

基于 InVEST 模型的祁连山地区土壤保持功能 时空演变及驱动因素分析

石建丽¹, 仲俊涛², 刘美娟¹

(1.青海师范大学 地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 探讨祁连山地区土壤保持服务时空变化特征及空间异质性影响因素, 为该区生态保护与可持续发展提供科学参考。[方法] 基于 2005—2020 年 4 期土地利用数据, 结合地形、土壤和气象数据, 运用 InVEST 模型及地理探测器方法, 模拟土壤保持服务, 探究土壤保持量时空变化特征及其价值, 对其空间异质性进行归因分析。[结果] ①祁连山地区 2005—2020 年土壤保持量变化区间为 $5.02 \times 10^9 \sim 7.89 \times 10^9$ t, 呈下降趋势; 土壤保持量在空间分布上表现为东南高西北低, 高值区均集中在研究区青海湖东侧和祁连山脉区域。②不同土地利用类型中, 草地土壤保持总量最大, 林地土壤保持强度最大; 土壤保持强度随海拔增加呈先增后减的单峰曲线, 随坡度增加呈线性增大。③研究区年均土壤保持服务价值为 3.912×10^{13} 元, 以保持土壤肥力的价值 E_1 为主。④地理探测结果显示: 坡度和土壤类型对土壤保持空间异质性的解释力最高, 整体上以植被覆盖度和土壤类型交互作用解释力最高。[结论] 坡度和土壤类型共同作用于植被覆盖度。植被覆盖度为影响土壤保持服务空间异质性的主导因子, 应将部分耕地转为草地或林地, 加大生态保护力度, 提高植被覆盖度, 减少水土流失, 增加土壤保持能力, 从而改善生态环境。

关键词: InVEST 模型; 地理探测器; 土壤保持功能; 祁连山地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0455-10

中图分类号: K901.2

文献参数: 石建丽, 仲俊涛, 刘美娟. 基于 InVEST 模型的祁连山地区土壤保持功能时空演变及驱动因素分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 455-464. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.045; Shi Jianli, Zhong Juntao, Liu Meijuan. Spatiotemporal evolution and driving factors of soil conservation function in Qilian Mountains based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 455-464.

Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Soil Conservation Function in Qilian Mountains Based on InVEST Model

Shi Jianli¹, Zhong Juntao², Liu Meijuan¹

(1. College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China; 2. School of Surveying and Mapping Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The characteristics of spatial and temporal changes in soil conservation services and the attribution of spatial heterogeneity in the Qilian Mountains were explored, in order to provide scientific reference for the ecological protection and sustainable development of the region. [Methods] Based on the four periods of land use data from 2005 to 2020, combined with topographic, soil and meteorological data, we used the InVEST model and geoprobe method to simulate the soil conservation service, explore the spatial and temporal characteristics of soil conservation and its value, and attribute its spatial heterogeneity. [Results] ① The soil conservation volume in Qilian Mountains area from 2005 to 2020 ranged from 5.02×10^9 t to 7.89×10^9 t, with a decreasing trend; the spatial distribution of soil conservation volume was high in the southeast and low in the northwest, and the high value areas were concentrated in the east side of the Qinghai Lake and the Qilian Mountains range in the study area. ② different land use types, grassland soil retention of the largest total amount of soil, forest soil retention intensity was the largest. Soil retention intensity with the increase

收稿日期: 2023-09-02

修回日期: 2023-11-03

资助项目: 青海省自然科学基金项目“黄河源区草地生态系统服务模拟与生态补偿标准厘定”(2022-ZJ-906); 国家自然科学基金项目(42001263)

第一作者: 石建丽(1997—), 女(汉族), 甘肃省庄浪县人, 硕士研究生, 研究方向为区域发展与城乡规划管理。Email: sj13248920231@163.com。

通信作者: 仲俊涛(1988—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 副教授, 主要从事区域地理与可持续发展研究。Email: zhongjuntao88@163.com。

in elevation was first increased and then decreased in the single peak curve, and with the increase in slope was linearly increasing. ③ The average annual value of soil conservation services in the study area was 3.912×10^{13} yuan, with the value of soil fertility conservation E_1 as the main value. ④ The results of geographic exploration showed that slope and soil type had the highest explanatory power for the spatial heterogeneity of soil conservation, and the interaction between vegetation cover and soil type had the highest explanatory power. [Conclusion] Slope and soil type jointly affect vegetation cover, and vegetation cover is the dominant factor influencing the spatial heterogeneity of soil conservation services. It is necessary to convert part of the cultivated land into grassland or woodland, increase ecological protection, improve vegetation cover, reduce soil erosion, increase soil conservation capacity, and thus improve the ecological environment.

Keywords: InVEST model; geographical detector; soil conservation function; Qilian Mountains area

生态系统是人类与自然和谐共生的重要纽带,是无法替代的自然资源和自然资产^[1],生态系统服务是人类从生态系统中获得的所有惠益^[2]。生态系统服务类型包括支持服务(养分循环、土壤形成、初级生产)、供给服务(食物、淡水、燃料)、调节服务(调节气候、洪水、净化水质)、文化服务(美学、精神、教育、消遣)等^[3]。随着人类活动范围的扩大和改造自然能力的提高,生态系统服务功能被日渐削弱^[4]。千年生态系统评估报告^[5]显示,全球大部分生态系统处于退化中,土壤保持服务是区域土壤形成、植被固着、水源涵养等功能的重要基础,可有效削弱因水土流失而造成的土壤肥力下降,农业面源污染等生态环境问题,成为全球变化领域的研究热点之一^[6-7],土壤保持功能的退化将对人类生产生活造成不可逆转的影响,其时空变化及影响机制研究越来越受到人们的关注^[8-9]。

