

陕西省耕地土壤可蚀性因子

张鹏宇^{1,3}, 王全九^{1,2}, 周蓓蓓¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 天津市碧波环境资源开发有限公司, 天津 300170)

摘要: [目的] 土壤可蚀性因子是计算土壤侵蚀的一个重要因子, 对陕西省耕地土壤可蚀性因子展开研究, 可为陕西地区的耕地土壤侵蚀计算及评价提供科学依据。[方法] 以陕西省9个地区的耕地土壤实测数据为基础, 利用通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation)、修订土壤流失方程 RUSLE2(revised universal soil loss equation version 2)、侵蚀生产力影响模型 EPIC(erosion productivity impact calculator)中可蚀性因子 K 值的计算公式以及几何平均粒径公式和几何平均粒径—有机质 Dg-OM 公式, 计算不同耕地土壤质地条件下的土壤可蚀性因子。[结果] RUSLE2 的极细砂粒转换公式在陕西黄土丘陵沟壑区平均低约 14.53%, 在陕南地区平均高约 32.91%, 使用修正公式后平均误差分别为 7.81% 和 13.14%; 对比分析 K 值的估算值与实测值, 子洲县实测 K 值为 $0.00269[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$, Dg-OM 模拟计算均值为 $0.0297[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$; 水蚀预报模型 WEPP(water erosion prediction project)中的细沟间可蚀性(K_i)和细沟可蚀性(K_r), 与 USLE 的 K 值相关系数分别为 0.738 6 和 0.607 4。[结论] 极细砂粒转换修正公式的计算误差小于 RUSLE2 模型; Dg-OM 模型适合陕西黄土丘陵沟壑区及长武县、杨凌区和安康市典型耕地土壤; WEPP 中 K_i 和 K_r , 当土壤砂粒含量小于 30%, USLE 的 K 值与 WEPP 的 K_i 和 K_r 值有强相关性。

关键词: 土壤可蚀性; 土壤侵蚀; 极细砂; USLE; WEPP; 黄土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0100-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 张鹏宇, 王全九, 周蓓蓓. 陕西省耕地土壤可蚀性因子[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 100-106. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.025

Cultivated Soil Erodibility in Shaanxi Province

ZHANG Pengyu^{1,3}, WANG Quanjiu^{1,2}, ZHOU Beibei¹

(1. Institute of Water Resources and Hydrologic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Tianjin Bibo Environmental Resources Development Limited Company, Tianjin 300170, China)

Abstract: [Objective] Soil erodibility is a key factor of calculating the soil erosion, and the investigation of cultivated soil erodibility provide the scientific basic to calculate and evaluate soil erosion in Shaanxi Province. [Methods] The soil data was from nine experimental plots that distributed in Shaanxi Province of China. To calculate soil erodibility of these areas, we utilized five commonly used models, which are universal soil loss equation(USLE), revised universal soil loss equation version 2(RUSLE2), Erosion productivity impact calculator(EPIC), geometric mean diameter(Dg) and geometric mean diameter-organic matter(Dg-OM). [Results] The equation of very fine sand(VFS) in RUSLE2 underestimated 14.53% of VFS content in hilly area of Losses Plateau of Shaanxi Province and overestimated 32.91% of VFS content in the Southern Shaanxi Province. Based on the measured values, the revised equation reduced the average calculation error of VFS content to 7.81% and 13.14% respectively. Secondly, comparison of K values, the measured K value in Zizhou County is $0.00269[(t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$, the mean K value of Dg-OM model is

收稿日期: 2015-12-11

修回日期: 2016-01-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡地土壤养分随地表径流流失动力机制与模拟模型”(51239009)

第一作者: 张鹏宇(1985—), 男(汉族), 天津市人, 硕士生, 主要从事土壤坡面水蚀与土壤可蚀性研究。E-mail: 45734104@qq.com。

通讯作者: 王全九(1964—), 男(汉族), 内蒙古自治区人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: wquanjiu@163.com。

0.029 7[(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)]. Thirdly, the interrill erodibility(K_i) and rill erodibility(K_r) parameters in water erosion prediction project model(WEPP) were calculated and the correlation of erodibility parameter between K_i , K_r and K of USLE were 0.738 6 and 0.607 4. [Conclusion] The average calculation error of revised equation of very fine sand is less than the equation of very fine sand in RUSLE2. Dg-OM model was suitable for calculation the soil erodibility in hilly area of Losses Plateau of Shaanxi Province and the area of Changwu County, Yangling District and Ankang City. Moreover, K_i and K_r parameters in WEPP was found the good correlation of erodibility parameter between USLE and WEPP model when the sand content was less than 30%.

