

引用格式: 李玲, 王震, 王克勤, 等. 西南高山峡谷区生态系统服务评估及多情景模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 813–824. LI Ling, WANG Zhen, WANG Keqin, *et al.* Ecosystem service assessment and multi-scenario simulation in southwest alpine canyon region[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 813–824.

西南高山峡谷区生态系统服务评估及多情景模拟

李 玲¹, 王 震¹, 王克勤¹, 李亦然¹, 李选平², 马艳波³, 杨 锦¹, 冯小纹¹

(1. 西南林业大学 水土保持学院, 云南 昆明 650224; 2. 永胜县水土保持委员会, 云南 永胜 674200; 3. 永胜县程海电力抽水站, 云南 永胜 674202)

摘要: 【目的】分析西南高山峡谷区的土地利用变化和不同情景下生态系统服务演变规律, 能够为该地区的生态环境保护 and 未来发展提供理论依据。【方法】基于中国土地覆盖数据集 (CLCD) 分析区域内土地利用的变化规律, 运用 InVEST 模型评估 2002—2022 年西南高山峡谷区 4 种生态系统服务 (产水量、碳储存、生境质量和土壤保持量) 的时空演变规律。利用 PLUS 模型模拟 2032、2042、2052 年不同情景下的土地利用空间分布格局, 结合 InVEST 模型评估未来不同情境下西南高山峡谷区 4 种生态系统服务的演变规律。【结果】①2002—2022 年西南高山峡谷区土地利用类型以林地和草地为主, 均占总面积的 44% 以上, 土地利用转移集中在林地、耕地、草地。②2002—2022 年西南高山峡谷区 4 种生态系统服务的产水量降低, 碳储量增加, 生境质量增加, 土壤保持量降低。③2032—2052 年在自然发展情景下 4 种生态系统服务功能平均值都有所增加, 耕地保护发展情景下 4 种生态系统服务功能平均值都有所降低, 经济优先发展情景下产水量和土壤保持量降低, 碳储量和生境质量增加。【结论】西南高山峡谷区地形复杂, 区域内林地和草地面积较多, 碳储量和生境质量整体情况较好, 但大量雪域和未利用地也导致产水量、土壤保持量都降低。图 9 参 39

关键词: 生态系统服务; 土地利用变化; InVEST; PLUS; 多情景模拟; 高山峡谷区

中图分类号: F062.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)04-0813-12

Ecosystem service assessment and multi-scenario simulation in southwest alpine canyon region

LI Ling¹, WANG Zhen¹, WANG Keqin¹, LI Yiran¹, LI Xuanping², MA Yanbo³, YANG Jin¹, FENG Xiaowen¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Yongsheng County Soil and Water Conservation Committee, Yongsheng 674200, Yunnan, China; 3. Yongsheng County Chenghai Power Pumping Station, Yongsheng 674202, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] As an important ecological barrier area in China, the southwest alpine canyon region requires analysis of land use change and ecosystem services under different scenarios. This study aims to provide a theoretical basis for ecological environment protection and future development. [Method] Based on the China Land Cover Dataset (CLCD), this paper analyzed the patterns of land use change in the region, and used the InVEST model to evaluate the spatial-temporal evolution rules of 4 types of ecosystem services (water yield, carbon storage, habitat quality, soil conservation) in southwest alpine canyon region from 2002 to 2022. The PLUS model was used to simulate the spatial distribution pattern of land use in 2032, 2042 and 2052 under different scenarios. And integrating the InVEST and PLUS model to evaluate the evaluated law of 4 types of ecosystem services in southwest alpine canyon region under different scenarios. [Result] (1) From 2002 to

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2025-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302904); 云南省基础研究专项-青年项目 (202401AU070122)

作者简介: 李玲 (ORCID: 0009-0003-7600-4649), 从事区域内生态系统服务价值评估研究。E-mail: liling_98@swfu.edu.cn。通信作者: 王震 (ORCID: 0009-0008-1968-3178), 讲师, 博士, 从事流域水文模型、非点源污染及综合治理研究。E-mail: wangzhen@swfu.edu.cn

2022, the land use types in the southwest alpine canyon region were mainly forest and grassland, each accounting for more than 44% of the total area. During the period, the transfer of land use was concentrated in forest, cropland and grassland. (2) From 2002 to 2022, the average water yield in southwestern alpine canyon region decreased, the average carbon storage increased, the average habitat quality improved, the average soil conservation decreased. (3) From 2032 to 2052, under the natural development scenario, the average values of 4 types of ecosystem service functions all increased; under the cultivated land protection scenario, the average values of 4 types of ecosystem service functions all decreased; under the economic priority scenario, the average values of water yield and soil conservation amount decreased, while the average values of carbon storage and habitat quality increased. [Conclusion] The terrain in southwest alpine canyon region was complex. There was a relatively large area of forest land and grassland in the region, and the overall situation of carbon storage and habitat quality was relatively good. However, a large amount of snow-covered areas and unused land also led to a decrease in both water yield and soil conservation amount. [Ch, 9 fig. 39 ref.]

Key words: ecosystem services; land use change; InVEST; PLUS; multi-scenario modeling; alpine canyon region

生态系统服务是指生态系统能够为人类生产生活提供的直接物质资料或间接无形服务等^[1]。土地利用变化是改变生态系统最主要的方式^[2],随着区域城镇化和工业化的迅速发展,区域内的土地利用类型显著改变,导致生态系统服务功能严重损害^[3]。西南高山峡谷区地形复杂、山高坡陡,气候类型独特且雨季较集中,部分区域土壤侵蚀严重,导致生态系统相对脆弱,经济发展缓慢^[4]。该区域是生态环境重点保护区,区域内多项生态系统服务功能有所降低^[5]。因此,对该区域的生态系统服务进行评估,可以为制定生态保护规划与管理制度等提供参考依据。

生态系统服务评估方法主要有模型综合法、遥感定量法以及基于土地利用数据的单位面积价值当量因子法等^[6]。运用较多的模型综合法是基于 InVEST、MIMES、NAIS、BTUEM 等模型,综合多源数据、调查实验和地理信息系统 (GIS) 技术等对生态系统服务及其价值进行评估^[7-8]。其中 InVEST 模型因数据需求低、运算高效及高精度等优点^[9],能够量化分析多种生态系统服务,绘制区域内空间分布图,有利于揭示生态系统服务的变化情况^[10]。产水量定量评估有利于探究区域内水资源的动态变化,对维持水源涵养具有重要的现实意义^[11]。在全球碳循环体系中,陆地生态系统中的碳储量占据着重要的地位^[12]。不同土地利用类型在碳储量能力上存在显著差异,不同阶段政策影响下的人类活动会引起土地利用变化,从而导致碳储量变化^[13]。生境质量是指生态系统提供的适宜个体与种群持续生存和发展的能力,可作为衡量一个地区生态健康状态及可持续状态的关键指标^[14]。土壤侵蚀问题是人类生存发展过程中面临的重大环境问题,极大地影响着人类社会的可持续发展^[15]。

