

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.032; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.032.

周建伟, 吴华, 许童, 等. 西藏雅砻河流域生态系统服务价值地形梯度分异及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 396-406.

Zhou Jianwei, Wu Hua, Xu Tong, et al. Terrain gradient differentiation and driving factors of ecosystem service value of the Yalong River Basin in Tibet[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 396-406.

## 西藏雅砻河流域生态系统服务价值 地形梯度分异及驱动因素

周建伟<sup>1,2</sup>, 吴华<sup>1,2,3</sup>, 许童<sup>2,3</sup>, 陈琳娜<sup>2,3</sup>, 孔玉忠<sup>2,3</sup>, 赵鑫永<sup>2,3</sup>,  
郭齐韵<sup>2,3</sup>, 李佳潼<sup>2,3</sup>, 张泽林<sup>2,3</sup>, 朱康成<sup>2,3</sup>, 张晨光<sup>2,3</sup>

(1. 西藏大学 生态环境学院, 拉萨 850000; 2. 西藏大学 高原地表环境遥感监测联合实验室,  
拉萨 850000; 3. 西藏大学 工学院, 拉萨 850000)

**摘要:** [目的] 分析雅砻河流域生态系统服务价值的变化, 为流域生态文明建设提供科学依据。[方法] 基于高精度土地利用数据, 运用地形梯度分级、标准差椭圆和地理探测器, 探究了近 20 年流域生态系统服务价值 (Ecosystem service value, ESV) 的时空演变和地形梯度分异特征。[结果] (1) 草地是流域主要的土地利用类型, 占比达 92.45%。研究期内林地、灌木和草地面积有所减少, 其他类型有所增加; (2) 流域 ESV 在研究期间增长了 0.13% (0.16 亿元), ESV 在空间上呈现出东南部高西北部低的特征。随着海拔、坡度和地形起伏度的抬升, ESV 呈先增后降的分布规律, 坡向梯度呈阴坡高于阳坡的特征。 (3) 流域 ESV 的标准差椭圆和重心在研究期内逐渐向西南方向移动, 并趋于聚集。ESV 的空间分异主要受自然和经济因子的影响, 其中年均地温是主导因子 ( $q=0.24$ ), 任意因子交互均增强了其分异性。[结论] 依据雅砻河流域 ESV 的时空和地形分布特征, 采取因地制宜的生态保护措施, 促进流域生态环境的可持续发展。

**关键词:** 生态系统服务价值; 地形梯度; 空间分异; 驱动因素; 雅砻河流域

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0396-11

## Terrain gradient differentiation and driving factors of ecosystem service value of the Yalong River Basin in Tibet

Zhou Jianwei<sup>1,2</sup>, Wu Hua<sup>1,2,3</sup>, Xu Tong<sup>2,3</sup>, Chen Linna<sup>2,3</sup>, Kong Yuzhong<sup>2,3</sup>, Zhao Xinyong<sup>2,3</sup>,  
Guo Qiyun<sup>2,3</sup>, Li Jiatong<sup>2,3</sup>, Zhang Zelin<sup>2,3</sup>, Zhu Kangcheng<sup>2,3</sup>, Zhang Chenguang<sup>2,3</sup>

(1. School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, China;

2. Joint Laboratory of Plateau Surface Remote Sensing, Tibet University, Lhasa 850000, China;

3. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to analyze the spatiotemporal changes of ecosystem service value (ESV) in the Yalong River Basin, and to provide scientific underpinnings for the ecological civilization development of the watershed. [Methods] High-resolution land use data, terrain gradient stratification, standard deviational ellipse and Geodetector were utilized to study the changes and terrain gradient differentiation in ESV over the past two decades. [Results] (1) Grassland was the predominant land use type, accounting for 92.45% of the area. During the study period, there was the decrease in the extent of forestland, shrub, and grassland, while other land types expanded. (2) The ESV of the basin increased by

收稿日期: 2024-05-27

修回日期: 2024-06-18

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 西藏大学人才创新团队与实验室平台建设项目 (2022ZDTD10); 中央引导地方项目 (XZ202401YD0028); 中国科学院“西部之光”访问学者项目; 中央支持地方部区合建项目 (藏财预指【2023】1 号)

第一作者: 周建伟 (1995—), 男 (藏族), 四川凉山州人, 在读博士研究生, 研究方向为高原生态学。E-mail: gesang3650@163.com

通信作者: 吴华 (1978—), 男, 山东临清人, 博士, 正高级工程师, 从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: xzwhua@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

0.13% (16 million yuan), with spatial distribution characterized by higher values in the southeast and lower values in the northwest. ESV exhibited an initial increase followed by a decrease in relation to elevation, slope, and relief degree of land surface, with higher values on shady slopes compared to sunny slopes. (3) The spatial distribution and centroid of the ESV shifted southwestward and became more concentrated over time. Spatial differentiation of ESV was influenced by both natural and economic factors, with mean annual ground temperature being the dominant factor ( $q=0.24$ ), and interactions between any two factors enhanced this differentiation. [Conclusion] To promote the sustainable development of the ecological environment in Yalong River Basin, it is essential to adopt the measures tailored to local conditions based on the spatiotemporal and topographical distribution characteristics of ESV within the basin.

**Keywords:** ecosystem service value; terrain gradient; spatial differentiation; driving factors; Yalong River Basin

生态系统服务价值(Ecosystem service value, ESV)的评估是生态学、环境科学以及资源管理领域的一个关键研究方向<sup>[1-2]</sup>,旨在量化自然生态系统对人类福祉的贡献<sup>[3]</sup>。随着全球环境变化和人类活动的加剧,对ESV的准确评估变得尤为重要,其合理评估促进生态保护、资源合理利用和可持续发展策略的制定<sup>[4]</sup>。目前,ESV的评估方法主要包括经济估价法、物理量估价法、生态模型法和综合评估法等<sup>[5]</sup>。ESV对维持地区乃至全球的环境稳定和人类福祉至关重要<sup>[6]</sup>。地形梯度作为影响ESV分布的关键自然因素之一<sup>[7]</sup>,通过影响气候条件、土壤类型、水文条件等生态因子,间接地影响生物多样性和生态系统的生产力。近年来,随着RS和GIS的发展,ESV的评估研究呈现出新的视角和趋势<sup>[8]</sup>。例如,不少学者利用遥感数据进行大尺度、高时空分辨率的生态系统服务动态监测,结合GIS技术对不同地理区域的ESV进行精准评估和空间化表达<sup>[9-10]</sup>。同时,ESV与生态系统健康、生物多样性保护等领域的交叉研究也日益增多<sup>[11]</sup>,为生态系统管理和保护提供了新的理论和方法。此外,亦有不少学者通过PLUS和CA-Markov等模型进行ESV预测<sup>[4,12]</sup>,为未来ESV研究打开了新思路。

尽管ESV的评估方法和研究视角不断深化和扩展,但仍存在一些研究不足和挑战<sup>[10]</sup>。首先,不同评估方法间的可比性和一致性问题尚未完全解决,不同研究结果的综合和比较存在困难<sup>[5]</sup>。其次,生态系统服务的间接价值和非使用价值评估方法仍不成熟,这限制了对生态系统服务价值的全面认识<sup>[13]</sup>。再次,人类社会经济活动与生态系统服务之间的相互作用机制和长期影响尚需进一步研究<sup>[7]</sup>,以更好地指导生态系统管理和政策制定。最后,面对全球变化背景下的生态系统服务评估,如何将气候变化、生物入侵等因素纳入评估框架<sup>[14]</sup>,仍是未来研究需要解决的重要问题。藏族文化发祥地(雅砻河流域)以其复杂多变的地形特征著称,从雄伟的高山到平坦的河谷平

