2003—2023年土地利用类型变化对新疆土壤水力侵蚀的影响

冯子睿[1], 马 波[1,2], 张秀梅[1], 帅 芳[2], 安韶山[1], 王文龙[1,2]

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 探究2003—2023年新疆维吾尔自治区不同土地利用类型动态变化对水力土壤侵蚀的影响,为该区水土保持措施科学合理制定和区域国土空间格局优化提供科学依据。[方法] 以新疆维吾尔自治区为研究对象,运用修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation)模型与土地利用转移矩阵方法,系统分析2003—2023年土地利用格局时空演变规律及土壤侵蚀强度变化特征,并探讨二者之间的关联机制。[结果] ①2003—2023年新疆土地利用格局以裸地和草地为主导类型,二者合计比例保持在90%以上且呈收缩趋势;耕地和建设用地扩张显著,面积比例分别由3.87%增至5.40%和由0.10%增至0.33%;林地面积稳步增长,水域面积先增后降;土地利用类型转换主要表现在裸地与草地之间。②2003—2023年新疆多年平均土壤水力侵蚀模数为282.24 t/(km^2·a),侵蚀强度呈现先波动后减少的趋势。微度侵蚀面积上升至95.63%,中度及以上强度侵蚀至2023年已趋近于零。③2003—2023年新疆土地利用变化对土壤水力侵蚀具有显著调控作用,水域、林地和湿地的增加有效抑制了侵蚀强度,而建设用地与耕地的扩张导致微度和轻度侵蚀面积的增加。[结论] 2003—2023年新疆土壤水力侵蚀以微度侵蚀为主,轻度侵蚀次之,中度及以上侵蚀未明显扩展。土地利用变化显著影响土壤水力侵蚀强度,建设用地扩展主要增加局部微度、轻度侵蚀,而水域、林地和湿地的增加有效抑制中高强度侵蚀,增强区域土壤保持能力。

关键词: 土地利用变化; 土壤水力侵蚀; RUSLE模型; 时空演变; 新疆维吾尔自治区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0369-14 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 冯子睿, 马波, 张秀梅, 等.2003—2023年土地利用类型变化对新疆土壤水力侵蚀的影响[J].水土保持通报,2026,46(3):369-382. Feng Zirui, Ma Bo, Zhang Xiumei, et al. Impacts of land use type changes on water-induced soil erosion in Xinjiang from 2003 to 2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(3):369-382.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.040 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.040**

Impacts of land use type changes on water-induced soil erosion in Xinjiang from 2003 to 2023

Feng Zirui[1], Ma Bo[1,2], Zhang Xiumei[1], Shuai Fang[2], An Shaoshan[1], Wang Wenlong[1,2]

(1.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] The impacts of dynamic changes in different land use types on water-induced soil erosion in the Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2023 were investigated in order to provide a scientific basis for the scientific and rational formulation of soil and water conservation measures and the optimization of regional territorial spatial patterns. [Methods] Taking the Xinjiang Uygur Autonomous Region as the research object, the

收稿日期:2025-12-23 **修回日期:**2026-01-22 **采用日期:**2026-01-30

资助项目:陕西省重点研发计划项目"塔吉克斯坦土壤侵蚀定量评价及碳汇型水土流失防控策略"(2025GH-YBXM-060); 国家自然科学基金项目"黄土高原北部冻融作用下物理结皮特性变化对风蚀的影响机理"(42277342)

第一作者:冯子睿(1999—),男(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与土地利用信息化。Email:fzr@nwafu.edu.cn。

通信作者:王文龙(1964—),男(汉族),陕西省渭南市人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email:wlwang@nwafu.edu.cn。

revised universal soil loss equation (RUSLE) model and the land use transfer matrix method were used to systematically analyze the spatiotemporal evolution of land use patterns and the variation characteristics of soil erosion intensity from 2003 to 2023 in this region, and to explore the correlation mechanism between the two factors. [Results] ① From 2003 to 2023, bare land and grassland were the dominant land use types in Xinjiang, with their combined proportion remaining above 90% and showing a shrinking trend. Cultivated land and construction land expanded significantly, with their area proportions increasing from 3.87% to 5.40% and from 0.10% to 0.33%, respectively. Forest land area increased steadily, while water area increased first and then decreased. Land use conversion mainly occurred between bare land and grassland. ② The multi-year average water-induced soil erosion modulus in Xinjiang from 2003 to 2023 was 282.24 t/(km^2·a), and the erosion intensity showed a trend of first fluctuating and then decreasing. The area of slight erosion increased to 95.63%, and moderate and above-intensity erosion approached zero by 2023.③ Land use change in Xinjiang from 2003 to 2023 had a significant regulatory effect on water-induced soil erosion. The increase in water areas, forest land, and wetlands effectively inhibited erosion intensity, while the expansion of construction land and cultivated land led to an increase in the area of slight and light erosion. [Conclusion] Water-induced soil erosion in Xinjiang from 2003 to 2023 was dominated by slight erosion, followed by light erosion, with no obvious expansion of moderate and above erosion. Land use change significantly affects the intensity of water-induced soil erosion. The expansion of construction land mainly increases local slight and light erosion, while the increase in water areas, forest land, and wetlands effectively restrains moderate and high-intensity erosion and enhances regional soil conservation capacity.

Keywords: land use change; water-induced soil erosion; RUSLE model; spatiotemporal evolution; Xinjiang Uygur Autonomous Region

随着区域经济快速发展与人类活动强度的持续增强,土地利用类型发生了显著转变[1]。土地利用变化不仅深刻重塑了地表能量与水分循环过程,还显著改变了地表物质的迁移格局,已成为驱动土壤侵蚀时空演变的重要因素之一[2]。土壤侵蚀作为制约土壤功能可持续发展的关键生态环境问题,直接影响农业生产力、生态系统稳定性及水土资源的可持续利用[3]。因此,系统探讨土地利用变化与土壤水力侵蚀之间的关系,具有重要的科学意义和现实价值。

土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)通过影响植被覆盖度、根系结构以及土壤理化性质,调控地表径流形成过程与水土保持功能,是影响土壤水力侵蚀的重要人类驱动因素[3]。土地开发强度过高往往破坏地表结构,增加地表裸露度并增强径流侵蚀能力,从而加剧土壤侵蚀风险[4],尤其在干旱与半干旱地区表现更为突出。在土壤水力侵蚀的定量评估方面,修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)因其结构清晰,参数易获取,适用性强而被广泛应用[5]。该模型综合考虑降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形因子、植被覆盖及水土保持措施等关键因素,可估算区域尺度年均土壤侵蚀模数[6],在土壤侵蚀时空格局分析与水土保持规划中具有重要应用价值。已有研究表明,RUSLE模型在新疆及相似自然环境区具有较好的适用性。如熊茂秋等[7]研究发现,2000—2020年塔里木河流域土壤侵蚀面积总体呈缩小趋势,土壤保持能力显著增强,其空间分布格局表现为中部高、四周低,降雨与地形条件是主要驱动因素。Yan Zhaojin等[8]基于RUSLE模型揭示了天山北坡城市群2010—2020年土壤侵蚀的时空演变特征,并模拟了不同情景下土地利用变化对土壤侵蚀的潜在影响。

新疆维吾尔自治区位于中国西北干旱半干旱区,是典型的生态脆弱区,具有温带大陆性干旱气候特征,降水稀少,蒸发强烈,水资源时空分布极不均衡[9]。复杂的地形条件,较低的植被覆盖度以及强烈的气候扰动共同作用,使新疆成为中国土壤侵蚀问题较为突出的区域之一[10]。该区土壤侵蚀类型以风力侵蚀与水力侵蚀并存为主要特征,侵蚀强度大且空间分异显著,区域生态安全面临持续威胁,水土保持任务依然严峻。王雅琴等[11]基于RUSLE模型与地理信息系统技术,对2000—2020年西北干旱区土壤侵蚀模数及其空间分布特征进行了分析,结果表明区域整体土壤侵蚀模数呈下降趋势,但塔里木盆地及东南部部分地区土壤侵蚀仍有加剧现象,反映出新疆水土保持形势依然严峻。尽管新疆整体属于典型干旱区,年均降水量仅177.4 mm,风力侵蚀因降水稀少而分布广泛且尤为严重[12],但水力侵蚀在特

