

乔荣荣,韩艳,季树新,等.基于地形指数的砒砂岩黄土区土壤侵蚀分析[J].中国沙漠,2021,41(5):175-182.

基于地形指数的砒砂岩黄土区土壤侵蚀分析

乔荣荣¹,韩艳²,季树新¹,董春媛¹,王傲洁¹,常学礼¹

(1.鲁东大学 资源与环境工程学院,山东 烟台 264025; 2.潍坊中学,山东 潍坊 261031)

摘要:地形是土壤侵蚀进程的重要控制因子,在土壤侵蚀评价中发挥着重要作用。基于地形起伏表达构建了地形指数,结合降雨侵蚀力和植被盖度等建立了基于地形指数的土壤侵蚀方程,并分析了内蒙古自治区鄂尔多斯市北部十大孔兑砒砂岩黄土区1985—2018年土壤侵蚀时空变化特征。结果表明:(1)研究区多年土壤侵蚀模数整体有下降趋势但变化差异不显著($P>0.05$),多年平均侵蚀模数为 $22.34\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1985年土壤侵蚀模数最大,2000年土壤侵蚀模数最小,1985—2000年呈下降趋势,2000—2018年呈上升趋势;(2)多年平均土壤侵蚀面积为 $2\,956.07\text{ km}^2$,1985年土壤侵蚀面积最大,为 $4\,047.14\text{ km}^2$,占总面积比例83%;2000年土壤侵蚀面积最小,为 $2\,153.67\text{ km}^2$,占比44%。研究区1985—2000年以轻度、中度侵蚀强度类型为主,2000—2018年以微度、轻度侵蚀类型为主;(3)多年土壤侵蚀空间分布格局基本一致,土壤侵蚀综合指数由西至东增加,总体上呈现为东部侵蚀大于西部的特点,母哈尔沟土壤侵蚀综合指数最大,毛卜拉孔兑最小;(4)地形指数土壤侵蚀方程与通用土壤流失方程在土壤侵蚀模数和土壤侵蚀面积估算上均无显著差异($P>0.05$)。

关键词:通用土壤流失方程;地形指数;土壤侵蚀综合指数;砒砂岩黄土区

文章编号:1000-694X(2021)05-175-08

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00053

中图分类号:S157

文献标志码:A

0 引言

地形是影响区域土壤侵蚀的关键因子^[1-2],在所有土壤侵蚀方程中作为关键因子参与计算^[3-9]。如基于经验的通用土壤流失方程(USLE, Universal Soil Loss Equation)、修正通用土壤流失方程(RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation)等^[3-6]。Pana-gos等^[10]基于RUSLE进行了欧洲土壤侵蚀评价,得到欧洲易受侵蚀土地平均土壤流失率为 $2.46\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。Roy^[11]结合USLE与GIS技术计算的印度伊尔加流域年均土壤侵蚀量为 $4.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究者基于USLE并结合中国土壤侵蚀实际特点,分别建立了小尺度坡面土壤流失方程^[12]、大尺度中国土壤流失方程(CSLE, Chinese Soil Loss Equation)^[13]等,与USLE、RUSLE一起被广泛应用^[14-16]。潘美慧等^[9]基于USLE估算的东江流域年均土壤侵蚀总量为 $16.2\times 10^8\text{ t}$;牛丽楠等^[14]利用RUSLE进行了六盘水市1990—2015年土壤侵蚀时空特征研究,

该区多年以微度和中度侵蚀为主;陈锐银等^[15]应用CSLE计算了四川省省级水土流失重点防治区土壤侵蚀状况,发现研究区2018年水土流失面积占比27.16%,且区内土壤侵蚀差异明显。

从上述方程所用参数特征来看包括了二类。一类为降雨侵蚀力、坡度坡长、植被覆盖等可通过气象站、地形图数据和遥感数据等重复检查的客观因子;另一类为土壤可蚀性、水土保持措施因子等基于小区实验的经验因子。后一类参数因研究地域参数值和范围具有不确定性,因此后续研究不断提出了基于实际应用区的因子修正计算方法^[16-21]。但是,这些方法存在的共性是对地形因子采用分级计算,导致了客观上连续的地形特征被分级赋值表达^[10-11,13,15],使各种方程中涉及的地形参数赋值受到影响,进而影响对区域水土侵蚀过程机理判断。针对这一问题,本文拟在砒砂岩黄土区,引入具有表达坡度、坡长综合属性的地形指数(T)替代USLE中的坡长因子(L)和坡度因子(S),分析砒砂岩黄土区

收稿日期:2021-03-25; 改回日期:2021-04-27

资助项目:国家自然科学基金项目(41271193);内蒙古自治区“十三五”水利重大专项(NSK2017-M2)

作者简介:乔荣荣(1995—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事区域环境遥感研究。E-mail: rongrongqiao@126.com

通信作者:常学礼(E-mail: xlchang@126.com)

