cdot bS_i \cdot cD_i \quad (2)$$

$$C_i = NP_i / CA_i \quad (3)$$

$$S_i = (0.5 \times \sqrt{NP_i / TA}) / (CA_i / TA) \quad (4)$$

$$D_i = (NP_i / TN + CA_i / TA + m_i / M) \quad (5)$$

式中:  $EI_i$  为第  $i$  类景观类型的结构安全指数;  $U_i$  为景观干扰度;  $V_i$  为景观脆弱度;  $F_i, S_i, D_i$  分别为第  $i$  类景观的破碎度、分离度、优势度(计算  $U_i$  时需要将这 3 个景观指数进行标准化), 其中  $D_i$  通过某景观类型在景观中出现的频率、密度、盖度表示;  $NP_i$  为第  $i$  类景观的斑块数;  $CA_i$  为第  $i$  类景观的面积;  $TN$  为斑块总数目;  $m_i$  为第  $i$  类景观类型在样本中出现的斑块数目;  $TA$  为景观总面积;  $M$  为样本景观斑块总数目;  $a, b, c$  为破碎度、分离度、优势度的权重, 根据前人研究<sup>[19,24]</sup>将其赋值为  $a=0.5; b=0.3; c=0.2$ ;  $V_i$  根据前人研究成果及澜沧江流域实际情况, 对各类景观类型的脆弱度指数进行赋值(表 1)。

**2.2.2 景观生态安全功能指数** 研究区 2005—2018 年来景观类型相互转变, 不但导致景观结构发

生变化,景观功能也相应变化。景观功能是指景观作为一个复杂的生态系统,其与周围环境、信息和能量之间存在相互作用,使得景观内部物质流、物种流和能量流发生各种复杂变化<sup>[25]</sup>。生态系统服务是对生态系统功能的定量表达<sup>[26]</sup>,指生态系统直接或间接为人类生存与发展提供服务的能力,因此将单位面积生态服务价值当量作为各景观类型的生态安全功能指数。参考前人研究结果<sup>[27-29]</sup>,结合区域实际情况,构建澜沧江下游各景观类型的生态安全功能指数(表 1)。

**2.2.3 景观生态安全度综合模型** 景观是一个具有特定结构与功能的整体系统<sup>[3]</sup>。将景观生态安全结构指数与景观生态安全功能指数的几何平均值作为景观类型生态安全值,再进行空间化得到每个栅格单元的景观生态安全度。计算公式为:

$$LES_i = \sqrt{SI_i \times EV_i} \quad (6)$$

$$LES_n = \sum_{i=1}^m \left( \frac{A_{mi}}{A_n} \times LES_i \right) \quad (7)$$

式中:  $LES_i$  为第  $i$  类景观的生态安全度;  $LES_n$  为第  $n$  栅格单元的景观生态安全度;  $A_{mi}$  为第  $i$  类景观在第  $n$  栅格单元内所占的面积;  $A_n$  为第  $n$  栅格单元的总面积;  $m$  为第  $n$  栅格单元中景观类型总数目。  $SI_i$  为景观生态安全结构指数;  $EV_i$  为景观生态安全功能指数。

### 2.3 时空变化驱动分析方法

景观生态安全具有一定的空间特征,因此采用双变量空间自相关分析刻画多个变量之间的相关特征,识别地形、气象等各因素对景观生态安全时空变化的驱动作用。计算公式为:

$$\text{Moran's } I_{zy}^a = \frac{X_y^a - \bar{X}_y}{\delta_y} \times \sum_{c=1}^n W_{ac} \times \frac{X_z^c - \bar{X}_z}{\delta_z} \quad (a \neq c) \quad (8)$$

式中: Moran's  $I$  为变量之间的空间相关性;  $X_y^a$  为空间单元  $a$  的变量  $y$  值;  $X_z^c$  为空间单元  $c$  的变量  $z$  值;  $y, z$  分别为变量  $y$  和  $z$  的平均值;  $\delta_y, \delta_z$  为变量  $y$  和  $z$  的方差;  $n$  为空间单元个数;  $W_{ac}$  为空间权重,采用 Queen 邻接标准定义;  $\delta_y, \delta_z$  变量  $y$  为选取的各影响因素;  $z$  为景观生态安全度。

