

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.044.

刘旦旦, 刘亚, 夏小林, 等. 安徽省重点水土流失区土壤可蚀性 K 值评估与修正[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 148-154.

Liu Dandan, Liu Ya, Xia Xiaolin, et al. Evaluation and Correction of Soil Erodibility K Value in the Key Soil Loss Areas of Anhui Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 148-154.

安徽省重点水土流失区土壤可蚀性 K 值评估与修正

刘旦旦^{1,2}, 刘亚³, 夏小林^{1,2}, 刘刚^{3,4}

(1. 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000; 2. 安徽省(水利部 淮河水利委员会)

水利科学研究院(安徽省水利工程质量检测中心站), 合肥 230088; 3. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院
(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 4. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 评估不同土壤可蚀性 K 值计算方法在安徽省重点水土流失区的有效性, 并基于实测可蚀性 K 值校正各计算方法。[方法] 应用 Nomo 方程、修正 Nomo 方程、EPIC 模型、DG 模型及 Torri 模型估算各径流小区土壤可蚀性 K 值, 并基于霍山县、广德县、岳西县及歙县四地的径流小区监测资料, 获取真实土壤可蚀性 K 值, 以评估各方法的有效性。[结果] 霍山县、广德县、岳西县及歙县土壤可蚀性 K 值分别为 $0.033 \sim 0.035$, 0.018 , 0.021 , 0.041 ($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$) / ($\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$)。不同方法计算的土壤可蚀性 K 值差异较大且都远远高估了实测值, 整体表现为 $K_{\text{Torri}} > K_{\text{Nomo}} > K_{\text{M-Nomo}} > K_{\text{DG}} > K_{\text{Epic}}$ 。校正后的各可蚀性 K 值计算方法较之前均有很大改进, 其中校正后的 Nomo 方程及修正 Nomo 方程具有较高的性能。[结论] 校正后的 Nomo 方程及修正 Nomo 方程被推荐在安徽省重点水土流失区使用。

关键词: 水土流失; 土壤可蚀性; 径流小区; 安徽省

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0148-07

Evaluation and Correction of Soil Erodibility K Value in the Key Soil Loss Areas of Anhui Province

Liu Dandan^{1,2}, Liu Ya³, Xia Xiaolin^{1,2}, Liu Gang^{3,4}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources, Bengbu, Anhui 233000,

China; 2. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission,

Ministry of Water Resources, Hefei 230088, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science

and Engineering / Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to assess the accuracy of soil erodibility K calculated by different methods in the key soil loss areas of Anhui Province, and to refine each calculation method based on the measured erodibility K . [Methods] The Nomo equation, modified Nomo equation, EPIC model, DG model and Torri model were utilized to estimate the soil erodibility K values. Based on monitoring data from runoff plots in Huoshan County, Guangde County, Yuexi County and She County, the actual erodibility factor K values were obtained to evaluate the effectiveness of each method. [Results] The soil erodibility K values in Huoshan County, Guangde County, Yuexi County and She County were $0.033 \sim 0.035$, 0.018 , 0.021 and 0.041 ($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$) / ($\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$), respectively. The differences in soil erodibility K values derived from different methods were significant, with all methods greatly overestimating the K values. The overall ranking of the methods in terms of soil erodibility followed the order: $K_{\text{Torri}} > K_{\text{Nomo}} > K_{\text{M-Nomo}} > K_{\text{DG}} >$

收稿日期: 2023-12-17

修回日期: 2024-01-25

资助项目: 安徽省自然科学基金水科学联合资助项目(2308085US14); 水利水资源安徽省重点实验室开放研究资助项目(2023SKJ03); 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院青年科技创新计划项目(KY202102, KY202304)

第一作者: 刘旦旦(1987—), 女, 甘肃省天水人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持与水生态方面的研究。E-mail: 378125135@qq.com

通信作者: 刘刚(1982—), 男, 陕西西安人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: gliu@foxmail.com

<http://stbcj.paperonice.org>

K_{Epic} . The methods of calculating K values for each were improved, in which the improved Nomo equation and the modified Nomo equation showed superior performance. [Conclusion] The improved Nomo equation and modified Nomo equation are recommended to apply in the key soil loss areas of Anhui Province.

