

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.050.

李朋飞, 张晓晨, 党旭, 等. 基于三维激光扫描的坡沟系统侵蚀产沙过程研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 13-21.

LI Pengfei, ZHANG Xiaochen, DANG Xu, et al. Investigation of Erosion Processes on the Slope-Gully System Using 3D Laser Scanning[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 13-21.

基于三维激光扫描的坡沟系统侵蚀产沙过程研究

李朋飞, 张晓晨, 党旭, 胡晋飞, 姚顽强, 郝铭揆

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

摘要:为了探究野外自然坡沟系统土壤侵蚀过程,研究于黄土丘陵沟壑区典型流域辛店沟内自然坡面开展5场放水冲刷试验,利用地面三维激光扫描技术(Terrestrial laser scanning, TLS)获取高精度地形信息,并采用DEM of difference(DoD)地形变化监测方法计算产沙量,利用实测产沙量评估TLS的监测精度,并探讨了坡沟系统侵蚀/沉积的变化特征。结果表明:(1)累积场次中,DoD不确定性(即level of detection, LoD)平均值(范围)为16.5 mm(16.2~16.8 mm)。单场次中,LoD值平均值为16.4 mm(16.2~16.6 mm);(2)累积场次中,梁峁坡、沟谷坡、坡沟系统TLS扫描所得产沙量相对误差的平均值(范围)为52.63%(26.06%~106.98%),56.68%(30.26%~75.49%)和56.28%(33.37%~73.28%),与实测数据显著相关($R^2>0.9$, $p<0.05$)。单场次TLS扫描相对误差波动范围更大且平均值高于累积场次,其值分别为83.70%(4.08%~190.40%),91.41%(0.95%~225.09%)和87.58%(4.09%~215.55%),与实测值非显著相关($R^2<0.57$, $p>0.05$),表明TLS更适合于坡沟系统累积场次侵蚀产沙监测,而单场次监测精度较差;(3)随冲刷次数的增加,梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统侵蚀产沙均呈增长趋势,但沟谷坡和坡沟系统沉积量快速增长后趋于平稳。(4)梁峁坡侵蚀区域主要位于梁峁坡上中部,沉积主要分布于梁峁坡中下方,沟谷坡大部分区域侵蚀剧烈,沉积主要分布于沟底,梁峁坡和沟谷坡侵蚀区占地形变化区域的比例均高于79%。结果可为黄土高原土壤侵蚀监测与机理研究提供参考。

关键词:侵蚀产沙; 三维激光扫描; 时空分布; 坡沟系统; 黄土高原

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0013-09

Investigation of Erosion Processes on the Slope-Gully System Using 3D Laser Scanning

LI Pengfei, ZHANG Xiaochen, DANG Xu, HU Jinfei, YAO Wanqiang, HAO Mingkui

(College of Gomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to explore the soil erosion process of in-situ slope-gully systems, five runoff scouring experiments were undertaken on a slope-gully system plot established on a natural slope of a small catchment (i.e. Xindiangu Catchment) in the hilly-gully region of Loess Plateau, while the terrestrial laser scanning (TLS) was employed to acquire the ultra-high resolution terrain information of the slope-gully system. The digital elevation model (DEM) of difference (DoD) algorithm was used to derive the sediment yield of the plot. The accuracy of the derived sediment yield was then assessed by using the measured sediment yield. The spatial pattern of erosion-deposition within the slope-gully system was also investigated based on the DoD results. The results showed that: (1) DoD uncertainty (i. e. level of detection, LoD) ranged between 16.2 mm and 16.8 mm (average value is 16.5 mm) for a cumulative erosion monitoring, while LoD ranged between 16.2 mm and 16.6 mm with an average value of 16.4 mm for the consecutive erosion monitoring;

收稿日期:2022-04-06

修回日期:2022-05-03

资助项目:国家自然科学基金项目(41977059;41807063);陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-259)

第一作者:李朋飞(1986—),男,陕西渭南人,博士,副教授,主要从事地貌遥感与水土保持研究。E-mail: pengfeili@xust.edu.cn

通信作者:胡晋飞(1992—),男,山西运城人,博士,讲师,研究方向为地貌遥感与水土保持研究。E-mail: jinfeih@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

(2) TLS-derived and measured cumulative sediment yields were highly correlated ($R^2 > 0.9$, $p < 0.05$), and the mean (minimum-maximum) relative errors of TLS-derived values for the hillslope, the gully slope and the whole of the slope-gully system were found to be 52.63% (26.06%~106.98%), 56.68% (30.26%~75.49%) and 56.28% (33.37%~73.28%), respectively; no significant relation ($R^2 < 0.57$, $p > 0.05$) was found between TLS-derived and measured consecutive sediment yield, and the mean (minimum-maximum) relative errors of TLS-derived values were 83.70% (4.08%~190.40%), 91.41% (0.95%~225.09%) and 87.58% (4.09%~215.55%), which demonstrated that TLS was more suitable for a monitoring of cumulative sediment yield rather than consecutive sediment yield in the slope-gully system; (3) the amounts of erosion and sediment yield on hillslope, gully slope and slope-gully system increased with the progress of runoff scouring, while depositions on gully slope and the whole of the slope-gully system stabilized after a rapid increase in the first experiments; (4) on the hillslope, erosion mainly occurred on the upper and middle parts while deposition primarily occurred on the lower part; intensive erosion was found on most area of the gully slope, while the deposition was mainly found on the bottom of the gully. The area with erosion accounted for over 79% of the area with topographic changes. These results can provide the useful reference for erosion monitoring and erosion process studies on the Chinese Loess Plateau.