Keywords: soil erodibility; soil erosion; very fine sand; USLE; WEPP; loess

土壤侵蚀是全球重要的环境问题之一,会造成土地资源退化,同时径流所携带的大量泥沙和污染物对水质和河道运行安全也产生严重威胁,影响社会的安定以及可持续发展^[1-2]。因此对土壤侵蚀做定量评价,并发展相应的控制措施极其重要。由于土壤侵蚀是受一系列因子影响的复杂且多变的过程^[3],因此人们进行大量的试验研究,并提出了多种模型,如 USLE(universal soil loss equation)通用土壤流失方程^[4]、RUSLE2(revised universal soil loss equation version (2) 修订通用土壤流失方程^[5]、EPIC(erosion productivity impact calculator)侵蚀生产力影响模型^[6]等。美国农业部 1995 年发布了 WEPP(water erosion prediction project)模型^[7]。其中提出了表层土壤对集中水流的抵抗力,它将土壤被侵蚀的过程分成细沟侵蚀与细沟间侵蚀。由于细沟侵蚀与细沟间侵蚀的物理过程不同,WEPP 模型中使用细沟可蚀性(K_r),细沟间可蚀性(K_i)以及临界剪切力(τ_c)^[7],分别计算细沟土壤剥离率以及细沟间土壤分离率。这些模型均涉及了土壤可蚀性这一基础参数。土壤可蚀性代表了土壤在雨滴打击和径流冲刷等外营力作用下被分离、搬运的难易程度^[8],土壤本身的物理性质可以更好的定量描述土壤可蚀性^[9]。随着研究深入,人们根据不同土壤资料经过回归计算,提出了多种经验公式计算土壤可蚀性因子,如几何平均粒径 Dg 公式^[10]和几何平均粒径—有机质 Dg-OM 公式^[11],但这些公式间相互关系如何,仍需要进一步探讨。

中国陕西地区耕地土壤质地变化较大,尤其是侵蚀最强烈的黄土丘陵沟壑区存在许多坡耕地,其坡面陡峭,且侵蚀方式复杂多样^[12],土壤可蚀性的确定是用模型评价这一地区土壤侵蚀的难点。目前,许多学者在中国各地区按照 USLE 提出的方法进行了多年观测试验,获得大量土壤可蚀性数据^[13-16],为模型计算土壤可蚀性提供基础依据。张科利等^[14,17]通过在中国东北、北方、西南、西北和南方耕地土壤上建立试

验场测得各地区耕地的土壤可蚀性,分别建立了中国耕地的土壤可蚀性与 USLE,EPIC 和 Dg 公式的土壤可蚀性的经验关系,并提出了黄土高原地区的土壤可蚀性经验公式。王彬^[11,18]将有机质的影响加入到 Römken 的 Dg 公式的计算方法中,给出了适于中国地区的计算公式,并且指出 RUSLE2 模型适合计算东北黑土地地区的土壤可蚀性。近年来随着 3S 技术的普及,不断有学者将 3S 技术与土壤侵蚀模型结合对研究区域土壤侵蚀进行评价^[19],因土壤可蚀性对评价结果的重要影响,其计算公式的适用选择上提出了新的要求。

本文拟以陕西省土壤实测资料为基础,计算 USLE,RUSLE2,EPIC,Dg,Dg-OM 模型的土壤可蚀性因子,与实测值比较以确定陕西不同地区耕地土壤所适合的计算模型。同时,计算 WEPP 模型中的细沟可蚀性,细沟间可蚀性,分析这 2 个参量与 USLE 的土壤可蚀性因子之间可能存在的关系,为合理选择土壤可蚀性因子提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区土壤基本理化性质

本文选取陕西省 9 个地区作为研究对象,由北向南顺序依次为神木、米脂、安塞、宜川、洛川、长武、杨凌、商南、安康。于 2012—2013 年在 9 个地区典型耕地提取表层 0—50 cm 土样,试验地直接选用当地农耕地。每个试验地每隔 3 m 取一个点,共取 30 个采样点,按照 0—25,25—50 cm 这 2 个层次取土,将每个取样点取出的上下 2 层土样混合均匀后取 3 个重复测其均值作为 1 个样点数据,共计采样总数为 810 个。将试供土样风干后过 2 mm 土筛,用马尔文激光法测定土壤颗粒组成,利用重铬酸钾外加热法^[20]进行土壤有机碳含量的测定,利用盘式吸渗仪单盘径单负压法^[21]测定土壤饱和导水率,其土壤类型^[22]及土壤质地按美国农业部分级标准划分,详细结果见表 1。