分析土地利用的历史演变对生态系统服务的影响,有助于预测未来生态系统服务的变化,从而为生态环境保护与未来发展策略提供坚实的理论依据。建立土地利用变化模型是探究土地覆盖变化研究的主要方法。当前应用较广的土地利用模型中,PLUS 模型与 CA-Markov、FLUS、CLUE-S 等模型相比,具有深入挖掘土地覆盖变化驱动因素的能力,能够高效模拟各种地类在未来复杂多变的演化过程^[16]。众多学者^[17-19]利用 PLUS 模型对不同发展情景下的土地利用情况进行预测,再耦合 InVEST 模型对不同地区产水量、碳储量、生境质量等生态系统服务功能指标进行评估,分析不同发展情景下各项指标的变化情况和时空分布特征。以上 2 种模型耦合能够实现历史和未来时期不同生态系统服务功能指标的评估及对比,反映不同发展情景下区域生态系统服务功能的差异。

为此,本研究利用 InVEST 模型对西南高山峡谷区 2002—2022 年的产水量、碳储存、生境质量、土壤保持量等 4 种生态系统服务进行分析,运用 PLUS 模型对该地区 2032—2052 年自然发展情景、耕地保护发展情景、经济优先发展情境下的土地利用类型变化进行预测,再运用 InVEST 模型对 3 种情景下的 4 种生态系统服务进行评估,以期为区域生态环境治理、保护以及推动地区高质量发展提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西南高山峡谷区地处四川省、云南省和西藏自治区交界地带 ($24^{\circ}58'7.47''\sim 32^{\circ}51'24.93''\text{N}$, $91^{\circ}23'48.24''\sim 104^{\circ}13'43.55''\text{E}$), 包含 12 个地级市、88 个县区, 面积为 60 万 km^2 。该区地处大横断“七脉六江”, 海拔为 84~7 083 m, 地形以山脉和高原为主, 分为藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区 (I)、藏东南高寒峡谷生态区 (II)、滇西北高山峡谷生态维护区 (III)、滇北—川西西南高山峡谷蓄水保护区 (IV)(图 1)。气候属于亚热带季风气候和高原山地气候, 气温为 $-3\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, 降水量为 296~2 302 mm, 雨季较集中, 土壤和植被类型丰富。西南高山峡谷区少数民族聚集, 种植模式各具特色, 规模化种植下集约化程度高, 经果林水土流失等问题突出, 限制了生态产业的可持续发展。由于特殊地形、地质和气候条件, 区域内生态环境脆弱, 属于国家生态环境重点保护区域。

1.2 数据来源

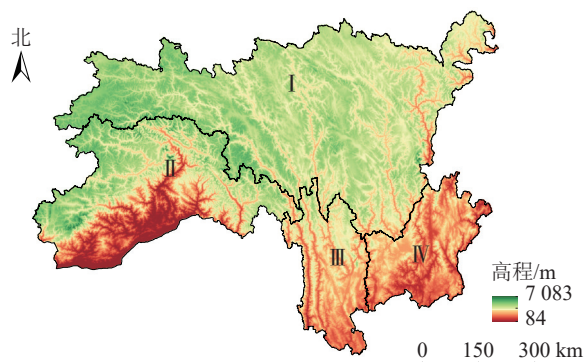
本研究选取地形数据 [数字高程模型 (DEM)、坡度、公路、河流、道路], 经济数据 [人口密度、国内生产总值 (GDP)], 气候数据 (降水量、蒸散量) 作为影响土地利用变化的驱动因素进行分析。通过地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>) 下载地区土地利用类型变化驱动因子 DEM 资料, 由 DEM 处理得到坡度数据; 通过全国地理信息资源目录服务 (<https://www.webmap.cn/>) 下载公路、河流、道路数据; 通过中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 下载社会经济数据 (人口密度、GDP); 通过国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 下载气候数据 (降水量、蒸散量)。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用及转移矩阵 根据中国土地覆盖数据集 (CLCD), 将研究区划分为耕地、林地、草地、水域、雪域、建设用地和未利用地等 7 类, 并通过土地利用转移矩阵定量反映研究区 5 期 (2002、2007、2012、2017、2022 年) 不同土地利用类型间的相互转换情况。土地利用转移矩阵不仅包含研究初期和末期的土地利用信息, 也反映研究时段内各土地利用类型面积转入与转出的详细信息^[20]。

1.3.2 InVEST 模型 InVEST 模型是量化生态系统服务功能及其经济价值的综合评估模型^[10]。本研究选取 4 种生态系统服务, 分别是: ①产水量模块。基于水量平衡原理, 定义每个栅格单元的产水量为降水量减去蒸散量 (含植物蒸腾与地表蒸发) 后的剩余水量^[11]。②碳储量模块。碳储存模块由四大碳库构成: 地上碳库、地下碳库、凋落物碳库、土壤碳库。碳储存总量通过各碳库的平均碳密度与其对应的面积相乘所得^[21]。InVEST 模型碳储量模块运行需要输入研究区各地类碳密度, 通常采取的方式是查阅相关文献与前人的研究成果^[22-23]。③生境质量模块。这一模块以土地利用数据为基础, 综合考虑外界威胁因子、生境质量适宜度及各地类对威胁因子的敏感度^[24]。不同威胁源的权重取值通过相关研究^[25-26]和 InVEST 模型手册获得, 在此基础上考虑研究区的特殊性, 选用耕地、建设用地和未利用地为威胁因子, 并对其权重进行赋值。每种生境对不同威胁源的相对敏感度结合当地实际情况, 并参考相关研究^[27]对生境适宜度和敏感性进行赋值。④土壤保持量模块。基于通用土壤流失方程, 土壤保持总量通过从潜在土壤流失量中减去实际土壤流失量计算得出, 实际土壤流失量要考虑植被覆盖因子与土壤保持措施因子的影响^[25]。

1.3.3 PLUS 模型土地利用变化模拟 PLUS 模型融合了基于土地扩张分析策略 (LEAS) 的规则挖掘框架, 并且采用了多类型随机种子 (CARS) 的斑块级土地利用模拟模型^[28]。PLUS 模型运行前使用



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作, 底图边界无修改。I 区. 藏东—川西高山峡谷生态维护水源涵养区; II 区. 藏东南高寒峡谷生态区; III 区. 滇西北高山峡谷生态维护区; IV 区. 滇北—川西西南高山峡谷蓄水保护区。