Keywords: soil erosion; 3D laser scanning; spatiotemporal pattern; slope-gully system; Loess Plateau

土壤侵蚀过程会造成土地退化,威胁生态安全,为制约区域生态环境可持续发展的关键因素之一^[1]。黄土高原是我国乃至全世界土壤侵蚀最为严重的地区^[2-3],其侵蚀产沙主要来源之一为坡沟系统^[4-5]。因此,坡沟系统侵蚀产沙精细化定量研究对于侵蚀产沙机理理解、模型构建和侵蚀防治意义重大^[6]。

侵蚀产沙模拟试验是研究坡沟系统侵蚀过程的主要途径^[7-8]。目前,传统坡沟系统侵蚀产沙监测方法主要包括填土法、体积计算法、测尺法^[9-10]、地形测针法^[11-12]等,此类方法虽然简单易操作,但存在精度过低、工作量大等问题。随着新兴技术的发展,摄影测量^[13]、地面三维激光扫描仪(Terrestrial laser scanning, TLS)^[14-15]、全球卫星导航^[16-17]等测绘遥感手段在土壤侵蚀过程研究中的应用大大节省了人力物力。其中, TLS 能够获取高精度、高密度^[18]的三维信息,且受天气影响小^[19],能够获取侵蚀和沉积信息^[19-21],为实现坡沟系统侵蚀产沙过程的精细化监测提供了技术支撑。已有研究通过 TLS 扫描点云插值生成 DEM 进行地表形态变化监测与侵蚀量化,现已应用于细沟形态监测^[7,22]、重力侵蚀监测^[23]、滑坡监测等^[24]方面。然而,有关 TLS 点云插值方法在野外自然坡沟系统侵蚀产沙监测中精度评估的相关研究较为缺乏^[25-26],极大限制了对点云插值方法在侵蚀监测中适用性的理解,亟待开展基于 TLS 的野外自然坡沟系统的侵蚀过程研究,定量揭示 TLS 点云插值方法的监测精度。

鉴于此,本文以黄土丘陵沟壑区辛店沟流域为研究

区,选定流域典型坡沟系统设置径流小区,开展野外自然坡沟系统放水冲刷试验。基于三维激光扫描技术,获取坡面高精度三维点云,结合实测侵蚀产沙数据定量评估 TLS 对野外坡面侵蚀产沙的监测精度,基于 TLS 监测结果探讨坡沟系统侵蚀沉积的变化特征。

1 研究区概况

辛店沟流域(110°16'45"—110°20'00"E, 37°29'00"—37°31'00"N)位于陕西省榆林市绥德县,属于黄土丘陵沟壑区^[27]。流域面积 1.44 km²,海拔 990~1 010 m,土壤类型以黄绵土为主^[28],年平均气温 10.2℃,最高、最低温度分别为 39.1℃, -27.1℃,年平均降雨量 513.1 mm^[28],约 70%以上的降水出现在 6—9 月,且多以短历时、高强度暴雨形式出现^[29],致使该流域水土流失严重。为防治水土流失,改善区域生态环境,该流域于 1970 年代起实施大面积退耕还林及生态恢复措施^[30],植被恢复效果显著,目前流域林草覆盖率已达到 75%以上^[27],土壤侵蚀得到有效控制。然而,在高强度降雨中,陡峭坡面仍会产生大量侵蚀^[7]。

2 数据与方法

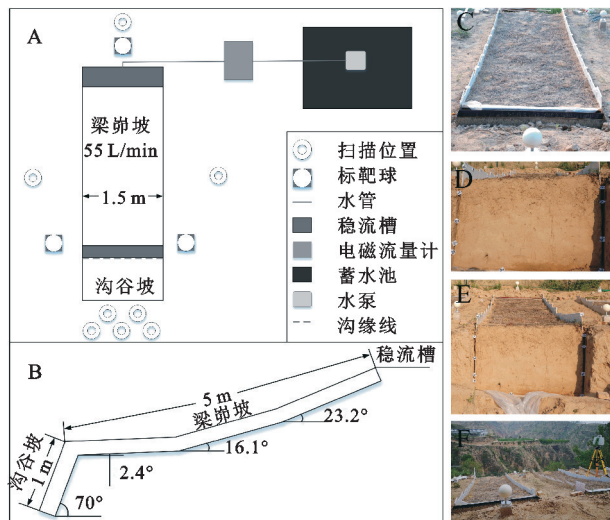
2.1 试验设计

鉴于发育成熟的坡沟系统较长且沟深和沟谷坡度较大,不利于进行放水冲刷试验,选取流域内发育早期的自然坡面设置坡沟系统。根据自然坡沟系统真实地形,在选定流域内设置单个典型坡沟系统径流小区,最终梁崩坡长度设置为 5 m,宽 1.5 m,梁

崩坡中上部较陡,坡度 $16.1^{\circ} \sim 23.2^{\circ}$,下部趋缓,坡度 $2.4^{\circ} \sim 7.6^{\circ}$,沟谷坡坡长 1 m,宽 1.5 m,坡度为 70° (图 1B)。在小区附近平坦区域设置混凝土立方体(共 3 处),用来放置半径为 5 cm 的标靶球,并在小区四周设置 TLS 扫描的架站位置(图 1A)。小区边界使用瓷砖围挡,以防径流溢出或渗入外侧,保障试验边界条件一致。在小区上方和沟缘线上方安装稳流槽(长 1.5 m、宽 0.3 m、深 0.5 m),距小区数米远处建立 40 m^3 蓄水池,水管连接稳流槽和蓄水池,并安装电磁流量计控制水流流量(图 1A)。根据当地常见降雨强度进行换算^[31],最终将梁崩坡和沟谷坡的放水流量大小设置为 55,10 L/min。