Keywords: soil and water loss; soil erodibility; runoff plot; Anhui Province

土壤侵蚀是世界性的环境问题,主要表现为土地资源退化、土地生产力下降、面源污染、破坏生物环境、威胁物种多样性及人类生产、生活安全问题^[1-2]。量化估算区域土壤侵蚀速率可为水土保持规划及相关工作提供基本指导,因此世界各国对土壤侵蚀建模及量化方面展开了大量研究。

土壤侵蚀本质上是土壤在外界侵蚀营力下发生的分离、搬运及沉积过程^[3],在此过程中,土壤内在性质对侵蚀的发生发展具有重要作用。因此,如何定量表征土壤对侵蚀的敏感程度即土壤可蚀性对侵蚀模型的构建、发展及应用至关重要。理论上,修建标准径流小区,通过监测多年降雨、径流泥沙数据来计算土壤可蚀性是最标准且准确的方法^[4]。然而,田间的长期观测往往是耗时耗力的,较难落实。因此,研究者们期待使用一些易测定的土壤理化性质来量化土壤对侵蚀的敏感性。在早期的研究中,多使用单一指标来表征土壤可蚀性,如黏粒比、粉砂含量、饱和导水率及静水崩解速率等^[5-7]。然而,土壤可蚀性本质上是土壤内在性质对外营力(雨滴打击、降雨特征、地表径流和壤中流等),气候因素以及人为干扰等综合作用的集中反映。因此,不能简单地由某一土壤理化性质的测定来表示土壤可蚀性。鉴于此,Wischmeier等^[8]基于美国中西部地区55种土壤的长期径流小区观测资料,提出了一个包含土壤质地、结构、有机质含量及入渗性能的土壤可蚀性 K 值估算方程(Nomo 方程),并给出了便于直接查询的土壤可蚀性 Nomo 图。Nomo 方程被 Universal Soil Loss Equation (USLE)采用,并在后期的 Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE 2) 中修正了部分因子的计算,是目前广为接受的土壤可蚀性估算方法^[9]。此外,Sharply等^[10]开发了一种土壤可蚀性预报模型——侵蚀/生产力影响模型(Erosion Productivity Impact Calculator, EPIC),提供了一种参数相对简单的土壤可蚀性计算方法,在目前应用较为广泛。值得注意的是,以上土壤可蚀性计算方法仅仅是由区域降雨、径流泥沙等监测资料拟合的经验关系,当应用到不同区域时,可能会发生明显的偏差。近来的一些研究也表明了经验公式计算的土壤可蚀性与实测土壤可蚀性间的差异,进而导致了区域土壤侵蚀估算的误差^[11]。

皖西大别山区及皖东南低山丘陵区仅占全省面积的

37.62%,然而其水土流失面积却占全省的 71.43%^[12],既涉及国家重点生态功能区,也属于国家级水土流失重点预防区。实现土壤侵蚀的精确评估,对该区水土流失防治与水生态建设具有科学指导作用,对促进生态强省具有现实意义。尽管已有研究使用侵蚀模型量化评估了该区土壤侵蚀的时空变化^[13],但由于没有进行足够的验证或校正而被直接应用,使得估算结果的精度无法保证。因此,本研究依托安徽省水土保持监测站点,根据实测降雨—径流泥沙数据及土壤理化性质,旨在对该区的土壤可蚀性 K 值进行适用性评价及修正,以期对该区土壤侵蚀的量化及水土保持工作的开展提供理论支撑。