定区域和时段的影响同样不容忽视,针对其开展专项研究具有重要必要性。主要因为水力侵蚀虽发生范围较风蚀局限,但往往具有突发性强,破坏集中度高的特点,对人类活动密集的绿洲农业区及交通基础设施威胁更大[12],亟需深入探究。首先,新疆地区降水时空分布极不均匀,天山、阿尔泰山及伊犁河谷等山地迎风坡年降水量可达400~600 mm,且多以短历时高强度暴雨形式集中于夏季,在复杂陡峭地形作用下极易引发强烈地表径流、沟道侵蚀与山洪泥石流灾害,对绿洲农业和基础设施构成直接威胁;其次,受全球气候变化及西北暖湿化趋势影响,区域极端降水事件频次显著增加,春季融雪径流与夏季暴雨叠加,进一步加剧水力侵蚀强度,其突发性和破坏集中性往往超过风蚀的慢性影响;此外,梁靓等[13]基于RUSLE模型的研究表明,尽管西北干旱区整体土壤侵蚀模数呈下降趋势,但塔里木盆地边缘、山前冲积扇及东南部局部地区土壤侵蚀仍呈加剧态势,主要源于水力过程驱动,凸显水力侵蚀的潜在威胁。因此,深入揭示新疆水力侵蚀的时空演变规律与驱动机制,对于科学认识干旱区复合侵蚀过程,推动从单一防风固沙向水风复合侵蚀综合治理转变,优化水土保持措施配置,保障区域生态安全与可持续发展,具有重要的科学价值和现实意义。近年来,针对新疆土壤侵蚀问题的研究多集中于新疆南部高海拔地区、塔里木盆地及其典型流域。在流域尺度上,李娜等[14]以天山北坡西白杨沟流域为研究对象,结合样地调查、遥感数据和CSLE模型,分析了2000—2017年水力侵蚀的时空变化特征,指出中高坡度区域及人为活动显著加剧了土壤侵蚀。乔雨宁等[15]以塔里木河流域为例,基于遥感数据、动态监测栅格数据和水文资料,揭示了1980—2022年水土流失演变特征,认为该流域以风力侵蚀为主且整体呈减弱趋势。张晓敏等[16]以阿尔泰山额尔齐斯河流域为研究对象,利用InVEST模型分析了降雨、融雪与土地利用变化的复合影响,强调融雪过程对寒区土壤侵蚀的显著放大效应。上述研究从不同尺度深化了对新疆典型区域土壤侵蚀的认识,但受研究范围限制,尚难以全面分析新疆全域土壤侵蚀的整体格局及土地利用的响应情况。

基于此,本研究结合RUSLE模型与土地利用转移矩阵,从区域尺度分析2003—2023年新疆维吾尔自治区土壤水力侵蚀强度与土地利用变化的时空演变特征,揭示不同土地利用类型动态变化对土壤侵蚀的影响。研究结果可为新疆地区水土保持规划、生态修复与区域可持续发展提供科学依据,并为践行“两山论”理念及推进“双碳”目标提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北边陲(73°40′—96°18′E,34°25′—48°10′N),总面积为1.67×10^6 km^2,约占中国陆地面积的1/6。区域地貌总体呈现“三山夹两盆”的格局[17],北部为阿尔泰山,南部为昆仑山系,天山横贯新疆中部,南侧为塔里木盆地,北侧为准噶尔盆地。新疆地处欧亚大陆腹地,受高大山系阻隔,海洋水汽难以深入,形成典型的温带大陆性干旱气候,年均降水量为177.4 mm,降水量整体偏少且时空分布不均。区域内地表植被覆盖度较低,土壤抗蚀能力相对较弱,在自然条件和人类活动共同作用下,水蚀与风蚀并存,为土壤侵蚀的发生提供了潜在条件。同时,水资源时空分布极不均衡,呈现出西多东少、北多南少、山区多而平原少的特征,区域生态环境整体较为脆弱[18]。

1.2　数据来源

本研究所用数据主要包括降水、地形、土壤、植被和土地利用等多源数据。降水数据采用1980—2023年中国1 000 m分辨率逐月平均降水数据集,来源于国家青藏高原科学数据中心。数字高程模型(DEM)数据也来自该中心。土壤数据为ISRIC(国际土壤参考和资料中心)的SoilGrids土壤剖面数据,其中包括不同土层深度的黏粒、砂粒、粉粒、土壤有机质含量以及土壤质地等信息,考虑到水力侵蚀主要作用于表层土壤,本研究选取0—5 cm,5—15 cm和15—30 cm这3个深度层的土壤属性(包括砂粒、粉粒、黏粒含量及有机碳含量)进行加权平均,代表0—30 cm土层深度的属性,然后代入计算。植被数据选用2003—2023年MODIS NDVI产品,通过Google Earth Engine平台获取月数据并合成处理;土地利用/覆被数据来源于Zenodo平台的中国土地利用/覆被数据集CLCD V1.0.3,空间分辨率为30 m,其覆盖1985—2023年具有较高的时序连续性和空间精度。在数据预处理阶段,所有空间数据统一坐标系统为WGS-84,采用ArcGIS重采样工具将各类栅格数据统一重采样至1 000 m空间分辨率,以保证多源数据在空间尺度上的一致性并提高模型运算效率(表1)。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述，通常的土地利用转移矩阵中，行表示某一时点的土地利用类型，列表示另一时点的土地利用类型。本文通过土地利用转移矩阵定量分析新疆维吾尔自治区2003—2023年的土地利用变化趋势。

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：S为土地面积；n为转移前后的土地利用类型数；i，j(i，j=1，2，…，n)分别为转移前与转移后的土地利用类型。

表1 研究数据及其来源

Table 1 Study data and its sources

数据类型	数据名称	空间分辨率/m	数据来源	时间段
降雨数据	中国1 000 m分辨率逐月数据集	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	2003－2023年
DEM	国家青藏高原科学数据中心相关地形数据集	30	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)	2023年
土壤数据	SoilGrids V 2.0土壤数据库	1 000	SoilGrids(www.soilgrids.org)	2003－2023年
植被数据	MODIS NDVI数据	250	谷歌地球引擎(Google Earth Engine，GEE)	2003－2023年
土地利用数据	中国土地利用/覆被CLCD V1.0.33数据集	30	Zenodo平台(https://zenodo.org/records/8176941)	2003－2023年

1.3.2 土地利用动态度

单一土地利用动态度反映一定时间范围内，研究区某种土地利用类型面积变化的速率，侧重于分析各土地利用类型的变化情况。其计算公式为

$$K=\frac{U_i-U_j}{U_i}\frac{1}{T}\times 100\% \tag{2}$$

式中：K为研究期内某种土地利用类型的动态度，即年变化率；U_i，U_j分别为研究初期及末期某种土地类型的面积；T为研究时段长度。

1.3.3 土壤水力侵蚀模数计算

本研究使用RUSLE模型进行土壤水力侵蚀模数的计算。RUSLE计算土壤侵蚀强度的公式为：

$$A=R\cdot K\cdot LS\cdot C\cdot P \tag{3}$$

式中：A为土壤侵蚀强度，表征单位面积的土壤侵蚀量〔t/(km^2·a)〕；R为降雨侵蚀力因子〔(MJ·mm)/(km^2·a)〕，该因子表征降雨强度且仅与降雨有关；K为土壤可蚀性因子〔(t·km^2·h)/(km^2·MJ·mm)〕；LS为地形因子，该因子作为一个复合因子由L坡长因子和S坡度因子共同构成，无量纲；C为植被覆盖与管理因子，无量纲；P为水土保持措施因子，无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。降雨侵蚀力因子是表征降雨径流剥蚀搬运土壤的外在动力，受降雨量、降雨动能等特性调控。本研究以于新疆逐月降水栅格数据为基础，采用月平均雨量估算侵蚀力算法模型，计算公式为

$$R=\alpha F^{\beta} \tag{4}$$

$$F=\left(\sum_{i=1}^{12}P_i^2\right)\times P^{-1} \tag{5}$$

式中：R为年平均降雨侵蚀力；α，β为模型参数，当使用月数据估算年R值时分别为0.183 3，1.995 7；F为修正参数；P为年降雨量(mm)；P_i为第i月的降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。通过SoilGridsV2.0数据集提取流域土壤的砂粒、粉粒、黏粒以及有机碳含量，根据Williams[19]提出的土壤侵蚀数学方程——土壤侵蚀量影响估算模型(erosion productivity impact calculator，EPIC)进行K因子的计算，计算公式为

$$K=A\cdot B\cdot C\cdot D\cdot 0.131\,7 \tag{6}$$

$$A=\left\{0.2+0.3\exp\left\{-0.025\,6\times S_{ND}\times\left(1-\frac{S_{LT}}{100}\right)\right\}\right. \tag{7}$$

$$B=\left(\frac{S_{LT}}{C_{LY}+S_{LT}}\right)^{0.3} \tag{8}$$

$$C=1-\frac{0.25\times \mathrm{Carbon}}{\mathrm{Carbon}+\exp(3.72-2.95\times \mathrm{Carbon})} \tag{9}$$

$$D=1-\frac{0.7\mathrm{SN}}{\mathrm{SN}+\exp(-5.51+22.9\mathrm{SN})} \tag{10}$$

式中：S_{ND}为土壤中的砂粒含量(%)；S_{LT}为粉粒含量(%)；C_{LY}为黏粒含量(%)；Carbon为土壤有机碳含量(%)；A，B，C，D为修正参数；SN=1－S_{ND}/100；0.131 7为美制单位改为国际制单位的修正系数。权重分别为层厚比例：0—5 cm占1/6，5—15 cm占1/3，15—30 cm占1/2，来代表0—30 cm整体土层。

(3) 坡长坡度因子(LS)。坡长因子L采用Foster等提出的坡长因子公式计算。基于DEM数

据,采用符素华等[20]设计的《坡度坡长因子计算工具》来实现。坡度因子S依据不同的坡度范围选用相应的公式计算,计算公式为

$$L=(\lambda_{out}^{m+1}-\lambda_{in}^{m+1})/\left[(\lambda_{out}-\lambda_{in})22.13^{m}\right] \quad (11)$$

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5)\\ 16.8\sin\theta-0.5 & (5\leqslant\theta<10)\\ 21.9\sin\theta-0.96 & (\theta\geqslant10)\end{cases} \quad (12)$$

式中:θ为坡度(°);λ_{out},λ_{in}分别为栅格出口及入口的坡长(m);m为坡长指数,m=0.2,θ<0.5°;m=0.3,0.5≤θ<1.5°;m=0.4,1.5°≤θ<3°;m=0.5,θ>3°。