土壤水力侵蚀变化趋势,同时与原USLE计算结果比较,对 T 因子代替 L 、 S 因子的可行性进行分析,为土壤水力侵蚀计算提供一种地形贡献连续性表达的计算方法。

1 研究区概况

十大孔兑位于内蒙古自治区鄂尔多斯市北部,是黄河内蒙古段十条一级支流总称,自西向东依次为毛卜拉孔兑、卜尔嘎色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母哈尔沟、东柳沟、呼斯太

河。十大孔兑上游(南部)为砒砂岩黄土区、中游经库布齐风沙区、下游流经北部平原区汇入黄河。研究区位于十大孔兑南部(图1),行政区域上隶属于鄂尔多斯市达拉特旗、杭锦旗、东胜区、准格尔旗。面积约为0.49万 km^2 ,地理位置为 $39^{\circ}50'—40^{\circ}10'N$ 、 $108^{\circ}45'—111^{\circ}01'E$ 。地势西高东低,海拔1082—1648 m;气候属温带大陆性气候,降水集中于夏季,多年平均降水量从西北到东南变化于200—400 mm。该区砒砂岩、黄土、风沙土广泛分布,沟壑纵横,植被稀疏,水土流失严重。

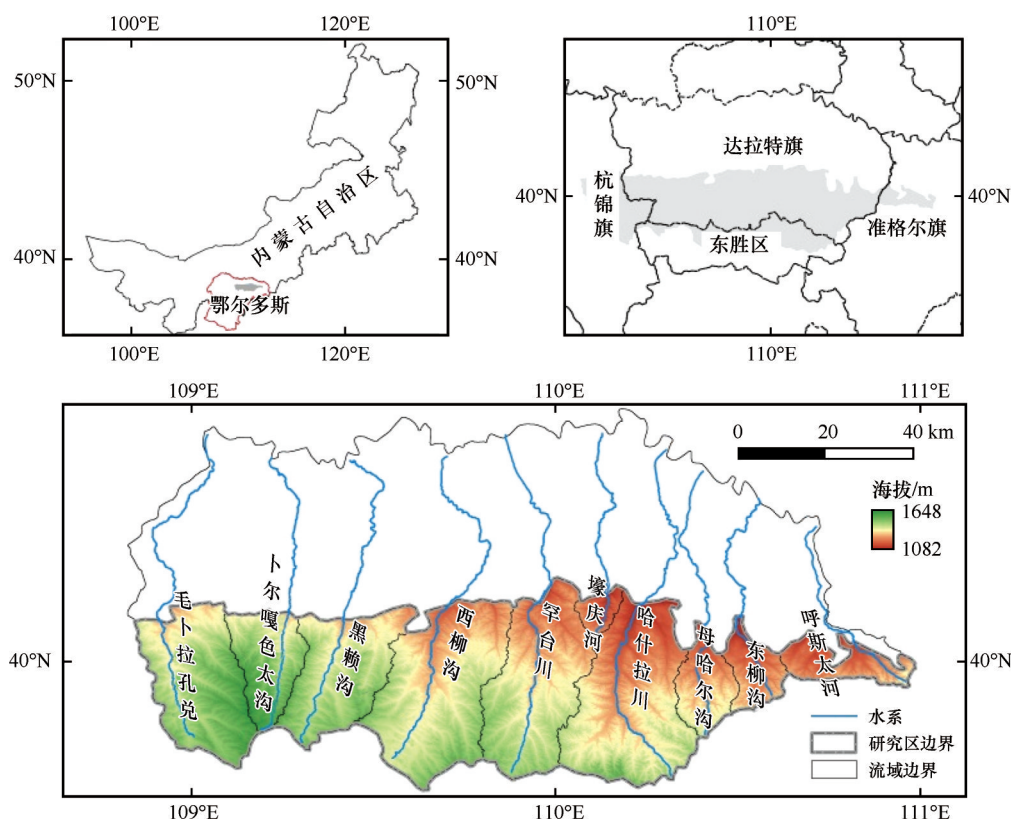


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the studied area

2 数据与方法

2.1 数据来源

GDDEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m。遥感数据为1985—2018年Landsat影像,下载自美国地质调查局网站(<http://www.usgs.gov>),空间分辨率为30 m。降水数据源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和研究区各旗县气象站逐日降水数据,时间为1985—2018年。

2.2 研究方法

2.2.1 地形指数土壤侵蚀评价方程(Terrain Soil Loss Equation, TSLE)

$$A = R \times K \times T \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为土壤流失量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。 K 为土壤可蚀性因子($\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$),依据圪坨店国家水土保持监测站提供的实测数据和水利部最新标准水土保持动态监测技术规定(办水保[2018]189号)计算得到。

T 为地形指数因子(无量纲)

$$T = ABS(DEM_i - DEM_{mean8 \times 8}) \quad (2)$$

式中: DEM_i 为研究区内任一栅格高程值; $DEM_{mean8 \times 8}$ 为研究区限定平均高程。基于DEM数据采用 8×8 栅格分析窗口进行邻域分析,得到研究区平均高程,将地形指数定义为原高程与平均高程差值的绝对值,得到基于每个栅格的起伏度。

