

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220601.001.

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 Chunling, JIAO Feng, WANG Fei, et al. Review of Studies on Factors of USLE/RUSLE in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 430-436.

中国 USLE/RUSLE 因子研究

马春玲¹, 焦峰^{1,2}, 王飞^{1,2}, 戈文艳^{1,2}, 丁文斌¹,
刘元昊¹, 尚天赦¹, 曹乐乐¹, 林媛媛¹

(1.西北农林科技大学 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; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:USLE/RUSLE 是土壤侵蚀监测与预报的核心工具, 方程中各因子赋值的合理性决定了方程应用结果的准确度。然而, 由于我国地形条件的复杂性等原因, 方程在我国范围内的应用受到限制。因此, 为明晰土壤流失方程各因子计算中需把握的关键因素, 以及当前我国研究中存在的主要问题, 采用文献综合对比研究的方法, 通过 CNKI 中国学术期刊全文数据库和 Web of Science 数据库, 搜集了土壤流失方程因子相关文献共 373 篇。文献综合分析结果表明: 各因子的研究普遍存在缺乏估算公式选用和估算结果的精度检验, 坡长坡度因子存在公式误用的情况, 作物覆盖与管理因子、水土保持措施因子缺少系统性定量计算的方法, 土壤可蚀性因子计算的背景条件差异大, 难以进行横向比较。为此, 提出两条提高模型使用精度的建议, 一是通过建设标准化的地面监测系统, 系统观测和建立土壤侵蚀因子定量方法, 二是明确此类模型应用边界, 在较为适合的环境应用。

关键词:土壤侵蚀模型; USLE/RUSLE 因子; 综述

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0430-07

Review of Studies on Factors of USLE/RUSLE in China

MA Chunling¹, JIAO Feng^{1,2}, WANG Fei^{1,2}, GE Wenyan^{1,2}, DING Wenbin¹,
LIU Yuanhao¹, SHANG Tianshe¹, CAO Lele¹, LIN Yuanyuan¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: USLE/RUSLE is the central tool for soil erosion monitoring and forecasting. The accurate calculation of each factor value in the equation determines the accuracy of the equation application. Given that China's topographical conditions is of great difficulty, the application of equations in China has been limited. To analyze the key factors that shall be grasped in the calculation of each factor of the soil loss equation, as well as the main problems existing in the current research, we adopted the method of comprehensive comparison of literature and collected 373 related literatures through CNKI China Academic Journal Full-text Database and Web of Science. The comprehensive analysis results of the literatures show that the researches for each factor generally lack the selection of estimation formulas and the accuracy test of the estimation results, the formulas for slope length and slope factors have been misused, and the measures for crop coverage and management factors and soil and water conservation lack systematic quantitative calculations. The background conditions for calculating soil erodibility factors are very different, and it is difficult to make a

收稿日期: 2021-09-02

修回日期: 2021-12-02

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (42177344, 41771558)

第一作者: 马春玲 (1995—), 女, 甘肃省民勤人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持效益评价。E-mail: 1249259050@qq.com

通信作者: 焦峰 (1967—), 男, 陕西三原人, 副研究员, 博士, 主要从事 GIS 应用, 水土保持与环境效应监测评价研究。E-mail: jiaof@ms.iswc.ac.cn
王飞 (1971—), 男, 陕西省户县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

horizontal comparison. To this end, two pieces of suggestions are put forward to improve the accuracy of the model. One is to establish a standardized ground monitoring system to systematically observe and establish a quantitative method for soil erosion factors. The other is to clarify the application boundary of this type of model and apply it in a more suitable environment.

Keywords: soil erosion model; USLE/RUSLE factors; review

土壤侵蚀破坏土地资源,进而引起水土流失,导致大量泥沙进入江河湖库,引起洪涝灾害、水体污染等环境问题,造成生态环境退化^[1]。认识并了解土壤侵蚀的过程及机理,揭示引起侵蚀的因子与土壤性质之间的关系,并对土壤侵蚀进行准确的评估、监测和预报,有助于识别土壤侵蚀的易发区和水土流失治理的薄弱环节,从而指导水土保持措施配置,优化水土资源利用。利用土壤侵蚀模型对土壤侵蚀进行监测与预报,是土壤侵蚀评估的重要手段之一^[2]。通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation)及其改进版 RUSLE,在过去 40 a,已在 109 个国家被应用,是全球应用最为广泛的土壤侵蚀模型^[3]。