(4)植被覆盖与管理因子(C)。植被覆盖与管理因子(C)是RUSLE模型中反映植被对土壤侵蚀抑制作用的核心参数。蔡崇法等[21]提出的基于NDVI的C因子计算公式虽源于南方丘陵区,但其基于植被覆盖度降低雨滴击溅、减缓径流、增强土壤抗蚀性的物理机制具有较好普适性,已在中国西北干旱半干旱区得到验证和应用,如陈朝良等[22]在湟水流域、何源[23]在窟野河流域的相关研究。本研究结合新疆植被稀疏、季节动态显著的特点,采用该公式定量估算C因子,以揭示植被覆盖特征对水力侵蚀的调控作用。计算公式为

$$\mathrm{FVC}=\frac{\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI_{soil}}}{\mathrm{NDVI_{veg}}-\mathrm{NDVI_{soil}}} \quad (13)$$

$$C=\begin{cases}1 & (0\leqslant\mathrm{FVC}\leqslant10\%)\\ 0.650\,8-0.343\,6\lg(\mathrm{FVC}) & (10\leqslant\mathrm{FVC}\leqslant78.3\%)\\ 0 & (\mathrm{FVC}\geqslant78.3\%)\end{cases} \quad (14)$$

式中:FVC为植被覆盖度(%);NDVI为归一化植被指数;$\mathrm{NDVI_{soil}}$表示无植被覆盖时裸土的NDVI;$\mathrm{NDVI_{veg}}$为完全植被覆盖区域的NDVI值。为减弱遥感噪声对NDVI的干扰并剔除异常值,本文以NDVI像元累计比例5%~95%作为置信区间,即分别选取累计像元比例为95%和5%时对应的NDVI数值作为上下限,随后基于像元二分模型计算植被覆盖度。

(5)水土保持措施因子(P)。水土保持措施因子P是RUSLE模型中用于表征水土保持措施对土壤侵蚀影响程度的重要参数。根据研究区的土地利用类型特点,本研究采用基于土地利用类型的经验赋值法,该方法已在西北干旱相似区域得到广泛应用并取得较好效果,结合梁靓[13]和Yan Zhaojin等[8]的研究成果,进行P因子赋值。具体赋值如下:耕地赋值为0.5,水域、雪地和建设用地赋值为0,林地、草地、裸地和湿地的赋值为1。

1.3.4　土壤侵蚀强度分级

本文按照中国水利行业标准《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》[24]中的分级标准,将土壤侵蚀强度分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈(表2)。

表2　土壤侵蚀强度划分标准

Table 2　Classification criteria for soil erosion intensity

侵蚀强度	平均侵蚀强度/(t·km^{-2}·a^{-1})
微 度	<1000
轻 度	1 000~2 500
中 度	2 500~5 000
强 烈	5 000~8 000
极强烈	8 000~15 000
剧 烈	>15 000

1.3.5　空间自相关模型

空间自相关即Moran's I指数,可用来分析地理事物或现象的某一属性在不同空间位置上的相关性,是对邻近单元位置属性值相似程度的定量描述[25-26]。使用全局和局部两种指标,全局指标用于探测整个研究区域的空间模式,使用单一的值来反映该区域的自相关程度。具体计算公式为

$$\text{global Moran's } I=\frac{N\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{J=1}^{N}W_{ij}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}(x_j-\bar{x})} \quad (15)$$

$$\text{local Moran's } I=\frac{(Y_i-Y)\sum_{j=1}^{N}W_{ij}(Y_j-\bar{Y})}{\sum_{j=1}^{N}W_{ij}(Y_j-\bar{Y})^2} \quad (16)$$

式中:global Moran's I为全局空间自相关指数,local Moran's I为局部空间自相关指数;N为研究区的空间网格单元数量;x_i,x_j分别为单元i和单元j的观测值;x为所有单元观测值的平均值;W_{ij}为空间单元i和j的权重矩阵。Moran's I的值介于−1~1,值等于0,表示结果不相关;值大于0,表示结果呈正相关,表示具有相似属性的对象聚集在一起;值小于0,表示结果呈负相关,表示具有相似属性的对象分布特征趋向于分散。局部自相关指数(LISA)聚类分析可视化结果中,Not表示结果不相关,高-高表示土壤侵蚀强度高值集聚区,高-低表示土壤侵蚀强度高值由低值围绕区,低-低表示土壤侵蚀强度低值集聚区,低-高表示土壤侵蚀强度低值由高值围绕区。

2　结果与分析

2.1　新疆2003—2023年土地利用类型变化特征

由土地利用类型构成(图1和表3)可以看出,裸地与草地始终占据主导地位,二者面积之和稳定维

持在全区总面积的90%以上。裸地主要分布于塔里木盆地和准噶尔盆地腹地2003年面积占68.34%，至2023年降至67.32%，减幅为1.48%。草地主要分布于天山、阿尔泰山及昆仑山及其过渡带，2003年占23.96%，至2023年降至22.99%，减幅为4.02%。2003—2023年耕地主要集中于天山北坡和西段伊犁河谷、喀什、阿克苏、和田、库尔勒等塔里木河沿线，由3.87%提升至5.40%，累计增加25 408.46 km²，增幅达39.40%，反映出农业现代化和绿洲开发力度的持续增强。

建设用地扩张最为迅速，比例由0.10%提升至0.33%，增幅高达244.94%，主要集中于乌鲁木齐市、天山北坡及南疆部分地区，充分体现了城镇化进程加速和基础设施建设投入增强的特点。生态用地差异化增长，部分类型保持稳定。林地面积由15 924.31 km²增至19 045.54 km²，增幅19.60%。水域面积表现出明显的阶段性波动特征，2003—2018年整体呈增长趋势，至2018年达到峰值后有所回落，2023年雪地、湿地和灌木用地面积变化相对较小，合计比例不足1%，总体保持稳定。

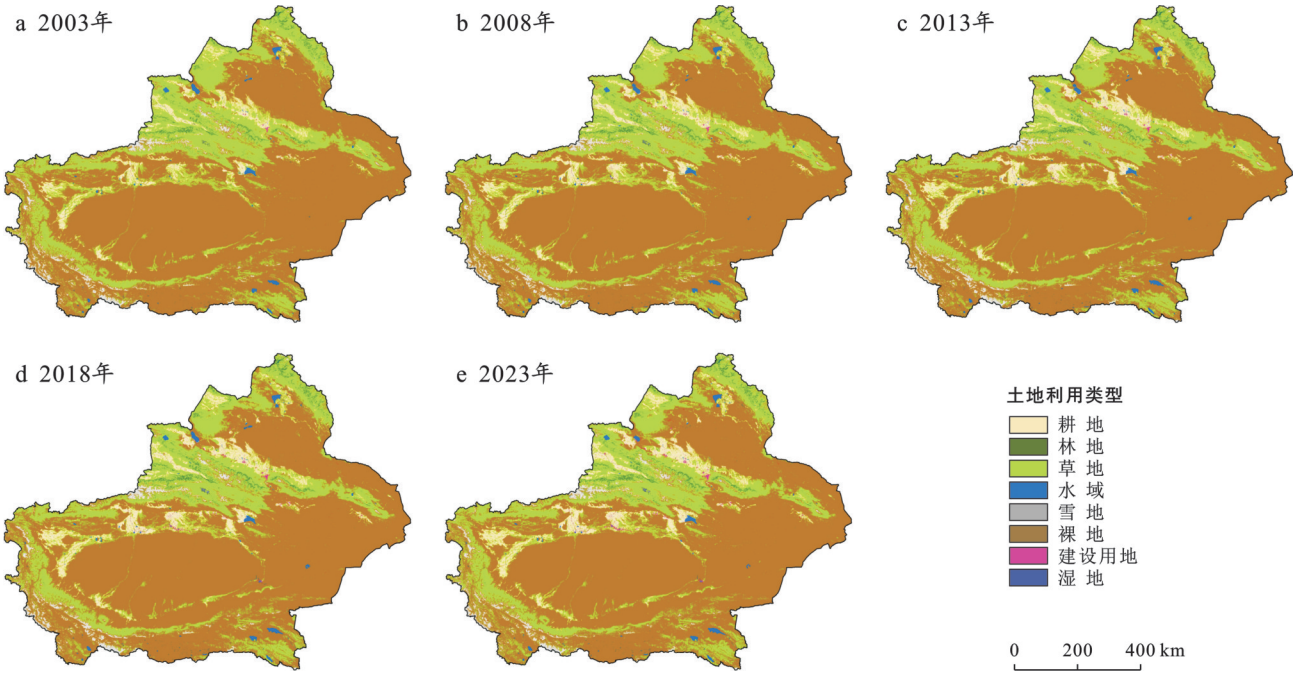


图1 新疆维吾尔自治区2003—2023年土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2023

表3 新疆维吾尔自治区2003—2023年土地利用类型面积及其比例

Table 3 Area and proportion of land use types in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2023

