基于 InVEST 模型的山东省临沂市土壤保持能力时空变化及其影响因素

王 兰[1,2]，李小娟[1,2]，和继军[2]，刘一哲[1,2]

（1.首都师范大学 资源环境与旅游学院，北京 100048；2.首都师范大学 水资源安全北京实验室，北京 100048）

摘　要：［目的］探究山东省临沂市土壤保持能力在“山水工程”实施前后的时空变化及影响因素，为该地区评估工程实施效果以及为未来规划提供科学支持。［方法］基于 InVEST 模型评估临沂市 2018，2020 和 2022 年土壤保持能力时空变化特征，从时间和空间两个维度分析土壤保持能力与影响因素的响应关系。［结果］临沂市 2018，2020 和 2022 年的土壤保持能力分别为 23.12，29.62 和 53.70 t/(hm^2 · a)，空间分布上呈现“西北高—东南低”的特征，在降水、土壤、地形和植被 4 大影响因素中，地形是影响其空间分布的主要因素，而年际变化则主要由降水驱动。［结论］临沂市土壤保持能力呈现显著提高的态势，具有明显的空间差异性和年际变化特征。降水在影响土壤保持能力年际变化方面的作用明显优于生态工程的作用，但生态工程贡献率有所上升。

关键词：土壤保持；InVEST 模型；影响因素；山东省临沂市；山水工程

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0337-09　　**中图分类号：**S157.1

文献参数：王兰，李小娟，和继军，等.基于 InVEST 模型的山东省临沂市土壤保持能力时空变化及其影响因素[J].水土保持通报，2025，45(1)：337-345. Wang Lan，Li Xiaojuan，He Jijun，et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of soil conservation capacity in Linyi City of Shandong Province based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(1)：337-345. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.035；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.035.

Spatiotemporal changes and influencing factors of soil conservation capacity in Linyi City of Shandong Province based on InVEST model

Wang Lan[1,2]，Li Xiaojuan[1,2]，He Jijun[2]，Liu Yizhe[1,2]

（1.*College of Resource Environment and Tourism*，*Capital Normal University*，*Beijing* 100048，*China*；2.*Beijing Laboratory of Water Resources Security*，*Capital Normal University*，*Beijing* 100048，*China*）

Abstract：［Objective］The spatiotemporal changes and factors influencing soil conservation capacity in Linyi City，Shandong Province，before and after the implementation of the “Mountain-River Project” were investigated，in order to provide scientific support for evaluating the project’s effectiveness and future planning in the region.［Methods］Using the InVEST model，the spatiotemporal characteristics of the soil conservation capacity in Linyi City of the years 2018，2020，and 2022 was assessed. The response relationship between the soil conservation capacity and influencing factors was analyzed from both temporal and spatial dimensions.［Results］The soil conservation capacity of Linyi City in 2018，2020，and 2022 was 23.12，29.62，and 53.70 t/(hm^2 · a)，respectively. Spatially，soil conservation capacity showed a pattern of “higher in the northwest-lower in the southeast.” Among the four main influencing factors，precipitation，soil，topography，and vegetation，topography was the primary factor affecting spatial distribution，whereas interannual variation was mainly driven by precipitation.［Conclusion］The soil conservation capacity of Linyi City showed a significant upward trend with distinct spatial and interannual variations. Precipitation plays a more prominent role than ecological engineering in influencing the interannual variation in soil conservation capacity；however，the contribution of ecological engineering has increased.

收稿日期：2024-07-10　　**修回日期：**2024-10-24　　**采用日期：**2024-10-25

资助项目：国家自然科学基金项目“黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀过程对临界坡长的响应机制”(52179071)，“基于近场动力学的区域地面沉降建模方法与应用研究”(42271487)

第一作者：王兰(1998—)，女(汉族)，四川省简阳市人，硕士研究生，研究方向为水土保持。Email：2220902191@cnu.edu.cn。

通信作者：李小娟(1965—)，女(汉族)，辽宁省抚顺市人，博士，教授，主要从事资源环境遥感与 GIS 方面的研究。Email：lixiaojuan@cnu.edu.cn。

Keywords: soil conservation; InVEST model; influencing factors; Linyi City of Shandong Province; Mountain-River Project

土壤侵蚀会导致生态系统服务退化和丧失[1],造成下游水环境污染,泥沙淤积,洪涝灾害增加,威胁下游城市安全[2],并对农业和林业产生不利影响。土壤保持是重要的生态系统服务之一,代表着生态系统保持土壤和控制侵蚀的能力[3],对于维持生态系统的稳定性、保护生物多样性、促进农业生产、水资源管理以及应对气候变化等方面具有重要意义。

山东省临沂市是水土流失较为严重的地区之一,根据山东省水利厅发布的《山东省 2022 年水土保持公报》,2022 年临沂市水土流失面积 4 238.27 km^2,占临沂市总面积 24.65%,占山东省水土流失面积 18.73%,是该省 16 个市中水土流失面积最大的市。为解决生态环境突出问题,临沂市于 2021 年启动了"沂蒙山区域山水林田湖草沙一体化保护和修复工程",该项目是国家首批"山水工程"之一,总投资 53.3 亿元,实施周期为 2021—2023 年,实施区总面积 13 794.85 km^2,包括临沂市 10 个区县,部署了退化公益林修复与森林质量提升工程、水土保持修复治理工程和森林保育工程等 74 个工程,这一系列措施对于土壤保持能力提高具有重大意义。2023 年 12 月《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》中特别指出继续实施"山水工程",加强水土流失综合治理,到 2035 年,水土保持率提高至 75%,生态系统基本实现良性循环[4]。临沂市作为这一政策的重要实施区域之一,如何量化"山水工程"实施后的生态效益,尤其是土壤保持能力的提升,成为当前亟需解决的关键问题。虽然国内外对土壤保持的研究较为丰富,但现有研究多集中于土壤侵蚀的空间分布及驱动机制[5-6],缺乏对大型生态工程实施前后时空变化的系统分析。InVEST[7]模型作为国际上广泛应用的生态系统服务评估工具,具备评估土壤侵蚀及土壤保持能力的模块,为定量分析生态工程实施前后的效益提供了科学依据。因此,本文采用 InVEST 模型泥沙输移比(SDR)模块来评估 2018,2020 和 2022 年临沂市土壤保持能力的时空变化特征,重点关注"山水工程"实施前后的变化情况。利用逐步回归和地理探测器分析临沂市土壤保持能力空间分布的影响因素,并对影响土壤保持能力年际变化的主要因素即降水和生态工程的贡献率进行厘定。

