

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.038

贺冬梅,王锦志,高玉凤,等.山西省水土保持率遥感估算[J].水土保持学报,2024,38(4):72-82.

HE Dongmei, WANG Jinzhi, GAO Yufeng, et al. Estimation of soil and water conservation rates by remote sensing in Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 72-82.

山西省水土保持率遥感估算

贺冬梅¹, 王锦志², 高玉凤², 高文文³, 李金峰², 田佳莉⁴, 赵旦^{5,6}

(1.山西农业大学林学院,山西 太谷 030801;2.山西农业大学水土保持科学研究所,太原 030013;

3.太原理工大学水利科学与工程学院,太原 030024;4.太原理工大学矿业工程学院,太原 030024;

5.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049;6.中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室,北京 100101)

摘要: [目的] 水土保持是保护和改善生态环境的重要途径,是生态系统可持续发展的重要基础,而区域尺度水土保持成效研究可为水土保持工作提供有效的理论依据。[方法] 基于遥感技术,采用修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)构建区域尺度水土保持率遥感估算方法体系,并估算山西省土壤侵蚀空间格局。[结果] 山西省水土流失等级以中度侵蚀为主,水土流失面积约49 545.68 km²,2022年水土保持率为68.38%,水土保持率高的等级面积占比最大。自然植被水土保持率高于农田,其中,森林水土保持率最高,为84.37%,且在自然植被与农田类型中,水土保持率高的等级面积占比最大,分别为48.11%,46.46%。水土保持率受坡度影响较大,且随坡度的变化呈现先显著减少后平缓波动的趋势。通过与已有研究成果对比,估算得到的山西省水土流失空间格局及规律与现有水土流失数据基本一致,且水土保持率估算结果与公布的水土保持率目标值呈显著强相关。[结论] 综上所述,区域尺度水土保持率遥感估算方法可为水土保持生态工程及其他国家重大生态工程的成效和效益评估提供重要的理论和方法依据。

关键词: 水土保持率; 遥感; 山西省; 区域尺度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0072-11

Estimation of Soil and Water Conservation Rates by Remote Sensing in Shanxi Province

HE Dongmei¹, WANG Jinzhi², GAO Yufeng², GAO Wenwen³, LI Jinfeng², TIAN Jiali⁴, ZHAO Dan^{5,6}

(1.Forestry College of Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030013, China; 3.School of Hydro Science & Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6.Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Earth, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] Soil and water conservation is important in protecting and improving the ecological environment, which plays an important role for the sustainable development of ecosystems. [Methods] While the study of the soil and water conservation effectiveness in regional scale provide an effective theoretical basis for soil and water conservation. [Results] We supposed an estimation method for the regional-scale soil and water conservation rates by remote sensing based on the RUSLE (revised universal soil loss equation), and estimated its the spatial pattern in Shanxi Province. The results showed that the soil erosion in Shanxi Province is dominated by moderate erosion, with an area of about 49 545.68 km², and the soil and water conservation rates is 68.38% in 2022, and the soil and water conservation rates accounted for the largest proportion in high level. The soil and water conservation rates of natural vegetation is higher than that of

收稿日期: 2024-03-22

修回日期: 2024-04-29

录用日期: 2024-05-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-06-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0703903); 山西省基础研究计划青年项目(202203021212273); 山西省水利科学技术研究项目(2023GM34); 山西省研究生实践创新项目(2023SJ128)

第一作者: 贺冬梅(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防护研究。E-mail: 1873185841@qq.com

通信作者: 李金峰(1976—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事黄土高原水土保持研究。E-mail: Sxjlf1976@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

cropland, among which, the rates of forest is the highest at 84.37%. The soil and water conservation rates of the natural vegetation and cropland accounted for the largest proportion in high level with 48.11% and 46.46%, respectively. The rates is greatly affected by slopes, and showed a trend of significant decrease followed by gentle fluctuation. Compared with previous researches, the estimated spatial pattern of soil erosion in Shanxi Province were consistent with the existing data. And the estimated soil and water conservation rates was significantly correlated with the published targets. [Conclusion] The method of estimating soil and water conservation rates at the regional scale by remote sensing can provide an important theoretical and methodological basis for evaluating the effectiveness and impact of soil and water conservation ecological projects and other national large-scale ecological projects.

Keywords: soil and water conservation rates; remote sensing; Shanxi Province; regional scale

Received: 2024-03-22

Revised: 2024-04-29

Accepted: 2024-05-10

Online(www.cnki.net): 2024-06-19

水土保持是我国重要的生态修复工程措施,是保护和改善生态环境的重要途径,是生态系统可持续发展的重要基础^[1]。水土流失加剧江河湖库泥沙的淤积、威胁防洪安全,导致土地退化、耕地减少,进而影响粮食及生态环境的安全,制约经济社会可持续发展^[2]。土壤改良、植被恢复及淤地坝工程水土保持措施的有效开展使得地表植被覆盖率增加,空气质量、气候环境及水土流失得到改善^[3]。因此,水土保持措施的实施对于改善水土流失问题至关重要。

区域尺度水土保持成效研究由于其评价方法复杂且难度大,现阶段在研究和评价方法上仍处于一定的摸索阶段。但有学者已经开展了探索性研究,如孙嘉等^[4]通过层次分析法(AHP)构建了三峡库区坡耕地治理成效评价体系,并基于生态、经济和社会3个方面的效益对坡耕地治理的综合成效进行评价;徐文玉等^[5]以丹江口市余家湾小流域为例,分别从土地利用、林草覆盖度、水土流失变化和蓄水保土、生态、经济、社会等效益方面对库区小流域综合治理成效进行评价;钟原等^[6]利用模糊综合评价法构建水土保持效益评价模型,利用改进AHP法评价陕西水源区的水土保持成效。然而,上述方法在不同研究区采用各自的水土保持评价方法,缺乏大区域尺度的综合评价标准,且需要大量的生态、经济、社会等多源数据。

2019年水利部首次提出水土保持率的概念,该指标回答了当前及今后一段时期水土流失预防和治理应该且能够“干到什么程度才算好?如何评价是否实现了好的目标?”等重大问题。其核心内涵是:在符合自然规律并满足经济社会发展要求条件下,水土流失预防和治理应当达到的程度。水土保持率指标包含现状值和阈值2个状态。其中,现状值即当前或基准期区域内水土保持状况良好面积占国土面积的比例;阈值即通过水土流失预防和治理,区域内水土保