## 3 结果与分析

### 3.1 景观生态安全时空变化特征

通过 ArcGIS 10.5 和 Fragstats 4.2 软件计算,得到 2005、2010、2015 和 2018 年澜沧江下游的景观生态安全指数及景观生态安全度(见表 1,图 2),进行

空间化后得到每个栅格单元的景观生态安全度(见图 3)。同时,为进一步表示研究区的景观生态安全时空变化特征,依据四期评价结果的自然断点分类值,整合分类后将景观生态安全度划为 5 个等级(见表 2)。在时序上,流域 4 个时期的整体生态安全度分别为 3.341、3.448、4.019 和 3.900,呈先增后减的变化趋势,但总体上有所提升(图 2)。其中,2005—2018 年期间,林地的生态安全度先减后增,草地的生态安全度先增后减,耕地和水域的生态安全度一直上升,而建设用地和裸地的生态安全度持续下降(表 1)。从景观类型上看,4 期生态安全度都呈现同样的比较关系:水域 > 林地 > 草地 > 耕地 > 建设用地 > 裸地,与各景观类型的生态安全功能指数大小排序相同。说明各景观类型间功能指数差距显著,是影响景观生态安全度的重要指数,景观类型的生态系统服务功能是决定区域景观生态安全的重要因素。相对而言,景观类型的功能指数没有考虑时间变化,因此需要从结构指数变化方面进一步分析研究区各景观类型的生态安全时间变化特征。澜沧江下游地区的景观生态安全结构指数在 4 个时期有所差别,2005 和 2010 年表现为:建设用地 > 林地 > 水域 > 草地 > 裸地 > 耕地,2015 年时表现为:林地 > 建设用地 > 水域 > 草地 > 耕地 > 裸地,2018 年变为:林地 > 水域 > 建设用地 > 草地 > 耕地 > 裸地(见表 1)。13 a 间,建设用地的结构指数逐年降低,主要由于澜沧江下游地区社会经济发展、人类活动增强,建设用地面积不断增加,使得景观破碎度和分离度显著上升,景观干扰度提高,导致建设用地景观生态安全的结构稳定性下降;林地的结构指数先减小,主要由于 2010 年前后云南省遭受连年旱灾,林地面积减少,景观分离度增加所导致,而旱灾过后,在生态保护等政策支持下,林地面积增加,景观破碎度和分离度明显降低,优势度整体增强,结构指数又不断增大;水域的结构指数一直较高,且不断增加,说明流域内澜沧江和洱海的水文调节使整体水域景观结构具有较强的稳定性,尤其 2014 年糯扎渡水电站建成蓄水后,研究区内水域面积明显增加,景观破碎度和分离度都明显降低,导致景观结构稳定性得到进一步增强;耕地的结构指数不断上升,说明随着基本农田政策出台,增强了耕地归并与整治的力度,其景观破碎度和分离度在 2010 年以后明显降低,结构稳定性增强;草地的结构指数先增后减,与草地景观类型面积波动性大,以及草地与林地、耕地间的相互转化有关;裸地的结构指数不断下降,主要由于其面积增加且景观分离度不断上升导致(见表 1)。

表 1 澜沧江下游 2005—2018 年景观生态安全指数

景观类型	年份	破碎度	分离度	优势度	干扰度	脆弱度	结构指数	功能指数	生态安全度
林 地	2005	0.065	0.169	0.709	0.094		0.911		4.262
	2010	0.146	0.265	0.759	0.116	0.095	0.890	19.95	4.213
	2015	0.003	0.010	0.840	0.086		0.919		4.281
	2018	0.004	0.011	0.811	0.083		0.921		4.287
草 地	2005	0.503	0.691	0.787	0.223		0.575		2.992
	2010	0.445	0.572	0.818	0.189	0.190	0.640	15.56	3.155
	2015	0.222	0.189	0.767	0.146		0.723		3.353
	2018	0.306	0.251	0.629	0.153		0.708		3.319
耕 地	2005	0.495	0.864	0.490	0.201		0.426		1.297
	2010	0.661	1.113	0.411	0.216	0.286	0.384	3.95	1.231
	2015	0.406	0.528	0.298	0.167		0.521		1.435
	2018	0.282	0.292	0.400	0.127		0.637		1.586
水 域	2005	0.442	0.990	0.004	0.148		0.789		5.177
	2010	0.490	1.087	0.003	0.145	0.143	0.793	33.97	5.190
	2015	0.168	0.630	0.042	0.087		0.875		5.453
	2018	0.109	0.485	0.029	0.059		0.916		5.577
建设用地	2005	0.290	0.973	0.010	0.115		0.945		0.615
	2010	0.320	1.052	0.009	0.115	0.048	0.945	0.40	0.615
	2015	0.357	1.859	0.019	0.212		0.899		0.600
	2018	0.603	1.053	0.126	0.225		0.893		0.598
裸 地	2005	0.556	1.879	0.000	0.219		0.478		0.309
	2010	0.931	1.113	0.000	0.220	0.238	0.477	0.20	0.309
	2015	0.794	1.503	0.033	0.302		0.280		0.237
	2018	0.729	2.849	0.006	0.353		0.160		0.179