1 研究区概况

临沂市(34°22′—36°13′N,117°24′—119°11′E)位于山东省东南部,总面积 17 191.2 km^2,以沂、沭河为中心,西、北、东三面被山脉所环绕,向南构成扇状冲积平原。地势西北高东南低,地貌复杂多样,山地、丘陵、平原面积呈 2∶4∶4 比例分布。气候属温带季风气候,雨热同季,无霜期长,雨量充沛,多年平均气温 13.4 ℃,多年平均降水量 818.8 mm,是该省降水最多的区域之一。临沂市在全国水土流失类型区划分中属于北方土石山区,主要土壤侵蚀类型为水力侵蚀,这种侵蚀主要由以大气降水产生的地表径流对土壤及其母质进行剥蚀、搬运和沉积为主。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本次研究所用到的数据来源详见表 1。所有数据使用 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标系,空间分辨率统一重采样为 30 m。

表 1 数据源及基本情况

Table 1 Data source and basic information

数据名称	空间分辨率	数据来源	获取因子
行政区划数据	面要素	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)	研究区范围
中国 30 m 年度土地覆盖产品	30 m×30 m	武汉大学黄昕教授团队生产的数据集 (https://zenodo.org/records/12779975)	土地利用
ASTER GDEM V3	30 m×30 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	数字高程模型(DEM)
中国逐月降水量数据集	1 km×1 km	国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn)	降水量
Landsat 8 C1 和 C2	30 m×30 m	Google earth engine (https://earthengine.google.com/)	植被覆盖度
基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)	1 km×1 km	国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn)	砂粒、粉粒、黏粒含量以及最大根系深度
中国土壤有机质数据集	30×30(arc-second)	时空三极环境大数据平台 (http://poles.tpdc.ac.cn/)	土壤有机质含量

2.2　研究方法

本研究的技术路线如图 1 所示。首先，收集并处理临沂市 2018，2020 和 2022 年的降水、DEM、土地利用和土壤数据等，计算 InVEST 模型所需的参数因子。其次，基于 InVEST 模型评估 2018，2020 和 2022 年临沂市土壤侵蚀强度和土壤保持能力的时空变化特征。最后，运用逐步回归和地理探测器两种方法对比分析土壤保持能力空间分布的影响因素，运用贡献率厘定法[8]计算土壤保持能力年际变化影响因素的贡献率，为制定合理的土壤保持对策提供依据。

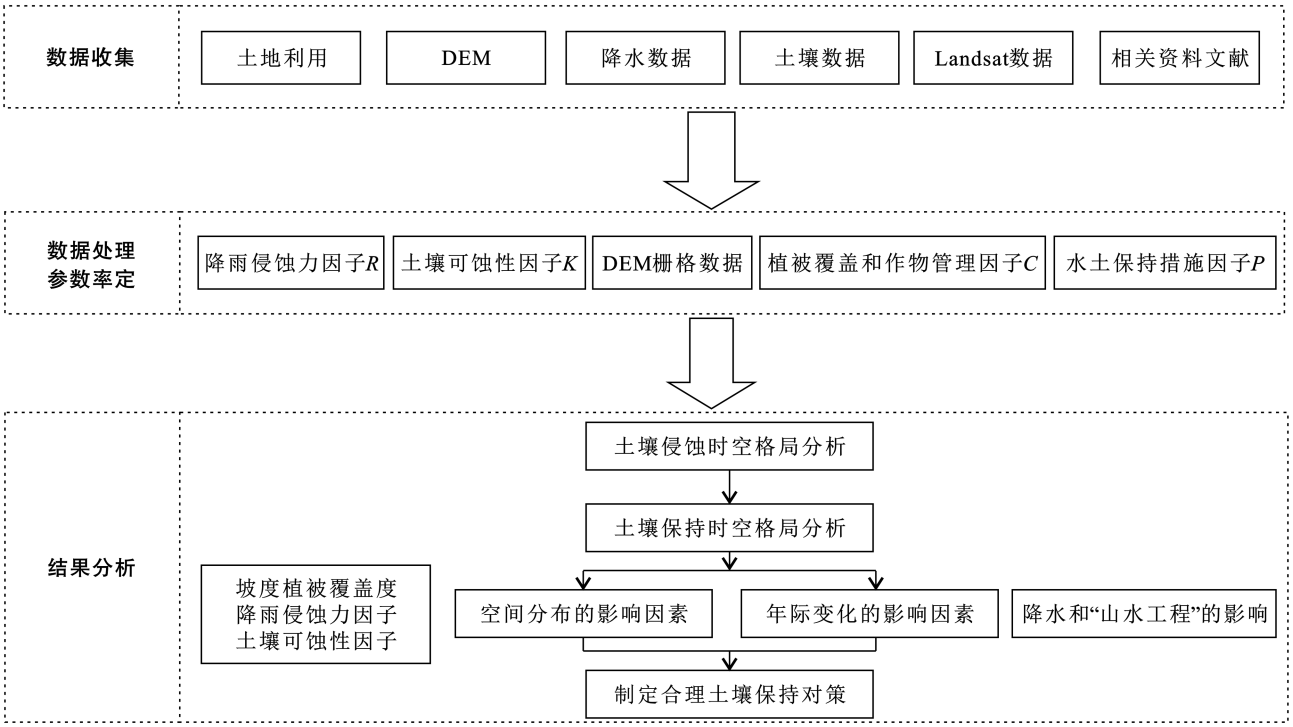

图 1　本研究技术路线图

Fig.1　Technical roadmap of research

2.2.1　土壤保持能力计算　本文基于 InVEST 模型中的 SDR 模块计算土壤保持量，进而评估土壤保持能力即单位面积上的土壤保持量，以像元尺度上的通用土壤流失方程（USLE）计算方法为基础，土壤保持量（AEX_i）为自然植被保护下的潜在土壤侵蚀量（$RKLS_i$）与人工管理和保持措施下的实际土壤侵蚀量（$ULSE_i$）之差。

$$AEX_i = RKLS_i - USLE_i \tag{1}$$

$$RKLS_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \tag{2}$$

$$ULSE_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i \tag{3}$$

式中：R_i 为降雨侵蚀力因子；K_i 为土壤可蚀性因子；LS_i 为坡度坡长因子；C_i 为植被覆盖和管理因子；P_i 为水土保持措施因子。

（1）降雨侵蚀力因子（R）。降雨侵蚀力因子是水土流失方程中首要的关键因子，其反映了降雨条件下雨水对土壤的分离、运输和冲刷而导致水土流失的潜在能力[9]。本研究选择月尺度[10]计算公式：

