

# 伊洛河流域土壤保持生态服务功能动态变化

曾麒洁<sup>1</sup>, 李双权<sup>2</sup>, 马玉凤<sup>2</sup>, 张志华<sup>1</sup>, 钱发军<sup>2</sup>, 杜军<sup>2</sup>, 毕会涛<sup>1</sup>

(1.河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450052; 2.河南省科学院 地理研究所, 河南 郑州 450002)

**摘要:** [目的] 分析河南省伊洛河流域土壤保持生态服务功能的动态变化特征, 为流域水土保持和生态管理建设提供参考。[方法] 采用修正通用水土流失方程(RUSLE)和统计学方法, 分析2010—2020年伊洛河流域土壤保持功能时空变化特征以及影响因素。[结果] ①2010—2020年伊洛河流域土壤保持功能呈递减趋势; 空间分布基本一致, 整体呈西南高, 东北低的分布格局。②不同生态系统类型的土壤保持功能差异较大, 2010—2020年森林和灌丛生态系统土壤保持总量较高, 农田生态系统面积最大, 但土壤保持功能较弱。③不同海拔和坡度的土壤保持功能随海拔和坡度的增加不断加强。④2010—2020年伊洛河流域土壤保持功能空间差异性主要受地形因素的控制, 时间变化主要受降雨侵蚀力的影响。[结论] 应注重和维护土壤保持功能较强的森林和灌丛生态系统, 增强农田生态系统的水土保持措施, 从而提高流域土壤保持功能, 有助于提升伊洛河流域的生态安全。

**关键词:** 土壤保持; 伊洛河流域; 生态系统; 动态变化; 河南省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)02-0350-11

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 曾麒洁, 李双权, 马玉凤, 等. 伊洛河流域土壤保持生态服务功能动态变化特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 350-360. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230426.001; Zeng Qijie, Li Shuangquan, Ma Yufeng, et al. Dynamic change of soil conservation ecological service function in Yiluo River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 350-360.

## Dynamic Change of Soil Conservation Ecological Service Function in Yiluo River Basin

Zeng Qijie<sup>1</sup>, Li Shuangquan<sup>2</sup>, Ma Yufeng<sup>2</sup>, Zhang Zhihua<sup>1</sup>, Qian Fajun<sup>2</sup>, Du Jun<sup>2</sup>, Bi Huitao<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou, He'nan 450002, China;

2.Institute of Geography, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, He'nan 450052, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic change characteristics of the soil conservation ecological service function in the Yiluo River basin in He'nan Province were determined in order to provide a reference for soil and water conservation and ecological management construction in the basin. [Methods] The revised universal soil loss equation (RUSLE) and statistical methods were used to analyze the dynamic change characteristics and influencing factors of the soil conservation function in the Yiluo River basin from 2010 to 2020. [Results] ① The soil conservation function for the Yiluo River basin decreased from 2010 to 2020. The spatial distribution pattern was basically the same, and the overall distribution pattern was high in the southwest and low in the northeast of the study area during the ten years. ② The soil conservation functions of different ecosystem types were quite different. From 2010 to 2020, the total amount of soil conservation in the forest and shrub ecosystems was relatively high. The area of the farming ecosystem was the largest, but the soil conservation function was weak. ③ The role of the soil conservation function increased as altitude and slope increased. ④ The spatial differences of soil conservation functions in the Yiluo River basin from 2010 to 2020 were

收稿日期: 2022-08-01

修回日期: 2022-10-26

**资助项目:** 河南省软科学研究计划项目“河南黄河流域生态状况变化与保护对策研究: 以伊洛河流域为例”(222400410358); 中央引导地方科技发展资金项目“河南省沿黄生态保护与高质量发展地理国情监测及研究”(211201004); 河南省科学院科研开发专项“淮河干流上游月儿湾段阶地发育过程研究”(220601103)

**第一作者:** 曾麒洁(1996—), 女(汉族), 四川省自贡市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务与水土保持。Email: 601543469@qq.com。

**通讯作者:** 马玉凤(1981—), 女(汉族), 河南省新乡市人, 博士, 副研究员, 主要从事生态环境和环境演化研究。Email: mayf@igs-has.cn。

mainly controlled by topographic factors, and the temporal changes were mainly affected by rainfall erosivity. [Conclusion] Greater attention should be given to maintaining forest and shrub ecosystems with strong soil conservation functions, and strengthening the soil and water conservation measures of farmland ecosystems so as to improve the soil conservation function and the ecological security of the Yiluo River basin.

**Keywords:** soil conservation; Yiluo River basin; ecosystem; dynamic change; He'nan Province

生态系统服务是人类生存和发展的基础,在维持全球生态系统平衡上发挥重要作用<sup>[1]</sup>。水土保持功能是生态系统服务的重要功能之一,具有增加水源补给、减轻土壤侵蚀和维护区域生态安全等作用<sup>[2-3]</sup>。土壤侵蚀风险在人类活动和气候变化影响下日益加剧,严重的土壤侵蚀不仅使土壤肥力降低、生产力下降,还易造成洪涝灾害<sup>[4-5]</sup>,这已成为全球共同面对的一大环境问题,并引起了国内外学者<sup>[6-9]</sup>的关注,对生态系统水土保持功能开展了深入研究<sup>[9-11]</sup>。水土保持功能的研究多采用通用土壤流失方程(USLE)和修正后的通用水土流失方程(RUSLE),以实际土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量的差值作为土壤保持量<sup>[8]</sup>。USLE和RUSLE已广泛应用于不同区域、流域尺度评估,国内学者对海南<sup>[12]</sup>、四川<sup>[13]</sup>、山西<sup>[14]</sup>、黑龙江<sup>[15]</sup>、江苏<sup>[16]</sup>、陕西等<sup>[17]</sup>省份的土壤保持功能进行评估,并分析其生态安全重点保护区域。随着信息技术的发展,从长时间尺度分析水土保持功能变化及其影响因素的研究越来越多,不同地区影响水土保持功能的因子不同。柳冬青等<sup>[18]</sup>、贾振宇等<sup>[19]</sup>发现降水量是影响2002—2014年白龙江流域和2000—2015年三江源区水土保持功能变化的主要因素。李子等<sup>[20]</sup>、田宇等<sup>[21]</sup>认为人类活动干扰是2000—2018年渭河流域和1990—2015年三峡库区水土保持功能变化的主要驱动力。贾振宇等<sup>[22]</sup>指出2010—2018年影响辽河土壤保持格局的主导因素是土地利用类型。廖雯等<sup>[23]</sup>分析出2010—2020年丹江口库区受地形因子的影响水土保持功能不断增强。了解区域生态系统水土保持功能的状况及其影响因子,对区域持续健康发展至关重要。河南省是黄河流域流经的重要省份,河南省的生态安全关乎整个黄河流域的生态安全 and 高质量发展,但目前对黄河流域河南段的相关研究较少,也缺乏长时间尺度上对伊洛河流域水土保持功能影响因素的系统分析。

伊洛河为黄河的十大支流之一,是黄河三门峡以下最大的支流,也是我国生态系统水土保持功能的重点区域,生态地位十分重要。流域内有中原城市群副中心城市洛阳市、煤炭城市义马市和全国百强县巩义市等。伊洛河流域人口众多,伴随着城市化加快、水利兴建、土地类型变化等人类活动的影响,人地矛盾问题愈加明显,流域内水土保持功能受到一定威胁。

本文对伊洛河流域2010—2020年的生态系统水土保持功能进行研究,分析伊洛河流域不同的生态系统类型、植被覆盖度、气候、土壤、地形等因素共同作用下水土保持功能的时空动态变化,利用SPSS分析伊洛河流域生态系统水土保持功能的主要影响因子,旨在为加强伊洛河流域生态保护,促进黄河流域生态安全 and 高质量发展提供借鉴。