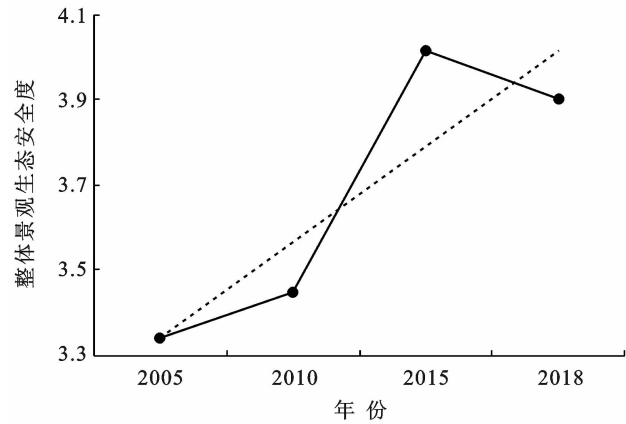


图 2 澜沧江下游 2005—2018 年整体景观生态安全度变化

在空间上,澜沧江下游地区的景观生态安全格局极不平衡,2005 和 2010 年,生态安全度较低的区域主要分布在北部和中西部。同时,除洱海附近由于建设用地较多、城镇化率较高而生态安全等级较低外,其余生态安全度较低的区域大多分布于澜沧江以西。景观生态安全度较高的区域则主要分布在东部、南部及东南部,以及洱海水域范围;2015 和 2018 年,澜沧江下游流域除东部与南部有部分区域生态安全降低外,景观生态安全的整体空间分布与前两个时期相比

并未发生明显变化。主要由于 13 a 来区域社会经济不断发展,景洪、思茅、勐海、勐腊、宁洱和景谷 6 个县市城镇化水平提高,其周边区域生态安全度降低,导致澜沧江下游的南部和东部有较低生态安全等级零星分布(见图 3)。

景观生态安全分级方面,2005—2018 年期间,较安全等级的面积都最大,占澜沧江下游地区总面积的 30% 以上;其次为高安全和中安全等级,占区域总面积的 18% 到 30% 之间;低安全等级面积较少,占区域总面积的 10% 左右;而不安全等级面积最低,仅占区域总面积的 3% 左右。由表 2 可以看出,澜沧江下游地区 13 a 间景观生态安全以较高安全等级为主,高安全、较安全和中安全等级占全区总面积的 85% 以上,生态安全状况相对良好,在人为干扰较少的情况下,能发挥重要的生态服务功能与作用;但由于社会发展、土地开垦、城市扩张等原因,仍有部分不安全和低安全等级分布。尤其原本生态安全状况最好的东部、南部和东南部区域存在恶化趋势,应当加以重视。整体上,澜沧江下游的景观生态安全呈现出较明显的时空变化特征。因此,要进一步了解澜沧江下游地区景观生态安全的时空变化规律,需要进行时空变化的驱动分析。

