

## 耦合土地利用变化与生态系统服务的云南省生态风险评价

谢佐清, 黄义忠

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** [目的] 构建合理的生态风险评价方法, 对于生态安全格局构建和国土空间优化具有重要意义。[方法] 基于2000年、2010年、2020年3期土地利用数据, 采用PLUS模型模拟2030年自然发展情景下土地利用, 并利用InVEST模型评估产水、碳储、水土保持、生境质量4项生态系统服务功能, 分别提取生态退化度、转移概率、服务变化、权衡协同指数4个生态风险指标, 构建生态风险评价模型开展评价, 结合云南省生态安全格局探讨风险防范对策措施。[结果] 1) 云南省2030年自然发展情景下的土地利用变化虽有不同, 但变化程度均一致, 耕地、林地、草地间的转换较为明显, 建设用地仍然呈扩张趋势。在空间分布上, 自然发展情景与历史土地利用数据分布具有相似性, 生态用地退化区域主要分布在开发建设的城市周边或农耕地。2) 云南省生态系统服务功能整体呈现“东低西高”的格局, 滇西北和西南为高值区, 滇中及东北为低值区, 且整体服务功能呈下降趋势。怒江、保山、德宏和西双版纳生态服务功能呈增强趋势, 滇中和滇东北权衡与协调指数较高, 生态系统服务间功能冲突明显。3) 2020—2030年云南省的潜在生态风险存在显著的空间差异。高风险区主要分布在滇中城市群, 低风险区分布在滇东南与滇西南, 风险区的形成受自然因素如地形、土地利用分布影响, 以及人类活动如城市开发和建设的影响, 需针对区域间特异性差异采取生态保护措施以促进可持续发展。[结论] 研究成果不仅能更准确掌握云南省潜在的生态风险, 为生态安全格局构建和生态修复提供基础决策信息, 也可以为生态风险评价方法拓展提供思路。

**关键词:** 土地利用; 权衡协同; 生态系统服务; 风险; 评价

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0224-11

## Ecological Risk Assessment of Yunnan Province by Coupling Land Use Change and Ecosystem Services

XIE Zuoqing, HUANG Yizhong

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** [Objective] Developing a rational ecological risk assessment methodology is of great significance for the establishment of ecological security patterns and the optimization of national land space planning. [Methods] Based on land use data from 2000, 2010 and 2020, the PLUS model was employed to simulate land use under the natural development scenario in 2030. The InVEST model was utilized to assess four ecosystem services, i.e. water yield, carbon storage, soil conservation, and habitat quality. Four ecological risk indicators, including ecological degradation degree, transition probability, service change, and trade-off and synergy indices, were extracted to construct an ecological risk assessment model. The assessment was conducted in conjunction with the ecological security pattern of Yunnan Province to explore risk prevention strategies. [Results] 1) Although the land use changes under the natural development scenario in Yunnan Province in 2030 would be different, the degree of change would be the same. The conversion between cultivated land, forest land and grassland would be obvious, and the construction land would continue to expand. In terms of spatial distribution, the natural development scenario would

收稿日期: 2024-11-26

修回日期: 2025-02-08

录用日期: 2025-02-20

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761081); 云南省哲学社会科学基础研究基地项目(ZD202218)

第一作者: 谢佐清(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态系统与生态安全研究。E-mail: 2801742031@qq.com

通信作者: 黄义忠(1972—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事国土空间规划研究。E-mail: 2684690927@qq.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

be similar to the historical land use data, with the degraded areas of ecological land mainly distributed around urban development and construction areas or agricultural regions. 2) The ecosystem service functions in Yunnan Province would show a pattern of "low in the east and high in the west", with the northwest and southwest regions being high-value areas, and the central and northeast regions being low-value areas, and the overall service function showing a downward trend. The ecological service functions of Nujiang, Baoshan, Dehong and Xishuangbanna would show an increasing trend, while the trade-off and coordination indices of central and northeastern regions would be high, and the functional conflicts between ecosystem services would be obvious. 3) There would be significant spatial differences in potential ecological risks in Yunnan Province from 2020 to 2030. High-risk areas would be mainly distributed in the central Yunnan urban agglomeration, while low-risk areas would be located in the southeast and southwest. The formation of high-risk areas would be affected by natural factors such as topography and land use distribution, as well as human activities such as urban development and construction. Ecological protection measures tailored to regional specificities are needed to promote sustainable development. [Conclusion] The results can not only provide a more accurate understanding of the potential ecological risks in Yunnan Province, supply fundamental decision-making information for the establishment of ecological security patterns and ecological restoration, but also provide innovative ideas for the expansion of ecological risk assessment methodologies.

**Keywords:** LUCC; trade-offs and synergies; ecosystem services; risks; assessment

**Received:** 2024-11-26

**Revised:** 2025-02-08

**Accepted:** 2025-02-20

**Online**(www.cnki.net): 2025-04-07

生态安全是国家发展的重要基础,云南作为长江、怒江、澜沧江、珠江等主要河流的上游或源头,肩负着青藏高原东南缘生态屏障、哀牢山—无量山生态屏障、南部边境生态屏障三大生态安全屏障的建设任务,承担着维护区域、国家乃至国际生态安全的战略任务。生态安全的本质是生态风险和生态脆弱性,而生态风险是指生态系统及其组分所承受的风险,指在一定区域内,具有不确定性的事故或灾害对生态系统及其组分可能产生的作用,该作用的结果可能导致生态系统结构和功能的损伤,从而危及生态系统的健康和生态安全<sup>[1]</sup>,而生态风险的识别、评估能为人类活动提供指导,使风险管理者根据风险程度作出合理的环境保护决策,逐渐成为学者们研究的一个热门课题<sup>[2]</sup>。

国内外学者<sup>[3-4]</sup>对生态风险研究已从以人体为对象的健康风险评估发展到以生态系统为对象的生态风险或生态安全评价,风险受体也从单物种向多物种、种群、生态系统及流域景观水平的方向发展。国内生态风险研究对象广泛,从水环境风险、景观生态风险,延伸到区域生态风险、流域生态风险<sup>[5]</sup>,生态风险现状评价往往基于PSR模型及其衍生模型,从多维度构建指标体系进行评价<sup>[6-9]</sup>,其中部分学者尝试结合相对风险<sup>[10]</sup>、生态足迹<sup>[11]</sup>、CA-markov<sup>[12]</sup>、CLUE-S<sup>[13]</sup>、PLUS<sup>[14]</sup>等理论或模型,并引入灰色关联<sup>[15]</sup>、空间自相关<sup>[16]</sup>、半变异<sup>[17]</sup>等分析方法,但较多评估现有或历史风险,往往忽视了未来风险的可能性。生态系统服务

