

紫色丘陵区几种土壤可蚀性  $K$  值估算方法的比较史东梅<sup>1</sup> 陈正发<sup>2</sup> 蒋光毅<sup>3</sup> 江 东<sup>3</sup>

(1 西南大学资源环境学院 2 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院 3 重庆市水土保持生态环境监测总站)

摘要: 土壤可蚀性  $K$  值可为当地土壤流失量预测和水土保持措施效应评价提供依据。采用 5 种土壤可蚀性  $K$  值估算方法对紫色丘陵区土壤可蚀性进行比较研究, 以筛选出符合该地区紫色土成土和侵蚀特点的土壤可蚀性估算方法。结果表明: 1) 对相同土壤母质和土地利用类型而言, 5 种土壤可蚀性估算方法的  $K$  值依次为:  $K_{\text{EPIC}} > K_{\text{修正诺谟}} > K_{\text{诺谟}} > K_{\text{Shirazi}} > K_{\text{Torri}}$ , 5 种估算方法  $K$  值差异显著, 其根本原因在于选择了不同的土壤理化性质指标作为  $K$  值估算基础。紫花苜蓿地土壤可蚀性  $K$  值最小, 说明选用紫花苜蓿等豆科植物作为坡耕地间、套作植物、绿篱建设植物, 可有效降低旱坡耕地的土壤侵蚀敏感性。2) 对相同土壤母质和土壤类型而言, 不同土地利用类型对土壤可蚀性估算方法的稳定性反应不同, 其敏感性大小为: 紫花苜蓿地 > 小麦地 > 桑林地, 对于存在经常性翻耕活动的各种坡耕地种植模式而言, 各种估算方法的稳定性差别不大。3) 在紫色丘陵区, 诺谟法和 EPIC 法估算的  $K$  值与标准值最为接近, 且对土壤理化性质变化具有一定敏感性, 因此在该地区进行土壤侵蚀敏感性评价和土壤流失量预测时, 可采用诺谟法和 EPIC 法进行  $K$  值估算。

关键词: 土壤可蚀性; 估算方法; 诺谟方程; EPIC 模型; 紫色丘陵区

中图分类号: S714.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2012) 01-0032-07

SHI Dong-mei<sup>1</sup>; CHEN Zheng-fa<sup>2</sup>; JIANG Guang-yi<sup>3</sup>; JIANG Dong<sup>3</sup>. **Comparative study on estimation methods for soil erodibility  $K$  in purple hilly area.** *Journal of Beijing Forestry University* (2012) 34(1) 32-38 [Ch, 27 ref. ]

1 College of Natural Resources and Environment, Southwest University, Chongqing, 400715, P. R. China;

2 Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., 650051, P. R. China;

3 Chongqing Municipal Ecological Environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, 401147, P. R. China.

Soil erodibility  $K$  value could provide an important basis for the prediction of local soil loss and for benefit evaluation of soil conservation measures. Five methods were used to estimate the soil erodibility  $K$  values of different cropping patterns in purple hilly area. The paper aims to select appropriate estimation methods for calculating  $K$  values, which could reflect the process of soil formation and erosion characteristics in the purple soil. Results showed that: 1) for the same soil parent material and land use types, the soil erodibility  $K$  values got by the five estimation methods could be lined in the order of  $K_{\text{EPIC}} > K_{\text{modified-nomo}} > K_{\text{nomo}} > K_{\text{Shirazi}} > K_{\text{Torri}}$ . The inherent differences among these  $K$  values were resulted from choosing varied soil physical and chemical properties as basic parameters for each estimation method. Soil erodibility  $K$  value of alfalfa was the smallest, indicating that alfalfa and other legumes were suitable plants for intercropping and alley cropping in local agricultural system on hillsides since they can effectively lower soil erosion sensitivity in this area. 2) For the same soil parent material and soil types, different land use types responded differently to the stability of estimation methods for  $K$  value, and the sensitivity order was alfalfa land > wheat land > mulberry land. Concerning the local cropping patterns with

收稿日期: 2011-05-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目( XDJK2009A002)、重庆市科委项目( CSTC2009AC1007)、重庆市水利局科技项目“重庆市土壤侵蚀模数研究”。

第一作者: 史东梅, 博士, 教授。主要研究方向: 土壤侵蚀与流域治理。电话: 13883159167 Email: shidm\_1970@126.com 地址: 400715 重庆市北碚区天生路 2 号西南大学资源环境学院。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

regular sloping land farming ,there was no distinct differences in the stability of estimation methods. 3) In the purple hilly area ,the estimated  $K$  values by nomograph model and EPIC model were close most to the standard value ,and also the two methods were sensitive to the changes in soil physical and chemical properties of this area. Therefore , nomograph model and EPIC model can be used to estimate soil erodibility  $K$  value when predicting soil loss amount and assessing soil erosion sensitivity in the purple hilly area.