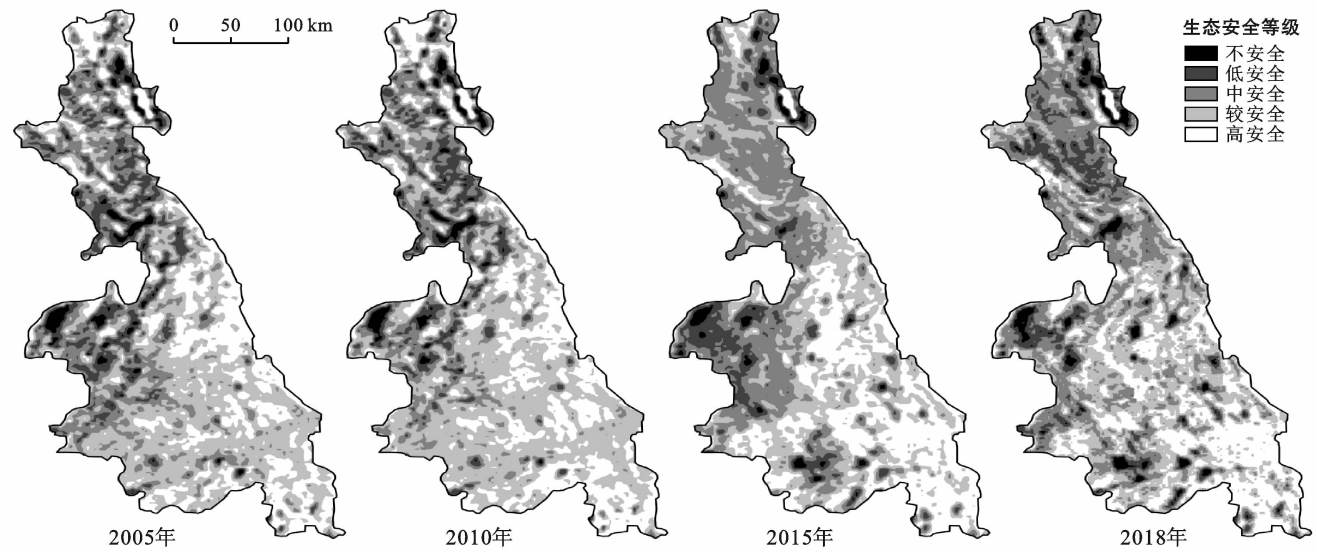


图 3 澜沧江下游 2005—2018 年景观生态安全等级分布

表 2 澜沧江下游景观生态安全分级面积比例					%	
景观生态安全度	<2.5 (不安全)	2.5~3.0 (低安全)	3.0~3.4 (中安全)	3.4~3.7 (较安全)	>3.7 (高安全)	
面积比例	2005 年	3.29	11.61	21.26	38.10	25.74
	2010 年	3.25	9.78	18.02	42.03	26.92
	2015 年	2.06	8.01	29.05	31.48	29.40
	2018 年	3.22	10.93	28.76	33.26	23.83

3.2 景观生态安全时空变化驱动分析

澜沧江下游流域属于高山峡谷到低山盆地过渡区,复杂的地形地貌、多变的气候条件、脆弱的生态环境、丰富的生态系统种类,导致区域内景观生态安全发生变化的原因复杂。

综合参考以往景观生态安全研究<sup>[30-31]</sup>,选取距城市距离、距道路距离、距河流距离、高程、坡度、气温和降水共 7 个因素(见图 4),分析研究区景观生态安全时空变化的驱动机理(见表 3)。其中,由于气温与降水 4 个时期空间分布规律相似,只采用 2018 年数据成图显示。2005—2018 年期间,澜沧江下游地区景观生态安全与各因素之间呈现一定的规律,与距城市距离、距道路距离、距河流距离、气温和降水呈正相关关系,而与高程和坡度呈负相关关系。说明距城市、道路和河流越远的地方,景观生态安全度越高;气温较高、降水丰富的区域景观生态安全也相对较好;而高程和坡度较大的地区则景观生态安全趋弱。其中,距城市距离、距道路距离、气温和降水的 Moran's I 指数最大,并呈显著相关,对景观生态安全度时空变化的驱动作用最强;距河流距离的 Moran's I 指数次之,部分年份呈显著相关,对景观生态安全的时空变化具有一定的解释作用;而高程和海拔的 Moran's I