USLE 最初用于定量预报农地或草地坡面多年平均年土壤流失量,后来延伸至其他土地利用类型。美国农业部在 80 年代对模型进行修改,考虑了细沟和细沟间侵蚀;1997 年又出版了修订通用土壤流失方程 RUSLE,改进了各因子的计算方法^[4]。然而,它在模型结构上仍然存在局限性,只反映了相乘因子之间有限的相互作用和相互关系^[2]。同时,USLE/RUSLE 在进行侵蚀热点区识别和侵蚀潜力研究中有较好表现,对于土壤侵蚀过程和精确侵蚀量研究存在较大不确定性。

土壤侵蚀是一个复杂的多因子耦合过程,土壤侵蚀模型存在不确定性,无法解释沉积物输送的所有相互作用。USLE/RUSLE 并不能表征所有形式和尺度的土壤侵蚀过程,例如无法解释沟壑侵蚀、河岸侵蚀等^[5];另外,USLE/RUSLE 系列以年为时间尺度衡量单位面积的土壤流失,无法衡量基于次降雨事件的土壤流失情况^[6]。

20 世纪末,USLE/RUSLE 被引入中国。我国学者在 USLE/RUSLE 各因子计算方法修订和利用方程进行土壤侵蚀的监测和预报等方面进行了大量研究,有力推动了我国土壤侵蚀研究的进展。有学者根据我国的实测资料,提出了适用于黄土地区、东北地区、滇东北山区以及南方红壤区等区域土壤流失方程^[7-9]。刘宝元基于 1 841 个地块年数据,在考虑中国陡坡水土流失的特点和系统性水土保持措施的基础上,提出了中国土壤流失方程(CSLE),用以预测不同水土保持措施下坡耕地的年平均土壤流失量。其中采用生物、工程和耕作措施因子代替作物覆盖与管理因子和耕作措施因子。

但由于方程本身的局限性或研究人员对方程理解上的偏差等,在应用过程中不乏误用、错用等情况^[4]。另外,各因子有严格的适用条件,计算方法有明显的区域适用性,加上我国土壤侵蚀的复杂性、基础数据缺失等^[2],为方程的区域适用性评价增加了难度。

本文通过 CNKI 中国学术期刊全文数据库、Web of Science,以各因子的中英文表达、USLE、RUSLE 为主题词,检索 1965—2020 年已公开发表的期刊论文,通过筛选与补充,共获得 373 篇相关文献。对这些文献进行综合分析,阐明 USLE/RUSLE 各因子常用计算方法的差异和优缺点,以及不同方法在计算过程中的限制条件,并就中国在各因子的计算及方程应用中存在的问题进行发现、总结,以期为 USLE/RUSLE 的应用优化及突破提供参考。

1 降雨侵蚀力因子(R)

1.1 标准定义及主要计算方法

降雨侵蚀力是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,是评价降雨对土壤剥离、搬运侵蚀的动力指标。Wischmeier 等^[10]基于 8 000 多个地块的降雨、土壤侵蚀实测资料,回归分析发现降雨动能 E 和最大 30 min 雨强 I_{30} 的乘积与土壤流失量的相关性最好,故用 EI_{30} 计算多年平均降雨侵蚀力,并在 USLE 中得到应用。但由于不同地区降雨特性存在差异, EI_{30} 并非适用于全球。Hudson 研究发现,相比 EI_{30} , $KE > 25$ 法(以雨强 $I > 25$ mm/h 的降雨总动能代表降雨侵蚀力)更适合热带亚热带地区^[11]。Foster 等^[12]研究显示 EI_{30} 与 PI_{30} (P 指次降雨量)有高度线性相关,可以采用 PI_{30} 来计算年降雨侵蚀力;且包含雨量、雨强和径流量的复合指标比 EI_{30} 要好,认为径流量少降雨量大时 EI_{30} 计算的降雨侵蚀力值偏高,反之则偏低,但径流数据获取困难。我国学者研究发现,中国北方地区 EI_{30} 和 EI_{10} 预测效果较好,南方地区 EI_{60} 预测效果较好。王万中等^[13]发现,进行全国性或大区域研究时, EI_{30} 整体的预报效果优于其他指标,而在降雨资料缺乏时可采用 PI_{30} 。