是指生态系统的结构、功能与过程能维持人类生产发展和生态过程所提供的自然条件和效用<sup>[18]</sup>,因其与土地利用联系紧密且数据便于收集而被日益重视。景观生态风险是基于景观格局,利用景观中风险发生概率与造成损失的乘积对地区景观生态风险状况进行表征<sup>[19]</sup>,并结合景观干扰度与景观脆弱度进行定量描述<sup>[20]</sup>,研究结果多以空间统计<sup>[21]</sup>和关联耦合<sup>[22]</sup>进行分析。然而,景观格局采用源-汇的方法并没有充分考虑到模式特征风险,割裂人与自然一体的关系,缺乏明确的评估终点,因此,将以人为中心的生态系统服务纳入生态风险评估,并结合土地利用变化,既能充分考虑人与自然一体的关系,也可以从土地利用变化的角度,对模拟预测未来风险,减少生态安全问题具有重要的生态意义。

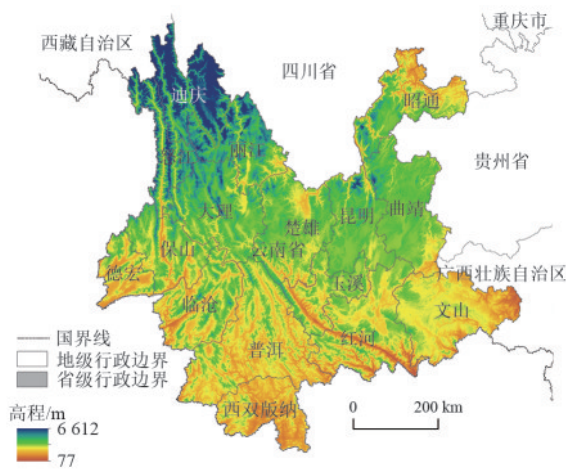
通过文献梳理,基于景观生态理念,以土地利用变化及其模拟预测,提取生态退化度和转移概率表征生态安全指标;评估生态系统服务能力,提取服务变化及权衡与协同指数表征负、正向指标;生态系统数量、质量结合,正向、负向指标结合,建立多参数的耦合模型开展潜在的风险评价,不失为一种较优的解决方案。本文选取云南省作为研究区,基于土地利用历史数据开展未来的预测,分析区域未来发展的复杂性和不确定性,同时通过叠加自然条件分析生态系统服务变化,构建耦合模型综合考虑多重因素的影响,能有力提高区域生态风险预判的准确性。研究成果促进多指标的融合,通过科学的评估和管

理,不仅能更准确掌握云南省潜在的生态风险,为生态安全格局构建和生态修复提供基础决策信息,也可以为生态风险评价方法拓展提供思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

云南省(21°08′32″~29°15′08″N, 97°31′39″~106°11′47″E)地处中国西南边陲,其地形复杂多样,以山地高原为主,海拔落差极大(图1),气候兼具亚热带与热带季风特点,气候带丰富多样,年温差小、日温差大且降水不均,植被类型丰富多样,南北差异巨大,使区域生态系统服务的空间格局不均。丰富的生物多样性虽然增强了生态系统的韧性,但在快速城市化和经济发展的背景下,生态风险也随之增加。



注:该图基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,边界无修改。下同。

图1 云南省地理位置与高程

Fig. 1 Geographical location and elevation distribution of Yunnan Province

### 1.2 数据来源

本文研究数据主要包括自然地理数据、社会经济数据和气候数据。土地利用、年降雨量、蒸散发来源于中国科学院资源环境科学数据中心(www.resdc.cn); 2030年降雨量、蒸散发数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/);土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD)(http://westdc.westgis.ac.cn/);DEM来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/);2020年的河流道路数据来源于OSM(www.openstreetmap.org);社会经济数据主要包括人口和GDP,来源于云南省统计年鉴(https://www.yn.gov.cn/sjfb/tjnj\_2/)。所有数据均转换为栅格,重采样转换为30 m×30 m分辨率,坐标系重投影为WGS1984\_UTM\_ZONE\_47N,应用行政区边界做缓冲裁剪栅格,保持范围一致。

### 1.3 研究方法

论文收集2000年、2010年、2020年3期土地利用数据,运用土地利用转移矩阵分析土地利用变化;基于自然环境、社会经济和交通区位3方面的驱动因素及云南省扩张数据,运用PLUS(patch generating land use simulation)模型模拟未来土地利用,并根据土地利用变化计算相应转移概率与生态退化度;收集多源数据,基于InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型<sup>[23]</sup>评估产水量、水土保持、碳储量、生境质量4项典型生态系统服务功能;最后提取土地利用转移概率、生态退化度、生态系统服务变化、生态系统服务权衡与协同等参数,建立耦合模型分析区域2030年的潜在生态风险状况。研究在原有土地利用转移概率与生态系统服务的框架上增加生态退化度与权衡协同指数,使其区域间的生态风险评价更为准确。研究框架见图2。

#### 1.3.1 土地利用模拟

##### 1) 驱动因子选择

基于自然环境、社会经济及交通区位3个维度选取DEM、坡度、降水、人口、GDP、农村居民点、城乡建设用地7个驱动因素提取2000—2020年用地扩张变化的潜在驱动因素。

##### 2) 精度验证

PLUS模型是基于栅格数据的斑块生成土地利用变化模型,对土地利用变化机理具有更好的解释性,能更加精确地模拟未来多种土地利用类型的时空变化,反映实际土地利用变化的不确定性。本研究基于2000年、2010年、2020年3期土地利用数据,运用PLUS模型搭载的用地扩张分析模块(LEAS)和基于多类随机种子(CA)模型,预测2020年土地利用变化情况,并对结果进行精度检验。用地扩张分析模块计算公式为:

$$P_{i,k(X)}^d = \frac{\sum_{n=1}^M I h_n X = d}{M} \quad (1)$$

式中: $M$ 为决策树数量; $X$ 为驱动因子组成的向量; $h_n$ 为第 $n$ 个决策树时计算预测的土地利用类型; $d$ 为0或1,即是否为该土地利用类型发生转变。

##### 3) 情景设定

自然发展情景是在没有特别政策干预下,土地利用按照当前趋势发展,不对任何土地类型设定转换限制,该情景是为评估在不采取特殊保护或开发措施的情况下,土地利用及生态系统服务的未来演变趋势。依据2000—2020年土地利用转移矩阵,结合PLUS模型以10 a为步长预测2030年云南省土地利用状况。