P 为水土保持措施因子(依据[2018]189号文件附中附表和研究区水保措施图赋值)。 C 为植被覆盖与管理因子,通过Landsat计算得NDVI(归一化植被指数,空间分辨率30 m),基于野外实测数据构建模型反演植被盖度获得(图2)。

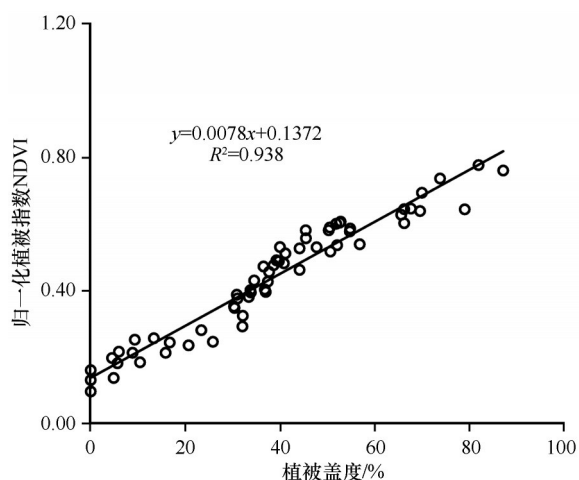


图2 NDVI与植被盖度关系

Fig.2 Relationship between NDVI and vegetation coverage

使用美国ASD公司的FieldSpec HandHeld手持便携式光谱仪(波长325—1 075 nm)进行植被光谱测定。测定时探头垂直向下,视场角为 25° ,与实测目标地物距离为0.67 m,对应地面样本为直径30 cm样圆。分别对不同级别盖度的植被光谱进行测定,每次测定重复5次,并对此时植被覆盖进行遮光拍照(剔除阴影干扰)并进行盖度值解译。光谱数据处理利用ViewSpec Pro软件,经积分计算后分别导出与Landsat红光、近红外对应波段并分别计算NDVI。为减少太阳辐照度的影响,选择的天气状况良好,晴朗无云,风力较小,太阳光强度充足并稳定的时段,每10—15 min用白板进行校正,野外光谱测量的时间为10:00—15:00。最终所得Landsat NDVI与植被盖度关系如图2所示。

2.2.2 通用土壤流失方程USLE

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (3)$$

L 和 S 计算公式^[22]为:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (4)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 为坡长因子; S 为坡度因子; λ 为坡长(m); θ 为从DEM数据中提取的坡度($^\circ$); m 为模型参数。

2.3 分类与分析方法

2.3.1 土壤侵蚀强度分级

根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》SL190—2007^[23],将研究区土壤侵蚀分为微度侵蚀($< 1\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、轻度侵蚀($1\,000—2\,500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中度侵蚀($2\,500—5\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、强烈侵蚀($5\,000—8\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、极强烈侵蚀($8\,000—15\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、剧烈侵蚀($> 15\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)共6级,其中微度侵蚀不列入土壤侵蚀面积。

2.3.2 空间侵蚀重心计算

为了分析土壤侵蚀空间分布格局,通过重心统计模型^[24]统计各孔兑土壤侵蚀重心。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (7)$$

式中: \bar{X} 表示孔兑土壤侵蚀分布重心的经度; M_i 表示第 i 级(i 取1,2,3,4,5,6)土壤侵蚀面积; X_i 分别表示十大孔兑南部砒砂岩黄土各孔兑水土流失区中心经度坐标(WGS84)。

2.3.3 空间土壤侵蚀评价

采用土壤侵蚀综合指数表征区域侵蚀强度,以实现土壤侵蚀空间评价^[25]。

$$INDEX_j = \sum_{i=1}^n W_i A_i \quad (8)$$

式中: $INDEX_j$ 为某年土壤侵蚀综合指数; W_i 为第 i 级土壤侵蚀强度等级权重分值; A_i 为第 i 级土壤侵蚀强度面积的比重, $i=6$ 。根据土壤侵蚀分级标准值比重,分别对土壤侵蚀微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀赋权重值为0、3、8、16、25、48。土壤侵蚀综合指数越大,土壤侵蚀越严重。

显著性检验采用 F 检验,置信度为95%, $P < 0.05$ 为显著, $P > 0.05$ 不显著。

3 结果与分析

3.1 侵蚀模数变化趋势

基于TSLE得十大孔兑南部砒砂岩黄土区1985—2018年土壤侵蚀模数为 $22.34 \pm 10.65 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2000年土壤侵蚀模数最小,为 $11.18 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;1985年土壤侵蚀模数最大,为 $43.13 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。时间尺度上表现出明显的分段式波动变化,1985—2018年土壤侵蚀模数整体表现下降趋势($P < 0.05$,图3),2018年土壤侵蚀模数较1985年降低了50.73%。其中1985—2000年土壤侵蚀模数呈下降趋势,但变化差异不显著($P > 0.05$),该时段各年值均大于研究期间总体平均值;2000—2018年土壤侵蚀模数变化呈增加趋势且变化差异性不显著($P > 0.05$),该时段各年值均小于研究期间总体平均值。