2.2 试验过程

对径流小区开展 5 次放水冲刷试验,单次试验时长 30 min,两次试验间隔 4 d,待土壤水分恢复至与前一试验基本一致时再开始下一场试验,如遇自然降雨,试验依次顺延。每隔 3 min 在坡面径流集中的沟缘线顶部及其附近用量筒采样梁崩坡径流样本,在沟谷坡底部用桶采集坡沟系统径流样本,若沟缘线后退,以沟缘线顶部以上为梁崩坡,以下为沟谷坡(图 2A)。使用精度为 0.1 s 的秒表记录采样时间,并使用精确度为 0.1 g 的电子天秤称量含沙水样,得到浑水样本质量,每场试验总共采集 10 个径流样本。待水自然挥发至一定体积后,将剩余含沙水样倒入铝盒并置于烘箱烘干 24 h(105°C)。再次使用电子天平称量烘干样本,得到产沙量。在 5 场冲刷试验完成后,从梁崩坡和沟谷坡上、中、下部位分别采集土壤样本,使用烘干法测量土壤容重,得到梁崩坡和沟谷坡平均土壤容重值分别为 1.238 g/cm^3 , 1.227 g/cm^3 。



注: A 为试验设计图; B 为小区侧视图; C 为试验前梁崩坡照片; D 为试验前沟谷坡照片; E 为试验前坡沟系统照片; F 为 TLS 扫描照片。

图 1 试验小区概况

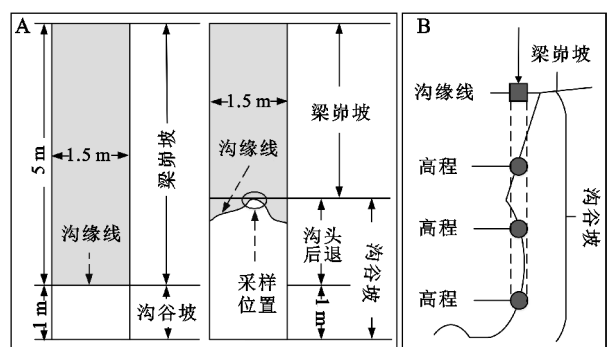
在第一次放水冲刷试验之前,通过徕卡 C10 三

维激光扫描仪(水平、垂直视场角分别为 360° , 270° , 扫描速度 5 万点/s, 目标扫描、距离、点位精度分别达到 2 mm, 4 mm, 6 mm)获取原始坡面点云数据, 架站位置见图 1A。在每次放水冲刷试验结束后, 在同样的架站位置扫描每轮冲刷后的坡面, 以监测坡沟系统侵蚀/沉积情况。

2.3 数据处理

2.3.1 TLS 点云数据处理 点云数据采集完成后, 需将同一场次扫描的多架次点云数据进行配准, 本文通过 3 个标靶球于 Cloud Compare 软件中(Align 工具)进行配准, 进而得到单场次完整点云数据。再以冲刷前坡面扫描数据为基准, 基于标靶球对其余五场数据进行配准, 从而获得同一坐标系下 6 片完整点云数据。最后, 通过 Terrasolid 2016 软件对配准后点云数据进行裁剪(去除瓷砖、稳流槽和水泥桩点云数据)和滤波(植被和噪点), 以获取小区的地面点。

鉴于梁崩坡与沟谷坡侵蚀发育程度及侵蚀形态差异巨大, 故将坡沟系统划分为梁崩坡和沟谷坡两部分逐一进行处理。地面点云需先经插值生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)才能进行后续处理, 但在沟谷坡插值时, 沟底的陷穴存在视线遮挡问题, 导致同一栅格对应多处高程值(图 2B), 造成构建的 DEM 存在错误。因此将三维地面点云作为整体进行旋转, 旋转之后点云描述的地形与旋转之前相同, 点云之间的相对位置没有发生变化, 为了避免无法量化沟坡实际 DEM 这一问题, 我们将沟谷坡的点云数据旋转 70° 以更好模拟沟谷坡的地形。



注: 图 B 中箭头方向为 DEM 俯视图方向, 方框代表生成栅格, 圆点代表该栅格对应的多个高程值。

图 2 试验中坡沟系统的发育(A)和沟谷坡 DEM 构建过程存在的问题(B)

2.3.2 地形变化监测 目前已有 Cloud to Cloud (C2C)^[32]、Cloud to Mesh (C2M)^[33]、Multiple Model to Model Cloud Comparison (M3C2)^[9,34]、DEM of difference (DoD) 等^[35-37] 方法用于土壤侵蚀特征监测。由于 C2C, C2M, M3C2 均是计算两片点云之间的高程变化, 而 DoD 方法可直接计算体积变化量, 且

该方法现已成熟,并已应用于区域尺度^[37-39],因此本研究采用 DoD 方法进行坡面侵蚀体积量化。

DoD 方法的原理是将两片点云通过 ArcGIS 10.2 插值生成两幅 DEM,根据逐栅格运算计算两幅 DEM 之间的差值^[34,36],通过差值判断坡面 DEM 在冲刷前后是否发生变化。由于不规则三角网算法(Triangle irregular network, TIN)适合复杂地形的表面建模^[25, 37],因此,本研究中 DEM 插值方法选用 TIN,再通过 ArcGIS 10.2 中 TIN 转栅格工具生成规则格网。

通过点云构建 DEM 的过程存在误差,这一过程误差可通过均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)计算。本研究将 3 个标靶球(上半球)的点云数据分为训练数据(90%)和验证数据(10%),通过提取验证点云位置对应的 DEM 栅格高程值,并基于栅格高程值与验证点云高程值之间的 RMSE 计算单片点云存在的误差^[38,40]。假设每个误差是独立分布的,可组合前后两次的 DEM 均方根误差作为整个 DoD 的不确定性误差(Level of detection, LoD)^[37,41]。

$$\text{LoD} = 1.96 \sqrt{(\delta z_{\text{new}})^2 + (\delta z_{\text{old}})^2} \quad (1)$$