**Key words** soil erodibility; estimation methods; nomograph model; EPIC model; purple hilly area

土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀敏感程度及土壤侵蚀预报模型(USLE/RUSLE)的重要量化参数,属于土壤侵蚀过程中土体抵抗力范畴。国外有代表性且应用广泛的有 Wischmeier 等<sup>[1]</sup>建立的土壤可蚀性诺谟方程和修正诺谟方程<sup>[2]</sup>、Williams 等<sup>[3]</sup>建立的 EPIC 模型(土壤侵蚀与土地生产力)中的计算方法、Shirazi 等<sup>[4]</sup>建立的几何平均粒径模型计算公式、Torri 等<sup>[5]</sup>建立的基于土壤理化性质非线性最佳拟合计算公式。这些土壤可蚀性估算方法自建立起,在土壤侵蚀敏感性评价、土壤流失量预测及水土资源利用等方面得到广泛应用。在实际应用中根据研究地点的土壤特性及土壤侵蚀特点分别采用不同的估算方法<sup>[6-7]</sup>,并对土壤可蚀性的时间、空间变化也进行了系统的分析<sup>[8-9]</sup>。在我国,具有土壤侵蚀预报价值的土壤可蚀性  $K$  值研究开始于 20 世纪 90 年代,在土壤可蚀性研究方法<sup>[10]</sup>、区域性土壤可蚀性特征<sup>[11-19]</sup>、土壤可蚀性实测法与估算法对比分析及两者的定量关系等方面<sup>[11,14,18]</sup>都进行了大量的研究工作,在研究手段方面既有基于径流小区观测资料的土壤可蚀性实测  $K$  值<sup>[11-12,15,17]</sup>,也有采用国际上通用的土壤可蚀性估算公式(基于土壤理化性质)估算  $K$  值<sup>[11,13-14,16-19]</sup>。目前  $K$  值实测方法多用于有长期定位观测资料的地区,而估算方法多用于无定位观测资料的地区,而对于特定地区土壤可蚀性时间、空间变化的分析和评价多采用估算方法。紫色土是侵蚀型的高生产力岩性土,以物理风化过程为主,成土速度很快(1 年左右可种植作物)<sup>[20]</sup>,紫色丘陵区土壤侵蚀和水土流失十分严重,典型地区土壤侵蚀模数为 3 798 ~ 9 831 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[21]</sup>,严重的土壤侵蚀是三峡库区紫色土坡地土壤退化的主

要原因,并由此造成土壤粗骨沙化、酸化和贫瘠化现象<sup>[22-23]</sup>。土壤可蚀性  $K$  值既是定量评价土壤抗侵蚀性的重要定量指标,也是基于 USLE/RUSLE 模型开展土壤侵蚀预测的重要参数。由于目前重庆市缺少长期性定位观测资料,本文选用国内外研究中常见的 5 种估算方法进行紫色土的土壤可蚀性  $K$  值研究,系统地分析了各种估算方法预测紫色土  $K$  值的特征,以现有紫色土  $K$  值为依据,筛选出符合紫色土成土特点和侵蚀特点的土壤可蚀性估算方法,可为当地土壤流失量实时预测和土壤侵蚀潜在危险性评价、水土保持措施布置提供应用参数,具有重要价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

研究区为重庆市西南大学水土保持教学试验基地,位于四川盆地东丘陵区,属亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 1 200 mm,5—9 月份的降雨量占全年的 70%,年均气温 18.3 ℃,年日照 1 276.7 h,无霜期年均约 334 d。紫色丘陵区坡耕地土壤以中生代侏罗纪沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的紫色土为主,土层厚度 30 ~ 50 cm。本研究的土壤样品分别取自野外径流小区的 4 种坡耕地种植模式和 3 种旱坡地的表层土壤。试验小区为标准径流小区,坡度均为 15°,小区规格为 5 m × 20 m,坡向均处在西南面上。3 种旱坡地均与径流小区处在同一坡向上,各种旱坡地种植模式的特点和种植环境如表 1 所示。采样点的土壤类型均为紫色土,土壤母质均为沙溪庙组紫色土泥岩,在 2009 年 7 月上旬同时采集以上土壤样品。

表 1 紫色丘陵区旱坡地种植模式的小区特征

Tab. 1 Features of fixed soil erosion monitoring sites under different cropping systems on purple hilly area