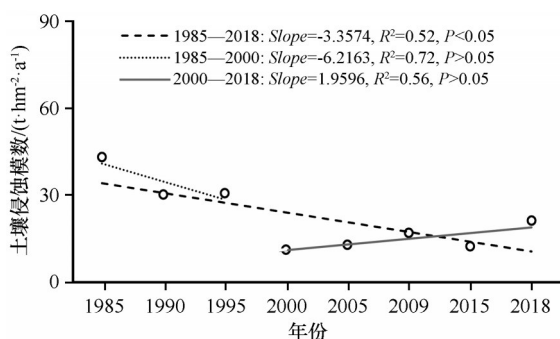


图3 1985—2018年土壤侵蚀模数

Fig.3 Soil erosion modulus of 1985–2018

1985—2018年土壤侵蚀面积表现为波动式下降趋势($P < 0.05$,图4)。多年平均侵蚀面积为 2956.07 km^2 。其中,1985年土壤侵蚀面积最大,为 4047.14 km^2 ,占总面积比例83%;2000年土壤侵蚀面积最小,为 2153.67 km^2 ,占总面积比例44%。研究区多年平均土壤侵蚀强度以微度侵蚀和轻度侵

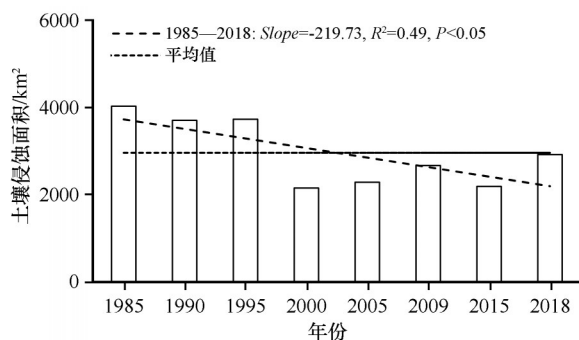


图4 1985—2018年土壤侵蚀面积

Fig.4 Soil erosion area of 1985–2018

蚀为主,微度侵蚀面积 1892.68 km^2 ,轻度侵蚀面积为 1446.89 km^2 ,所占总面积比例依次为39.0%、29.8%。其中2000年之前(1985、1990、1995年)以轻度、中度侵蚀强度为主,2000年及之后(2000、2005、2009、2015、2018年)以微度和轻度侵蚀类型为主(图5)。

就不同侵蚀强度级别年际变化趋势结果来看:微度侵蚀面积表现为增加趋势($P < 0.05$),增幅为133.8%;轻度侵蚀为增加趋势且变化差异性不显著($P > 0.05$),增幅为25.5%;中度、强烈和剧烈侵蚀为减小趋势但变化差异性不显著($P > 0.05$),降幅依次为21.6%、55.8%、82.9%;极强烈侵蚀表现为减小趋势($P < 0.05$),降幅为98.0%

3.2 侵蚀强度空间分异

研究区土壤侵蚀强度分布具有较强的空间异质性,但多年土壤侵蚀分布格局基本一致,土壤侵蚀综合指数由西至东增加,土壤侵蚀总体上表现为东部大于西部的特点(图6)。就多年平均土壤侵蚀综合指数来看,位于东部的母哈尔沟(土壤侵蚀重心经度, 110.36°E),土壤侵蚀综合指数最大为6.10,土壤侵蚀最为严重,土壤侵蚀面积 156.83 km^2 ,占该流域面积比68.4%;位于西部的毛卜拉孔兑土壤侵蚀综合指数为3.44,土壤侵蚀最轻,土壤侵蚀面积 349.27 km^2 ,占流域面积比为52.5%。除此之外卜尔嘎色太沟(109.18°E)、罕台川(109.91°E)和哈什拉川(110.16°E)土壤侵蚀综合指数皆大于平均土壤侵蚀综合指数值(4.64),黑赖沟(109.38°E)、西柳沟(109.65°E)、壕庆河(110.09°E)、东柳沟(110.50°E)和呼斯太河(110.74°E)土壤侵蚀综合指数小于平均土壤侵蚀综合指数。

4 讨论

水土流失是复杂的生态水文过程,土壤侵蚀状况则是各因素综合作用的结果。地形既是影响土壤侵蚀强度的重要控制因子,也是影响其他因子(如降雨侵蚀力)分布格局的重要因素^[26-27]。本文提出综合反映坡度坡长的地形指数,并基于地形指数建立土壤侵蚀方程实现了对砒砂岩黄土区土壤侵蚀特征的快速评价。研究区1985—2018土壤侵蚀模数和面积表现为下降趋势且变化差异性显著,其中1985—2000年表现为下降趋势,主要原因是20世纪80年代以来该区开始实行的水土保持工程治