表 1 土壤基本理化特性

| 土壤来源 (种类) | 土壤质地 | 土壤有机质含量/ (g · kg ⁻¹) | D ₅₀ / μm | 极细砂粒/% (0.05~0.1 mm) | 砂粒/% (0.05~2.0 mm) | 粉粒/% (0.002~0.05 mm) | 黏粒/% (<0.002 mm) | 导水率/ (mm · h ⁻¹) |
|--------------|------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 神木(绵沙土) | 粉壤土 | 5.63 | 39.29 | 22.11 | 35.10 | 51.89 | 13.01 | 314.10 |
| 米脂(黄绵土) | 粉壤土 | 11.41 | 42.74 | 23.90 | 36.58 | 53.09 | 10.33 | 107.88 |
| 安塞(黄绵土) | 粉壤土 | 18.20 | 35.46 | 18.58 | 29.15 | 58.04 | 12.80 | 146.40 |
| 宜川(黄绵土) | 粉壤土 | 5.04 | 21.76 | 11.10 | 15.62 | 63.77 | 20.61 | 104.40 |
| 洛川(黄绵土) | 粉壤土 | 12.56 | 19.82 | 9.11 | 13.60 | 65.01 | 21.39 | 195.60 |
| 长武(黑垆土) | 粉黏壤土 | 12.51 | 12.47 | 4.83 | 8.17 | 62.36 | 29.47 | 55.26 |
| 杨凌(塬土) | 粉黏壤土 | 17.73 | 12.68 | 4.85 | 10.18 | 58.45 | 31.38 | 23.40 |
| 商南(黄棕壤) | 粉壤土 | 10.04 | 28.34 | 14.68 | 30.69 | 55.50 | 13.81 | 14.52 |
| 安康(黄棕壤) | 粉黏壤土 | 21.64 | 12.75 | 4.99 | 12.85 | 59.44 | 27.71 | 19.50 |

1.2 可蚀性因子 K 值的计算公式

1.2.1 USLE 模型中的可蚀性因子 K 计算公式

USLE 模型中 K 值为土壤可蚀性因子,其单位为

$$K = \frac{[2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25(S_i - 2) + 2.5(P' - 3)]}{100} \quad (1)$$

$$M = (SIL + VFS) \times (100 - CLA) \quad (2)$$

式中:OM——土壤有机质百分含量(%);SIL——粉粒含量(0.002~0.05 mm)(%);VFS——极细砂粒含量(0.05~0.1 mm)(%);CLA——黏粒含量(<0.002 mm)(%);P'——土壤结构等级,因土壤样品均取自耕地,其土壤结构等级默认为 2^[23];S_i——土壤渗透性等级。

渗透性等级是指土壤剖面最低的饱和导水率,分为 6 个等级,其中 1 为快速(>150 mm/h),2 为中等

$$K = [k_i(12 - OM) + 3.25(2 - S_i) + 2.5(P' - 3)]/100 \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} k_i = k_b = \frac{[2.1[(SIL + VFS)(100 - CLA)]^{1.14}]}{10\ 000} & (SIL + VFS < 68\%) \\ k_i = k_b - [0.67(k_b - k_{168})^{0.82}] & (SIL + VFS > 68\%) \end{cases} \quad (4)$$

该公式由 USLE 中的公式修正而来,RUSLE2 中土壤结构等级对可蚀性因子的影响趋势与 USLE 相反^[24]。

$$K = [0.2 + 0.3e^{-0.0256SAN(1 - \frac{SIL}{100})}] \times (\frac{SIL}{CLA + SIL})^{0.3} \times [1 - \frac{0.25 C'}{C' + e^{(3.72 - 2.95 C')}}] \times [1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + e^{(22.9SN_1 - 5.51)}}] \quad (5)$$

$$SN_1 = 1 - \frac{SAN}{100} \quad (6)$$

式中:SAN——砂粒含量(%);C'——有机碳含量(%).

1.2.4 Dg 模型中可蚀性因子 K 值的计算公式 该公式最早由 Römken 根据美国 138 个土壤数据提出^[11],而后 Shirazi 根据世界 225 个土壤数据进行修正,建立了 Dg 模型^[26]。该模型仅需要几何平均粒径计算 K 值。对于多数土壤性质和资料不完整的情

(t · hm² · h)/(hm² · MJ · mm), 由 Wischmeier 等^[4]经过了大量实地试验,并在土壤可蚀性诺莫图的基础上给出了 K 值的计算公式:

至快(50~150 mm/h),3 为中等(15~50 mm/h),4 为慢至中等(5~15 mm/h),5 为慢(1~5 mm/h),6 为极慢(<1 mm/h)。