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5\lg\frac{P_i^2}{P} - 0.818\,8} \tag{4}$$

式中：P_i 为月降雨量（mm）；P 为年降雨量（mm）。

（2）土壤可蚀性因子（K）。土壤可蚀性因子与土壤本身特性密切相关，其中的土壤质地、有机质含量、土体结构和透气性等因素决定着土壤的可蚀性。本研究采用 Williams 等[11]提出的 EPIC 模型中的公式，结合张科利等[12]提出的修正方法进行修正，计算公式为：

$$K = (-0.013\,83 + 0.515\,75K_{epic}) \times 0.131\,7 \tag{5}$$

$$K_{epic} = \left\{0.2 + 0.3\exp\left[-0.026\,5S_{AN}\left(1 - \frac{S_{IL}}{100}\right)\right]\right\} \times \left(\frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}}\right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1 - \frac{0.7S_N}{S_N + \exp(22.9S_N - 5.51)}\right] \tag{6}$$

式中：$S_N = 1 - S_{AN}/100$；S_{AN}，S_{IL}，C_{LA} 和 C 分别为沙粒、粉粒、黏粒和有机碳含量（%）。

（3）植被覆盖和作物管理因子（C）。植被覆盖因子是在一定条件下有植被覆盖的土壤侵蚀总量与无植被覆盖土壤侵蚀量的比值[13]。本研究使用蔡崇

法[14]的植被覆盖和作物管理因子计算方法。计算公式为：

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

$$f_c=(\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_0)/(\mathrm{NDVI}_g-\mathrm{NDVI}_0) \quad (8)$$

式中：f_c 代表植被覆盖度；NDVI 代表植被归一化指数；NDVI_0 为裸土、无植被覆盖区域的 NDVI 值；NDVI_g 为完全被植被覆盖的像元的 NDVI 值。

（4）水土保持措施因子（P）。水土保持措施因子是指采用一定的水土保持措施后的土壤流失量与不采取任何措施的土壤流失量之比[15]。本研究考虑不同土地利用类型[16]的坡度，并结合类似研究区[17-18]的相关研究成果对 P 因子进行赋值。将农田赋值为 0.3，森林赋值为 1，灌木赋值为 1，草地赋值为 0.9，水域赋值为 0，荒地赋值为 1，不透水面赋值为 0。

2.2.2 逐步回归分析 土壤保持能力的空间格局是降水、土壤、地形和植被几大因素综合作用的结果[19]。为揭示土壤保持能力空间分布的影响因素，采用 SPSS PRO 中的逐步回归进行分析。该方法可识别关键的解释变量并排除多重共线性问题，并判断自变量对因变量的影响程度大小及方向，其中因变量取格网尺度的土壤保持能力，自变量取格网尺度的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡度因子和植被覆盖度因子。

2.2.3 地理探测器 地理探测器是用于探测空间分异性，以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法。其核心思想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[20]。地理探测器包括因子探测、交互作用探测、风险探测和生态探测 4 部分，本文采用 Geodetector 2018 的因子探测对研究区土壤保持能力空间分布的主要影响因子进行定量探测。

2.2.4 降水和生态工程对土壤保持能力年际变化的贡献率厘定 降水和生态工程是土壤保持能力年际变化的主要影响因素。为了厘定这两个因素对土壤保持的贡献率，在 InVEST 模型中，输入多年平均降水，估算平均降水状况下的土壤保持量，可以认为土壤保持量的变化与降水变化无关，主要反映生态工程实施引起土地利用和植被变化的影响。而真实降水状况下的变化量反映了降水变化和生态工程的综合影响。因此，计算平均降水状况下的指标量可以厘定出生态工程对土壤保持能力变化的贡献率[8]。具体计算公式为：

$$C_{\mathrm{project}}=\frac{G_{\mathrm{Al}}-G_{\mathrm{Ap}}}{|G_{\mathrm{Rl}}-G_{\mathrm{Rp}}|} \quad (9)$$

$$C_{\mathrm{nature}}=\frac{G_{\mathrm{Rl}}-G_{\mathrm{Rp}}}{|G_{\mathrm{Rl}}-G_{\mathrm{Rp}}|}-C_{\mathrm{project}} \quad (10)$$

式中：C_{project} 为生态工程的贡献率；C_{nature} 为降水的贡献率；G_{Al}，G_{Ap} 分别为平均降水状况下工程实施后和实施前的指标量；G_{Rl}，G_{Rp} 分别为真实降水状况下工程实施后和实施前的指标量。

3 结果与分析

3.1 结果验证

InVEST 模型 SDR 模块计算结果包括潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量（以下简称“土壤侵蚀量”）、土壤保持量和输沙量等。本文验证采用水利部《中国河流泥沙公报》中临沂水文站 2018，2020 和 2022 年的输沙量数据。输沙量是基于土壤侵蚀量计算的，通过对输沙模拟值的验证间接对土壤侵蚀量和土壤保持量进行验证[9]。临沂水文站控制面积为 1.03×10^4 km²，控制临沂市的面积为 8 400 km²，将这部分得出的输沙模拟值与水文站实测值进行比较，误差在 10% 以内（表 2），因此 InVEST 模型 SDR 模块计算得到的结果是基本可信的。

表 2 临沂水文站 2018，2020 和 2022 年输沙模拟值与实测值对比

Table 2 Comparison of simulated and measured sediment transport values at Linyi City in 2018, 2020 and 2022

项 目	输沙模数/(t·hm⁻²·a⁻¹)		
	2018 年	2020 年	2022 年
InVEST 模型模拟值	0.132	2.283	0.129
临沂水文站实测值	0.119	2.320	0.120