式中:LoD 是 DoD 中的不确定性误差(mm); δz_{old} , δz_{new} 分别是第一片、第二片点云到 DEM 所产生的均方根误差(mm),并取 95% 的置信区间作为置信水平^[42-44]。

2.3.3 侵蚀产沙量计算 基于 DoD 方法计算出逐栅格的高程变化(负值为侵蚀,反之为沉积),再将高程变化中的 LoD 值剔除。当高程变化的绝对值大于 LoD 值时,高程变化的绝对值减去 LoD 值为真实地形变化,否则将高程变化设置为 0,最终得到每次冲刷试验后真实的高程变化情况^[41]。

栅格单元的体积等于栅格大小与高程变化值的乘积,通过区分栅格单元体积的正负,分别对每个栅格单元体积进行求和,最终得到整个坡沟系统的体积变化(负值为侵蚀,反之为沉积),整个坡面的侵蚀体积减去沉积体积即为产沙体积。侵蚀量和沉积量是通过侵蚀体积、沉积体积和平均土壤容重的乘积求得,产沙量的值即为侵蚀量与沉积量的差值。

2.4 精度评价

采用相对误差(Relative error, RE)、决定系数(Coefficient of determination, R^2)两个指标来评价 TLS 监测产沙量与实测侵蚀产沙量之间的精度,相对误差和决定系数的数学表达式分别为:

$$\text{RE} = \frac{|x_i - X_i|}{X_i} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (3)$$

式中: x_i 是 TLS 监测侵蚀产沙量(kg); X_i 是实测侵蚀产沙量(kg); \bar{X}_i 是实测侵蚀产沙量的平均值(kg)。

3 结果与分析

3.1 LoD 变化特征

不同场次冲刷试验地面点云插值生成 DEM 过程所存在的误差见表 1。其中 DEM 误差的最小值为 5.7 mm,最大值为 6.1 mm,平均值为 5.9 mm,极差不超过 0.4 mm。DoD 的不确定性误差计算结果见表 1,在累积场次中,DoD 的 LoD 最小值为 16.2 mm,最大值为 16.8 mm,平均值为 16.5 mm,极差小于 0.6 mm。在单场次中,LoD 值 16.2~16.6 mm,LoD 平均值为 16.4 mm,极差小于 0.4 mm。

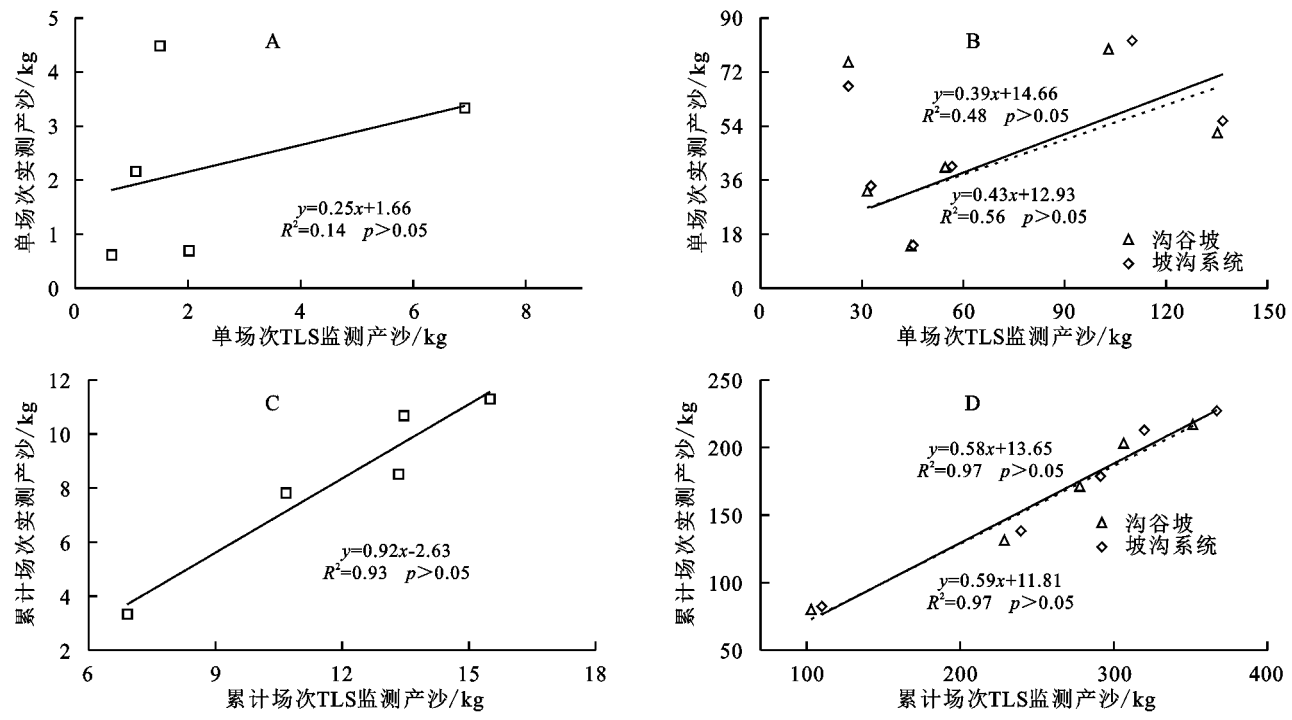
表 1 DEM 误差及 LoD

冲刷次数	0	1	2	3	4	5
DEM 误差/mm	6.0	5.7	6.1	5.9	5.9	6.0
累积场次 LoD/mm	16.2	16.8	16.4	16.5	16.6	
单场次 LoD/mm	16.2	16.4	16.6	16.3	16.5	