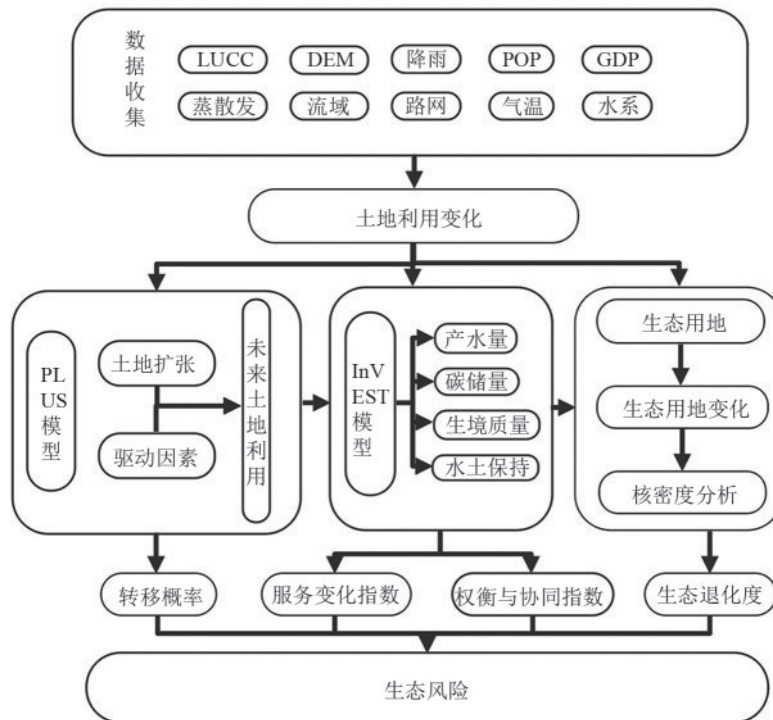


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

1.3.2 生态退化度分析 生态退化是生态系统在人为和自然因素的影响下处于失衡状态,表现出较强的敏感性和脆弱性,较弱的缓冲能力和抵抗性,逐渐演变为一种低水平状态的过程。本研究基于土地利用数据,将耕地划分为生产用地,建设用地划分为生活用地,林地、草地、水域、未利用地划分为生态用地,并应用 ArcGIS 分析生态用地变化情况,提取相应单元中心

点进行核密度插值,得到生态退化状况。

1.3.3 生态系统服务评估 InVEST 模型是由美国斯坦福大学研发,旨在根据土地利用变化定量评估生态系统服务功能,其优点在于实现生态系统服务功能的空间化和可视化表达。本文应用 InVEST 模型定量评估云南省产水量、碳储量、水土保持、生境质量 4 项典型生态系统服务,公式及相关数据来源和处理见表 1。

表 1 生态系统服务功能计算

Table 1 Calculation of ecosystem service functions

服务	计算公式	参数描述
产水量	$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) P(x)$	$Y(x)$ 为年产水量, $m^3$ ; $AET(x)$ 为潜在蒸散量, $mm$ ; $P(x)$ 为栅格 $x$ 年降雨量, $mm$
生境质量	$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}\right)$	$Q_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中栅格 $x$ 的生境质量; $D_{xj}$ 为土地利用类型 $j$ 中栅格 $x$ 的生境退化度; $H_j$ 为土地利用类型 $j$ 的生境适合度; $k$ 为半饱和常,取 $D_{xj}$ 最大值的 $1/2$ ; $z$ 为季节性因子
碳储量	$CS = \sum_{m=1}^n A_m \times (C_a + C_b + C_s + C_d)$	$CS$ 为总碳储量, $t/hm^2$ ; $A_m$ 为第 $m$ 地类面积; $n$ 为土地利用类型数; $C_a$ 为地上植被碳密度, $t/hm^2$ ; $C_b$ 为地下植被碳密度, $t/hm^2$ ; $C_s$ 为土壤碳密度, $t/hm^2$ ; $C_d$ 为死亡有机物碳密度, $t/hm^2$
水土保持	$SC = K \times R \times LS \times (1 - C \times P)$	$SC$ 为单位面积内的土壤保持量, $t/(hm^2 \cdot a)$ ; $R$ 为降雨侵蚀性因子, $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ ; $K$ 为土壤可蚀因子, $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ; $LS$ 为坡长坡度因子; $C$ 为植被与作物管理因子; $P$ 为水土保持因子

1.3.4 潜在生态风险评估 1) 生态系统服务变化指数 该指数用于衡量区域生态系统服务功能变化大小的指标,本论文拟提取生态服务功能减少区域构建负向的生态评价指标。具体方法:对单项生态系统

服务功能进行标准化处理消除量纲差异,并进行累加计算综合生态系统服务功能,并求得变化区域,最后提取服务功能减少区域作为研究对象。具体公式为:

$$ES = WY + SC + CS + HQ \quad (2)$$

$$\Delta ES = \sum_{m=0}^3 ES_{m+1} - ES_m \quad (3)$$

式中:WY、SC、CS和HQ分别为产水量、土壤保持、碳储、生境质量;ES为最终生态系统服务功能; $m$ 为时间; $\Delta ES$ 为生态系统服务损失。

2)生态系统服务权衡与协同指数 该指数是指某一栅格单元中1项或2项服务供给较强、其他服务较弱的状态;协同则表示多项服务供给能力均衡,权衡协同指数能够表征生态系统服务功能相互影响作用<sup>[24]</sup>。具体方法:对不同生态系统服务功能进行标准化处理,并以自然断点法分为3个等级,其次通过空间叠加计算区域权衡协同量,最后进行标准化处理得出权衡协同指数。

3)生态风险评价模型构建 本研究充分结合风险源发生的概率和风险损失量的计算方法<sup>[25]</sup>,以未来土地利用变化概率为风险源发生概率、生态系统服务变化与权衡协同效应为风险损失构建生态风险评价模型。研究以关键生态系统服务退化作为损失代表,结合权衡协同指数对传统的生态风险评估模型进行改进,能更准确地评估生态风险。具体计算公式为:

$$ER = \frac{N_{ij} \times \Delta ES \times N \times L}{\sum_{k=1}^m N_{ik}} \quad (4)$$

式中: $N_{ij}$ 为由地类*i*转变为*j*的面积, $\text{km}^2$ ;  $N_{ik}$ 为土地利用类型*i*的总面积, $\text{km}^2$ ;  $k$ 为土地利用类型数量; $N$ 为生态系统服务权衡协同指数;ER为潜在生态风险; $L$ 为生态退化度。以生态系统服务功能变化指数、权衡与协同指数、生态退化度的乘积代表风险损失。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化及模拟

2.1.1 土地利用变化分析 基于2000年、2010年、2020年3期土地利用数据分析云南省土地利用变化情况,并运用ArcGIS软件提取土地利用转移矩阵,分析云南省土地利用转移趋势。由图3可知,云南省的土地利用类型以林地为主,面积占比超总面积的50%,耕地和草地次之。2000—2020年耕地、草地、未利用地面积持续减少,林地面积呈先增后减趋势,而建设用地持续增加,耕地、草地和未利用地面积分别减少13.60、28.33、5.71  $\text{km}^2$ ,林地、水域和建设用地面积逐渐增加9.12、10.04、28.48  $\text{km}^2$ 。从空间分布看,滇东南、滇东北、滇西区域土地利用变化较为明显,滇中、滇东区域地类变化幅度不大。