编号	小区规格	旱坡地种植模式	种植方式	种植年限/a	地表覆盖度/%
HS-1	5 m × 20 m	裸地休闲小区	无植被	3	<5.0
HS-2	5 m × 20 m	顺坡耕作小麦地	条播,条间距为 20 cm	3	45.5
HS-3	5 m × 20 m	横坡耕作小麦地	条播,条间距为 20 cm	3	47.2
HS-4	5 m × 20 m	横坡植物篱小麦地	条播,条间距为 20 cm	3	72.8
CD	旱坡地	横坡耕作菜地	穴值,行株距为 0.3 m × 0.3 m	>5	50.0 ~ 60.0
ZHMXD	旱坡地	横坡耕作紫花苜蓿地	穴值,行株距为 0.5 m × 0.5 m	>3	50.0 ~ 60.0
SSLD	旱坡地	桑林地	行株距为 2 m × 3 m	>5	50.0 ~ 70.0

注:小区坡度均为 15°,从 2008 年开始野外定位监测。

## 1.2 研究方法数据来源

### 1.2.1 诺谟方程

Wischmeier 等<sup>[1]</sup>选用粉粒 + 极细砂粒含量、砂粒含量、有机质含量、结构和入渗 5 项土壤特性指标,通过分析其与土壤可蚀性因子  $K$  值之间的关系,提出了土壤可蚀性  $K$  值估算公式:

$$K_{\text{诺谟}} = [2.1(N_1 N_2)^{1.14} (12 - \text{OM}) \times 10^{-4} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)]/100 \quad (1)$$

式中:  $N_1$  = 粉砂(0.05 ~ 0.1 mm)含量(%)+极细砂(0.002 ~ 0.05 mm)含量(%);  $N_2$  = 100 - 黏粒(<0.002 mm)含量(%)或者为  $N_1$  + 砂粒(0.1 ~ 2.0 mm)含量(%); OM 为有机质的百分含量;  $S$  为土壤结构参数;  $P$  为土壤渗透级别,  $K$  值单位为美国制(short ton, ac. h/(100 ft. short ton, ac. in))。

式中:  $N_1$ 、 $N_2$ 、OM 采用样地的实测数据,土壤结构参数  $S$  与土壤渗透级别  $P$  的取值参照表 2、3。

表 2 土壤结构参数  $S$

Tab. 2 Soil structure parameter  $S$

结构类型	极细的团粒	细团粒	中等或粗团粒	块状或片状
$S$	1	2	3	4

表 3 土壤渗透级别参数  $P$

Tab. 3 Soil infiltration parameter  $P$

渗透级别	迅速	中等~快	中等	慢~中等	慢	极慢
$P$	1	2	3	4	5	6

该方法的提出解决了在无野外径流小区观测资料的情况下,基于土壤普查常规资料进行土壤可蚀性  $K$  值的估算问题,大大推进了 USLE 方程的应用。

本研究根据旱坡地土壤样品实测的土壤团聚体结构和入渗特征值,同时参考国内相似土壤类型区关于紫色土坡耕地的土壤结构参数与渗透级别的判断值,在研究中参数  $S$ 、 $P$  分别取 3、5。

### 1.2.2 修正的诺谟方程

在原 USLE 基础上, RUSLE 模型对土壤可蚀性计算作了进一步修改,土壤可蚀性  $K$  值计算是在诺谟方程的基础上修正得到的,其计算形式为:

$$K_{\text{修正诺谟}} = [2.1(N_1 N_2)^{1.14} (12 - \text{OM}) \times 10^{-4} + 3.25(2 - S) + 2.5(P - 3)]/100 \quad (2)$$

式中各参数意义及取值同诺谟法,  $K$  值单位为美国制。该方法的应用条件与(1)相同,大大推进了 RUSLE 方程的应用。

### 1.2.3 EPIC 模型

Williams 等<sup>[3]</sup>在 1990 年建立了 EPIC(erosion-productivity impact calculator)模型,该模型在土壤侵蚀预测模块中采用土壤有机碳和粒径组成资料来估算土壤可蚀性  $K$  值:

$$K_{\text{EPIC}} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1.0 -$$

$$\text{SIL}/100)\} \times [\text{SIL}/(\text{CLA} + \text{SIL})]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25C/[C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} \times \{1.0 - 0.7\text{SN1}/[\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN1})]\} \quad (3)$$

式中: SAN 为砂粒(0.05 ~ 2.0 mm)含量(%); SIL 为粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)含量(%); CLA 为黏粒(<0.002 mm)含量(%);  $C$  为有机碳含量(%);  $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。该模型中各指标值采用实测数据,  $K$  值单位为美国制。