土地利用类型	2003年		2008年		2013年		2018年		2023年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
耕 地	64 478.81	3.87	72 795.53	4.37	85 352.75	5.13	87 796.85	5.28	89 887.27	5.40
林 地	15 924.31	0.96	17 398.69	1.05	17 942.52	1.08	18 467.84	1.11	19 045.54	1.14
草 地	398 879.11	23.96	401 702.37	24.13	389 869.59	23.42	384 767.98	23.16	382 841.23	22.99
水 域	9 061.56	0.54	9 317.66	0.56	9 744.16	0.59	10 740.41	0.65	9 485.02	0.57
雪 地	36 940.07	2.22	38 233.85	2.30	38 086.92	2.29	36 838.96	2.22	36 905.45	2.22
裸 地	1 137 726.48	68.34	1 122 278.66	67.41	1 119 766.61	67.26	1 117 801.01	67.28	1 120 840.01	67.32
建设用地	1 590.70	0.10	2 753.87	0.17	3 753.80	0.23	4 525.06	0.27	5 486.33	0.33
湿 地	298.96	0.02	419.36	0.03	383.64	0.02	551.89	0.03	406.09	0.02

2003—2023年新疆土地利用转移以裸地和草地之间的相互转换为主导特征，由图2可知，二者转移面积合计占总转移面积71.35%。裸地转出面积最大，主要转向草地和耕地，表明在生态修复工程和农业开发双重驱动下，部分裸地实现了有效利用或生态改善。草地主要转向裸地和耕地，反映出草地在农业

扩张压力和生态退化风险下的双向转换特征。耕地净增面积远大于转出面积,转入来源主要为裸地和草地,充分体现了绿洲农业持续扩张的趋势。建设用地主要来源于耕地和草地转入。林地和水域也表现出净增加趋势,主要来源于草地和裸地的转入。

2.2　新疆 2003—2023 年土壤水力侵蚀时空分布特征

基于 RUSLE 模型计算结果如图 3—4 所示,2003—2023 年新疆土壤侵蚀模数均值为 282.24 t/(km^2·a),整体处于微度侵蚀等级。从时序变化来看,土壤侵蚀强度呈现先波动上升后逐步减弱的演变趋势。2003—2013 年为侵蚀强度上升阶段,年均土壤侵蚀模数由 263.47 t/(km^2·a)增至 318.56 t/(km^2·a);2018—2023 年侵蚀强度明显下降,降至 247.93 t/(km^2·a),表明区域水土保持状况显著改善。从侵蚀等级分布来看,微度侵蚀面积比例由 2003 年的 90.46% 增至 2023 年的 95.63%,轻度侵蚀比例由 7.84% 降至 3.92%,中度及以上侵蚀面积比例持续缩减,至 2023 年强烈及以上等级侵蚀面积趋近于零,表明新疆土壤侵蚀总体呈改善趋势。

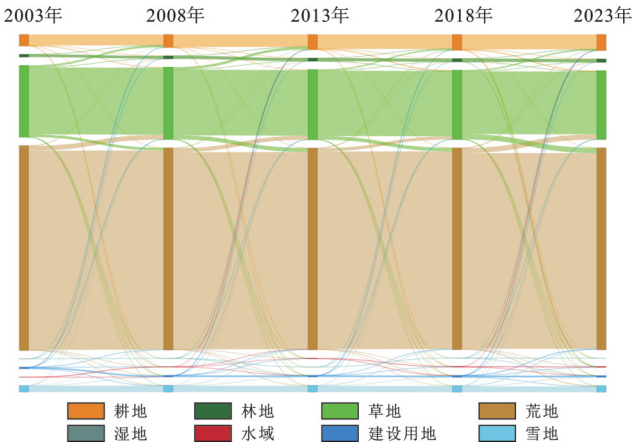


图 2　新疆维吾尔自治区 2003—2023 年土地利用转移桑基图

Fig.2　Sankey diagrams of land use transfer in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2023

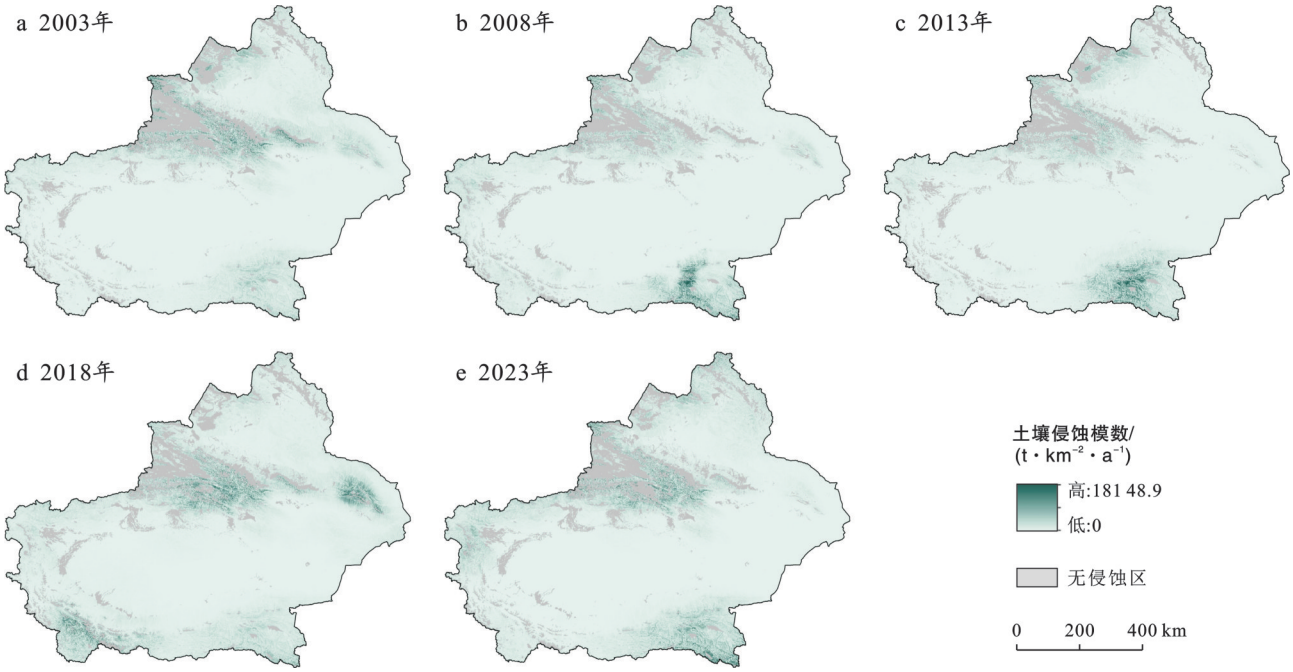


图 3　新疆维吾尔自治区 2003—2023 年土壤侵蚀模数分布

Fig.3　Distribution of soil erosion modulus in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2023

从空间格局来看,微度侵蚀始终占据主导地位(表 4),覆盖范围长期超过全疆总面积的 90%,轻度及以上强度侵蚀则呈零星分布,主要集中在绿洲外围、山前过渡带以及南疆局部区域。2003 年微度侵蚀覆盖 1.51×10^6 km^2(比例为 90.46%),轻度侵蚀(1.18×10^5 km^2)主要分布于和田地区、喀什地区,中度侵蚀(3.15×10^4 km^2)零星散布在喀什地区。2008 年微度侵蚀扩展至 1.56×10^6 km^2(比例 93.94%),轻度侵蚀缩减至 7.96×10^4 km^{2}并向阿克苏地区转移,南部和田地区皮山县的极强烈侵蚀(700 km^2)范围明显收窄。2013 年中度侵蚀扩张至 5.23×10^4 km^2,在巴音郭楞蒙古自治州南部出现局部扩张趋势,微度侵蚀小幅回落至 1.54×10^6 km^2(比例 92.29%)。2018 年轻度侵蚀反弹至 9.64×10^4 km^{2}并向伊犁哈萨克自治州分散,微度侵蚀继续收缩至 1.52×10^6 km^2(比例 91.42%)。2023 年微度侵蚀显著扩大至 1.59×10^6 km^2(比例 95.63%),仅在喀什地区、阿克苏地区残留 6 500 km^{2}轻度侵蚀,中高强度侵蚀面积趋近于零。