指数最小,对景观生态安全的影响能力较弱,并非澜沧江下游地区景观生态安全时空变化的主要驱动因素。

从不同年份看,研究区景观生态安全与各因素之间的相关性有所差别。2005、2010、2015 和 2018 年 4 个时期中,距城市距离与景观生态安全度的 Moran's I 指数分别为 0.125、0.114、0.227 和 0.211,说明距城市距离对景观生态安全的驱动作用愈发明显,并且散点图中以第Ⅲ象限分布居多,处于“低—低”状态,大部分距离城市较近的区域景观生态安全度较低,人类活动使景观生态安全逐渐恶化;距道路距离与景观生态安全度的 Moran's I 指数分别为 0.119、0.122、0.176 和 0.218,散点图中同样以第Ⅲ象限分布居多,说明距道路距离对景观生态安全的驱动作用也是逐年增强,并且与距城市距离有相似的作用机制;距河流距离与景观生态安全度的 Moran's I 指数分别为 0.121、0.099、0.028 和 0.025,除 2005 年显著相关外,后 3 个时期对景观生态安全的影响作用并不明显,说明河流对景观生态安全的影响逐年减弱;气温与景观生态安全度的 Moran's I 指数分别为 0.099、0.148、0.127 和 0.164,除 2005 年外其他时期显著相关,说明气温对于景观生态安全的影响逐渐增加;降水与景观生态安全度的 Moran's I 指数分别为 0.173、0.131、0.168 和 0.222,均处于显著相关状态,说明降水对景观生态安全有较明显的影响作用,相对而言 2010 年云南省旱灾发生时对景观生态安全的驱动较弱,其他时期降水都能使生态安全向好发展;高程和坡度对景观生态安全的影响则不明显,4 个时期的驱动作用波动较小。