1.2.2 RUSLE2 模型中的可蚀性因子 K 本文 RUSLE2 的可蚀性因子 K 使用了修正的诺莫图,并考虑了土壤冻融、结皮、土壤水分、季节变化等因素^[5],修正了粉粒和极细砂含量大于 68% 时土壤 K 值的计算公式,改变了土壤结构等级在高沙量及高黏粒含量时的算法。具体公式如下:

1.2.3 EPIC 模型中可蚀性因子 K 计算公式 本文 EPIC 的土壤侵蚀模型中采用了 Williams 于 1995 年提出的公式^[25]:

况,这提供了一个很好的解决方法。

$$K = 0.003\ 4 + 0.038\ 7 \times \exp^{[-(\frac{1}{2}) \times (\frac{\lg_{10}(D_g) + 1.533}{0.7671})^2]} \quad (7)$$

Dg 的计算方法如下:

$$Dg = \exp(0.01 \times \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i) \quad (8)$$

式中:Dg——几何平均粒径(mm);f_i——土壤各粒级含量的百分权重(%);m_i——各土壤粒级粒径的算术平均数(mm)。

1.2.5 Dg-OM 模型中可蚀性因子 K 值的计算公式
该模型是由王彬根据中国可蚀性因子实测资料回归分析提出的计算模型,他发展了 Römken 的 Dg

$$K = 0.0364 - 0.0013 \left\{ \ln \left(\frac{OM}{Dg} \right) - 5.6706 \right\}^2 - 0.015 \times \exp[-28.9589 [\lg(Dg) + 1.827]^2] \quad (9)$$

式中:OM——有机质含量(%).下同。

1.2.6 WEPP 模型中的可蚀性因子计算 土壤可蚀性作为 WEPP 的重要参数,依据物理过程的不同,划分为细沟间可蚀性 K_i 、细沟可蚀性 K_r 。目前,通常将土壤分为沙土(砂粒体积分数 $\geq 30\%$)和黏土(砂粒体积分数 $< 30\%$)2组,并考虑农田土壤与牧场土壤的不同特性,分别计算和 K_i 和 K_r 。

对于农田土壤,当土壤砂粒含量大于 30%时,

$$K_i = 2.728 \times 10^6 + 1.921 \times 10^7 v_{fs} \quad (10)$$

$$K_r = 0.00197 + 0.03v_{fs} + 0.03863e^{-184OM} \quad (11)$$

砂粒含量小于 30%时:

$$K_i = 6.054 \times 10^6 - 5.513 \times 10^6 \quad (12)$$

$$K_r = 0.0069 + 0.134e^{-20C} \quad (13)$$

式中: K_i ——细沟间可蚀性[$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$]; K_r ——细沟可蚀性(s/m); v_{fs} ——极细砂含量(g/g); C ——黏粒含量(g/g)。

2 结果与分析

2.1 极细砂粒参数的转换

极细砂粒含量(VFS)对于 USLE, RUSLE2 及 WEPP 模型来说是必要的计算参数,但大多资料并不提供这一数值。在 RUSLE2 模型中,给出了砂粒含量和极细砂粒含量的经验关系:

$$f_{v_{fs}} = \left(0.74 - \frac{0.62f_{\text{sand}}}{100} \right) f_{\text{sand}} \quad (14)$$

式中: $f_{v_{fs}}$ ——极细砂粒含量(%); f_{sand} ——砂粒含量(%).但该公式是以美国土壤数据为基础进行开发,对于其他地区土壤适用性需要与实测数据进行对照。将本试验测得的砂粒和极细砂粒数据按照地域划分为黄土丘陵沟壑区和陕南地区 2 组,其中黄土丘陵沟壑区包括神木、米脂、安塞、宜川、洛川;陕南地区包括长武、杨凌、商南、安康。然后再均分这 2 组数据,首先用其中一组黄土丘陵沟壑区和一组山南地区数据建立 $f_{v_{fs}}$ 和 f_{sand} 的回归关系如图 1 所示。得到修正公式(16—17)分别为黄土丘陵沟壑地区与陕南地区的砂粒和极细砂粒转换关系式。

$$f_{v_{fs}} = 0.6333f_{\text{sand}} + 0.2853 \quad (R^2 = 0.9557) \quad (15)$$

$$f_{v_{fs}} = 0.4074f_{\text{sand}} + 0.4059 \quad (R^2 = 0.9035) \quad (16)$$

为验证公式是否符合陕西地区土壤砂粒和极细砂粒的转换,将另一组黄土丘陵沟壑区实测数据带入

模型公式,并将有机质含量参数引入模型^[12],其 K 值估算公式如下

公式(15)和(16),陕南地区数据带入公式(15)和(17)。计算结果误差对比如图 2 所示,RUSLE2 公式(15)在黄土丘陵沟壑区存在低估现象平均误差为 14.53%,在陕南地区存在高估现象平均误差为 32.91%,最大误差为 110.56%。