3.2 土壤侵蚀强度时空变化分析

临沂市 2018，2020 和 2022 年的土壤侵蚀模数分别为 4.55，4.86 和 7.73 t/(hm²·a)。土壤侵蚀模数上升的主要原因是降雨侵蚀力在增大，2020 年较 2018 年，降雨侵蚀力增长幅度为 29.29%，2022 年较 2020 年，降雨侵蚀力增长幅度为 60.54%。临沂市 2018，2020 和 2022 年土壤侵蚀总量分别为 7.82×10^6 t，8.35×10^6 t 和 13.29×10^6 t，分别占潜在土壤侵蚀总量的 16.46%，14.10%，12.59%。虽然土壤侵蚀模数和土壤侵蚀总量呈上升态势，但实际土壤侵蚀总量占潜在土壤侵蚀总量的比例呈下降趋势，说明该研究区的土壤保持能力在提高，主要原因可以认为是水土保持措施的相对有效性，近年来“山水工程”涉及的荒山造林工程、土地整治工程、退化公益林修复与森林质量提升工程等在一定程度上发挥了作用，使得实际土壤侵蚀量的增长速度低于潜在土壤侵蚀量的增长速度。

将研究区 3 期土壤侵蚀模数按照《北方土石山区水土流失综合治理技术标准》[21] 中的北方土石山区水蚀强度进行分级,2018,2020 和 2022 年实际土壤侵蚀强度空间分布基本一致(图 2),表现为西北高东南低,微度侵蚀的面积占比 3 期分别为 77.87%,73.07%和 66.52%(图 3)。县域上,土壤侵蚀强度相对较高的是蒙阴县和平邑县,相对较低的是罗庄区和河东区。2020 年与 2018 年相比,土壤侵蚀级别整体变化不大;2022 年与 2020 年相比,土壤侵蚀等级除微度侵蚀以外的各个等级由于降水影响有不同程度增加。由图 3 可知,微度侵蚀是临沂市的主要侵蚀等级,占临沂市总面积的 65%～80%,因此,尽管其他侵蚀等级略有增加,但由于微度侵蚀面积的显著减少,整体侵蚀水平呈现下降趋势。这个结果表明,在治理措施实施后,主要的侵蚀形式得到了有效控制,从而改善了土壤保持状况。

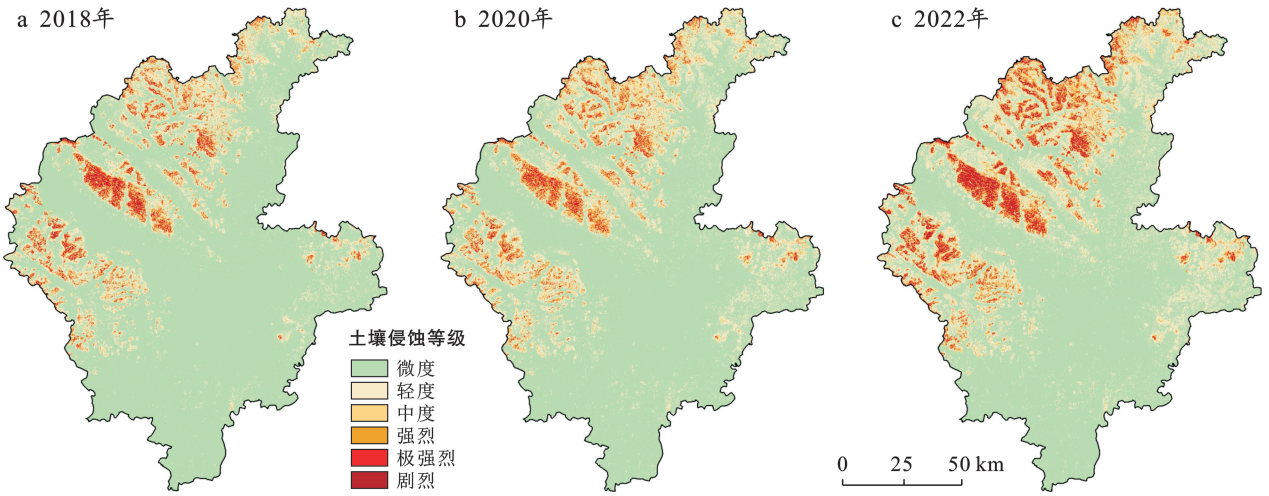

图 2　临沂市 2018,2020 和 2022 年土壤侵蚀强度时空分布格局

Fig.2　Spatial and temporal distribution patterns of soil erosion intensity at Linyi City in 2018, 2020 and 2022

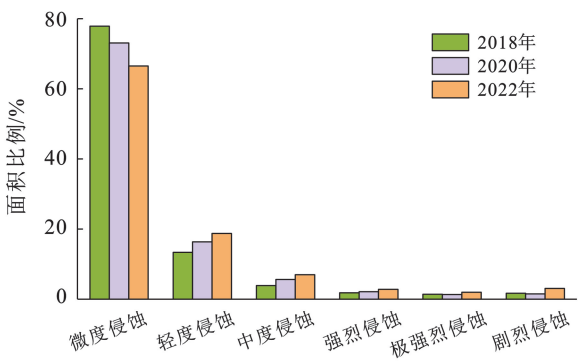

图 3　临沂市 2018,2020 和 2022 年土壤侵蚀强度各等级面积比例

Fig.3　Area proportion of soil erosion intensity grades at Linyi City in 2018, 2020 and 2022

3.3　土壤保持能力时空变化分析

从市域上看(图 4),临沂市 2018,2020 和 2022 年土壤保持能力分别为 23.12,29.62 和 53.70 t/(hm^2 · a),土壤保持总量分别为 3.97×10^7 t,5.09×10^7 t 和 9.23×10^7 t,虽然研究区的土壤侵蚀总量在增加,但土壤保持能力和土壤保持总量也呈增加态势。临沂市土壤保持能力的空间分布格局较为稳定,具有明显的空间差异性,呈现“西北高—东南低”的特征。西北地区整体生态环境较好,土地类型主要以农田和林地为主,有蒙山和孟良崮等多处国家、省、市级森林公园以及自然保护区和生态功能保护区,植被覆盖度较高,这些地区土壤保持能力较高。土壤保持能力低值主要位于临沂中心城区和南部的平原,这些地区土地利用类型以建设用地、裸地和荒地为主,植被覆盖度较低,容易受到水流冲刷和侵蚀,泥沙拦截能力较弱。