以上计算方法均需要降雨过程资料,资料的年限最好为 20 年以上,很多地区缺乏这些资料。另外,降雨动能计算和断点雨强划分也较为麻烦,推广受到限

制,因此有学者提出了降雨侵蚀力的简易算法,即通过建立常规降雨资料(降雨量等)与多年平均降雨侵蚀力之间的数量关系式来估算降雨侵蚀力。章文波等^[14]参考 Richardson 等以日降雨量估算半月降雨侵蚀力的幂函数形式模型,建立了适合中国的半月降雨侵蚀力估算模型。后又基于逐年日雨量、逐年月雨量、逐年年雨量、月平均雨量及年平均雨量建立了其他降雨资料的模型。我国学者根据中国不同区域适宜的经典指标,利用常规降雨资料建立了大量的降雨侵蚀力简易估算模型。目前,我国 R 因子的简易估算模型主要有基于日降雨量、月降雨量、年降雨量的侵蚀力模型,也有包含雨量和降雨指标的复合指标模型,基本覆盖了我国主要水力侵蚀区。在研究全国或者大区域研究时,可引用章文波等^[14]建立的日降雨量侵蚀模型;东南地区可参考吴素业^[15]、郭新波等^[16]建立的模型;北京地区可参考徐丽等^[17]建立的估算模型;西南地区可参考黄凤琴等^[18]建立的估算模型;西北地区可参考刘秉正^[19]、赵文武^[20]等建立的模型。另外,基于不同分辨率降雨数据建立的简易模型所反映的降雨侵蚀力特征不同。研究者可根据研究区域、降雨数据的分辨率以及研究目的进行引用,并进行适用性验证。

1.2 R 因子方程在中国的应用

基于对 102 篇流域或区域尺度土壤侵蚀或 R 因子文献研究发现,我国一般通过以下两种方法进行降雨侵蚀力的估算。一种是直接对前人建立的估算模型进行引用,其中既有国外模型也有国内模型。如何兴元等^[21]研究岷江上游土壤侵蚀动态时,引用了国外普遍适用的 R 因子模型。章文波等^[14]的日雨量模型在我国引用率较高,截至 2021 年 8 月底,仅 CNKI 上的被引量就达 571 次。在引用前人建立的模型时,缺少适用性验证的现象普遍存在,梳理的 102 篇文献中,这类文献占了约 88%。因为模型建立过程中均使用的监测数据,除非应用的区域与模型建立的区域降水情况极度相似,否则直接引用很有可能导致误差。Xie 等^[22]的研究表明,章文波等建立的日雨量模型对站点侵蚀力真值存在一定高估,尤其对于侵蚀力较高的站点。另一种是利用已有资料建立适合当地的估算模型,再进行估算,采用这类方法的研究较少。如高克昌等^[23]在重庆主城区,利用已有资料建立简易估算模型,通过与其他模型估算的值比较进行模型验证。戴海伦等^[24]研究贵州省时,利用小区资料建立降雨侵蚀力简易模型,再计算站点降雨侵蚀力,但未对模型进行验证。在未来研究中,有必要加强模型的适用性研究,并对模型验证方法进行标准

化;此外,对现有模型按照采用降雨数据类型、适用区域分门别类进行归纳也很有意义。

2 坡长坡度因子(LS)

2.1 标准定义及主要计算方法

在 USLE 中,地形因素对土壤侵蚀的影响由坡长坡度表示。在坡面或地块尺度,坡长坡度因子被定义为在降雨、土壤等其他条件都一致的情况下,某一坡长或坡度的坡面土壤侵蚀量与标准小区(坡长 22.13 m、坡度 5.14°或 9%)土壤侵蚀量的比值,标准径流小区的坡长、坡度数值为 1。CSLE 中考虑到中国的大部分土壤流失来自陡坡,定义长 20 m、宽 5 m、坡度 15°的小区为标准小区。

LS 因子的原始定义和计算方法只适用于坡面尺度,其假设坡面的坡度具有均匀的梯度,任何不规则的斜率都必须被划分为更小的均匀梯度段。随着研究的深入,坡面侵蚀被划分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀,Foster 等^[25]以此为根据提出坡长与细沟侵蚀量和细沟间侵蚀量比值的关系式。Mc Cool 等^[26]综合考虑了坡度和不同侵蚀类型侵蚀量比值对坡长指数的影响,提出的公式用于 RUSLE。Foster 和 Wischmeier 开发了一种将不规则坡面划分为多个均匀段的方法,从而解释了坡面形状对土壤流失的影响,使得研究范围不再局限于坡面。然而,由于划分坡面难度很高,且用流域代替地块时坡长失去了预测地表水流和土壤侵蚀的意义^[27]。故有学者建议用单位等高线长度的上坡排水面积替代坡长,即单位面积贡献法。该方法在研究复杂景观的土壤侵蚀有重要意义。但以上方法均忽略了水流路径和沉积的情况。 LS 因子计算结果的精度与 DEM 的分辨率以及研究区的地形起伏有较大关系。Wang 等研究发现,在较大地形起伏区,相对于 5 m 分辨率,采用 30 m 分辨率估算的 LS 值普遍高估了 20%以上,而在低地形起伏区低估了 15%以上。在中等地势地区,这种偏差小于 10%^[28]。有学者研究指出土壤侵蚀量随着 DEM 分辨率的降低而降低。