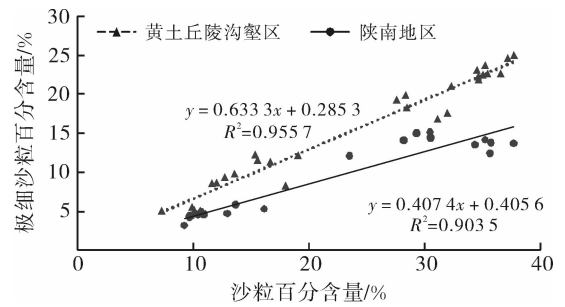


图 1 实测土壤砂粒与极细砂粒的相关关系

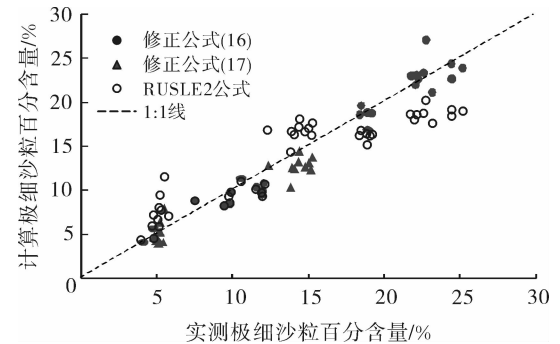


图 2 陕西地区极细砂粒估算值与实测值误差对比

使用修正公式(16—17)计算黄土丘陵沟壑区的平均误差为 7.81%,陕南地区平均误差为 13.14%。可见黄土丘陵沟壑区的修正公式(16)计算更为准确,而陕南地区的修正公式(17)偏差较大。造成这种结果的原因是陕南地区土壤质地类型差别很大,不同土壤类型的砂粒和极细砂粒含量之间很难找到一个可靠的经验关系进行描述,但修正公式的结果好于 RUSLE2 给出的经验关系。

2.2 可蚀性因子 K 值计算结果比较与适用性分析

K 值的计算采用 USLE 公式(1)、RUSLE2 公式(3)、EPIC 公式(6)、Dg 公式(8)以及 Dg-OM 公式(10),计算陕西 9 个地区的土壤可蚀性因子(表 2)。从各地区可蚀性因子分布来看,USLE 模型的计算结

果最大,其中杨凌、长武和安康用 USLE, RUSLE2 和 EPIC 计算的 K 值较为接近,可以认为对于杨凌的塬土、长武的黑垆土和安康的黄棕壤,这 3 种模型的计算区别不大。

除以上 3 个地区外,EPIC 模型的 K 值均小于

USLE, RUSLE2 的结果,但与 Dg 模型相近。而 Dg-OM 模型的估算值最小,这与张科利等实测黄土高原土壤可蚀性因子要低于 USLE, RUSLE2, EPIC 模型计算结果的结论相一致^[10,18]。

表 2 不同模型计算 K 值统计

($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$)/($\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$)

| 估算方法 | | USEL | | RUSLE2 | | EPIC | | Dg | | Dg-OM | |
|------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 地区 | 样本数 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| 神木 | 30 | 0.063 0 | 0.001 2 | 0.058 0 | 0.000 5 | 0.036 5 | 0.000 5 | 0.041 9 | 0.000 2 | 0.024 1 | 0.000 6 |
| 米脂 | 30 | 0.068 2 | 0.002 3 | 0.061 4 | 0.000 9 | 0.036 8 | 0.000 9 | 0.042 0 | 0.000 2 | 0.029 7 | 0.000 5 |
| 安塞 | 30 | 0.061 3 | 0.002 4 | 0.055 3 | 0.000 9 | 0.039 0 | 0.000 8 | 0.041 7 | 0.000 2 | 0.029 4 | 0.001 8 |
| 宜川 | 30 | 0.060 7 | 0.005 6 | 0.055 5 | 0.003 4 | 0.041 8 | 0.000 8 | 0.038 2 | 0.001 5 | 0.018 3 | 0.004 0 |
| 洛川 | 30 | 0.051 8 | 0.004 1 | 0.047 4 | 0.002 3 | 0.042 2 | 0.000 9 | 0.037 6 | 0.001 1 | 0.023 4 | 0.002 6 |
| 长武 | 30 | 0.043 3 | 0.003 4 | 0.042 8 | 0.003 0 | 0.042 0 | 0.000 7 | 0.032 9 | 0.001 6 | 0.033 5 | 0.002 1 |
| 杨凌 | 30 | 0.039 8 | 0.003 6 | 0.039 8 | 0.003 6 | 0.040 7 | 0.000 8 | 0.032 6 | 0.001 1 | 0.034 5 | 0.000 1 |
| 商南 | 30 | 0.066 6 | 0.001 8 | 0.066 4 | 0.000 6 | 0.038 0 | 0.000 8 | 0.041 5 | 0.000 2 | 0.024 1 | 0.001 7 |
| 安康 | 30 | 0.041 3 | 0.001 8 | 0.041 3 | 0.001 8 | 0.040 7 | 0.000 9 | 0.034 7 | 0.001 8 | 0.031 2 | 0.003 9 |