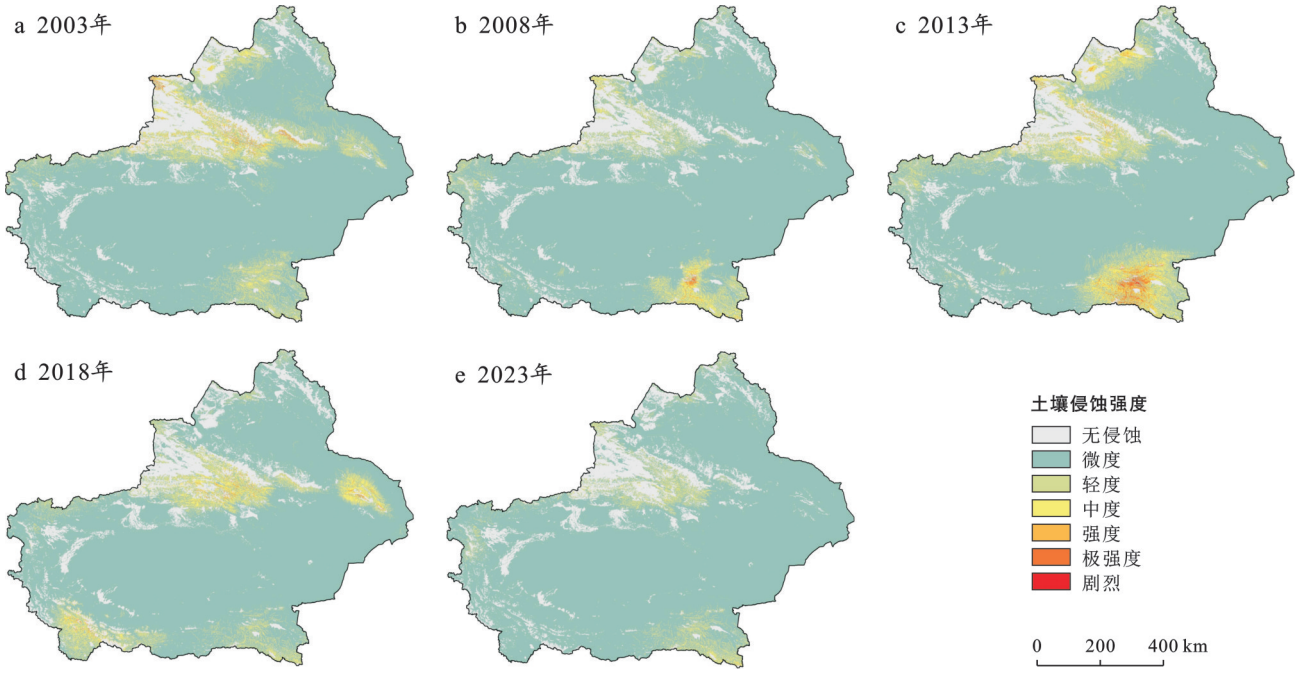


图 4 新疆维吾尔自治区 2003—2023 年土壤侵蚀强度分布

Fig.4 Distribution of soil erosion intensity in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2023

表 4 新疆维吾尔自治区土壤水力侵蚀强度面积及比例

Table 4 Area and proportion of water-induced soil erosion intensity in Xinjiang Uygur Autonomous Region

土壤侵蚀强度	2003年		2008年		2013年		2018年		2023年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
微度	1 506 130.81	90.46	1 564 156.12	93.95	1 536 611.05	92.29	1 522 135.57	91.43	1 592 174.58	95.63
轻度	117 604.93	7.06	79 636.91	4.78	57 257.45	3.44	96 394.65	5.79	65 349.86	3.90
中度	31 583.37	1.89	17 841.47	1.07	52 342.17	3.14	38 396.81	2.31	7 250.057	0.44
强度	7 876.23	0.47	2 506.06	0.15	17 741.15	1.07	7 342.87	0.44	125.49	0.01
极强	1 683.75	0.11	739.91	0.04	591.46	0.04	626.18	0.04	0	0
剧烈	20.92	—	19.61	—	356.71	0.02	3.92	—	0	0

由图 5 可知，2003—2023 年新疆土壤侵蚀空间聚集格局与“三山夹两盆”地貌格局高度耦合。土壤侵蚀高值集聚区（高-高聚集区），涵盖北部阿尔泰山南麓阿勒泰地区、西部天山山脉伊犁州及博州、南部昆仑山北麓阿克苏地区北部、喀什地区北部及和田地区等，多为坡度＞15°的山地陡峭径流充沛地带，叠加早期耕地扩张与植被破坏，2003—2013 年面积扩张 8.2%，2013 年后收缩 5.7%；土壤侵蚀低值集聚区（低-低聚集区）连片位于塔里木盆地腹地与准噶尔盆地中部极端干旱荒漠行政单元，涉及和田地区南部、阿克苏地区东部及昌吉州、哈密市等荒漠区域，20 a 来空间格局与强度高度稳定，仅沙漠边缘绿洲过渡带略有波动；土壤侵蚀低值由高值围绕与高值由低值围绕（高-低聚集区）的异常值域面积相对较小，零星分布于绿洲-山地过渡带及盆地-山地的交界，2018 年后天山北麓昌吉州、乌鲁木齐市米东区等绿洲边缘出现局部高-低聚集区，喀什绿洲区与荒漠交界处出现低-高聚集区。总体而言，新疆土壤侵蚀聚集格局，高值聚集区以山地为主，低值聚集区以盆地为主。

2.3 新疆土地利用变化对土壤水力侵蚀的影响

2003—2023 年，新疆土地利用结构发生了显著变化，主要表现为建设用地、耕地、林地、水域和湿地之间的相互转化。建设用地的扩展与水域、林地、湿地的增加相伴随，耕地和草地的分布也发生了较大变化，这些变化对土壤侵蚀强度的分布产生重要影响（图 6—9）。2003—2008 年建设用地转入水域的面积为 23 786.59 km²，占转化总面积的约 50%，水域转化后的土壤主要表现为微度侵蚀，比例接近 100%。建设用地转入林地的面积为 4.08 km²，占转化总面积的 0.01%，微度水土流失面积占 100%。湿地转化面积为 320.28 km²，占转化总面积的 0.7%，微度侵蚀占主导。在 2008—2013 年耕地与草地之间的转化较为

频繁,耕地转入林地的面积为1 759.51 km²,占转化总面积的15%,转化后区域的土壤侵蚀主要为微度侵蚀,侵蚀强度较低。耕地转入水域的面积为6.12 km²,比例为0.05%,轻度水土流失面积有所增加,但整体侵蚀强度较低。2013—2018年建设用地与耕地的扩展继续导致微度和轻度侵蚀面积的增加,尤其是在耕地转为林地的区域,微度侵蚀占主导,未出现大规模的中度及以上侵蚀。水域和林地的增加对土壤侵蚀有缓解作用。转化中,耕地转入水域的面积为9.62 km²,微度侵蚀比例约96%。2018—2023年建设用地的扩展仍在持续,微度侵蚀区域的比例为约94%,而水域、林地和湿地的增加继续抑制了中高强度土壤侵蚀的扩展,微度侵蚀比例接近95%,表现出较强的土壤保持效果。

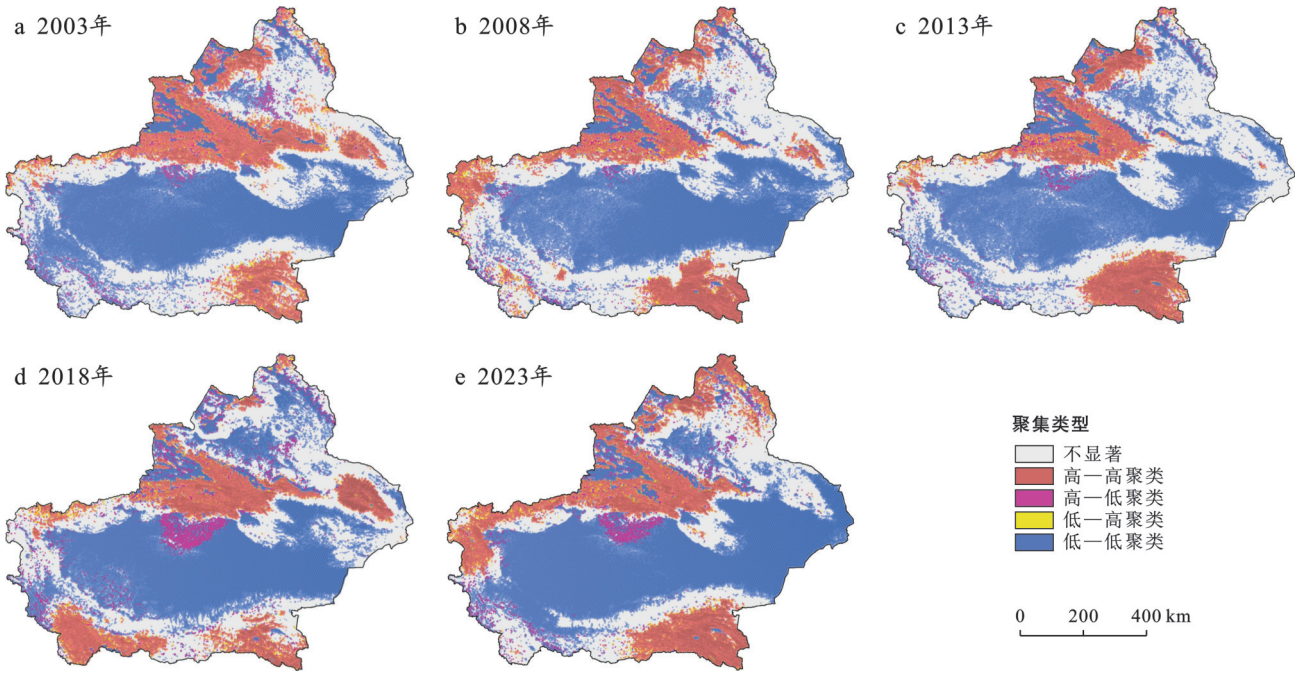


图5　新疆土壤水力侵蚀强度局部空间分析(LISA)

Fig.5　Local spatial analysis (LISA) of water-induced soil erosion intensity in Xinjiang Uygur Autonomous Region

3　讨　论

(1)自然地理背景约束下的新疆土壤水力侵蚀空间格局。新疆土壤水力侵蚀的空间分异格局在很大程度上受"三山夹两盆"地形结构与干旱-半干旱气候条件的共同制约[27-28]。山地坡度普遍较大,降水相对集中,径流侵蚀动力充足,土壤水力侵蚀高值长期汇聚于此;而塔里木盆地、准噶尔盆地中部、吐鲁番-哈密盆地东部等荒漠区年均降水量普遍低于50 mm,且地表植被稀疏,使其成为低侵蚀的主要区域。整体呈现"山地高侵蚀,盆地低侵蚀"的空间格局。2003—2023年新疆土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主,整体呈现"先升后降"的变化趋势,侵蚀强度的空间分异与地形起伏及区域土地利用分布高度吻合。这表明,在区域尺度上,自然地理背景仍是决定土壤侵蚀空间格局与演变上限的基础约束条件。