3.2 坡面侵蚀产沙监测精度

由图 3 可知,在梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统 3 种地貌单元下,累积场次 R^2 明显高于单场次。单场次中,梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统的 TLS 监测产沙与实测产沙之间的相关性较低,其 R^2 分别为 0.14, 0.48, 0.56,且 TLS 监测产沙量和实测产沙量间并无显著的线性关系($p > 0.05$),表明单场次下 TLS 对坡面产沙的监测精度较低,难以用于梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统侵蚀产沙量的评估。在累积场次下,梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统 TLS 监测的产沙与实测产沙之间的 R^2 均高于 0.9,且两者之间有显著的线性关系($p < 0.05$),表明累积场次下 TLS 对于坡面产沙的监测结果与实测结果拟合精度较高。

由图 4 可以看出,在梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统 3 种地貌单元下,累积场次相对误差的平均值明显低于单场次。单场次中梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统的相对误差范围分别为 4.08%~190.40%, 0.95%~225.09% 和 4.09%~215.55%,相对误差的平均值分别为 83.70%, 91.41% 和 87.58%。其中,梁峁坡的相对误差最大值出现在第三场次的冲刷试验中,沟谷坡和坡沟系统的相对误差最大值出现在第五次冲刷试验中。累积场次中梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统的相对误差范围分别为 26.06%~106.98%, 30.26%~75.49% 和 33.37%~73.28%,相对误差的平均值分别为 52.63%, 56.68% 和 56.28%。其中,梁峁坡的相对误差最大值出现在第一场次冲刷试验中,沟谷坡和坡沟系统的相对误差最大值出现在第二场次的冲刷试验中。在累积场次中,相比梁峁坡结果,沟谷坡监测误差波动较小。



注: A, B 为单次, C, D 为累积场次。下图同。

图3 TLS 监测产沙和实测产沙的关系

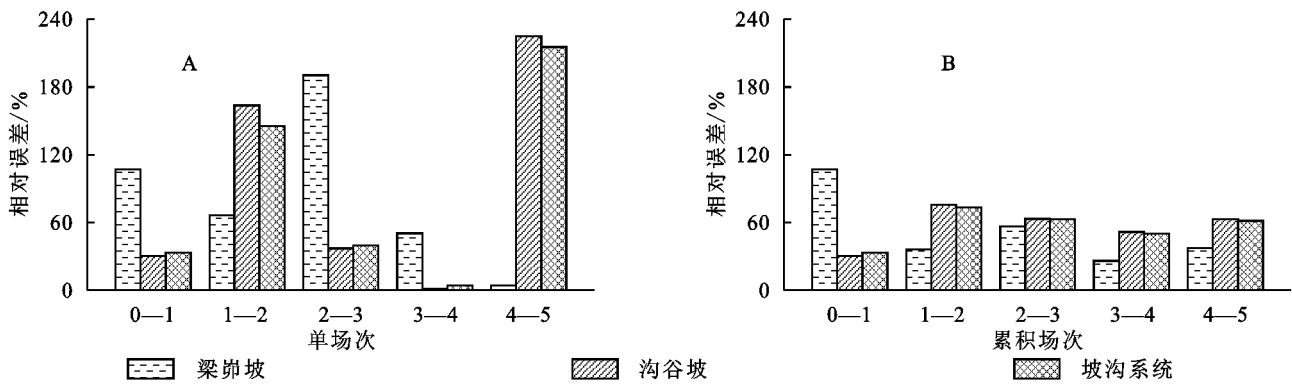


图4 TLS 监测产沙量的相对误差

3.3 坡面侵蚀时空分布特征

3.3.1 时间变化特征 由图 5A 可知,沟谷坡和坡沟系统侵蚀量范围 111.48~385.27 kg 和 118.56~403.95 kg,而梁崩坡的侵蚀量范围 7.09~18.69 kg,沟谷坡和坡沟系统侵蚀量远高于梁崩坡。在五次冲刷试验中,梁崩坡侵蚀量在第一次冲刷试验中增幅最大,值为 7.09 kg,沟谷坡和坡沟系统侵蚀量在第二次冲刷试验中增幅最大,分别为 151.36 kg 和 155.44 kg,梁崩坡、沟谷坡和坡沟系统侵蚀量均在第四次冲刷试验中增幅最小,值分别为 2.01 kg,29.79 kg 和 31.80 kg。

对比分析梁崩坡、沟谷坡和坡沟系统的沉积量可知(图 5B),随着冲刷试验次数的增加,梁崩坡沉积量呈稳步上升趋势,而沟谷坡和坡沟系统沉积量在第二场冲刷试验中突然增大后上下波动。其中沟谷坡和坡沟系统沉积量明显大于梁崩坡,沟谷坡和坡沟系统

沉积量范围为 8.44~34.50 kg 和 8.62~37.17 kg,而梁崩坡沉积量范围为 0.18~3.19 kg。在五次冲刷试验中,梁崩坡沉积量在第四次冲刷试验中增幅最大,值为 1.88 kg,沟谷坡和坡沟系统沉积量在第二次冲刷试验中增幅最大,值分别为 25.57 kg 和 25.89 kg。

由图 5C 可知,随着冲刷试验次数的增加,梁崩坡、沟谷坡和坡沟系统产沙量稳步上升。其中沟谷坡和坡沟系统产沙量明显大于梁崩坡,沟谷坡和坡沟系统产沙量范围为 103.04~351.53 kg 和 109.95~367.03 kg,而梁崩坡产沙量范围为 6.91~15.50 kg。在五次冲刷试验中,梁崩坡产沙量在第一次冲刷试验中增幅最大,值为 6.91 kg,沟谷坡和坡沟系统产沙量在第二次冲刷试验中增幅最大,分别为 125.79 kg 和 129.55 kg,梁崩坡、沟谷坡和坡沟系统产沙量均在第四次冲刷试验中增幅最小,值分别为 0.13 kg,28.53 kg 和 28.66 kg。