由于各模型大部分估算值之间差异较大,其适用性需要与实际值进行比较。根据已有黄土丘陵沟壑区耕地土壤可蚀性因子的实测文献资料^[18]与本试验测量的土壤数据相结合,对黄土丘陵沟壑区的土壤可蚀性因子进行适用性分析。现有文献中给出了安塞和子洲耕地 K 值实测值(表 3),对于典型黄土耕地,安塞的 K 值分布在 0.009 1~0.010 1,均值为 0.009 6;子洲的 K 值分布在 0.020 8~0.031 5,均值为 0.026 9。由 USLE, RUSLE2, EPIC, Dg, Dg-OM 模型计算的安塞 K 值均值分别为 0.061 3, 0.055 3,

0.039, 0.041 7, 0.029 4, 都远大于 0.009 6 的实测值,其中 Dg-OM 值为 0.029 4,虽然有实测值 3 倍大小,但其为 5 个模型中与文献实测资料最为接近的。子洲与米脂相邻,同处黄土高原腹地,其耕地土壤的可蚀性变化范围应不大,模型计算的米脂耕地土壤 K 值均值分别为 0.068 2, 0.061 4, 0.036 8, 0.042, 0.029 7,可以看出由 Dg-OM 模型得出的结果 0.029 7 与实测文献资料最为接近。由此说明对于计算典型的陕西黄土丘陵沟壑地区耕地土壤, Dg-OM 模型最为接近。

表 3 陕西黄土地区耕地土壤可蚀性实测值^[18]

| 项目 | 地区 | 小区号 | | | | | 均值 |
|---|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| K 值/ [$t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1})$] | 安塞 | 0.009 7 | 0.009 4 | 0.010 0 | 0.010 1 | 0.009 1 | 0.009 6 |
| | 子洲 | 0.031 5 | 0.024 9 | 0.020 8 | 0.030 6 | | 0.026 9 |

对于长武、杨凌、商南、安康等地,由于没有当地的实测文献资料,但现有中国实测土壤可蚀性值基本偏小于 USLE, RUSLE2, EPIC 的计算值^[14], Dg-OM 模型的计算值也偏小于 USLE, RUSLE2, EPIC 的计算值,可以认为相比 USLE, RUSLE2, EPIC 模型, Dg-OM 模型的计算值更加接近实测值。同时由于 Dg-OM 模型要求参数较少,易于计算,所以推荐在长武、杨凌、商南、安康地区使用 Dg-OM 公式计算土壤 K 值。

2.3 USLE 模型 K 值与 WEPP 模型 K_i, K_r 的关系分析

现有大量文献在利用 USLE 和 WEPP 模型来研究土壤侵蚀,而 WEPP 模型将可蚀性因子分为细沟可蚀性 K_r 与细沟间可蚀性 K_i 两个参数,所以 USLE 的 K 值与 WEPP 模型的可蚀性参数的物理意义不同,若能建立两模型的可蚀性参数关系,即可将这两模型的部分成果联系起来,在缺乏足够土壤资料的情形下使用模型。

利用 WEPP 模型 K_i 与 K_r 值计算公式(11—14) 计算 270 个土壤样本的 K_i 与 K_r 值,并对 K_i , K_r 与 USLE, EPIC 及 Dg-OM 模型 K 值进行相关分析。如表 4 所示, EPIC 模型计算出的 K 值与 WEPP 的可蚀性因子为负相关, 相关系数为 -0.6388 和 -0.7605 , 与缪驰远等^[27] 在福建省研究得出的无相关性结果不同。究其原因可能是土壤颗粒组成不同造成。在 WEPP 模型中对于高砂粒含量的土壤, 其