(2)土地利用变化对土壤水力侵蚀的响应机制。在干旱-半干旱自然背景约束下,土地利用类型通过影响地表植被覆盖度、土壤结构稳定性及抗蚀能力[29-30],直接调控土壤侵蚀的发生强度与空间分布。研究结果显示,不同地类对侵蚀的响应具有显著差异。耕地和水域因地表覆盖相对连续、结构稳定,整体维持较低侵蚀水平,各时期水土流失面积比例均较小,中度及以上侵蚀几乎未出现。林地与湿地同样表现出明显的侵蚀抑制效应,其面积增加有效降低了区域侵蚀强度,体现出较强的土壤保持功能。相较之下,裸地由于植被覆盖度低、土壤结构疏松,对降雨侵蚀和地表径流冲刷高度敏感[31],是区域土壤侵蚀的主要高风险地类。2008—2013年在人类活动扰动增强与自然条件叠加作用下,上述地类水土流失面积比例显著上升,并出现极强烈侵蚀,土地利用转化过程进一步揭示了植被恢复在调控土壤侵蚀中的关键作用。研究发现,建设用地或耕地向水域、林地和湿地转化后,土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主;其中,2008—2013年耕地转为林地面积达1 759.51 km²,对应区域侵蚀强度明显降低。这表明,通过提高地表覆盖度、增强土壤结构稳定性,可有效削弱侵蚀动力,是缓解干旱区土壤水力侵蚀的有效途径。

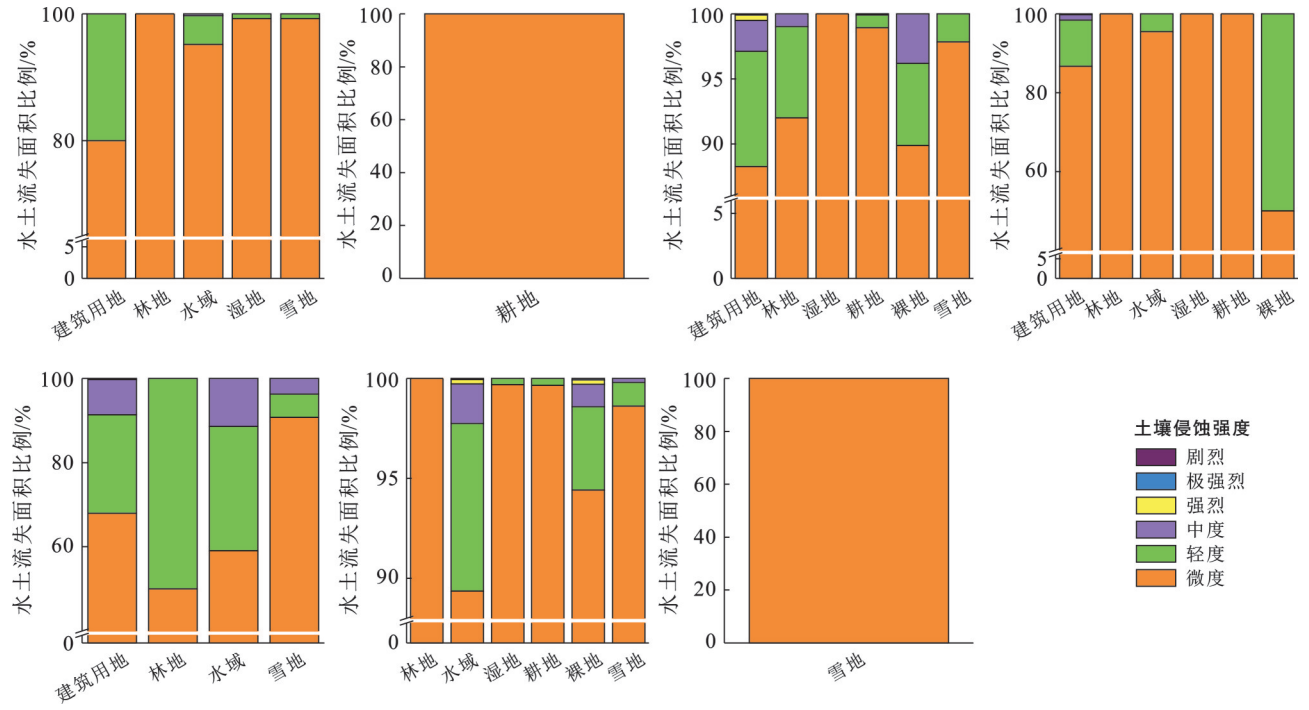


图 6 新疆维吾尔自治区 2003—2008 年转出-转入土地利用类型土壤侵蚀强度面积

Fig.6 Area of soil erosion intensity of transferred-out and transferred-in land use types in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2003 to 2008

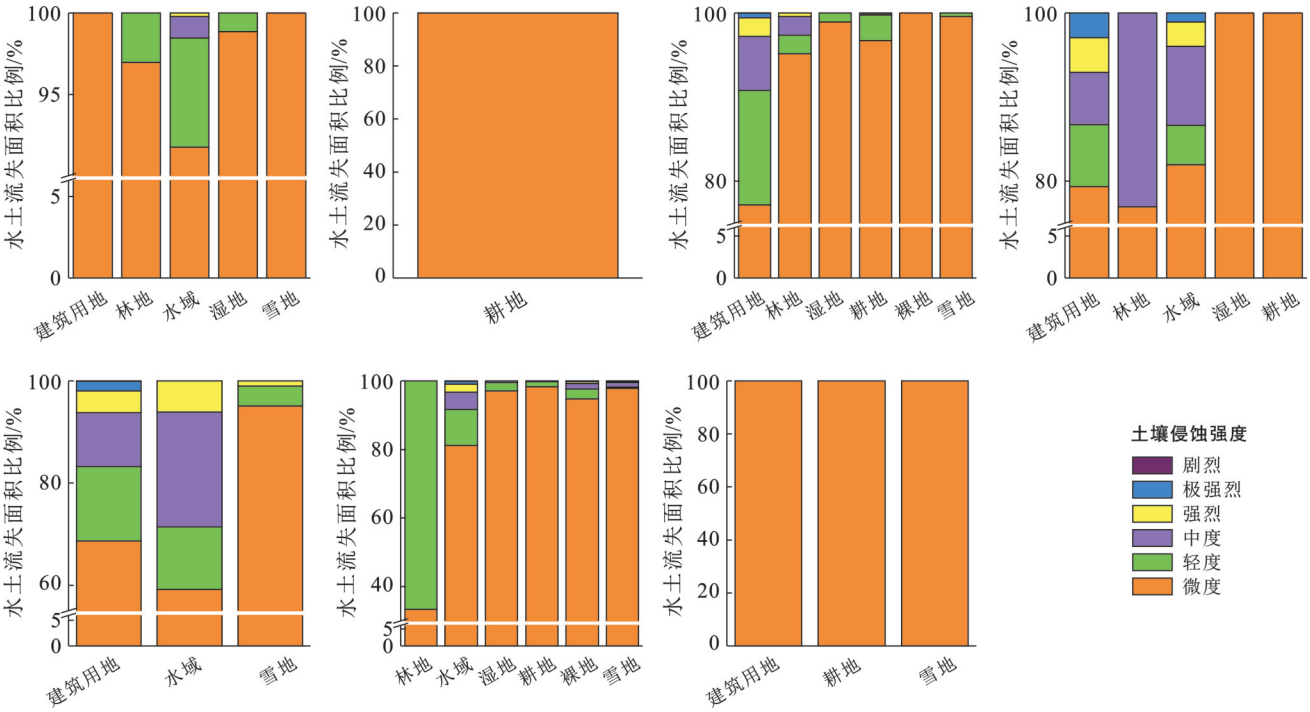


图 7 新疆维吾尔自治区 2008—2013 年转出-转入土地利用类型土壤侵蚀强度面积

Fig.7 Area of soil erosion intensity of transferred-out and transferred-in land use types in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2008 to 2013

（3）人类干预与生态治理下土壤水力侵蚀调控效应。在自然背景与土地利用类型差异共同作用下，人类活动通过政策引导干预，对新疆土壤侵蚀演变产生了显著调控效应。2003—2013 年，在粮食安全需求和农业开发驱动下，伊犁河谷耕地扩张、阿克苏等绿洲边缘植被破坏加剧，叠加局部自然扰动，使得区域侵蚀模数升至峰值 408.55 t/(km^2·a)，侵蚀高值集聚区扩展 8.2%，表明不合理开发活动会显著放大干旱区侵蚀风险。2013 年后，随着退耕还林还草、水土保持工程等生态治理措施持续推进，新疆土壤

侵蚀得到有效遏制。尤其是2003年后持续阶段性实施的退耕还林工程,以及2012年出台的《新疆实施〈土地管理法〉办法》对生态保护红线和用地约束有着明确要求,显著促进了林地与水域面积的增加,使侵蚀模数持续回落至2023年的161.9 t/(km²·a),中高强度侵蚀面积大幅收缩,高值聚集区减少5.7%。