1 材料与方法

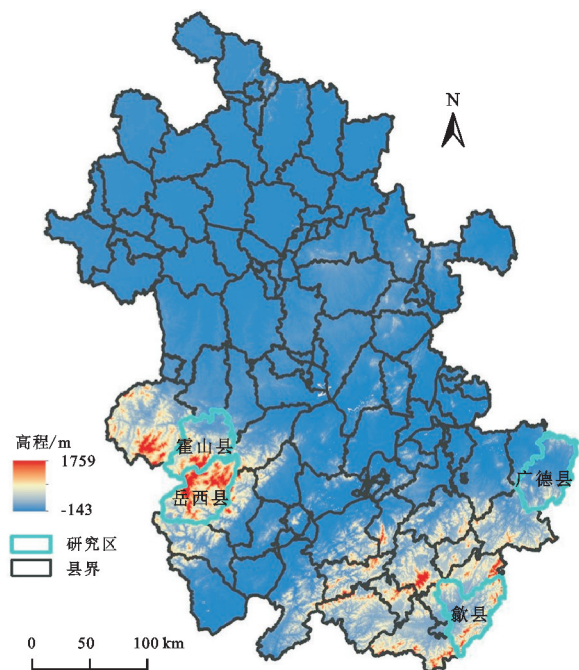
1.1 研究区概况

皖西大别山区位于安徽省西南部,行政区划涉及2市9个区(市、县),土地总面积 21 566 km²,水土流失面积为 3 545.95 km²。该区属亚热带湿润区和暖温带半湿润区的过渡地带,年平均气温 14~15℃,年降水量 1 250~1 400 mm,地带性土壤包括黄棕壤、黄红壤和山地草甸土。皖东南低山丘陵区位于安徽省东南部,行政区划涉及4市19个区(市、县),土地总面积 31 137 km²,水土流失面积为 4 803.29 km²。该区属北亚热带向中亚热带过渡地带,年平均气温 15.4~16.3℃,年降水量 1 200~1 700 mm,地带性土壤包括红壤(黄红壤)、黄壤、暗黄棕壤、山地草甸土和酸性棕壤。皖西大别山及皖东南低山丘陵区是安徽省暴雨中心,每年夏季的大量降雨导致该区土壤侵蚀严重,对安徽省的生态文明发展造成重要影响。

依托安徽省水土保持监测试验站,分别选择霍山(HS-1, HS-2),广德(GD)、岳西(YX)、歙县(SX)作为试验区,各试验区位置见图1,各试验区径流小区基本情况见表1。

1.2 样品的采集与分析

在各径流小区以5点法采集表层0—20 cm土壤样品,混合均匀在室内风干。使用吸管法测定土壤颗粒组成,使用高锰酸钾氧化法测定土壤有机质含量,各径流小区土壤基本理化性质见表2。于2011—2016年对各径流小区的径流泥沙进行监测,记录径流泥沙量。



注:该图基于审图号为 GS(2022)1873 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

1.3 土壤可蚀性的估算

本研究拟采用应用较为广泛的 5 种可蚀性估算方法,以评估这些方法在皖西大别山区及皖南低山丘陵区的有效性,具体如下:

$$K_{\text{Nomo}} = [0.1317 \times 2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - \text{SOM}) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)] / 100 \quad (1)$$

表 1 试验径流小区基本情况

Table 1 Basic information about the experiment runoff plots

试验站名称	纬度 N	经度 E	土壤类型	小区编号	小区尺寸/(m×m)	坡度/(°)	土地利用类型
霍山	31°08'43"	115°59'9"	黄棕壤	HS-1	20 m×5 m	15°	作物油菜
				HS-2	20 m×5 m	5°	作物红芋
广德	30°41'23"	119°15'40"	黄棕壤	GD	20 m×5 m	15°	作物小麦
岳西	30°50'00"	116°21'00"	黄棕壤	YX	20 m×5 m	23°	作物玉米
歙县	29°58'09"	118°40'39"	黄壤	SX	20 m×5 m	15°	作物小麦

表 2 土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil

土壤/性质	HS-1	HS-2	GD	YX	SX
黏粒含量(<0.002 mm)	3.31	2.74	2.72	4.2	8.28
颗粒					
粉粒含量(0.002~0.05 mm)	51.49	46.27	47.85	44.5	72.91
组成/%					
极细砂含量(0.05~0.10 mm)	18.34	21.37	20.88	15.11	9.33
砂粒(不包括极细砂)含量(0.10~2.0 mm)	26.85	29.61	28.55	36.17	9.48
有机质含量/%	1.11	0.73	1.14	1.10	1.05

$$K_{\text{DG}} = 0.034 + 0.0387 \exp \left\{ -0.5 \left[\frac{\lg(\text{DG}) + 1.533}{0.7671} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

$$\text{DG} = \exp \left(0.01 \times \sum_{i=1}^n f_i \lg m_i \right) \quad (5)$$

式中: K_{DG} 为使用 DG 模型计算的土壤可蚀性值 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$;

式中: K_{Nomo} 为使用 Nomo 方程计算的土壤可蚀性值 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; $M = (\text{极细砂}(0.05 \sim 0.10 \text{ mm}) + \text{粉粒}(0.002 \sim 0.05 \text{ mm}) \times (100 - \text{黏粒}(<0.002 \text{ mm}))(\%))$; SOM 为有机质百分含量; S 为根据土壤团粒含量确定的土壤结构等级系数^[14], 本研究中 5 个径流小区的土壤结构等级系数均为 3; P 为根据土壤质地确定的土壤渗透等级系数^[14], 本研究中 HS-1, HS-2, GD, YX 及 SX 共 5 个径流小区的土壤渗透等级系数分别为 3, 3, 2, 3 及 2; 0.1317 为单位换算系数^[8]。

$$K_{\text{M-Nomo}} = [0.1317 \times 2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - \text{SOM}) + 3.25(2 - S) + 2.5(P - 3)] / 100 \quad (2)$$