持状况良好面积占国土面积比例的远期上限,本文所提及的水土保持率均为水土保持率现状值^[7]。现阶段,水土保持率已被纳入美丽中国评估体系及黄河流域生态保护与高质量发展规划中,成为各级政府水土保持工作成效评价的重要依据。孙雪文等^[8]以2020年黑龙江省年水土流失动态监测成果推算2025年、2030年、2035年及2050年县级水土保持率的目标值;曹梅英^[9]利用2019年水土流失动态监测成果对太原市阳曲县计算了水土保持率最小值和最大值,并确定水土保持率的阈值范围;刘旦旦等^[10]基于中国土壤流失方程CLSE对影响安徽省水土保持率的各因子进行了分析。以往水土保持率研究主要集中在确定目标值,且缺乏区域尺度水土保持率方法体系构建的相关研究,特别是在黄土广泛覆盖的山西省,水土保持率相关应用研究仍然不足。当前,如何全面、科学地评估水土保持生态成效迫在眉睫,这是保障国家生态工程科学实施和有序管理的必要前提。

现阶段,遥感技术提供了一种经济、便捷的时空评估手段并广泛地应用于水土保持监测研究中,特别是为空间化及大尺度长时序研究提供了强有力的条件。随着遥感技术的不断发展,利用遥感技术来提取水土流失影响因子从而建立水土流失风险及成效评估模型已经成为水土流失定量研究常用方法^[11]。因此,本文基于山西省高分一号遥感影像、逐日降水及土壤数据,采用修正的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)^[12]构建区域尺度水土保持率遥感估算方法体系,为区域尺度水土保持生态效益评价提供一种新的思路,同时分析讨论山西省水土保持率空间分布现状及其特征,为水土保持生态工程及其他国家重大生态工程的成效和效益评估提供方法及理论支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

山西省($34^{\circ}34'00''-40^{\circ}44'00''\text{N}$, $110^{\circ}14'00''-114^{\circ}33'00''\text{E}$)地处黄河中游、黄土高原东部,北与内蒙古自治区接壤,西隔黄河与陕西省相望,南抵黄河与河南省为邻,东依太行山与河南省、河北省毗连(图 1)。全省总土地面积 15.6万 km^2 ,境内山峦叠嶂,东部太行山、西部吕梁山纵贯南北,恒山、五台山、系舟山、太岳山和中条山散列其间,山地、丘陵地区面积占总面积的 80% 以上。地貌呈东北向西南倾斜的平行四边形,东西两侧隆起,中部断陷盆地相间排列,河流全属外流水系,分属黄河、海河两大水系。位于暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 $9\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $400\sim 600\text{ mm}$,降水主要集中在 6—8 月。根据水土流失类型分类,大致可分为黄土丘陵沟壑区、黄土残塬沟壑区、丘陵缓坡风沙区、土石山区、黄土丘陵阶地区及冲积平原区。山西省是我国水土流失最严重的省份之一,截至 2018 年 9 月底,山西省累计治理水土流失 6.67万 km^2 ,治理度高达 61.8%^[13]。但是受到气候及治理措施保存率的影响,山西省水土流失面积治理任务依旧艰巨。

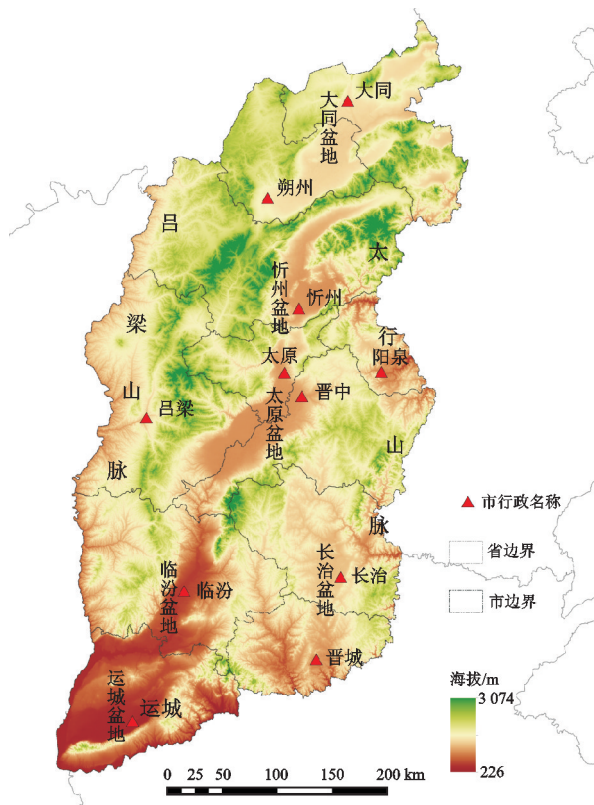


图 1 山西省位置

Fig. 1 Location map of Shanxi Province

1.2 数据源及预处理

本文选取 2022 年 7—8 月 15 景自然植被生长期

的高分一号遥感影像作为数据源,采用 FLAASH 大气辐射传输模型进行大气校正,采用卫星自带的 RPC 参数进行无控制点有理多项式模型区域网平差几何校正,并将影像的投影坐标统一转换为 UTM—WGS84 坐标,得到空间分辨率为 16 m 的多光谱影像。

本文收集 1981—2020 年 40 年来 78 个山西省国家级降雨站点的日降水数据(中国气象局气象数据中心 <http://data.cma.cn/>)。DEM 数据为 ASTER DEM,来自日本的地球遥感数据分析中心(ERS-DAC) (<http://ersdac.or.jp/>),其空间分辨率为 30 m 。土壤类型空间数据集来自国家地球系统科学数据中心共享服务平台,同时参照中国土种志、山西省土壤类型图(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)以及相关土壤类型文献资料。以上空间数据均在 Envi 和 ArcGIS 中进行预处理,并将所有数据重采样为 10 m 。

本文基于高分辨率遥感影像进行精度验证,在 Google Earth 中选用 2022 年高分辨率遥感影像(包括 Worldview—2(1.8 m 分辨率)、QuickBird(0.61 m 分辨率)等),采用随机采样法收集土地覆被样点共计 1 472 个,其中森林 180 个、灌木 209 个、草地 385 个、农田 450 个、水体 81 个、建设用地 148 个和裸地 19 个。

2 研究方法

2.1 土地覆被解译

本文以世界粮农组织土地覆被分类系统^[14]为基础,得到山西省土地覆被分类系统,包括森林、灌木、草地、水体、农田、建设用地和裸地 7 大类。其中,森林和灌木主要为自然、半自然或人工植被,郁闭度大于 20%。草地主要为自然、半自然或人工植被,郁闭度大于 20%,植被高度在 $0.03\sim 3.00\text{ m}$ 。水体主要为自然或人工水面。农田属于人工植被,其土地扰动较大,收割过程显著。建设用地土地覆被属于人工硬地面、居民地及工厂。裸地以自然无植被覆盖表面,裸岩,裸土为划分指标。