从县域上看(图 5),2018,2020 和 2022 年临沂市土壤保持能力较高的地区分别为蒙阴县、平邑县和费县,较低的地区分别是郯城县、河东区和罗庄区。临沂市各个县的土壤保持能力都处于增长态势。2020 年与 2018 年相比,土壤保持能力提升最大的为沂水县,提升了 13.75 t/(hm^2 · a);2022 年与 2020 年相比,土壤保持能力提升最大的为蒙阴县,提升了 57.55 t/(hm^2 · a)。在“山水工程”中,蒙阴县是重点实施区域,近两年涉及的工程有森林保育工程、退化公益林修复与森林质量提升工程、小微湿地生态修复工程等,这些措施有助于增加植被覆盖度和稳定土壤结构,从而提高土壤保持能力,提升生态系统整体健康和稳定性。

从土地利用角度上看(图 6),2018,2020 和 2022 年除荒地外,其他土地利用类型的土壤保持能力均在

增加。2020—2022 年的增幅总体上大于 2018—2020 年，其中灌木和森林增幅最大，荒地和水域增幅最小。土壤保持能力 2018 年的排序为：森林＞灌木＞草地＞农田＞荒地＞水域＞不透水面，2020 年的排序为：森林＞灌木＞草地＞农田＞水域＞不透水面＞荒地，2022 年的排序为：灌木＞森林＞草地＞农田＞水域＞不透水面＞荒地。从多年平均土壤保持总量来看，土壤保持总量的排序为：农田＞森林＞不透水面＞草地＞水域＞荒地＞灌木，农田土壤保持能力虽然排第 4，但其面积最大，因此土壤保持总量最高。研究表明，农田是研究区主要的土地利用类型，但土壤保持能力相对较低，因此优化农田管理，推广保护性耕作可以有效减少水土流失，进而推动生态环境的持续改善。

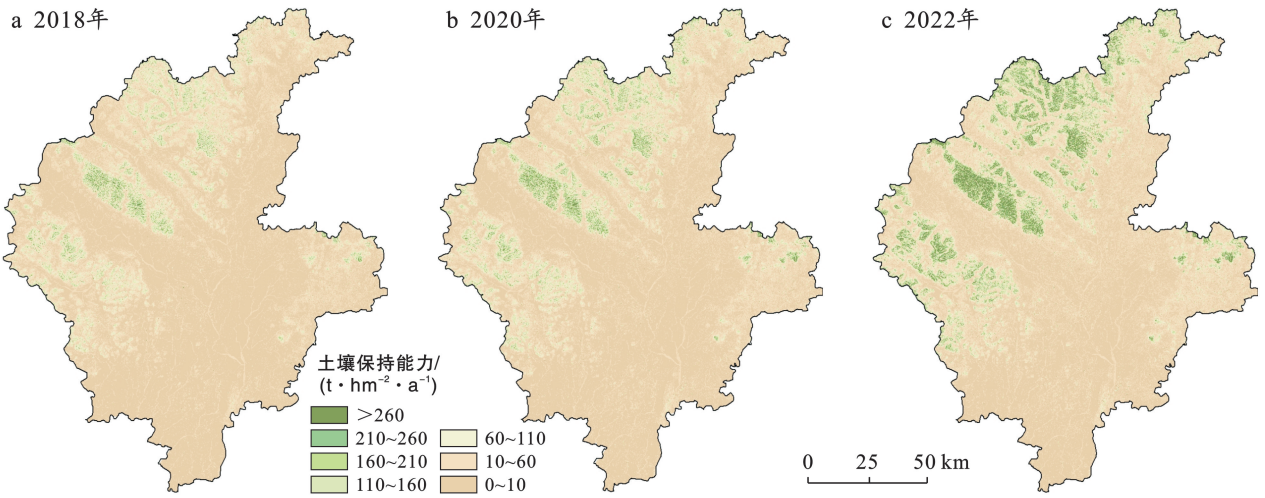

图 4 临沂市 2018，2020 和 2022 年土壤保持能力时空分布格局

Fig.4 Spatial and temporal distribution patterns of soil conservation capacity at Linyi City in 2018, 2020 and 2022

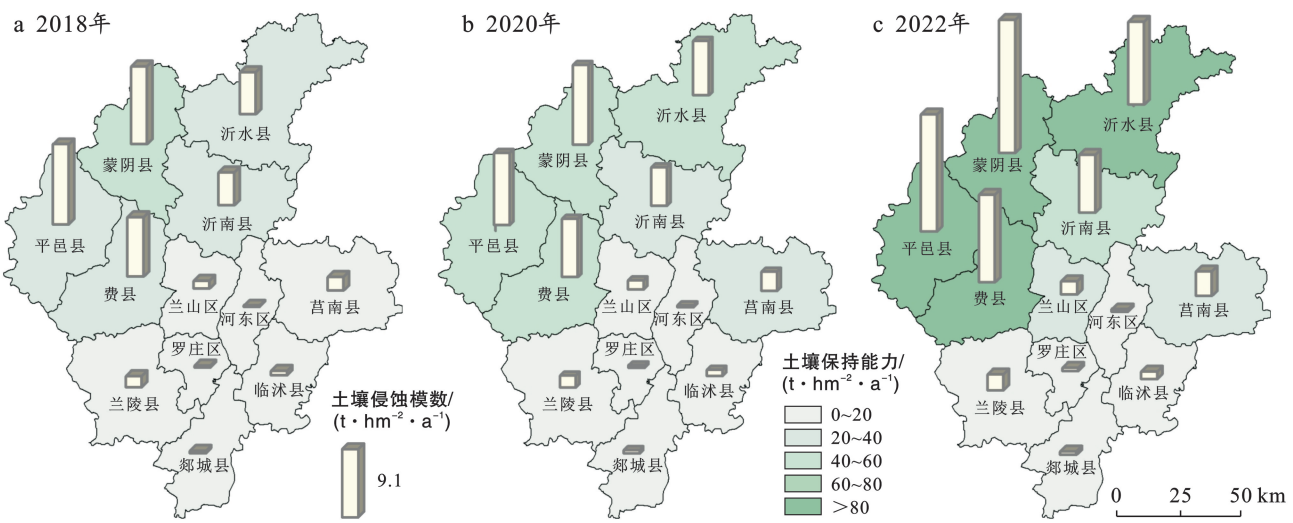

图 5 临沂市县域 2018，2020 和 2022 年土壤侵蚀和土壤保持能力时空分布格局

Fig.5 Spatial and temporal distribution patterns of soil erosion and soil conservation capacity at Linyi City's counties in 2018, 2020, 2022