目前,InVEST模型已在国内外得到广泛应用,相较其他模型,InVEST模型适用性和准确度较高^[10],借助GIS平台,量化生态系统服务功能并实现评估结果的可视化表达,在生态系统服务模拟与评估方面发挥着重要作用^[11]。如Haunreiter等^[12]运用该模型评估土壤保持、产水量、碳储存、生物多样性等服务功能。国内相关学者从省市^[13]、流域等^[11]不同生态单元出发,运用InVEST模型模拟土壤保持服务,并进行空间变化分析。但大多数研究都只局限于某一固定时段,且多侧重于土壤保持服务时空变化分析等方面,在土壤保持服务影响机制以及长时间连续性土壤保持方面的研究尚显不足。在影响机制研究方法中,地理探测器在空间分异归因方面得到广泛应用^[14]。

祁连山地区是中国西部重要的生态安全屏障,属于全球变化的敏感区和生态系统典型脆弱区^[15]。当前关于祁连山地区的生态系统研究多集中于气候变化^[16]、水文调节^[17]、水源涵养等^[18]方面,缺乏专门针对土壤保持服务空间分布特征及其驱动机制的研究。

基于此,本文以祁连山地区为研究区,基于2005—2020年4期土地利用数据,运用InVEST模型模拟土壤保持服务时空变化过程,结合地理探测器多因子交互探测模型剖析其空间异质性影响因素,以期探明祁连山地区土壤保持功能时空变化规律,为祁连山地区生态保护与可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

祁连山地区位于甘肃省西南部,北起河西走廊,东抵乌鞘岭,南邻黄河谷地、共和盆地、茶卡和柴达木盆地,西至当金山口,整体呈西北—东南走向。介于 $35^{\circ}58'—39^{\circ}20'N$, $94^{\circ}50'—103^{\circ}10'E$ 之间,流域面积为 $176\,216\text{ km}^2$,海拔介于 $1\,660—5\,738\text{ m}$,以高原气候和温带大陆性气候为主,年平均降雨量为 $150—400\text{ mm}$ ^[19]。主要的土地利用类型有耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

研究采用InVEST模型中的泥沙输移子模块,是以像元尺度的通用土壤流失方程计算方法为基础,模拟祁连山地区土壤保持空间分布。以数字高程模型DEM、降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、土地利用数据(LULC)、植被覆盖度和作物管理因子(C)、水土保持措施因子(P)等数据为输入参数。

2.1.1 降雨侵蚀力(R) 本文采用祁连山地区2005—2020年的年降雨量数据,计算 R 值,计算公式为^[20]:

$$R = 0.53P^{1.655} \quad (1)$$

式中: R 为年降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; P 为年均降雨量(mm)。

2.1.2 土壤可蚀性(K) 本文采用Williams等^[21]建立的EPIC模型计算土壤可蚀性参数(K)(图1),其计算公式为:

$$K_{\text{EPIC}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.256 S_a (1.0 - S_l/100)]\} \times [S_l / (C_l + S_l)]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25 C / [C + \exp(3.72 - 2.95 C)]\} \times \{1.0 - 0.7 \text{SN}_1 / [\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SN}_1)]\} \quad (2)$$

式中: S_a 为砂粒含量(%); S_l 为粉粒含量(%); C_l 为黏粒含量(%); C 为有机碳含量(%); $\text{SN}_1 = 1 - S_a/100$ 。此公式中会计算的 K 值单位为美国制惯用单位,需将此值乘上 0.131 7 转化成国际单位制 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)]$ 。

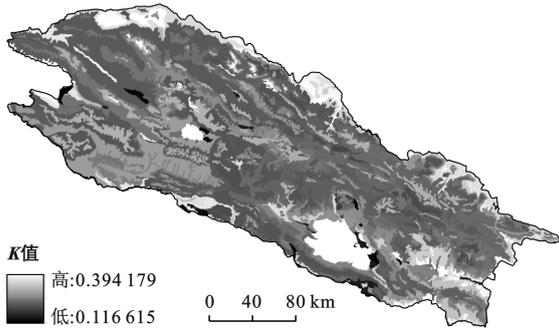


图 1 祁连山地区土壤可蚀性因子 K 值分布

Fig.1 Distribution of soil erodibility factor K in Qilian Mountains

2.1.3 坡度坡长因子(LS) 坡度坡长因子可通过对 DEM 数据进行填洼处理,将其输入 InVEST 模型计算 LS 值。本文借鉴 Liu 等^[22]对坡度在 9%~55% 陡坡土壤侵蚀的发展研究得到的公式:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (3)$$

$$\lambda = I \times \cos \alpha \quad (4)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为水平投影坡长(m); I 为地表沿流向的水流长度; α 为水流地区的坡度值; m 是可变的坡度指数,当:

$$m = \begin{cases} 0.2 & (\theta < 0.57^\circ) \\ 0.3 & (0.57^\circ \leq \theta < 1.72^\circ) \\ 0.4 & (1.72^\circ \leq \theta < 2.86^\circ) \\ 0.5 & (2.86^\circ < \theta) \end{cases} \quad (5)$$

坡度计算基于分级进行,计算公式^[22]:

$$S = \begin{cases} 10.80 \times \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.80 \times \sin \theta - 0.50 & (5^\circ < \theta \leq 10^\circ) \\ 21.91 \times \sin \theta - 0.96 & (\theta > 10^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$)。

2.1.4 植被覆盖因子(C) 本研究采用蔡崇法^[23]提出的运用植被覆盖度(c)求解 C 值公式,计算不同土地利用类型 C 值。计算公式为:

$$c = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (7)$$

$$C = \begin{cases} 1 & (c = 0) \\ 0.650 8 - 0.343 6 \lg c & (0 < c \leq 78.3\%) \\ 0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (8)$$

式中: C 为植被覆盖因子; c 为植被覆盖率; NDVI

为归一化植被指数; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为无植被覆盖区域的 NDVI 值; NDVI_{veg} 为完全被植被所覆盖的像元的 NDVI 值。