该方法为土壤侵蚀与土地生产力模型(EPIC)提出,基于土壤有机碳和粒径分布进行土壤可蚀性  $K$  值估算,推进了 EPIC 模型的应用。

### 1.2.4 Shirazi 公式法

Shirazi 等提出在土壤理化性质资料有限(如无极细砂含量或有机质含量,或者土壤颗粒分级标准不一致)的情况下,建议可用只考虑土壤几何平均粒径( $D_g$ , mm)来计算土壤可蚀性  $K$  值:

$$K_{\text{Shirazi}} = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\lg D_g + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

$$D_g = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i) \quad R^2 = 0.983$$

式中:  $f_i$  是原土壤中第  $i$  个粒径级组成百分比,  $m_i$  是小于第  $i$  个粒径级的算术平均值,  $K$  值单位是美国制。

该方法仅考虑土壤的几何平均粒径,基于土壤机械组成资料即进行土壤可蚀性  $K$  值估算。

### 1.2.5 Torri 模型法

Torri 等<sup>[5]</sup>于 1997 年提出采用土壤粒径和有机质数据建立的可蚀性估算模型:

$$K_{\text{Torri}} = 0.0293(0.65 - D_g + 0.24D_g^2) \times \exp \left\{ -0.0021 \frac{\text{OM}}{c} - 0.00037 \left( \frac{\text{OM}}{c} \right)^2 - 4.02 + 1.72c^2 \right\} \quad (5)$$

式中: OM 是百分数表示的土壤有机质含量;  $c$  为由小数表示的黏粒(<0.002 mm)的含量。

$D_g$  可由下式计算:

$$D_g = \sum f_i \lg \sqrt{d_i d_{i-1}} \quad (6)$$

式中:  $d_i$  为土壤机械组成中第  $i$  级土壤颗粒的最大值(mm),  $d_{i-1}$  为第  $i$  等级土壤颗粒的最小值(mm),当  $i=1$  时  $d_0 = 0.00005$  mm。  $f_i$  为用小数点表示的相应粒径等级土壤颗粒含量。基于砂粒(0.05 ~ 2 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)3 个粒径计算  $D_g$ 。  $K$  值单位为国际制单位( $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ),以国际制  $K$  值除以 0.1317 即为美国制  $K$  值。

该方法基于土壤机械组成资料即可进行土壤可蚀性  $K$  值估算,可在土壤理化性质资料有限的情况下应用。

#### 1.2.6 数据来源

各种土壤可蚀性  $K$  值估算方法涉及的土壤理化性质基本数据都来自试验地土壤样品的实测分析。在不同种植模式的标准径流小区和典型土地利用模式旱坡地上,用土样采集器采集 0~20 cm 厚度的土壤,采用“S”形采样法采集 5 个混合土样,每个混合土样为 1 kg,混合土壤合计重量为 5 kg,再从混合土样中采用四分法取 2 kg 带回实验室分析,共采集土壤混合样品 7 个。在采样的同时用铝盒和环刀测定土壤水分和容重,并采用环刀法测量土壤的入

渗过程。采集的土壤样品经风干、过筛后测定土壤机械组成、团聚体特征和有机质含量,其中土壤机械组成测定采用吸管法,土壤团聚体分布采用干湿筛法测定<sup>[24]</sup>,土壤有机质采用重铬酸钾法测定<sup>[25]</sup>

## 2 结果与分析

### 2.1 紫色丘陵区旱坡地土壤理化性质

土壤理化性质是直接影响土壤可蚀性  $K$  值的原因,坡耕地是土壤理化性质变化速度和程度最大的土地利用类型,而不同的坡耕地种植模式会导致土壤理化性质向不同方向发展,因此土壤理化性质分析是评价  $K$  值的前提和基础。紫色丘陵区旱坡地不同种植模式的主要土壤理化性质见表 4。

表 4 不同旱坡地种植模式的土壤理化性质

Tab.4 Soil physical and chemical properties of different cropping systems on slope dry land

编号	颗粒组成 /mm											有机质
	石砾		砂粒				粉粒			黏粒		
	>3	3~2	2~1	1~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	0.002~0.001	<0.001	
HS-1	3.37	0.50	2.41	4.38	14.15	10.61	21.52	6.21	10.86	2.52	23.46	0.56
HS-2	2.59	0.40	0.99	4.84	11.06	24.36	14.34	7.17	6.77	3.58	23.90	0.63
HS-3	3.00	0.42	2.53	4.07	11.44	9.06	25.43	7.18	7.96	5.63	23.29	0.60
HS-4	3.01	0.64	2.90	5.25	13.79	9.72	24.44	6.93	7.51	6.74	19.05	0.95
CD	1.37	0.27	0.85	1.77	20.05	7.77	25.17	6.79	8.39	6.79	20.78	0.66
ZHMXD	0.86	0.11	1.20	1.66	13.33	0.78	27.89	9.30	11.72	18.39	14.76	0.96
SSLD	0.97	0.22	1.68	3.70	16.09	8.87	23.15	7.39	8.58	15.17	14.17	0.34