## 1 研究区概况

伊洛河(33°33'—35°05'N, 109°45'—113°06'E)是黄河的一级支流,由伊河和洛河两大水系组成。伊洛河位于河南省西北部,由西南向东北汇入黄河,是黄河水资源较丰富的支流之一,全长974 km,省内流域面积15 811 km<sup>2</sup>,占整个伊洛河流域总面积的83.74%,占河南省黄河流域总面积的43.29%。其中,伊河发源于河南省内的熊耳山区栾川县张家村,由西南向东北流,在偃师市枣庄注入洛河;洛河发源于陕西省洛南县,自西向东流入河南省境内,两河汇合后在河南省巩义市洛口以北流入黄河。伊洛河流域位于我国二、三级阶梯过渡地带,即山地向平原过渡地区,地貌类型多样,地势整体上西南高、东北低。伊洛河流域上游主要以山地地貌为主,植被较好,有原始森林,植被覆盖度高;中下游以丘陵和平原为主,是全流域的经济中心和重要的粮食基地,人口密度较高,植被覆盖度相对较低。研究区气候属于暖温带大陆性季风气候,夏秋炎热多雨,春冬寒冷干旱,暴雨集中在7—8月,约占汛期降水量的85%,降雨具有量大、面广、集中、历时长等特点。伊洛河流域矿产资源非常丰富,在流域内已经形成了资源开采、加工、运输、销售等一系列资源型工业企业,成为当地经济发展的重要支撑。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

生态系统水土保持功能用土壤保持量表示,本文采用国家生态环境部2021年8月实施的《全国生态状况调查评估技术规范:生态系统服务功能评估(HJ1173-2021)》<sup>[24]</sup>中推荐的修正通用水土流失方程(RUSLE)的土壤保持服务模型开展评价,计算公式为:

$$Q_{sr}=Q_{se\_p}-Q_{se\_a}\tag{1}$$

$$Q_{se\_p}=R\cdot K\cdot L\cdot S\tag{2}$$

$$Q_{se\_a}=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot C\tag{3}$$

式中: $Q_{sr}$ 为土壤保持量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $Q_{se\_p}$ 为潜在土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $Q_{se\_a}$ 为实际土壤侵蚀量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $R,K,L,S,C$ 分别为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)],土壤可蚀性因子[t·hm<sup>2</sup>·a/(MJ·hm<sup>2</sup>·mm)],坡长因子、坡度因子、植被覆盖因子。

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。降雨侵蚀力因子是降雨对土壤剥离、搬移以及地表冲刷能力的大小的体现,表现出降雨导致土壤侵蚀和流失发生的潜在能力。计算公式<sup>[24]</sup>为:

$$r=\sum_{k=1}^{24}r_{\text{半月}K}\tag{4}$$

$$K_{\text{EPIC}}=\{0.2+0.3\exp[-0.025\ 6m_s(1-m_{\text{silt}}/100)]\}\times[m_{\text{silt}}/m_c+m_{\text{silt}}]^{0.3}\times\{1-0.25\text{orgC}/[\text{orgC}+\exp(3.72-2.95\text{orgC})]\}\times\{1-0.7(1-m_s/100)/\{(1-m_s/100)+\exp[-5.51+22.9(1-m_s/100)]\}\}\tag{6}$$

$$K=(-0.013\ 83+0.515\ 75K_{\text{EPIC}})\times0.131\ 7\tag{7}$$

式中: $K_{\text{EPIC}}$ 为采用侵蚀—生产力评价模型计算的修正前的土壤可蚀性因子[t·hm<sup>2</sup>·a/(MJ·hm<sup>2</sup>·mm)]; $K$ 为修正后的土壤可蚀性因子[t·hm<sup>2</sup>·a/(MJ·hm<sup>2</sup>·mm)]; $m_s$ 为砂粒(0.05~2 mm)百分含量(%); $m_{\text{silt}}$ 为粉粒(0.002~0.05 mm)百分含量(%); $m_c$ 为黏粒(<0.002 mm)百分含量(%); $\text{orgC}$ 为有机碳的百分含量(%)。

(3) 坡长坡度因子( $LS$ )。坡度坡长因子是形成水土流失的动力条件,影响地表物质的搬运、堆积等过程与速度,反映了地形地貌对土壤侵蚀的影响。计算公式<sup>[24]</sup>为:

$$\begin{cases} S=10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5^\circ) \\ S=16.8\sin\theta-0.5 & (5^\circ\leq\theta<10^\circ) \\ S=21.91\sin\theta-0.96 & (\theta\geq10^\circ) \end{cases}\tag{8}$$

表 1 伊洛河流域不同生态系统植被覆盖因子赋值<sup>[24]</sup>

Table 1 Assignment of vegetation cover factors of different ecosystems in the Yiluo River basin

生态系统类型	不同覆盖度植被的覆盖因子赋值					
	<10%	10%~30%	30%~50%	50%~70%	70%~90%	>90%
森林	0.1	0.08	0.06	0.02	0.004	0.001
灌丛	0.4	0.22	0.14	0.085	0.04	0.011
草地	0.45	0.24	0.15	0.09	0.043	0.011
园地	0.41	0.225	0.14	0.088	0.042	0.011

(5) 统计分析。生态系统土壤保持功能的空间格局受气候、地形、土壤和植被覆盖因素的综合影响。为揭示伊洛河流域土壤保持功能的空间差异,本文自变量选取降雨侵蚀力因子、坡长坡度因子、土壤可蚀

$$r_{\text{半月}K}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\sum_{j=0}^m(\alpha\cdot P_{i,j,k}^{1.726\ 5})\tag{5}$$

式中: $r$ 为多年平均年降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $r_{\text{半月}K}$ 为第 $k$ 个半月的降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)]; $k$ 为一年的24个半月,即 $k=1,2\cdots24$ ; $i$ 为所用降雨资料的年份,即 $i=1,2\cdots n$ ; $j$ 为第 $i$ 年第 $k$ 个半月侵蚀性降雨日的天数,即 $j=1,2\cdots m$ ; $P_{i,j,k}$ 为第 $i$ 年第 $k$ 个半月第 $j$ 个侵蚀性日降雨量(mm); $\alpha$ 为参数,暖季 $\alpha=0.393\ 7$ ,冷季 $\alpha=0.310\ 1$ ,根据每月温度将4—10月定为暖季,11月到次年3月定为冷季。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )。土壤可蚀性因子是土壤本身性质不同所引起的侵蚀量差异的体现,是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标。计算公式<sup>[24]</sup>为:

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m\tag{9}$$

$$m=\beta/(1+\beta)\tag{10}$$

$$\beta=(\sin\theta/0.089)/[3.0\times(\sin\theta)^{0.8}+0.56]\tag{11}$$

式中: $L$ 为坡长因子; $S$ 为坡度因子; $m$ 为坡长指数; $\theta$ 为坡度(°); $\lambda$ 为坡长(m)。

(4) 植被覆盖管理因子( $C$ )。植被覆盖管理因子反映了生态系统类型和植被覆盖度对土壤侵蚀的影响,是控制土壤侵蚀的积极因素<sup>[25]</sup>。 $C$ 因子取值范围在0~1之间,以全国生态状况调查评估技术规范<sup>[24]</sup>为指导,结合相近区域的研究成果<sup>[23,26-28]</sup>,其中湿地、城镇、耕地、水田、裸地的植被覆盖因子分别赋值为0,0.01,0.375,0和0.7,其余生态系统类型按不同植被覆盖度进行赋值(表1)。