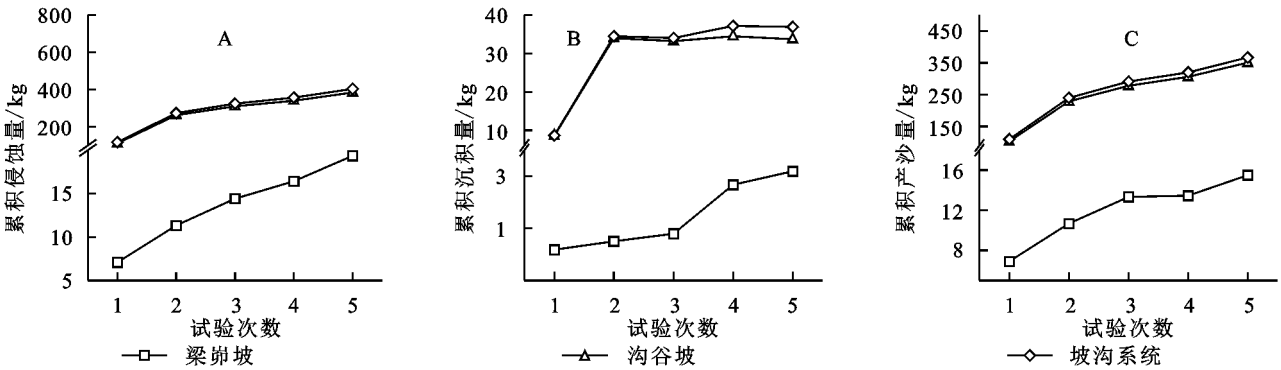
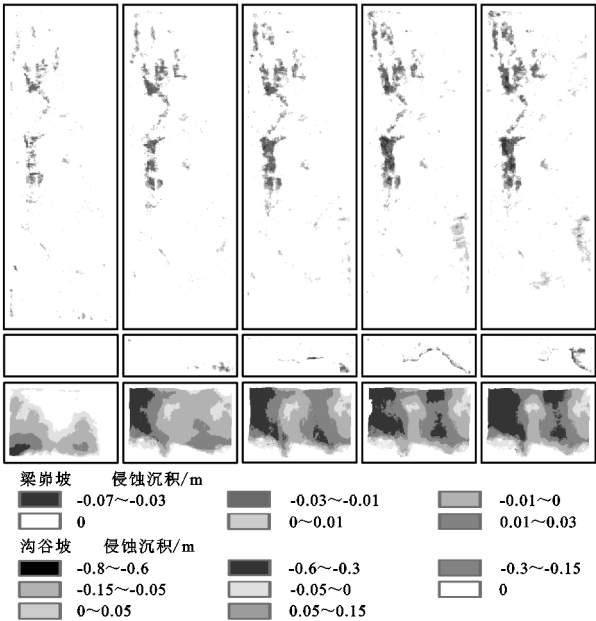


图 5 梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统时间变化特征

3.3.2 空间分布特征 由图 6 可知,随着冲刷试验次数的增加,梁峁坡的侵蚀分布范围愈来愈广,主要分布在梁峁坡上中部,同样沉积也分布愈来愈广,主要分布在梁峁坡中下方。经定量分析可知,随着冲刷试验次数的增加,梁峁坡变化(侵蚀和沉积)区域占整个坡面的比例逐渐增大,占比由 3.51%增加到 9.82%,其中,侵蚀区面积远高于沉积区,其在变化区域中的占比高达 79.74%~97.00%,而沉积区占比仅为 3.00%~20.26%。

随着冲刷试验次数的增加,沟谷坡侵蚀分布在沟缘线附近和沟谷坡中上方,沉积分布在沟谷坡坡底。据统计结果,沟谷坡变化(侵蚀和沉积)区域占整个坡面的 57.57%~79.68%。其中,侵蚀区域和沉积区域分别占变化区域的 79.33%~80.23%和 19.77%~20.67%。沟谷坡的侵蚀首先以沟底弧形凹陷穴形式出现,随着冲刷试验次数增加,沟头崩塌,切沟发展迅速,最后沿沟床侵蚀较微弱,沟底和沟壁形态稳定,切沟发展则相对较慢,对应侵蚀区域占比几乎不变。



注:正值表示沉积,负值表示侵蚀。

图 6 坡沟系统侵蚀沉积空间分布特征

4 讨论

本研究借助 TLS 监测坡面侵蚀发育过程,大多学者们通过构建不同时相的 DEM 或 Mesh,估算侵蚀量^[45],却忽略了点云生成 DEM 或 Mesh 存在的不确定性误差。TLS 获取的原始点云需通过扫描间配准和扫描集间配准,这一过程存在一定误差^[9,46],同样,将地面点云通过 TIN 插值生成不规则网格,再通过 TIN 转栅格生成规则 DEM,亦会有误差产生,且误差会随着操作过程进行传播^[34-35],该类误差无法有效避免,需通过计算不确定性误差予以消除^[39]。本研究将冲刷前后地面点云构建 DEM 的过程误差以平方平均的形式组合^[37],并取 95%的置信区间来计算 DoD 的 LoD。研究结果表明,DoD 的 LoD 值范围为 16.2~16.8 mm,极差不足 1 mm,说明在坡面尺度上 DoD 的 LoD 值几乎无差异,可为后续在同样条件下计算 LoD 提供参考。本研究 LoD 计算基于半球进行,但 Abellan 等^[47]还基于平面和不规则表面分别计算 LoD。坡面尺度上,平面或不规则表面各自的 LoD 与半球的 LoD 差异是否较大尚未可知,后续需进一步深入研究。