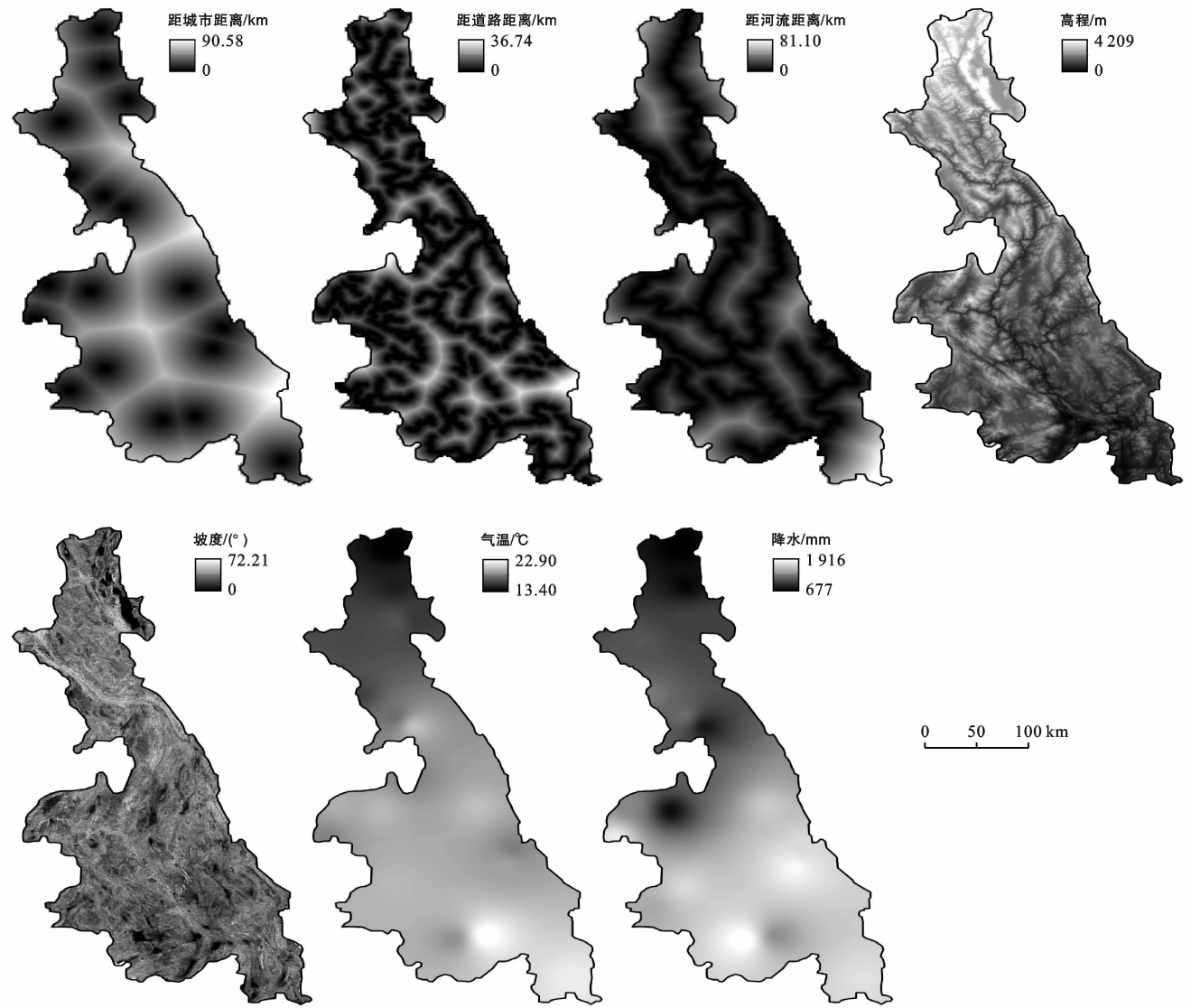


图 4 澜沧江下游景观生态安全驱动因素空间分布

表 3 景观生态安全与各因素的 Moran's I 指数				
驱动因素	2005LES	2010LES	2015LES	2018LES
距城市距离	0.125*	0.114*	0.227**	0.211**
距道路距离	0.119*	0.122*	0.176*	0.218**
距河流距离	0.121*	0.099	0.028	0.025
高 程	−0.003	−0.038	−0.082	−0.058
坡 度	−0.084	−0.093	−0.047	−0.048
气 温	0.099	0.148*	0.127*	0.164*
降 水	0.173*	0.131*	0.168*	0.222**

注: \*\* 和 \* 分别表示在 99% 和 95% 置信水平下显著相关。

4 讨论

澜沧江作为中国与东南亚共有的重要国际河流,其景观生态安全的重要性不言而喻。2005—2018 年期间,澜沧江下游流域的整体景观生态安全度呈先升后降的变化特征,总体上呈向好发展的趋势。王娟等研究 1985—2000 年澜沧江流域的景观生态安全变

化,认为景观生态安全指数呈下降趋势<sup>[21]</sup>。这与其研究结果综合可以得出,比起上个世纪,澜沧江下游流域的生态安全状况得到一定改善。这说明在生态文明建设过程中,加大生态保育力度、倡导生态文明行为,为景观生态安全的改善提供了良好的条件。同时,流域内景观生态安全空间分布具有一定的规律性,北部和中西部的景观生态安全状况明显比东部、南部和东南部差,但东部、南部和东南部也有恶化趋势,并且与区域内重要城市的发展区域吻合。从景观类型上看,林地和草地的景观生态安全度有所波动,耕地和水域的景观生态安全度上升,建设用地和裸地的景观生态安全度下降,与相关研究结果类似<sup>[6,32]</sup>。这说明人类活动过程中导致的景观类型变化对生态安全具有明显的扰动作用。澜沧江下游流域的景观生态安全主要受到距城市距离、距道路距离、距河流距离、气温和降水等因素的驱动,与其他河流流域的