原,再到广阔的高原草甸,形成了独特的生态梯度和生物多样性<sup>[15]</sup>。因此,理解这些地形梯度对ESV空间分布的影响,对于评估和保护该地区的自然资源具有重要意义<sup>[7]</sup>。除自然因素外,人类活动也是影响ESV空间分异的重要因素<sup>[2,10]</sup>,雅砻河流域的居民以其生活方式和经济活动(如畜牧业、农业、旅游业等)直接或间接地影响着生态系统的结构和功能。21世纪以来,随着流域社会经济的快速发展和人口激增的影响,剧烈人类活动对ESV的影响愈发显著<sup>[16]</sup>,探讨其作用机制对于流域制定科学的资源管理和环境保护政策具有重要价值。与此同时,雅砻河流域的ESV时空演变及其地形梯度分布特征,迄今为止在学术界尚未得到充分研究。

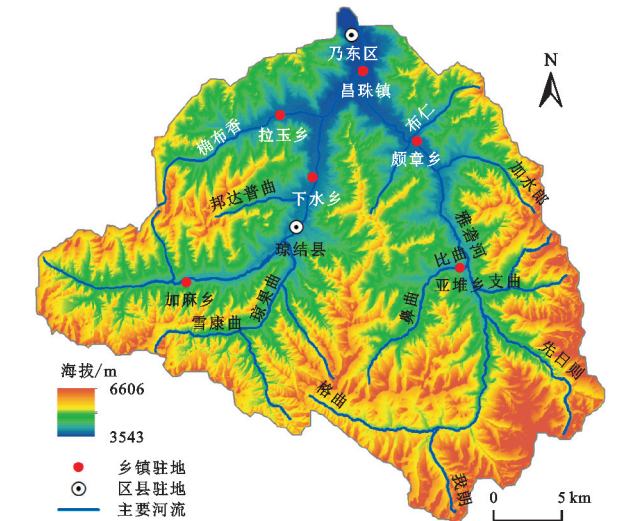
综上所述,本文利用长时间序列高精度土地利用数据,通过地形梯度分级、ESV评估模型、标准差椭圆和地理探测器等方法,分析雅砻河流域ESV的时空演变和地形梯度分布特征、空间分异驱动因素。旨在填补雅砻河流域ESV研究的不足,以期为该流域及类似地区的生态保护和可持续发展提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

雅砻河藏语意为“从上游下来的大河”,为雅鲁藏布江右岸的一级支流,源于西藏自治区山南市措美县北部喜马拉雅山北麓的雅拉香波山<sup>[17]</sup>,长约80 km,流域面积约2 261.15 km<sup>2</sup>,于乃东区泽当镇北部注入雅鲁藏布江(图1)。雅砻河流域地势南高北低,海拔3 543~6 606 m,地貌以高原河谷地貌为主。流域属高原温带半干旱气候区,年均降水量约393.6 mm(降水量具有明显季节分异,集中于6—9月份),年均温约为8.8℃<sup>[15,18]</sup>。雅隆河上游高山区具有大面积冰川资源,丰富的淡水资源为下游河谷的农田提供了灌溉水源<sup>[18]</sup>。发达的农业生产使该地区成为藏族文化的最早发祥地,流域内有西藏建造最早的宫殿雍布拉康、西藏重要寺庙昌

珠寺和西藏规模最大的古墓群藏王墓,还有古老的村寨田园、淳朴的民风民俗。21 世纪以来,随着人口急速增长和经济快速发展(流域人口由 2000 年的 5.36 万人增至 2020 年的 9.68 万人,流域 GDP 则由 4.35 亿元增至 68.48 亿元),流域土地利用变化显著,区域生态可持续发展面临诸多威胁。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为 GS(2020)4630 号,底图无修改,下同。

图 1 雅砻河流域地理位置  
Fig. 1 Geographic location of the Yalong River Basin

### 1.2 数据来源

数据来源如下:(1) 30 m 空间分辨率土地利用数据集(2000—2020 年)来源于中国科学院空天信息创新研究院基于 Landsat 卫星数据(Landsat TM,ETM+和 OLD)生产的全球精细地表覆盖动态监测产品(<https://data.casearth.cn/>),总体精度为 82.50%,Kappa 系数达 0.78<sup>[19]</sup>,满足研究需求。(2) DEM 源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m,并由此处理得到坡度、坡向和地形起伏度。(3) 年均

风速、年日照数、年均相对湿度、年均地温、年蒸发量、年均降水、年均气温、NDVI、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温、地均 GDP 和人口密度数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率均为 1 km。(4) 公路、居民点、河流数据来自国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn/>)发布的 1:100 万基础地理信息数据。(5) 粮食产量、粮食播种面积数据来源于山南市统计局(<http://tjj.shannan.gov.cn/>),粮食平均收购价格源自西藏自治区粮食和物资储备局(<https://xz.lswz.gov.cn/>)。

### 1.3 研究方法

1.3.1 ESV 核算模型 以 Costanza 等<sup>[3]</sup>关于 ESV 的估算方法和谢高地等制定的中国 ESV 当量表为基础,依据 2020 年山南市粮食平均产量为 6 592.53 kg/hm<sup>2</sup>和西藏自治区 2020 年粮食平均收购价格 4.93 元/kg,遵循“单位面积 ESV 等于平均粮食单产市场经济价值价值的 1/7”理论<sup>[20-21]</sup>,由此计算得到流域 ESV 当量为 4 643.03 元/hm<sup>2</sup>,根据修正后的价值当量和各土地利用类型面积计算得到流域 ESV,计算公式如下:

$$ESV = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (A_k V_{ki}) \quad (1)$$

式中:ESV 表示生态系统服务价值(元); $m$  为土地利用类型的数量; $n$  为生态系统服务功能类型数; $A_k$  表示第  $k$  种土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>); $V_{ki}$  表示第  $k$  种土地利用类型下第  $i$  类生态系统功能的价值系数。

1.3.2 地形梯度分级 选取海拔、坡度、坡向和地形起伏度 4 个地形要素来分析雅砻河流域土地利用和 ESV 的地形梯度分布。其中海拔、坡度和地形起伏度通过自然断点法<sup>[22]</sup>进行分级(表 1),坡向依据前人研究成果<sup>[23]</sup>进行分级,地形起伏度由为研究区内最高点和最低点的高程差<sup>[24]</sup>(雅砻河流域海拔介于 3 543~6 606 m)。

表 1 雅砻河流域地形因子梯度分级标准及其面积占比

Table 1 Gradient classification criteria of terrain factors and its area proportion (%) in the study area				
分级	海拔/m/占比	坡度/(°)/占比	坡向/占比	地形起伏度/m/占比
I	[3543,3842]/8.47	[0,7.39]/9.22	平面/0.04	[0,208]/2.47
II	(3842,4098]/10.75	(7.39,13.90]/9.92	北/13.04	(208,340]/8.10
III	(4098,4327]/12.93	(13.90,19.52]/13.67	东北/13.24	(340,432]/14.88
IV	(4327,4542]/14.12	(19.52,24.54]/16.10	东/12.96	(432,512]/18.79
V	(4542,4748]/15.18	(24.54,29.27]/16.49	东南/11.15	(512,588]/20.54
VI	(4748,4956]/14.79	(29.27,34.01]/15.02	南/9.97	(588,666]/17.43
VII	(4956,5177]/13.11	(34.01,39.33]/11.32	西南/12.69	(666,759]/11.86
VIII	(5177,5494]/8.77	(39.33,46.72]/6.37	西/13.84	(759,912]/4.80
IX	(5494,6606]/1.88	(46.72,75.40]/1.88	西北/13.08	(912,1287]/1.12

1.3.3 标准差椭圆理论 标准差椭圆方法主要通过描述重心、方位角、长轴、短轴等基本参数反映研究对

象空间分布特征与时空演变过程的空间计量分析方法<sup>[25]</sup>,本文采用该方法分析 ESV 的时空分布和演变



特征。涉及的主要参数的计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$\tan \alpha = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{y}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{y}_i^2)^2 + 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i} \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \cos \alpha - w_i \bar{y}_i \sin \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \sin \alpha - w_i \bar{y}_i \cos \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (4)$$

$$S = \pi \sigma_x \sigma_y \quad (5)$$

式中:  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  为重心坐标;  $w_i$  为权重;  $\alpha$  为标准差椭圆方位角( $^\circ$ );  $\bar{x}_i$  和  $\bar{y}_i$  分别为各研究对象区位到平均中心的坐标偏差;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别为沿 x 轴和 y 轴的标准差;  $S$  为椭圆面积( $\text{km}^2$ )。