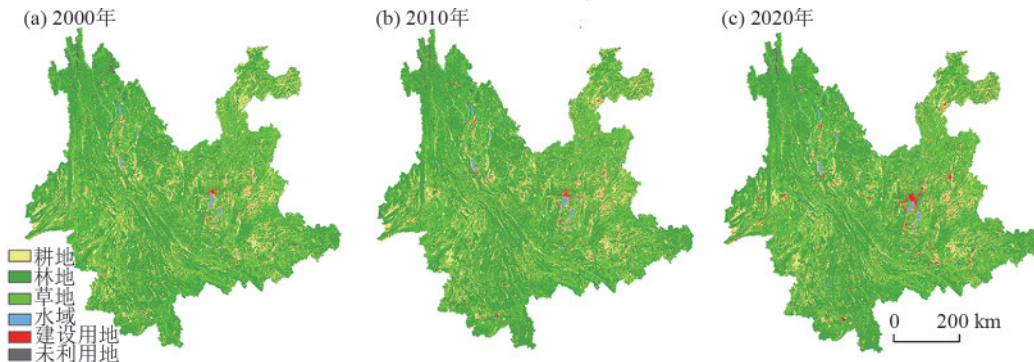


图3 云南省2000—2020年土地利用现状

Fig. 3 LUCC in Yunnan Province from 2000 to 2020

由图4可知,土地利用变化呈现出“一转多”的整体特征,建设用地的流出总量最少,而林地成为草地和耕地的主要接受者。此变化与保护生态环境的建设用地政策和退耕还林的实施密切相关。建设用地扩张占用大量耕地和草地,导致林地和草地之间的交换面积较大。总体而言,云南省土地利用变化受到自然地理条件、政策导向和经济发展的共同影响,呈现出建设用地扩张、林地面积增加及耕地和草地面积减少的趋势,对区域生态环境和可持续发展具有重要影响。

2.1.2 未来土地利用模拟 基于2000年、2010年、2020年的土地利用数据,使用PLUS模型预测2020年土地利用状况,Kappa系数为0.89,可信度高,精度满足

研究要求。

由图5可知,从土地利用转移概率上看,自然发展情景的土地利用不会出现大规模转移。从空间分布上看,自然发展情景与历史土地利用数据分布具有相似性,2030年云南省耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地面积分别为668.33、2190.35、852.75、46.94、62.14、15.42  $\text{km}^2$ ,相较于2010—2020年,2020—2030年土地利用变化虽有不同,但变化方向均一致,以建设用地和耕地变化明显,建设用地增加14.52  $\text{km}^2$ ,增幅为30.49%,耕地减少8.14  $\text{km}^2$ ,其他各地类的面积都处在上下波动的范围,变化不大。自然发展情景下,建设用地扩张明显,若要降低未来生态风险,需要在一定程度上限制建设用地扩张。

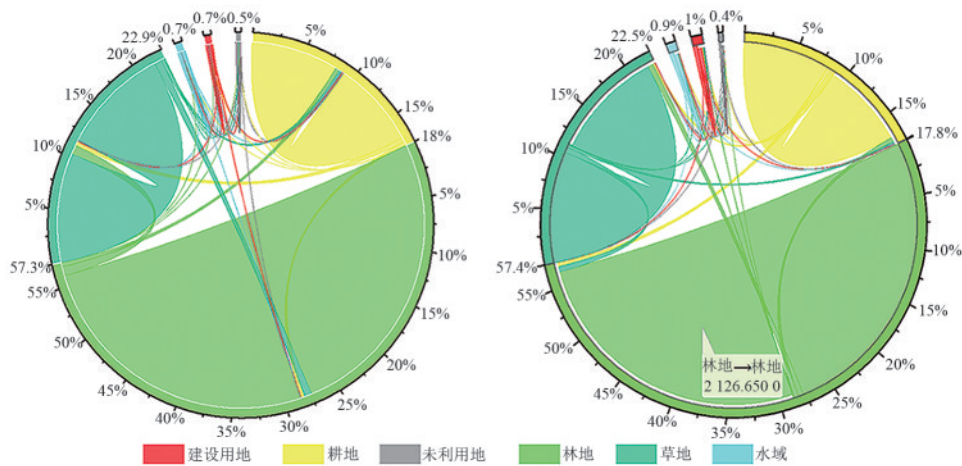


图 4 云南省 2000—2020 年土地利用转移弦图

Fig. 4 Chord diagram of LUCC transfer in Yunnan Province from 2000 to 2020

(a) 土地利用转移概率

(b) 自然发展情景土地利用

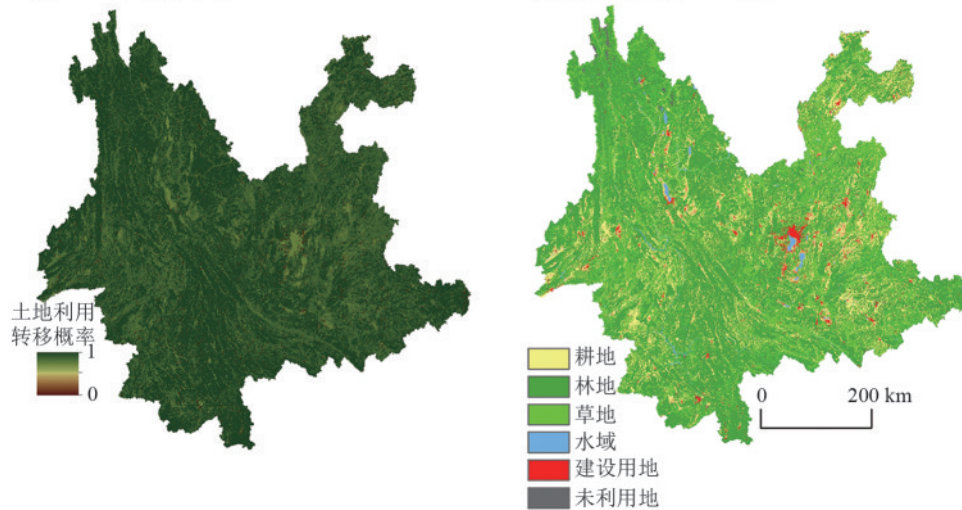


图 5 云南省自然发展情景土地利用与转移概率

Fig. 5 LUCC and transfer probabilities in Yunnan Province under the natural development scenario

### 2.2 生态退化度分析

根据云南省土地利用变化可知,2000—2030 年生态用地变化趋势一致,转为耕地的情况最明显,主要体现在林地、草地转为耕地;其次是生态用地转为建设用地,转入源为林地、草地、水域,草地转移较多。由图 6 可知,退化区域主要分布在开发建设的城市周边或农耕区域,这也是生态用地退化的主要原因。从转移时间看,2010—2020 年生态用地退化程度最明显,是由于这一时期云南省以经济建设为中心,城市扩张和基础设施建设速度加快,导致生态用地被大量占用,生态退化严重。随着生态文明理念的提出和生态保护政策的逐步落实,生态退化程度有所减缓。

### 2.3 生态系统服务功能评价

生态系统服务功能是根据 InVEST 模型量化得出,由表 2 可知,2000—2020 年,云南省 4 项主要生态系统服务功能均呈下降趋势。产水服务和土壤保持服务的减少最为显著,变化率分别为 16.33% 和