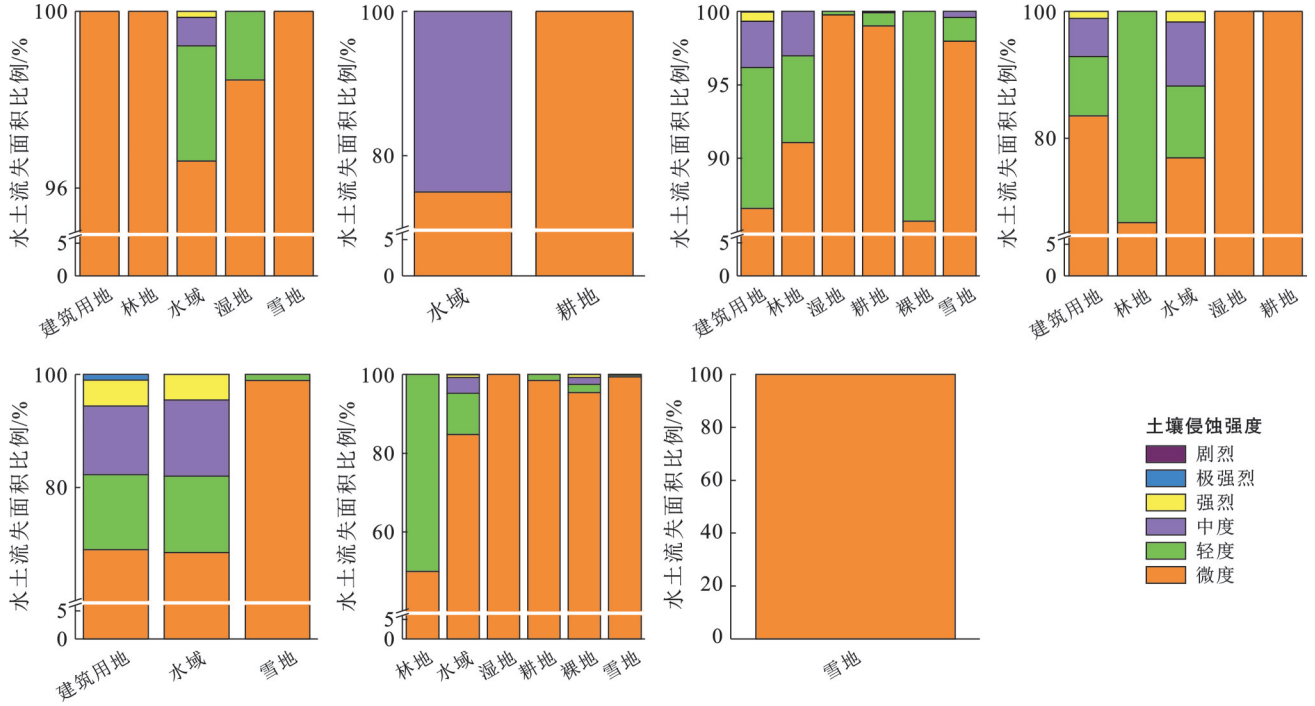


图8　新疆维吾尔自治区2013—2018年转出-转入土地利用类型土壤侵蚀强度面积

Fig.8　Area of soil erosion intensity of transferred-out and transferred-in land use types in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2013 to 2018

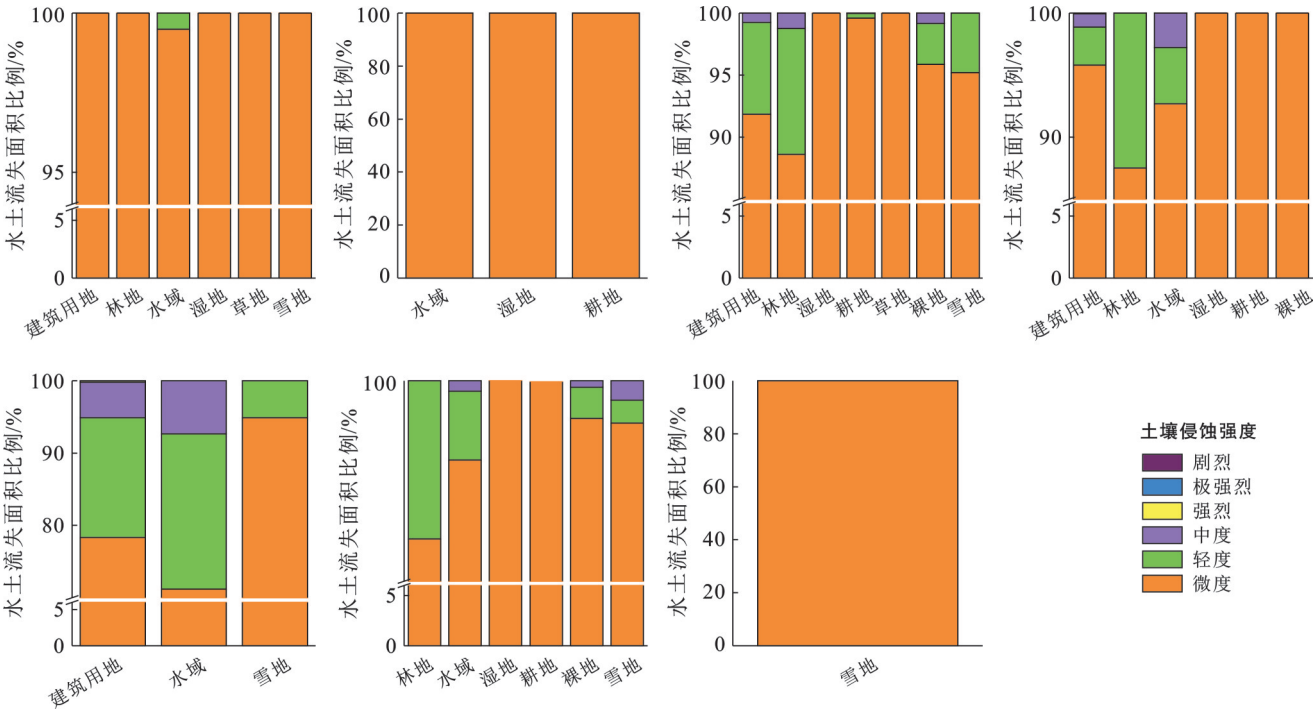


图9　新疆维吾尔自治区2018—2023年转出-转入土地利用类型土壤侵蚀强度面积

Fig.9　Area of soil erosion intensity of transferred-out and transferred-in land use types in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2018 to 2023

土地利用转化结果进一步揭示了政策调控的实际成效。在《新疆维吾尔自治区粮食安全保障条例》及农业生产、补贴激励政策推动下，耕地面积持续增加，但其侵蚀强度始终维持在较低水平，2018—2023年水土流失比例降至0.5%，且未出现中度及以上侵蚀，表明规范化耕作与配套管理并未显著加剧侵蚀风险。裸地的变化最能体现生态治理的侵蚀调控效果。2008—2023年裸地水土流失面积减少2 614.51 km^2，高强度侵蚀基本清零，这与草方格沙障固沙工程、梭梭等耐旱植被恢复措施密切相关。总体来看，尽管建设用地和耕地扩展在局部增加了微度和轻度侵蚀面积，但水域、林地和湿地在多项生态与土地管理政策引导下持续扩张，有效抑制了中高强度侵蚀的发生，显著提升了区域土壤保持功能。

此外，本研究在数据处理与模型参数化中采用了一些大区域尺度RUSLE模型应用的常规近似方法，虽不可避免存在一定局限，但总体合理可靠。多源数据统一重采样至1 000 m分辨率，在兼顾计算效率与区域尺度表达方面具有合理性。尽管该尺度难以反映局部地形与覆被细节，可能使LS，C，P因子在微度与轻度侵蚀区略有低估，但研究表明RUSLE在区域尺度仍能较好反映侵蚀空间分布格局，结果具有可靠性，可满足大尺度评价需求[32-34]。未来可引入更高分辨率遥感数据并结合实地观测数据，对RUSLE模型中的关键因子进行验证。进一步提升模型精度，更加精确地分析土地利用与土壤侵蚀的变化规律，为新疆水土保持精准治理提供更加可靠的科学支撑。

4 结 论

（1）2023年新疆裸地比例最大为67.32%，草地次之（占22.99%），耕地等其他用地比例均较低。2003—2023年新疆土地利用类型变化明显，建设用地增幅244.94%，林地分别约增19.60%；草地减幅约4.02%；裸地为首要地类，2023年比例达69.56%。

（2）2003—2023年新疆土壤侵蚀以微度及轻度侵蚀为主，比例达到95%左右，整体呈现“先升后降”的趋势。2003—2013年土壤侵蚀强度增加12.31%，2013—2023年经过有效治理下降16.51%；微度侵蚀比例由90.46%升至95.63%，高强度等级侵蚀则逐渐趋于零，生态治理措施在改善土壤侵蚀状况方面发挥积极作用。

（3）新疆土地利用类型转移对土壤侵蚀格局产生显著影响。2003—2023年建设用地主要通过转入水域实现扩张，转入面积达2.38×10^4 km^2，以微度侵蚀为主。耕地向林地转出面积约为1.76×10^3 km^2，微度侵蚀为主。建设用地、耕地扩展主要引起局部微度、轻度侵蚀变化，而水域、林地和湿地增加有效抑制中高强度侵蚀扩展，区域土壤保持能力整体增强。因此，不同区域应结合自身水土流失特征，采取具有针对性的综合治理措施。

参考文献（References）

[1] 段健，杨歌，王莹莹，等.年楚河流域陆地表层人类活动强度变化及其对生态环境质量的影响[J].生态学报，2026，46(6)：3160-3180.
Duan Jian, Yang Ge, Wang Yingying, et al. Impacts of terrestrial surface human activity intensity changes on ecological environment quality in the Nianchu River basin [J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(6): 3160-3180.