我国学者根据实测数据,建立了坡长坡度的指数型计算公式(表 1)。刘宝元等^[29]在 Mc Cool 等公式的基础上,利用绥德、安塞和天水的观测资料,修正了 RUSLE 模型中 10°以上坡地的坡度因子计算公式,该公式提高了 10°以上坡地的坡度因子精度,并应用到 CSLE 中。刘斌涛等^[30]在刘宝元算法的基础上,根据西南土石山区地形陡峭的特点细化了 10°以上坡度的计算方法。

2.2 LS 方程在中国的应用

基于对 98 篇流域或区域尺度土壤侵蚀或 LS 因子文献研究发现,80%的文献计算坡长坡度因子时,

以栅格为单元提取 DEM 得到坡长坡度,直接采用 USLE 或修订的坡长坡度公式进行估算。但无论引用国外的计算公式还是国内的计算公式,都较少对公式的适用性进行验证,部分学者根据当地的地形条件选用缓坡或陡坡公式。在流域及以上尺度 LS 的计算中,坡长的定义和计算公式都与坡面尺度的存在差

异,但只有 20%左右的文献对坡长定义进行了修订。另外,还有学者对坡度划分等级后对地形因子直接赋值。在未来研究中,可加强高分辨率 DEM 的利用。有学者研究发现,高分辨率 DEM 的可用性已经超过了定义贡献区域流算法的方法研究。此外,还应加强坡长对径流和侵蚀的水文过程研究。

表 1 中国坡长坡度计算公式

公式	说明	来源
$LS=(\frac{\lambda}{20})^{0.24}\cdot(\frac{\theta}{6})^{1.6}$	适用西北地区, λ 代表坡长(m); θ 代表坡度($^{\circ}$)	金争平等 ^[31]
$LS=(\frac{\lambda}{20})^{0.14}\cdot(\frac{S}{9})^{1.2}$	适用西北地区, λ 代表坡长(m); S 代表坡度($\%$)	赵晓光等 ^[32]
$LS=(\frac{\lambda}{20})^{0.18}\cdot(\frac{S}{8.75})^{1.32}$	适用东北地区, λ 代表坡长(m); S 代表坡度($\%$)	张宪奎等 ^[7]
$LS=(\frac{\lambda}{20})^{0.24}\cdot(\frac{S}{5})^{1.32}$	仅适用滇东北山区	杨子生等 ^[8]
$LS=0.08(\frac{\lambda}{20})^{0.35}\cdot(\frac{\theta}{10})^{0.66}$	适用闽东南地区, λ 代表坡长(m); θ 代表坡度($^{\circ}$)	黄炎和等 ^[9]
$LS=(\frac{\lambda}{20})^{0.4}\cdot(\frac{\theta}{10})^{1.3}$	适用西北地区, λ 代表坡长(m); θ 代表坡度($^{\circ}$)	江忠善等 ^[33]

3 作物覆盖与管理因子(C)

3.1 标准定义及主要计算方法

C 因子由特定的植被覆盖度、轮作顺序、管理措施的整体功能以及作物不同生长期降雨侵蚀力的分布决定。其定义为一定条件下有植被覆盖或实施田间管理的土地土壤流失总量与同等条件下的连续休闲地土壤流失总量的比值,无量纲,介于 0~1 之间,其值越大土壤侵蚀越严重。