注:表中粒径分类采用美国制。

从表 4 可看出,对于 3 种坡耕地种植模式的小麦(*Triticum aestivum*)地来说,顺坡耕作的小麦地砂粒含量最大(41.25%),其次为横坡植物篱耕作模式(31.68%),顺坡耕作模式最小(27.09%);3 种植模式的土壤粉粒含量差异较大,顺坡种植模式(28.28%)<横坡植物篱模式(38.88%)<横坡种植模式(40.57%);3 种植模式的土壤黏粒含量均保持在 25%~29% 之间,横坡植物篱模式(25.79%)<顺坡种植模式(27.48%)<横坡种植模式(28.92%)。这是因为传统顺坡耕作法有利于地表径流的形成和汇集,输沙量较大,土壤粉粒在地表径流冲刷下易于流失。

对于 3 种传统旱坡地利用,菜地和桑(*Morus alba* Linne)林地的土壤机械组成差异不明显(菜地 3 种粒径组成为:30.44%、40.36% 和 27.57%,桑林地为:30.35%、39.12% 和 29.34%),3 种粒径范围颗粒组成非常接近,而紫花苜蓿(*Medicago sativa*)地的土壤机械组成则与上述两种土地利用模式存在较明显的差异,砂粒、粉粒和黏粒组成分别为 16.97%、48.92% 和 33.15%。本试验区的紫色土 >1mm 的石砾含量均低于 6%,这主要是因为紫色砂页岩极易风化,很少会有较大的石砾

颗粒存在。

在 7 个土地利用模式中,桑林地为单一的桑树种植模式,土壤有机质含量较低,为 0.34%,紫花苜蓿地和横坡植物篱小麦地由于采用复合耕作方式,有机质含量较高,达到了 0.95% 以上,其余土地利用和种植模式土壤有机质保持在 0.56%~0.66%。双尾显著性检验表明,7 种样地有机质的显著性水平都远大于 0.05,说明不同土地利用类型的土壤有机质含量差异不显著。

### 2.2 基于 5 种估算方法的土壤可蚀性 $K$ 值比较分析

以表 4 为基础数据,分别利用公式(1)~(5)可得各种旱坡地模式的土壤可蚀性  $K$  值(表 5)。就 5 种估算方法的  $K$  值而言,以 EPIC 法的  $K$  值最大,以 Torri 法的最小,修正诺谟法的偏小,而诺谟法  $K$  值和 Shirazi 法  $K$  值相差在 0.05 以内。方差分析表明 5 种可蚀性估算模型计算得到的  $K$  值差异显著。现有土壤可蚀性估算方法多以土壤理化性质中土壤质地类、土壤结构类、土壤渗透性、土壤有机质含量等指标为基础数据进行计算。各估算方法所得  $K$  值存在差异的根本原因在于选择不同的土壤理化性质指标作为  $K$  值计算基础,土壤理化性质主要集中

在土壤机械组成中砂粒、粉粒和黏粒 3 个组分以及由此决定的土壤入渗特性,化学性质主要集中在有机质含量。因此,即使对于相同成土母质和土壤类型,由于不同土地利用类型所造成的土壤理化性质差异,采用不同估算方法所得的旱坡地土壤可蚀性  $K$  值大小和排序存在差异性。对于 5 种估算方法而言,除 EPIC 法外,其余 4 种估算方法得到的紫花苜蓿地土壤可蚀性  $K$  值均为最小,这与豆科植物能有效地提高土壤有机质和改良土壤结构的特性有关,说明在旱坡地利用中,选用紫花苜蓿等豆科植物作

为坡耕地间套作植物、绿篱建设植物、以及果草间作模式可有效降低立地的土壤侵蚀敏感性。而间作裸地休闲小区土壤可蚀性  $K$  值最大,这说明在降雨量大的南方地区,坡面一旦缺少地表覆被,土壤侵蚀可能性大大增加,甚至高于顺坡耕作的坡耕地利用类型。因此,从降低紫色土丘陵区耕作土壤的侵蚀敏感性角度考虑,坡耕地利用应选择具有明显改良土壤理化性质、提高有机质含量的种植模式<sup>[23]</sup>,尤其应增加豆科植物在坡耕地间、套作及水土流失防治中的作用。

表 5 不同种植模式的土壤可蚀性  $K$  值比较Tab. 5 Erodibility  $K$  values of different cropping systems