21.64%,而生境质量服务与碳储量服务的降幅较小,分别为 0.16% 和 1.39%,显示出不同服务功能下降速度的差异性。

由图 7 可知,生态系统服务功能空间分布呈“东低西高”的格局,与自然特征的关联性较强,尤其在西北部和南部地区更为突出。滇西北和西南区域的生态系统服务功能高值集中,与滇西北地区的高海拔导致城市发展有限、人类活动强度低、生态环境保存较为原始有关;滇西南地区则因气候温和、降雨量大和植被丰富,生态环境优越。相反,滇中的商业、教育和政治中心区域,由于人口密度大、人类活动强度高,生态系统服务功能较低。滇西南区域的石漠化问题也严重影响生态系统服务功能的发挥,导致该区域服务功能较低。总体而言,2000—2020 年云南省生态系统服务功能的退化,反映经济发展与生态保护之间的矛盾。未来需要进一步加强生态保护政策的落实,优化土地利用方式,以实现生态系统服务功能的恢复和提升。

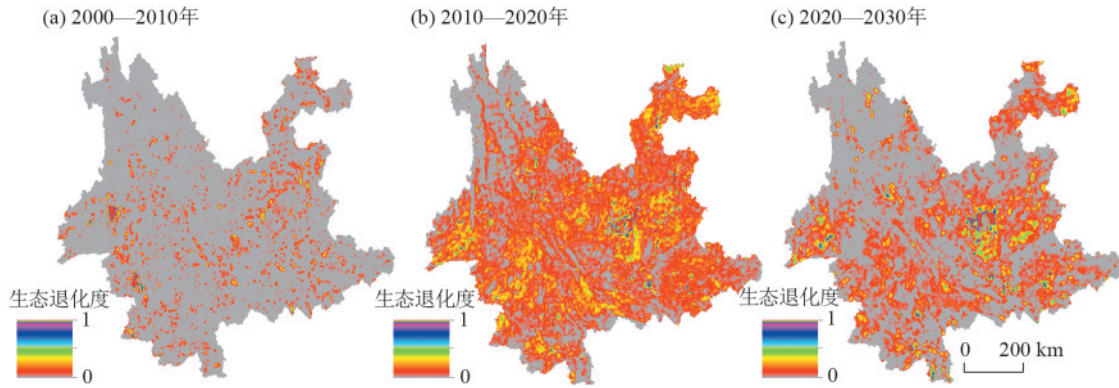


图 6 云南省 2000—2030 年生态退化度分布

Fig. 6 Distribution of ecological degradation degree in Yunnan Province from 2000 to 2030

表 2 生态系统服务功能均值

Table 2 Average values of ecosystem service functions

年份	产水量/mm	碳储量/t	水土保持/t	生境质量
2000	971.22	19.17	5 922.62	0.72
2010	873.68	19.24	5 501.61	0.71
2020	812.58	19.14	4 641.22	0.71

### 2.4 潜在生态风险评价

2.4.1 生态系统服务变化指数 生态系统服务变化指数根据综合生态系统服务功能作差求得。2000—2030 年,云南省综合生态系统服务功能整体平均值为负,总体呈现下降趋势,但不同区域变化幅度不一致,一些区域的生态系统服务明显提升(图 8),可能与当地生态保护措施加强和生态修复工程推进有关。

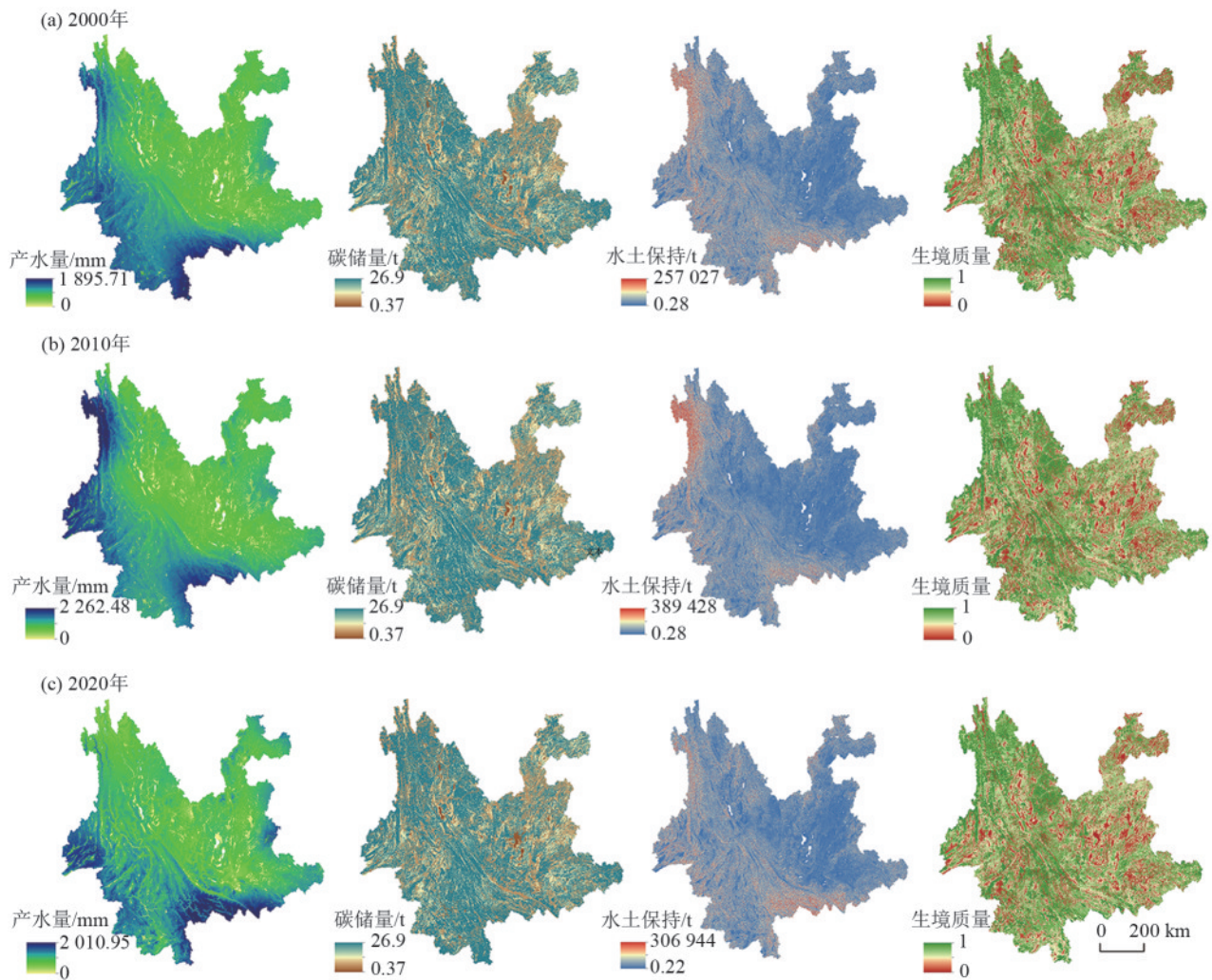


图 7 云南省 2000—2020 年生态系统服务功能分布

Fig. 7 Distribution of ecosystem service functions in Yunnan Province from 2000 to 2020