图 1 西南高山峡谷区高程及二级区划示意图

Figure 1 Elevation and secondary zoning map of southwest alpine canyon

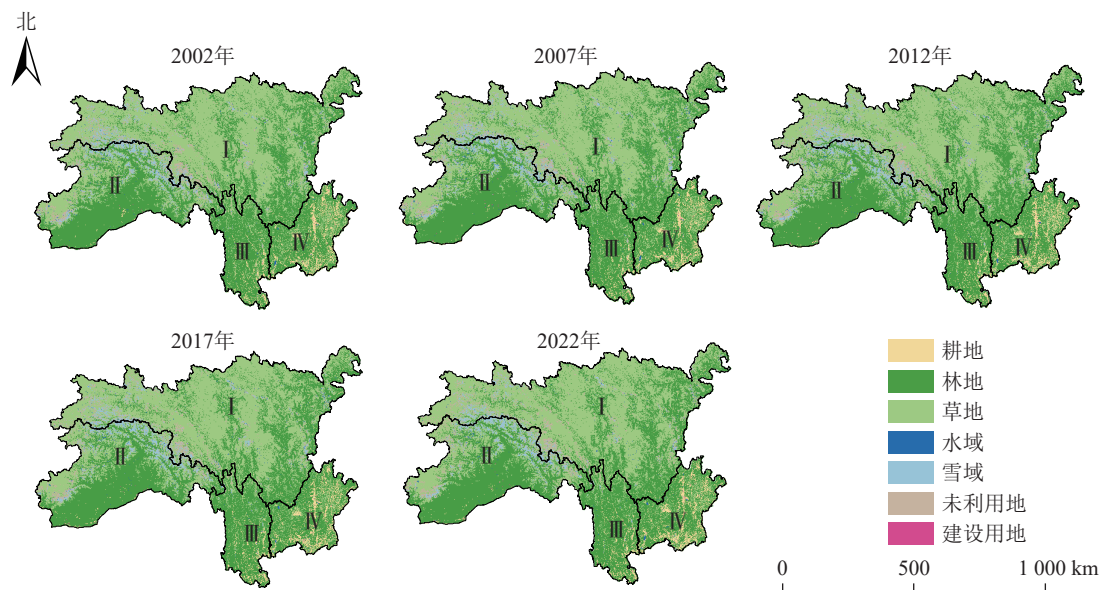
Kappa 系数评估模型的准确性, 以 2002 和 2012 年实际土地利用数据为基准, 利用 PLUS 模型中的 Markov 预测得到 2022 年土地利用数据, 与实际的 2022 年土地利用数据进行对比, 验证结果显示 Kappa 系数为 0.80, 表明模拟结果具有高准确性。

基于西南高山峡谷区土地、经济、社会发展情况, 在 PLUS 模型中设定自然发展情景、耕地保护发展情景、经济优先发展 3 种发展情景 (2032、2042、2052 年) 代表研究区未来发展的方向^[28]。①自然发展情景。自 1999 年国家实行退耕还林政策以来, 前期耕地向林地大幅度转移, 所以预测西南高山峡谷区未来土地利用情况时将耕地向林地的转移概率减少 20%^[29], 不改变其余地类转换。②耕地保护发展情景。耕地是粮食安全的载体, 结合研究区情况, 在 CARS 模块中限制耕地向其他土地利用类型转移, 并将耕地向建设用地的转移概率减少 60%^[30-31]。③经济优先发展情景。在 CARS 模块中限制建设用地向其他地类转移, 将耕地、林地、草地转化为建设用地的概率上调 20%, 建设用地向其他类型转变的概率降低 30%^[32], 以及将未利用地向建设用地转变的概率提高 60%^[33]。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

如图 2 所示: 研究区的主要土地利用类型为林地和草地, 均占总面积的 44% 以上, 林地主要分布在 II 区南部、III 区和 IV 区, 草地主要分布在 II 区北部和 I 区。建设用地面积最少, 占总面积的 0.03%, 分布在地势较为平缓的 III 区和 IV 区, 所以这 2 个区域人口较其余区域分布较多。



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作, 底图边界无修改。I、II、III、IV 所表示含义同图1。

图 2 2002—2022 年西南高山峡谷区的土地利用变化示意图

Figure 2 Changes of land use types in southwest alpine canyon region from 2002 to 2022

由图 3 可见: 2002—2022 年土地利用转移集中在林地、耕地、草地之间, 在国家退耕还林政策实施下, 林地面积共增加了 7 340 km², 耕地、林地的转换变动远大于其他土地利用类型之间的转换, 草地的总转出量大于转入量, 面积减少 11 965 km²。

2.2 生态系统服务分析

从图 4 可以看出: 2002—2022 年, 西南高山峡谷区产水量平均值呈先降低后增加再降低的趋势。产水量高的 II 区以林地、水域和雪域为主, 地势较高, 受人类活动影响较小; 产水量低的区域主要分布在 I 区和 IV 区, 土地类型以草地为主, 有相对较多的建设用地和耕地, 受人类活动的影响导致产水量较低。碳储量平均值为 5 241.55~5 282.36 t·km⁻², 空间分布上与土地利用类型保持较高的一致性, 林地碳储量较高, 建设用地和未利用地的碳储量较低。生境质量平均值为 0.59~0.62 t·km⁻², 呈先增加后降低的趋势, 生境质量低值和高值区域较多。高生境质量 I 区和 II 区内的草地和林地, 对于提升生境质量具有很大的作用。低生境质量的 III 区和 IV 区受建设用地和未利用地影响, 人类活动频繁, 对生境质量产生较

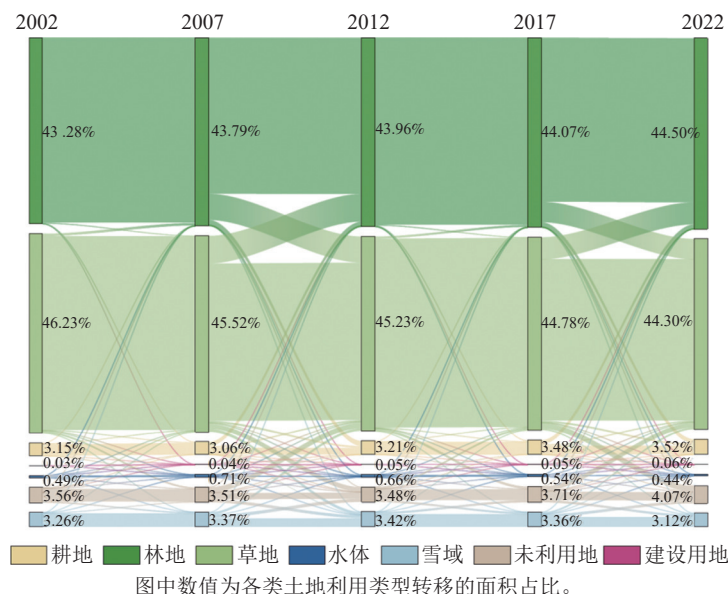


图 3 2002—2022 年西南高山峡谷区土地利用类型转移矩阵

Figure 3 Land use type change transfer matrix in southwest alpine canyon region from 2002 to 2022

大的破坏作用，整体范围内生境质量较低。土壤保持量平均值呈先少量增加后大幅度波动降低的趋势，土壤保持量受降水的影响，降水增加会导致土壤侵蚀强度加剧。在土壤保持量减少最多的 2 个区域中，Ⅱ区主要受未利用地的影响；Ⅳ区为人口聚集区，建设用地较多，受人类活动干扰，其土壤侵蚀相较其他区域影响更大。