1.3.4 ESV 空间分异模型 地理探测器可通过分析各驱动因子层内方差和总方差的关系,分析要素的空间分异<sup>[26]</sup>。因此借助它表现出的空间分层异质性来

探索流域 ESV 的空间分异特征,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L ((N_h \sigma_h^2) / (N \sigma^2))}{L} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (6)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad \text{SST} = N \sigma^2 \quad (7)$$

式中:  $q$  表示某驱动因子对要素空间分异的影响力;  $L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层,即分类或分区;  $N_h$  和  $N$  分别为评价单元  $h$  和全区单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为评价网格和研究区要素的方差;  $\text{SSW}$  和  $\text{SST}$  分别代表评价单元内的总方差和全区总方差。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化

2000—2020 年雅砻河流域土地利用以草地为主(图 2),其面积约占流域总面积的 92.45%;其次为未利用地和林地,二者分别约占 5.76%和 1.03%;耕地和水域的面积分别约占 0.29%和 0.26%;建设用地和灌木较少,二者的面积占比分别约为 0.17%和 0.04%。耕地和建设用地高度集中于流域下游河谷(图 2),林地和灌木集中在流域东部边缘和西部边缘的山地,草地分布于流域大部分地区,水域主要集中在河流支干流和南部山区的湖泊带,未利用地分布在流域中下游河谷和东南部山地。

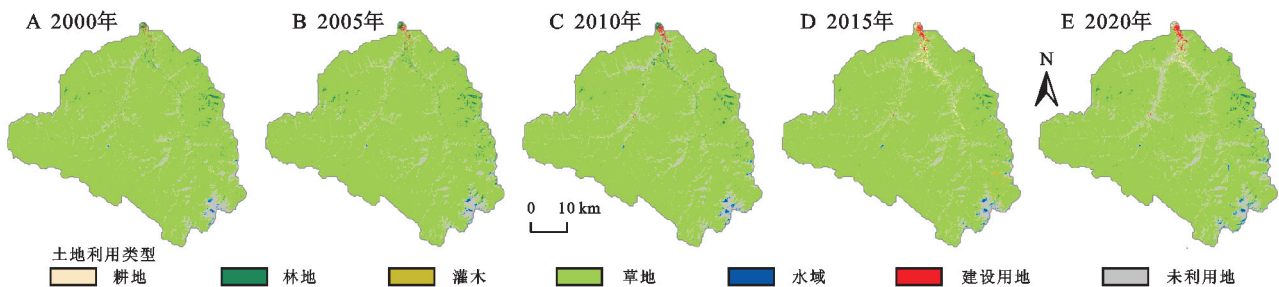


图2 雅砻河流域土地利用空间分布和变化

Fig. 2 Spatial distribution and changes in land use in the Yalong River Basin

2000—2020 年流域土地利用呈现林地、灌木和草地缩减,其余地类扩张的变化趋势(图 3)。其中草地和林地分别减少 3.08% ( $65.05 \text{ km}^2$ ) 和 2.64% ( $0.66 \text{ km}^2$ ),未利用地、耕地、水域和建设用地则分别扩张 41.62% ( $48.75 \text{ km}^2$ ), 213.16% ( $6.57 \text{ km}^2$ ), 177.82% ( $6.12 \text{ km}^2$ ) 和 308.93% ( $4.30 \text{ km}^2$ ),灌木面积变化不明显。可见城镇化带来的经济和人口激增以及全球气候变暖等因素影响下,流域土地利用变化剧烈。

### 2.2 生态系统服务价值变化

2000—2020 年雅砻河流域 ESV 呈上升—下降—上升的变化趋势,总体由 2000 年的 123.45 亿元增至 2020 年的 123.61 亿元,最大值为 2005 年的 124.53 亿元。草地是流域 ESV 贡献率最大的地类,其贡献率高达

94.65%(图 4A);其次为水域和林地,二者的贡献率分别为 2.73%和 2.08%;其余地类的 ESV 贡献率较小,均在 0.50%以下。2000—2020 年各地类的 ESV 变化趋势与其面积变化一致,其中水域、未利用地和耕地的 ESV 分别增长 3.57 亿元、0.17 亿元和 0.12 亿元,草地和林地的 ESV 分别减少 3.64 亿元和 0.07 亿元,其余地类的 ESV 变化不显著。在生态系统服务功能方面(图 4B),气候调节和水文调节的 ESV 贡献率最为突出,二者的贡献率分别高达 25.78%和 21.07%;其次为土壤保持、生物多样性、气体调节和净化环境,四者的贡献率分别为 11.88%, 10.88%, 9.75%和 8.62%;其余生态系统服务功能的 ESV 贡献率较低,皆在 5.00%以下。2000—2020 年除水文调节和水资源供给的 ESV 分别增长 8.79% (2.21 亿元)和

8.91%(0.18 亿元)外,其余功能的 ESV 均呈减少趋势,其中气候调节、土壤保持、气体调节和生物多样性的 ESV 分别减少 2.96%(0.89 亿元),2.46%(0.36 亿元),2.62%(0.32 亿元)和 2.23%(0.30 亿元)。

为进一步分析 2000—2020 年流域 ESV 的空间分布及其变化特征,以  $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$  的评价单元计算单位面积 ESV(万元/hm<sup>2</sup>),并以自然断点法划分为极低价值[0.86, 4.75)、低价值[4.75, 6.17)、中等价值[6.17, 8.86)、高价值[8.86, 13.38)和极高价值[13.38, 22.52]5 个等级(图 5)。在空间分布上,研究区 ESV 具有显著的空间分异性:极低价值区集中在流域上游山地和中下游河谷的未利用地、耕地和建设用地集中区域;低价值区为流域西部和南部等地区的草地集中带;中等价值区为流域东部边缘和东南

部的水域和草地等地类的过渡带;极高价值和高价值区集中在流域东部边缘和东南部林地和水域密集的地区。

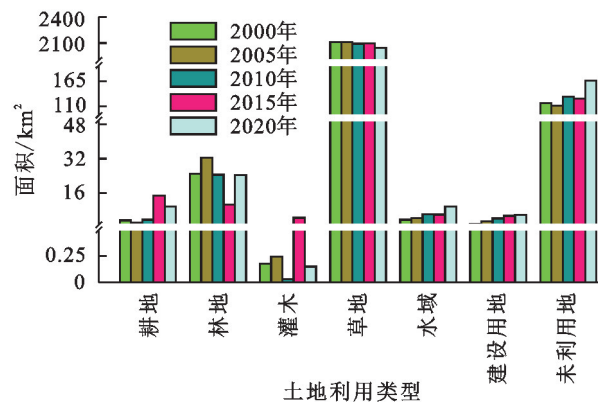


图 3 雅砻河流域土地利用面积变化

Fig. 3 Changes in land use area in the Yalong River Basin

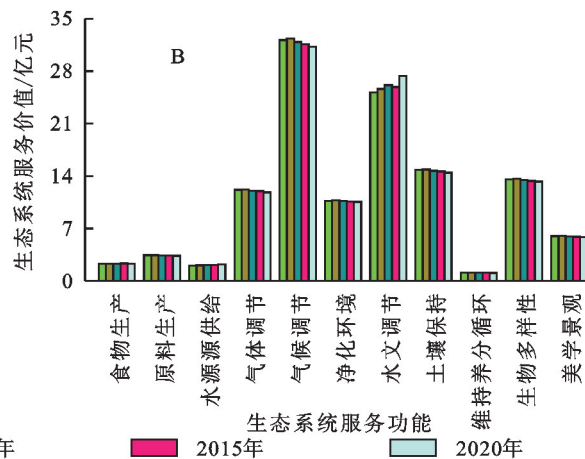
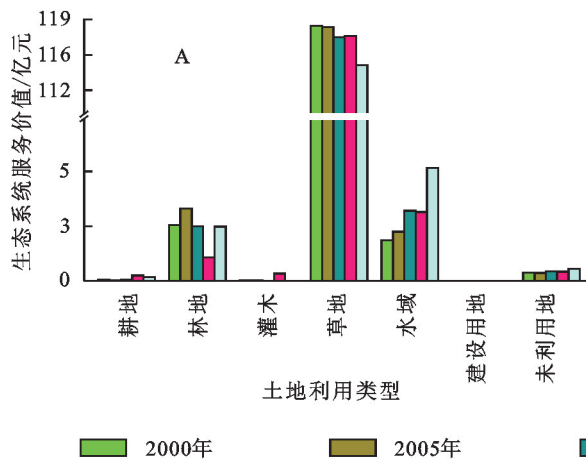


