

土壤侵蚀估算模型的比较与适用性

Dawit Kanito^{1,*}, Samuel Feyissa²

1 埃塞俄比亚 阿雷卡 阿雷卡农业研究中心南方农业研究所自然资源管理局

2 埃塞俄比亚 哈拉玛雅 哈拉玛雅大学自然资源管理与环境科学学院

摘要: 土壤侵蚀是一个具有全球挑战性的问题, 它会加剧土地退化和失去最肥沃的土壤, 从而阻碍农业生产力。尽管这是一个全球性问题, 但它对居住在发展中国家的农民产生了不利影响。因此, 提供土壤流失信息对于规划和实施适当的水土保持措施至关重要。因此, 开发了侵蚀估计模型, 并将其分为基于经验、概念和物理的广义保护伞。本文主要旨在比较广泛实施的土壤侵蚀估算模型的机会和局限性, 并通过选择广泛使用的模型, 如 USLE、RUSLE、SLMSA 和 WEPP 来审查其适用性。这项审查的结果表明, 所审查的侵蚀模型是为了预测坡面和细沟侵蚀造成的土壤损失而设计的。来自研究的证据表明, 通过根据当地环境条件进行校准, R/USLE 模型可以普遍使用。然而, 它们很简单, 需要更少的数据和计算时间; 它们不是事件响应型的, 测量的是冲沟和河岸侵蚀造成的土壤损失。但是, RUSLE 模型的参数计算过程与 USLE 模型不同。本研究还描述了 SLEMSA 模型将土壤侵蚀因素视为一个单独的实体, 并受到 LS 因素的高度影响。WEPP 模型能够在短时间内估计土壤损失和异地侵蚀率, 但是; 它只适用于个别山坡。因此, 根据这次审查的结果, 提出了以下建议供进一步研究, 以填补空白; R/USLE 参数的升级, SLMSA 地形子模型的修改, 以及 WEPP 模型中基本参数的修订, 以估计大型集水区的侵蚀。

关键词: 土壤流失; 基于事件的侵蚀; 侵蚀模型; 模型校准; 农业生产力

Comparison and Applicability of Selected Soil Erosion Estimation Models

Dawit Kanito^{1,*}, Samuel Feyissa²

1. Natural Resources Management Directorate, Southern Agricultural Research Institute, Areka Agricultural Research Center, Areka, Ethiopia

2. School of Natural Resources Management and Environmental Science, Haramaya University, Haramaya, Ethiopia

Abstract: Soil erosion is a globally challenging issue that hinders agricultural productivity by enhancing land degradation and loss to the top fertile soil. Although it is a global issue, its effect is adverse on farmers dwell in developing countries. Hence, providing information on soil loss is crucial to plan and implement appropriate soil and water conservation measures. Accordingly, erosion estimation models were developed and grouped as empirical, conceptual, and physical-based broad umbrella. This review paper primarily is intended to compare the opportunities and limitations of widely implemented soil erosion estimation models and review their applicability by selecting widely used models such as: USLE, RUSLE, SLEMSA, and WEPP. The result of this review revealed that the so reviewed erosion models have been designed to predict soil loss from sheet and rill erosion. Evidence from studies indicated that R/USLE models can be universally used by calibrating to the local environmental conditions. They are simple, requires less data and computational time, however; they are not event responsive and measure soil loss from gully and stream-bank erosion. But, RUSLE model has different parameter calculation procedure than the USLE. This study also depicts the SLEMSA model treats soil erosion factors as a separate entities and is highly influenced by LS factors. The WEPP model has capability to estimate soil loss in a short time scale and out-of-place erosion rates, but; it only works for individual hillslope. Thus, based on the result of this review the following recommendations are forwarded for further study to fill the gaps; upgrading of R/USLE parameters, modification of topographic sub-model of SLEMSA, and revision of essential parameters in WEPP model to estimate erosion from large catchments.

Keywords: Soil loss; Event-based erosion; Erosion models; Model calibration; Agricultural productivity

1. 简介

在二十一世纪, 土壤侵蚀是主要的挑战性问题, 普

遍威胁着自然资源和农业生产力的可持续性^[1-3]。由于具有不同好奇心的人口增加^[1]、过度放牧、土地利用—土地覆盖变化和大范围暴雨^[4]，农业集约化到脆弱和边缘生态系统，再加上任何对土地资源造成压力的活动，都是背后的主要驱动力。城市化、森林砍伐、不适当的耕作方式以及没有必要的水土保持措施的耕作也是土壤侵蚀的直接原因。根据 Phinzi 等人^[5]的发现，全球每年约有 750 亿吨顶级肥沃土壤被农田侵蚀。由于无法获得农业技术、经济不发达以及克服土壤侵蚀引发的冲击的能力较低，其后果对新兴国家的农业人民来说是严重的。