生态系统服务变化指数的颜色从深到浅,颜色越深表明其变化越大,2000—2030年生态系统服务变化指数的最大值分别为0.64、0.67、0.62,怒江、保山、德宏、西双版纳等5个地区的生态系统服务变化指数表现出由负转正的趋势,楚雄、文山、曲靖、昭通等区域生态系统服务指数变化幅度减小,结果表明“退耕还林还草”政策的实施,使得林地面积和植被覆盖度增加,从而提升土壤保持服务和碳储量服务功能。2010—2020年云南省在石漠

化区域实施水土保持重点工程,治理大量水土流失区域,水土流失面积显著减少,使得生态系统服务功能增强,这些地区的成功经验可为云南省其他区域提供借鉴,体现政策引导与生态保护结合的重要性,以实现更全面的生态系统服务功能提升。同时,也提出在生态系统服务功能提升过程中需要面对的挑战,包括如何在经济发展与生态保护之间找到平衡点,以及如何有效地实施和推进生态修复工程。

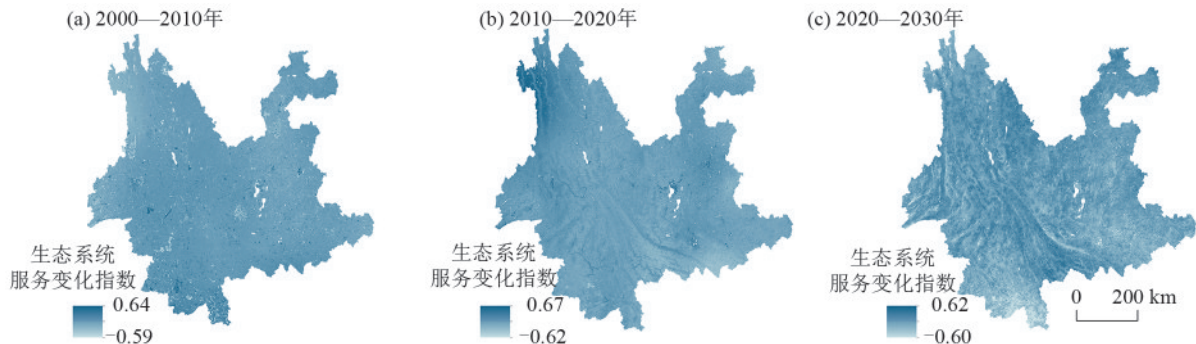


图 8 云南省 2000—2030 年生态系统服务变化指数分布

Fig. 8 Distribution of ecosystem service change indices in Yunnan Province from 2000 to 2030

2.4.2 生态系统服务权衡与协同指数 由图9可知,云南省生态系统服务功能权衡与协同指数的空间特征明显,滇中和滇东北地区权衡与协同指数都高于0.6表明生态服务功能间冲突显著;滇西南和西北地区权衡与协同指数低于0.5,显示出较强的协同作用。滇中

和滇东北地区的高权衡指数可能与经济发展、城镇化扩张和农业活动对自然环境的压力有关,导致生态服务功能间的冲突加剧。滇西南和西北地区由于自然资源丰富和土地开发强度较低,生态系统服务功能能够较好地协同发挥,维持较高的服务能力。

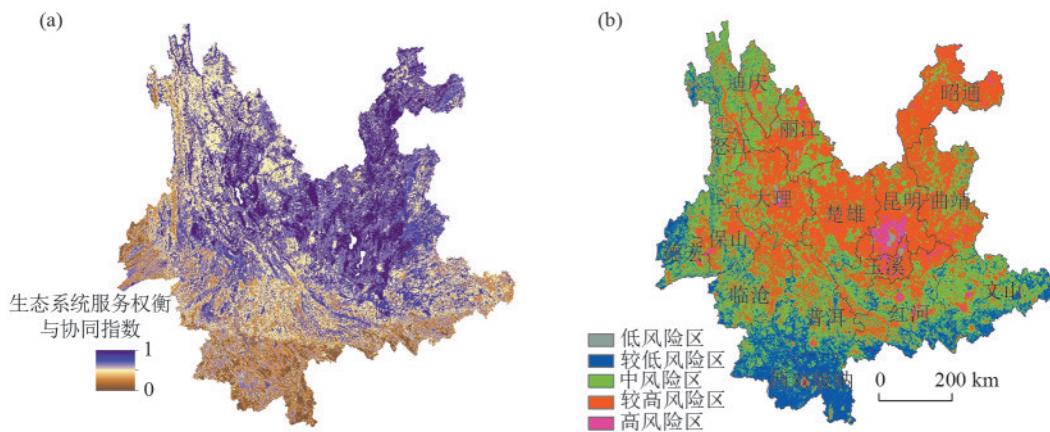


图 9 云南省权衡与协同指数分布与生态风险分级

Fig. 9 Trade-off and synergy index distribution and ecological risk grading map of Yunnan Province

不同区域的生态服务功能特征要求制定针对性的保护措施。高权衡指数区域需限制不合理土地开发,优化土地利用结构,减少生态服务功能冲突。低权衡指数区域应继续保持自然资源保护,合理规划土地利用,以保持生态服务功能的协同作用。跨区域合作和政策协调对于实现区域生态服务功能的优化和提升至关重要。通过共享最佳实践和协调土地利用政策,根据生态保护的系统性和协同性,采用分区管控和其他生态修复的具体措施,可以减少人类

活动对生态系统的负面影响,保护和提升云南省的生态服务功能。

2.4.3 生态风险评价结果 生态风险是以土地利用转移概率代表风险发生概率,生态退化度、生态系统服务功能变化指数、权衡与协同指数代表风险损失,通过风险概率与损失模型评价生态风险。由图9可知,2020—2030年滇中的潜在生态风险相对较高,滇西南、滇西北的生态风险较低。由表3可知,较高、高风险区占云南省总面积44.9%,整体生态风险水平不

高,但其形成机制多样,且存在显著的空间差异。风险区的分布特征和变化趋势受到自然条件、社会经济因素的综合影响,低风险区主要集中在部分区域,而高风险区则多分布在地形复杂、人口密集或经济发达的地区。丽江、大理、楚雄、昆明、昭通一带沿金沙江流域,具有提供生态系统服务功能的潜力,但地区海拔较高、地形起伏度大,导致生态稳定性受到威胁,从而生态风险较高;红河、保山林草植被覆盖率

低,生物多样性低,水土流失严重,同时人口剧增,土地过度开发,导致区域生态环境脆弱,从而使得生态风险处在较高水平;曲靖植被覆盖率高,但林地覆盖率低且耕地大面积分布,导致生态退化,整体生态风险偏高;热带雨林主要分布在西双版纳州、普洱市和临沧市东部地区,这些区域森林覆盖率高、自然资源丰富并且本身较高的生态系统服务功能,所以风险水平较低。