可蚀性值与极细沙含量有关, EPIC 模型中没有这一参数; WEPP 模型对于低砂粒含量的土壤, 其可蚀性值仅与黏粒含量有关, EPIC 模型也包含黏粒含量。相较于福建土壤, 陕西土壤的砂粒含量低, 因此黏粒含量能够成为联系两公式的参数, 使两者形成负相关。USLE 的 K 值与 WEPP 模型的 K_i , K_r 的相关系数分别为 0.7386 , 0.6074 , 说明有强相关性, 这与 Consuelo 根据南安第斯山脉的试验结果类似^[10]。

表 4 可蚀性 K 值及相关系数

| 地区 | $K_i /$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) | $K_r /$ ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) | $K_{\text{USLE}} /$ ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm})^{-1}$) | $K_{\text{EPIC}} /$ ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm})^{-1}$) | $K_{\text{Dg-OM}} /$ ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm})^{-1}$) |
|---------------------------------|--|---|---|---|--|
| 神木 | 6 977 252 | 0.022 3 | 0.063 0 | 0.036 5 | 0.024 1 |
| 米脂 | 7 319 190 | 0.013 8 | 0.068 2 | 0.036 8 | 0.029 7 |
| 安塞 | 5 348 336 | 0.017 2 | 0.061 3 | 0.039 0 | 0.029 4 |
| 宜川 | 4 917 771 | 0.009 1 | 0.060 7 | 0.041 8 | 0.018 3 |
| 洛川 | 4 874 769 | 0.008 8 | 0.051 8 | 0.042 2 | 0.023 4 |
| 长武 | 4 429 319 | 0.007 3 | 0.043 3 | 0.042 0 | 0.033 5 |
| 杨凌 | 4 324 021 | 0.007 2 | 0.039 8 | 0.040 7 | 0.034 5 |
| 商南 | 5 548 028 | 0.007 5 | 0.066 6 | 0.038 0 | 0.024 1 |
| 安康 | 4 526 348 | 0.007 4 | 0.041 3 | 0.040 7 | 0.031 2 |
| K_r, K_i 与 K 值计算 结果的相关系数 | | K_r K_i | 0.607 4 0.738 6 | $-0.638 8$ $-0.760 5$ | $-0.039 6$ 0.084 0 |

注: 每个地区样本数为 30 个, K_i, K_r, K 值为各地区平均值。

根据 USLE 的 K 值与 WEPP 模型的 K_i, K_r 值存在强相关性, 对两者关系进行具体分析。WEPP 模型在计算可蚀性值时, 以砂粒含量 30% 为界。将 270 个土壤样本按该标准分成 2 组计算, 当砂粒含量大于 30% 时, K_i 和 K_r 与极细砂和有机质含量有关, 计算结果显示 USLE 模型的 K 值与 WEPP 模型的 K_i 和 K_r 的拟合的相关系数仅为 $0.2251, 0.00001$; 而小于 30% 时, K_i 和 K_r 只与土壤的黏粒含量有关, 此时 2 个模型的可蚀性参数有相当好的拟合关系, 式(18, 19)。从计算砂粒含量小于 30% 结果看(图 3), 当 K 值较低时, K_i 与 K_r 值也较低, K 和 K_i 成线性关系, K 值随着 K_r 值先增大后减小, 在 K_r 为 0.013 附近出现拐点。在图 3 中, K 值在 $0.035 \sim 0.045$ 附近范围的点, 其黏粒含量较高。黏粒决定土壤的黏性程度, K_i 与 K_r 值会随着黏粒含量的增大而减小。USLE 模型中假定 K 值会随着粉粒含量的降低而降低, 间接说明其值会随着砂粒或黏粒的含量增大而降低。对于砂粒含量大于 30% 的情况, K_i 与 K_r 的计算公式(11—12) 不符合与黏粒的关系, 则其与 USLE 的结果无联系可寻。