式中: $K_{\text{M-Nomo}}$ 为使用修正后的 Nomo 计算的土壤可蚀性值 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; 该公式中调整了土壤结构的计算方法^[9]。

$$K_{\text{Epic}} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{Sand} \left(1 - \frac{\text{Silt}}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{\text{Silt}}{\text{Clay} + \text{Silt}} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25 \text{SOC}}{\text{SOC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{SOC})} \right) \left(1 - \frac{0.7 \text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SN}_1)} \right) \quad (3)$$

式中: K_{Epic} 为使用 EPIC 模型计算的土壤可蚀性值 $[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; Sand , Silt 和 Clay 分别为土壤砂粒(0.05~2.0 mm)、粉粒及黏粒含量(%); SOC 为土壤有机碳含量(%); $\text{SN}_1 = (1 - \text{Sand}) / 100$ ^[10]。

$\text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; DG 为土壤颗粒的几何平均直径(mm); f_i 为第 i 个粒径所占百分比(%); m_i 为 $i+1$ 与 $i-1$ 所对应粒径的平均值(mm)^[15]。

$$K_{\text{Torni}} = 0.0293(0.65 - D_g + 0.24 D_g^2) \times \exp[-0.0021 \text{SOM}/C - 0.00037(\text{SOM}/C)^2 - 4.02 + 1.72 C^2] \quad (6)$$

$$D_g = \sum_{i=1}^n f_i \ln \sqrt{(d_i d_{i-1})} \quad (7)$$

式中: K_{Torri} 为使用 Torri 模型计算的土壤可蚀性值 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$;C 为以小数计的土壤黏粒组分; d_i 与 d_{i-1} 为第*i*级土壤粒径的最大值与最小值(mm); d_{i-1} 的最小值为 0.000 05 mm^[16]。

1.4 土壤可蚀性的计算与比较

使用 USLE 方程计算土壤可蚀性 *K*, 如下:

$$K_{\text{实测}} = \frac{A}{RLSCP} \quad (8)$$

式中: $K_{\text{实测}}$ 为实测土壤可蚀性 *K* 值 $[(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$;A 为年均土壤流失量 $(\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;R 为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$,使用公式(9),(10)计算^[8];LS 为坡长坡度因子,使用刘宝元等^[17]改进的适用于中国陡坡地的公式(公式 11)计算;C 为覆盖—管理因子,根据各径流小区的管理记录,确定 HS-1,HS-2,GD,YX 及 SX 这 5 个径流小区的 C 值分别为 0.11,0.20,0.056,0.029 及 0.088;P 为水土保持措施因子,为 1。

$$R = \sum EI_{30} \quad (9)$$

$$E = \sum \{0.29[1 - 0.72\exp(-0.082i_r)]\} P_r \quad (10)$$

式中: E 为降雨动能 $(\text{MJ} \cdot \text{hm}^2)$; I_{30} 为最大 30 分钟降雨强度 (mm/h) ; i_r 为 r 时段的断点雨强 (mm/h) ; P_r 为 r 时段对应的降雨量 (mm) 。

$$LS = (L/22.13)^m (21.9\sin\theta - 0.96) \quad (11)$$

$$LS = (L/22.13)^m (10.8\sin\theta + 0.03) \quad (12)$$

式中: L 为坡长(m); θ 为坡度($^\circ$); m 为随坡度而变的系数,在本研究中为 0.5;公式(11)适用于坡度 $\geq 10^\circ$ 的径流小区,公式(12)适用于坡度 $\leq 5^\circ$ 的小区。

为评价不同土壤可蚀性计算方法在皖西大别山区及皖南低山丘陵区的适用性,使用决定系数(R^2)、模型效率系数(ME)、均方根误差(RMSE)和平均相对误差(AVE)对各方法进行检验。其中 R^2 及 ME

大于 0.7 表示效果良好,位于 0.5~0.7 之间表示效果可以接受;RMSE 及 AVE 越接近 0,表明该方法计算的 *K* 值越接近实测值^[18]。

2 结果与分析

2.1 降雨及侵蚀特征

2011—2016 年,霍山县、广德县、岳西县及歙县的降雨侵蚀力均值分别为 2 908.15,2 290.90,2 522.51,3 358.24 MJ·mm/(hm²·h·a)(表 3)。就平均降雨侵蚀力而言,歙县最大,广德县最小。5 个径流小区的土壤侵蚀模数介于 181.03~18 003.5 t/(km²·a),平均侵蚀模数为 3 013.25 t/(km²·a),远远大于当地容许土壤流失量 $[500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ ^[19]。由于降雨特征及小区坡度的差异,各径流小区土壤侵蚀规律不明显,但总体上表现为霍山县、歙县的侵蚀量高于广德县及岳西县。