性因子、植被覆盖因子和生态系统类型,因变量选取单位面积土壤保持量,借助 SPSS 进行分析。

2.2 数据来源与处理

本研究采用的数据主要有:气象、地形、土壤、植被

覆盖度、生态系统类型数据(表 2)。生态系统类型解译数据分别采用 2010 年 30 m 的 TM 影像和 2015 年、2020 年分辨率为 16 m 的高分影像数据(“全国生态状况调查评估”工作中由环保部卫星中心下发)。为了与全国生态状况进行对比,与原始影像分辨率一致,本文

采用 16 m×16 m 的栅格。土壤可蚀性因子、坡度坡长因子和植被管理因子根据计算公式在 ArcGIS 中利用栅格计算器对各因子进行计算,并对所有因子进行重采样,得到 16 m×16 m 大小栅格,经过地理配准、校正等处理,再参与水土保持功能的计算和分析。

表 2 本研究数据来源及数据处理  
Table 2 Data source and processing of this study

名称	类型	分辨率/比例	数据来源	数据处理
气象数据	文本	—	2006—2020 年国家基本气象站点日观测数据	利用 2006—2020 年伊洛河流域 12 mm 以上的日降水数据算出 2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年 3 个时间段的每 5 a 的平均降雨侵蚀力,在 ArcGIS 软件中利用克里金空间插值得到流域年降雨侵蚀力栅格图,将结果分别应用于 2010、2015 和 2020 年的土壤保持量计算
地形数据	栅格	30 m	地理空间数据云	根据公式,在 ArcGIS 软件中进行坡度坡长的计算
土壤数据	矢量	1:100 万	黑河计划数据管理中心的“基于世界土壤数据库的中国土壤数据集”	根据土壤机械组成和土壤有机质含量公式,利用 ArcGIS 软件中栅格计算器求得土壤可蚀性因子
植被覆盖度	栅格	500 m	利用 MODIS 反射率数据(MOD09)反演而来	根据 2010、2015 和 2020 年的月植被覆盖度栅格图,在 ArcGIS 软件中利用栅格计算器得到年均植被覆盖度栅格图
生态系统类型	栅格	30 m(2010 年), 16 m(2015 和 2020 年)	生态环境部和中科院联合开展的全国生态状况变化遥感调查评估项目	在 ArcGIS 软件中对 2010 年数据进行重采样,得到与 2015 和 2020 年分辨率一致的数据。参考相近区域的研究成果 <sup>[23-24,26-28]</sup> 并结合区域实际情况和计算的植被覆盖度对植被管理因子进行赋值

3 结果与分析

3.1 土壤保持量时空变化分析

2010—2020 年伊洛河流域土壤保持量变化明显(图 1—2),总体呈下降趋势。2010 年土壤保持总量为  $1.38 \times 10^9$  t,单位面积土壤保持量  $873 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;2015 年土壤保持总量下降至  $8.97 \times 10^8$  t,单位面积土壤保持量  $567.1 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,下降了 35.04%;2020 年土壤保持总量下降至  $8.59 \times 10^8$  t,单位面积土壤保持量  $543.58 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,下降了 4.14%。2010—2020 年伊洛河流域土壤保持量空间分布特征基本保持一致,整体呈西南高、东北低的空间分布格局。研究区土壤保持量较高的主要集中在西南区域的栾川县、卢氏县;较低的主要分布在东北区域的洛阳市区、偃师市等。2010—2015 年栾川县单位面积土壤保持量下降明显,减少量大于  $1\,000 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;2015—2020 年,土壤保持量下降明显的栾川县较前 5 a 有所增加,但之前增长的伊川县西部、嵩县北部等出现下降趋势。总体而言,2010—2020 年伊洛河流域单位面积土壤保持量变化幅度较大,研究区中部的洛阳市区、新安县、宜阳县北部和伊川县西部呈增长趋势,西南和东北区域的栾川县、卢氏县、洛宁县、巩义市等呈减少趋势,且西南区域的栾川县、卢氏县减少明显。伊河流域和洛河流域土壤保持总量较为接近,但单位面积土壤保持量伊河流域大于洛河流域(表 3)。2010—

2020 年伊河流域和洛河流域的土壤保持量都呈下降趋势,2010—2015 年下降明显,伊河流域土壤保持总量由 2010 年  $6.96 \times 10^8$  t 下降到 2015 年  $4.10 \times 10^8$  t,单位面积土壤保持量下降了  $478.32 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,下降了 41.06%;洛河流域土壤保持总量由 2010 年  $6.84 \times 10^8$  t 下降至 2015 年  $4.87 \times 10^8$  t,单位面积土壤保持量下降了  $201.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,下降了 28.91%。2015—2020 年伊洛河流域土壤保持量呈下降趋势,相比前 5 a 整体变化不大,伊河、洛河流域土壤保持总量分别下降  $2.00 \times 10^6$  t、 $3.50 \times 10^7$  t。

3.2 土壤保持量随生态系统类型的变化

对 2010—2020 年伊洛河流域生态系统类型数据进行统计,得到流域各生态系统类型分布图(图 3)。伊洛河流域生态系统类型以农田为主,2020 年面积  $6\,641.05 \text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 42%,其次是森林和灌丛生态系统。2010—2020 年伊洛河流域各生态系统类型发生了不同程度的变化,主要表现在森林、灌丛、湿地、城镇生态系统面积呈增长趋势,草地、农田生态系统面积呈下降趋势。

为明确伊河和洛河流域的土壤保持功能情况,对两个流域的生态系统土壤保持量进行分析比较(图 4—5)。结果表明,2010—2020 年伊河流域以农田和森林生态系统为主,2020 年分别占总面积的 38.07%和 34.65%,其土壤保持总量分别占伊河流域的 9.41%、66.87%;洛河流域以农田生态系统为主,2020



年占总面积 46.4%，其土壤保持总量占洛河流域 达 33.13%，面积占 16.97%，单位面积土壤保持量伊 23.07%，森林生态系统 2020 年土壤保持总量最高， 河较洛河流域更高。

表 3 伊洛河流域的土壤保持量  
Table 3 Soil conservation amount of the Yiluo River basin

流域	面积/ hm <sup>2</sup>	2010 年		2015 年		2020 年	
		土壤保持量/ 10 <sup>8</sup> t	单位面积土壤 保持量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	土壤保持量/ 10 <sup>8</sup> t	单位面积土壤 保持量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	土壤保持量/ 10 <sup>8</sup> t	单位面积土壤 保持量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
伊洛河	1 581 105	13.80	873.00	8.97	567.10	8.59	543.58
伊 河	597 413	6.96	1 164.78	4.10	686.46	4.08	682.24
洛 河	983 692	6.84	695.80	4.87	494.60	4.52	459.36

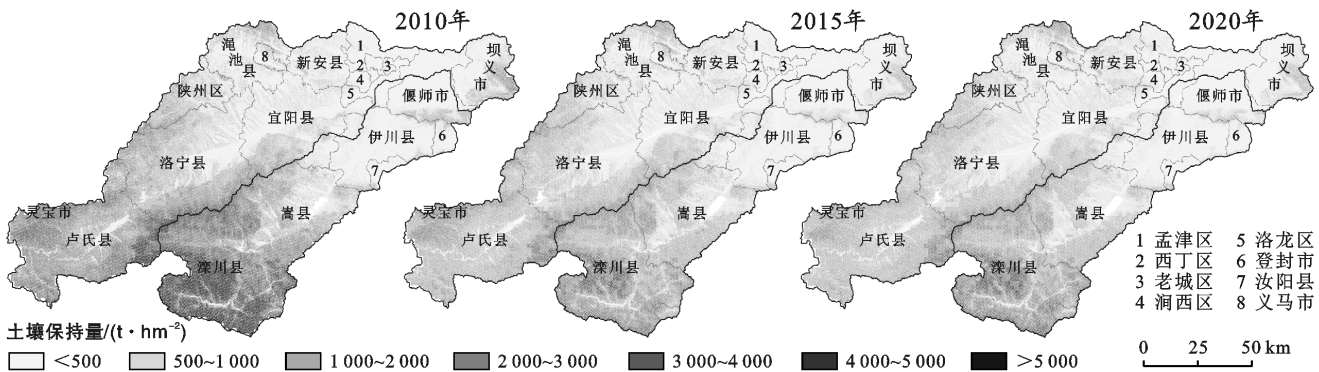


图 1 2010—2020 年伊洛河流域土壤保持量空间分布  
Fig.1 Spatial distribution of soil conservation in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