$$K_{\text{USLE}} = 3 \times 10^{-8} K_i - 0.075 5$$

$$R^2 = 0.886 1 \quad (17)$$

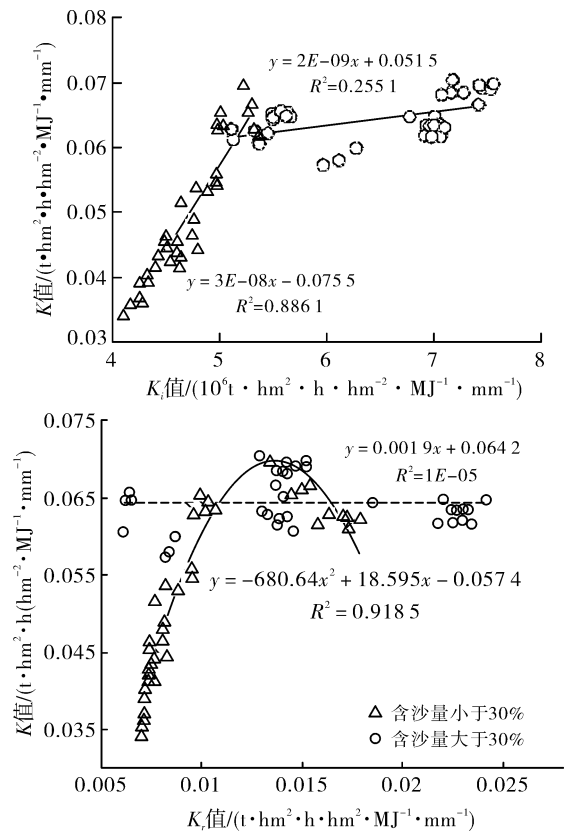


图 3 USLE 的 K 值与 WEPP 的 K_i 和 K_r 的关系(砂粒含量小于 30%)

$$K_{USLE} = -680.64K_r^2 + 18.595K_r - 0.0574$$

$$R^2 = 0.9185 \quad (18)$$

3 结论

(1) RUSLE2 的极细砂粒转换公式在陕西黄土丘陵沟壑区存在低估现象,平均误差在 14.53%,在陕南地区又存在高估现象,平均误差为 32.91%,最大误差达到了 110.56%。通过修正公式改进后误差分别在 7.81%和 13.14%。

(2) Dg-OM 模型 K 值计算方法适于陕西黄土丘陵沟壑区及长武、杨凌、商南、安康地区典型耕地土壤的可蚀性计算;

(3) USLE 模型的 K 值与 WEPP 模型中的 K_i 和 K_r 之间有较好的相关性,相关系数分别为 0.60, 0.73。进一步由数据得出,在砂粒含量小于 30%时,USLE 模型的 K 值与 K_i 和 K_r 之间存在趋势关系,且趋势符合土壤条件特性,证明在该条件下 2 个模型的参数可以用回归公式相互转换。

[参 考 文 献]

- [1] 唐科丽,史立人,史德明. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [2] 景可,王万忠,郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境[M]. 北京:科学出版社,2005:83-96.
- [3] 王彬,郑粉莉, Römken M J M. 水蚀过程的土壤可蚀性研究评述[J]. 水土保持研究,2013,20(1):277-286.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[M]. U. S. Government Printing Office, Washington D. C, USA: United States Department of Agriculture Agricultural Handbook, 537, 1978.
- [5] USDA-Agriculture Research Service, Revised Universal Soil Loss Equation2[M/OL]. (2013-12-05)[2015-12-12]. Http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=6010.
- [6] Sharply A N, Williams J R. EPIC:Erosion/Productivity Impact Calculator. Model Documentation[M]. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990.
- [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. Soil Erosion and Conservation(3rd ed)[M]. M A: Blackwell Publishing, 2005:116-149.
- [9] Romero C C, Stroosnijder L, Baigorria G A. Interrill and rill erodibility in the Northern Andean Highlands [J]. Catena, 2007,70(2):105-113.
- [10] Römken M J M, Roth C B, Nelson D W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977,41(5):954-960.
- [11] Wang Bin, Zheng Fenli, Römken M J M. Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database[J]. Soil and Plant Science, 2013,63(1):69-79.
- [12] 张科利,蔡永明,刘宝元,等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J]. 生态学报,2001,21(10):1689-1697.
- [13] 张科利,彭文英. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [14] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报,1992,12(4):1-9.
- [15] 金争平,史培军,候福昌,等. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [16] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J]. 水土保持通报,1999,19(1):1-9.
- [17] Zhang K, Li S, Peng W, et al. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004,76(2):157-165.
- [18] 王彬,郑粉莉,王玉玺. 东北典型薄层土壤可蚀性模型适用性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(6):126-131.
- [19] 梁伟. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀控制效果研究:以陕西省吴旗县柴沟流域为例[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [20] 林大仪. 土壤学试验指导[M]. 北京:中国林业出版社,2004.
- [21] 王琳芳. 盘式吸渗仪测定水力学参数方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.
- [22] 郭兆元,黄自立,冯立孝. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [23] Foster G P. Science documentation: Revised universal soil loss equation, Version 2 (RUSLE2)[Z]. USDA: Agricultural Research Service, Washington D C, 2005.
- [24] Williams J R. Computer models of watershed hydrology[M]. Water Resources Publications,1995.
- [25] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48(1):142-147.
- [26] 缪驰远,何丙辉,陈晓燕,等. USLE 与 WEPP 土壤可蚀性因子的关联性分析[J]. 中国水土保持,2004(6):23-25.