3.4 土壤保持能力空间分布的影响因素分析

土壤保持能力空间分布受降水、土壤、地形和植被几大自然因素影响，采用逐步回归和地理探测器探究多个自变量对因变量的影响。根据 InVEST 模型所需参数，降水因素选择降雨侵蚀力因子，土壤因素选择土壤可蚀性因子，地形因素选择坡度，植被因素选择植被覆盖度，逐步回归和地理探测器结果显示（表 3），3 个时期的坡度、降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子和植被覆盖度具有极显著影响（$p<0.01$），且都通过了多重共线性检验（VIF＜10）。其中坡度的影响最大，逐步回归结果显示影响程度达到 61%左右，地理探测器结果显示坡度的解释力达到 47%左右，其次是降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子和植被覆盖度，影响程度和解释力都未达到 10%。为进一步探究坡度对土壤保持能力的影响，根据临沂市的坡度情况，将其划分为 5 个等级。

如图 7 所示,土壤保持能力整体上随坡度等级的增大而增强,尤其在坡度大于 25°时达到最高。临沂市地形起伏较大,丘陵、山地、河谷和平原地形交错分布,虽然陡坡区域的潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量较大,但这些区域土地类型主要以农田和林地为主,且土壤保持需求更加紧迫,实施了更多的土壤保持措施。同时,随着坡度等级的提高,植被覆盖度也呈现增加趋势,极大降低了实际侵蚀量。因此,尽管坡度增加带来了更高的侵蚀风险,但有效的保持措施和合理的土地利用减少了实际侵蚀,增强了土壤保持能力。

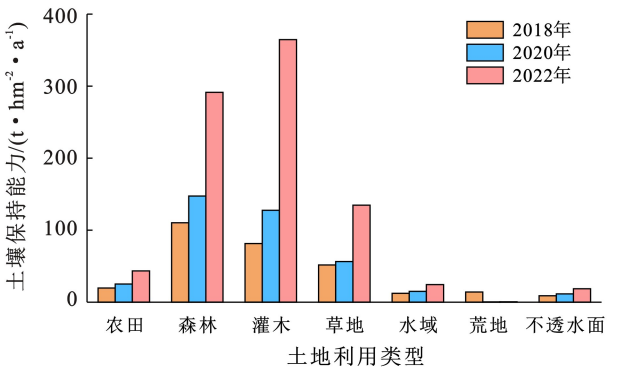

图 6　临沂市 2018,2020 和 2022 年不同土地利用类型的土壤保持能力

Fig.6　Soil conservation capacity of different land uses at Linyi City in 2018, 2020 and 2022

表 3　临沂市土壤保持能力空间分布的影响因素逐步回归和地理探测器分析结果

Table 3　Stepwise regression and geographic detector analysis results of factors impacting spatial and temporal patterns distribution of soil conservation capacity at Linyi City

影响因子	Beat 值			q 值			p 值		
	2018 年	2020 年	2022 年	2018 年	2020 年	2022 年	2018 年	2020 年	2022 年
坡度(Slope)	0.612	0.623	0.613	0.478	0.464	0.467	<0.01	<0.01	<0.01
降雨侵蚀力因子(R)	0.073	0.045	0.081	0.035	0.019	0.066	<0.01	<0.01	<0.01
土壤可蚀性因子(K)	0.043	0.044	0.053	0.041	0.040	0.042	<0.01	<0.01	<0.01
植被覆盖度(FVC)	0.03	0.042	0.033	0.022	0.019	0.024	<0.01	<0.01	<0.01

注:因变量为土壤保持能力;Beat 是回归分析中非标准回归系数,可用于比较自变量 X 对因变量 Y 的影响程度;q 值是地理探测器分析中衡量因子 X 对属性 Y 空间分异的解释程度;p 是显著性分析中的显著性水平,小于 0.05 表示显著。

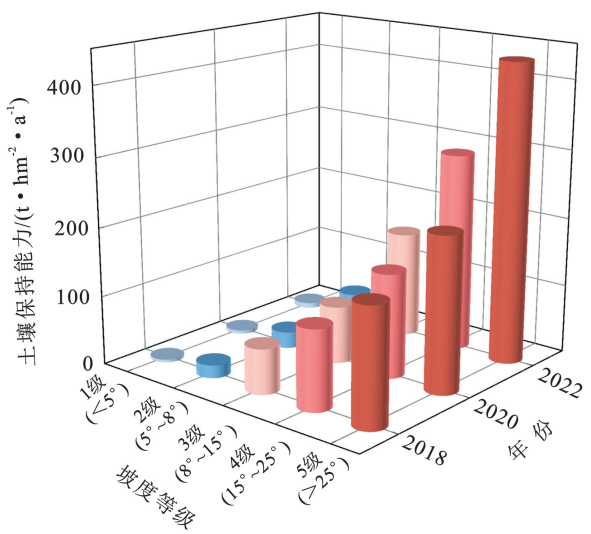

图 7　临沂市 2018,2020 和 2022 年不同坡度下的土壤保持能力

Fig.7　Soil conservation capability under different slopes at Linyi City in 2018, 2020 and 2022

3.5　土壤保持能力年际变化的影响因素分析

降水和生态工程是土壤保持能力年际变化的主要影响因素。降水变化导致降雨侵蚀力变化,临沂市 2018,2020 和 2022 年的降雨侵蚀力分别为 292.25,377.86和 606.64 MJ·mm/(hm²·h·a),2022 年 6 月和 7 月的暴雨导致 2022 年降雨侵蚀力较 2020 年增长 60.5%。另外,生态工程——"山水工程"的实施对土壤保持能力提高产生了重要作用,退化公益林修复与森林质量提升工程有利于恢复已经退化的森林,并预防新的森林退化;森林保育工程有效扩大了森林面积,提高了郁闭度;小流域水土流失综合治理工程改善了小流域的生态环境,这些生态工程的实施改善了植被,林地面积增加,从而共同促进了生态系统的健康发展。