USLE 中先划分农作物生长期,再计算作物不同农作期作物小区与裸露小区的土壤流失比率,然后根据不同气候区降雨侵蚀力指数的季节分布加权平均求年平均 C 因子。我国学者通过该方法研究了东北^[34]、西北^[35]、西南^[36]地区典型作物及不同管理措施下 C 因子值。在 RUSLE 中,对 C 值的计算采用次因子法,即在土壤流失率计算中考虑前期土地利用次因子(PLU)、冠层覆盖次因子(CC)、地面覆盖次因子(SC)、地表糙度次因子(SR)和土壤水分次因子(SM)等,每个因子都有相应的计算公式,并且不再划分生长期,以半月步长计算半月土壤流失率。但该方法需要大量的观测数据,在流域或区域尺度应用较为困难。随着 GIS 与 RS 的发展,通过构建 C 因子与植被因子之间的线性或非线性模型估算 C 因子成为主要的方法。用于 C 因子估计的植被因子包括植被覆盖度、植被指数和影像波段等^[37]。除以上方法,利用前人的研究结果对土地利用图直接赋值也是常用方

法之一。基于植被因子或者土地利用图估算 C 值忽略了管理因素,且一般使用遥感数据估计 C 因子值缺少与实测值的比较,可能对土壤侵蚀预测产生不确定性,但依旧有助于研究流域或区域土壤侵蚀潜力。

3.2 C 因子方程在中国的应用

基于对 105 篇流域或区域尺度土壤侵蚀或 C 因子文献研究发现,我国学者估算 C 因子主要通过以下两种方法。一是直接使用已有的估算公式,这样的文献占了 50%左右。众多学者利用蔡崇法公式在我国部分地区进行了 C 值的估算^[38~40]。另外一种是根据研究区已有研究取得的 C 值直接进行赋值,这样的文献占了 32%。但使用这两种方法估算的 C 值都未与当地的实测值进行验证。且林杰等^[41]对蔡崇法公式进行实际应用时发现,只有植被盖度(f_c)的值大于 0.09 时,代入公式 $C=0.6508\sim0.3436lgf_c$ 。后 C 值才不大于 1。 C 因子取决于降雨事件发生时植被和植被覆盖发展的特定阶段,也取决于之前的土地利用条件。例如,作物残茬、整地措施等,这些都会对土壤侵蚀产生不同的影响。因此,需加强系统的实地观测研究。

4 水土保持措施因子(P)

4.1 标准定义及主要计算方法

USLE 方程中水土保持措施因子是指其他条件相同时,特定水土保持措施下的土壤流失量与未实施水土保持措施地块顺坡耕作时的土壤流失量之比。 P 值无量纲,典型的 P 值范围从反式梯田的 0.2 到

没有水土保持措施的 1.0, P 值越大说明水土保持措施效果越差。与其他因子相比, P 因子的定量化研究尚不充分。第一版 USLE 中, 提供了等高耕作的 P 值; 但研究人员考虑到小沟壑等情况, 对 P 因子值进行了订正。在 RUSLE 中, P 因子的计算采用保土措施的次因子法, 增加了其他措施的因子值。上述两种计算方法在应用中有较大限制, 前者仅适用于坡面尺度, 后者需要详细的水土保持措施信息, 包括不同措施的配置、单个措施的规模等, 获取难度较大。

大量学者根据 P 因子的定义, 基于径流小区的观测数据研究了不同水土保持措施的 P 值^[9]。McCool 等^[26]认为, P 因子的值是 USLE/RUSLE 因子中最不可靠的, 指出在坡面给定坡度上观测到的数据有效性广泛降低。在流域或更大空间尺度上, 通常基于 GIS 建模实现方程计算, 但 P 因子的空间信息往往是缺乏的, 使得在模型运算中忽略了水土保持措施对土壤侵蚀的影响。一些研究仅根据坡度计算 P 因子值。Wenner 方法假设 P 因子与坡度之间存在线性关系^[42]。林素兰等^[43]通过对辽北低山丘陵区坡耕地 11 a 径流小区试验数据的对比研究, 得出了 P 因子与坡度的关系式。但使用坡度计算的 P 因子值, 缺少水土保持措施的信息; 而且, 在相同的坡度梯度下观察到 P 因子值具有高度可变性^[6]。一些研究根据先前的研究工作得到的 P 值, 按土地覆盖类别赋值^[7]。但不同水土保持措施的效用受到气候、地形、土地利用等多种因素的影响, 这可能会导致误差。此外, 国际上有学者研究了 P 因子的替代指标, 认为 P 因子的替代指标能够对 P 因子的值和可能带来的影响进行相对评估, 这为我们国家 P 因子的研究提供了新的思路。