2.2 实测土壤可蚀性

使用公式(8)计算各径流小区土壤实际土壤可蚀性 *K* 值,如图 2 所示。霍山县土壤可蚀性 *K* 值为 0.033~0.035 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm),广德县土壤可蚀性 *K* 值为 0.018 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm),岳西县土壤可蚀性 *K* 值为 0.021 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm),歙县土壤可蚀性 *K* 值为 0.041 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)。整体而言,土壤可蚀性 *K* 值表现为歙县>霍山县>岳西县>广德县。

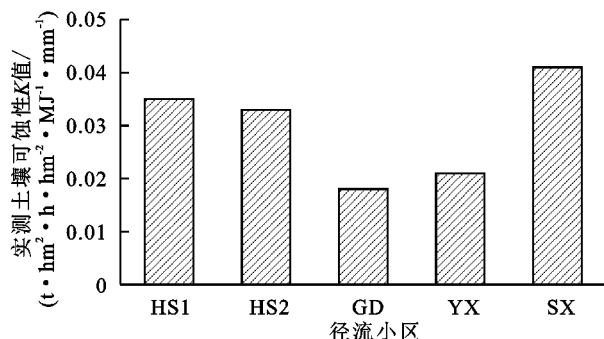
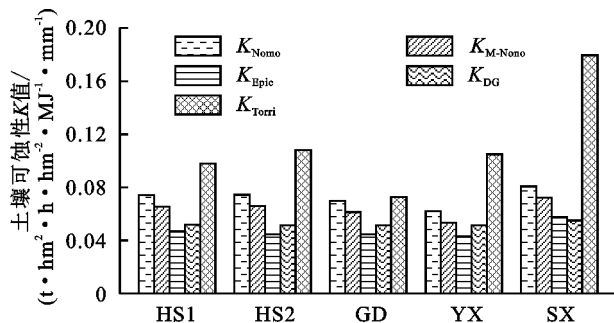
2.3 估算土壤可蚀性

使用不同方法计算各径流小区土壤可蚀性 *K* 值,如图 3 所示。Nomo 方程、修正的 Nomo 方程、EPIC 模型、DG 模型及 Torri 模型估算的土壤可蚀性 *K* 值分别为 0.062~0.081,0.054~0.072,0.043~0.058,0.051~0.055,0.073~0.18 (t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)。不同方法计算的土壤可蚀性 *K* 值差异较大,整体表现为 $K_{\text{Torri}} > K_{\text{Nomo}} > K_{\text{M-Nomo}} > K_{\text{DG}} > K_{\text{Epic}}$ 。

表 3 不同站点降雨侵蚀力及侵蚀模数

Table 3 Rainfall erosivity and erosion modulus at different sites

年份	指标	HS-1	HS-2	GD	YX	SX
2011	降雨侵蚀力/[(MJ·mm)/(hm ² ·h·a)]	1825.93	1825.93	3261.17	2950.00	3499.76
	侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	3910.13	2739.07	—	2271.74	18003.5
2012	降雨侵蚀力/[(MJ·mm)/(hm ² ·h·a)]	3138.37	3138.37	2250.49	2248.40	4486.72
	侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	1050.41	206.45	—	1652	770.1
2013	降雨侵蚀力/[(MJ·mm)/(hm ² ·h·a)]	4373.06	4373.06	2480.76	2221.72	2523.28
	侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	12336	957	562	—	592
2014	降雨侵蚀力/[(MJ·mm)/(hm ² ·h·a)]	2154.63	2154.63	2604.70	3952.09	2838.78
	侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	—	—	1530	—	1450
2015	降雨侵蚀力/[(MJ·mm)/(hm ² ·h·a)]	1326.40	1326.40	1790.82	1451.19	3442.68
	侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	—	—	1180	181.03	7070
2016	降雨侵蚀力/[(MJ·mm)/(hm ² ·h·a)]	4630.50	4630.50	1357.45	2311.68	4154.93
	侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	—	—	473.8	316.51	—

图 2 不同径流小区实测土壤可蚀性 K 值Fig. 2 Measured soil erodibility K values for different runoff plots图 3 不同方法计算的土壤可蚀性 K 值Fig. 3 Soil erodibility K values calculated by different methods

2.4 土壤可蚀性的验证

评估不同方法计算的土壤可蚀性 K 值的有效性,如图 4A—E 所示。 R^2 表明各计算 K 值与实测 K 值具有一定相关性,其中 Nomo 及修正的 Nomo 方程相关性最高,达到 0.73。然而, RMSE, ME 及 AVE 表明各计算 K 值与实测 K 值间的偏差,尤其是模型的 ME 均远小于 0,表明计算结果的不可信性。整体而言,各方法均高估了土壤可蚀性 K 值, Nomo 方程、修正的 Nomo 方程、EPIC 模型、DG 模型及 Torri 模型分别高估了 1.97~3.88, 1.76~3.41, 1.34~2.49, 1.34~2.86, 2.80~5.00 倍。