面向对象的分类方法是基于目标对象的分类方法,其基本原理是将遥感影像按照像元自身的光谱特征和几何特征分割成由同质不规则多边形组成的不同尺度的对象层,与传统像元分类方法相比能够提高分类的精度^[15]。基于多尺度分割对象层,采用决策树分类方法进行土地覆被解译。结合特征指数^[16]与分割对象的几何、纹理特征,通过决策树的分离过程,不断去除非确定信息,提取特定目标地物。其中,选用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和比值植被指数(ratio vegetation in-

dex, RVI), 提取水体 ($\text{NDVI} < 0$); 选用归一化水体差异指数 (normalized difference water index, NDWI) 和插值植被指数 (difference vegetation index, DVI), 区分植被 ($\text{NDMI} > 0.05$) 和非植被 ($\text{NDWI} < 0$); 选用 NDVI 指数, 并结合 4 月和 8 月的波段特征, 提取耕地; 选用第 4 近红外波段和第 3 红波段的光谱特征, 同时考虑垂直植被指数 (perpendicular vegetation index, PVI), 区分森林和草地; 选用归一化建筑物差异指数 (normalized difference built-up index, ND-BI), 并结合对象的几何、纹理特征, 区分建设用地和裸地。以上方法采用 eCognition 8.0 软件完成。

本文采用整体精度及 Kappa 分析精度验证方法对土地覆被结果进行分析, 其中, 整体精度为土地覆被正确样点个数与样点总数之比。Kappa 分析的具体计算公式为:

$$K = \frac{N \cdot \sum_{n=1}^k x_{nn} - \sum_{n=1}^k (x_{ni} \cdot x_{nj})}{N^2 - \sum_{n=1}^k (x_{ni} \cdot x_{nj})} \quad (1)$$

式中: N 为所有观测点的总数; k 为总矩阵行数; n 为矩阵行数; x_{nn} 为第 n 行第 n 列的观测点个数; x_{ni} 为第 n 行观测点数之和; x_{nj} 为第 n 列观测点数之和。 K 值越高, 分类精度越高, 一般认为 K 值 > 0.8 时参考数据之间具有较强的一致性 or 较高的精度, K 值在 $0.4 \sim 0.8$ 时表示精度中等, 而 K 值 < 0.4 表示精度较差。计算得到 2022 年土地覆被整体精度为 90.35%, K 值为 0.88, 各土地覆被类型的用户精度均超过 80%, 其中水体最高, 为 98.72%, 其次为建设用地 98.00%, 森林 91.01%, 草地 90.66%, 灌木、农田和裸地较低, 分别为 83.93%, 89.28%, 85.71%。

2.2 水土流失方程

本文采用 RUSLE 模型估算研究区水土流失空间分布格局, 其模型基本形式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中: P 为水土保持措施因子 (无量纲); C 为植被覆盖与管理因子 (无量纲); LS 为坡度坡长因子 (无量纲); K 为土壤可蚀性因子 [$(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; A 为土壤侵蚀量 [$t / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$] [17]。其中, 降雨侵蚀力因子 (R) 及植被覆盖与管理因子 (C) 采用克里金空间插值方法获取空间数据, 土壤可蚀性因子 (K) 和地形因子 (LS) 采用最邻近像元重采样方法统一到 10 m 空间分辨率。

2.2.1 降雨侵蚀力因子 (R) 基于降雨量与侵蚀力之间的幂函数, 选择日降雨量在 12 mm 以上的日平

均降雨量, 选用章文波等 [18] 建立的降雨量与侵蚀力之间的幂函数, 并通过半月侵蚀力的累积值得到年降雨侵蚀力。其中, R 值计算公式为:

$$R_{\text{半月}} = \alpha \cdot \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (3)$$

$$R_{\text{年}} = \alpha \cdot \sum_{i=1}^{24} R_{\text{半月}}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.177/P_{d12} + 24.455/P_{y12}$$

式中: $R_{\text{年}}$ 为年降雨侵蚀力 [$(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; $R_{\text{半月}}$ 为半月降雨侵蚀力 [$(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; m 为半月内有效日降雨 (降雨量 12 mm 以上) 的天数; P_k 为半月内第 k 天的日降雨量 (mm); α 和 β 为模型参数; P_{d12} 为降雨量 12 mm 以上的有效日降雨量平均值 (mm); P_{y12} 表示降雨量 12 mm 以上的有效日降雨量的年平均降雨量 (mm)。其中, α 和 β 选用 1981—2021 年 40 年来 78 个山西省国家级降雨站点的日降水数据进行估算。

2.2.2 土壤可蚀性因子 (K) 基于 WILLIAMS [19] 的 EPIC 模型并结合 1:100 万土壤类型数据来计算得到山西省土壤可蚀性因子空间数据, K 值具体计算公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 Sa \left(1 - \frac{Si}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{Si}{Cl - Si} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \times \left(1 - \frac{0.7Sn}{Sn + \exp(-5.51 + 22.9Sn)} \right) \quad (5)$$

$$Sn = (1 - Sa) / 100 \quad (6)$$

式中: K 为土壤可蚀性 [$(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$]; Sa 为砂砾含量 (%); Si 为粉粒含量 (%); Cl 为黏粒含量 (%); C 为土壤有机碳含量 (%); Sn 为表层土壤中除去砂粒之后, 其他土壤颗粒级物质所占的百分比 (%)。

2.2.3 地形因子 (LS) 基于 DEM 数据, 采用符素华等 [20] 研发的坡长坡度因子计算工具进行地形因子 LS 的计算。其中, 坡长因子 (L) 采用 FOSTER 等 [21] 1974 年提出的分段坡长因子公式, 在 10° 以下, 坡度因子 (S) 采用 MC COOL 等 [22] 提出的计算方法, 10° 以上选用 LIU 等 [23] 提出的陡坡情况下的公式。

2.2.4 植被覆盖与管理因子 (C) 采用蔡崇法等 [24] 提出的基于植被覆盖度的回归方程来计算植被覆盖

与管理因子(C),具体计算方法为:

$$C = \begin{cases} 1 & f_c = 0 \\ 0.650\ 8 - 0.343\ 6 \lg f_c & 0 < f_c \leq 78.3\% \\ 0 & f_c > 78.3\% \end{cases} \quad (7)$$

式中:植被覆盖度 f_c 基于高分一号遥感影像采用像元二分模型^[25]估算得到。

2.2.5 水土保持措施因子(P) 参照以往山西省水土保持因子研究成果,结合土地覆被数据获取不同地类的水土保持措施因子 P 值^[26]。其中,森林、灌木 P 值为 1.0,草地为 0.9,农田为 0.3,建设用地为 0.2,水体和裸地分别为 0 和 0.05。