4.2 P 因子方程在中国的应用

基于对 103 篇流域或区域尺度土壤侵蚀或 P 因子文献研究发现, 78% 的文献中 P 因子值都由直接赋值得出。花利忠等^[44]根据研究区的实际情况, 参照美国农业部手册进行 P 值的率定。部分学者直接参考相关研究资料对 P 因子赋值^[45]。陆建忠等研究鄱阳湖流域土壤侵蚀变化时, 从研究区的 DEM 中计算出百分比坡度, 再将土地利用类型和坡度进行叠置分析, 依据坡度和土地利用类型赋值^[46]。少量研究通过经验公式直接计算 P 因子值, 中国洛河流域^[47]、延河流域^[48]的土壤侵蚀评估时利用了林素兰等的公式。直接赋值法的估算精度受主观因素影响较大, 经验公式得到的 P 值少有研究者对其进行验证。以上两种方法一定程度上忽略了因子随时间、管理等变化的情况。在未来研究中, 应加强 P 因子定

量化研究。并通过收集坡面的试验数据, 建立 P 因子数据集, 为定量化研究提供数据基础。

5 土壤可蚀性因子(K)

5.1 标准定义及主要计算方法

土壤可蚀性因子反映了在其他条件都相同的情况下, 土壤本身性质不同所引起的侵蚀量差异, 是具有恒定值的土壤固有属性。 K 最初是一个经验值, 是根据美国 23 种主要土壤类型的地块 20 a 的观测数据确定的, 是在单位降雨侵蚀力下某种土壤和标准小区(坡长 22.13 m, 坡度 9%)内连续清耕条件下的土壤流失速率的比值: $K = \frac{A}{EI}$ 。其值范围一般在 0.001 到 1.0 之间, 小值对变化很敏感, 对土壤侵蚀预测的准确性有较大影响, 因此, K 因子是 USLE 中的重要参数。由于直接观测确定 K 值需要对不同土壤类型的地块进行长期监测, 费时费力, 因此 Wischmeier 等^[49]考虑了 4 个最重要的土壤参数(颗粒大小、有机质百分比、土壤结构和土壤渗透性), 建立诺谟图用于推导 K 因子, 后建立了包含土壤有机质含量(%), 粉粒和极细砂粒含量(%), 砂粒含量(%), 土壤结构系数、土壤入渗等级的诺谟方程。同时, 他们指出, 该公式仅适用于中等土壤质地, 土壤中粉粒含量小于 70%, 对于黏粒含量和有机质含量高的土壤适用性差, 且没有完全反映出诺谟图。诺谟法中土壤结构系数与土壤渗透级别资料获取较为困难, Williams 等在 EPIC 模型中采用了土壤的有机碳和粒径, 当缺乏土壤粒径组成、有机质、土壤入渗等多种资料, 可采用只考虑几何平均粒径的 D_g 公式来计算土壤可蚀性。

我国关于 K 因子的计算方法大致可分为两类: (1) 径流小区实测法; (2) 经验模型法。径流小区实测法是根据 USLE 的构建原理和各因子的定义取值, 在标准小区上, 采用公式 $K = \frac{A}{LSR}$ 进行计算, 若观测小区不是标准小区, 需要对 LS 因子订正后计算。张宪奎等^[7]观测了东北黑土地区的黑土、白浆土、暗棕壤 3 种土壤 K 值。吕喜玺等^[50]计算了我国南方主要侵蚀土壤表层 K 值。经验模型法包括两种, 一是分析实测 K 值与土壤性质之间的关系, 建立土壤性质与 K 值的计算公式。陈明华^[51]、史学正^[52]等通过此方法建立了福建红壤区、东部丘陵区的 K 因子计算公式; 二是对比分析实测值与已有经验公式的关系, 修订后得到适合当地的计算公式。张科利等^[53]分析了实测 K 值与诺谟方程、EPIC 模型、 D_g 公式计算值的关系, 得到了适合除东北地区外的我国东部地区的修正公式。

以上计算方法考虑的是长期的、平均的土壤对降雨的响应, 忽略了土壤可蚀性的动态变化。冻融、风

化、人类管理或踩踏土壤均会影响土壤的可蚀性。然而,现有模型实现土壤可蚀性的动态变化监测还有一定难度,为土壤侵蚀监测增加了不确定性和误差。

5.2 K 因子方程在中国的应用

基于对 105 篇流域或区域尺度土壤侵蚀或 K 因子文献研究发现,K 因子的估算方法主要有两种。一是直接引用国外的经验公式。有研究者通过实验室分析得到的土壤基础数据,直接引用国外的诺漠方程、EPIC 模型等方法计算得到 K 值,这样的文献占了 40%;二是基于第二次土壤普查数据或已有的土壤可蚀性资料,直接赋值,这样的文献同样占了 40%。但高德武在黑龙江地区比较了实测值和诺漠法求得的值,发现将诺漠法求得的值加 30% 才可达实测值水平^[54]。张科利^[53]、史学正等^[55]研究表明,国外公式估算的 K 值与实测值之间差距较大。张科利等^[56]研究中美农用地的 K 值发现,美国的土壤 K 值比中国大两到三倍。因此直接引用会造成误差,需要进一步修订才能表示我国的 K 值。在未来研究中,应加强土壤可蚀性因子的动态变化研究。

