

DOI:10.11766/trxb202307260292

陶勤, 王世航, 王奇, 刘峰, 赵明松, 徐胜祥. 基于 InVEST 模型的川滇生态屏障区土壤保持功能评价[J]. 土壤学报, 2024

TAO Qin, WANG Shihang, WANG Qi, LIU Feng, ZHAO Mingsong, XU Shengxiang. Evaluation of Soil Conservation Function in The

Sichuan-Yunnan Ecological Barrier Area Based on The InVEST Model [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024

基于 InVEST 模型的川滇生态屏障区土壤保持功能评价*

陶勤^{1,2}, 王世航², 王奇^{1,2}, 刘峰^{1,3}, 赵明松², 徐胜祥

^{1,3}†

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 安徽理工大学 空间信息与测绘工程学院, 安徽淮南 232001; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以川滇生态屏障区为研究对象, 采用生态系统服务和交易的综合评估模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST) 对 2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年的土壤侵蚀和土壤保持情况进行分析, 并运用地理探测器探测土壤侵蚀的主控因子。结果表明: 川滇生态屏障区不同年份的土壤侵蚀模数和土壤侵蚀总量呈先减少后增加的趋势。侵蚀强度以微度侵蚀为主, 约占整个区域的 85%, 主要分布在川滇生态屏障区东部, 轻度及以上侵蚀强度多分布于西部地区。不同年份的土壤保持模数分别为 4.0×10^3 、 3.5×10^3 、 3.5×10^3 、 4.5×10^3 t·km⁻², 土壤保持总量分别为 9.6×10^8 、 8.3×10^8 、 8.2×10^8 、 1.1×10^9 t。各影响因子对土壤侵蚀的影响程度从高到低依次为: 土地利用类型、高程、植被覆盖度、土壤可蚀性因子、降雨侵蚀力因子、坡度, 其中土地利用类型与土壤可蚀性因子的交互协同作用对土壤侵蚀的解释力最强。

关键词: 土壤侵蚀; 土壤保持; InVEST 模型; 地理探测器

中图分类号: P964

文献标志码: A

Evaluation of Soil Conservation Function in The Sichuan-Yunnan Ecological Barrier Area Based on The InVEST Model

TAO Qin^{1,2}, WANG Shihang², WANG Qi^{1,2}, LIU Feng^{1,3}, ZHAO Mingsong², XU Shengxiang^{1,3*}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】The Sichuan-Yunnan ecological barrier area is an important ecological function area in China. To reduce the increasing ecological degradation and soil erosion, it is important to research soil erosion and soil conservation functions. 【Method】The Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) model was used to characterize the spatial distribution of soil erosion and soil retention in 2000, 2010, 2015, and 2020. The

* 科技基础资源调查专项 (2022FY100204)、国家自然科学基金项目 (42271369) 和安徽省自然科学基金项目 (2208085MD88) 资助 Supported by the Specialized Survey of Scientific and Technological Basic Resources (No.2022FY100204), the National Natural Science Foundation of China (No.42271369) and the Natural Science Foundation of Anhui Province (No.2208085MD88)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sxxu@issas.ac.cn

作者简介: 陶勤 (1998-), 女, 安徽太和人, 硕士研究生, 主要从事资源环境与遥感信息研究。E-mail:1458545387@qq.com
收稿日期: 2023-07-26; 收到修改稿日期: 2024-04-15; 网络首发日期 (www.cnki.net):

GeoDetector was applied to detect the main controlling factors of soil erosion. **【Result】** The results showed that the soil erosion modulus and the total amount of soil erosion in the four phases showed a trend of decreasing and then increasing. The erosion intensity was dominated by mild erosion, accounting for about 85% of the whole area, and mainly distributed in the eastern part of the area. The light and more than light erosion intensity were mostly distributed in the western part. Soil conservation modulus in 2000, 2010, 2015, and 2020 were 4.0×10^3 , 3.5×10^3 , 3.5×10^3 , and 4.5×10^3 t·km⁻², respectively, and soil conservation amount were 9.6×10^8 , 8.3×10^8 , 8.2×10^8 , and 1.1×10^9 t, respectively. The influence degree of each influencing factor on soil erosion in descending order was as follows: land use type, elevation, fractional vegetation cover, soil erodibility, erosivity, and slope. The interaction effects between factors on soil erosion were greater than that single factor, and the interaction between land use type and soil erodibility had the strongest effects on soil erosion.

【Conclusion】 Although soil erosion in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area shows a worsening trend, soil conservation is gradually improving, and soil conservation is stronger than soil erosion, and overall, the Sichuan-Yunnan area is developing in a better direction.