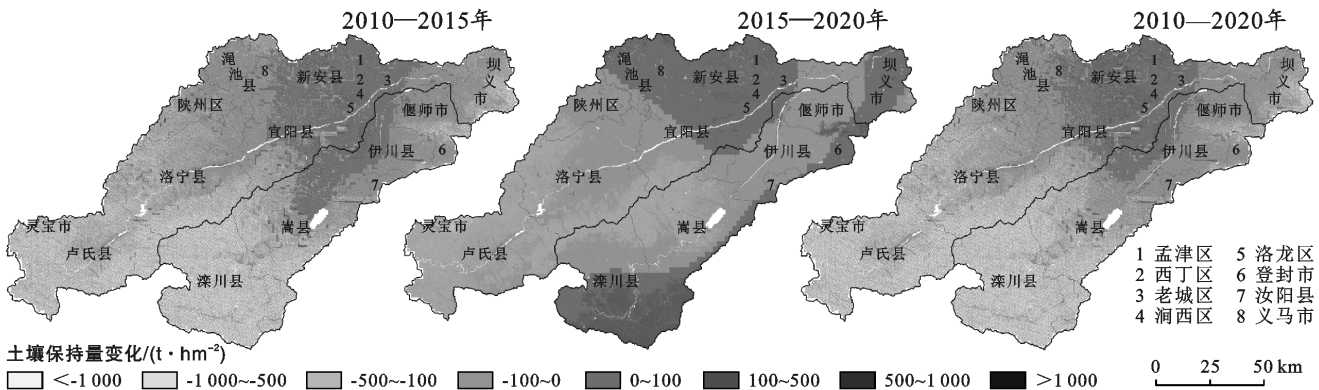


图 2 2010—2020 年伊洛河流域土壤保持量变化  
Fig.2 Change of soil conservation in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

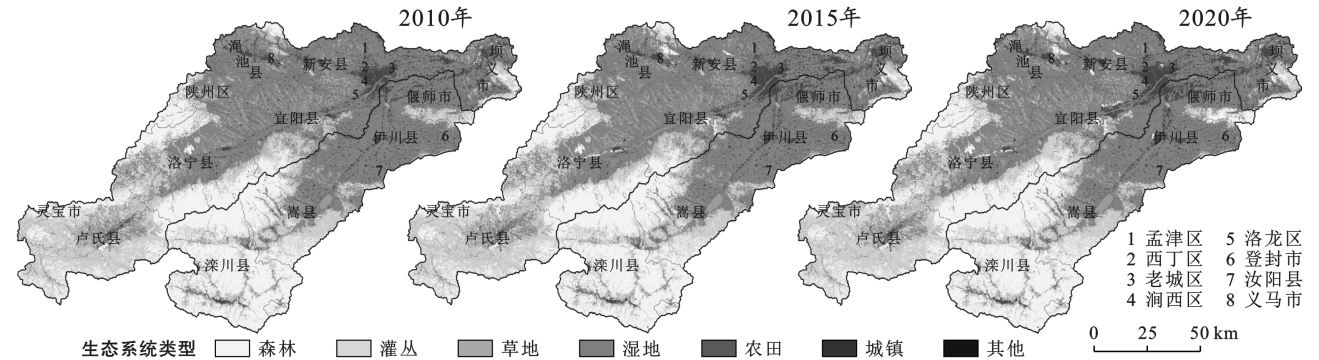


图 3 2010—2020 年伊洛河流域生态系统类型  
Fig.3 Types of ecosystem in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

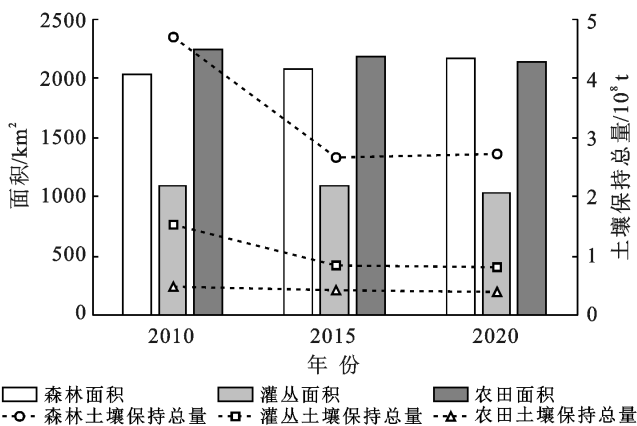


图 4 伊河流域 2010—2020 年主要生态系统类型的土壤保持总量

Fig.4 Total amount of soil conservation of main ecosystem types in the Yihe River basin from 2010 to 2020

利用生态系统类型转移矩阵对各地类转入和转出的面积进行统计(表 4)。2010—2020 年伊洛河流域生态系统类型主要特点:转入和转出面积最大的分

别是灌丛和草地生态系统,其次是城镇和农田生态系统。流域内面积最大的农田生态系统,转出面积 478.19 km<sup>2</sup>,其中转向城镇生态系统 280.1 km<sup>2</sup>,占转出面积的 58.45%。

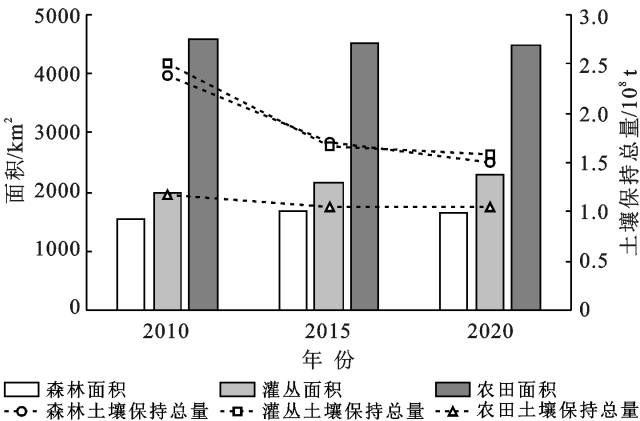


图 5 洛河流域 2010—2020 年主要生态系统类型的土壤保持总量

Fig.5 Total amount of soil conservation of main ecosystem types in Luohe River basin from 2010 to 2020

表 4 伊洛河流域 2010—2020 年生态类型转移矩阵								
Table 4 Ecological type transfer matrix in the Yiluo River basin from 2010 to 2020								
km <sup>2</sup>								
2020 年面积	项 目	2010 年面积						
		森林生态系统	灌丛生态系统	草地生态系统	湿地生态系统	农田生态系统	城镇生态系统	其 他
	森林生态系统	3 543.57	191.56	32.15	2.05	41.10	7.92	0.31
	灌丛生态系统	64.13	2 879.84	330.60	1.59	57.99	9.36	0.18
	草地生态系统	56.61	13.17	681.18	0.84	20.45	0.77	0.02
	湿地生态系统	0.84	3.08	1.68	99.22	77.83	2.44	4.49
	农田生态系统	9.82	36.91	90.83	7.36	6 404.78	90.38	0.98
	城镇生态系统	3.38	6.31	7.74	4.82	280.10	737.64	0.95
	其 他	0.15	0.11	0.04	0.01	0.72	0.06	2.30
总 计		3 678.51	3 130.97	1 144.21	115.89	6 882.97	848.57	9.22
		15 810.34						