图 4 雅砻河流域 ESV 变化

Fig. 4 Changes in ESV of the Yalong River Basin

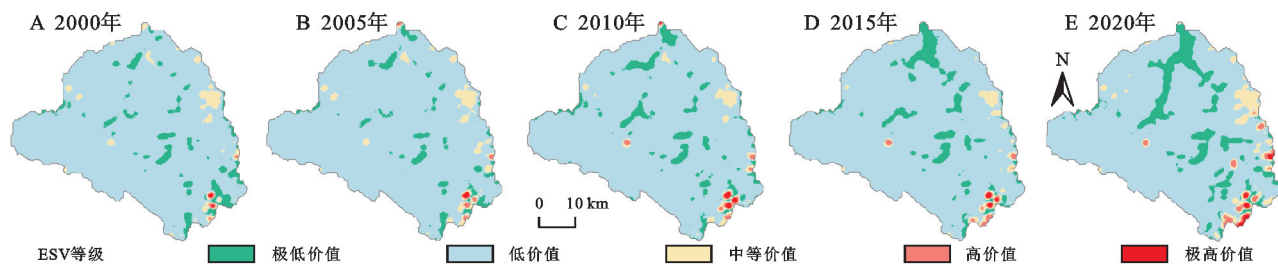


图 5 雅砻河流域 ESV 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ESV in the Yalong River Basin

2000—2020 年流域 ESV 以低价值为主(图 6A),其面积约占 88.06%;其次为极低价值和中等价值区,面积约占 7.94%和 3.19%;高价值和极高价值区的面积分别仅占 0.61%和 0.32%。2000—2020 年仅低价值区的面积有所减少,其余等级的面积均在扩张,其中低价值区缩减 9.23%,极低价值和中等价值的面积扩张 6.12%和 1.84%,其余等级变化不大。低价值区缩减的面积主要转为极低价值、中等价值和高价值区(图 6B),转为三者的面积分别达 165.95 km<sup>2</sup>, 52.24 km<sup>2</sup>, 12.05 km<sup>2</sup>;此外,有 20.36 km<sup>2</sup>, 9.79 km<sup>2</sup>

的极低价值区转为低价值区和中等价值区,也有 8.84 km<sup>2</sup>, 5.96 km<sup>2</sup>的中等价值区转为高价值区和极高价值区;其余等级间的面积转换不大。

### 2.3 生态系统服务价值地形梯度分异

以 2020 年为代表年,分析流域 ESV 的地形梯度分布情况。随着海拔、坡度和地形起伏度增大,ESV 呈现先增后降的分布规律(图 7A),第 V 级梯度为三者的转换带,ESV 分别占 15.53%(19.19 亿元),16.43%(20.25 亿元)和 21.03%(25.99 亿元)。ESV 在坡向梯度则呈阴坡多阳坡少的分布规律,其中阴坡上的 ESV 占

57.20%(70.51 亿元),阳坡上则为 42.77%(52.73 亿元),最大值分布在第Ⅸ级坡向,平面仅分布有 0.03%(0.04 亿元)。在单位面积 ESV(万元/hm<sup>2</sup>)的地形梯度分布方面(图 7B),随海拔和坡度增大 ESV 呈上升—下降—上升

的分布规律,最大值均在第Ⅸ级,分别为的 6.58,7.34。坡向梯度上呈现阴坡高阳坡低的分布规律,最大值为第Ⅸ级的 6.31。随地形起伏度增大,单位面积 ESV 呈递增趋势,最大值均为第Ⅸ级的 7.03。