Key words: Soil erosion; Soil conservation; InVEST; GeoDetector

水土流失不仅破坏土壤肥力, 导致土地生产力的下降, 威胁国家粮食生产安全^[1], 而且携带了大量的泥沙淤积河道, 造成严重的危害^[2]。土壤保持是指生态系统对土壤侵蚀的防控能力以及对泥沙存储的保持能力^[3], 在维护区域侵蚀控制和生态安全方面起到了独特的作用, 为区域降低灾害提供了重要保障。1965年, Wischmeier和Smith^[4]首次提出了通用水土流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE), 对该方程各个因子的含义和算法进行不断的修正和调整, 最终形成了修订后的通用土壤流失方程 (RUSLE)^[5]。2002年Liu等^[6]提出了更适合中国区域的中国土壤流失方程 (CSLE)。随着学者们对土壤侵蚀模型研究的不断完善, 生态系统服务和交易的综合评估模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST) 应运而生, 此模型弥补了USLE和RUSLE方程缺少地块拦截上游泥沙模块这一缺陷, 是量化大区域/国家层面上土壤侵蚀较为合适的工具。近年来, InVEST应用较为广泛。基于500 m空间分辨率的土壤数据, Marques等^[7]研究了葡萄牙土壤侵蚀的时空分布。Xiao等^[8]采用空间分辨率为90 m的DEM数据和1 km的NDVI数据对三峡库区土壤保持功能进行了分析, 并探讨了影响土壤保持功能的因素。Guo等^[9]分析了淮河地区土壤侵蚀和土壤保持的时空变化, 并通过随机森林和地理探测器对驱动因素进行评价和量化。赵欣悦等^[10]采用空间分辨率为90 m的DEM数据对北三河流域的土壤保持情况进行研究。贾婉琳等^[11]基于空间分辨率为1 km的土壤数据分析赤水河流域的土壤保持情况。总体而言, 国内外有关区域尺度土壤侵蚀的研究采用的栅格数据空间分辨率相对较粗。1 km的世界土壤数据库 (HWSD), 1 km的NDVI数据和90 m DEM数据。然而, 无论是基于何种方程, 在大尺度上获取准确的土壤侵蚀参数对研究结果均至关重要^[12]。玉院和王金亮等^[13]通过分析不同空间分辨率 (30 m、60 m、90 m、120 m) 下的地形因子的差异性, 表明在土壤侵蚀等模型中对地形因子进行估算时, 应该充分考虑空间分辨率的影响。同样, 土壤侵蚀格局的精细表征也需要高分辨率土壤可蚀性因子数据支撑^[14]。提高研究区土壤侵蚀模型输入数据的空间分辨率可以有效地提高该区域土壤侵蚀结果精度。

川滇区是我国重要的生态功能区, 对构建国家整体生态安全格局的战略地位十分突出。然而长期以来, 川滇区生态环境“家底”不清, 生态环境变化的系统性和完整性调查工作尚属空白。现有的土壤侵蚀或土壤保持数据集产品的空间分辨率较低 (1 km), 且时效性较差 (2000—2015年)。数据源空间分辨率的高低一定程度上会影响土壤侵蚀结果的分析, 研究的时间范围也会对土壤侵蚀趋势有一定的影响。因此, 本文采用空间分辨率为90 m的

土壤数据、30 m 的 DEM 数据和 NDVI 数据对川滇生态屏障区 2000 年、2010 年、2015 年、2020 年的土壤侵蚀进行研究，并运用地理探测器对土壤侵蚀的主控因子进行分析。研究结果将为川滇区的水土保持综合治理和生态环境保护政策提供理论依据和科学决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

川滇生态屏障区位于川滇西部及四川盆地的过渡地带（图 1），在 $24^{\circ} 78' \sim 33^{\circ} 73' N$ ， $98^{\circ} 72' \sim 106^{\circ} 77' E$ 之间，横跨我国长江、黄河、澜沧江和怒江等四大江河，地跨四川、云南两省，由川西 73 个县（区）和滇北 17 个县（区）构成，幅员面积 $2.37 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。位于青藏高原东缘地形急变带的川滇区，地形西北高、东南低，平均海拔约 4 000 m。以高原山地温带、寒温带季风气候为主，属于高原山地垂直体系。区域内地震、泥石流、滑坡等山地灾害类型多样、分布广泛、活动频繁，并具有规模巨大、灾害链效应明显、破坏力强、容易形成巨灾等鲜明特点^[15]。