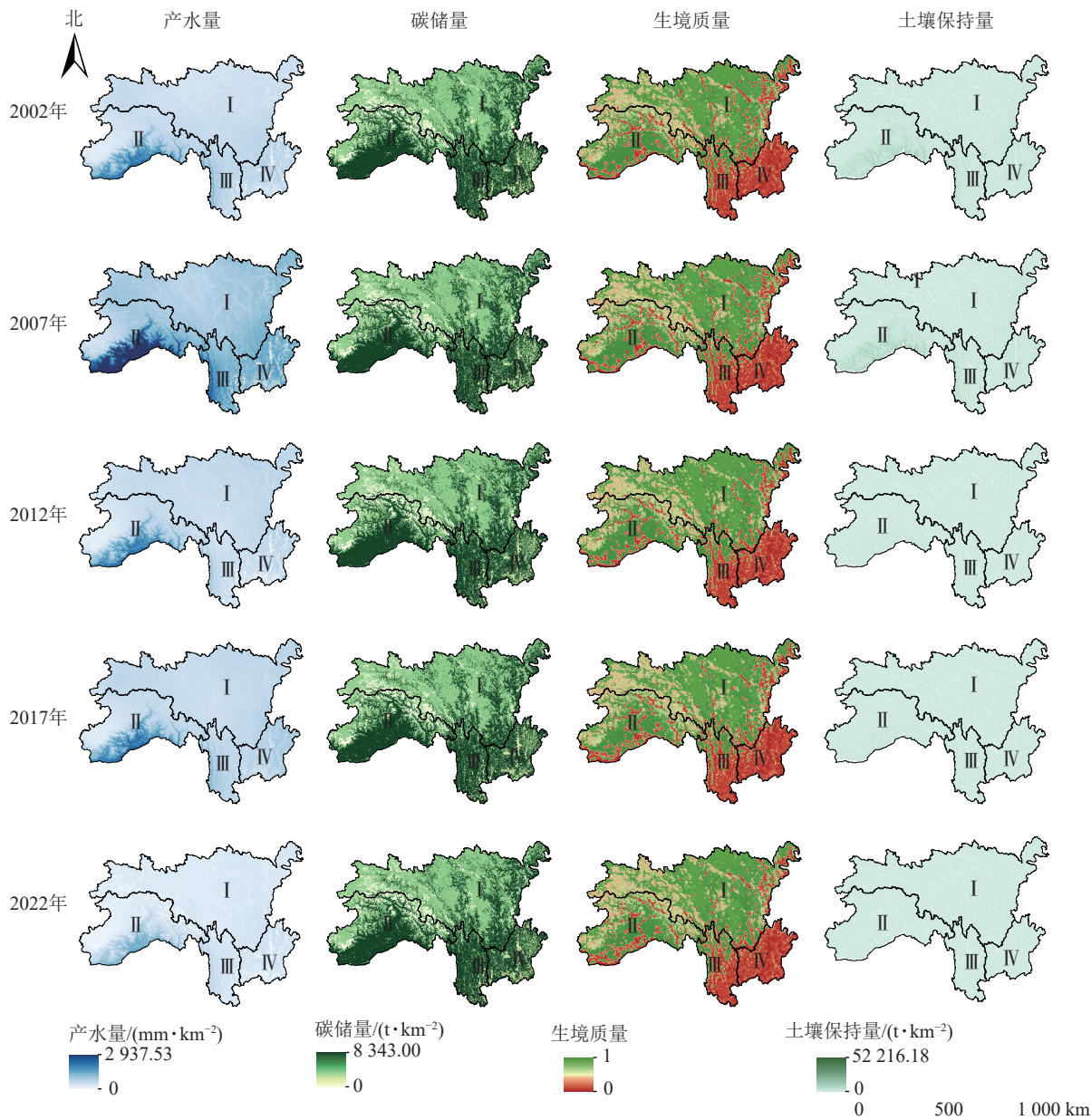
2.3 未来多情景下土地利用和生态系统服务的模拟

2.3.1 未来多情景模拟下的土地利用变化情况 从图 5 可见：在自然发展情景下，耕地、林地、水域、建设用地面积占比增加，其余土地利用类型面积占比降低，其中林地面积增加最多，面积占比增加了 0.91%，草地面积占比降低了 0.67%。在耕地保护发展情景下，林地、雪域面积占比分别减少了 1.06%、0.25%，其余土地利用类型面积占比增加，其中耕地面积占比增加了 0.68%，是所有土地利用类型中面积增加最多的类型。在经济优先发展情景下，耕地、林地、水域面积占比增加，草地、雪域面积占比减少，其中林地面积占比增加了 0.90%，雪域面积占比减少了 0.69%。

2.3.2 未来多情景模拟下产水量变化情况 从时间上看，西南高山峡谷区年产量 (图 6) 在 2032、2042、2052 年自然发展情景下产水量平均值分别为 266.75、244.12、488.12 $\text{mm} \cdot \text{km}^{-2}$ ，呈先降低后增加的趋势。耕地保护发展情景下，产水量平均值逐渐降低，但都高于 2022 年，2032、2042、2052 年产水量平均值分别为 625.85、471.53、434.34 $\text{mm} \cdot \text{km}^{-2}$ 。经济优先发展情景下，产水量平均值在 2032 年时高于 2022 年，后逐渐降低，2032、2042、2052 年产水量平均值分别为 635.82、205.30、82.71 $\text{mm} \cdot \text{km}^{-2}$ 。从空间分布上看，3 种发展情景下年产量高值都集中分布在Ⅲ区和Ⅳ区，低值主要分布在Ⅰ区。其中自然发展情景下增长较多的区域在Ⅰ区北部和东部、Ⅳ区北部。耕地保护发展情景下 4 个区域产水量都有所增加。经济优先发展情景下的产水量降低区域主要在Ⅲ区南部和Ⅳ区东北部。

2.3.3 未来多情景模拟下碳储量变化情况 在 3 种情景下，西南高山峡谷区 2032—2052 年碳储量平均值都高于 2022 年 (图 7)。自然发展情景下碳储量平均值大于 5 292.41 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ ，并呈逐年增加趋势。耕地保护发展情景下碳储量平均值大于 5 317.66 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ ，呈先降低后增加的趋势。经济优先发展情景下碳储量平均值少量增加，大于 5 339.35 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ ，呈逐渐降低的趋势。从整体上看，研究区碳储量高值集中在林地较多的Ⅱ区和Ⅲ区，Ⅰ区主要为草地，碳储量低于以林地为主的其他区域，Ⅳ区虽然林地占比高于其他土地利用类型，但受区域内建设用地和未利用地的影响，碳储量低于Ⅱ区和Ⅲ区。

2.3.4 未来多情景模拟下生境质量变化情况 在 3 种发展情景下西南高山峡谷区生境质量平均值都在 0.60 以上，且都高于 2022 年 (图 8)。自然发展情景和经济优先发展情景下的生境质量平均值趋势大致相同，耕地保护发展情景下生境质量平均值呈先大幅度降低后趋于平缓的趋势。从空间格局上看，3 种发展情景下的生境质量与 2002—2022 年分布基本相同。生境质量较好的区域集中在Ⅰ区，该区域以草地