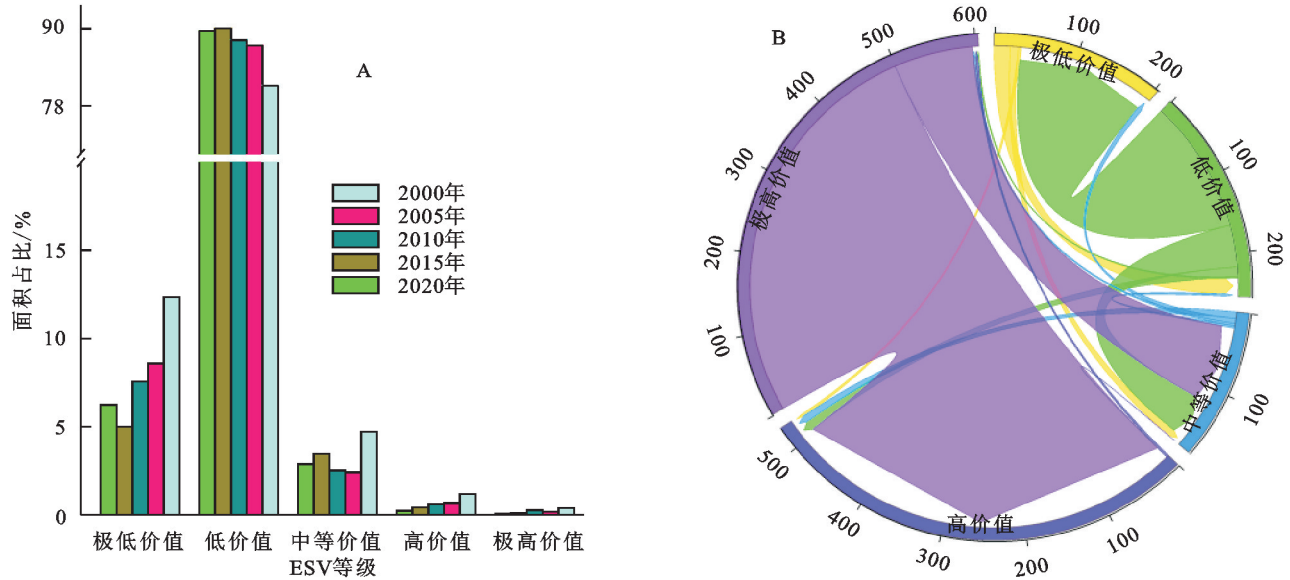


图 6 雅砻河流域不同等级 ESV 的面积占比变化和转移

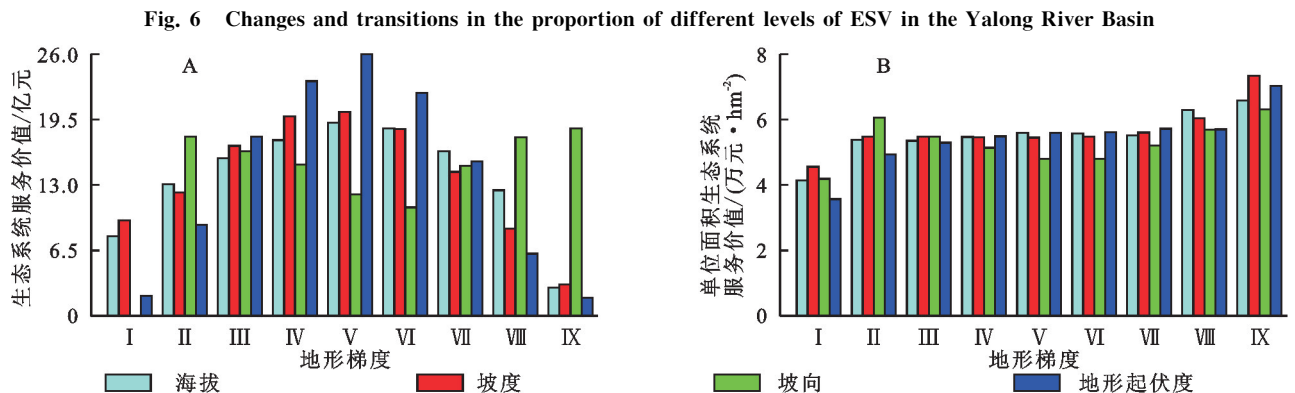


图 7 雅砻河流域 ESV 的地形梯度分布

Fig. 7 Topographic gradient distribution of ESV in the Yalong River Basin

在各项生态系统服务功能 ESV 的地形梯度分布方面(图 8),随海拔、坡度和地形起伏度增大,各项功能的 ESV 呈先增后降的分布规律,最大值均在第Ⅴ级;坡向梯度上,各项功能的 ESV 总体呈阴坡高阳坡低的分布规律,最大值均在第Ⅷ级和Ⅸ级。

在海拔梯度上(图 8A),各项功能的 ESV 最大值占其总值的比重分别为食物生产 15.75%(0.36 亿元)、原料生产 16.12%(0.54 亿元)、水资源供给 13.55%(0.30 亿元)、气体调节 16.21%(1.92 亿元)、气候调节 16.27%(5.09 亿元)、净化环境 15.82%(1.67 亿元)、水文调节 13.60%(3.72 亿元)、土壤保持 16.16%(2.33 亿元)、维持养分循环 16.13%(0.18 亿元)、生物多样性 16.11%(2.13 亿元)和美学景观 16.02%(0.94 亿元)。在坡度梯度上(图 8B),各项功能的 ESV 最大值占其总值的比重分别为食物生产 16.55%(0.38 亿元)、原料生

产 16.80%(0.56 亿元)、水资源供给 15.21%(0.34 亿元)、气体调节 16.87%(1.99 亿元)、气候调节 16.87%(5.27 亿元)、净化环境 16.64%(1.75 亿元)、水文调节 15.20%(4.15 亿元)、土壤保持 16.84%(2.43 亿元)、维持养分循环 16.81%(0.18 亿元)、生物多样性 16.80%(2.22 亿元)和美学景观 16.77%(0.98 亿元)。在坡向梯度上(图 8C),水资源供给、净化环境和水文调节的 ESV 最大值位于第Ⅸ级,三者的 ESV 最大值占其总值的比重分别为 18.17%(0.40 亿元)、14.44%(1.52 亿元)和 18.31%(5.00 亿元)。其余各功能的最大值位于第Ⅷ级,比重分别为食物生产 14.38%(0.33 亿元)、原料生产 14.39%(0.48 亿元)、气体调节 14.42%(1.70 亿元)、气候调节 14.43%(4.51 亿元)、土壤保持 14.39%(2.07 亿元)、维持养分循环 14.39%(0.16 亿元)、生物多样性 14.39%(1.90 亿元)和美学景观 14.39%(0.84 亿元)。在地形起



伏度梯度上(图 8D),各项功能的 ESV 最大值占其总值的比重分别为食物生产 20.84%(0.48 亿元)、原料生产 21.00%(0.70 亿元)、水资源供给 20.91%(0.47 亿元)、气体调节 21.09%(2.50 亿元)、气候调节 21.10%(6.60 亿

元)、净化环境 21.04%(2.22 亿元)、水文调节 20.92%(5.73 亿元)、土壤保持 21.05%(3.04 亿元)、维持养分循环 21.01%(0.23 亿元)、生物多样性 21.06%(2.79 亿元)和美学景观 21.09%(1.23 亿元)。

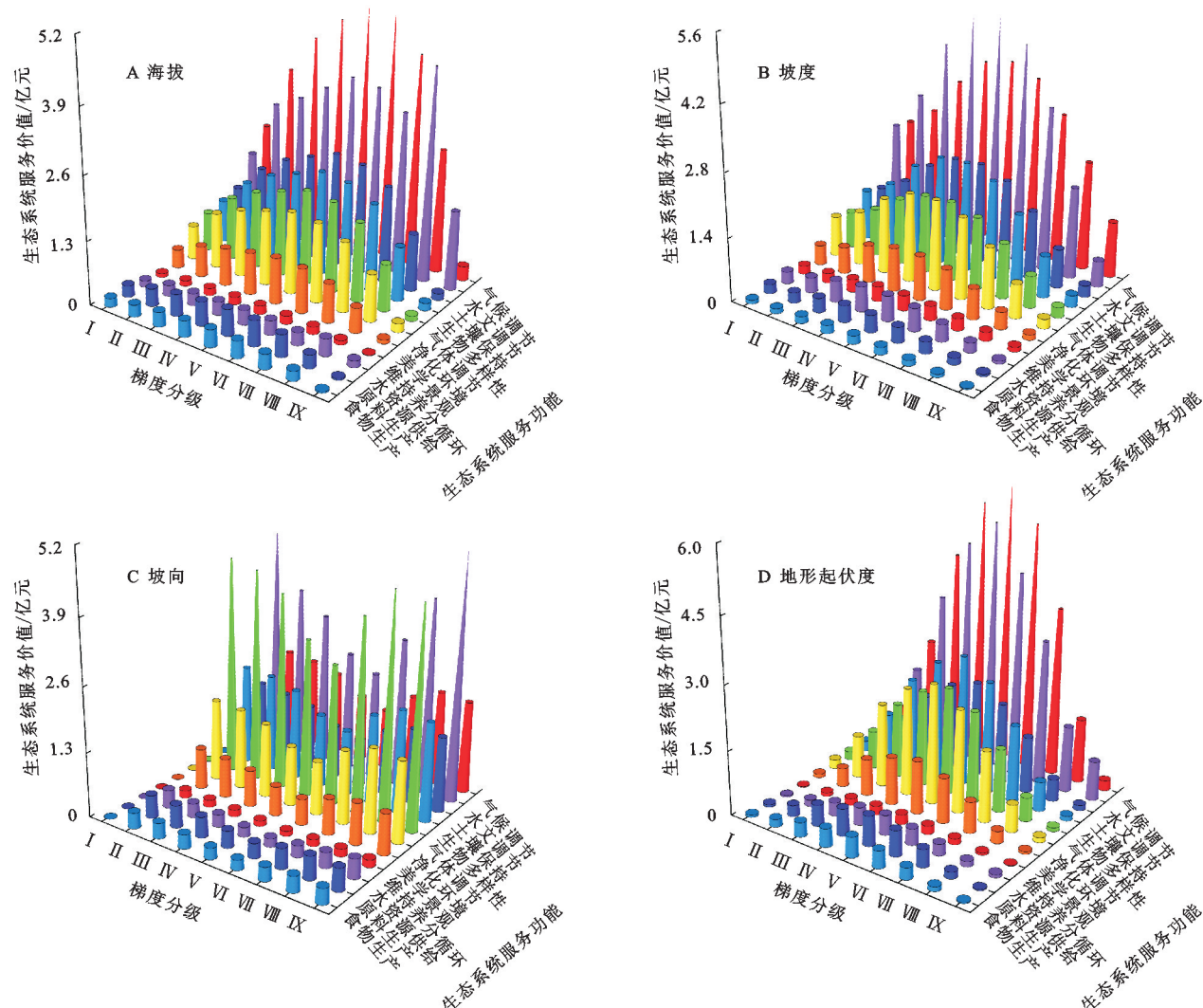


图 8 研究区各类生态系统服务功能 ESV 的地形梯度分布

Fig. 8 Topographic gradient distribution of ESV for various ecosystem service functions in the study area