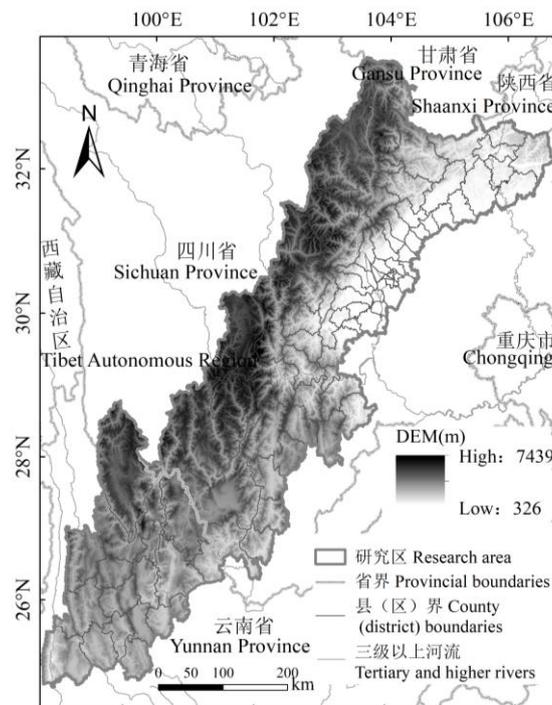


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源

本文所需数据包括：（1）川滇区边界和行政区划的矢量数据，源于中国科学院资源环境科学与数据中心；（2）DEM 数据，采用空间分辨率为 30 m 的 SRTM1 V3.0 的中国区域数据；（3）土壤数据，数据来源于国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心-土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)^[16-17]；（4）逐月降雨数据集，采用国家青藏高原科学数据中心，空间分辨率为 1 km 的逐月降水量数据集^[18]；（5）NDVI 数据，源于中国科学院地理科学与资源研究所土地利用与全球变化遥感团队制作的中国 30 m 年最大 NDVI 数据集^[19]；（6）土地利用数据，采用了在 GEE 平台上制作的源自 Landsat 的年度中国土地覆盖数据集^[20]，空间分辨率为 30 m。上述数据中，逐月降雨数据集、NDVI 数据和土地利用数据的时间范围为 4 期：2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年。

1.3 InVEST 模型原理

InVEST 模型以 GIS 作为应用平台，以空间数据为参考基础，通过输入较少的数据就可以输出较多的数据，打破了传统方法的局限性，使复杂问题简易化，运行结果可以在 ArcGIS 上以地图的方式呈现出来，使结果可视化^[21]，较纯文字的表达方式更加直观^[22]。目前，此模型已非常成熟，适用于全球范围各尺度上的生态系统服务功能评估，推广性强。其中土壤保持模块的具体公式如下：

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (1)$$

$$RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i \quad (2)$$

$$SDR_i = RKLS_i - USLE_i \quad (3)$$

式中， $RKLS_i$ 为第 i 个栅格单元的年潜在土壤侵蚀量， $USLE_i$ 为第 i 个栅格单元的年实际土壤侵蚀量， SDR_i 为第 i 个栅格单元的土壤保持量，年潜在土壤侵蚀量与年实际土壤侵蚀量之差为年土壤保持量。 R_i 、 K_i 、 LS_i 、 C_i 、 P_i 分别为第 i 个栅格单元的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长因子、地表覆盖管理因子、土壤保持管理因子。

1.4 土壤侵蚀强度分级

土壤侵蚀强度分级标准采用中华人民共和国水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)。以年平均侵蚀模数为判别指标，具体分类分级标准如表 1 所示。

表 1 土壤侵蚀强度分类分级标准 (西南土石山区)

Table 1 Criteria for classification and grading of soil erosion intensity (southwestern soil and rocky mountainous areas)

土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity	平均土壤侵蚀模数 Average soil erosion modulus /(t·km ⁻²)	土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity	平均土壤侵蚀模数 Average soil erosion modulus /(t·km ⁻²)
微度侵蚀 Mild erosion	<500	强度侵蚀 Severe erosion	5 000~8 000
轻度侵蚀 Light erosion	500~2 500	极强度侵蚀 Extreme erosion	8 000~15 000
中度侵蚀 Moderate erosion	2 500~5 000	剧烈侵蚀 Drastic erosion	>15 000

1.5 模型参数处理

(1) 降雨侵蚀力因子 R ，采用四期月降雨量的栅格数据，计算公式具体见参考文献 [23]。(2) 土壤可蚀性因子 K ，采用 Williams 等^[24]提出的 EPIC 模型，模型中的粒径包括砂粒、粉粒、黏粒，具体公式见参考文献 [25]。(3) 地形因子 LS ，可由 InVEST 模型根据填洼后的 DEM 数据自动计算出地形因子 LS ^[26]。(4) 地表覆盖管理因子 C ，采用目前适用较广的蔡崇法模型^[27]。(5) 土壤保持措施因子 P ，本文参考郎燕等^[23]对川滇区土壤保持措施因子的 P 取值，耕地为 0.4，林地、草地、水域、建设用地、未利用地和其他用地为 1。

1.6 土壤侵蚀主控因子识别

采用地理探测器进行土壤侵蚀主控因子的识别，其为探测空间异质性的工具，该方法的原理是如果某个自变量对某个因变量有重要影响，那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[28]。本文使用地理探测器的“分异及因子探测”和“交互作用探测”模块对研究区土壤保持服务的主要影响因子和交互作用进行定量探测。将影响因子坡度、高程、植被覆盖度、土地利用类型、降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子定义为自变量，并对其进行编码 X1、X2、X3、X4、X5、X6，土壤侵蚀数据为因变量 Y。除土地利用类型数据外，输入的其他数据均为连续变量，本文按照自然断点法对自变量进行重分类，得到类别数据。再根据研究区矢量数据生成 10 km×10 km 的规则网格，网格的中心点为采样点，按照采样点对 X、Y 进行提取分析，去除异常值后将数据导入地理探测器模型中，分析得到各因子对土壤侵蚀的影响力以及双因子对土壤侵蚀的交互作用。