鉴于模型的较大误差,以各径流小区实测土壤可蚀性 K 值为基准,对各模型进行校正,如下所示:

$$K_{\text{实测}} = 1.21K_{\text{Nomo}} - 0.058 \quad (R^2 = 0.73, \text{ME} = 0.73, \text{RMSE} = 0.0045, \text{AVE} = -3.53\%) \quad (13)$$

$$K_{\text{实测}} = 1.21K_{\text{M-Nomo}} - 0.048 \quad (R^2 = 0.73, \text{ME} = 0.73, \text{RMSE} = 0.0045, \text{AVE} = -3.32\%) \quad (14)$$

$$K_{\text{实测}} = 1.22K_{\text{Epic}} - 0.029 \quad (R^2 = 0.56, \text{ME} = 0.56, \text{RMSE} = 0.0058, \text{AVE} = -4.69\%) \quad (15)$$

$$K_{\text{实测}} = 4.30K_{\text{DG}} - 0.20 \quad (R^2 = 0.49, \text{ME} = 0.49, \text{RMSE} = 0.0062, \text{AVE} = -5.41\%) \quad (16)$$

$$K_{\text{实测}} = 0.19K_{\text{Torri}} + 0.0084 \quad (R^2 = 0.59, \text{ME} = 0.59, \text{RMSE} = 0.0055, \text{AVE} = -4.72\%) \quad (17)$$

使用校正后公式计算的土壤可蚀性 K 值更接近实测值(图 4F)。此外,统计参数表明校正后的 Nomo 方程及修正 Nomo 方程具有较高的性能,因此被推荐在安徽省重点水土流失区应用。

3 讨论

不同地区土壤可蚀性表现为歙县>霍山县>岳西县>广德县。不同于 Wang 等^[20]的结论:土壤黏粒含量越高,可蚀性越小。在本研究中,尽管歙县土壤有相对较高的黏粒含量,但其可蚀性 K 值却最大。这可能因为歙县土壤有远高于其他土壤的粉粒含量(72.91%),粉粒既没有黏粒的高黏结性,相较于沙粒又更容易被搬运,进而影响坡面侵蚀。而广德土壤有机质含量最高,有利于团聚体的形成与稳定^[21],因此广德土壤的可蚀性最小。

土壤可蚀性作为侵蚀模型的必要参数,其计算的准确性显著影响模型精度。已有一些研究评估了使用不同方法计算土壤可蚀性的有效性,如 Zhang 等^[22]分析了诺谟方程、修正的诺谟方程及 EPIC 模型在东北黑土区的适用性;黄小芳等^[23]比较了使用不同方法计算的湖北省主要土壤可蚀性 K 值。但安徽省水土流失重点区域,如皖西大别山区及皖南山区等的土壤可蚀性仍缺乏研究。在本研究中,使用不同方法计算的土壤可蚀性 K 值具有明显差异,整体表现为 $K_{\text{Torri}} > K_{\text{Nomo}} > K_{\text{M-Nomo}} > K_{\text{DG}} > K_{\text{Epic}}$ (图 3)。就统计参数而言,相较于 EPIC, DG 及 Torri 模型, Nomo 方程及修正后的 Nomo 方程计算的土壤可蚀性与实测值具有较好的相关性($R^2 = 0.73$)。这可能由于 Nomo 方程综合考虑了多方面因素对坡面侵蚀的影响,尤其是土壤结构。Liu 等^[21]的研究发现,相对于质地,土壤结构尤其是团聚体稳定性主导坡面侵蚀过程。因此,考虑了土壤结构的 Nomo 方程及修正后的 Nomo 方程表现出较优越的性能。然而, RMSE, ME 及 AVE 却表明了 5 种模型计算的土壤可蚀性值均有较大误差。一方面,这些模型是依据当地条件建立的经验公式,当应用到其他地区时由于水、热及土壤类型的不同,拟合公式的经验关系可能发生变化^[7,23]。另一方面尽管 Nomo 方程考虑了土壤结构,但其对土壤结构进行分级赋值,而不是使用具体的量化指标(如团聚体稳定性等),这可能会导致具有不同团聚体稳定性的土壤却具有相同的土壤结构等级。