2.3 区域水土保持率

水土保持率是指区域内水土保持状况良好的面积占国土面积的比例,即非水土流失面积占国土面积的比例^[7]。根据估算得到的水土流失面积,本文构建区域尺度水土保持率计算公式为:

$$R_s = \frac{S - S_s}{S} \times 100\% \quad (8)$$

式中: R_s 为区域尺度水土保持率(%); S 为区域面积(km^2); S_s 为区域水土流失面积(km^2)。为了匹配 RUSLE 得到的水土流失空间分布数据并且保证区域水土保持率估算结果的有效性,本文选取 10×10 个像元,即 1 km^2 作为区域水土保持率计算单元。

2.4 分析方法

参照土壤侵蚀分类分级标准^[27]并结合自然分段法本文将计算得到的侵蚀模数分为 7 个侵蚀等级(上含下不含),分别为无侵蚀 $[0 \sim 50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、微度侵蚀 $[50 \sim 150 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、轻度侵蚀 $[150 \sim 250 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、中度侵蚀 $[250 \sim 2\ 500 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、强烈侵蚀 $[2\ 500 \sim 10\ 000 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、极强烈侵蚀 $[10\ 000 \sim 50\ 000 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 和剧烈侵蚀 $[> 50\ 000 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 。其中,中度、强烈、极强烈和剧烈 4 个侵蚀等级的侵蚀面积计入水土流失面积总量,微度和轻度侵蚀不计入水土流失面积。采用分级分析方法将水土保持率平均分为 5 个等级(上含下不含),分别为水土保持率低($< 20\%$)、中低($20\% \sim 40\%$)、中($40\% \sim 60\%$)、中高($60\% \sim 80\%$)和高($> 80\%$)。

参照 2004 年颁布实行的《国家森林资源连续清查主要技术规定》^[28]划分标准中规定的林地坡度分级要求,并结合山西省地形概况,将坡度范围分为 6 个坡度等级(上含下不含),分别为平坡($0 \sim 5^\circ$)、缓坡($5^\circ \sim 15^\circ$)、斜坡($15^\circ \sim 25^\circ$)、陡坡($25^\circ \sim 35^\circ$)、急坡($35^\circ \sim 45^\circ$)和险坡($> 45^\circ$),并对水土保持率结果进行

分坡度分析。

采用 Pearson 相关性检验方法,分析讨论水土保持率计算值与公开目标值之间的相关性,并在 $\alpha = 0.05$ 水平下进行双尾显著性检验。其中, Pearson 相关系数 R 绝对值接近于 1,其相关性越强,越接近于 0,相关性越弱。相关系数一般分为: $0.8 \sim 1.0$ 为非常强相关; $0.6 \sim 0.8$ 为强相关; $0.4 \sim 0.6$ 为中度相关; $0.2 \sim 0.4$ 为弱相关; $0 \sim 0.2$ 为非常弱或不相关。

3 结果与分析

3.1 水土保持率空间格局

计算所得的 RUSLE 各因子空间分布和土壤侵蚀模数(图 2)。山西省土壤侵蚀以中度侵蚀为主,水土流失总面积约为 $49\ 545.68 \text{ km}^2$,占山西省土壤侵蚀面积总量的 31.62% 。水土流失空间格局整体呈现东、西部山区侵蚀等级较高、平原和盆地较低的分布,其中吕梁山脉南部及太行山脉北部侵蚀等级较强,太原盆地、长治盆地西北部及运城盆地西部侵蚀等级较弱。

水土流失分级统计结果见表 1,其中无侵蚀面积占比最大,占山西省总面积的 58.60% ,约 $91\ 806.93 \text{ km}^2$ 。其次为中度侵蚀和强烈侵蚀,占比分别为 20.53% 和 10.44% 。微度侵蚀、轻度侵蚀和剧烈侵蚀占比较小,分别为 5.99% 、 3.80% 和 0.65% 。极强烈侵蚀面积为 0.01 km^2 ,可忽略不计。

基于水土保持率定义,采用 RUSLE 获取的山西省水土流失空间分布数据,估算山西省水土保持率空间分布(图 3),以上操作在 ArcGIS 中进行。山西省整体水土保持率为 68.38% ,根据其空间分布可知,山西省水土保持率整体较好,呈现出中部及南部较高,东北及西南部较低的分布状况。太原盆地、忻州盆地及运城盆地水土保持率较高,吕梁山脉及太行山脉两侧水土保持率较低,其中吕梁山脉南部、太行山脉北部水土保持率最低。

根据水土保持率分级分析(表 2)可知,水土保持率等级越高,其面积占比越大。其中水土保持率高的等级所占面积比例最大,为 45.67% ,其次为水土保持率中高等级,为 18.71% ,水土保持率低、中低及中等级所占面积比例之和不到 40% 。综上所述,山西省水土保持率以高等级为主,水土保持成效显著。

采用空间分析方法,对山西省各市水土保持率结果进行统计分析,得到山西省各市水土保持率,分别为太原市 70.51% ,大同市 73.74% ,阳泉市 66.31% ,

长治市 65.41%,晋城市 65.03%,朔州市 72.70%,晋中市 68.61%,运城市 77.60%,忻州市为 64.83%,临汾市为 63.89%,吕梁市为 59.89%。其中,运城市水土保持率最高,吕梁市水土保持率最低。