1.7 数据处理与绘图

在 InVEST 模型中运算土壤侵蚀和土壤保持数据，模型所需参数 R、K、LS、C、P（空间分辨率为 30 m）以及后续的分析、出图均采用 ArcGIS 10.8.1 软件进行处理；在 GeoDetector 2018 软件中实现土壤侵蚀主控因子的识别；数据统计和绘图采用 Microsoft Excel 2021 和 Origin 2018 软件。

2 结果

2.1 土地利用变化特征

图 2 为川滇区不同时期的土地利用情况和空间分布图，分析可得川滇区土地利用类型以林地为主，约占 62%，所占面积呈增长趋势；其次为耕地和草地，分别约占 17.5% 和 16.6%，所占面积呈减少趋势；建设用地面积约占 0.8%，且呈增长趋势，其他土地利用类型的面积占比较少，且四期无明显变化。耕地和建设用地主要分布在川滇区的东北地区，其中耕地面积较大，呈片状分布；建设用地呈零星线状由中心城区向四周散开，如图 2 中的成都市。川滇区的西部和南部多为山地，土地利用方式以林地为主。

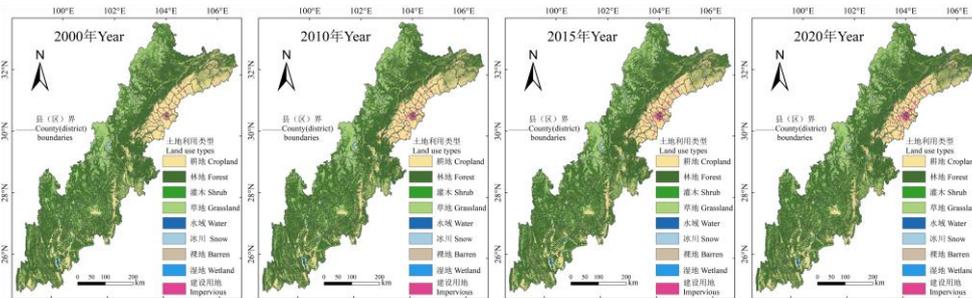


图 2 川滇生态屏障区不同时期土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area in different periods

2.2 降雨侵蚀力变化特征

根据公式计算得到四期降雨侵蚀力因子 R 栅格图层，如图 3 所示。川滇区降雨侵蚀力因子 R 总体上呈现从西北至东南递增的趋势，从 2000 年至 2020 年，降雨侵蚀力的空间分布没有明显差异，降雨侵蚀力较高的区域主要集中在邛崃市、蒲江县、彭山区、东坡区、丹棱县、名山区、雨城区、洪雅县等区域。2000 年至 2020 年四期的降雨侵蚀力平均值分别为 2.7×10^5 、 2.3×10^5 、 2.6×10^5 、 3.0×10^5 MJ-mm-km²·hm⁻²·a⁻¹，最低值和最高值均出现在 2015 年，分别为 1.1×10^5 、 9.6×10^5 MJ-mm-km²·hm⁻²·a⁻¹。

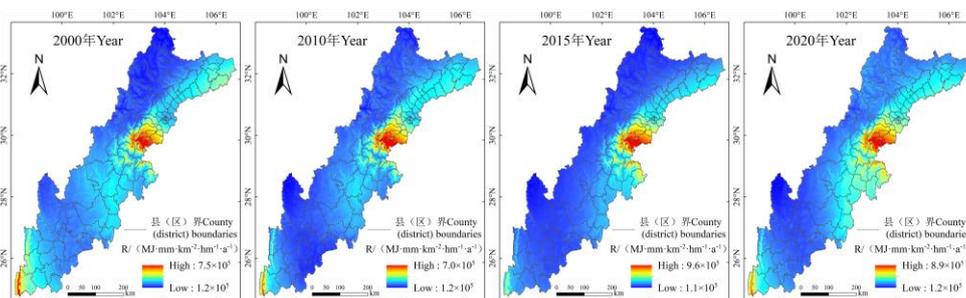


图 3 川滇生态屏障区不同时期降雨侵蚀力空间分布

Fig.3 Spatial distribution of rainfall erosivity in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area in different periods