表 3 云南省各州市生态风险区面积

行政区	低风险区	较低风险区	中风险区	较高风险区	高风险区
保山	4 442.23(2.32)	1 846.93(9.70)	8 939.74(46.93)	7 618.62(40.00)	201.02(1.06)
楚雄	580.04(2.04)	351.49(1.24)	6 639.19(23.34)	20 727.46(72.88)	144.08(0.51)
大理	680.23(2.40)	373.45(1.32)	8 446.89(29.86)	18 378.16(64.97)	407.80(1.44)
德宏	522.11(4.68)	3 789.31(33.99)	5 539.32(49.68)	1 237.49(11.10)	61.22(0.55)
迪庆	707.52(3.05)	1 499.29(6.47)	14 276.68(61.60)	6 491.87(28.01)	200.74(0.87)
红河	895.72(2.77)	5 543.85(17.17)	13 830.11(42.84)	11 336.92(35.12)	673.04(0.30)
昆明	1 064.34(5.05)	83.28(0.40)	2 592.67(12.30)	14 496.39(68.77)	2 842.74(13.49)
丽江	571.01(2.78)	176.35(0.86)	7 660.38(32.27)	11 858.15(57.69)	289.11(1.41)
临沧	675.60(2.86)	2 701.31(11.42)	11 087.16(46.89)	9 174.52(38.80)	8.46(0.04)
怒江	481.41(3.30)	2 150.64(14.75)	8 466.23(58.05)	3 447.10(26.03)	39.92(0.27)
普洱	1 162.88(2.63)	14 008.21(31.66)	20 254.02(45.77)	8 753.56(19.78)	69.33(0.16)
曲靖	760.45(2.62)	394.05(1.36)	7 761.34(26.70)	19 933.73(68.58)	217.00(0.75)
文山	973.09(3.07)	7270.15(22.96)	18 664.70(58.95)	4 593.69(14.51)	160.14(0.51)
西双版纳	746.34(3.91)	14 698.76(77.08)	3 232.05(16.95)	292.45(1.53)	99.60(0.52)
玉溪	693.17(4.63)	784.66(5.24)	4 624.44(30.90)	8 031.51(53.66)	832.79(5.56)
昭通	984.14(4.36)	18.69(0.08)	2 020.65(8.96)	19 158.31(84.92)	377.96(1.68)

注:括号中数据为生态风险区面积占比,%。

### 3 讨论

#### 3.1 生态风险分析

本文从土地利用与生态系统服务的角度出发,针对云南省区域间差异明显现实状况,选用多个指标构建耦合评价模型,以提升生态风险评价的精确性与科学性,研究结果与胥蕊等<sup>[26]</sup>的研究存在一定程度的吻合。云南省实施一系列的生态修复政策,这些生态治理的正面效应抵消建设用地扩张引起的负面影响,在降低生态风险中取得显著成效。昭通市、曲靖市、文山州和红河州等地区高脆弱度耕地大面积分布,低脆弱度耕地向建设用地的转移,导致生态退化严重,生态系统服务功能下降<sup>[27]</sup>。2000—2030年曲靖和文山等地整体生态系统有所改善,显示土地利用变化可提升生态服务功能<sup>[28]</sup>。不同区域生态系统服务功能差异显著,区域间的权衡与协同效应对于降低生态风险至关重要,不仅涉及在生态保护和经济发展之间寻求平衡,以实现生态功能的最大化,而且还包括促进二者之间的和谐发展,确保

生态保护与经济增长相辅相成。

通过叠加云南省生态安全格局(图 10)可知,青藏高原东南缘生态屏障在保护独特生态系统和生物多样性方面具有重要作用,同时也是众多河流的发源地,承担着涵养水源和调节气候的功能,因此生态风险级别较低。哀牢山和无量山生态屏障对于保障滇中区域的生态安全发挥着关键作用,但由于石漠化和水土流失的影响,生态风险较高。金沙江流域城市虽具有较强的生态服务潜力,但由于高海拔和复杂的地形,生态稳定性受到威胁,导致该地区生态风险较高。干热河谷地带植被覆盖率较低,生物多样性匮乏,水土流失严重,造成区域生态环境的脆弱性,并加剧生态风险。尽管一些区域通过实施生态保护政策和修复工程展示出一定的恢复潜力,但整体上生态系统衰退的趋势仍然显著。因此,生态保护政策和修复工程的实施对于恢复和维持生态系统服务功能至关重要,但更全面和长远的策略是应对生态系统服务衰退趋势的关键。

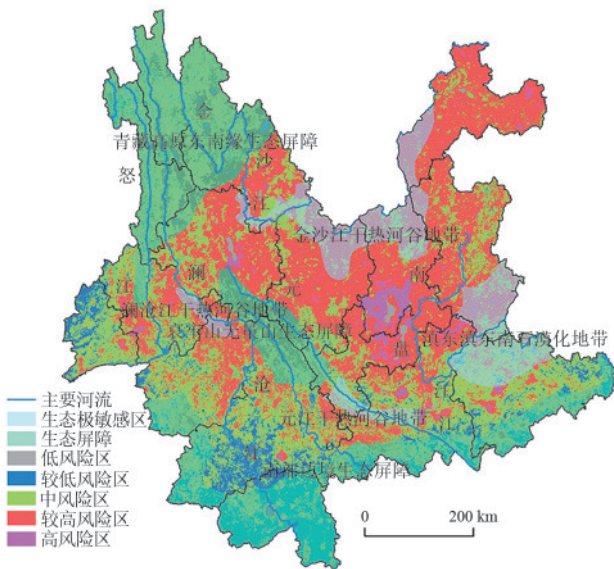


图10 云南省生态安全格局

Fig.10 Ecological security pattern of Yunnan Province

### 3.2 建议措施

城市化进程的加快将促进建设用地的扩张,结合自然发展情景的土地利用变化趋势,未来云南省亟须制定有效的生态保护政策,推动生态系统服务的恢复与提升,如优化土地利用、加强自然保护区管理、推动生态旅游及改善水土保持措施等。不同区域的生态风险特征要求制定针对性的保护措施。滇中等高风险区域需限制不合理土地开发,优化土地利用结构,减少生态服务功能冲突。滇西南和滇西北等低风险区域应继续保持自然资源保护,合理规划土地利用,以保持生态服务功能的协同作用,通过综合治理与可持续发展的策略,针对高风险区域采取正确措施,能有效应对潜在生态风险,确保生态环境的稳定与社会经济的和谐发展。为应对土地利用变化对生态系统服务的影响,制定科学的土地管理政策显得尤为重要,包括保护未利用地和水域,防止生态退化,促进生态系统的恢复和保护,从而增强生态服务功能,为可持续发展奠定基础。

### 3.3 未来展望

本研究充分参考前人的生态风险评价方法,创新性地挖掘数据关系,并将生态系统服务的权衡与协同效应纳入生态风险评价模型,使其更加准确。但由于数据收集问题,未将生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界纳入自然发展情景的土地利用模拟,导致结果与实际可能出现偏差。因此,在未来的研究中,可将三线数据作为限制因素纳入未来土地利用模拟,使结果更符合实际。