编号	土地利用模式	$K_{EPIC}$	$K_{诺谟}$	$K_{修正诺谟}$	$K_{Shirazi}$	$K_{Torri}$	$K_{极差}/K_{平均}$
HS-1	裸地休闲小区	0.047	0.045	0.036	0.041	0.038	0.27
HS-2	顺坡耕作小麦地	0.041	0.047	0.039	0.038	0.034	0.33
HS-3	横坡耕作小麦地	0.048	0.044	0.035	0.043	0.037	0.31
HS-4	横坡植物篱小麦地	0.046	0.044	0.035	0.041	0.038	0.27
CD	横坡耕作菜地	0.047	0.044	0.036	0.042	0.038	0.27
ZHMXD	横坡耕紫花苜蓿地	0.053	0.042	0.033	0.043	0.038	0.48
SSLD	桑林地	0.047	0.044	0.036	0.043	0.037	0.27

注:  $K$  值均为国际制单位。

由于土壤可蚀性  $K$  因子由土壤内在性质决定,具有一定的稳定性,因此采用  $K_{极差}/K_{平均}$  作为稳定评价指标。由表 5 可见,对于存在经常性翻耕的坡耕地而言,各估算方法的稳定性差别不大;而紫花苜蓿由于具有明显的改良土壤结构和提高土壤有机质含量的特点,选用不同方法对其  $K$  值影响较大;桑林地由于为多年生林木,地表扰动程度轻,  $K$  值变化不大,因此选用何种估算方法对其  $K$  值影响不大;各种旱坡地种植模式对土壤可蚀性估算方法的敏感性大小为紫花苜蓿地 > 坡耕地 > 桑林地。因此如果选择土壤可蚀性  $K$  值作为坡耕地土壤流失量预测的基本参数,或者作为各种水土保持措施蓄水保土基础效益评价指标时,对那些具有明显土壤理化性质改良土地利用类型和水土保持模式而言,应选择对土壤理化性质变化敏感的  $K$  值估算方法进行预测和评价,以实时反映土壤抗侵蚀性的变化。

通过对表 5 不同计算模型可蚀性值组内方差分析表明,EPIC 法、Shirazi 公式法、诺谟法和修正诺谟法在不同土地利用模式下得到的  $K$  值差别最大, Torri 模型法最小,其中又以 EPIC 法的方差最大,

Shirazi 公式法、诺谟法和修正诺谟法次之。由组间方差分析可知 5 种方法得到的不同土地利用模式下的  $K$  值差异达到极显著水平 ( $F = 33.83 > F_{0.01}$ )。综合以上分析可见,尽管 5 种方法计算得到的  $K$  值没有表现出显著差异来,但  $K$  值本身应受到土壤理化性质的差异而存在变化,因此分析说明,EPIC 法、Shirazi 公式法、诺谟法和修正诺谟法能在一定程度上灵敏反映土壤理化性质差异产生的  $K$  值的变化。

### 2.3 土壤可蚀性 $K$ 值估算方法的筛选

总结国内已有的紫色土土壤可蚀性  $K$  值研究成果<sup>[12,14-15,17-19]</sup>,选择其中表土层的  $K$  值并统一到国际制单位,根据土地利用类型将  $K$  值分为坡耕地、荒地、林地 3 大类,分别取各种土地利用类型的表土层平均  $K$  值作为本研究中 5 种估算方法适用性评价的标准和依据。同时将表 5 中的 7 种旱坡地模式的土壤可蚀性  $K$  值分别归结为坡耕地、荒地、林地 3 种土地利用类型,与标准值进行对比分析(表 6)。依此表为基础,采用误差分析法的 MAE、MRE、RMSE 和  $A_f$ <sup>[25-26]</sup> 对 5 种估算方法的精度进行不确定分析,评价结果见表 7。

表 6 不同土地利用类型的土壤可蚀性  $K$  值比较Tab. 6 Erodibility  $K$  values of different land use types

土地利用类型	$K_{标准值}$	$K_{EPIC}$	$K_{诺谟}$	$K_{修正诺谟}$	$K_{Shirazi}$	$K_{Torri}$
坡耕地	0.041	0.059	0.044	0.036	0.042	0.037
荒地	0.046	0.060	0.045	0.036	0.041	0.038
林地	0.047	0.059	0.044	0.036	0.043	0.037

注: 以上  $K$  值均为国际制单位,标准值计算的基本样本数为 20。

表 7 土壤可蚀性  $K$  值估算方法的不确定性评价Tab. 7 Uncertainty assessment of erodibility  $K$  values with different evaluation methods