2.3 土壤侵蚀

根据 InVEST 模型输出结果，在 ArcGIS 中对其进行分析，得到 2000 年、2010 年、2015

年、2020年川滇区土壤侵蚀情况。总体上看，川滇区土壤侵蚀呈先减少后增长的趋势，土壤侵蚀模数从2000年的 $144.8\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 先降低至2010年的 $137.5\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ，然后增长至2020年的 $231.4\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。土壤侵蚀总量从2000年的 $3.4\times 10^7\text{ t}$ 先降低至2010年的 $3.3\times 10^7\text{ t}$ ，然后增长至2020年的 $5.5\times 10^7\text{ t}$ ，与2000年相比，2020年增加了 $2.1\times 10^7\text{ t}$ 。对川滇区土壤侵蚀强度进行划分，得到图4（空间分辨率为30 m）。

川滇区土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主，主要分布在川滇区东部地势较为平坦的低海拔区域，2000年占据总面积的86.1%，2010年后微度侵蚀面积开始有所减少，2015年和2020年微度侵蚀所占比例分别为85.9%和81.6%。其中变化最为明显的区域为甘洛县、峨边彝族自治县、马边彝族自治县、美姑县和越西县，由2000年少量区域为轻度侵蚀发展为2020年大部分区域为轻度侵蚀。轻度及以上侵蚀强度多分布于川滇区的西部地区。如康定市，该区域以轻度侵蚀为主，局部区域出现剧烈侵蚀，与泸定县接壤处剧烈侵蚀情况相对明显，整个川滇区的剧烈侵蚀大多分布于此。随着年份的增长，轻度及以上侵蚀强度所占面积也在增长，轻度侵蚀所占面积由2000年的 $2.7\times 10^4\text{ km}^2$ 增长为2020年的 $3.5\times 10^4\text{ km}^2$ ，中度侵蚀所占面积由2000年的 $3.6\times 10^3\text{ km}^2$ 增长为2020年的 $5.5\times 10^3\text{ km}^2$ 。与2000年相比，2020年强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀所占面积均有不同程度的增加，分别增长了649.2、363.7、185.2 km^2 ，其中汶川县和理县、小金县的接壤处变化最为明显。

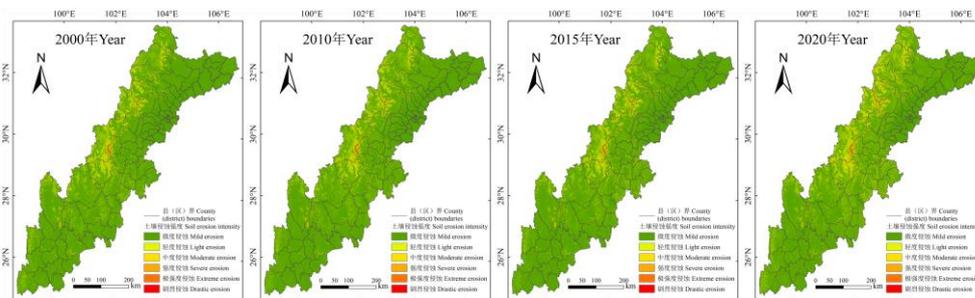


图4 川滇生态屏障区不同时期土壤侵蚀强度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil erosion intensity in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area in different periods

2.4 土壤保持功能

通过 InVEST 模型计算得到川滇区土壤保持情况，结果如图5所示。土壤保持呈先下降后增长的趋势，从2000年至2010年土壤保持模数开始降低，从 $4.0\times 10^3\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 降至 $3.5\times 10^3\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。2010年至2015年土壤保持模数仍呈下降趋势，但仅降低了 $38.6\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ ，趋于好转。从2015年至2020年，土壤保持模数呈增长趋势，从 $3.5\times 10^3\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 增长至 $4.5\times 10^3\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。土壤保持总量的变化趋势与土壤保持模数保持一致，2000年至2015年为下降趋势，2015年至2020年为增长趋势。由图5可知，土壤保持强度低于 $200\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 的区域多为海拔较高的山顶、水域和海拔较低的居民聚集地，如位于康定市和泸定县接壤处的燕子沟和海螺沟冰川森林公园；途经石棉县、汉源县、甘洛县的大渡河流域；川滇区东北部的东坡区、新津县、广汉市等地。从2000年至2020年，土壤保持强度大于 $5\ 000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 的面积有一定的增加，中部和北部地区变化相对明显。

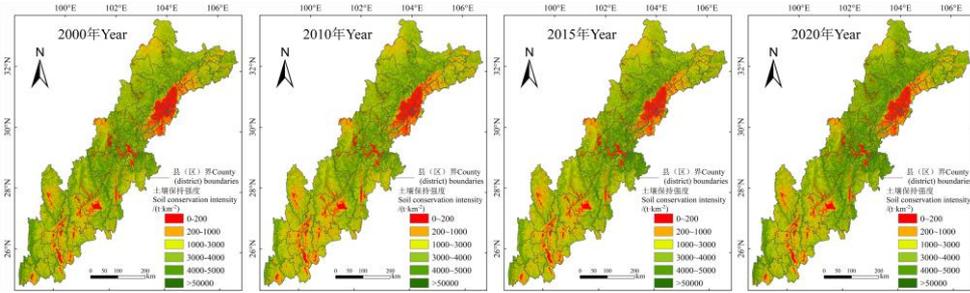


图5 川滇生态屏障区不同时期土壤保持能力空间分布

Fig.5 Spatial distribution of soil conservation capacity in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area in different periods