## 2.4 生态系统服务价值的空间分异

2.4.1 生态系统服务价值的时空演化趋势 从 ESV 的标准差椭圆参数变化来看(表 2),2000—2020 年流域 ESV 的方位角在  $116.55^{\circ} \sim 118.12^{\circ}$  范围内波动,方位角总体呈变大趋势,表明 ESV 扩张的方向有从“东—西”朝“东南—西北”转变的趋势。短轴先由 2000 年的 18.05 km 减至 2020 年的 17.87 km,表明 ESV 的分布范围有所收缩;长轴由 2000 年的 22.23 km 增至 2020 年的 22.83 km。根据短轴和长轴的变化,可发现全流域 ESV 在南北方向较为稳定,东西方向总体呈扩张趋势。长轴和短轴的比值由 2000 年的 1.23 增至 2020 年的 1.28,表明流域 ESV 分布越趋集聚。

从标准差椭圆的分布范围和轨迹变化来看(图 9),2000—2020 年流域 ESV 扩张方向主要呈西北—

东南走向。从流域 ESV 标准差椭圆的重心变化来看(表 2,图 9):2000—2010 年重心快速向东南方向移动 0.41 km,2010—2015 年向西南方向移动 0.21 km,2015—2020 年向东南方向移动 0.35 km,2000—2020 年重心整体向东南移动 0.82 km。

2.4.2 生态系统服务价值的空间分异驱动因素 综合考虑流域自然和经济特征,并参照前人研究成果<sup>[2,27]</sup>。选取距居民点距离( $X_1$ )、NDVI( $X_2$ )、人口密度( $X_3$ )、年均气温( $X_4$ )、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温( $X_5$ )、年日照数( $X_6$ )、年均地温( $X_7$ )、坡度( $X_8$ )、地均 GDP( $X_9$ )、距公路距离( $X_{10}$ )、年蒸发量( $X_{11}$ )、距河流距离( $X_{12}$ )、年均相对湿度( $X_{13}$ )、海拔( $X_{14}$ )、地形起伏度( $X_{15}$ )、坡向( $X_{16}$ )、年均降水( $X_{17}$ )和年均风速( $X_{18}$ )共 18 个自然和经济因子来探究雅砻河流域 ESV 空间分异的驱动因素。

表 2 研究区 ESV 的标准差椭圆和重心参数变化

Table 2 Changes in standard deviation ellipse and centroid parameters of ESV in the study area

年份	标准差椭圆				重心	
	方位角/(°)	长轴/km	短轴/km	长轴/短轴	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)
2000	116.55	22.23	18.05	1.23	91.745	28.986
2005	117.17	22.35	17.97	1.24	91.746	28.985
2010	118.12	22.51	17.90	1.26	91.748	28.984
2015	117.17	22.60	17.79	1.27	91.747	28.982
2020	117.38	22.83	17.87	1.28	91.750	28.980

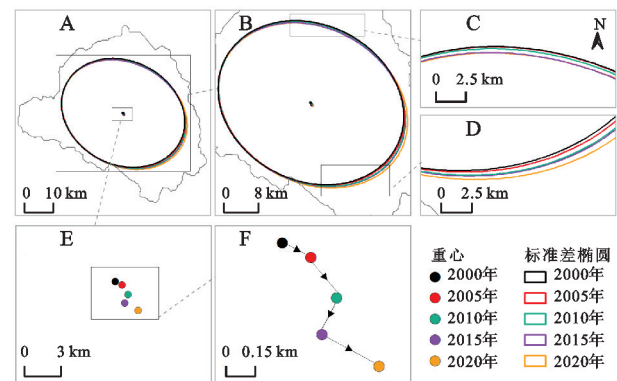


图 9 研究区 ESV 的标准差椭圆和重心分布及变化

Fig. 9 Distribution and changes in standard deviation ellipse and centroid of ESV in the study area

ESV 空间分异驱动因子的地理探测结果显示 (图 10A), 区域 ESV 空间分异受自然因素 G5 和经济因素的共同作用影响, 按各驱动因素的解釋力  $q$  值由高到低排序为:  $X_7 > X_{11} > X_{18} > X_{14} > X_4 > X_{17} > X_{13} > X_6 > X_{15} > X_9 > X_3 > X_5 > X_8 > X_2 > X_{10} > X_1 > X_{12} > X_{16}$ 。其中  $X_7$  是区域 ESV 空间分异的主导因子, 解釋力高达 0.24。  $X_{11}$ ,  $X_{18}$ ,  $X_{14}$ ,  $X_4$ ,  $X_{17}$ ,  $X_{13}$  和  $X_{16}$  为较重要的因子, 解釋力分别达 0.23, 0.23, 0.22, 0.21, 0.19, 0.18, 0.18。其余因子的解釋

力均低于 0.18, 但也对区域 ESV 空间分异产生影响。区域 ESV 空间分异受年均地温、年蒸发量、地均 GDP 和人口密度等因素的影响深远, 需规范区域土地利用方式, 加强生态保护力度, 优化土地资源配置, 促进流域生态系统健康发展。

从 ESV 空间分异驱动因子的交互探测结果来看 (图 10B), 任意两两因子交互作用对区域 ESV 和 ERI 空间分异产生的影响均大于单因子的作用。其中  $X_7$  与  $X_9$  的交互对 ESV 空间分异的影响最为显著, 解釋力  $q$  值高达 0.35。此外,  $X_2 \cap X_4$ ,  $X_2 \cap X_{11}$ ,  $X_4 \cap X_9$ ,  $X_6 \cap X_{11}$ ,  $X_6 \cap X_{13}$ ,  $X_7 \cap X_{10}$ ,  $X_7 \cap X_{12}$ ,  $X_7 \cap X_{15}$ ,  $X_9 \cap X_{11}$ ,  $X_9 \cap X_{13}$ ,  $X_9 \cap X_{14}$ ,  $X_9 \cap X_{17}$ ,  $X_9 \cap X_{18}$ ,  $X_{10} \cap X_{11}$ ,  $X_{10} \cap X_{18}$ ,  $X_{15} \cap X_{17}$  的交互作用对区域 ESV 空间分异的解釋力较高,  $q$  值均在 0.30 以上。其余因子交互的解釋力  $q$  值均在 0.30 以下, 但均对流域 ESV 空间分异产生影响。由此可见, 在区域自身的气候和地形等自然条件制约下, 强烈的人类活动会干扰区域 ESV 的空间分异。故需采取与流域自然和经济状况相适应的土地利用开发模式, 规避不合理人类经济活动对区域生态环境稳定性的干扰。