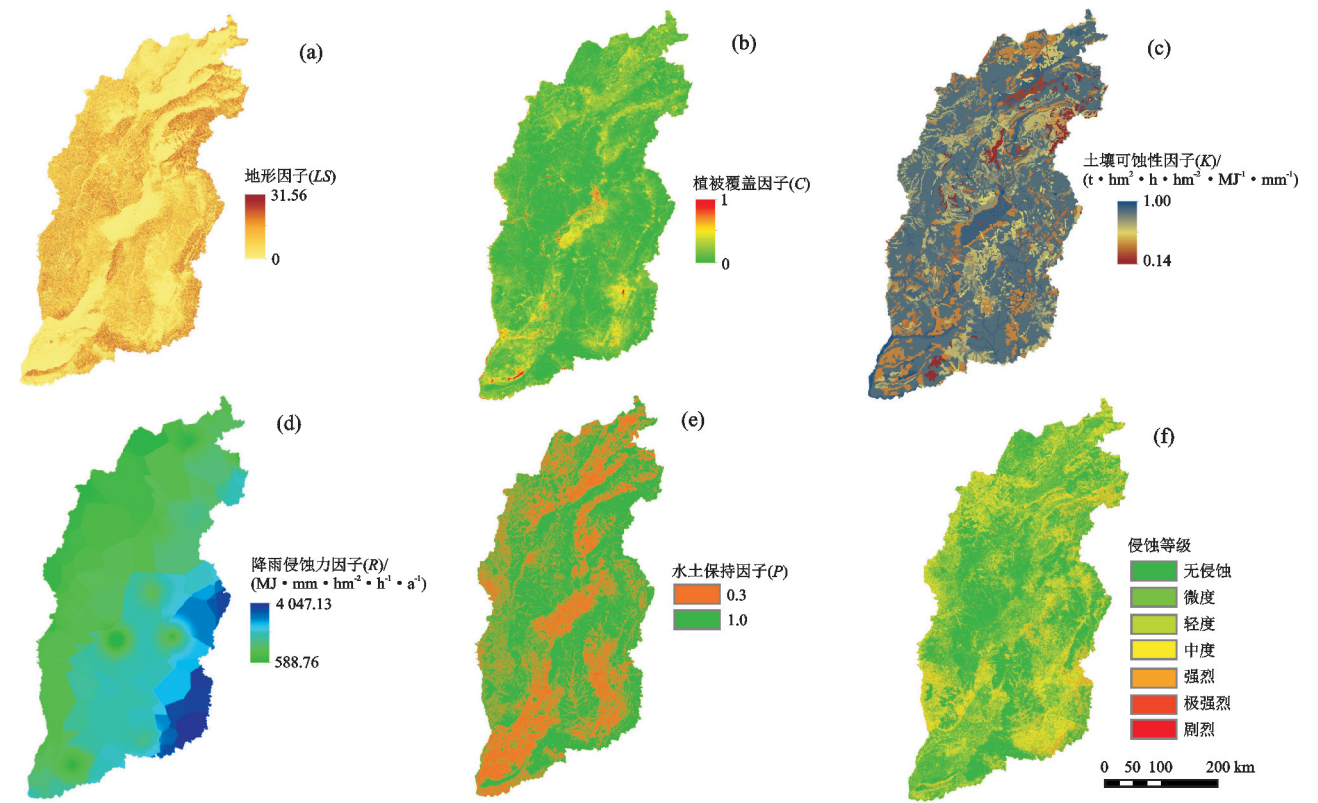


图 2 山西省各因子分布和土壤侵蚀模数

Fig. 2 Distribution of factors and RUSLE in Shanxi Province

表 1 山西省土壤侵蚀分级分析

Table 1 Classification analysis of the soil erosion in Shanxi Province

侵蚀等级	侵蚀区间/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	面积/km ²
无侵蚀	0~50	91 806.93
微度	50~150	9 378.94
轻度	150~250	5 946.89
中度	250~2 500	32 160.84
强烈	2 500~10 000	16 362.74
极强烈	10 000~50 000	1 022.09
剧烈	>50 000	0.01

3.2 土地覆被类型水土保持率分析

采用空间分析方法,将水土保持率结果与土地覆被及植被覆盖度进行叠加分析,选取土地覆被类型中的自然植被(森林、灌木、草地)和农田进行水土保持率分级分析(表 3),以上操作在 ArcGIS 中进行。其中,山西省农田的水土保持率低于自然植被,分别为 70.92%和 72.19%。自然植被中森林的水土保持率及植被覆盖度均值均为最高,分别为 84.37%和 87.73%,其次是灌木,分别为 76.05%和 83.80%,草地的水土保持率最低,为 56.16%,农田的植被覆盖度均值最低,为 73.50%。

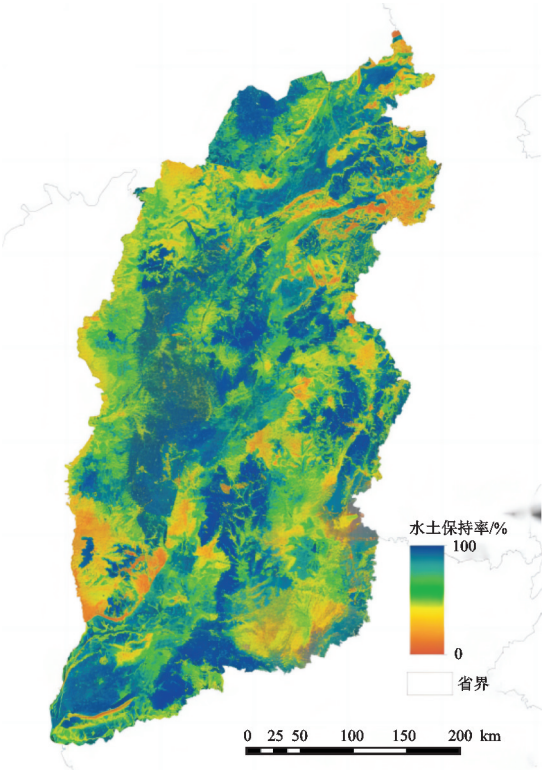


图 3 山西省水土保持率空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution of soil and water conservation rates in Shanxi Province

表 2 山西省水土保持率分级分析

Table 2 Classification analysis of soil and water conservation rates in Shanxi Province

水土保持率分级	区间/%	面积/km ²	百分比/%
低	<20	15 397.19	9.80
中低	20~40	18 091.25	11.51
中	40~60	22 481.89	14.31
中高	60~80	29 404.26	18.71
高	>80	71 766.72	45.67

表 3 自然植被及农田水土保持率

Table 3 The soil and water conservation rates of natural vegetation and cropland

土地覆被类型	面积/km ²	水土保持率/%	植被覆盖度平均值/%
森林	23 389.67	84.37	87.73
灌木	22 679.60	76.05	83.80
草地	46 980.18	56.16	77.87
农田	53 317.13	70.92	73.50

由表 4 可知,自然植被中,水土保持率等级高的所占面积比例最大,为 48.11%,其次为水土保持率中高、中、低等级,所占面积比例分别为 15.71%,12.68%,12.22%。水土保持率等级中中低等级所占面积比例最小,仅为 11.27%。农田水土保持率等级高的所占面积比例最大,为 46.46%,其次为中高、中和中低等级,所占面积比例分别为 22.56%,15.23%,10.88%。农田水土保持率等级低的所占面积比例最小,仅为 4.87%。综上所述,山西省自然植被水土保持率高于农田,森林水土保持率最高,且自然植被与农田的水土保持率均以水土保持率高等级为主。

表 4 自然植被及农田水土保持率分级分析

Table 4 Classification analysis of soil and water conservation rates of natural vegetation and cropland