评价参数	$K_{EPIC}$	$K_{诺谟}$	$K_{修正诺谟}$	$K_{Shirazi}$	$K_{Torri}$
平均绝对误差 (MAE)	0.002 3	0.002 3	0.008 7	0.003 2	0.007 4
平均相对误差 (MRE)	0.055 3	0.051 5	0.192 5	0.070 1	0.163 5
均方根误差 (RMSE)	0.003 6	0.002 4	0.009 1	0.003 7	0.007 8

$$\text{注: } MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |NK_i - SK_i|}{n}; MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|NK_i - SK_i|}{NK_i}; RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NK_i - SK_i)^2}{n}}; A_f = 10 \left( \frac{\sum_{i=1}^n |\lg(SK_i/NK_i)|}{n} \right).$$

式中:  $NK_i$  为前人研究得到的第  $i$  种土地利用类型上的可蚀性  $K$  理论值;  $SK_i$  为采用模型计算得到的第  $i$  种土地利用类型上的土壤可蚀性  $K$  值;  $A_f$  为精度因子;  $n$  为样本数, 本文分为 3 种土地利用类型, 故  $n=3$ 。

由统计学原理可知, MAE、MRE 和 RMSE 越趋近于 0,  $A_f$  越接近于 1, 则土壤可蚀性  $K$  值预测的不确定性越小。根据以上评价原则, 紫色丘陵区的土壤可蚀性  $K$  值预测方法以诺谟法和 EPIC 法结果最好, 可用于该地区土壤侵蚀敏感性评价和土壤流失量计算。张科利等<sup>[19]</sup>对各  $K$  值估算方程的研究也认为: 在土壤理化性质资料较全时, 应首先选择诺谟方程进行  $K$  值估算, 估算  $K$  值与真实  $K$  值之间存在良好线性关系。在重庆地区由于缺乏长期性野外径流小区实测资料, 直接获得实测  $K$  值十分困难, 因此可充分利用全国第 2 次土壤普查资料并配合典型样点调查对土壤理化性质进行修正, 也可利用农业部测土配方施肥调查的土壤理化性质基础数据进行重庆市土壤可蚀性  $K$  值估算, 对该地区分布面积广且土壤流失量大的紫色土坡耕地的土壤可蚀性  $K$  值变化进行实时分析和定量评价。

### 3 讨 论

#### 3.1 土壤可蚀性 $K$ 值的确定性和变化性

土壤可蚀性是由土壤内在理化性质决定的特征参数,  $K$  值确定性表现在其仅为土壤理化性质的函数, 可以客观地反映土壤抵抗侵蚀的敏感性, 与降雨、坡度、土地利用类型以及人为活动无直接关系。但由于土壤可蚀性评价指标多样化和不规范, 即使同样采用径流小区观测法, 由于对同一地区土壤可蚀性评价选用“单位径流深下标准小区的土壤流失量”和“单位降雨强度下标准小区的土壤流失量”两种度量标准, 因而在土壤可蚀性数值上差异较大。土壤可蚀性  $K$  值变化性的根本原因在于自然生态过程(如土壤侵蚀过程、成土过程)和人类干扰过程(人类耕作活动)直接或间接地造成土壤理化性质发生季节变化和空间变异。邓良基等<sup>[17]</sup>对四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性进行了研究, 认为土壤理化性质是影响  $K$  值大小的内在原因, 土壤侵蚀进程直接影响  $K$  值大小, 土地覆盖和利用状况间接影响  $K$  值。张向炎等<sup>[27]</sup>研究表明我国亚热带土壤可

蚀性存在明显季节性变化, 不同土壤类型其  $K$  值变动趋势和幅度都不同, 同一类型土壤的最高和最低  $K$  值可相差 6 倍左右。

#### 3.2 土壤可蚀性 $K$ 值估算方法筛选依据

对于特定的土壤侵蚀类型区而言, 土壤可蚀性  $K$  值估算方法应遵循: 1)  $K$  值估算方法应能够反映不同土壤类型的差异性, 因为不同土壤类型的理化性质有很大差异性, 估算方程应能够反映这个特性; 至于每种土壤类型的亚类、土属、土种的差异性应结合其土壤分类系统及现实的土地利用类型和成土过程的特征进行综合分析。2) 能够反映同一土地利用类型土壤理化性质的时间变化特点, 坡耕地的土壤理化性质变化非常大, 随生长期而发生季节性变化; 荒草地、林地的土壤理化性质随水土保持生态修复过程而发生以多年为时间单位的变化。3)  $K$  值估算方法同时也要反映出由于土壤理化性质变化而导致的  $K$  值变化, 具有一定土壤成土过程和土壤侵蚀环境灵敏性。