此外,与张科利等^[24]的结论一致,本研究也发现

模型估算的土壤可蚀性远远大于实测值。Nomo 方程、修正的 Nomo 方程、EPIC 模型、DG 模型及 Torri 模型分别高估了 1.97~3.88,1.76~3.41,1.34~2.49,1.34~2.86,2.80~5.00 倍。这表明在使用 USLE 系列模型估算区域土壤侵蚀时,若未对土壤可蚀性 K 进行修正,可能会表现为对区域土壤侵蚀的高估,进

而影响后续水土保持工作的开展与规划。基于此,本研究通过线性回归对各模型进行校正。统计参数表明校正后的模型性能有大大提升,尤其是校正后的 Nomo 方程,其精度达到了满意的程度。然而,由于数据的限制,校正后的方程应在区域尺度上进行更多的检验与改进,以期减小模型误差。

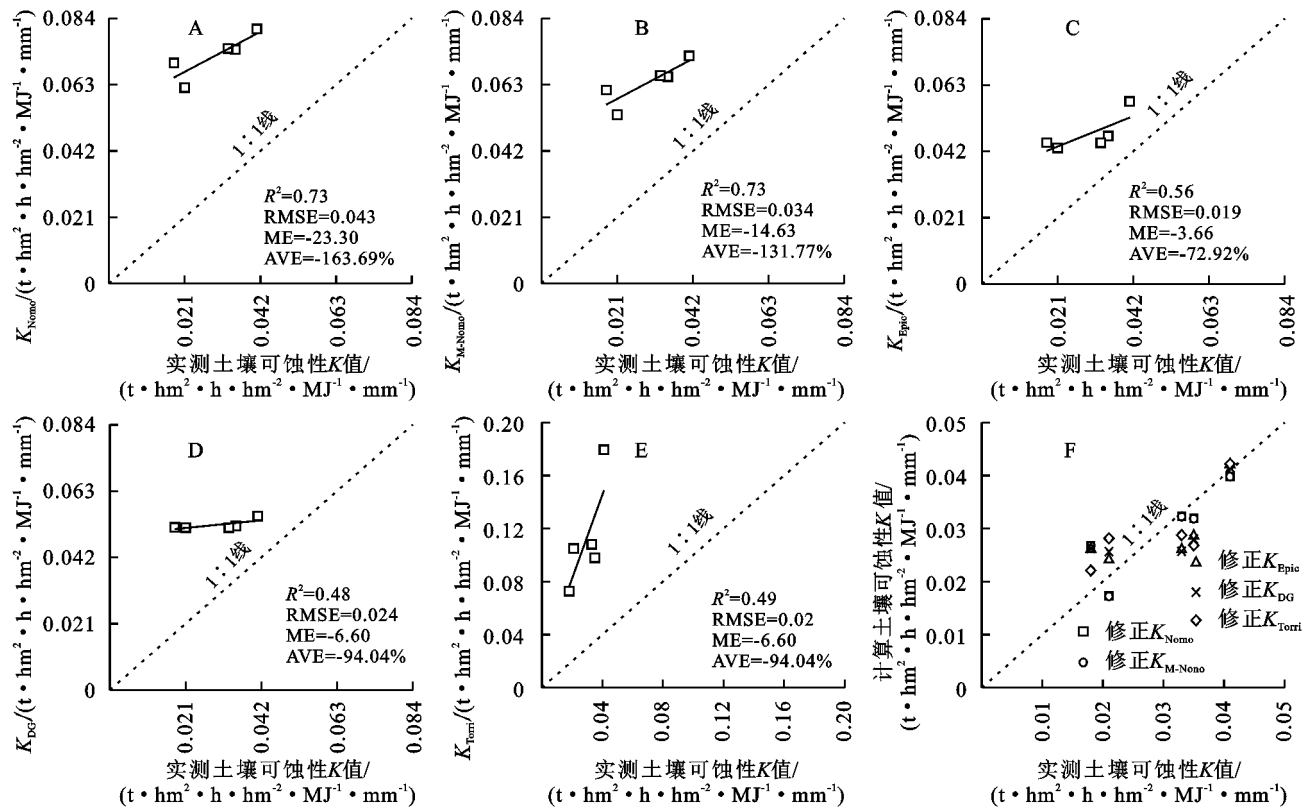


图 4 实测土壤可蚀性 K 值与预测值比较

Fig. 4 Comparison of measured and predicted soil erodibility K values

4 结论

土壤可蚀性 K 值计算的准确与否,严重影响着区域侵蚀模型的估算精度。为评估目前主流土壤可蚀性 K 值计算方法在皖西及皖南山区的适用性,以径流小区实测土壤可蚀性 K 值为基准,验证了 Nomo 方程、修正 Nomo 方程、EPIC 模型、DG 模型及 Torri 模型的有效性及精度。结果表明:不同方法计算的土壤可蚀性 K 值差异较大且都远远高估了实测值,Nomo 方程、修正的 Nomo 方程、EPIC 模型、DG 模型及 Torri 模型分别高估了 1.97~3.88,1.76~3.41,1.34~2.49,1.34~2.86,2.80~5.00 倍。使用回归分析校正了上述可蚀性计算模型,统计参数表明校正后各模型性能均有所提升,其中校正后的 Nomo 方程及修正 Nomo 方程被推荐在皖西大别山及皖南山区使用。研究结果可为安徽省土壤侵蚀的精确评估提供科学指导,但今后的研究中,应通过更多的径流小区实测数据来验证及改进本研究提出的校正公式。

参考文献 (References):

[1] 张科利,蔡强国,柯奇画.中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域[J].水土保持通报,2022,42(4):373-380.
Zhang K L, Cai Q G, Ke Q H. Major achievements and future key fields of soil erosion research in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 373-380.

[2] Jean P. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(1): 64-84.

[3] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报, 2020, 34(4): 21-30.
Zhang G H. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 21-30.

[4] 马春玲,焦峰,王飞,等.中国 USLE/RUSLE 因子研究 [J].水土保持研究,2023,30(1):430-436.
Ma C L, Jiao F, Wang F, et al. Review of studies on

- factors of USLE/RUSLE in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):430-436.
- [5] Bennett H H. Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperature American soils, with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties[J]. Soil Science, 1926,21(5):349-376.
- [6] Dong L B, Li J W, Zhang Y, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302: 113985.
- [7] 杨苗苗.全球土壤可蚀性因子(K)计算与砾石影响分析[D].西安:西北大学,2023.
Yang M M. Calculation of Soil Erodibility Factor (K) on a Global Scale And Analysis of the Effect of Rock Fragments on Soil Erodibility Factor[D]. Xi'an: Northwest University, 2023.
- [8] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning[M]. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978.
- [9] USDA Agriculture Research Service. Revised universal soil loss equation version2[EB/OL]. Washington D C: USDA-ARS, 2008. https://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/About_RUSLE2_Technology.htm, 2008-11-28.
- [10] Sharply A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator I, model documentation[J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990,4(4):206-207.