水土保持率分级	区间/%	自然植被		农田	
		面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
低	<20	11 369.62	12.22	2 595.77	4.87
中低	20~40	10 487.19	11.27	5 801.22	10.88
中	40~60	11 797.45	12.68	8 118.94	15.23
中高	60~80	14 616.47	15.71	12 022.30	22.56
高	>80	44 752.11	48.11	24 761.35	46.46

3.3 水土保持率坡度分析

采用区域空间分析方法,将基于 DEM 提取得到的坡度数据与山西省水土保持率空间分布结果进行空间叠加分析,以上操作在 ArcGIS 中进行。由表 5 可知,山西省以缓坡为主,其面积比例达到 40.95%,其次是斜坡、平坡和陡坡,占比分别为 26.56%,18.51%和 11.07%。急坡面积为 3 991.20 km²,占比 2.54%;险坡面积最小,为 570.03 km²,占比 0.36%。

平坡水土保持率最高,为 76.40%,缓坡水土保持率最低,为 66.04%。

表 5 山西省水土保持率坡度分级分析

Table 5 Classification analysis of soil and water conservation rates in slopes of Shanxi Province

坡度类型	坡度/(°)	面积/km ²	面积占比/%	水土保持率/%
平坡	0~5	29 124.76	18.51	76.40
缓坡	5~15	64 433.81	40.95	66.04
斜坡	15~25	41 794.30	26.56	66.34
陡坡	25~35	17 418.84	11.07	68.12
急坡	35~45	3 991.20	2.54	68.13
险坡	>45	570.03	0.36	66.21

由图 4 可知,山西省水土保持率随着坡度呈现先显著减少后平缓波动的趋势。从平坡到缓坡,水土保持率显著降低,减幅为 13.56%。缓坡是所有坡度等级中面积最大的区域,是坡耕地所在的主要坡度等级,其最低的水土保持率将影响山西省整体水土保持率。缓坡到斜坡,水土保持率基本不变,从斜坡到陡坡,水土保持率出现缓慢上升的趋势,增幅约 2.68%。从陡坡到急坡,水土保持率基本不变,从急坡到险坡水土保持率减幅显著,约为 2.82%。陡坡和急坡水土保持率除平坡外最高,其面积总和为 21 410.04 km²,不足缓坡面积的 1/2。综上所述,山西省水土保持率受坡度影响较大,特别是平坡到缓坡阶段,水土保持率显著减少。

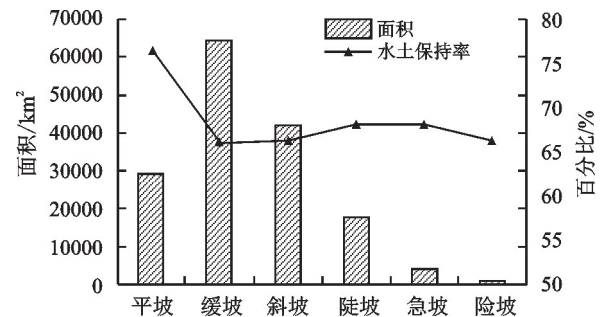


图 4 山西省坡度水土保持率变化

Fig. 4 The variation of soil and water conservation rates in slopes of Shanxi Province

4 讨论

4.1 水土保持成效对比

本文基于 RUSLE 模型,计算得到山西省 2022 年水土流失总面积约为 49 545.68 km²,水土流失空间格局总体呈现山区侵蚀等级较高,盆地及平原地区侵蚀等级较弱的分布,太行山脉北部及吕梁山南部地区土壤侵蚀最为严重,这与何维灿等^[29]的研究结果类似。其次,在不同土地覆被类型中,均是农田的水土保持率最低,其次为草地,这与郭子萍等^[30]的研究结果类似,其原因可能在于山西省缓坡面积占全省面

积比例最大,同时受人类活动影响较大,故水土流失量最大,水土保持率较自然植被最低。水土流失面积随着坡度的增加而增加,这与何莎莎等^[31]提出的研究结论一致。土壤侵蚀强度随着坡度的增加而逐渐增加,因此,针对坡度较高的区域需要采取更有力的水土保持措施。

采用 Pearson 相关性分析方法,对估算得到的 2022 年山西省各市水土保持率均值与山西省政府公布的 2025 年各市水土保持率目标值进行相关性分析(表 6)。其中,估算值与目标值呈极显著非常强相关,其 $R=0.924^{**}$ 。其中,运城市水土保持率估算值及公开的目标值均为 11 个市中最高的,吕梁市水土保持率均为 11 个市中最底的。晋城市与长治市估算值比目标值低,这主要是由于两市位于山区,土地覆被类型以林地为主,且林地植被长势好,植被覆盖度高,受到模型算法影响,容易出现估算值偏低的情况^[32]。此外,本文获取的降水站点全部来自国家级站点逐日数据,站点各市分布不均且不够密集,也导致估算值与目标值有所差异。综上所述,本文构建的区域尺度水土保持率遥感方法体系具有较高的可行性。

表 6 水土保持率估算值与目标值相关关系

Table 6 Correlations of soil and water conservation rates between estimated and target value

项目	指标	目标值	估算值
目标值	R^2	—	0.924 ^{**}
	p	—	0
估算值	R^2	0.924 ^{**}	—
	p	0	—

注: * * 表示极显著相关($p<0.01$)。

4.2 水土保持率影响因子分析

山西省水土保持率空间分布格局主要受到自然环境和水土保持政策 2 个方面的影响,其中自然环境主要包括降水、地形、植被分布与长势。山西省水土保持率整体呈现东、西部山区水土保持率低,太原盆地、运城盆地、忻州盆地及临汾盆地水土保持率较高的空间分布特征。

山西省东部太行山区降水处于山西省最高水平,地表多以浅层土壤为主,当降水强度较大时,雨水下渗不及时,极易形成地表径流,造成水土流失,导致水土保持率处于较低水平。此外,黄河流经西部吕梁山区,该地区地表土质松软,为黄泥沙主要来源区,受到黄河及其支流冲刷及土壤沉积的影响,易造成水土流失,因此水土保持率处于较低水平。党的十八大以来,山西省重点推动水土保持生态建设项目,特别是针对吕梁山北部黄土丘陵沟壑区和南部黄土残垣沟壑区,以及太行山土石山区开展了大量的水土保持工

作。截至 2021 年底,水土流失面积较 2011 年已经减少 1.23 万 km^2 ,减幅达到 17.5%,水土保持率也在积极向上增长。然而,受到自然环境的约束,以上地区仍存在水土流失且水土保持率仍旧处于较低水平。太原盆地、运城盆地、忻州盆地及临汾盆地,为降水低值区,其地形起伏较小,水土流失敏感度较低,水土保持率处于较高水平^[33]。此外,山西省植被主要分布在太行山南部地区,其植被长势好,水土流失较少;吕梁山北部地区为风沙区,土壤沙漠化严重,植被长势较太行山南部地区差,从而导致太行山南部地区水土保持率高于吕梁山北部地区。