2.1.5 水土保持因子(P) P 值区间为 0~1,0 代表基本不发生侵蚀的地区,而 1 代表未采取任何控制措施的地区。本文依据美国农业部 703 号手册,参考相关学者的研究成果^[24],耕地运用 $P = 0.2 - 0.03 \times \text{slope}$ 对祁连山地区不同土地利用类型的 P 值进行赋值(表 1)。

表 1 祁连山地区各类土地类型水土保持措施因子(P)
Table 1 Soil and water conservation measures factor (P) for various land types in Qilian Mountains

土地利用类型	耕地	林地	草地	水体	不透水面	裸地	冰川
P 值	0.31	1	1	0	0	1	0

2.1.6 土壤保持 以潜在土壤侵蚀与实际土壤侵蚀的差值来表征生态系统土壤保持功能。土壤保持计算公式为^[25]:

$$\text{RKLS} = R \times K \times \text{LS}$$

$$\text{USLE} = R \times K \times \text{LS} \times C \times P$$

$$\text{SC} = \text{RKLS} - \text{USLE} + E_i \quad (9)$$

式中: RKLS , USLE 分别表示潜在土壤侵量(t)和实际土壤侵蚀量(t); SC 表示土壤保持量; E_i 表示泥沙持流量。

2.1.7 土壤保持生态服务功能价值估算 采用市场价值法、影子工程法、替代成本法等生态系统服务价值核算方法,依据土壤保持量,从保持土壤肥力、减轻泥沙淤积和减少土地废弃 3 方面定量估算土壤保持服务价值,最后汇总计算流域总价值量^[26]。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (10)$$

$$E_1 = A \times B_i \times C_i \times P_i \quad (11)$$

$$E_2 = 0.24 \times A \times C / P \quad (12)$$

$$E_3 = A \times B / (0.6 \times P \times 10\ 000) \quad (13)$$

式中: E 为土壤保持服务价值(元); E_1 为保持土壤肥力价值(元); E_2 为减轻泥沙淤积价值(元); E_3 为减少土地废弃价值(元); A 为研究区土壤保持量(t); B_i 为土壤中氮、磷、钾平均含量,分别为 0.15%, 0.13%, 1.02%^[27]; C_i 为土壤中的氮、磷、钾折算成相应肥料(尿素、过磷酸钙和氯化钾)的系数^[27]; D_i 为化肥的市场价格(元/ t); C 为水库工程费用(元· m^3); P 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^3$); 0.24 为全国平均土壤侵蚀泥沙淤积率^[26]; B 为农林业年均收益(元· hm^2), 0.6 为土层平均厚度。

2.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性并揭示各要素空间分异的统计学方法,由王劲峰等^[28]提出,由四部分组成。本文以祁连山地区土壤保持量为因变量 Y 。影响因子选择地形地貌、土壤、植被、土地利用等要素(表 2)。在因子间相互联系的渔网构建上,本文按照 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 间隔共生成 43 015 个点以进行多因子空间关联。

表 2 祁连山地区土壤保持服务空间分异影响因子

Table 2 Factors affecting spatial differentiation of soil conservation services in Qilian Mountains

类型	指标	数据类型
地形地貌	高程	连续
	坡度	连续
土壤	土壤类型数据	离散
植被	NDVI	连续
土地利用	土地利用类型	离散

2.3 数据来源

根据 InVEST 模型与地理探测器模型数据要求,本文数据源包括土壤数据、DEM、土地利用数据、气象数据、祁连山地区边界数据、植被覆盖数据。DEM、土壤数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),土地利用成品数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。尿素价格、过磷酸钙价格和氯化钾价格来源于中国化肥网(<http://www.fert.cn>),有机质价格来源于中国农资网(www.ampcn.com)。农林牧渔业年均收益来源于甘肃和青海统计年鉴。水库工程费用数据来源于甘肃省水利厅(<http://slt.gansu.gov.cn/>),以上土壤保持模型空间参数数据均设置成 30 m 分辨率,地理坐标为 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

3 结果与分析

3.1 祁连山地区土壤保持服务时空分布

从时间变化上看(图 2),祁连山地区土壤保持量年际变化整体上呈减少趋势,土壤保持最高峰出现在 2005 年,土壤保持量为 $7.89 \times 10^9\text{ t}$,土壤保持强度为 $557.79\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,土壤保持量最低值出现在 2020 年,土壤保持总量为 $5.02 \times 10^9\text{ t}$,土壤保持强度为 $355.07\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其他年份在此之间上下浮动。祁连山地区土壤保持总量变化区间为 $5.02 \times 10^9 \sim 7.89 \times 10^9\text{ t}$,土壤保持量年际变化整体上表现为下降

趋势,由 2005 年的 $7.89 \times 10^9\text{ t}$ 下降到 2020 年的最低值 $5.02 \times 10^9\text{ t}$,减少了 $2.87 \times 10^9\text{ t}$,下降率为 36.37% ,其他年份在此之间上下浮动。

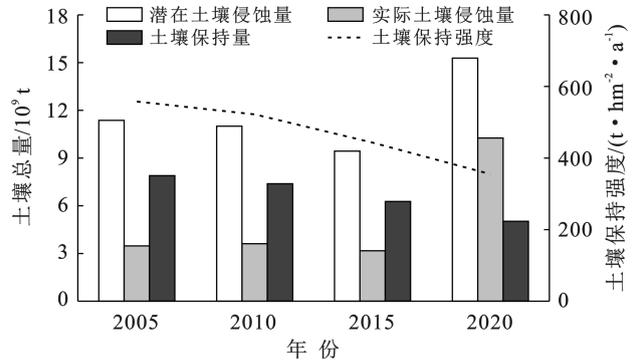


图 2 祁连山地区 2005—2020 年相关土壤数据对比

Fig.2 Comparison of soil data in Qilian Mountains from 2005 to 2020

从空间变化上看(图 3),结果显示 2005—2020 年间祁连山地区土壤保持量变化区间为 $0 \sim 479.04 \times 10^4\text{ t}$,土壤保持强度变化范围为 $355.07 \sim 557.79\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,2020 年较 2005 年高值区上升 $123.95 \times 10^4\text{ t}$,增幅达 34.91% 。其中 2005—2020 年平均土壤保持量分别为 $5.22 \times 10^4, 5.58 \times 10^4, 4.43 \times 10^4, 3.55 \times 10^4\text{ t}$,平均土壤保持量呈先增后降的单峰曲线,整体略有减少。土壤保持量在 2005—2020 年空间分布格局上变化浮动较小,表现为东南高西北低。研究时段内土壤保持高值区均集中在流域青海湖东侧和祁连山脉区域,土壤保持最低值主要分布在祁连山脉西南部区域。