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改。I、II、III、IV所表示含义同图1。

图4 2002—2022年西南高山峡谷区的生态服务示意图

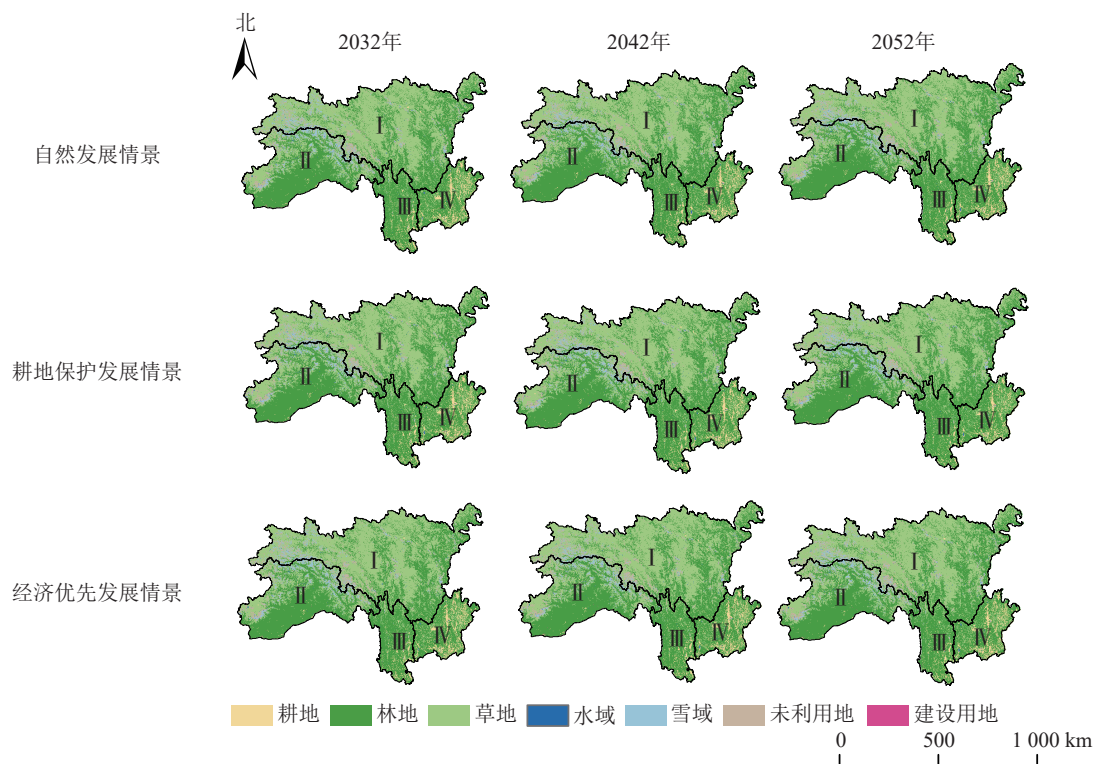
Figure 4 Ecological services in southwest alpine and canyon region from 2002 to 2022

为主,受人类活动影响较小;III区和IV区的生境质量较差,其主要的土地利用类型为建设用地和耕地,该区域地势平缓,受人类活动影响较大。

2.3.5 未来多情景模拟下土壤保持量变化情况 在3种情境下,西南高山峡谷区2032—2052年土壤保持量平均值都高于2022年(图9)。自然发展情景下土壤保持量平均值从2032年的 $81.58 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 增加至2052年的 $174.30 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,前期土壤保持量增加较为平缓。耕地保护发展情景下土壤保持量平均值从2032年的 $256.09 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 降低至2052年的 $160.18 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。经济优先发展情景下土壤保持量平均值从2032年的 $246.42 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 降低至2052年的 $60.49 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,在2042年后逐渐平缓。从空间上看,研究区土壤保持情况较好,但有极端较差情况。土壤保持量最大值分布在I区东南部、III区西部和南部、IV区南部,这些地区主要受建设用地和未利用地的影响,土壤保持量高于其他地方。

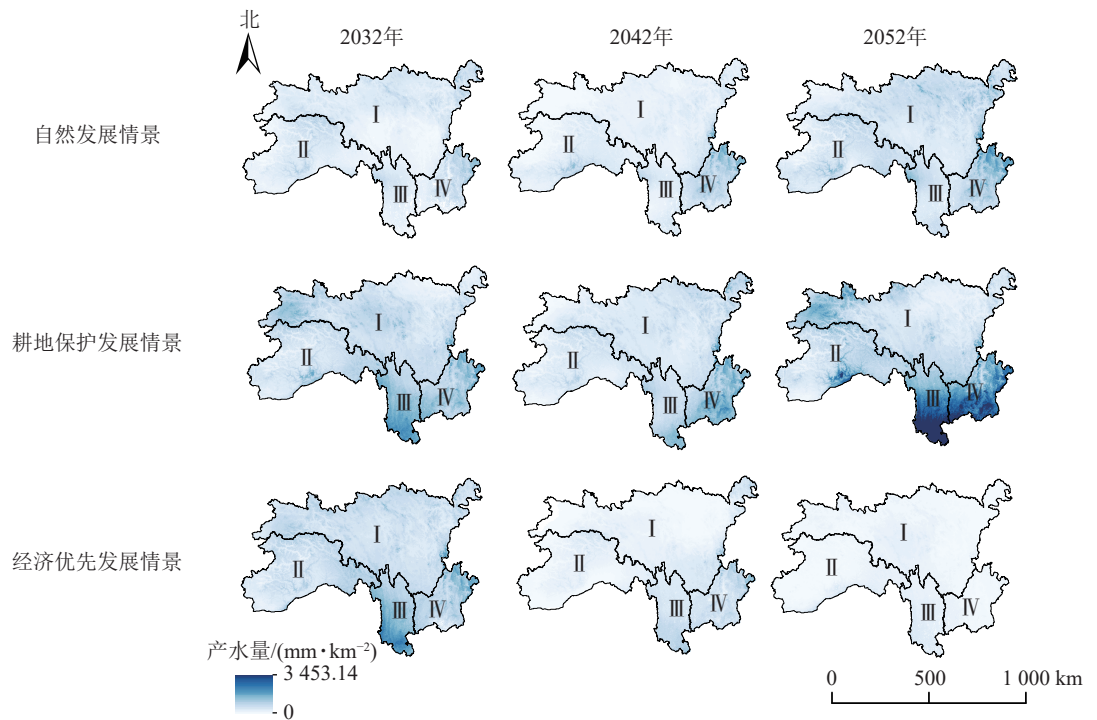
3 讨论

本研究表明:西南高山峡谷区土地类型以林地和草地为主,建筑用地面积最少,2022年林地和草地



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ所表示含义同图1。

图 5 2032—2052 年西南高山峡谷区不同情景下土地利用类型示意图
Figure 5 Land use types under different scenarios in southwest alpine canyon region from 2032 to 2052