4.3 水土保持率估算局限性讨论

水土流失是一个复杂的多因子耦合过程,其最主要的 3 个影响因子是水力侵蚀、风力侵蚀和冻融侵蚀,而 RUSLE 模型目前只能将降水的影响纳入到模型中^[34-35],且 RUSLE 模型来源于美国的一个小流域耕地,是一个基于年降水的产沙侵蚀经验模型。现阶段基于 RUSLE 模型已开展广泛地研究,如陈思旭等^[36]利用 RUSLE 模型对南方丘陵山区 4 个主要省份的土壤侵蚀空间分布特征及与坡度、海拔间的关系进行了定量分析;李佳蕾等^[37]利用 RUSLE 模型估算了 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年的中国的土壤侵蚀量。然而,RUSLE 模型仅反映各相乘因子之间有限的相互作用及关系,对于土壤侵蚀过程和精确侵蚀量研究存在较大不确定性,且多适用于缓坡,在高强度次降雨居于侵蚀产沙主导地位的地区有一定的局限性^[38]。谢炎敏^[39]将 RUSLE 预测单次降雨产沙量与实测值进行对比发现,二者之间有较大误差,这主要由于模型所使用的数据主要来源于美国落基山脉以东地区,需要根据中国南方红壤区实际条件进行率定和修正;翟睿洁等^[40]对比 USPED、InVEST 和 RUSLE 3 个模型发现,RUSLE 模型模拟的土壤侵蚀量偏大的原因在于未考虑泥沙沉积过程。本文选取 2022 年高分一号遥感影像,并选用精度高于面向像元分类的面向对象的决策树分类方法获取山西省高分辨率土地覆被数据,整体精度为 90.35%, K 值为 0.88,能够更加精准地描述土地覆被现状,增加水土保持措施因子 P 值及植被覆盖与管理因子 C 值的可靠性,从而更好地将 RUSLE 模型应用到山西省。

遥感技术具有经济、便捷和实用性等特点,其能够快速、准确连续地提取地表信息,提供研究所需的长时序和动态空间数据,被广泛地运用于大尺度的土壤侵蚀监测中,但遥感解译精度受多因素的影响,对解析结果造成一定的误差。如数据源的获取时间和计算方法会影响水土保持率的结果。首先,本文的植

被覆盖度遥感影像的获取时间为 7—9 月,这段时间为黄土高原地区植被生长最旺盛阶段,获取的植被覆盖度也为最高,由于像元二分法对土壤背景敏感,对于高覆盖度植被不敏感,容易出现高植被覆盖度地区估算值偏低的情况^[32];其次,本文收集的 78 个国家级降水站点中,没有县级或省级站点,可能导致降水站点不够密集,一定程度上影响空间插值结果^[41];再次,降水空间分布数据采用站点数据进行克里金空间插值,这导致降雨侵蚀力(R)的估算结果受到不同插值方法的影响而出现不同的空间分布。在 ArcGIS 进行栅格计算的过程中,也可能因为各因子的精度不同,造成一定的误差。

5 结论

(1)山西省整体水土保持率约为 68.38%,水土保持率高的等级占全省面积比例最大。其中,山西省土壤侵蚀整体以中度侵蚀为主,其次为强烈侵蚀,水土流失面积约为 49 645.68 km²。

(2)山西省自然植被水土保持率均高于农田类型。自然植被中,森林类型的水土保持率最高。根据水土保持率分级分析可知,自然植被与农田的水土保持率均以高等级为主。

(3)山西省水土保持率受坡度影响较大,特别是平坡到缓坡阶段,水土保持率显著减少,减幅为 13.56%。

(4)根据水土保持成效对比结果,估算得到的水土流失空间分布格局、各土地覆被类型及不同坡度等级的水土流失分布均与已有研究成果一致。估算得到的水土保持率与公布的水土保持率目标值变化规律基本一致,其结果差异主要受到数据源和模型 2 方面的影响。

遥感技术虽具有时效性强、技术成本低等特点,但遥感估算得到的土壤侵蚀模数仍与实际测量结果存在一定差异,在今后研究中可尝试长时间序列的水土保持率监测研究,以提高区域尺度水土保持率的估算精度。

参考文献:

- [1] 全海.水土保持生态建设综合效益评价指标体系及核算方法初探[J].北京林业大学学报,2009,31(3):64-70.
- [2] BORRELLI P, ALEWELL C, ALVAREZ P, et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis[J].The Science of the Total Environment,2021,780:e146494.
- [3] LIU J B, GAO G Y, WANG S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics[J].Journal of Geographical Sciences,2018,28(1):59-78.
- [4] 孙嘉,康满春,刘定湘,等.三峡库区坡耕地治理成效评价研究[J].中国水土保持,2023(8):68-72.
- [5] 徐文玉,刘晓路,雷盛,等.丹江口库区小流域综合治理成效评价:以丹江口市余家湾小流域为例[J].亚热带水土保持,2021,33(3):11-15.
- [6] 钟原,陈菊红,马安妮,等.南水北调陕西水源区水土保持效益评价[J].水土保持研究,2016,23(3):119-124.
- [7] 曹文洪,宁堆虎,秦伟.水土保持率:概念内涵、阈值确定及实践应用[J].水土保持通报,2023,43(1):409-416.
- [8] 孙雪文,杨庆楠,徐金忠,等.黑龙江省县级水土保持率目标值的确定方法[J].中国水土保持,2023(9):43-46,84.
- [9] 曹梅英.太原市阳曲县水土保持率确定研究[J].海河水利,2023(1):31-35.
- [10] 刘旦旦,夏小林,汪邦稳,等.安徽省水土保持率目标值确定关键因素研究[J].治淮,2023(3):15-17.