3.1.1 不同土地利用类型土壤保持特征 由表 3 可知,草地、未利用地和水体是祁连山地区最主要的土地利用类型,3 者分别占流域总面积的 $58.04\%, 29.29\%, 9.56\%$ 。祁连山流域土壤保持总量变化范围为 $5.02 \times 10^9 \sim 7.89 \times 10^9\text{ t}$,其中草地的土壤保持量最大,其值在 $33.58 \times 10^8 \sim 51.37 \times 10^8\text{ t}$ 间变化,土壤保持量最小的是耕地,变化范围为 $5.90 \times 10^7 \sim 1.08 \times 10^8\text{ t}$ 。林地的土壤保持强度在近 16 a 期间最大,变化范围为 $1\ 140.47 \sim 1\ 711.40\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;其次是耕地、草地,强度最小的是未利用地,变化范围为 $153.10 \sim 317.49\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。该结果表明不同的土地利用类型土壤保持能力差异较大。2015 较 2020 年耕地和林地土壤保持总量和土壤保持强度大幅增加,其他土地利用类型土壤保持总量和土壤保持强度都为下降趋势。所以应该在下一阶段采取适当的水土保持措施,保护未利用地的土壤保持能力,降低研究区的水土流失。

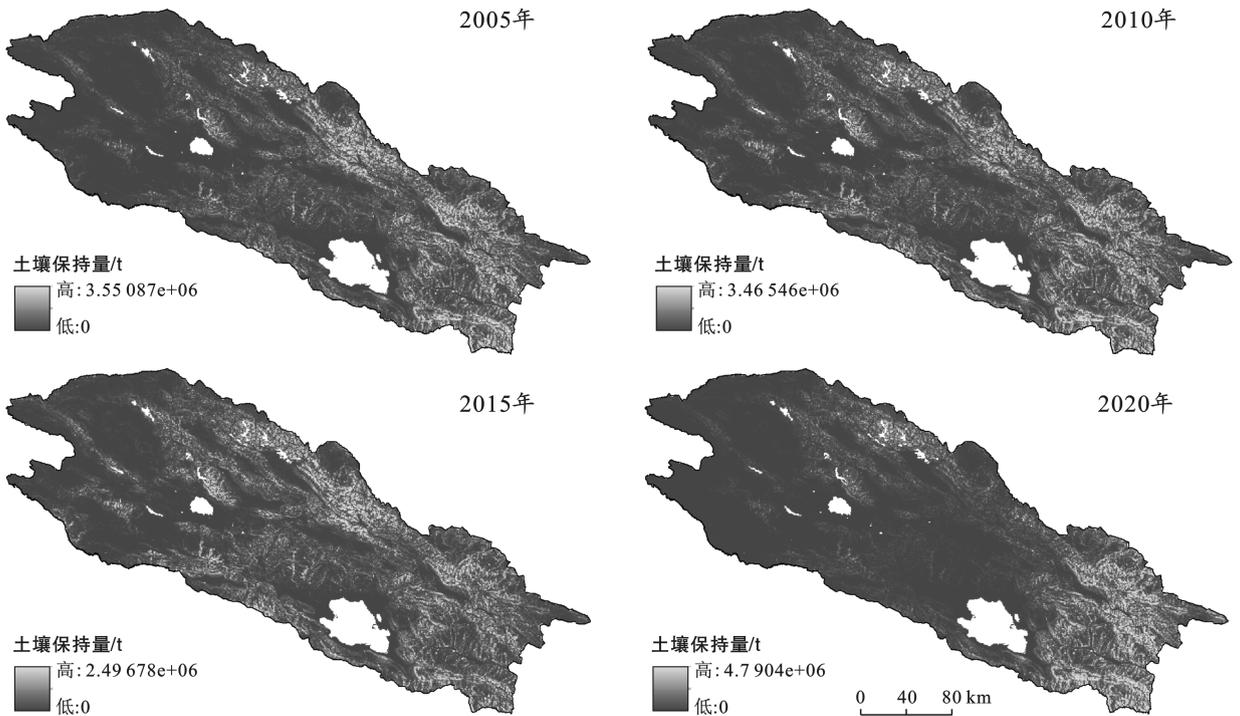


图3 2005—2020年祁连山地区土壤保持空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil conservation in Qilian Mountains from 2005 to 2020

表3 2005—2020年不同土地利用类型祁连山地区土壤保持总量与土壤保持强度

Table 3 Total soil conservation and soil conservation intensity of different land use types in Qilian Mountains from 2005 to 2020

土地利用类型	2005年		2010年		2015年		2020年	
	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$
耕地	0.96	897.00	0.98	927.73	0.59	547.37	1.08	1 032.28
林地	5.23	1 642.60	5.44	1 711.40	3.64	1 140.47	4.87	1 530.21
草地	51.73	613.67	47.48	578.26	40.17	474.37	33.58	403.90
未利用地	13.32	317.49	10.03	242.17	12.09	280.44	5.98	153.10