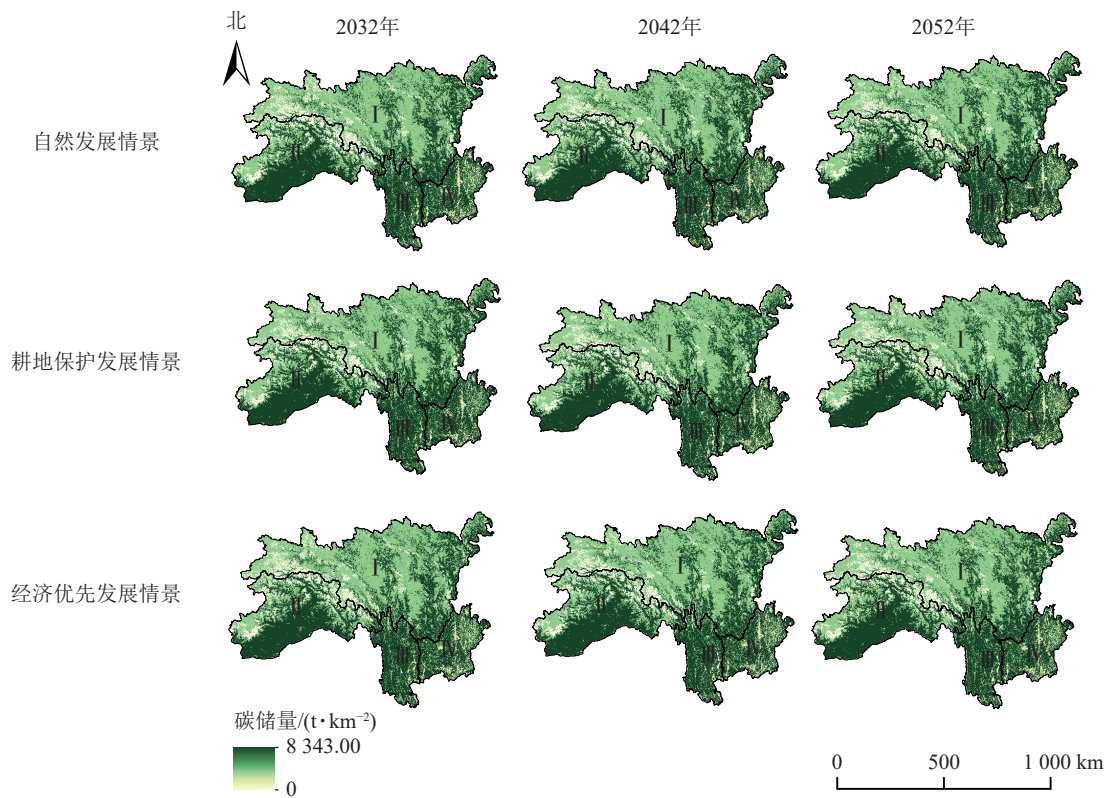


基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ所表示含义同图1。

图 6 2032—2052 年西南高山峡谷区不同情景下的产水量示意图
Figure 6 Water production under different scenarios in southwest alpine canyon region from 2032 to 2052

分别占西南高山峡谷区总面积的 44.50%、44.30%，建筑用地面积占总面积的 0.06%。20 a 间土地利用转移集中在林地、耕地和草地之间。

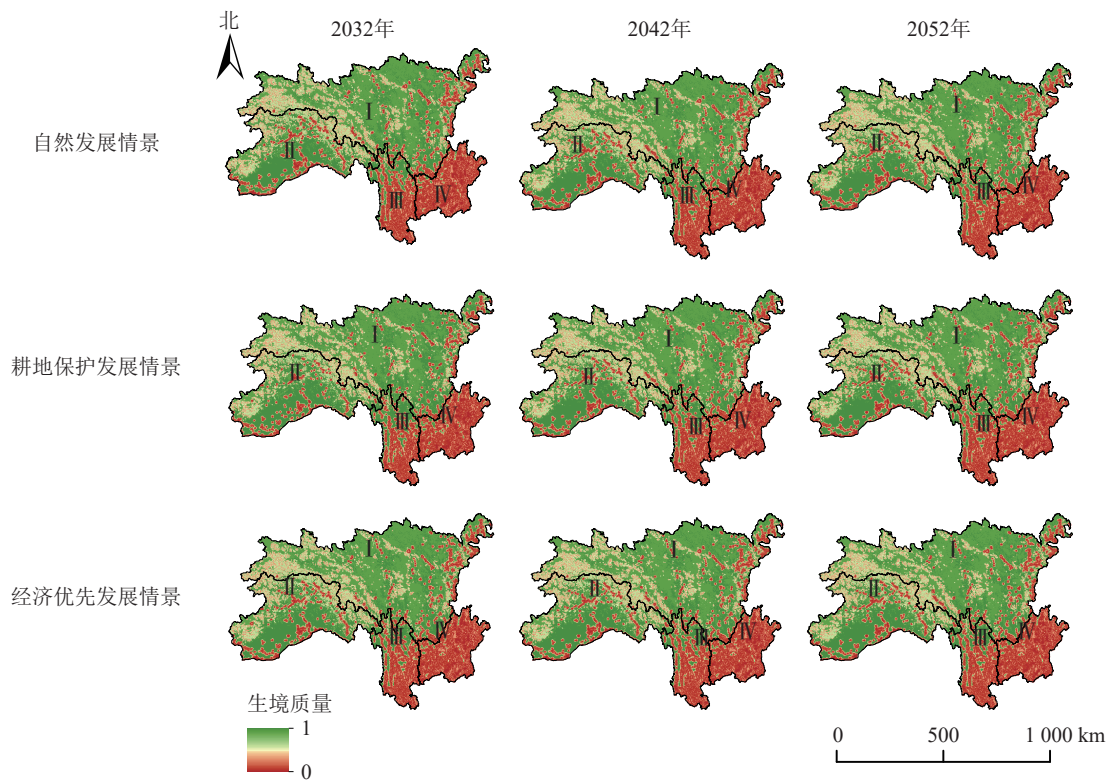
PLUS 模型预测下，2032—2052 年，自然发展情景下耕地、林地、水域面积增加，草地、雪域、未



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改。I、II、III、IV所表示含义同图1。

图7 2032—2052年西南高山峡谷区不同情景下的碳储量示意图

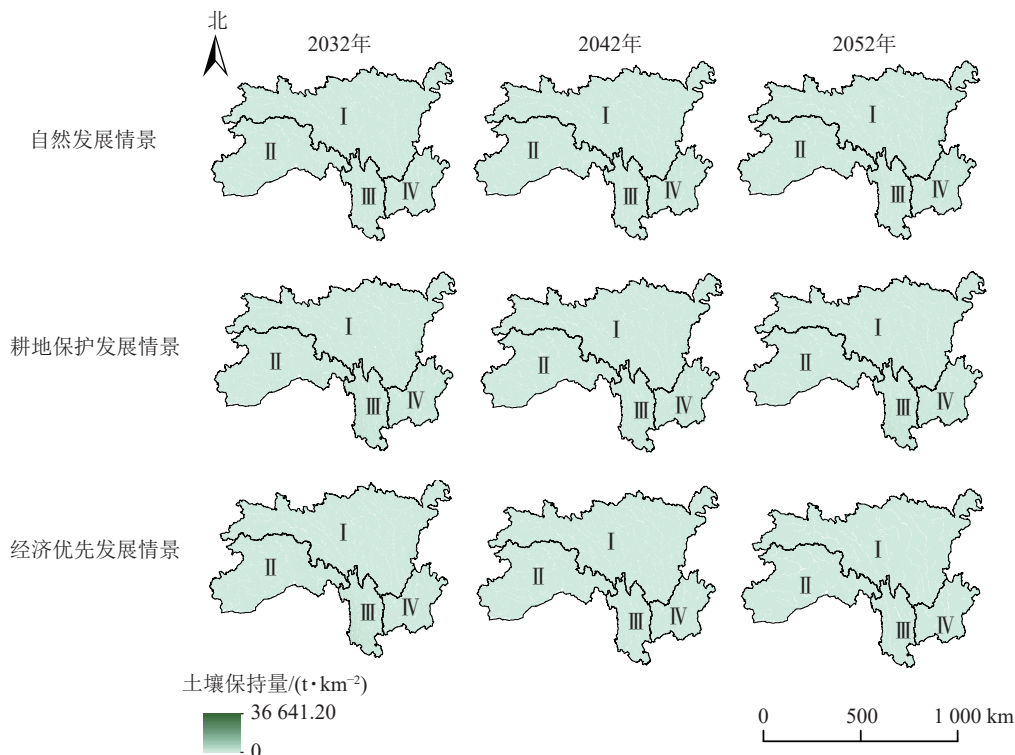
Figure 7 Carbon storage under different scenarios in southwest alpine canyon region from 2032 to 2052