6 关于提高侵蚀模型评价质量的两个建议

综上,我国土壤流失方程各因子的研究程度存在明显差异。降雨侵蚀力因子有认可度较高的计算公式,但各公式的区域适用性研究较少,引用公式时也较少利用站点实测数据进行验证;坡长坡度因子计算方法较多,因子值的计算精度与 DEM 的分辨率有较大关系,同一计算方法和相同分辨率的 DEM 在不同地形起伏度的区域计算精度不同;作物覆盖与管理因子、水土保持措施因子缺乏完全反映因子影响因素的定量计算公式;土壤可蚀性因子的“标准值”缺乏统一的计算标准,目前的计算公式忽略了很多因素的影响。随着模型和遥感数据的发展,USLE/RUSLE 不再仅用于坡面或地块尺度,在尺度上推过程中方程因子的计算方法可能产生不确定性,且计算的结果验证有一定困难。因为 USLE/RUSLE 估算的是总侵蚀率,而大部分监测得到的是净侵蚀率。由此,提出以下两点建议,促进我国土壤侵蚀评价模型的应用质量。

(1) 通过建设系统化、标准化的地面监测系统,观测和建立土壤侵蚀因子定量方法。根据我国地形地貌实际,综合考虑各类因素,建设系统化、标准化的地面监测系统,通过系列化标准小区监测结果,确定各个侵蚀因子的量化结果,或者通过与相对稳定的土壤参数结合建立估算模型,从而在全国推广应用。同时也可以通过适量的实际监测结果,修正常用的侵蚀因子计算模型,提高这些因子在中国的适宜性。

(2) 明确 USLE 和 RUSLE 的应用场景或边界,在与模型产生环境相差太大的环境下,不建议过分使用,从而确保模型的有限应用和高质量应用。如果在一些场合,超过了模型研发的边界条件,需要在结果中明确说明模型结果与实际应用场景的试验差异,为读者判断研究结果实际价值提供客观参考。

参考文献:

- [1] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348 (6235):647.
- [2] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等.土壤侵蚀预报模型研究进展[J].*水土保持通报*,2001,21(6):16-18,32.
- [3] Alewell C, Borrelli P, Meusburger K, et al. Using the USLE:Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019,7(3):203-225.
- [4] Renard K G, Washington D C, Foster G R, et al. Predicting soil erosion by water:a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Usda. Agriculture Handbook, 1997.703.
- [5] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J].*水土保持研究*,2004,11(4):80-83.
- [6] Benavidez R, Jackson B, maxwell D, et al. A review of the(Revised) Universal Soil Loss Equation((RUSLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018,22(11):6059-6086.
- [7] 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):1-9,18.
- [8] 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):4-12.
- [9] 黄炎和,卢程隆,付勤,等.闽东南土壤流失预报研究[J].*水土保持学报*,1993,7(4):13-18.
- [10] Wischmeier W H. A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss EquationI[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1959,23(3):246-249.
- [11] Hudson N W. Soil Conservation[M]. London: Batsford, 1976.
- [12] Foster G R. Evaluation of Rainfall-Runoff Erosivity Factors for Individual Storms[J]. *Transactions of the Asae*, 1982,25(1):124-129.
- [13] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I) [J].*水土保持学报*,1995,9(4):5-18.
- [14] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].*地理科学*,2002,22(6):705-711.
- [15] 吴素业.安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J].*中国水土保持*,1994,4(4):12-13.
- [16] 郭新波,王兆骞,张如良.浙江红壤区降雨侵蚀力季节分布与日雨量模型研究[J].*水土保持学报*,2001,15 (3):35-37,128.