- conservation rate in Anhui Province[J]. *Harnessing the Huaihe River*, 2023(3):15-17.
- [11] 廖俊, 焦菊英, 严增, 等. RUSLE 模型对黄土高原退耕植被恢复坡面土壤侵蚀的模拟效果分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2):97-108.
- LIAO J, JIAO J Y, YAN Z, et al. Simulation effect analysis of RUSLE model on slope soil erosion restored by reclaimed vegetation in Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):97-108.
- [12] RENARD K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [13] 秦雪芬. 黄河山西段水土流失治理动态变化及驱动因素分析[D]. 太原: 山西财经大学, 2021.
- QIN X F. Analysis on dynamic changes and driving factors of soil and water loss control in Shanxi Section of the Yellow River[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2021.
- [14] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(4):723-731.
- WU B F, YUAN Q Z, YAN C Z, et al. Land cover changes of China from 2000 to 2010[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4):723-731.
- [15] 高文文, 曾源, 刘宇, 等. 南水北调中线水源区 2000—2015 年森林动态变化遥感监测[J]. *林业科学*, 2019, 55(4):97-107.
- GAO W W, ZENG Y, LIU Y, et al. Forest dynamic monitoring by remote sensing from 2000 to 2015 in the water source area of the south-to-north water diversion project[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(4):97-107.
- [16] KALLEL A, LE HÉGARAT-MASCLE S, OTTLÉ C, et al. Determination of vegetation cover fraction by inversion of a four-parameter model based on isoline parametrization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4):553-566.
- [17] 马春玲, 焦峰, 王飞, 等. 中国 USLE/RUSLE 因子研究[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1):430-436.
- MA C L, JIAO F, WANG F, et al. Review of studies on factors of USLE/RUSLE in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):430-436.
- [18] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(6):705-711.
- ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6):705-711.
- [19] WILLIAMS J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 1990, 329(1255):421-428.
- [20] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5):105-110.
- FU S H, LIU B Y, ZHOU Y G, et al. Calculation tool of topographic factors[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5):105-110.
- [21] FOSTER G R, WISCHMEIER W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(2):305-309.
- [22] MC COOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5):1387-1396.
- [23] LIU B Y, NEARING M A, RISSE L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6):1835-1840.
- [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.
- 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 Water Conservation*, 2000, 14(2):19-24.
- [25] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004(4):153-159.
- LI M M, WU B F, YAN C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004(4):153-159.
- [26] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(7):1164-1175.
- LI T H, ZHENG L N. Soil erosion changes in the Yanhe watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(7):1164-1175.
- [27] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 190—2007 Standards for classification and gradation of soil erosion[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [28] 刘菊, 郑智礼, 孙拖焕. 基于 DEM 的坡度提取与分析[J]. *山西水土保持科技*, 2013(3):12-14.
- LIU J, ZHEN Z L, SUN T H. DEM-based slope extraction and analysis[J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2013(3):12-14.

- [29] 何维灿,赵尚民,王睿博,等.基于 GIS 和 CSLE 的山西省土壤侵蚀风险研究[J].水土保持研究,2016,23(3):58-64.
- HE W C, ZHAO S M, WANG R B, et al. Research on soil erosion risk based on GIS and CSLE in Shanxi Province[J].Research of Soil and Water Conservation,2016,23(3):58-64.
- [30] 郭子萍,王乃昂,屈志勇.基于 RUSLE 的引黄入晋北干沿线地区土壤侵蚀定量研究[J].水土保持通报,2018,38(3):180-186,192.
- GUO Z P, WANG N A, QU Z Y. Quantitative study on soil erosion along area of north main line of drawing water from Yellow River to Shanxi Province based on RUSLE[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(3):180-186,192.
- [31] 何莎莎,朱文博,崔耀平,等.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):426-439.
- HE S S, ZHU W B, CUI Y P, et al. Study on soil erosion characteristics of Qihe watershed in Taihang Mountains based on the InVEST model[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(2):426-439.
- [32] 刘亚岚,任玉环,陈涛,等.基于“北京一号”小卫星数据的密云水库流域植被覆盖度估算方法比较[J].遥感技术与应用,2007,22(5):581-585.
- LIU Y L, REN Y H, CHEN T, et al. Comparisons of estimating methods of vegetation fraction based on “BJ-1” microsatellite imagery[J].Remote Sensing Technology and Application,2007,22(5):581-585.
- [33] 马道铭,回毅滢,赵炯昌,等.近 60 年山西省降雨侵蚀力时空变化特征[J].水土保持研究,2023,30(6):24-31,48.
- MA D M, HUI Y Y, ZHAO J C, et al. Spatiotemoral characteristics of rainfall erosivity in Shanxi Province in recent 60 years[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(6):24-31,48.
- [34] 邓椿,蒋晓辉,聂桐,等.山西省植被覆盖度多因子探测特征与驱动力分析[J].环境科学与技术,2022,45(2):182-191.
- DENG C, JIANG X H, NIE T, et al. Multi-factor detection characteristics and driving force analysis of vegetation coverage in Shanxi Province[J].Environmental Science and Technology,2022,45(2):182-191.
- [35] 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].水利水电技术(中英文),2024,55(4):186-199.
- LI J, CAO Y Q, MO J Q, et al. Temporal and spatial variation analysis of soil erosion in Beijing-Tianjin-Hebei region based on RUSLE model[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(4):186-199.
- [36] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于 RUSLE 模型的南方丘陵区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- CHEN S X, YANG X H, XIAO L L, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model[J].Resources Science,2014,36(6):1288-1297.
- [37] 李佳蕾,孙然好,熊木齐,等.基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究[J].生态学报,2020,40(10):3473-3485.
- LI J L, SUN R H, XIONG M Q, et al. Estimation of soil erosion based on the RUSLE model in China[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(10):3473-3485.
- [38] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等.土壤侵蚀预报模型研究进展[J].水土保持通报,2001,21(6):16-18,32.
- ZHENG F L, LIU F, YANG Q K, et al. Review of research progress in soil erosion prediction model[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2001,21(6):16-18,32.
- [39] 谢炎敏. WEPP 与 RUSLE 在南方红壤丘陵区土壤侵蚀模拟中的应用对比研究[J].人民珠江,2018,39(10):34-38.
- XIE Y M. Application and comparison of WEPP and RUSLE in the soil erosion simulation in hilly red soil region of southern China[J].Pearl River,2018,39(10):34-38.
- [40] 翟睿洁,赵文武,贾立志.基于 RUSLE、InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究:以陕北延河流域为例[J].农业现代化研究,2020,41(6):1059-1068.
- ZHAI R J, ZHAO W W, JIA L Z. A comparative study of soil erosion estimation based on RUSLE, InVEST and USPED models: A case study of the Yanhe River Basin in Northern Shaanxi[J].Research of Agricultural Modernization,2020,41(6):1059-1068.
- [41] 岳书平,闫业超,王丹丹,等.降雨侵蚀力空间插值不确定性及其对侵蚀模拟结果的影响[J].北京林业大学学报,2013,35(1):30-35.
- YUE S P, YAN Y C, WANG D D, et al. Uncertainty in interpolation of rainfall erosivity data and its effects on the results of soil erosion modeling[J].Journal of Beijing Forestry University,2013,35(1):30-35.