本研究采用野外原位放水冲刷试验,通过对比侵蚀产沙实测值与 TLS 监测结果得出 TLS 对于累积场次 ($R^2>0.9$) 的监测精度明显优于单场次 ($R^2<0.57$)。其中,单场次下 TLS 监测产沙与实测值没有显著的关系,而累积场次下两者关系显著,这是因为较单场次下,累积场次下的地形变化更大,因此更容易监测且监测结果更为准确。冲刷试验中,沟谷坡的误差与坡沟系统的误差有相同趋势,这是因为沟谷坡产沙占据坡沟系统产沙的 94%~96%,此时沟谷坡在坡沟系统中贡献的产沙中起主导作用,该结果与王玲玲等^[48]在野外试验的研究结果较为一致。而通过室内进行模拟试验,Li 等^[49]得出沟谷坡产沙仅占据 32%,杨春霞得出沟坡产沙占据坡沟系统的 38.06%^[50],李勉的

研究中占 43.23%^[51],上述研究与本文结果存在差异的根本原因可能在于野外土壤与室内重塑土理化性质差异较大,导致研究结果相异。

本研究通过分析坡面侵蚀沉积的空间分布特征得出,梁峁坡的侵蚀区域逐渐增大,其原因在于侵蚀发生初期多以小跌口形式出现,随后随着侵蚀程度的加剧逐渐发生下切侵蚀和溯源侵蚀,造成崩塌导致细沟加宽,断续细沟溯源发展为连续细沟,细沟发育稳定^[19],导致梁峁坡侵蚀区域分布范围不断增大。第二次冲刷试验中,沟谷坡变化区域由 57.57%增加至 94.20%,这是由于沟头发生崩塌^[52],且崩塌产生的泥沙不断积聚于沟底,短时间内无法由水流携带搬运^[53],同时,沟底下切和沟壁下部凹穴扩大^[52],致使侵蚀沉积变化区域明显增大。

坡沟系统作为流域产沙的主要来源,精确量化其侵蚀产沙对流域水土流失控制和区域生态环境治理等具有重要意义。本研究验证了 TLS 在野外自然坡面的精度,基于地形变化监测方法不仅能够获取产沙,还可以获得沟道侵蚀发育过程。根据侵蚀沉积分布可确定出细沟分布位置,定量描述侵蚀沉积分布面积^[17],区分沟道发育阶段(活跃期或稳定期),这对于侵蚀产沙机理深入理解及侵蚀产沙过程模型的构建具有重要意义。

5 结论

(1) 地面点云生成 DEM 这一过程中误差为 5.9 mm(5.7~6.1 mm)。在累积场次中,DoD 的不确定误差为 16.5 mm(16.2~16.8 mm);在单场次中,不确定性误差为 16.4 mm(16.2~16.6 mm)。

(2) TLS 可用于监测坡沟系统累积场次侵蚀产沙,但单场次监测误差较大。单场次试验中,梁峁坡、沟谷坡和坡沟系统的 TLS 监测产沙和实测产沙间的线性关系均不显著($R^2 < 0.57$, $p > 0.05$),相对误差的平均值(范围)分别为 83.70%(4.08%~190.40%),91.41%(0.95%~225.09%)和 87.58%(4.09%~215.55%),而在累积场次中,3 种地貌下 TLS 监测产沙和实测产沙间的线性关系显著($R^2 > 0.9$, $p < 0.05$),相对误差的平均值(范围)分别为 52.63%(26.06%~106.98%),56.68%(30.26%~75.49%)和 56.28%(33.37%~73.28%)。同时,在累积场次中,相比梁峁坡结果,沟谷坡监测误差波动较小。因而, TLS 更适合于监测累积场次的坡沟系统。

(3) 随着冲刷试验次数的增加,梁峁坡、沟谷坡

和坡沟系统 3 种地貌单元侵蚀产沙均呈增长趋势,而沟谷坡和坡沟系统沉积量快速增长后趋于平稳。梁峁坡侵蚀主要分布在梁峁坡上中部,沉积主要分布在梁峁坡中下方,沟谷坡侵蚀严重,沉积主要分布在沟底。梁峁坡与沟谷坡侵蚀区面积均远高于沉积区域,其侵蚀区在地形变化区域的面积占比分别为 79.74%~97.00%和 79.33%~80.23%。

参考文献:

- [1] 张素,熊东红,吴汉,等.基于 RUSLE 模型的孙水河流域土壤侵蚀空间分异特征[J].水土保持学报,2021,35(5):24-30.
- [2] Li P F, Mu X M, Joseph H, et al. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017,170:17-30.
- [3] Zhao G J, Gao P, Tian P, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020,185:104284.
- [4] Wang H, Wang J, Zhang G H. Impact of landscape positions on soil erodibility indices in typical vegetation-restored slope-gully systems on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2021,201:105235.
- [5] 苏远逸,李鹏,李占斌,等.坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):32-39.
- [6] 王承书,高峰,孙文义,等.黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J].生态学报,2021,41(8):3111-3122.
- [7] Li P F, Hao M K, HU J F, et al. Spatiotemporal patterns of hillslope erosion investigated based on field scouring experiments and terrestrial laser scanning [J]. *Remote Sensing*, 2021,13(9):1674.
- [8] 张凯,王瑄,周丽丽,等.径流冲刷条件下冻融坡面产沙时空分布[J].水土保持学报,2017,31(5):139-144.
- [9] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope [J]. *Geomorphology*, 2000,32(3):385-415.
- [10] Rejman J, Brodowski R. Rill characteristics and sediment transport as a function of slope length during a storm event on loess soil [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005,30(2):231-239.
- [11] Miernecki M, Wigneron J P, Lopez-baeza E, et al. Comparison of SMOS and SMAP soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,154:89-101.
- [12] 韩鹏,倪晋仁,李天宏.细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J].应用基础与工程科学学报,2002,10(2):