## 4 结论

1)云南省2030年自然发展情景下的土地利用虽有不同,但变化程度均一致,耕地、林地、草地间的转换较为明显,建设用地仍然呈扩张趋势。在空间分布上,自然发展情景与历史土地利用数据分布具有相似性。

2)云南省生态系统服务功能整体呈现“东低西高”的格局,滇西北和西南为高值区,滇中及东北为低值区,且整体服务功能呈下降趋势。怒江、保山、德宏和西双版纳生态服务功能呈增强趋势,滇中和滇东北权衡与协调指数较高,生态系统服务间功能冲突明显。

3)2020—2030年云南省的潜在生态风险存在显著的空间差异。高风险区主要分布在滇中城市群,低风险区分布在滇东南与滇西南,风险区的形成受自然因素如地形、土地利用分布影响,以及人类活动如城市开发和建设的影响,需针对区域间特异性差异采取生态保护措施以促进可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 张欣欣,金晓斌,梁坤宇,等.社会-生态系统视角下快速城市化地区生态风险评价与管控分区:以江苏省为例[J].生态学报,2024,44(18):8138-8149.  
ZHANG X X, JIN X B, LIANG K Y, et al. Ecological risk assessment and management zoning in rapid urbanization areas from the perspective of social-ecological system: A case study of Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8138-8149.
- [2] 傅伯杰,田汉勤,陶福祿,等.全球变化对生态系统服务的影响研究进展[J].中国基础科学,2020,22(3):25-30.  
FU B J, TIAN H Q, TAO F L, et al. Progress of the impact of global change on ecosystem services[J]. China Basic Science, 2020, 22(3): 25-30.
- [3] 刘宇.呼包鄂榆城市群生态风险评价及预测模拟研究[D].呼和浩特:内蒙古财经大学,2024.  
LIU Y. Study on ecological risk assessment and prediction simulation of Hubao Eyu urban agglomeration[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Finance and Economics, 2024.
- [4] XU M L, MATSUSHIMA H. Multi-dimensional landscape ecological risk assessment and its drivers in coastal areas[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: e168183.
- [5] 曾建军,邹明亮,郭建军,等.生态风险评价研究进展综述[J].环境监测管理与技术,2017,29(1):1-5.  
ZENG J J, ZOU M L, GUO J J, et al. Ecological risk assessment and its research progress[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2017, 29(1): 1-5.

- [6] 朱青,蔡永立.生态风险与生态系统健康对生态系统服务的影响[J].地理学报,2024,79(5):1303-1317.  
ZHU Q, CAI Y L. Impact of ecological risk and ecosystem health on ecosystem services [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(5): 1303-1317.
- [7] 刘志强.土地利用变化驱动下景观生态风险评价研究:以赣州市为例[D].江西赣州:江西理工大学,2022.  
LIU Z Q. Study on landscape ecological risk assessment driven by land use change: A case study of Ganzhou City [D]. Jiangxi Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [8] 杨旭,信桂新,蒋好雨,等.基于最佳尺度的景观生态风险时空变化研究:以重庆市江津区为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):576-586.  
YANG K, XIN G X, JIANG H Y, et al. Study on spatiotemporal changes of landscape ecological risk based on the optimal spatial scale: A case study of Jiangjin district, Chongqing City [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(5): 576-586.
- [9] 丁鸿浩,贺宏斌,孙然好.景观变化的生态风险评价与预测:以河南省洛阳市为例[J].地域研究与开发,2023,42(1):167-173.  
DING H H, HE H B, SUN R H. Dynamic assessment and driving factors of landscape ecological risk based on LUCC: A case study of Luoyang City in Henan Province [J]. Areal Research and Development, 2023, 42(1): 167-173.
- [10] 朱家兵,吴建廷,张华,等.基于相对风险模型的区域生态风险评价[J].科学技术与工程,2024,24(7):3020-3033.  
ZHU J B, WU J T, ZHANG H, et al. Regional ecological risk assessment based on relative risk model [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(7): 3020-3033.
- [11] 鲁钰,赵银娣,董霁红.西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J].生态学报,2022,42(4):1354-1367.  
LU Y, ZHAO Y D, DONG J H. Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint in northwestern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1354-1367.
- [12] KANG L X, YANG X, GAO X, et al. Landscape ecological risk evaluation and prediction under a wetland conservation scenario in the Sanjiang Plain based on land use/cover change [J]. Ecological Indicators, 2024, 162: e112053.
- [13] 于芝琳,赵明松,高迎凤,等.基于InVEST-PLUS模型的淮北市碳储量时空演变及预测[J].环境科学,2024,45(6):3270-3283.  
YU Zhilin, ZHAO Mingsong, GAO Yingfeng, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Huaibei city based on InVEST-PLUS model [J]. Environmental Science, 2024, 45(6): 3270-3283.
- [14] CAI G, XIONG J F, WEN L S, et al. Predicting the ecosystem service values and constructing ecological security patterns in future changing land use patterns [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: e110787.
- [15] 郑乐乐,马小雯,安翔,等.基于DPSIR-GM(1,1)模型的甘肃省生态安全评价与预测[J].生态科学,2022,41(4):60-69.  
ZHENG L L, MA X W, AN X, et al. Evaluation and prediction of ecological security in Gansu Province based on DPSIR-GM (1, 1) model [J]. Ecological Science, 2022, 41(4): 60-69.
- [16] 娄妮,王志杰,何嵩涛.基于景观格局的阿哈湖国家湿地公园景观生态风险评价[J].水土保持研究,2020,27(1):233-239.  
LOU N, WANG Z J, HE S T. Assessment on ecological risk of Aha Lake national wetland park based on landscape pattern [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 233-239.
- [17] 赵越,罗志军,李雅婷,等.赣江上游流域景观生态风险的时空分异:从生产-生活-生态空间的视角[J].生态学报,2019,39(13):4676-4686.  
ZHAO Y, LUO Z J, LI Y T, et al. Study of the spatiotemporal variation of landscape ecological risk in the upper reaches of the Ganjiang River basin based on the "production-living-ecological space" [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4676-4686.
- [18] 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(6630): 253-260.
- [19] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.  
PENG J, DANG W X, LIU Y X, et al. Review on landscape ecological risk assessment [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664-677.
- [20] 武泽民,余哲修,李瑶,等.滇池流域土地利用演变及景观生态安全评价研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(3):122-129.  
WU Z M, YU Z X, LI Y, et al. The study of land use evolution and landscape ecological security evaluation in Dianchi Lake basin [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(3): 122-129.
- [21] 袁媛,罗志军,赵杰,等.基于景观结构和空间统计学的南昌市景观生态安全评价[J].水土保持研究,2020,27(3):247-255.  
YUAN Y, LUO Z J, ZHAO J, et al. Landscape ecological security evaluation of Nanchang City based on landscape structure and spatial statistics [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 247-255.

(下转第 246 页)