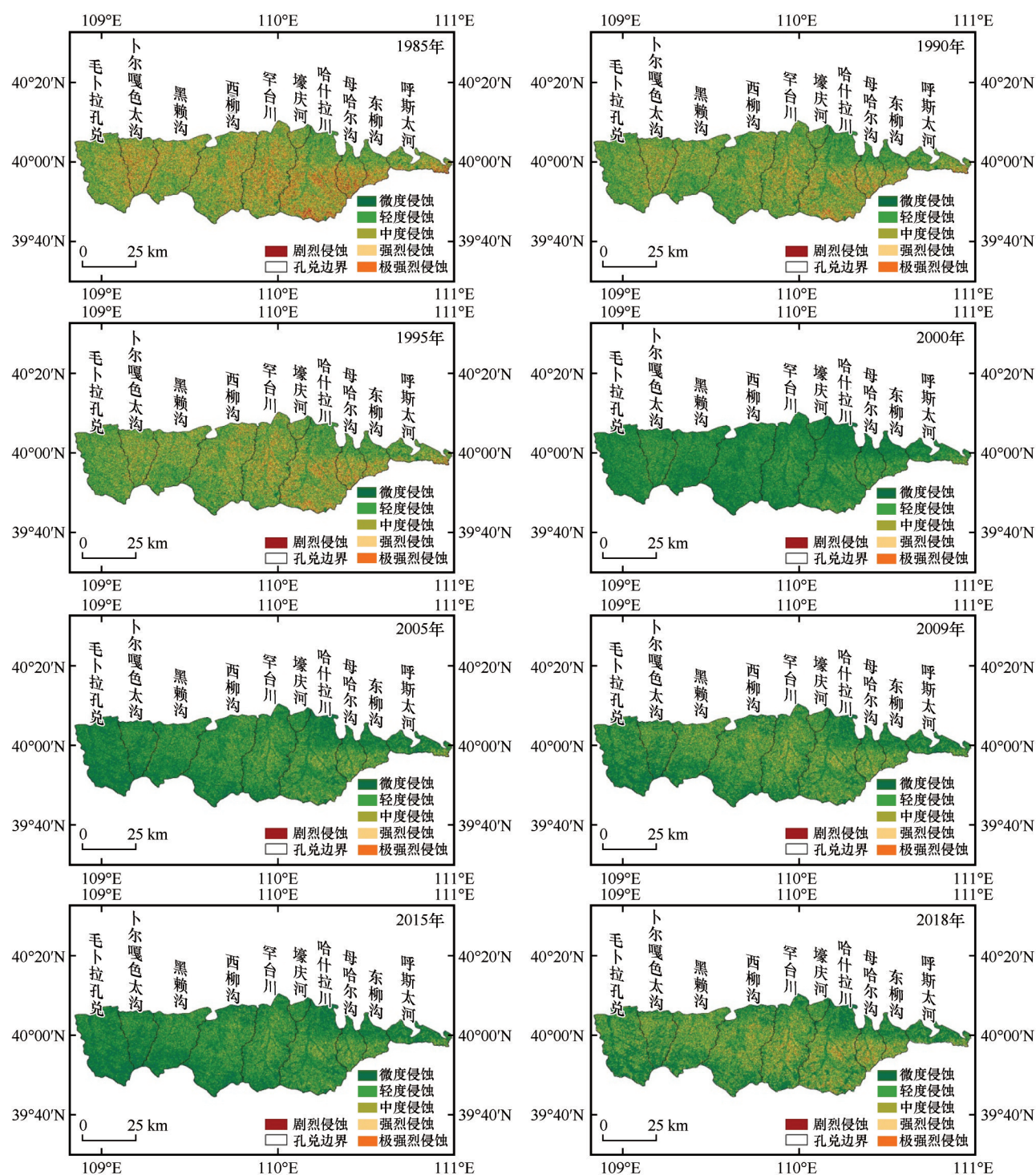


图5 1985—2018各年份土壤侵蚀状况

Fig.5 Yearly soil erosion status of 1985–2018

理,使得土壤侵蚀状况逐年改善;而2000—2018年土壤侵蚀模数表现为增加趋势,但整体水平明显低于前一时期(图4),原因是该研究时段内2009年和2018年降雨量明显偏大,而土壤侵蚀模数的增加与年际降雨变化特征具有一致性^[28],从而导致该时段在较低水平上呈增加趋势。

为了检验基于地形指数的土壤侵蚀评价公式结果的可信度,将其与USLE 2000、2005、2009、2015年共4年所得结果进行比较分析。

就研究区土壤侵蚀模数总体比较来看,二者结果均为随时间呈波动式增加趋势变化差异不显著($P_{\text{TSLE}}=0.67$, $P_{\text{USLE}}=0.79$),且变化形态一致(图7)。