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改。I、II、III、IV所表示含义同图1。

图8 2032—2052年西南高山峡谷区不同情景下生境质量示意图

Figure 8 Habitat quality under different scenarios in southwest alpine canyon region from 2032 to 2052



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。I、II、III、IV所表示含义同图1。

图 9 2032—2052 年西南高山峡谷区不同情景下的土壤保持量示意图

Figure 9 Soil conservation under different scenarios in southwest alpine canyon region from 2032 to 2052

利用地面积减少；耕地保护发展情景下耕地、草地、水体、未利用地、建设用地面积上升，林地、雪域面积下降；经济优先情景下耕地、林地、水域面积上升，草地、雪域面积下降。

利用 InVEST 模型计算分析西南高山峡谷区的产水量、碳储量、生境质量和土壤保持量。2002—2022 年研究区产水量平均值呈现降低—增加—降低的趋势，高产水量区域集中在 II 区，该区域降水充沛、森林生长繁茂且有大量雪域区域；产水量较低的 III 区和 IV 区以耕地和围绕耕地分布的人类活动城镇区为主，这种分布与陈龙^[34]的研究结论相似。建设用地中人类活动剧烈，植被覆盖少，不利于有效拦截大量降水，地表蒸散发能力较弱，建设用地的增加一定程度上会引起产水量的增加^[35]。本研究区域内碳储量的平均值为 5 241.55~5 282.36 t·km⁻²，呈逐年增加的趋势，其中林地对生态系统碳储量的贡献最明显，这与方精云等^[36]的研究结果一致。研究区生境质量主要以高值和低值区域为主，低值区主要分布在建设用地和未利用地较多的 III 区和 IV 区，这与冉璇等^[37]的研究结论类似。区域内土壤保持量先降低后增加又降低，高值区域集中在多为地表扰动较小的石质山区的 II 区，这部分地区受人类活动影响有限^[38]；低值区域集中分布在人类活动相对频繁、工农业相对发达的地带，这与谢余初等^[39]的研究结果相呼应，土壤保持低值区与滑坡、泥石流灾害多发区或生态高风险区是相对应的。

2032—2052 年自然发展情景下西南高山峡谷区产水量逐渐增加，高值集中在 III 区和 IV 区，碳储量逐渐增加，土壤保持量平均值先减少后增加；耕地保护发展情景在一定程度上保护了农业生产，区域内产水量先减少后增加，碳储量少量增加，土壤保持量平均值逐渐降低；经济优先情景以经济增长为主，忽视资源与环境的保护，在这样的發展情景下，区域内产水量大幅度减少、碳储量少量增加、土壤保持量大幅度减少。3 种发展情境下生境质量平均值为 0.60 左右，期间变化较小，但总体好于 2022 年。

4 结论

西南高山峡谷区地形复杂，主要以林地和草地为主，建设用地面积最少，土地利用转移主要在林地、耕地和草地之间。碳储量和生境质量整体情况较好，但大量雪域和未利用地也导致产水量、土壤保持量都降低。

5 参考文献

- [1] SELIVANOV E, HLA VÁČKOVÁ P. Methods for monetary valuation of ecosystem services: a scoping review [J]. *Journal of Forest Science*, 2021, **67**(11): 499–511.
- [2] WINKLER K, FUCHS R, ROUNSEVELL M, *et al.* Global land use changes are four times greater than previously estimated[J/OL]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): 2501 [2024-10-01]. DOI: [10.1038/s41467-021-22702-2](https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2).
- [3] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. *生态学报*, 2023, **43**(11): 4473–4487.
- REN Yinming, LIU Xiaoping, XU Xiacong, *et al.* Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(11): 4473–4487.
- [4] 廖瑞恩, 齐实, 赖金林, 等. 西南高山峡谷区水力侵蚀时空变化及其驱动力[J]. *水土保持研究*, 2024, **31**(5): 139–147.
- LIAO Ruiren, QI Shi, LAI Jinlin, *et al.* Spatial-temporal variation and driving mechanism of water erosion in southwest alpine-canyon area of China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, **31**(5): 139–147.
- [5] 赖金林, 齐实, 廖瑞恩, 等. 2000—2019 年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应[J]. *农业工程学报*, 2023, **39**(14): 155–163.
- LAI Jinlin, QI Shi, LIAO Ruiren, *et al.* Vegetation change responses to climate change and human activities in southwest alpine canyon areas of China from 2000 to 2019 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, **39**(14): 155–163.
- [6] 钱大文, 曹广民, 杜岩功, 等. 2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, **40**(4): 1392–1404.
- QIAN Dawen, CAO Guangmin, DU Yangong, *et al.* Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in the southern slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1392–1404.
- [7] 姜芳茗, 徐志红, 王建锋, 等. 国土空间复合生态功能识别与分区——以浙江省湖州市为例[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, **48**(2): 227–239.
- JIANG Fangming, XU Zhihong, WANG Jianfeng, *et al.* Identification and zoning of complex ecological functions in territorial space: a case study of Huzhou City of Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2022, **48**(2): 227–239.
- [8] 李丽, 王心源, 骆磊, 等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(4): 1233–1245.
- LI Li, WANG Xinyuan, LUO Lei, *et al.* A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(4): 1233–1245.
- [9] HOUGHTON R A. Counting terrestrial sources and sinks of carbon [J]. *Climatic Change*, 2001, **48**(4): 525–534.
- [10] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, *et al.* Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569/570**: 1418–1426.
- [11] 黄锦彦, 罗敏玄, 吴凯, 等. 1980—2018 年大别山区西段水源涵养能力时空格局及演变特征[J]. *中国地质调查*, 2024, **11**(3): 68–75.
- HUANG Jinyan, LUO Minxuan, WU Kai, *et al.* Spatio-temporal pattern and evolution characteristics of water source conservation capacity in the western part of Dabie Mountains from 1980 to 2018 [J]. *Geological Survey of China*, 2024, **11**(3): 68–75.
- [12] ITO A, NISHINA K, NODA H M. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: an analysis using ISI-MIP data [J]. *Polar Science*, 2016, **10**(3): 346–355.
- [13] 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 等. 1975—2005 年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(3): 397–408.
- CHEN Yaoliang, LUO Geping, YE Hui, *et al.* Sources and sinks of carbon caused by forest land use change from 1975 to 2005 in central Asia [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(3): 397–408.
- [14] 周婷, 陈万旭, 李江凤, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, **41**(15): 6134–6145.
- ZHOU Ting, CHEN Wanxu, LI Jiangfeng, *et al.* Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(15): 6134–6145.
- [15] WALL D H, SIX J. Give soils their due[J/OL]. *Science*, 2015, **347**(6223): 695 [2024-10-01]. DOI: [10.1126/science](https://doi.org/10.1126/science).

aaa8493.