降水和生态工程对土壤保持能力年际变化的贡献率如表 3 所示。2018—2020 年,真实与平均降水状况下,土壤保持能力变化值分别为 6.50 和0.91 t/(hm²·a)(表 4),生态工程的贡献率为 14.0%,降水的贡献率 86.0%;2020—2022 年,真实与平均降水状况下,土壤保持变化量分别为 24.08 和 4.52 t/(hm²·a),生态工程的贡献率为 18.8%,降水的贡献率为 81.2%。"山水工程"对于生态工程贡献率的提高在一定程度上发挥了作用,通过时间的推移,往后生态工程的贡献率会体现得愈加明显。

表 4　真实和平均降水状况下土壤保持能力归因统计

Table 4　Statistical attribution of soil conservation capacity under actual and mean climatic conditions

年 份	土壤保持能力变化值/(t·hm⁻²·a⁻¹)		生态工程贡献率/%	气候变化贡献率/%
	平均气温	真实气温		
2018—2020 年	0.91	6.50	14.0	86.0
2020—2022 年	4.52	24.08	18.8	81.2

4 讨论

(1) 近年来临沂市土壤保持服务总体态势积极向好,呈现“西北高—东南低”的特征,与前人[22]得出的临沂市土壤保持服务空间格局研究结果相符合。坡度对土壤保持能力空间分布的影响程度和解释力占主导,土壤保持能力随坡度等级的增大而增大,相似结论也出现在史鑫明[5]、田宇[23]的研究中。随着临沂市地形起伏度增加,坡度增大,人类活动的范围和强度缩小,城市化程度相对较低,人类对地表破坏性也在降低[24],同时植被覆盖度随之增加,且坡度较高的区域土地类型主要以农田和林地为主,因此土壤保持能力高值主要在西北地区。而随着临沂市海拔和坡度降低,人口密度相对增大,工农业和城市化程度增强,土地利用更加密集和多样化,导致东南地区的土壤保持能力相对较低。因此,坡度对临沂市土壤保持能力的空间分布影响最为显著。针对临沂市的土壤保持工作,需防和治结合,对兰山区和郯城这样人为扰动较大且具有生态保护区的地区需要重点预防保护,实施生态修复、封山禁牧,减少人为扰动;对海拔较高的低山丘陵区,主要涉及沂南县、沂水县、费县、平邑县和蒙阴县,该区贫困人口集中,主要以整治水土流失、提高农业生产条件和生态环境质量为主,实施小流域综合治理和坡改梯工程。

(2) 相较于生态工程的贡献率,降水对土壤保持能力年际变化的影响更为显著。特别是在夏季,极端降雨事件频繁发生,这些事件通常伴随着高强度降雨和高降雨量。极端降雨导致短时间内降雨侵蚀力显著增加,降雨侵蚀力反映了对土壤表面破坏的潜力。当降雨侵蚀力增大时,土壤颗粒更容易被冲刷和搬运,导致土壤侵蚀,还会造成水土流失,淤积河道和水库,进而影响土壤保持效果。这些极端天气事件导致土壤保持年际变化明显,对当地农业生产和生态环境造成了负面影响,大量的土壤流失还可能导致农田地力下降,减产甚至绝收,直接威胁到当地居民的粮食安全和生计。此外,更严重的土壤侵蚀还可能引发次生灾害,如山体塌方、泥石流等,对人类的生命和财产安全构成严重威胁。这要求相关部门在制定土壤保持措施时,充分考虑季节性降雨模式的变化。例如,通过科学的土壤侵蚀监测和预警系统,及时应对极端降雨事件,减少其对土壤和生态环境的破坏。此外,可以制定强降雨期间的应急响应计划,确保在发生极端天气时能够迅速采取措施。具体措施包括加强河道疏浚,构建防护林带,建立高效的排水系统,以及推广农田保护和改良技术等。进一步地,教育和培训当地居民,提高他们对土壤保护和可持续农业实践的认识。只有通过综合治理和多方参与,才能有效应对极端降雨带来的挑战。

(3) 生态工程(山水工程)是土壤保持能力年际变化的次要影响因素,但生态工程的贡献率呈上升趋势。近年“山水工程”的实施,对生态工程贡献率的提高起到了关键作用。“山水工程”通过大规模的植被修复和恢复项目,增加了植被覆盖率,植被不仅能减缓雨滴直接冲击土壤,还通过根系固定土壤颗粒,增强土壤结构稳定性;在应对气候变化方面,“山水工程”通过提高区域的碳汇能力,减缓气候变化,增强生态系统韧性,帮助地区更好地应对极端天气事件,如暴雨和干旱,减少这些事件对土壤侵蚀的影响;在恢复生态系统功能方面,“山水工程”通过促进植被恢复和生态系统多样性,增强了区域生态系统的稳定性和功能性,提升了包括水源涵养、气候调节和生物多样性在内的多种生态系统服务,这些都对土壤保持产生了积极影响。在未来,随着“山水工程”的深入推进和完善,更多的生态恢复和修复项目得以实施,土壤保持能力将持续增强。“山水工程”的实施将进一步推动绿色经济的发展,绿色经济的发展有助于减少对土地的过度开发和利用,同时保护土壤资源,进一步促进土壤保持。此外,“山水工程”可借助先进的技术和科学管理方法,例如利用遥感技术和大数据分析,实时监测土壤侵蚀状况,优化管理措施,提升土壤保持的效果。

5 结论

(1) 2018,2020和2022年土壤保持能力分别为23.12,29.62和53.70 t/(hm^2·a),呈上升趋势。土壤保持能力在空间上分布格局较为稳定,呈现“西北高—东南低”的特征。从县域上看,土壤保持能力总体较高的地区分别为蒙阴县、平邑县和费县;从土地利用尺度上看,森林和灌木多年的土壤保持能力最高。

(2) 土壤保持能力的空间分布主要受坡度影响,土壤保持能力整体上随坡度的增大而增强。在坡度较高的地区,采取了更多的土壤保持工作,植被覆盖度也呈上升趋势,这有助于稳定土壤、减缓水流速度,从而提供更多的生态系统服务。

(3) 土壤保持能力的年际变化主要受降雨侵蚀力影响,而植被覆盖度整体变化不大,因此对土壤保持能力的年际变化影响并不大。降水在影响土壤保持能力年际变化方面的作用明显优于生态工程的作用,但生态工程贡献率有所上升。

参考文献(References)

[1] 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.