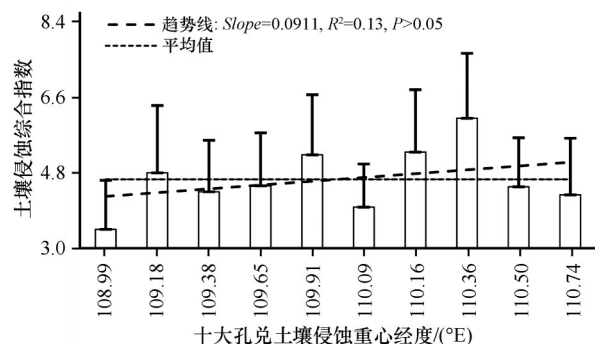


图6 多年平均土壤侵蚀综合指数经向变化

Fig.6 Multi-year average comprehensive index of soil erosion

TSLE 所得结果显示,研究区在研究时段土壤侵蚀模数 $11.18\text{--}16.97\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; USLE 结果在 $12.84\text{--}19.61\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。总体上二者所得4年土壤侵蚀模数差异不显著($P=0.40$)。

从多年土壤侵蚀面积来看,根据 TSLE 与 USLE 分别估算研究区2000、2005、2009、2015年土壤侵蚀

面积随时间变化均呈增加趋势但变化差异不显著($P_{\text{TSLE}}=0.81, P_{\text{USLE}}=0.96$,图7)。TSLE 结果显示研究期间土壤侵蚀面积 $2\,146.96\text{--}2\,665.31\text{ km}^2$,多年平均侵蚀面积 $2\,318.57\text{ km}^2$; USLE 结果显示土壤侵蚀面积 $2\,020.44\text{--}2\,627.63\text{ km}^2$,多年平均侵蚀面积 $2\,229.06\text{ km}^2$ 。二者均在2009年达到侵蚀面积最大值。总体上 TSLE 与 USLE 所得4年土壤侵蚀面积差异不显著($P=0.64$),差值 $36.79\text{--}161.68\text{ km}^2$,占总平均侵蚀面积比 $1.14\%\text{--}7.69\%$ 。

由研究区不同年份各孔兑(由西至东)土壤侵蚀综合指数对比来看(图8),总体上均为东部土壤侵蚀大于西部的特点,与顾珍逵等^[1]的研究结果“十大孔兑主沟纵剖面以东部流域演化程度较高为特点”的结论基本一致。各研究年份二者土壤侵蚀综合指数值差异性检验分别为 $P_{2000}=0.04, P_{2005}=0.09, P_{2009}=0.19, P_{2015}=0.32$,除2000年外,其余年份内二者在0.05水平上差异性均不显著。

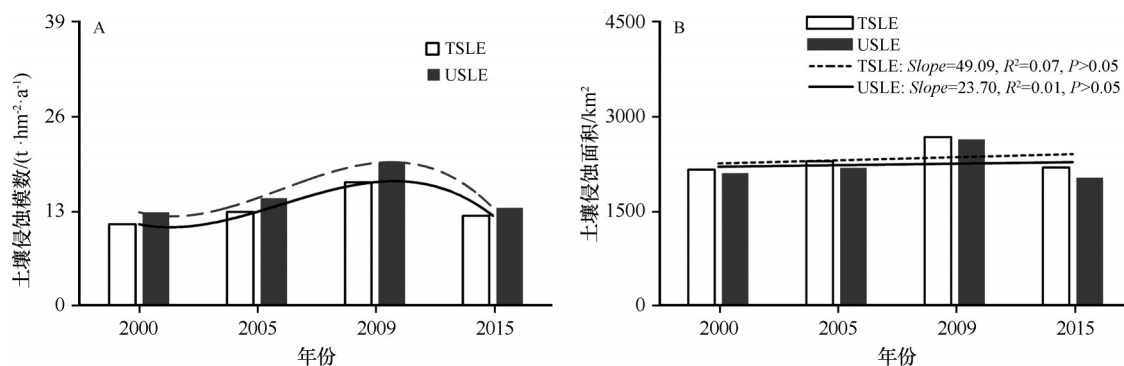


图7 TSLE与USLE土壤侵蚀模数、土壤侵蚀面积

Fig.7 Results of soil erosion modulus and soil erosion area obtained by TSLE and USLE respectively

通过对坡长因子(L)和坡度因子(S)分析发现,由于 LS 因子是通过分级计算获得,故其频数分布上表现出了不连续特点,而这与地形连续性的自然属性不符。而 T 因子通过遥感和GIS手段提取,首先具有连续性的表达特点,其次具有计算步骤上的简便性以及客观和可重复性的优势。

总得来看,基于地形指数的土壤侵蚀评价公式在进行土壤侵蚀评价时具有一定的可信度,该法具有计算方便、可重复性检查的优点,如地形指数与土壤可蚀性因子可重复参与计算,植被覆盖与管理因子和降雨侵蚀力因子年变化数据可通过共享数据逐年进行更新。特别需要指出的是在各种土壤侵蚀方程计算中,地形、植被盖度和降雨侵蚀力因子是核心要素^[29-30],其中地形因子在各类方程都采用定值,植被盖度和降水侵蚀力因子为逐年变量,