图6a为不同土地利用类型下的土壤保持模数，其中冰川和裸地的土壤保持模数太小可忽略不记；从2000年至2020年耕地、林地、灌木、草地、建设用地和湿地的土壤保持模数呈先减少后增多的趋势，节点出现在2010年；水域的土壤保持模数逐年升高。林地和灌木的土壤保持模数远远大于其他土地利用类型，且二者很接近，其次为草地、耕地、水域、湿地、建设用地、裸地和冰川。图6b为不同土地利用类型下的土壤保持总量，水域、建设用地、湿地、冰川和裸地的土壤保持总量相对较少，林地的土壤保持总量占主要部分，占比约为75%以上，2000年至2020年4期的土壤保持总量分别为 1.0×10^9 、 9.1×10^8 、 9.9×10^8 、 1.2×10^9 t，与对应的土壤侵蚀模数波动趋势一致；其次为耕地、草地和灌木。

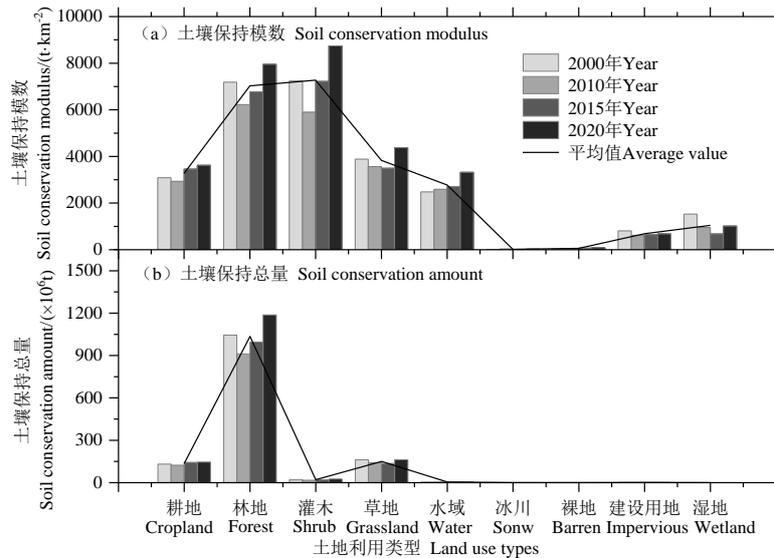


图6 川滇生态屏障区不同土地利用类型的土壤保持情况

Fig.6 Soil conservation of different land use types in the Sichuan-Yunnan ecological barrier area

2.5 土壤侵蚀主控因子

通过分析土壤侵蚀各影响因子的解释力 q 值，发现2000年、2010年、2015年和2020年的主控因素均为土地利用类型，其解释力 q 值逐年降低，由2000年的0.2418降至为2020年的0.1850。高程、植被覆盖度、土壤可蚀性、降雨侵蚀力因子和坡度的解释力 q 值依次降低，对土壤侵蚀的影响依次减弱。采用地理探测的交互作用探测模块对双因子的交互作用进行定量探测，可知任何两种变量对土壤侵蚀空间分布的交互作用均要大于第一种变量的独自作用。土地利用类型与其余5个影响因子的交互协同作用对解释力 q 值提升均较为明显，其中土地利用类型与土壤可蚀性因子的交互协同作用对土壤侵蚀的影响最大，2000年、2010年、2015年和2020年的 q 值分别为0.51、0.51、0.38和0.5。

3 讨论

位于青藏高原东缘地形急变带的川滇区,是我国乃至全球范围内地质灾害最为严重的区域之一,正因如此,该区的水土保持情况也备受关注。在以往的研究中,有学者采用 CSLE 和 RUSLE 方程对川滇区土壤侵蚀和土壤保持情况做了研究^[29-30]。在此基础上本研究采用 InVEST 模型进一步对川滇区土壤保持情况进行分析,结果表明,从 2000 年至 2020 年川滇区土壤侵蚀模数和土壤保持模数均呈先降低后升高的趋势。其中 2015 年至 2020 年侵蚀总量呈增大趋势,与徐庆等^[29]对川滇区 2015 年至 2016 年的研究结果基本一致。但与陈江铃^[30]的研究结果有一定的差别,主要原因是在研究期限、研究方法和研究区域等方面存在差异。陈江铃采用 CSLE 方程,研究了滇北 4 个县和川西 27 个县 2010 年和 2015 年的土壤侵蚀情况,结果表明,川滇区从 2010 年至 2015 年土壤侵蚀模数有减少的趋势,但侵蚀面积仍然有扩展的趋势。与前人研究相比,本研究生成的数据产品的空间分辨率更高(30 m)、结果更直观、可视化更强。虽然川滇区以山地为主,地形陡峭、海拔较高、自然灾害较频繁,导致其潜在土壤侵蚀较大,但是该区的植被覆盖较广,土地利用类型以林地和草地为主。而该用地类型对土壤保持的能力最强,效果最好,这与曹泰彰^[31]的研究结果保持一致。土壤保持能力较低的区域多为地势平坦的居民聚集地,这与张佳惠^[32]的研究结果保持一致,住宅区一般都是开发较为完善的区域,地表缺少自然保护,土壤保持能力偏低。土壤侵蚀和土壤保持不仅与自然因素密切相关,人为因素对其同样有很大的影响,本研究采用地理探测器对其驱动因子进行分析,结果表明川滇区土壤侵蚀的主控因子为土地利用类型,与黄鑫等^[33]对沂蒙山区土壤侵蚀影响因素的研究结果一致。