- 115-125.
- [13] Wells R R, Momm H G, Rigby J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows[J]. *Catena*, 2013, 101: 114-121.
- [14] James L A, Watson D G, Hansen W F. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA[J]. *Catena*, 2007, 71(1): 132-144.
- [15] 肖海, 夏振尧, 朱晓军, 等. 三维激光扫描仪在坡面土壤侵蚀研究中的应用[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 198-200.
- [16] 游智敏, 伍永秋, 刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 91-94.
- [17] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探: 以东北漫川漫岗黑土区为例[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 16-19, 41.
- [18] Chico G, Clutterbuck B, Midgley N, et al. Application of terrestrial laser scanning to quantify surface changes in restored and degraded blanket bogs[J]. *Mires and Peat*, 2019, 24(14): 1-24.
- [19] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 48-59, 116.
- [20] Passalacqua P, Belmont P, Staley D M, et al. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 148: 174-193.
- [21] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2): 32-37, 46.
- [22] 赵龙山, 侯瑞, 吴发启. 黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望[J]. *中国水土保持*, 2017(9): 47-51, 67.
- [23] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 204-211.
- [24] 谢谟文, 胡嫚, 杜岩, 等. TLS 技术及其在滑坡监测中的应用进展[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 8-15.
- [25] 朱建东, 吴礼舟, 李绍红, 等. 2 种雨型的黄土坡面侵蚀室内试验[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 92-98.
- [26] 付金霞, 王静, 张宝利, 等. 砒砂岩原状坡面不同季节复合侵蚀动力的贡献研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 66-73.
- [27] 党维勤, 党恬敏. 辛店沟水土保持科技示范园景观资源及其美学意境分析[C]//2015 海峡两岸水土保持学术研讨会论文集(上), 中国山西太原, 2015.
- [28] 王伟, 李志能, 李鹏, 等. 连续极端暴雨事件下小流域侵蚀泥沙流失规律研究[J]. *西安理工大学学报*, 2020, 36(3): 286-293.
- [29] 杨帆, 潘成忠. 黄土丘陵沟壑区多年生草地的保水固土效益[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 300-306.
- [30] Sun W, Shao Q, Liu J, 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.
- [31] Gong J G, Jia Y W, Zhou Z H, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 203-213.
- [32] Girardeau-Montaut D, Roux M, Marc R, et al. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner[C]//International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Germany, 2005.
- [33] Barnhart T, Crosby B. Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik River, Alaska[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 2813-2837.
- [34] Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3 D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z) [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 82: 10-26.
- [35] Wheaton J M, Brasington J, Darby S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(2): 136-156.
- [36] Nourbakhshbeidokhti S, Kinoshita A, Chin A, et al. A Workflow to estimate topographic and volumetric changes and errors in channel sedimentation after disturbance[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 586.
- [37] Milan D J, Heritage G, Hetherington D. Application of a 3 D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(11): 1657-1674.
- [38] Milan D J, Heritage G, Large A R G, et al. Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 160-171.
- [39] Lane S, Westaway R M, Hicks M. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(3): 249-271.
- [40] Collins B D, Corbett S C, Fairley H C, et al. Topographic change detection at select archeological sites in

- Grand Canyon National Park, Arizona, 2007—2010 [R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2012.
- [41] Cavalli M, Goldin B, Comiti F, et al. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models[J]. *Geomorphology*, 2017,291:4-16.
- [42] Lane S, Westaway R M, Hicks M. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003,28(3):249-271.
- [43] Wheaton J M, Brasington J, Darby S E, et al. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009,35(2):136-156.
- [44] Rengers F K, Tucker G E, Moody J A, et al. Illuminating wildfire erosion and deposition patterns with repeat terrestrial lidar [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2016,121(3):588-608.
- [45] 朱建东,吴礼舟,李绍红,等.2 种雨型的黄土坡面侵蚀室内试验[J].*水土保持学报*,2019,33(6):92-98.
- [46] Winiwarter L, Anders K, Höfle B. M3 C2-EP:Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021,178:240-258.
- [47] Abellán A, Jaboyedoff M, Oppikofer T, et al. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to a rockfall event [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009,9(2):365-372.
- [48] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄丘区坡沟系统不同时间尺度下的侵蚀产沙特征[J].*水利学报*,2013,44(11):1347-1351.
- [49] Li M, Yao W Y, Ding W F, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009,19(3):321-330.
- [50] 杨春霞,李莉,王佳欣,等.坡沟系统侵蚀时空分布特征试验研究[J].*人民黄河*,2017,39(1):95-97.
- [51] 丁文峰,李勉,张平仓,等.坡沟系统侵蚀产沙特征模拟试验研究[J].*农业工程学报*,2006,22(3):10-14.
- [52] 张光辉.切沟侵蚀研究进展与展望[J].*水土保持学报*,2020,34(5):1-13.
- [53] Allen P M, Arnold J, Auguste L, et al. Application of a simple headcut advance model for gullies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017,43(7):202-217.
- ~~~~~
- (上接第 12 页)
- [22] 彭燕,何国金,张兆明,等.中国区域 Landsat 遥感指数产品 [J].*中国科学数据:中英文网络版*,2020,5(4):83-90.
- [23] Yang J, Huang X. 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.
- [24] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J].*资源科学*,2003,25(1):35-41.
- [25] Williams J R, Dyke P T, Jones C A. EPIC: A new method for the effects of erosion on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983,38(5):553-572.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 秦伟,朱清科,张岩.基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J].*农业工程学报*,2009,25(8):157-163.
- [29] 闫瑞,张晓萍,李够霞,等.基于 RUSLE 的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J].*水土保持学报*,2017,31(4):32-37.
- [30] 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.