从这一点来看,TSLE公式与其他各类公式完全保持一致,因此采用该方法在进行长时间序列快速土壤侵蚀趋势动态监测方面具有方便、快捷特点。

5 结论

T 因子可以实现对研究区地形的连续表达,基于地形指数的土壤侵蚀方程(TSLE)与通用土壤流失方程(USLE)2000、2005、2009、2015年的计算结果检验中,土壤侵蚀模数和土壤侵蚀面积差异性均不显著($P>0.05$)。

1985—2018年土壤侵蚀模数整体表现为下降趋势($P<0.05$),多年平均土壤侵蚀模数为 $22.34\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中1985—2000年土壤侵蚀模数表现为下降趋势但变化差异不显著($P>0.05$),2000—2018年为增加趋势但变化差异不显著($P>0.05$)。

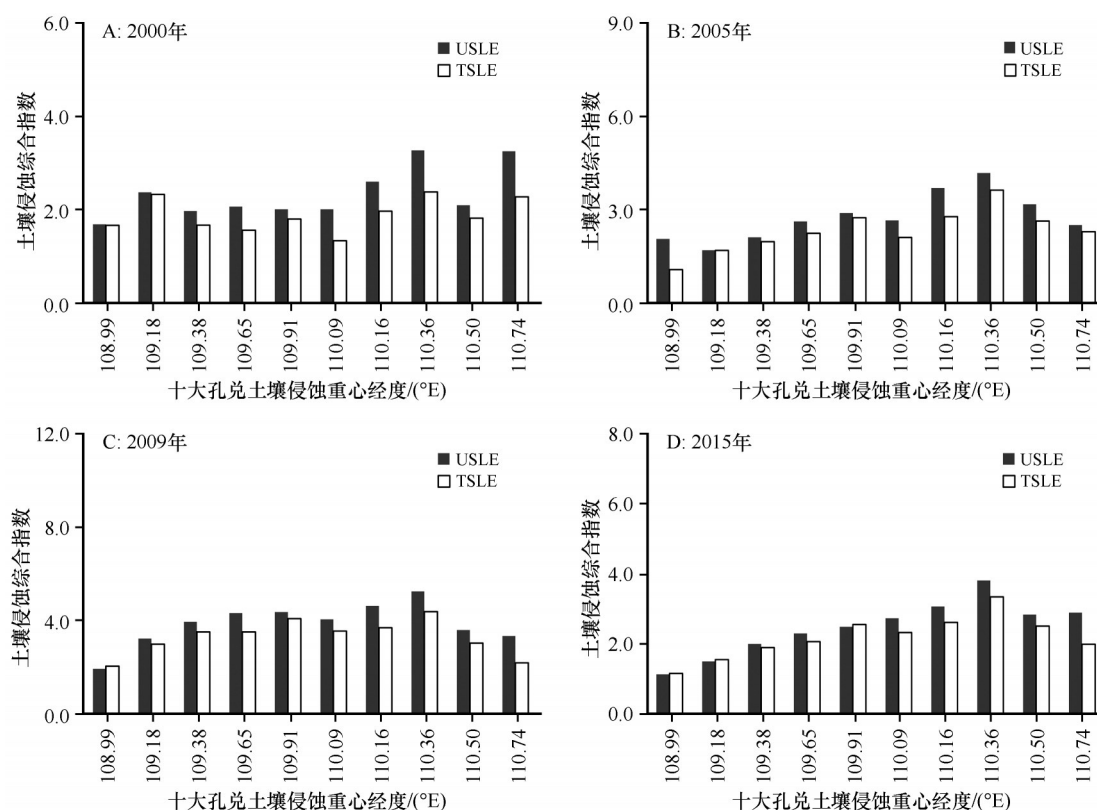


图8 2000—2015年 TSLE、USLE 土壤侵蚀综合指数经向变化

Fig.8 Comprehensive soil erosion index of TSLE and USLE from 2000 to 2015

在总体上,研究区1985—2018年土壤侵蚀面积为下降趋势($P < 0.05$),多年平均侵蚀面积为2 956.07 km²,其中1985年土壤侵蚀面积最大,为4 047.14 km²;2000年土壤侵蚀面积最小,为2 153.67 km²。

在空间分异上,研究区土壤侵蚀表现出明显的空间异质性,整体上表现为从西向东增加趋势。多年平均土壤侵蚀强度以微度和轻度侵蚀级别为主,其中母哈尔沟多年平均土壤侵蚀综合指数最大,土壤侵蚀面积占比66.36%;毛卜拉孔兑多年平均土壤侵蚀综合指数最小,土壤侵蚀面积占比52.55%。

参考文献:

- [1] 顾珍逵,师长兴,阳辉,等.内蒙古十大孔兑流域地貌演化格局及其成因机制[J].干旱区地理,2017,40(6):1188-1197.
- [2] 孙从建,王佳瑞,郑振婧,等.黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J].干旱区地理,2020,43(3):568-576.
- [3] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26: 189-193.
- [4] Renard K G, Ferreira V A. RUSLE model description and database sensitivity[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22

(3):458-466.