- [16] LIANG Xun, GUAN Qingfeng, CLARKE K C, *et al.* Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J/OL]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, **85**: 101569[2024-10-01]. DOI: [10.48550/arXiv.2010.11541](https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11541).
- [17] 郭佳晖, 刘晓煌, 张文博, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的云贵高原产水量时空变化特征分析[J]. *现代地质*, 2024, **38**(3): 624–635.
- GUO Jiahui, LIU Xiaohuang, ZHANG Wenbo, *et al.* Spatiotemporal variation of water yields in the Yunnan-Guizhou Plateau based on InVEST and PLUS models [J]. *Geoscience*, 2024, **38**(3): 624–635.
- [18] 韩楚翘, 郑江华, 王哲, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. *干旱区地理*, 2024, **47**(2): 260–269.
- HAN Chuqiao, ZHENG Jianghua, WANG Zhe, *et al.* Spatiotemporal variation and multiscenario simulation of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Turpan-Hami Basin based on PLUS-InVEST model [J]. *Arid Land Geography*, 2024, **47**(2): 260–269.
- [19] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(4): 1125–1136.
- HU Feng, ZHANG Yan, GUO Yu, *et al.* Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(4): 1125–1136.
- [20] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例[J]. *地理研究*, 2013, **32**(8): 1497–1507.
- QIAO Weifeng, SHENG Yehua, FANG Bin, *et al.* Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: a case study of Suzhou, Jiangsu Province [J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(8): 1497–1507.
- [21] 尹珂, 廖思雨. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的三峡库区(重庆段)碳储量时空变化及预测[J]. *长江科学院院报*, 2024, **41**(9): 60–69.
- YIN Ke, LIAO Siyu. Spatio-temporal variation and prediction of carbon stocks in Chongqing section of Three Gorges Reservoir area based on InVEST-PLUS model [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(9): 60–69.
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, **41**(1): 35–43.
- XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen, *et al.* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(1): 35–43.
- [23] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006 年中国城市建成区有机碳储量的估算[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(5): 1195–1202.
- ZHU Chao, ZHAO Shuqing, ZHOU Decheng. Organic carbon storage in urban built-up areas of China in 1997–2006 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(5): 1195–1202.
- [24] 苏敬, 芮茵艺, 朱沁园, 等. 基于 InVEST 模型的 1985—2020 年忻州市生境质量演变及地形效应[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(12): 1525–1533.
- SU Jing, RUI Hanyi, ZHU Qinyuan, *et al.* Temporal and spatial evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in Xinzhou City based on InVEST model from 1985 to 2020 [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(12): 1525–1533.
- [25] 刘纯军, 周国富, 黄启芬, 等. 基于 InVEST 模型的山地流域生境质量时空分异研究——以贵州省境内赤水河流域为例[J]. *人民长江*, 2021, **52**(10): 62–69.
- LIU Chunjun, ZHOU Guofu, HUANG Qifen, *et al.* Spatio-temporal evolution analysis on habitat quality in mountainous watershed based on InVEST Model: case of Chishui River Basin in Guizhou Province [J]. *Yangtze River*, 2021, **52**(10): 62–69.
- [26] 黄贤峰, 杨永菊, 武艺, 等. 1990—2017 年喀斯特自然保护区土地利用变化对生境质量的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(6): 345–351.
- HUANG Xianfeng, YANG Yongju, WU Yi, *et al.* Land use change and its impact on habitat quality in Karst Nature Reserve from 1990 to 2017 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(6): 345–351.
- [27] 刘宇. 基于 InVEST 模型的喀斯特地区茶园生态系统服务功能评估——以云南省广南县为例[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- LIU Yu. *Evaluation of Tea Garden Ecosystem Service Function in Karst Area Based on InVEST Mode: A Case Study of*

- Guangnan County, Yunnan Province[D]. Kunming: Yunnan University, 2021.
- [28] GONG Wenfeng, DUAN Xuanyu, SUN Yuxin, *et al.* Multi-scenario simulation of land use/cover change and carbon storage assessment in Hainan coastal zone from perspective of free trade port construction[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **385**: 135630[2024-10-01]. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.135630](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135630).
- [29] 喇露梦, 勾蒙蒙, 李乐, 等. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(11): 1368–1377.
- LA Lumeng, GOU Mengmeng, LI Le, *et al.* Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges Reservoir area: a case study of Zigui County [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(11): 1368–1377.
- [30] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, **43**(1): 378–387.
- LI Jun, YANG Dehong, WU Fengzhen, *et al.* Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage in Kunming based on PLUS and InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, **43**(1): 378–387.
- [31] WANG Haoyang, WU Lishu, YUE Yongsheng, *et al.* Impacts of climate and land use change on terrestrial carbon storage: a multi-scenario case study in the Yellow River Basin (1992–2050)[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2024, **930**: 172557[2024-10-01]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.172557](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172557).
- [32] 武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 等. 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响[J]. 环境科学, 2024, **45**(5): 2828–2839.
- WU Aibin, CHEN Fuguo, ZHAO Yanxia, *et al.* Multi-scenario simulation of construction land expansion and its impact on ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(5): 2828–2839.
- [33] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟——以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, **36**(10): 86–95.
- YANG Shuo, SU Hao, ZHAO Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: a case study of Hanzhong City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, **36**(10): 86–95.
- [34] 陈龙. 澜沧江流域典型生态系统服务与生物多样性及其空间格局研究[M]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- CHEN Long. *Study on Typical Ecosystem Services and Biodiversity and their Spatial Pattern in Lancang River Basin*[M]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [35] 蔡梦卿, 黄璐, 严力蛟. 基于 InVEST 模型的杭州市典型年份年降水量时空变化特征及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(1): 127–135.
- CAI Mengqing, HUANG Lu, YAN Lijiao. Temporal and spatial variation characteristics of annual water yield and its influencing factors in Hangzhou based on InVEST model [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(1): 127–135.
- [36] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, **40**(7): 566–576.
- FANG Jingyun, YANG Yuanhe, MA Wenhong, *et al.* Carbon pool and its change in grassland ecosystem of China [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2010, **40**(7): 566–576.
- [37] 冉璇, 李渊, 郭宇龙, 等. 基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, **32**(9): 1932–1948.
- RAN Xuan, LI Yuan, GUO Yulong, *et al.* Ecosystem services assessment and trade-off synergy relationships in Qianjiangyuan National Park based on InVEST model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, **32**(9): 1932–1948.
- [38] 张娟, 赵润江, 雷金睿, 等. 基于 InVEST 模型的海口市 2000—2020 年生境质量时空演变分析[J]. 浙江农林大学学报, 2025, **42**(2): 383–392.
- ZHANG Juan, ZHAO Runjiang, LEI Jinrui. Spatio-temporal evolution of habitat quality in Haikou from 2000 to 2020 based on InVEST model [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(2): 383–392.
- [39] 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.
- XIE Yuchu, GONG Jie, ZHANG Lingling. Dynamics of landscape ecological security based on PSR model in the Bailongjiang River watershed [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(6): 790–797.