2010—2020 年伊洛河流域不同生态系统类型的土壤保持总量差异较大,且都呈下降趋势(图 6)。森林土壤保持总量最高,但下降幅度最大,由 2010 年  $7.06 \times 10^8$  t,占研究区总量的 51.16%,下降到 2020 年  $4.22 \times 10^8$  t,总量下降 40.18%;灌丛仅次于森林,2020 年土壤保持总量为  $2.38 \times 10^8$  t,占研究区总量的 27.74%;其他生态系统类型的土壤保持总量比例较小。2020 年森林和灌丛生态系统面积占研究区总面积的 45.3%,而土壤保持量占研究区总量的 76.86%。伊洛河流域不同生态系统类型的土壤保持功能存在明显差异(图 7)。2020 年伊洛河流域单位面积土壤保持量最大的是森林生态系统,1 109.61 t/(hm<sup>2</sup> · a);灌丛生态系统仅次于森林生态系统;湿地、农田、城镇生态系统单位面积土壤保持量远小于

森林和灌丛生态系统。2010—2020 年土壤保持量整体呈下降趋势,虽然森林和灌丛土壤保持功能较强,但其土壤保持量下降最大,总量上分别下降了  $2.83 \times 10^8$  t 和  $1.64 \times 10^8$  t,单位面积土壤保持量分别下降了 853.45 和 593.75 t/(hm<sup>2</sup> · a)。上述研究表明,2010—2020 年伊洛河流域农田、森林、灌丛是研究区的主要生态系统类型,其中森林和灌丛土壤保持总量较高,且面积呈增长趋势,但森林和灌丛单位面积土壤保持量大幅度下降,使研究区土壤保持总量呈下降趋势。研究区农田生态系统面积最大,但单位面积土壤保持量较小,土壤保持功能较弱,存在土壤侵蚀的风险。因此,应采取适当的水土保持措施提高农田生态系统的土壤保持功能,加强维护土壤保持功能较强的森林和灌丛生态系统,从而增强研究区的土壤保持功能。

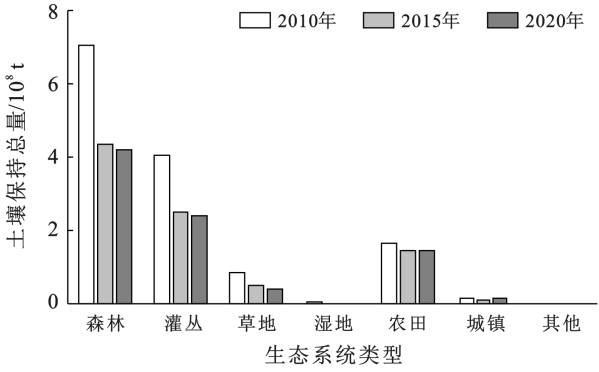


图 6 伊洛河流域 2010—2020 年不同生态系统类型的土壤保持总量

Fig.6 Total amount of soil conservation of different ecosystem types in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

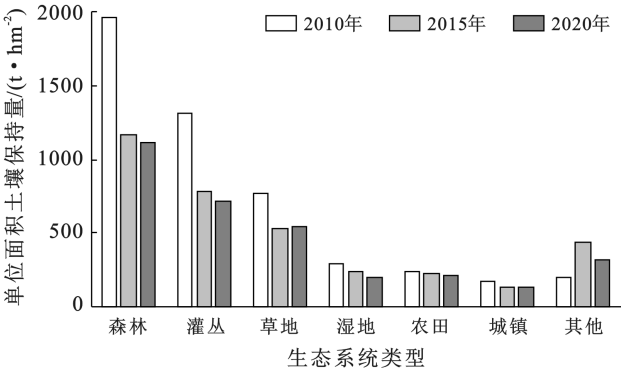


图 7 伊洛河流域 2010—2020 年不同生态系统类型的单位面积土壤保持量

Fig.7 Soil conservation per unit area of different ecosystem types in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

3.3 土壤保持量随海拔坡度的变化

在 ArcGIS 中将伊洛河流域 DEM 数据与 2020 年流域土壤保持栅格图层进行叠加,得到不同海拔的单位面积土壤保持量(图 8)。结果表明,土壤保持功能随海拔的升高而不断增加,2020 年单位面积土壤保持量由 250 m 以下的 82.22 t/(hm<sup>2</sup>·a)到 2 000 m 以上的 2 191.32 t/(hm<sup>2</sup>·a)。海拔 250~500 m 面积 4 437.07 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的比例最大,为 28.51%,但土壤保持量仅占总量的 11.43%,为 1.01×10<sup>8</sup> t。海拔 750~1 000 m 土壤保持总量最高 2.17×10<sup>8</sup> t,占研究区总量的 24.76%,面积占研究区总面积的 17.19%。对伊河和洛河流域不同海拔高程的土壤保持功能进行分析比较(图 9)。伊河和洛河流域海拔都主要集中在 250~500 m 区域内,分别占各自流域面积的 28.48%,28.52%。伊河和洛河在海拔 2 000 m 以下时土壤保持功能都随海拔的升高而不断增加,且伊河增长速度较洛河快,2 000 m 以上伊河持续增长,达 2 277.27 t/(hm<sup>2</sup>·a),而洛河流域在 2 000 m 以上呈减少趋势。

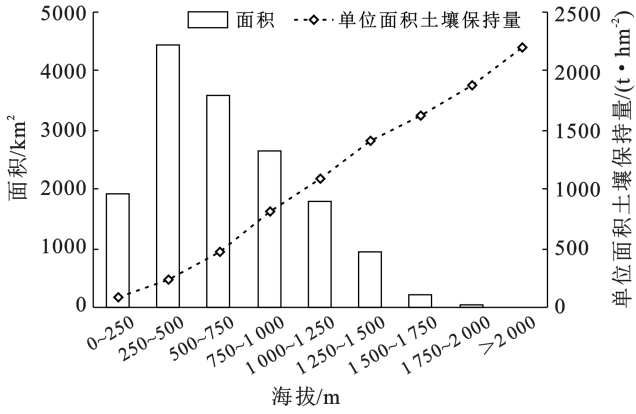


图 8 伊洛河流域不同海拔高程的单位面积土壤保持量

Fig.8 Soil conservation per unit area at different elevations in the Yiluo River basin

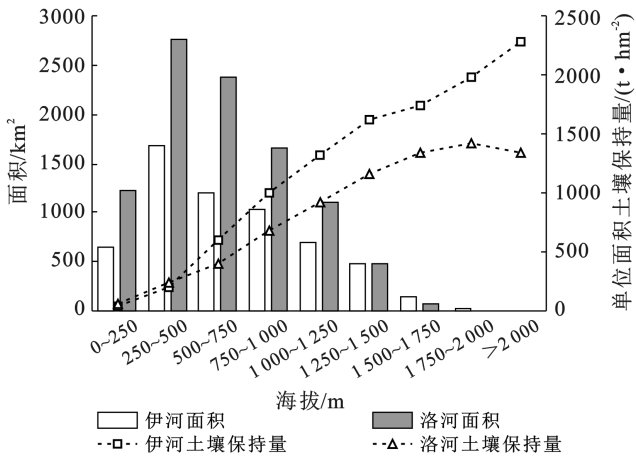


图 9 伊河和洛河流域不同海拔高程的单位面积土壤保持量

Fig.9 Soil conservation amount per unit area at different elevations in Yihe River and Luohe River basins