- [11] Ostovari Y, Ghorbani-Dashtaki S, Bahrami H A, et al. Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran[J]. Geomorphology, 2016,273:385-395.
- [12] 安徽省水利厅.安徽省水土保持公报(2022年)[R/OL]. <https://slt.ah.gov.cn/tsdw/swj/stbcjcyj/121838881.html>,2023-10-25.
Anhui Provincial Department of Water Resources. Soil and water conservation bulletin of Anhui province (2022)[R/OL]. <https://slt.ah.gov.cn/tsdw/swj/stbcjcyj/121838881.html>,2023-10-25.
- [13] 田昌园,张红丽,汪军红,等.近30年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].水土保持学报,2024,38(3):1-9.
Tian C Y, Zhang H L, Wang J H, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in dabie mountains of western anhui in recent 30 years. [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):1-9.
- [14] 郭乾坤,秦伟,宁堆虎,等.一般扰动地表土壤可蚀性因子增大系数[J].中国水土保持科学,2019,17(6):85-92.
Guo Q K, Qin W, Ning D H, et al. Enhancement coefficient of soil erodibility factor for general disturbed land surface[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6):85-92.
- [15] Shirazi M A, Boersma L, Hart J W. A unifying quantitative analysis of soil texture: Improvement of precision and extension of scale[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988,52(1):181-190.
- [16] Torri D, Poesen J, Borselli L. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset[J]. Catena, 1997,31(1/2):1-22.
- [17] Liu B Y, Zhang K L, Yun X. An empirical soil loss equation// proceedings of 12th International Soil Conservation Organization Conference, Vol. III. [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002:21-25.
- [18] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(3):885-900.
- [19] 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.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion: SL190-2007[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [20] 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.
- [21] Liu Y, Liu G, Xiao H, et al. Predicting the interrill erosion rate on hillslopes incorporating soil aggregate stability on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2023,622:129698.
- [22] Zhang K L, Yu Y, Dong J Z, et al. Adapting & testing use of USLE K factor for agricultural soils in China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019,269: 148-155.
- [23] 黄小芳.湖北主要监测点的土壤可蚀性特征及估算模型适用性评价[D].武汉:华中农业大学,2022.
Huang X F. Soil Erodibility Characteristics of Main Monitoring Points in Hubei and Applicability Evaluation of Estimation Model[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [24] 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 K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.