3.1.2 不同海拔土壤保持特征 表4结果表明,土壤保持强度随海拔增加呈先增后减的单峰曲线。土壤保持强度在2 700~3 200 m区域达到最大,在4 200~4 700 m的区域强度最小,变化区间为161.07~387.86 $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

土壤保持总量主要集中在2 700~4 200 m区域,总量在3 200~3 700 m最大,面积占研究区总面积的23.8%,3 700~4 200 m的区域次之,大于5 200 m的区域最小,土壤保持总量变化区间依次为 1.40×10^9 t~ 2.23×10^9 t, 8.93×10^8 t~ 2.02×10^9 t, 4.00×10^6 t~ 0.150×10^7 t。对于整个研究区而言,3 200~3 700 m的区域由于植被覆盖和水土保持措施对土壤保持的作用增大,是土壤保持量主要集中区域和土壤保持强度最大的区域。

3.1.3 不同坡度土壤保持特征 表5为研究区土壤保持服务按不同坡度的统计结果。

由表5可知,2005—2020年土壤保持总量在坡度介于 $5^\circ \sim 10^\circ$ 区域达到最大, $10^\circ \sim 15^\circ$ 的区域次之, 20° 以上的区域最小。土壤保持总量变化区间为 $1.81 \times 10^9 \sim 2.81 \times 10^9$ t, $1.47 \times 10^9 \sim 2.23 \times 10^8$ t, $1.34 \times 10^8 \sim 2.45 \times 10^8$ t;在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 区域,面积为 9.44×10^6 hm^2 ,占研究区面积的66.74%,尽管该区域土壤保持总量较大,但面积最大,所以土壤保持强度最低,变化区间为132.76~214.59 $t/(hm^2 \cdot a)$, 20° 以上的区域土壤保持强度区间达到最大,为1 719.40~3 150.53 $t/(hm^2 \cdot a)$,其次是 $10^\circ \sim 20^\circ$ 的区域, $0^\circ \sim 5^\circ$ 的区域强度最低。

总体上,祁连山地区土壤保持量主要集中在坡度为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的区域,祁连山地区的植被覆盖措施和水土保持措施所发挥的土壤保持效应随坡度增大而不断增强,祁连山地区的土壤保持强度也随着坡度增加而不断提升,且增速较大。

表 4 2005—2020 年不同海拔祁连山地区土壤保持总量与土壤保持强度

Table 4 Total soil conservation and soil conservation intensity at different elevations in Qilian Mountains from 2005 to 2020

海拔高度/m	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$
1 700~2 200	1.31	912.05	1.22	854.63	0.80	561.54	1.33	928.71
2 200~2 700	8.09	939.19	8.09	938.85	5.42	629.01	8.15	946.14
2 700~3 200	14.52	977.90	14.89	1 003.33	10.68	719.75	12.61	849.19
3 200~3 700	21.57	784.42	22.33	811.94	17.55	638.21	13.99	508.58
3 700~4 200	18.71	482.34	20.18	520.50	17.44	449.59	8.93	230.19
4 200~4 700	6.52	309.14	8.17	387.86	7.40	351.06	3.39	161.07
4 700~5 200	1.15	388.68	1.69	573.60	1.50	509.30	0.61	205.21
>5 200	0.10	323.31	0.15	488.91	0.13	447.67	0.04	149.43

表 5 2005—2020 年不同坡度等级祁连山地区土壤保持总量与土壤保持强度

Table 5 Total soil conservation and soil conservation intensity of different slope grades in Qilian Mountains from 2005 to 2020

坡度	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	土壤保持总量/ 10^8 t	土壤保持强度/ $(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$
$0^\circ \sim 5^\circ$	18.51	156.13	20.25	214.59	15.78	167.25	12.53	132.76
$5^\circ \sim 10^\circ$	26.27	633.17	28.13	901.67	22.05	706.54	18.14	581.23
$10^\circ \sim 15^\circ$	21.15	1 231.99	22.29	1 748.33	17.83	1 398.58	14.70	1 152.75
$15^\circ \sim 20^\circ$	5.54	1 792.32	5.75	2 500.59	4.80	2 086.83	3.51	1 527.13
$>20^\circ$	2.36	2 422.35	2.45	3 150.53	2.19	2 811.10	1.34	1 719.40

3.2 土壤保持服务价值时空变化

祁连山地区 2005—2020 年,年均保持土壤肥力的价值、年均减少泥沙淤积损失的价值、年均减少土地废弃的价值和年均土壤保持服务价值依次为 3.910×10^{13} , 1.245×10^{10} , 4.530×10^9 , 3.912×10^{13} 元。从表 6 可以看出,保持土壤肥力价值、减少泥沙淤积损失的价值和减少土地废弃的价值对土壤保持服务价值的贡献不同,其中 E_1, E_2, E_3 分别占 99.96%, 0.032% 和 0.012%, 表明 2005—2020 年祁连山地区生态系统土壤保持服务价值以保持土壤肥力价值为主。总体上看,2005—2020 年祁连山地区土壤保持服务价值呈波动递减的态势,从 2005 年的 4.647×10^{13} 元,下降至 2020 年的 2.959×10^{13} 元,降幅为 36.34%。

表 6 2005—2020 年祁连山地区土壤保持服务价值
Table 6 Value of soil conservation services in Qilian Mountains from 2005 to 2020

年份	保持土壤肥力价值 $E_1/^{13}$ 元	减少泥沙淤积损失价值 $E_2/^{10}$ 元	减少土地废弃价值 $E_3/^{8}$ 元	土壤保持服务价值 $E/^{13}$ 元
2005	1.837	1.479	3.042	1.839
2010	1.720	1.385	3.998	1.721
2015	1.459	1.175	5.514	1.461
2020	1.170	0.942	5.557	1.171
平均	1.547	1.245	4.528	1.548