将伊洛河流域坡度数据与 2020 年流域土壤保持栅格图层进行叠加,得到不同坡度的土壤保持数据(图 10)。结果表明,单位面积土壤保持量随坡度的上升而不断增强,2020 年单位面积土壤保持量由坡度 5°以下的 95.47 t/(hm<sup>2</sup>·a)到坡度 55°以上的 1 735.56 t/(hm<sup>2</sup>·a),坡度 10°~30°之间土壤保持功能增长较快,坡度 35°以上增长缓慢。坡度小于 5°地区面积 8 105.31 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 52.05%,但土壤保持总量仅占研究区总量的 9%,为 7.70×10<sup>7</sup> t。坡度 35°以上地区面积占流域总面积的 14.4%,而土壤保持总量占流域总量的 42.41%,为 3.65×10<sup>8</sup> t。对比分析伊河和洛河流域在不同坡度的土壤保持功能(图 11),两个流域的面积都集中在坡度 0°~5°,且随坡度的上升,土壤保持功能的变化趋势相同,都在不断增强,其中坡度 30°以下增长速度较快,坡度 30°以上增长速度缓慢。坡度 0°~10°区域伊河和洛河的土壤保持功能基本一致,坡度 10°以上伊河的



增长速度较洛河更快,伊河和洛河流域在 55°以上区域单位面积土壤保持量分别是 2 025.28 和 1 468.93 t/(hm<sup>2</sup>·a)。伊洛河流域生态系统土壤保持功能和海拔坡度有着密切关系,土壤保持功能随海拔和坡度的增加不断加强。伊洛河流域山地土层发育深厚,植被覆盖度高,海拔较高地区土壤保持功能依然呈增长趋势或变化不大。随着坡度的增加,尽管潜在的土壤侵蚀风险增加,但由于对土壤采取了一定的保持措施,加之人类活动干扰的减少,土壤保持功能依然随坡度的增加不断提高。

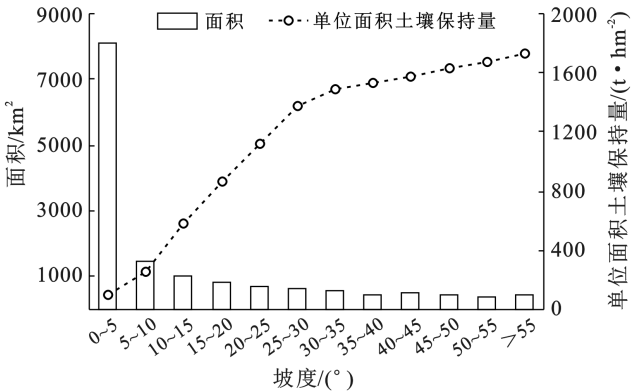


图 10 伊洛河流域不同坡度的单位面积土壤保持量  
Fig.10 Soil conservation amount per unit area of different slopes in the Yiluo River basin

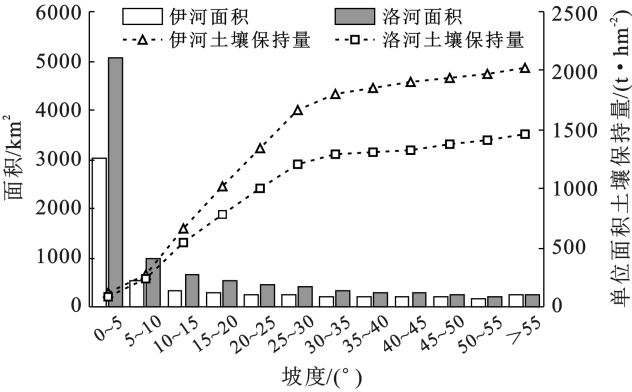


图 11 伊河和洛河流域不同坡度的单位面积土壤保持量  
Fig.11 Soil conservation amount per unit area of different slopes in Yihe River and Luohe River basins

3.4 土壤保持功能的影响因素分析

3.4.1 空间差异 土壤保持功能的空间差异是由气候、土壤、地形和植被因子共同作用的结果,采用逐步回归分析各因子对研究区生态系统土壤保持功能的影响(表 5)。结果表明,各影响因子与生态系统土壤保持功能具有显著相关性( $p<0.01$ ),其中坡度坡向、降雨侵蚀力和土壤可蚀性与土壤保持量呈显著正相

关关系,生态系统类型和植被管理因子与土壤保持量呈显著负相关关系。在土壤保持功能的空间差异上,坡度坡向因子贡献最大,可解释土壤保持空间变异的 63.3%,其他因子的影响相对较小,影响力依次是生态系统类型、降雨侵蚀力、土壤可蚀性和植被管理因子。伊洛河流域处于山地向平原的过渡地带,地形地势变化较大,地形因子的空间差异明显,对研究区土壤保持空间格局表现出较强的控制作用。

表 5 伊洛河流域土壤保持功能影响因子逐步回归分析  
Table 5 Stepwise regression analysis of influence factors of soil conservation function in Yiluo River basin

变量	标准回归系数	R <sup>2</sup>	p
坡度坡向	0.743	0.633	0.000
生态系统类型	−0.106	0.645	0.000
降雨侵蚀力	0.088	0.656	0.000
土壤可蚀性	0.075	0.661	0.000
植被管理	−0.054	0.662	0.000

3.4.2 时间变化 参与土壤保持量计算的因子是降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子和植被管理因子。土壤和地形属于稳定因子,基本不变,主要发生变化的是气候、植被覆盖度和生态系统类型因子,降雨侵蚀力因子随气候变化而变化,植被管理因子受生态系统类型和植被覆盖度的影响。土壤保持量是随着植被覆盖度的升高而增加。2010,2015 和 2020 年伊洛河流域植被覆盖度分别是 52.55%,61.44%和 62.33%,是呈逐渐上升趋势;2010—2020 年单位面积土壤保持量高的森林、灌丛生态系统面积呈增长趋势,单位面积土壤保持量较低的农田生态系统面积呈减少趋势,但 2010—2020 年伊洛河流域土壤保持总量是呈下降趋势。降水量是影响土壤保持的重要动力因子,研究发现伊洛河流域降雨侵蚀力从 2010—2020 年呈下降趋势,2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年每 5 a 平均得到的 2010,2015 和 2020 年年均降雨侵蚀力分别为 2 124.16,2 039.48 和 1 975.87 MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)(图 12)。2010—2020 年伊洛河流域森林、灌丛、农田生态系统土壤保持总量较高,其中森林生态系统土壤保持总量占研究区总量的 1/2。2010—2015 年森林生态系统降雨侵蚀力下降幅度最大,下降了 20.46%,其土壤保持总量从 7.06×10<sup>8</sup> t 下降到 4.36×10<sup>8</sup> t,下降了 38.26%;灌丛生态系统降雨侵蚀力下降了 12.97%,土壤保持总量从 4.03×10<sup>8</sup> t 下降到 2.52×10<sup>8</sup> t。2015—2020 年研究区各生态系统类型的土壤保持总量和降雨侵蚀力变化不大。



上述研究表明,2010—2020 年研究区降雨侵蚀力和土壤保持量的变化趋势大致相同,森林生态系统土壤保持量减少,主要是因降雨侵蚀力的减少,从而使研究区土壤保持总量的减少。