本研究还存在以下不足:(1) InVEST 模型打破了传统方法的局限性,使复杂问题简化,将复杂机理模型拆分成五个因子,同时也导致了模型输出结果对模型输入参数非常敏感^[34]。因此,在以后的研究中,考虑对各输入参数进行敏感性分析和精度验证。(2) 本研究使用的是空间分辨率为 90 m 的土壤数据、30 m 的 DEM 数据和 NDVI 数据。今后研究可以考虑进一步提高基础数据的空间分辨率,例如,采用空间分辨率为 12.5 m 的 DEM 数据,土地利用类型数据和 NDVI 数据可以通过哨兵 2 数据(空间分辨率为 10 m)来加工生成,土壤数据可以通过数字制图方法来生产空间分辨率为 10 m 的研究区基本土壤属性数据。

4 结论

本文采用 InVEST 模型对川滇区 2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年的土壤侵蚀情况进行分析,对不同土地利用类型、不同植被覆盖度、不同坡度以及不同海拔的土壤保持功能进行了分析,并运用地理探测器对其土壤侵蚀主控因子进行研究,主要结论如下:(1) 土壤侵蚀呈先减少后增长的趋势,土壤侵蚀模数和土壤侵蚀总量分别从 2000 年的 144.8 t·km⁻²和 3.4×10⁷ t 增长至 2020 年的 231.4 t·km⁻²和 5.5×10⁷ t,侵蚀强度以微度侵蚀为主。

(2) 土壤保持呈先下降后增长的趋势,2000 年至 2015 年土壤保持模数和土壤保持总量呈下降趋势,从 2015 年开始逐渐上升,2015 年出现最低值,分别为 3.5×10³ t·km⁻²和 8.2×10⁸ t。(3) 各影响因子对土壤侵蚀的影响程度从高到低依次为:土地利用类型、高程、植被覆盖度、土壤可蚀性因子、降雨侵蚀力因子、坡度,任何两个影响因子的交互作用对土壤侵蚀的影响均大于单因子的影响。

参考文献 (References)

- [1] Wang X K, Gu J, Liu G, et al. The influence of transverse and longitudinal ridge tillage on soil erosion and deposition cycles for mollisol slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 430-439.[王小康, 谷举, 刘刚, 等. 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 430-439.]

-
- [2] Yu W Y, Zhao L S, Zhang J S, et al. Quantitative attribution analysis of driving factors of soil erosion in Xiaolangdi Reservoir area of the Yellow River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 155-163, 171. [余万洋, 赵龙山, 张劲松, 等. 黄河小浪底库区土壤侵蚀驱动因子定量归因分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 155-163, 171.]
- [3] Zheng T, Zhou Z X, Bai J Z. Simulation and characteristic analysis of ecosystem service flow: A case of the soil conservation services in the Jinghe River Basin[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(4): 21-33. [郑婷, 周自翔, 白继洲. 生态系统服务流模拟与特征分析——以泾河流域土壤保持服务为例[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 21-33.]
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains[S]. *USDA Agricultural Handbook*, No.282, 1965,.
- [5] Ma Y, He H M, Zhao H F. Spatiotemporal change of soil erosion in Gannan Tibetan autonomous prefecture based on GIS and RUSLE[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 37-46. [马悦, 何洪鸣, 赵宏飞. 基于 GIS 和 RUSLE 的甘南州土壤侵蚀时空演变[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 37-46.]
- [6] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[C]//*Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference*, 2002.
- [7] Marques S M, Campos F S, David J, et al. Modelling sediment retention services and soil erosion changes in Portugal: A spatio-temporal approach[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(4): 262.
- [8] Xiao Q, Hu D, Xiao Y. Assessing changes in soil conservation ecosystem services and causal factors in the Three Gorges Reservoir region of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S172-S180.
- [9] Guo Z Q, Yan Z J, PaErHaTi M, et al. Assessment of soil erosion and its driving factors in the Huaihe region using the InVEST-SDR model[J]. *Geocarto International*, 2023, 38(1): 2213208.
- [10] Zhao X Y, Wang J F, Li Q, et al. The function of soil conservation in Beisan River Basin based on InVEST model[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2022, 40(4): 487-496. [赵欣悦, 王金凤, 李庆, 等. 基于 InVEST 模型的北三河流域土壤保持功能研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(4): 487-496.]
- [11] Jia W L, Wu S N, Chen A. Research on evaluation of ecosystem services in Chishui River Basin based on InVEST[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, 18(4): 313-320. [贾婉琳, 吴赛男, 陈昂. 基于 InVEST 模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(4): 313-320.]
- [12] Fang T Z, Qin P Y, Wang L M, et al. High temporal- and spatial-resolution green vegetation coverage generation and its application in soil erosion monitoring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5679-5689. [方天纵, 秦朋遥, 王黎明, 等. 高时空分辨率植被覆盖获取方法及其在土壤侵蚀监测中的应用[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5679-5689.]
- [13] Yu Y H, Wang J L. Uncertainty of terrain factors extraction based on different resolution of DEM[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2018, 30(1): 40-45. [玉院和, 王金亮. DEM 不同分辨率对地形因子提取的不确定性[J]. *云南地理环境研究*, 2018, 30(1): 40-45.]
- [14] Zhu Y L. Study on soil erosion pattern and its response to land use change in hilly areas of Northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2021. [祝元丽. 东北低山丘陵区土壤侵蚀格局及其对土地利用变化的响应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.]
- [15] Cui P. Progress and prospects in research on mountain hazards in China[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(2): 145-152. [崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(2): 145-152.]
- [16] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328-340.