从空间分布来看(图 4),研究区土壤保持服务生态价值量的高值地区(>8 亿元)主要集中在研究区最北部边缘的张掖市地区,次高值区集中在研究区中部。从县域分布来看,肃南裕固族自治县土壤保持价值最高,天祝藏族自治县、门源回族自治县、祁连县、天峻县为土壤保持价值次高值区,景泰县、瓜州县、肃州区、玉门市、古浪县、甘州区、高台县、临泽县、山丹县、尖扎县、城北区、城东区、城西区、城中区属于全区土壤保持服务价值总量低县区。

3.3 土壤保持服务空间异质性归因分析

在整个祁连山地区尺度上,纵观 2005—2020 年各因子对土壤保持服务空间异质性的影响程度(图 5),可以看出,坡度和土壤类型对土壤保持空间异质性的释力最高,因子解释力 q 值分别在 17.95%~38.59% 和 9.59%~19.35% 之间波动,远高于其他因子解释力。分析发现,土壤保持能力随着坡度的增大而增加,坡度越大土壤保持能力越强;解释力 $< 10\%$ 的因子中以植被覆盖度和高程解释力最高,两者差异不明显。土地利用类型因子的解释能力则最低,对土壤保持服务空间分异影响极小。多因子交互探测结果显示,多种因子之间的内在联系共同作用促进了土壤保持服务的空间异质性^[20]。在整个研究区及不同分区内,其中植被覆盖度与土壤类型的交互作用

解释力均为最大值,解释力达到 67%,对土壤保持服务空间分异起到第一主导作用,土壤类型叠加其他因子对土壤保持服务空间分异分别起到第二和第三主

导作用。可见,植被覆盖度、海拔、土壤类型等环境因子在祁连山地区土壤保持服务空间分异方面发挥着不可替代的作用。

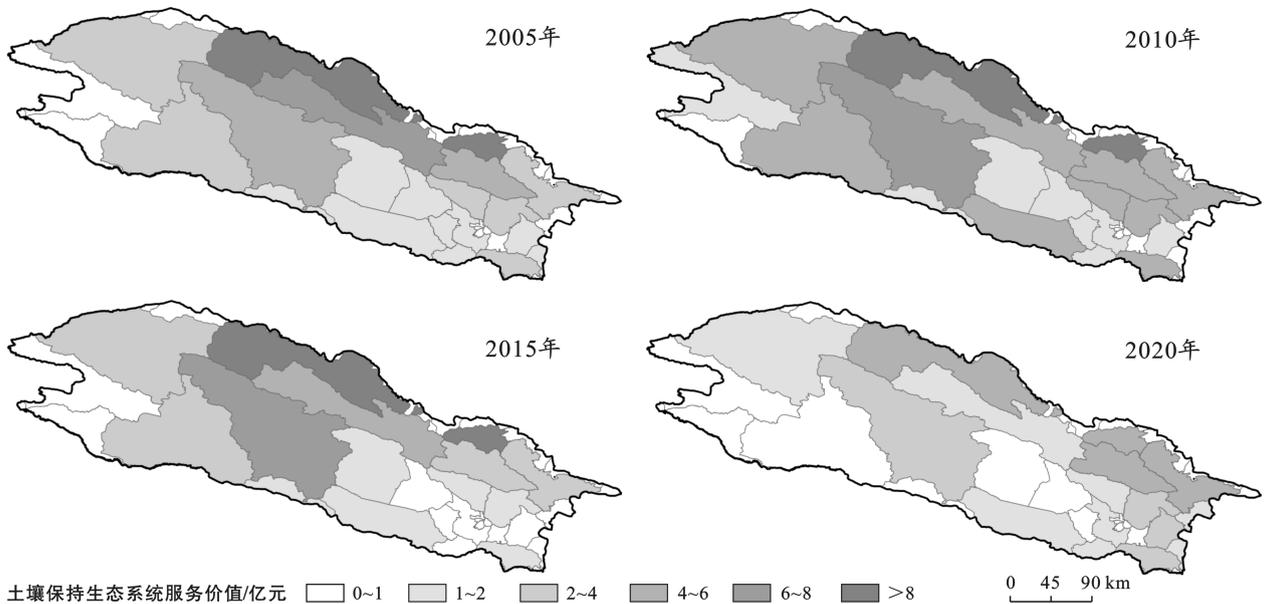


图 4 2005—2020 年祁连山地区土壤保持生态服务价值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil conservation ecological service value in Qilian Mountains from 2005 to 2020

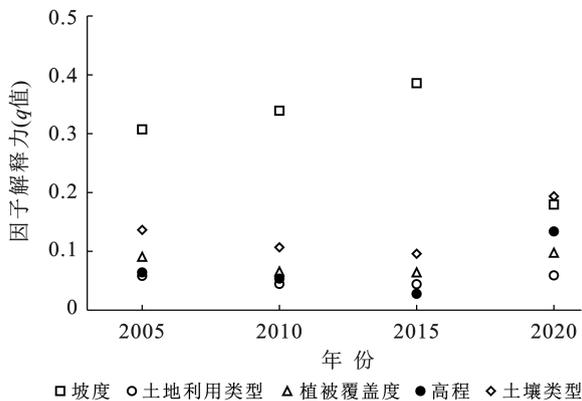


图 5 2005—2020 年祁连山地区因子对土壤保持空间异质性的影响程度

Fig.5 Effects of factors on spatial heterogeneity of soil conservation in Qilian Mountains from 2005 to 2020

4 讨论

土壤保持是生态系统减少的土壤侵蚀,对保持土壤养分,防止土地退化,减轻河流泥沙淤积等具有重要作用^[25]。本文运用 InVEST 模型得到祁连山地区 2005—2020 年间土壤保持总量变化范围为 $5.02 \times 10^9 \text{ t} \sim 7.89 \times 10^9 \text{ t}$,土壤保持强度变化范围为 $355.07 \sim 557.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,高于国家平均水平 $[224.42 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ^[29]。借助 ArcGIS 软件得到研究区 2005—2020 侵蚀类型主要包括土壤保持量时空变化情况,结果显示土壤保持量呈逐年下降趋势,导致这