研究结果相似<sup>[4,30]</sup>。尤其距城市距离、距道路距离、气温和降水因素对流域的景观生态安全影响最为显著。城市、道路的建设能直观表现人类活动的强弱程度,以及对生态环境的扰动作用<sup>[33-35]</sup>。距城市距离和距道路距离对景观生态安全驱动作用明显,是人类活动干扰生态环境的一个重要体现,其影响能力超过了所有的自然因素,能在短时间内直接作用于景观类型的覆被变化,最终导致景观生态安全不断恶化。因此在社会经济发展过程中,应加强规划与管理,减弱这种人为扰动的负面效应。同时,气温相对较高、降水相对充沛的南方地区植物生长条件较好,生态系统结构较为稳定,并且能向人类活动提供较强的生态服务,因此气象因素成为影响景观生态安全的重要自然驱动因素<sup>[30]</sup>。距河流距离的影响作用相对较弱,并且逐渐降低,主要由于交通尚未发展时,耕地、建设用地等对生态安全扰动较大的景观类型需要沿河发展,因而距离河流较近的区域生态安全度较低,但交通等基础设施发展后,河流的重要性逐渐减弱,对景观生态安全的影响作用也慢慢变小。高程、坡度等地形地貌因素对景观生态安全有负向驱动作用,但影响力极低。澜沧江下游流域是由高山峡谷到低山盆地的过渡区,地形地貌变化较大,南北呈现不同的特点,因而地形地貌方面的高程、坡度因子对景观生态安全影响较弱。总体上看,距城市距离、距道路距离、气温和降水等社会、气象因素对景观生态安全的作用最为明显,在生态开发与管理时应多加注意。同时,澜沧江筑有多级水电站,亦是人为工程干扰自然生态环境的一种方式,但由于缺乏基础数据,因而难以探讨水电站建设对景观生态安全的正向或负向驱动机制。今后在开展流域尺度景观生态安全时空变化驱动分析的研究时,应当加强对这一内容的深入探讨。

## 5 结论

(1) 2005—2018年期间,澜沧江下游流域整体景观生态安全度呈先增后减的变化特征,总体上有所提升。空间上呈现北部和中西部景观生态安全较差,而东部、南部和东南部较好的状况,同时由于城市不断建设发展,邻近景洪、思茅、勐海、勐腊、宁洱和景谷6个县市区域景观生态安全有所恶化。

(2) 各景观类型中,澜沧江下游流域的景观生态安全度从大到小依次为:水域>林地>草地>耕地>建设用地>裸地,景观生态安全功能具有主导作用。其中,13 a间林地的生态安全度先减后增,草地的生态安全度先增后减,耕地和水域的生态安全度一直上升,而建设用地和裸地的生态安全度持续下降,则与

景观生态安全的结构指数变化相关。

(3) 澜沧江下游流域景观生态安全的时空变化主要受距城市距离、距道路距离、距河流距离、气温和降水等因素的驱动,尤其社会因素和气象因素的影响作用最为显著。在进行资源环境开发、社会经济发展时,应尽量降低由人类活动引起的生态环境负荷,同时积极发挥气象因素对生态安全的正向效应,避免在生态文明建设过程中因决策失误而带来的重大生态、经济损失。

## [参 考 文 献]

- [1] Chen Xi, Xu Dawei, Fadelelseed S, et al. Spatiotemporal analysis and control of landscape eco-security at the urban fringe in shrinking resource cities: A case study in Daqing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(23):4640.
- [2] Li Sucui, Xiao Wu, Zhao Yanling, et al. Incorporating ecological risk index in the multi-process MCRE model to optimize the ecological security pattern in a semi-arid area with intensive coal mining: A case study in Northern China [J]. *Journal of cleaner production*, 2020,247: 119-143.
- [3] 傅伯杰. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] Ma Libang, Bo Jie, Li Xiaoyang, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: The middle and lower reaches of Shule River basin as an example [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,674:424-438.
- [5] Peng Jian, Pan Yajing, Liu Yanxu, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape [J]. *Habitat International*, 2018,71:110-124.
- [6] 梁二敏,张军民. 新疆玛纳斯河流域景观格局变化的生态安全分析[J]. *水土保持研究*, 2016,23(3):170-175.
- [7] Wang Shudong, Zhang Xiaoyuan, Wu Taixia, et al. The evolution of landscape ecological security in Beijing under the influence of different policies in recent decades [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 646: 49-57.
- [8] 王飞,叶长盛,华吉庆,等. 南昌市城镇空间扩展与景观生态风险的耦合关系[J]. *生态学报*, 2019,39(4):1248-1262.
- [9] 王媛,周长威. 黔中城市群景观生态安全格局构建[J]. *生态与农村环境学报*, 2019,35(9):1111-1117.
- [10] 方雪娟,任海波,毋瑾超,等. 海岸带景观生态格局研究进展及启示[J]. *科技创新与生产力*, 2019(11):33-37,40.
- [11] 黄宁,杨绵海,林志兰,等. 厦门市海岸带景观格局变化及其对生态安全的影响[J]. *生态学杂志*, 2012,31(12):



3193-3202.