[2] 宋维峰.中国的水土流失及其对区域环境的影响[J].亚热带水土保持,2007,19(4):29-31.
Song Weifeng. Soil erosion in China and impact to the regional environment [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2007,19(4):29-31.

[3] Yin Caichun, Zhao Wenwu, Pereira P. Soil conservation service underpins sustainable development goals [J]. Global Ecology and Conservation, 2022,33:e01974.

[4] 本刊讯.中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见[J].中国水土保持,2024(2):12.
Ben Kanxun. Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on comprehensively promoting the construction of beautiful China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(2):12.

[5] 史鑫明.临沂市生态系统服务时空变化特征及驱动因素研究[D].江苏 南京:南京林业大学,2023.
Shi Xinming. Research on the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of ecosystem services in Linyi City [D]. Nanjing, Jaingsu: Nanjing Forestry University, 2023.

[6] 乔心如.沂河流域生态系统服务权衡/协同研究[D].山东 济南:山东师范大学,2023.
Qiao Xinru. Research on trade-offs/synergies of ecosystem services in the Yihe River Basin [D]. Jinan, Shandong: Shandong Normal University, 2023.

[7] Angélica V T, Chetan T, Atkinson Samuel F. Sustaining human nutrition in an increasingly urban world [J]. Sustainability, 2022,14(13):7607.

[8] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J].地理学报,2016,71(1):3-20.
Shao Quanqin, Fan Jiangwen, Liu Jiyuan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region [J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(1):3-20.

[9] 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.
Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Ren Heyu, et al. Spatiotemporal variations of the soil conservation in the agro-pastoral ecotone of Northern China under grain for green program [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):172-178.

[10] Angulo-Martínez M, Beguería S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2009,379(1/2):111-121.

[11] 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.

[12] 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.
Zhang Keli, Peng Wenying, Yang Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.

[13] 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].江西 南昌 南昌大学,2021.
Wang Lezhi. Research on soil conservation and habitat quality changes in the Poyang Lake basin based on the InVEST model [D]. Nanchang, Jiangxi: Nanchang University, 2021.

[14] 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.

[15] 黄杰,姚志宏,查少翔,等.USLE/RUSLE 中水土保持措施因子研究进展[J].中国水土保持,2020(3):37-39.
Huang Jie, Yao Zhihong, Zha Shaoxiang, et al. Progress of study on soil and water conservation measure factors in USLE/RUSLE [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(3):37-39.

[16] Yang Jie, Huang Xin. 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.

[17] 林锦阔.基于 RUSLE 模型沂河流域土壤侵蚀研究[D].山东 济南:山东师范大学,2017.
Lin Jinku. Research on soil erosion in the Yihe River basin based on the RUSLE model [D]. Jinan, Shandong Shandong Normal University, 2017.

[18] 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.
Huang Xin, Chen Hong, Xu Xiaoren, 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.

(下转第 356 页)

Research on spatial conflict calculation and zoning optimization of land use in Nanchang City from the perspective of "three living spaces" [J]. World Regional Studies, 2021,30(3):533-545.

[24] 陈理庭,蔡海生.昌江流域土地利用冲突时空演变及关键影响因子探析[J].生态与农村环境学报,2024,40(1):55-67.
Chen Liting, Cai Haisheng. Spatial and temporal evolution of land use conflicts and their key influencing factors in the Changjiang River Basin [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(1):55-67.

[25] 蒋金亮,徐建刚,吴文佳,等.中国人—地碳源汇系统空间格局演变及其特征分析[J].自然资源学报,2014,29(5):757-768.
Jiang Jinliang, Xu Jiangang, Wu Wenjia, et al. Patterns and dynamics of China's human-nature carbon source-sink system [J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(5):757-768.

[26] 万慧琳,王赛鸽,陈彬,等.三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析[J].生态学报,2022,42(16):6595-6606.
Wan Huilin, Wang Saige, Chen Bin, et al. Ecological risk assessment and spatial threshold analysis of wetlands in the Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(16):6595-6606.

[27] 孟斌,王劲峰,张文忠,等.基于空间分析方法的中国区域差异研究[J].地理科学,2005,25(4):393-400.
Meng Bin, Wang Jinfeng, Zhang Wenzhong, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4):393-400.

[28] 徐珏,黄春萍,宋姝娟,等.Moran's *I* 系数分析手足口病的空间自相关性[J].浙江预防医学,2014,26(6):541-543.
Xu Jue, Huang Chunping, Song Shujuan, et al. Spatial autocorrelation analysis on hand-foot-mouth disease using Moran's *I* index [J]. Zhejiang Journal of Preventive Medicine, 2014,26(6):541-543.

[29] 王健,刘欣雨.基于"风险—效应"的土地利用空间冲突识别与测度[J].农业工程学报,2022,38(12):291-300.
Wang Jian, Liu Xinyu. Recognizing and measuring spatial conflict of land use via "risk-effect" [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(12):291-300.

(上接第345页)

[19] 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.
Rao Enming, Xiao Yi. Spatial characteristics and effects of soil conservation service in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(24):8741-8749.

[20] 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.

[21] 水利部关于批准发布水利行业标准的公告[J].中华人民共和国水利部公报,2015(1):21-26.
Announcement on the approval and publication of water industry standards [J]. Gazette of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2015(1):21-26.

[22] 杨骐鸿.基于生态系统服务供需的城市生态安全格局构建与管控:以临沂市为例[D].山东 济南:山东建筑大学,2023.
Yang Qihong. Construction and Management of Urban Ecological Security Pattern Based on Ecosystem Service Supply and Demand [D]. Jinan, Shandong: Shandong Jianzhu University, 2023.

[23] 田宇.三峡库区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
Tian Yu. Research on water source conservation and soil conservation ecosystem service functions in the Three Gorges Reservoir area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Science, 2020.

[24] 刘长雨,杨洁,谢保鹏,等.黄河流域甘青段生境质量时空特征及其地形梯度效应[J].农业资源与环境学报,2023,40(2):372-383.
Liu Changyu, Yang Jie, Xie Baopeng, et al. Temporal and spatial characteristics of habitat quality and its topographic gradient effect in the Gansu-Qinghai section of the Yellow River basin [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(2):372-383.