- [5] Bagarello C V, Stefano V D, Ferro V, et al. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models[J]. Catena, 2018, 155: 10-19.
- [6] 唐辉,李占斌,李鹏,等.黄土坡面产流产沙过程及微地形变化特征[J].中国沙漠,2016,36(6):1708-1712.
- [7] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5):1587-1593.
- [8] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6):527-544.
- [9] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等.基于USLE的东江流域土壤侵蚀量估算[J].自然资源学报,2010,25(12):2154-2164.
- [10] Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe[J]. Environmental Science & Policy, 2015, 54: 438-447.
- [11] Roy P. Application of USLE in a GIS environment to estimate soil erosion in the Irga watershed, Jharkhand, India[J]. Physical Geography, 2019, 40(4):361-383.
- [12] 王钰,朱冰冰,冯起.草地坡面径流侵蚀动力特征模拟[J].中国沙漠,2020,40(6):162-168.
- [13] 蔡强国,刘纪根.关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J].地理科学进展,2003(3):142-150.
- [14] 牛丽楠,邵全琴,刘国波,等.六盘水市土壤侵蚀时空特征及影

- 响因素分析[J].地球信息科学学报,2019,21(11):1755-1767.
- [15] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2020,34(1):17-26.
- [16] Maltsev K, Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia [J]. Catena, 2020, 195: 104726.
- [17] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.基于DEM和GIS的修正通用土壤流失方程地形因子值的提取[J].中国水土保持科学,2007(2):18-23.
- [18] Shabani F, Kumar L, Esmacili A. Improvement to the prediction of the USLE K factor[J]. Geomorphology, 2014, 204(1): 229-234.
- [19] 梁晓珍,符素华,丁琳.地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):21-26.
- [20] 刘海涛.基于改进通用土壤侵蚀方程的水土流失时空模拟:以淮河上游为例[J].人民长江,2016,47(4):17-19.
- [21] 张照录,崔继红.通用土壤流失方程最新研究改进分析[J].地球信息科学,2004,4(6):51-55.
- [22] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. Catena, 2014, 121: 151-163.
- [23] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL190-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008:1-20.
- [24] LI Z, Jiang W G, Wang W J, et al. Exploring spatial-temporal change and gravity center movement of construction land in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(8): 1363-1380.
- [25] 张增祥,赵晓丽,陈晓峰,等.基于遥感和地理信息系统(GIS)的山区土壤侵蚀强度数值分析[J].农业工程学报,1998(3):3-5.
- [26] 舒天竹,王晓红.基于3S技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究[J].水土保持研究,2017,24(4):127-132.
- [27] 刘慧,李晓英,姚正毅.1961—2015年雅鲁藏布江流域降雨侵蚀力[J].中国沙漠,2019,39(2):166-176.
- [28] Liang Y, Jiao J Y, Tang B Z, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124694.
- [29] 胡晓倩,李忠武,陈佳,等.南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估[J].水土保持学报,2020,34(6):95-100.
- [30] 刘雯霞,赵瑞东,邵鹏,等.近15 a黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J].干旱区地理,2018,41(1):99-108.

Analysis of soil erosion in loess area of sandstone based on terrain index

Qiao Rongrong¹, Han Yan², Ji Shuxin¹, Dong Chunyuan¹, Wang Aojie¹, Chang Xueli¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China;

2. Weifang Middle School, Weifang 261031, Shandong, China)

Abstract: Terrain is an important controlling factor affecting the process of soil erosion and plays an important role in the evaluation of soil erosion. In this paper, based on the expression of terrain relief, the terrain index was constructed, and the soil loss formula based on terrain index was established by combining rainfall erosivity and vegetation coverage. The temporal and spatial variation characteristics of soil erosion from 1985 to 2018 in the loess area of Ten Turbutries sandstone in the north of Ordos City, Inner Mongolia Autonomous region were analyzed. The main results are as follows: (1) the soil erosion modulus in the study area showed no significant decreasing trend for many years, and the average erosion modulus was $22.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The soil erosion modulus was the highest in 1985 and the lowest in 2000, and showed a downward trend from 1985 to 2000 and an upward trend from 2000 to 2018. (2) The average soil erosion area for multi-year was $2\,956.07 \text{ km}^2$. The soil erosion area was the largest in 1985 at $4\,047.14 \text{ km}^2$, accounting for 83% of the total area; it was the smallest in 2000 at $2\,153.67 \text{ km}^2$, accounting for 44%. There were mainly light and moderate erosion intensity grades in the study area from 1985 to 2000, and there were mainly slight and mild erosion intensity grades from 2000 to 2018. (3) The spatial distribution pattern of soil erosion had remained basically the same over the years. The comprehensive index of soil erosion was increasing from west to east, and the soil erosion in the east was greater than that in the west. Among them, Muhaergou had the largest soil erosion comprehensive index and Maobula was the smallest. (4) There was no significant difference in the estimation of soil erosion modulus and area between Terrain Soil Loss Equation and Universal Soil Loss Equation ($P > 0.05$).

Key words: USLE; terrain index; comprehensive index of soil erosion; loess area of sandstone