一变化的原因主要是土壤侵蚀量增加。青海祁连山土壤侵蚀遥感监测报告的检测结果显示,祁连山区的土壤侵蚀主要包括水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀 3 种类型。侵蚀类型平均强度来看,冻融侵蚀平均强度最大,其次是水利,风力侵蚀最小;从侵蚀面积来看,冻融侵蚀面积最大,水利侵蚀面积次之,风力侵蚀最小;从地域分布来看,风蚀和冻融侵蚀主要分布在研究区西部,水蚀主要分布在研究区东部。受海拔、坡度、气候、土壤、植被等空间分异的影响,祁连山地区生态系统土壤保持功能呈现高度空间异质性。本文尝试利用地理探测器多因子探测方法识别土壤保持服务空间异质性归因,测试结果显示单因子对土壤保持服务空间分异的解释力存在显著差异,坡度和土壤类型是影响土壤保持服务空间异质性的主要驱动力,这与已有研究结果一致^[30]。不同的海拔、坡度会导致土壤类型以及植被类型分布不同,祁连山地区土壤类型多样,有山地草原栗钙土、山地森林灰褐土、亚高山灌丛草甸土等十多种,主要植被有乔木林、灌丛、草原和草甸。坡度和海拔均为西北高东南低,植被覆盖度呈西北向东南递增的空间格局^[19]。

祁连山地区土壤保持服务研究过程中存在着较大的不确定因素,主要包括:①受到数据缺乏等因素限制,难以在大尺度应用^[31],②除土壤类型、坡度、海拔、土地利用类型、降雨等自然因素外,土壤保持服务

还受到人为因素的影响。祁连山区域地跨甘肃、青海两省,在祁连山的庇护下,河西走廊形成一个个绿洲城市,并产生了东西方文明交流的通道——丝绸之路^[27]。区域人口增长和经济发展是影响土壤保持服务的重要人为因素^[13],在今后的研究中应着重研究人为因素对土壤保持服务空间分异的影响。丰富的植被能够加固土壤,减少水土流失,植被覆盖率的大小可直接影响土壤被侵蚀程度,因此在流域进行全面治理的时候,从可持续的角度出发,继续巩固退耕还林还草成果,提高植被覆盖度,合理改变土地利用方式,兼顾生态效益和经济效益相统一^[11]。

5 结论

(1) 研究时段内祁连山地区土壤保持量年际变化趋势较明显,整体上呈递减趋势。研究时段内土壤保持高值区均集中在流域青海湖东侧和祁连山脉区域,土壤保持最低值主要分布在祁连山脉西南部区域。

(2) 不同地类中,草地土壤保持总量最大,林地土壤保持强度最大;在不同海拔高度,土壤保持强度随海拔增加呈先增后减的单峰曲线;在不同坡度等级,土壤保持强度随坡度增加呈线性增大。植被覆盖措施和水土保持措施所发挥的土壤保持效应随坡度增大而不断增强,所以应该采取适当的措施提高研究区土壤保持能力,降低水土流失。

(3) 土壤保持价值 E_1 , E_2 和 E_3 对土壤保持服务价值的贡献不同,以保持土壤肥力价值 E_1 为主,年平均值为 3.912×10^{13} 元,总体上呈逐年下降趋势,可将一些不良耕地转变为草地和林地,减少祁连山地区水土流失,改善生态环境,使生态系统土壤保持服务价值增益显著。

(4) 地理探测结果发现,植被生长需要的条件有水热和土壤等,结合单因子和交互因子探测可知,植被覆盖度是影响土壤保持服务空间异质性的主导因子。应因地制宜地制定相关生态环境保护措施,减小植被破坏,增强土壤保持能力,促进生态恢复和可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The value of ecosystem services in China [J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [2] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.

Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 571-576.

- [3] 李双成,刘金龙,张才玉,等.生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J].地理学报,2011,66(12):1618-1630.
Li Shuangcheng, Liu Jinlong, Zhang Caiyu, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [4] 常畅,王耕.基于 InVEST 模型的碧流河流域土壤保持功能研究[J].国土与自然资源研究,2019(4):8-10.
Chang Chang, Wang Geng. Study on soil conservation function of Biliu River based on the InVEST model [J]. Territory & Natural Resources Study, 2019(4): 8-10.
- [5] United Nations Environment Program. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being [M]. Washington, D C: Island Press, 2005.
- [6] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.
Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 365-376.
- [7] 肖洋,欧阳志云,徐卫华,等.基于 GIS 重庆土壤侵蚀及土壤保持分析[J].生态学报,2015,35(21):7130-7138.
Xiao Yang, Ouyang Zhiyun, Xu Weihua, et al. GIS-based spatial analysis of soil erosion and soil conservation in Chongqing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7130-7138.
- [8] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等.子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):188-197.
Yan Lingling, Gong Jie, Xu Caixian, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of soil conservation service in Ziwuling Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 188-197.
- [9] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(5):381-388.
Wang Xiuming, Liu Xucheng, Long Yingxian, et al. Spatial-temporal changes and influencing factors of ecosystem services in Shaoguan City based on improved InVEST [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 381-388.
- [10] 杨君,周鹏全,袁淑君,等.基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J].水土保持通报,