[2] 王新宇，么文卓.东北典型黑土区土地利用变化及土壤侵蚀空间格局研究：以嫩江市为例[J].测绘与空间地理信息，2025，48(S2)：83-86.
Wang Xinyu, Yao Wenzhuo. Study on spatial pattern of land use change and soil erosion in typical black soil region of northeast China: A case study of Nenjiang City [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2025, 48(S2): 83-86.

[3] 胡馨怡，肖作林，秦川，等.基于PLUS-InVEST模型的三峡库区土地利用变化与土壤侵蚀多情景预测[J].水土保持学报，2025，39(6)：106-117.
Hu Xinyi, Xiao Zuolin, Qin Chuan, et al. Multi-scenario prediction of land use changes and soil erosion in Three Gorges reservoir region based on PLUS-InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 106-117.

[4] 潘文，王强.土地利用方式和强度对土壤抗蚀性的影响述评[J].亚热带水土保持，2024，36(1)：44-46.
Pan Wen, Wang Qiang. Review on the impact of the land use pattern and the strength on the soil corrosion resistance [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2024, 36(1): 44-46.

[5] 庄永在，何光熊，喜文飞，等.基于RUSLE模型与多源数据的耕地土壤侵蚀时空演变评估：以金沙江干热河谷元谋县为例[J].中国水土保持科学，2025，23(6)：42-53.
Zhuang Yongzai, He Guangxiong, Xi Wenfei, et al. Spatiotemporal dynamics of cultivated land soil erosion in dry-hot valley ecosystems: An integrated assessment using RUSLE model and multi-source data [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(6): 42-53.

[6] 谢乐，侯鹏，刘亦晟.基于土壤流失方程的水土流失定量评估方法研究进展[J].环境生态学，2024，6(11)：1-10.
Xie Le, Hou Peng, Liu Yisheng. Research progress of quantitative evaluation methods of soil and water loss

based on soil loss equation [J]. Environmental Ecology, 2024,6(11):1-10.

[7] 熊茂秋,刘晓煌,张雪辉,等.基于RUSLE模型的塔里木河流域上游土壤保持时空变化研究[J].地质通报,2024,43(4):641-650.
Xiong Maoqiu, Liu Xiaohuang, Zhang Xuehui, et al. Spatio-temporal variation of soil conservation in the upper reaches of the Tarim River basin based on RUSLE model [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(4): 641-650.

[8] Yan Zhaojin, Mao Fulin, He Rong, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of soil erosion in the urban agglomeration on the northern slopes of the Tianshan Mountains in China [J]. Geocarto International, 2025,40(1):2521834.

[9] 岳笑,张良侠,周德成,等.干旱-半干旱典型生态脆弱区生态脆弱性时空演变及驱动因子分析[J].环境生态学,2023,5(6):1-9.
Yue Xiao, Zhang Liangxia, Zhou Decheng, et al. Spatial-temporal variations and driving forces of the ecological vulnerability in the typical arid/semi-arid ecologically vulnerable areas [J]. Environmental Ecology, 2023, 5(6): 1-9.

[10] 陈顺礼.新疆水土流失现状及变化趋势分析[J].中国水土保持科学,2013,11(S1):93-97.
Chen Shunli. Analysis of soil loss present situation and variation trend in Xinjiang [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013,11(S1):93-97.

[11] 王雅琴.气候变化对新疆风蚀气候侵蚀力的影响研究[D].新疆 石河子:石河子大学,2022.
Wang Yaqin. Impact of climate change on wind erosion climatic erosivity in Xinjiang [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2022.

[12] 贺海燕,李小霞,魏玮.中国土壤水力侵蚀的影响因素研究[J].农业灾害研究,2022,12(6):152-154.
He Haiyan, Li Xiaoxia, Wei Wei. Study on influencing factors of soil water erosion in China [J]. Journal of Agricultural Disaster Research, 2022, 12(6): 152-154.

[13] 梁靓.变化环境下西北干旱区土壤侵蚀演变及预测研究[D].甘肃 兰州:兰州理工大学,2024.
Liang Liang. Study on soil erosion evolution and prediction in arid area of northwest China under changing environment [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University of Technology, 2024.

[14] 李娜,王新军,卢刚,等.2000—2017年天山北坡西白杨沟流域土壤侵蚀时空变化分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):73-79.
Li Na, Wang Xinjun, Lu Gang, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion in Xibaiyanggou watershed on the northern slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2017 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(3):73-79.

[15] 乔雨宁,任婧宇,吴睿,等.新疆塔里木河流域水土流失动态变化分析[J].中国水土保持,2025(5):66-72.
Qiao Yuning, Ren Jingyu, Wu Rui, et al. Dynamic change of soil erosion and water loss in the Tarim River basin in Xinjiang [J]. Soil and Water Conservation in China, 2025(5):66-72.

[16] 张晓敏,张东梅,王莉,等.降雨、积雪以及土地利用复合影响下的额尔齐斯河流域土壤侵蚀分析[J].水土保持学报,2022,36(5):104-111.
Zhang Xiaomin, Zhang Dongmei, Wang Li, et al. Soil erosion analysis in the Irtysh River basin under the combined effects of rainfall, snow cover and land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 104-111.

[17] 姚俊强,李漠岩,迪丽努尔·托列吾别克,等.不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J].干旱区研究,2022,39(2):333-346.
Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961—2019 [J]. Arid Zone Research, 2022,39(2):333-346.

[18] 张志浩,何宝忠,宋雅宁,等.基于SD-PLUS-InVEST的新疆土地利用及生境质量多情景分析[J].环境科学与技术,2025,48(3):10-22.
Zhang Zhihao, He Baozhong, Song Yaning, et al. Multi-scenario analysis of land-use and habitat quality in Xinjiang based on SD-PLUS-InVEST [J]. Environmental Science & Technology, 2025,48(3):10-22.

[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 Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):105-110.

[21] 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 and Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.

[22] 陈朝良,赵广举,穆兴民,等.基于RUSLE模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J].水土保持学报,2021,35(4):73-79.

Chen Chaoliang, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui watershed based on RUSLE model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):73-79.

[23] 何源.窟野河流域土壤侵蚀时空特征及动态评价[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2025.
He Yuan. Spatiotemporal characteristics and trend prediction of soil erosion in Kuye River basin [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.

[24] 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.

[25] 张良玉,李兴阳,王志超,等.基于Moran's *I*指数的京津冀地区$PM_{2.5}$空间自相关分析[J].四川环境,2021,40(2):52-59.
Zhang Liangyu, Li Xingyang, Wang Zhichao, et al. Spatial autocorrelation analysis of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on Moran's *I* index [J]. Sichuan Environment, 2021,40(2):52-59.

[26] 陈彦光.基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J].地理研究,2009,28(6):1449-1463.
Chen Yanguang. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics [J]. Geographical Research, 2009,28(6):1449-1463.

[27] 黄露,杜毅倩,杨秀春.新疆退牧还草工程区草地生态恢复效果评价[J/OL].(2025-12-19).草地学报,1-22. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.s.20251218.1645.004.
Huang Lu, Du Yiqian, Yang Xiuchun. Evaluation of grassland ecological restoration effects in the grassland restoration project areas of Xinjiang [J/OL]. (2025-12-19). Acta Agrestia Sinica, 2025: 1-22. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.s.20251218.1645.004.

[28] 王颢霖,焦菊英,安韶山,等.新疆天山东段南北坡土壤侵蚀调查[J].水土保持通报,2019,39(4):306-313.
Wang Haolin, Jiao Juying, An Shaoshan, et al. Investigation on soil erosion in north and south slopes of eastern Tianshan Mountain in Xinjiang Wei Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):306-313.

[29] 高杨,吕宁,薛重生,等.不同区域土地利用与土壤侵蚀空间关系研究[J].中国水土保持,2006(11):21-23.
Gao Yang, Lü Ning, Xue Chongsheng, et al. Study on spatial relationship of land use and soil erosion of different regions [J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(11):21-23.

[30] 李益敏,朱军.基于GIS的区域土壤侵蚀敏感性评价:以怒江州为例[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(1):98-106.
Li Yimin, Zhu Jun. An assessment on toregional soil erosion sensitivity based on GIS: Taking Nujiang Prefecture as an area of study [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2017,39(1):98-106.

[31] 邓祥征,刘艺杰,刘禹含.黄河流域土壤侵蚀的气候-植被阈值机制及时序响应特征[J].人民黄河,2025,47(9):77-84.
Deng Xiangzheng, Liu Yijie, Liu Yuhan. Climate-vegetation threshold mechanism and temporal response characteristics of soil erosion in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2025,47(9):77-84.

[32] 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 Jialei, Sun Ranhao, Xiong Muqi, et al. Spatiotemporal patterns of soil water erosion in China based on the RUSLE model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3473-3485.

[33] 张启旺,安俊珍,王霞,等.中国土壤侵蚀相关模型研究进展[J].中国水土保持,2014(1):43-46,69.
Zhang Qiwang, An Junzhen, Wang Xia, et al. Research progress of soil erosion related models in China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(1): 43-46, 69.

[34] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017,8(1):2013.