### 4 结 论

1) 5 种估算模型土壤可蚀性  $K$  值差异显著, 在 5 种土壤可蚀性  $K$  值估算方法中, 以 EPIC 法  $K$  值最大, 以 Torri 法  $K$  值最小, 修正诺谟法  $K$  值偏小, 而诺谟法  $K$  值和 Shirazi 法  $K$  值相差在 0.05 以内; 土壤可蚀性  $K$  值确定性表现仅为土壤理化性质的函数, 但土地利用类型、土壤侵蚀过程通过对土壤理化性质影响而使  $K$  值发生变化。对 5 种估算方法而言, 除 EPIC 法外估算得到的紫花苜蓿地土壤可蚀性  $K$  值最小, 说明可选用紫花苜蓿等豆科植物作为坡耕地间套作植物、绿篱建设植物, 可有效降低旱坡地立地土壤侵蚀敏感性。

2) 不同土地利用类型对土壤可蚀性估算方法的稳定性反应不同, 其敏感性大小为紫花苜蓿地 > 小麦地 > 桑林地, 对于存在经常性翻耕活动的各种坡耕地种植模式, 各估算方法稳定性差别不大。对那些具有明显土壤理化性质改良土地利用类型和水

土保持模式而言,应选择对土壤理化性质变化敏感的  $K$  值估算方法。

3) 估算  $K$  值方差分析和误差分析表明,在紫色丘陵区,土壤可蚀性  $K$  值估算的诺谟法和 EPIC 法与  $K$  因子标准值最为接近,且对土壤理化性质变化具有一定敏感性;在该地进行土壤侵蚀敏感性评价和土壤流失量预测时,可采用诺谟方程和 EPIC 法进行  $K$  值估算和评价。

#### 参 考 文 献

- [1] WISCHMEIER W H, JOHNSON C B, CROSS B V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26(26): 189-193.
- [2] USDA Agricultural Research Service. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)* [G]. Washington: USDA, 2000.
- [3] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [4] SHIRAZI M A, BOERSMA L, HART W. A unifying analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(1): 181-190.
- [5] TORRI D, POESSEN J, BORSELLI L. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using global dataset [J]. *Catena*, 1997, 31: 1-22.
- [6] SONNEVELD B G J S, NEARING M A. A nonparametric/parametric analysis of the universal soil loss equation [J]. *Catena*, 2003, 52: 9-21.
- [7] VAEZI A R, SADEGHI S H R, BAHRAMI H A, et al. Modeling the USLE  $K$ -factor for calcareous soils in northwestern Iran [J]. *Geomorphology*, 2008, 97(3-4): 414-423.
- [8] RAQUEL P R, MARQUES M J, BIENES R. Spatial variability of the soil erodibility parameters and their relation with the soil map at subgroup level [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378: 166-17.
- [9] DICKHUDT P J, FRIEDRICHS C T, SCHAFFNER L C, et al. Spatial and temporal variation in cohesive sediment erodibility in the York River estuary, eastern USA: A biologically influenced equilibrium modified by seasonal deposition [J]. *Marine Geology*, 2009, 267(3-4): 1-13.
- [10] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用 [J]. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 345-350.
- [11] 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, 14(4): 1-10.
- [12] 吕喜奎, 沈荣明. 土壤可蚀性因子  $K$  值的初步研究 [J]. *水土保持学报*, 1992, 6(1): 63-70.
- [13] 史学正, 于东升, 邢廷炎. 用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性  $K$  值 [J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 399-405.
- [14] 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性  $K$  值研究 [J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 47-52.
- [15] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子 [J]. *山地学报*, 1999, 17(增刊): 10-15.
- [16] 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): 1687-1697.
- [17] 邓良基, 侯大斌, 王昌全, 等. 四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究 [J]. *中国水土保持*, 2003(7): 23-25.
- [18] 赵辉, 郝志敏, 齐实, 等. 南方丘陵紫色页岩地区土壤可蚀性因子  $K$  值的确定——以湖南衡阳为例 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(6): 41-43.
- [19] 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.
- [20] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土 (I) [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [21] 何毓蓉. 中国紫色土 (II) [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 董杰, 张重阳, 罗丽丽, 等. 三峡库区紫色土坡地土壤粗骨沙化和酸化特征 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 31-34.
- [23] 史东梅. 基于 RUSLE 模型的紫色丘陵区坡耕地水土保持研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 1-7.
- [24] 南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] 张文太, 于东升, 史学正, 等. 中国亚热带土壤可蚀性  $K$  值预测的不确定性研究 [J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 185-190.
- [27] 张向炎, 于东升, 史学正, 等. 中国亚热带地区土壤可蚀性的季节性变化研究 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 41-44.

(责任编辑 李 斐)