2010—2015 年伊洛河流域降雨侵蚀力变化呈现由南向北处递增,降雨侵蚀力下降幅度最大区域位于栾川县,减少量大于  $1\,000\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ ; 2015—2020 年,栾川县有所增加,嵩县减少明显(图 13)。总体而言,2010—2020 年伊洛河流域降雨侵蚀力变化明显,研究区南部和东部栾川县、卢氏县、巩义市、登封市等下降明显,中部的新安县、宜阳县、洛阳市区等有所增长。研究表明,2010—2020 年伊洛河流域降雨侵蚀力变化同土壤保持功能时空变化趋势相同,降水量对土壤保持功能的变化具有重要作用。

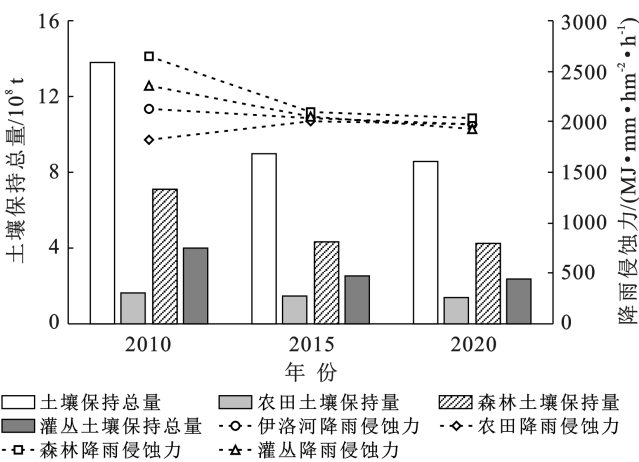


图 12 伊洛河流域 2010—2020 年主要生态系统类型的降雨侵蚀力变化

Fig.12 Rainfall erosivity change of main ecosystem types in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

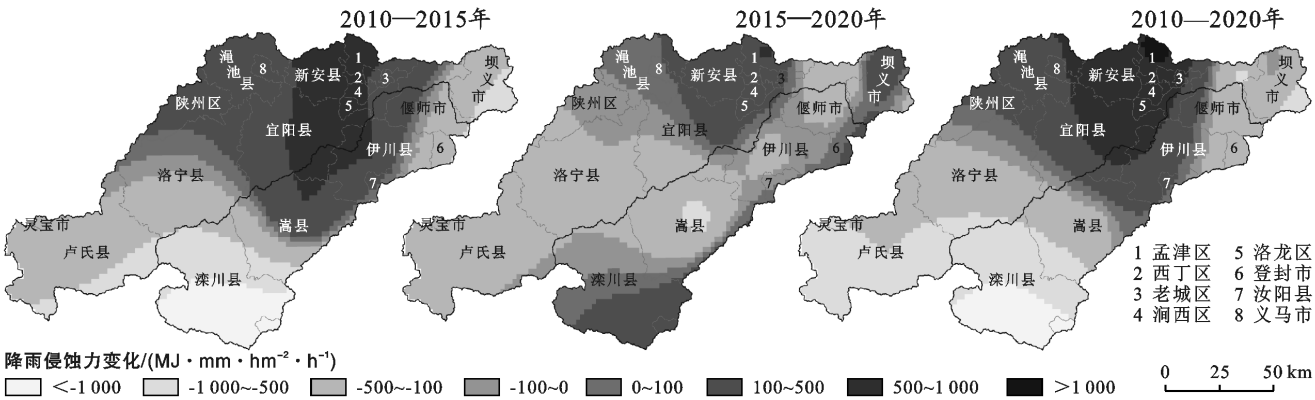


图 13 伊洛河流域 2010—2020 年降雨侵蚀力变化特征

Fig.13 Change characteristics of rainfall erosivity in the Yiluo River basin from 2010 to 2020

4 讨论

伊洛河是黄河的十大支流之一,占河南省黄河流域总面积的 43.29%,是我国重要的生态屏障,生态系统土壤保持功能在一定程度上能有效防止土地退化,减轻土壤侵蚀。2010,2015 和 2020 年伊洛河流域土壤保持总量分别是  $13.8\times 10^8\text{ t}$ ,  $8.97\times 10^8\text{ t}$ ,  $8.59\times 10^8\text{ t}$ ,单位面积土壤保持量分别是 873,567.1 和  $543.58\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ,总体呈减少趋势,与杜军等<sup>[29]</sup>在河南省豫西黄土丘陵区和张静静等<sup>[30]</sup>在河南省伏牛山的研究结果基本一致。伊洛河流域面积占河南省的 9.54%,土壤保持总量占河南省的 21.97%,伊洛河流域生态系统土壤保持功能在保护河南省以及黄河流域的生态安全等方面发挥了重要作用。受地形、气候、土壤、植被等因素的综合影响,伊洛河流域生态系统土壤保持功能呈现空间异质性,土壤保持功能较强的位于海拔较高的栾川县、卢氏县等,这些区域

位于我国二、三级阶梯的过渡地带,山高坡陡,受人为干扰较小,植被覆盖度高,使其拥有较强的土壤保持功能<sup>[31]</sup>;土壤保持功能较低的位于洛阳市区、偃师市等,这些区域海拔较低,地形平坦,受人类活动的干扰,土壤保持功能较弱。全球约 3/4 的土壤侵蚀来自于农田生态系统<sup>[32]</sup>,农田生态系统的土壤保持量较低,但它能够满足人们的生活需要,在保障区域粮食安全等方面具有重要作用<sup>[33]</sup>。河南省是我国重要的粮食基地,粮食产量占全国的 1/10<sup>[34-35]</sup>。2020 年伊洛河流域的农田生态系统面积占研究区总面积的 42%,土壤保持量  $1.43\times 10^8\text{ t}$ ,约占研究区土壤保持总量的 16.6%,说明农田生态系统在保障人类需求的同时,也发挥了一定的土壤保持作用,但土壤保持功能较弱。在保障区域粮食安全的情况下,应加强对农田生态系统的水土保持措施,降低土壤侵蚀的潜在威胁。总体而言,2010—2020 年政府的退耕还林、植树造林、堤岸护坡等生态工程措施以及生态补偿

政策,提升了伊洛河流域生态环境质量,研究区内植被覆盖度明显提高,森林和灌丛生态系统面积增加,且土壤保持转入量大于转出量。虽然伊洛河流域采取了一定的土壤保持措施,以及人类活动干扰的减少,但研究区土壤保持功能受气候因素影响较大,本文采用了2006—2020年时间序列的气象数据研究了10 a的土壤保持功能,气候的周期性波动规律是怎样的,对区域的土壤保持功能的影响贡献有多大,还有待于今后进一步开展长时间序列的土壤保持功能研究。

## 5 结论

(1) 2010—2020年伊洛河流域土壤保持功能空间分布格局基本一致,研究区土壤保持量较高的位于山高坡陡,植被覆盖度高的栾川县、卢氏县;较低的位于地形起伏度小,植被覆盖度低的洛阳市区等;时间上土壤保持量呈持续下降趋势,下降了37.73%。伊河流域和洛河流域土壤保持总量较为接近,但单位面积土壤保持量伊河流域大于洛河流域,2010—2015年伊河流域土壤保持量下降了41.06%,洛河流域下降了28.91%,2015—2020年变化幅度不大。

(2) 2010—2020年农田、森林、灌丛是研究区主要生态系统类型,2020年农田生态系统面积最大,占总面积的42%,但其土壤保持总量较低,仅占研究区的16.6%,在农业活动中应注意加强水土保持措施;2020年森林生态系统土壤保持量占研究区总量的49.13%,其土壤保持量下降幅度最大,从而使研究区土壤保持总量呈下降趋势。伊河和洛河流域农田生态系统分别占各自流域面积的46.4%,38.07%。2010—2020年转入和转出面积最大的分别是灌丛和草地生态系统,其次是城镇和农田生态系统。