- [17] 徐丽,谢云,符素华,等.北京地区降雨侵蚀力简易计算方法研究[J].水土保持研究,2007,14(6):398-402.
- [18] 黄凤琴,第宝锋,黄成敏,等.基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用:以四川省凉山州为例[J].山地学报,2013,31(1):55-64.
- [19] 刘秉正.渭北地区 R 的估算及分布[J].西北林学院学报,1993,8(2):21-29.
- [20] 赵文武,徐海燕,解纯营.黄土丘陵沟壑区延河流域降雨侵蚀力的估算[J].农业工程学报,2008,24(S1):38-42.
- [21] 何兴元,胡志斌,李月辉,等. GIS 支持下岷江上游土壤侵蚀动态研究[J].应用生态学报,2005,16(12):2271-2278.
- [22] Xie Y, Yin S, Liu B, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China[J]. Journal of Hydrology, 2016,535:547-558.
- [23] 高克昌,赵纯勇.重庆市主城区降雨侵蚀力计算方法与特征研究[J].水土保持学报,2002,16(6):13-16,30.
- [24] 戴海伦,苑爽,张科利,等.贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J].水土保持研究,2013,20(1):37-41.
- [25] Foster G R. A Runoff Erosivity Factor and Variable Slope Length Exponents for Soil Loss Estimates[J]. Transactions of the Asae, 1977,20(4):683-687.
- [26] Mc Cool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the Asae-American Society of Agricultural Engineers(USA),1987,30(5):1387-1396.
- [27] Desmet P J J C, Gobers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996,51(5):427-433.
- [28] Wang C, Shan L, Liu X, et al. Impacts of horizontal resolution and downscaling on the USLE LS factor for different terrains[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020,8(4):363-372.
- [29] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope Gradient Effects on Soil Loss for Steep Slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.
- [30] 刘斌涛,宋春风,史展,等.西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J].中国水土保持,2015(8):49-51.
- [31] 金争平,赵焕勋,和泰,等.皇甫川区小流域土壤侵蚀量预报方程研究[J].水土保持学报,1991,5(1):10-20.
- [32] Zhao X, Song S, Guan Y. Analysis of Runoff and Soil Loss on the Gentle Fallow Slope Land in Gully Region Loess Plateau[C]// Henan : IEEE, 2010.
- [33] 江忠善,李秀英.黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988,7(1):40-45.
- [34] 张宪奎.黑龙江省土壤流失方程应用简介[J].国土与自然资源研究,1995(1):30-32.
- [35] 张岩,刘宝元,史培军,等.黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J].生态学报,2001,21(7):1050-1056.
- [36] 唐寅,代数,蒋光毅,等.重庆市坡耕地植被覆盖与管理因子 C 值计算与分析[J].水土保持学报,2010,24(6):53-59.
- [37] 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.
- [38] 卜兆宏,刘绍清.用于土壤流失量遥感监测的植被因子算式的初步研究[J].遥感技术与应用,1993,8(4):16-22.
- [39] 马超飞,马建文,布和敖斯尔.USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J].水土保持通报,2001,21(4):6-9.
- [40] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波.基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J].中国环境科学,2011,31(7):1197-1203.
- [41] 林杰,张金池,顾哲衍,等.基于叶面积指数的植被覆盖管理措施因子 C 的遥感定量估算[J].林业科学,2013,49(2):86-92.
- [42] Wenner, Carl G. Soil Conservation in Kenya[J]. Ambio A Journal of the Human Environment, 1983,12(6):305-307.
- [43] 林素兰,黄毅,聂振刚,等.辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立[J].土壤通报,1997,28(6):12-14.
- [44] 花利忠,贺秀斌,朱波.川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究[J].水土保持通报,2007,27(3):111-115.
- [45] 耿豪鹏,潘保田,王超,等.基于 GIS 与 USLE 的榆中县土壤侵蚀[J].兰州大学学报:自然科学版,2009,45(6):8-13.
- [46] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.
- [47] 王涛.基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀影响因素定量评估:以陕北洛河流域为例[J].环境科学与技术,2018,41(8):170-177.
- [48] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J].中国水土保持科学,2007,5(4):27-33.
- [49] 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, 1971,26:189-193.
- [50] 吕喜玺,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.
- [51] 陈明华,黄炎和.土壤可蚀性因子的研究[J].水土保持学报,1995,9(1):19-24.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 高德武.黑龙江省土壤流失方程中土壤可蚀性因子(K)的研究[J].国土与自然资源研究,1993(3):40-43.
- [55] 史学正,于东邢,邢廷炎,等.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.
- [56] 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 & Environment, 2019, 269: 148-155.