[12] 王涛,肖彩霞,刘娇,等.杞麓湖流域景观时空格局演变及其对景观生态风险的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):219-225.

[13] 陈昆仑,齐漫,王旭,等.1995—2015 年武汉城市湖泊景观生态安全格局演化[J].生态学报,2019,39(5):1725-1734.

[14] 奚世军,安裕伦,李阳兵,等.基于景观格局的喀斯特山区流域生态风险评估:以贵州省乌江流域为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):712-721.

[15] 彭文君,舒英格.喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程[J].生态学报,2018,38(3):852-865.

[16] 何珍珍,王宏卫,杨胜天,等.渭干河—库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化[J].生态学报,2019,39(15):5473-5482.

[17] 欧朝蓉,朱清科,孙永玉.元谋干热河谷景观生态安全时空变化[J].中国水土保持科学,2018,16(1):131-140.

[18] 曹秉帅,邹长新,高吉喜,等.生态安全评价方法及其应用[J].生态与农村环境学报,2019,35(8):953-963.

[19] 赵筱青,王兴友,谢鹏飞,等.基于结构与功能安全性的景观生态安全时空变化:以人工园林大面积种植区西盟县为例[J].地理研究,2015,34(8):1581-1591.

[20] 谢花林.基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析:以江西兴国县为例[J].中国环境科学,2011,31(4):688-695.

[21] 王娟,崔保山,姚华荣,等.纵向岭谷区澜沧江流域景观生态安全时空分异特征[J].生态学报,2008,28(4):1681-1690.

[22] 张猛,曾永年.长株潭城市群湿地景观时空动态变化及驱动力分析[J].农业工程学报,2018,34(1):241-249.

[23] 刘吉平,董春月,盛连喜,等.1955—2010 年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应[J].地理科学,2016,36(6):879-887.

[24] 时卉,杨兆萍,韩芳,等.新疆天池景区生态安全度时空分异特征与驱动机制[J].地理科学进展,2013,32(3):475-485.

[25] 彭建,王仰麟,景娟,等.城市景观功能的区域协调规划:以深圳市为例[J].生态学报,2005,25(7):1714-1719.

[26] 刘月亮,成方龙,黄勋,等.1995—2015 年广州市景观生态安全时空演变研究[J].生态经济,2019,35(7):221-229.

[27] 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.

[28] 顾泽贤,赵筱青,高翔宇,等.澜沧县景观格局变化及其生态系统服务价值评价[J].生态科学,2016,35(5):143-153.

[29] 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.

[30] 谈娟娟,董增川,方庆,等.滦河流域景观生态健康演变及驱动力分析[J].中国农村水利水电,2015(9):47-51.

[31] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J].地理科学,2015,35(6):790-797.

[32] 刘世梁,安南南,侯笑云,等.澜沧江下游景观破碎化时空动态及成因分析[J].生态环境学报,2018,27(7):1351-1358.

[33] 姚小微,曾杰,李旺君.武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J].农业工程学报,2015,31(9):249-256.

[34] 杨晴青,刘倩,尹莎,等.秦巴山区乡村交通环境脆弱性及影响因素:以陕西省洛南县为例[J].地理学报,2019,74(6):1236-1251.

[35] 赵筱青,普军伟,饶辉,等.云南喀斯特山区城乡建设用地开发适宜性及分区[J].水土保持研究,2020,27(1):240-248.

(上接第 210 页)

[17] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168:94-116.

[18] 邓瑞民.建设用地扩展模式空间差异与驱动机制的多尺度研究[D].广东 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2018.

[19] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.

[20] 李国珍.基于 FLUS 模型的深圳市土地利用变化与模拟研究[D].湖北 武汉:武汉大学,2018.

[21] 李义龙.生态—经济协调发展视角下的重庆市渝北区土地利用变化及模拟研究[D].重庆:西南大学,2019.

[22] 许凤娇,吕晓.基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险格局[J].生态学报,2018,38(20):7312-7325.

[23] 肖琳,田光进.天津市土地利用生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(2):469-476.

[24] 李月月,黄义雄,杨阳,等.基于景观结构的福建省沿海生态风险时空特征[J].水土保持通报,2018,38(4):241-246.