(3) 伊洛河流域不同海拔高度的土壤保持功能差异明显,土壤保持功能随海拔的升高而不断加强,土壤保持总量最高区域位于海拔750~1 000 m,占研究区总量的24.76%。伊河和洛河流域海拔都集中在250~500 m区域内,分别占各自流域面积的28.48%,28.52%。研究区土壤保持功能随坡度的上升呈增长趋势,0°~5°区域面积占流域总面积的52.05%,但土壤保持总量仅占全流域总量的9%;坡度35°以上地区面积占流域总面积的14.4%,而土壤保持总量占流域总量的42.41%。坡度0°~10°区域伊河和洛河流域单位面积土壤量基本一致,坡度10°以上伊河流域的增长速度更快。

(4) 伊洛河流域生态系统土壤保持功能的空间差异性主要受地形因子的控制,时间变化主要是受降

雨侵蚀力的影响,表明自然因素对研究区土壤保持功能的时空变化具有重要作用。

## [参考文献]

- [1] 于德永,郝蕊芳.生态系统服务研究进展与展望[J].地球科学进展,2020,35(8):804-815.
- [2] 韩永伟,高吉喜,王宝良,等.黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J].农业工程学报,2012,28(17):78-85.
- [3] Marques M J, Bienes R, Jimenez L, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events. Rainfall simulation over USLE plots [J]. Science of the Total Environment, 2007,378(1/2):161-165.
- [4] 高峰.基于GIS和CSLE的区域土壤侵蚀定量评价研究[D].广西桂林:广西师范学院,2014.
- [5] 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.
- [6] Hou Jian, Fu Bojie, Wang Shuai, et al. Comprehensive analysis of relationship between vegetation attributes and soil erosion on hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(5):1721-1731.
- [7] 安妙颖,韩玉国,吴玉恒,等.基于KINEROS2模型的降雨和坡长因子对土壤侵蚀过程影响的研究[J].水土保持学报,2017,31(4):25-31.
- [8] Mukanov Y, Chen Y, Baisholanov S, et al. Estimation of annual average soil loss using the revised universal soil loss equation (RUSLE) integrated in a geographical information system (GIS) of the Esil River basin (ERB), Kazakhstan [J]. Acta Geophysica, 2019,67(3):921-938.
- [9] Roy P. Application of USLE in a GIS environment to estimate soil erosion in the Irga watershed, Jharkhand, India [J]. Physical Geography, 2018,40(4):361-383.
- [10] Rellini I, Scopesi C, Olivari S, et al. Assessment of soil erosion risk in a typical Mediterranean environment using a high resolution RUSLE approach (Portofino promontory, NW-Italy) [J]. Journal of Maps, 2019,15.
- [11] 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.
- [12] 饶恩明,肖燚,欧阳志云,等.海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J].生态学报,2013,33(3):746-755.
- [13] 饶恩明,肖燚.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.
- [14] 宁婷,郭新亚,荣月静,等.基于RUSLE模型的山西省生态系统土壤保持功能重要性评估[J].水土保持通报,2019,39(6):205-210.
- [15] 蒋春丽,张丽娟,张宏文,等.基于RUSLE模型的黑龙

- 江省 2000—2010 年土壤保持量评价[J].中国生态农业学报,2015,23(5):642-649.
- [16] 李该霞,宋蒙亚,谢丽芳,等.江苏省水土保持功能的重要性评价[J].水土保持通报,2016,36(1):236-241.
- [17] 王子垚,韩磊,赵永华,等.陕西省土壤保持功能时空变化特征[J].西部大开发(土地开发工程研究),2020,5(3):30-37.
- [18] 柳冬青,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子[J].水土保持研究,2018,25(4):98-103.
- [19] 贾振宇,高艳妮,刘学,等.2000—2015 年三江源区土壤保持功能及其价值时空变化分析[J].环境生态学,2020,2(5):35-42.
- [20] 李子,张艳芳.基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].水土保持学报,2021,35(4):178-185.
- [21] 田宇,朱建华,李奇,等.三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J].生态学杂志,2020,39(4):1164-1174.
- [22] 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.
- [23] 廖雯,胡砚霞,于兴修,等.丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素[J].水土保持通报,2021,41(6):288-294.
- [24] 生态环境部. HJ 1173-2021.全国生态状况调查评估技术规范:生态系统服务功能评估[S].北京:生态环境部,2021.
- [25] 吴昌广,李生,任华东,等. USLE/RUSLE 模型中植被覆盖管理因子的遥感定量估算研究进展[J].应用生态学报,2012,23(6):1728-1732.
- [26] 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.
- [27] 宁婷,郭新亚,荣月静,等.基于 RUSLE 模型的山西省生态系统土壤保持功能重要性评估[J].水土保持通报,2019,39(6):205-210.
- [28] 刘孟竹,张红娟,任贺宇,等.退耕还林背景下北方农牧交错带土壤保持功能时空变化[J].水土保持研究,2021,28(5):172-178.
- [29] 杜军,赵胜朝,徐建昭,等.河南省豫西黄土丘陵区 2015—2020 年水土保持功能时空变化[J].河南科学,2021,39(11):1802-1808.
- [30] 张静静,赵天旭,梁丹.伏牛山地区森林生态系统服务空间差异分析[J].生态环境学报,2020,29(7):1285-1291.
- [31] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].地理学报,2020,75(5):975-988.
- [32] Pimentel D, Burgess M. Soil erosion threatens food production [J]. Agriculture, 2013,3(3):443-463.
- [33] 王莉雁,肖焱,饶恩明,等.全国生态系统食物生产功能空间特征及其影响因素[J].自然资源学报,2015,30(2):188-196.
- [34] 谢坤,丁明军,辛良杰,等.中国县域粮食产量的时空格局及其与经济发展的空间关系[J].经济地理,2021,41(11):167-175.
- [35] 姚成胜,李政通,易行.中国粮食产量变化的驱动效应及其空间分异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(9):72-81.

(上接第 219 页)

- [27] 陈朝亮,彭树宏,钱静,等.基于 AHP-Logistic 熵权模型的西南浅丘区地质灾害分布特征研究:以内江市为例[J].长江科学院院报,2020,37(2):55-61.
- [28] 谢人栋,赵翠薇.基于栅格尺度的喀斯特槽谷区生态环境脆弱性时空分异研究[J].长江科学院院报,2018,35(4):48-53.
- [29] 姚昆,张存杰,何磊,等.雅砻江中上游流域生态环境脆弱性动态评价及预测[J].国土资源遥感,2020,32(4):199-208.
- [30] 丁肇慰,陈锡云,陈昌华,等.开垦 60 年东北三江平原典型产粮区生态脆弱性时空格局演变分析:以 859 农场为例[J].干旱区资源与环境,2018,32(1):77-83.
- [31] 张洪岩,周成虎,闫国年,等.试论地学信息图谱思想的内涵与传承[J].地球信息科学学报,2020,22(4):653-661.
- [32] 陈永林,谢炳庚,钟典,等.基于微粒群—马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟:以长株潭城市群为例[J].生态学报,2018,38(1):55-64.
- [33] 方方,李裕瑞.西部地区乡村振兴难度评价及重点帮扶县识别[J].经济地理,2022,42(4):8-18.
- [34] 田超,杨夏捷,鞠园华,等.吉林省西部地区生态脆弱性的动态评价[J].水土保持研究,2018,25(4):298-303.
- [35] 杨爱民,朱磊,陈署晃,等.1975—2015 年玛纳斯河流域土地利用变化的地学信息图谱分析[J].应用生态学报,2019,30(11):3863-3874.