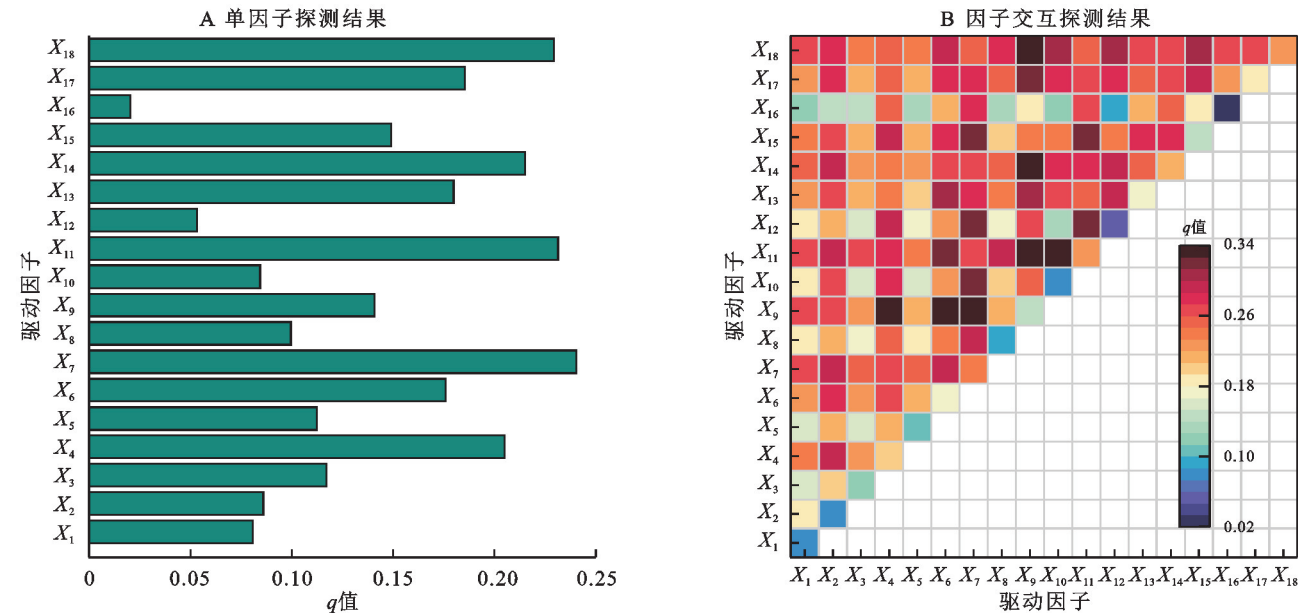


图 10 雅砻河流域 ESV 空间分异的驱动因素探测结果

Fig. 10 Results of exploring driving factors of spatial differentiation in ESV in the Yalong River Basin



### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

2000—2020年雅砻河流域ESV总体增长0.13% (0.16亿元),变化趋势与相关学者在青藏高原及类似地区的研究成果一致<sup>[4,9]</sup>。有研究表明,全球气候变暖影响下青藏高原上的冰川总体在退缩<sup>[28]</sup>,得益于冰川消融的注入,青藏高原的众多湖泊得以扩张<sup>[29]</sup>。雅砻河流域上游冰川转为水体,水域面积扩张带来的水文调节和水资源供给能力的提升是流域ESV增长的主要因素。因此,在雅砻河流域未来发展中,不仅同青藏高原大部分地区一样需关注草地问题<sup>[1,4]</sup>,也需要对水体资源的维护加以重视。作为藏族文化的发祥地,雅砻河流域复杂多样的地形对ESV产生了显著的影响。本研究发现,随着地形梯度的抬升,ESV呈现出明显的梯度变化特征,与相关学者在临近地区的研究成果相似<sup>[7]</sup>。具体而言,雅砻河流域ESV随海拔、坡度和地形起伏度升高呈现先增长后减少的分布特征,而在坡向方面呈现出阴坡高阳坡低的分布格局。这种分异反映了雅砻河流域不同地形条件下生态系统的内在差异,同时也揭示了其生态系统多功能性的空间分布特征。故雅砻河流域未来需继续贯彻因地制宜的国土空间规划,切实保护好流域内的生态用地。此外,亦需参照党和政府提出的《拉萨南北山绿化工程总体规划(2021—2030年)》案例和青藏高原典型干旱城市(西宁)的环境绿化实践经验<sup>[30]</sup>,推动雅砻河流域尤其是其阴坡地区的绿化工作。此外,还需在雅砻河中下游河谷沙化严重区加大对砂生槐、绢毛蔷薇和江孜沙棘等适应当地干旱、低温气候环境灌木<sup>[31]</sup>的培育及推广,以有效应对沙化问题对生态环境的破坏,改善中下游河谷地区的生态环境。同时,应借鉴拉萨河中下游采取的河势控导和拦水坝工程<sup>[32]</sup>,通过增加冬春季节雅砻河谷中下游的蓄水量,以降低气候变暖引发的雅砻河谷沙漠化加剧风险。

此外,除了自然地形因素外,人类活动也是驱动雅砻河流域ESV时空和地形梯度分异的重要因素。近年来,随着雅砻河流域当地居民生活方式的变化、旅游业的快速发展以及拉林铁路、曲乃高速等交通大动脉的建设,人类活动对ESV产生了深刻的影响。例如,过度放牧和农业扩张导致的土地退化<sup>[33]</sup>,在一定程度上降低了生态系统的土壤保持和水文调节能力。同时,旅游业的发展虽然增加了经济收入,但也给生态环境带来了压力,影响了生态系统的健康和服务价值的长期维持。雅砻河流域作为青藏高原的重要组成部分,正面临着全球气候变化的直接影响<sup>[18]</sup>,包括气温升高和降水模式的变化。这些变化会通过影响植被分布和水资源可用性等,进一步影响流域

ESV在时空和地形梯度上的分布及分异。因此,实施因地制宜的土地利用空间规划政策,对于雅砻河流域生态文明的可持续发展尤为重要。

本文重点分析了雅砻河流域ESV在时空和地形梯度的变化和分异特征,结果显示其分异特征受到多种因素的影响,包括自然地形条件、人类活动以及全球气候变化的综合作用。因此,未来的土地管理策略和保护措施应当考虑这些复杂的相互作用,采取综合性的方法来维护和提升流域的ESV。同时,亦需加强对生态敏感区域和生态功能区的保护,合理规划人类活动,同时增强对气候变化影响的适应能力,以确保雅砻河流域的ESV得以持续和有效地提供。但本文仍有诸多不足之处:首先,受土地利用数据和各类自然及经济数据的精度限制,研究结果与雅砻河流域实际情况存在一定误差。其次,ESV空间分异的驱动因素缺乏层次性解析。同时,因数据获取受限,一些驱动因素的选取未与高原地区相结合(如选取 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温作为驱动因素,在高原地区不太合适)。因此,未来研究不仅需更加注重于提高各类数据精度,也需要加强对ESV空间分异驱动因素的层次性解析。

#### 3.2 结论

(1) 2000—2020年草地是雅砻河流域最主要的土地利用方式,其面积约占92.45%。研究期内流域土地利用呈现林地、灌木和草地减少,其余地类扩张的趋势。

(2) 研究期内流域ESV累计增长0.13% (0.16亿元),草地的ESV贡献率高达94.65%。气候调节和水文调节功能的ESV贡献率突出,分别贡献了25.78%和21.07%。在空间上,ESV总体呈东南高西北低的分布特征。总ESV和各项生态系统服务功能的ESV随海拔、坡度和地形起伏度增大,呈先增后降的分布规律,坡向梯度呈阴坡高阳坡低的分布特征。

(3) 2000—2020年流域ESV的标准差椭圆和分布重心总体向西南方向移动,ESV分布越趋聚集。流域ESV空间分异受自然和经济因子共同作用影响,其中年均地温为主导因子( $q=0.24$ ),任意两因子的交互均会增强其分异性。

#### 参考文献(References):

- [1] 李中锋,高婕,钟毅.西藏草地生态安全评价研究:基于生态系统服务价值改进的生态足迹模型[J].干旱区资源与环境,2023,37(4):9-19.  
Li Z F, Gao J, Zhong Y. Assessment on grassland ecological security in Tibet based on ecological footprint model improved by ecosystem services value[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(4):9-19.
- [2] 孙梦华,牛文浩,张蚌蚌,等.黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应:以陕甘宁地区为