-
- [17] Liu F, Zhang G L, Song X D, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114061.
- [18] Peng S Z. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901-2020). National Tibetan Plateau Data Center, DOI:10.5281/zenodo.3185722, CSTR:, 2020[彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集 (1901-2020). 国家青藏高原科学数据中心, DOI:10.5281/zenodo.3185722, CSTR:, 2020.]
- [19] Yang J L, Dong J W, Xiao X M, et al. Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111395.
- [20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [21] Wu Z J, Wang Y Q, Yan B, et al. Research on soil erosion and soil conservation function of Ordos city based on InVEST model[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(8): 31-34, 98. [吴志俊, 王永强, 鄢波, 等. 基于 InVEST 模型的鄂尔多斯市土壤侵蚀及土壤保持功能研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(8): 31-34, 98.]
- [22] Chen S S, Liu K, Li T, et al. Evaluation of ecological service function of soil conservation in Shangluo city based on InVEST model[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 800-807. [陈姗姗, LIU 康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 800-807.]
- [23] Lang Y, Liu N, Liu S R. Changes in soil erosion and its driving factors under climate change and land use scenarios in Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the Southern Hilly Mountain Belt, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5106-5117. [郎燕, 刘宁, 刘世荣. 气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5106-5117.]
- [24] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [25] Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 7-13. [张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7-13.]
- [26] Wang L Z. Research on soil conservation and habitat quality changes in Poyang Lake based on InVEST model[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.[王乐志. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖流域土壤保持和生境质量变化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.]
- [27] Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24. [蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.]
- [28] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [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.]
- [29] Xu Q, Li L, Li G M, et al. Research on ecological environment monitoring technology of Sichuan-Yunnan ecological barrier area based on remote sensing[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(10): 7-10, 13.[徐庆, 李亮, 李国明, 等. 基于遥感的川滇生态屏障区生态环境监测技术研究[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(10): 7-10, 13.]
- [30] Chen J L. Study on monitoring and evaluation of ecological environment in Sichuan-Yunnan ecological barrier area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. [陈江玲. 川滇生态屏障区生态环境监测与评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.]
- [31] Cao T Z. Evaluation of soil conservation function in Gaizhou city based on USLE Model[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2023(5): 11-12. [曹泰彰. 基于 USLE 模型的盖州市土壤保持功能评价研究[J]. *水土保持应用技术*, 2023(5): 11-12.]
- [32] Zhang J H. Study on soil conservation function of Yiluo River Basin based on InVEST model[J]. *Henan*

Science and Technology, 2023, 42(17): 86-90. [张佳惠. 基于 InVEST 模型的伊洛河流域土壤保持功能研究[J]. 河南科技, 2023, 42(17): 86-90.]

[33] Huang X, Chen H, Xu X R, et al. Analysis of temporal and spatial changes and driving factors of soil erosion in the Yimeng mountainous area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(4): 469-479. [黄鑫, 陈红, 徐小任, 等. 沂蒙山区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(4): 469-479.]

[34] Li J, Cao Y Q, Yao J Q, et al. Temporal and spatial variation analysis of soil erosion in Beijing-Tianjin-Hebei region based on RUSLE model[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering, 20231023.1507.006.[李静, 曹永强, 么嘉棋, 等. 基于 RUSLE 模型的京津冀地区土壤侵蚀时空变化分析[J/OL]. 水利水电技术, 20231023.1507.006.]