- 2022,42(1):267-272.
- Yang Jun, Zhou Pengquan, Yuan Shujun, et al. Land ecosystem service functions for Dongting Lake ecological economic zone based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(1):267-272.
- [11] 何莎莎,朱文博,张静静,等.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤保持功能研究[J].*河南大学学报(自然科学版)*,2018,48(5):542-553.
- He Shasha, Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, et al. The function of soil conservation on Taihang Mountain Qihe River Basin based on InVEST model [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2018, 48 (5): 542-553.
- [12] Haunreiter E, Cameron D. Mapping ecosystem services in the Sierra Nevada, CA [J]. *The Nature Conservancy, California Program*, 2001,12(1):16-32.
- [13] 王敏,阮俊杰,姚佳,等.基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究:以福建宁德为例[J].*水土保持研究*,2014,21(4):184-189.
- Wang Min, Ruan Junjie, Yao Jia, et al. Study on soil conservation service of ecosystem based on InVEST model: A case study of Ningde City, Fujian Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(4):184-189.
- [14] 刘美娟,仲俊涛,王蓓,等.基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J].*地理科学*, 2023,43(3):411-422.
- Liu Meijuan, Zhong Juntao, Wang Bei, et al. Spatio-temporal change and driving factor analysis of the Qinghai Lake Basin based on InVEST model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023,43(3):411-422.
- [15] 丁永建,叶柏生,刘时银.祁连山区流域径流影响因子分析[J].*地理学报*,1999,54(5):431-437.
- Ding Yongjian, Ye Baisheng, Liu Shiyin. Effect of climatic factors on streamflow in the alpine catchment of the Qilian Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999,54(5):431-437.
- [16] 周祖昊,韩宁,蔡静雅,等.祁连山区冰川演变特征及对气候变化的响应:以苏干湖流域为例[J].*冰川冻土*, 2017,39(6):1172-1179.
- Zhou Zuhao, Han Ning, Cai Jingya, et al. Variation characteristics of glaciers and their response to climate change in the Qilian Mountains: Take the Suganhu basin as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017,39(6):1172-1179.
- [17] 孙飞翔,吕一河,胡健.祁连山大野口小流域生态系统水文调节服务的尺度特征[J].*生态与农村环境学报*, 2015,31(3): 273-279.
- Sun Feixiang, Lü Yihe, Hu Jian. Scales of hydrological regulation service of Dayekou watershed eco-system in the Qilian Mountains [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015,31(3):273-279.
- [18] 王军德,李元红,李赞堂,等.基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究:以石羊河上游杂木河流域为例[J].*生态学报*,2010,30(21):5875-5885.
- Wang Junde, Li Yuanhong, Li Zantang, et al. Optimization of vegetation covers in Qilian Mountains based on hydrological responses by SWAT model: A case study of Zamu River Basin in Upper Shiyang River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(21):5875-5885.
- [19] 王顺利,刘贤德,金铭,等.祁连山区气候变化与流域径流特征研究[J].*干旱区资源与环境*,2011,25(1):162-165.
- Wang Shunli, Liu Xiande, Jin Ming, et al. The Impact of temperature and precipitation on the streamflow in the middle part of the Qilian Mountains, Northwestern China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011,25(1):162-165.
- [20] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*,2021,35(2):31-37.
- Wei Jianmei, Li Changbin, Wu Lei, et al. Study on soil erosion in Northwestern Sichuan and Southern Gansu (NSSG) based on USLE [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(2):31-37.
- [21] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion: Sediment yield models [J]. *Soil Technology*, 1997,11(1):43-55.
- [22] 杨洁,郭晓敏,宋月君,等.江西红壤坡地柑橘园生态水文特征及水土保持效益[J].*应用生态学报*,2012,23(2):468-474.
- Yang Jie, Guo Xiaomin, Song Yuejun, et al. Ecohydrological characteristics and soil and water conservation effect of citrus plantation on slope red soil of Jiangxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012,23(2):468-474.
- [23] 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.
- Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000,14(2):19-24.
- [24] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].*农业工程学报*,2011,27(2):337-344.
- Lu Jianzhong, Chen Xiaoling, Li Hui, et al. Soil erosion

- changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 337-344.
- [25] 饶恩明, 肖焱. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8741-8749. Rao Enming, Xiao Yi. Spatial characteristics and effects of soil conservation service in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8741-8749.
- [26] 朱青, 周自翔, 刘婷, 白继洲. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究: 以延河流域为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2557-2570. Zhu Qing, Zhou Zixiang, Liu Ting, et al. Vegetation restoration and ecosystem soil conservation service value increment in Yanhe Watershed, Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 41(7): 2557-2570.
- [27] 陈童尧, 贾燕锋, 王佳楠, 等. 基于 InVEST 模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 150-159. Chen Tongyao, Jia Yanfeng, Wang Jianan, et al. Current situation and function of soil conservation in national nature reserves in the Qilian Mountains based on InVEST model [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 150-159.
- [28] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] Rao Enming, Ouyang Zhiyun, Yu Xinxiao, et al. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China [J]. Geomorphology, 2014, 207: 64-70.
- [30] 贾振宇, 王世曦, 刘学, 等. 辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 686-692. Jia Zhenyu, Wang Shixi, Liu Xue, et al. Spatial and temporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Liaohe Conservation Area [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 686-692.
- [31] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 432-440. Liu Yue, Zhao Wenwu, Jia Lizhi. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 432-440.

(上接第 399 页)

- [27] 涂安国, 莫明浩, 李英, 等. 2000—2014 年江西东江源区水源涵养量时空变化[J]. 山地学报, 2022, 40(5): 694-703. Tu Anguo, Mo Minghao, Li Ying, et al. Spatio-temporal variation of water conservation in the source area of the Dongjiang River in Jiangxi Province of China from 2000 to 2014 [J]. Mountain Research, 2022, 40(5): 694-703.
- [28] 王亚慧, 戴尔阜, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 371-386. Wang Yahui, Dai Erfu, Ma Liang, et al. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain Region [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2): 371-386.
- [29] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽妹, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 669-679. Sun Xiaoyin, Guo Hongwei, Lian Lishu, et al. The Spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake basin [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 669-679.
- [30] 王晓峰, 尧文洁, 冯晓明, 等. 青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2023, 43(17): 6968-6982. Wang Xiaofeng, Yao Wenjie, Feng Xiaoming, et al. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 6968-6982.