- 例[J].应用生态学报,2021,32(11):3913-3922.
- Sun M H, Niu W H, Zhang B B, et al. Spatial-temporal evolution and responses of ecosystem service value under land use change in the Yellow River Basin: A case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia region, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32 (11): 3913-3922.
- [3] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387:253-260.
- [4] 张晓瑶,陆林,虞虎,等.青藏高原土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟[J].生态学杂志,2021,40(3):887-898.
- Zhang X Y, Lu L, Yu H, et al. Multi-scenario simulation of the impacts of land-use change on ecosystem service value on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(3):887-898.
- [5] 虞依娜,彭少麟.生态系统服务价值评估的研究进展[J].生态环境学报,2010,19(9):2246-2252.
- Yu Y N, Peng S L. Review on evaluation of ecosystem services[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(9):2246-2252.
- [6] 王波,杨太保.1980—2018年银川市生态系统服务价值评价及驱动力分析[J].干旱区地理,2021,44(2):552-564.
- Wang B, Yang T B. Value evaluation and driving force analysis of ecosystem services in Yinchuan City from 1980 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021,44(2): 552-564.
- [7] 张学斌,罗君,石培基,等.格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征[J].应用生态学报,2020,31(2):543-553.
- Zhang X B, Luo J, Shi P J, et al. Spatial-temporal evolution pattern and terrain gradient differentiation of ecosystem service value in Zhangye, Northwest China at the grid scale[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(2):543-553.
- [8] 王鹏,刘小鹏,王亚娟,等.黄土丘陵沟壑区生态移民过程及其生态系统服务价值评价:以宁夏海原县为例[J].干旱区地理,2019,42(2):433-443.
- Wang P, Liu X P, Wang Y J, et al. Ecological migration process and the evaluation of its ecosystem service value in Loess hilly and Gully Region: A case study of Haiyuan County, Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2019,42(2):433-443.
- [9] 程琳琳,黄婷,刘焱序.基于改进价值当量因子的1992—2015年青藏高原生态系统服务价值演化分析[J].水土保持通报,2019,39(5):242-248.
- Cheng L L, Huang T, Liu Y X. Analysis on evolution of ecosystem service value in Qinghai-Tibet Plateau based on improved value equivalent factors from 1992 to 2015[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):242-248.
- [10] 周建伟.1980—2018年川西山区生态系统服务价值与生态风险时空演变研究[D].四川南充:西华师范大学,2023.
- Zhou J W. Spatial-Temporal Evolution of Ecosystem Service Value and Ecological Risk in Western sichuan mountainous area from 1980 to 2018[D]. Nanchong, Sichuan: China West Normal University, 2023.
- [11] 杨海江,勾晓华,唐呈瑞,等.2010—2021年中国森林生态系统服务功能价值评估研究进展[J].生态学报,2024,43(1):244-253.
- Yang H J, Gou X H, Tang C R, et al. Research progress on the evaluation of forest ecosystem services in China during 2010 to 2021[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(1):244-253.
- [12] 隋露,蒲春玲,刘志有,等.基于PLUS模型的乌鲁木齐市生态服务价值权衡协同探究[J].干旱区地理,2023,46(1):159-168.
- Sui L, Pu C L, Liu Z Y, et al. Trade-off synergy of ecosystem service value in Urumqi City based on PLUS model [J]. Arid Land Geography, 2023,46(1):159-168.
- [13] 亢楠楠,黄季焜.生态系统服务价值评价中的效益转移:进展与挑战[J].中国人口·资源与环境,2022,32(3):159-168.
- Kang N N, Huang J K. Benefit transfer of ecosystem service valuation: Progress and challenges[J]. China Population,Resources and Environment, 2022,32(3): 159-168.
- [14] 徐雨晴,周波涛,於琰,等.气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征[J].生态学报,2018,38(6):1952-1963.
- Xu Y Q, Zhou B T, Yu L, et al. Temporal-spatial dynamic pattern of forest ecosystem service value affected by climate change in the future in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):1952-1963.
- [15] 陈新丰,拉多,桑群宗,等.西藏雅砻河流域种子植物组成及其区系特征研究[J].高原科学研究,2022,6(4):33-41,65.
- Chen X F, Rado, Gusang Qunzong, et al. Composition and floristic characteristics of seed plants in the Yalong River Basin, Tibet [J]. Plateau Science Research, 2022,6(4):33-41,65.
- [16] 周建伟,杨海青,邓青春,等.干旱河谷区土地利用与生态系统服务价值时空演变:以四川攀西地区为例[J].环境工程技术学报,2023,13(2):715-724.
- Zhou J W, Yang H Q, Deng Q C, et al. Spatial-temporal changes of land use and ecosystem service value in dry valleys: A case study of Panxi Area, Sichuan Province [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(2):715-724.
- [17] 李丹,黄川友,殷彤,等.基于改进生态足迹法的雅砻河源区生态承载力评价及保护措施[J].水电能源科学,

- 2018,36(3):38-41.
- Li D, Huang C Y, Yin T, et al. Ecological carrying capacity assessment and protective measures of head-stream region of Yalong River based on improved ecological footprint method [J]. *Hydropower Energy Science*, 2018,36(3):38-41.
- [18] 李彬权,梁忠民,周伟,等.西藏雅砻河流域气候变化与冰川萎缩特征分析[J].*人民珠江*,2017,38(1):35-38.
- Li B Q, Liang Z M, Zhou W, et al. Analysis on climate change and glacier retreat in the Yarlung River Basin, Tibet[J]. *Pearl River*, 2017,38(1):35-38.
- [19] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, et al. GLC\_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(6):2753-2776.
- [20] 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.
- 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.
- [21] 周建伟,罗君.干旱河谷生态服务价值与景观生态风险时空演变[J].*人民长江*,2023,54(4):85-93.
- Zhou J W, Luo J. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value and landscape ecological risk in dry valleys[J]. *Yangtze River*, 2023,54(4):85-93.
- [22] Jin T, Chen Y, Shu B, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem service value and topographic gradient effect in the Da-Xiao Liangshan Mountains in Sichuan Province, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2023,20(8):2344-2357.
- [23] 付建新,曹广超,郭文炯.1980—2018年祁连山南坡土地利用地形梯度变化及其地形因子地理探测[J].*水土保持研究*,2021,28(6):371-381.
- Fu J X, Cao G C, Guo W J. Terrain gradient change of land use and its geographical detector of terrain factors on the south-facing slope of Qilianshan Mountains from 1980 to 2018[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(6):371-381.
- [24] 张锦明,游雄.地形起伏度最佳分析区域预测模型[J].*遥感学报*,2013,17(4):728-741.
- Zhang J M, You X. A prediction model of optimum statistical unit of relief[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2013,17(4):728-741.
- [25] 郑准,陈曦.长江中游城市群城市创新潜力的分布动态与空间收敛性研究[J].*长江流域资源与环境*,2024,33(2):271-284.
- Zheng Z, Chen X. Study on the distribution dynamics and spatial convergence of urban innovation potential in the Yangtze River middle reaches urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2024,33(2):271-284.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [27] 谈旭,王承武.伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J].*应用生态学报*,2023,34(10):2747-2756.
- Tan X, Wang C W. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(10):2747-2756.
- [28] You Q L, Wu T, Shen L C, et al. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020,201:103043.
- [29] Liu J S, Wang S Y, Yu S M, et al. Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2009,67(3/4):209-217.
- [30] 侯伟,普布顿珠,边巴多吉,等.西宁南北山造林绿化实践对拉萨南北山绿化建设的启示[J].*林业建设*,2022(5):51-55.
- Hou W, Pubudunzhu, Bianbaduoji, et al. Enlightenment from practice of afforestation and greening in north and south mountains of Xining to greening construction of north and south mountains of Lhasa[J]. *Forestry Construction*, 2022(5):51-55.
- [31] 张林,杜晓辉,赵旺林,等.植被地带性分布及植物功能性状对拉萨南北山绿化的启示[J].*西藏科技*,2023,45(11):93-100.
- Zhang L, Du X H, Zhao W L, et al. Enlightenment of zonal distribution of vegetation and plant functional traits to the greening of the northern and southern mountains of Lhasa[J]. *Tibet Science and Technology*, 2023,45(11):93-100.
- [32] 刘雅静,蔡晓梅.空间嵌入性视角下拉萨河改造与旅游地营建[J].*旅游学刊*,2023,38(4):12-14.
- Liu Y J, Cai X M. Reconstruction of Lhasa River and construction of tourist destinations from the perspective of spatial embeddedness [J]. *Tourism Tribune*, 2023,38(4):12-14.
- [33] Lu X Y, Kelsey K C, Yan Y, et al. Effects of grazing on ecosystem structure and function of alpine grasslands in Qinghai-Tibetan Plateau: a synthesis [J]. *Ecosphere*, 2017,8(1):e01656.