土壤侵蚀的影响已成为全球环境问题，并被广泛归类为场外和现场影响。它的影响几乎延伸到地球的整个纬度。土壤侵蚀导致不透水底土暴露，从而降低可用土壤水、营养丰富的表层土的损失^[1, 6]、水生生态系统的破坏、水库和大坝的破坏，并最终导致生物、物理和化学土地退化^[1]。它还通过形成细沟影响造林活动，通过形成冲沟减少耕地，并限制耕作。它还通过冲沟的形成减少了可耕地，并通过细沟的形成影响了植树，从而限制了耕作的机会。最终，土壤侵蚀的影响产生了相当大的额外投入成本，导致农业的巨大经济损失、痛苦的环境影响和干旱。

因此，土壤侵蚀估算对于确定易受侵蚀的地区以及规划和构建合适的水土保持措施至关重要。由于侵蚀的实验测定耗时、昂贵且人力密集^[3]，许多学者对许多模型进行了重要的工业化研究，并在世界各地实施。研究人员开发了大约 82 个土壤流失估算模型^[7]。举几个例子，通用土壤流失方程 (USLE)^[8, 9]及其修订版 RUSLE^[10]，水蚀预测项目 (WEPP)^[11]，欧洲土壤侵蚀模型 (EUROSEM)^[12]，南非土壤流失估计模型 (SLMSA)^[13]，以及化学品、径流、农业管理系统侵蚀 (CREAMS)^[14]，和区域非点源流域环境响应模拟 (ANSWER)^[15]。通常，侵蚀模型大致分为概念模型、经验模型和基于物理的模型，这取决于模型模拟的物理过程、模型的数据依赖性以及描述这些过程的模型算法。

经验模型，称为数据驱动模型，是以观察为导向的，在很大程度上取决于输入的准确性。这是基于一个假设，即在研究期间，基本条件保持不变。它们是黑盒，这意味着对控制径流结果如何确定的内部过程（降雨—径流）知之甚少^[16]。由于它们是数据驱动的，输入数据是误差的主要来源，因为输入数据失真会在建模输出中产生严重后果。根据贝文^[17]的说法，经验模型的一个缺点是，它可能会导致与公认的理论分析不同的结论。此外，经验模型中的参数缺乏物理意义，因为它们对集水区系统的物理性质采用了不切实际的假设：忽略集水区输入和特征（降雨和土壤类型）的异质性，忽略集水区系统中固有的非线性。另一方面，参数数量少，计算时间快，成本效益高，模拟准确，时间步长长，重现了过去的径流值，并且应用简单，因此经验模型是土壤侵蚀建模的

首选模型。因此，它们被称为所有模型中最简单的模型^[18]。

物理模型，也称为基于过程的物理模型，基于对与水文过程相关的物理的理解，由完全可测量的参数定义，可以在无需校准的情况下提供径流响应的连续模拟^[17]。物理模型的优点是参数和集水区物理特征之间的联系^[19]，这使其变得现实。基于物理的模型提供了对基本沉积物产生过程的理解，并有能力获取沉积物夹带、运输和沉积过程的空间和时间变化^[20]。他们描述了在处理能量和质量守恒定律的数学方程的帮助下所涉及的过程^[21]。它们中的大多数需要大量的输入数据并且是复杂的。理论上，基于过程的模型中的参数是可测量的，因此是已知的。然而，在实践中，由于所涉及的参数太多，而且集水区重要特征的异质性，这些参数应该根据观测数据进行校准。

概念模型基于水库蓄水和物理水文过程的简化方程，为集水区的行为提供了概念概念^[22, 19]。它代表了将降雨转化为径流、蒸散和地下水的水平衡方程。水平衡方程中的每个分量都是通过一个数学方程来估计的。易于使用和校准使得它们在建模社区中很受受欢迎。此外，先前校准的模型可以用于不同的集水区。该模型可以在有限的计算时间和集水区特征下最佳使用，从而可以在不需要大量空间和时间分布数据的情况下提供土地利用变化的定性和定量影响的指示。该模型的主要不足在于，由于模型的简单性以及控制方程和参数的物理意义，缺乏对空间可变性的考虑。该模型以降雨和径流为输入，以产沙量为输出^[20]。

本文主要旨在比较广泛实施的土壤侵蚀估算模型的机会和局限性，并审查其适用性。

2. 土壤侵蚀估算模型

侵蚀建模对于侵蚀情景评估至关重要，这有助于绘制具有潜在风险的区域地图并选择侵蚀控制措施。信息驱动在决策过程中也非常有用，可以避免侵蚀风险地区的土地征用。此外，为可持续发展制定适当的土壤管理需要对脆弱地区进行明确的清查和评级。侵蚀模型是选择那些最符合可用数据^[23]、模型的准确性和简单性^[24]，并广泛依赖于模型需要服务的功能^[18]的模型。然而，可用的数据可能不足且不兼容，无法应用其设计区域以外的模型。因此，根据当地条件对模型进行校准是必要的^[23]。正如梅里特等人^[25]所指出的，每种模型类型都有其设计目的，因此，特定类型的模型并不是最好的条件

2.1 通用土壤流失方程 (USLE)

20 世纪初，北美启动了土壤侵蚀研究，并在富兰克林·罗斯福帮助通过 1935 年《土壤保护法》（公法 74-46）后加速了这项研究。农业和新成立的土壤保护服务机构在 20 世纪 50 年代开发了通用土壤流失方程 (USLE)，作为预测土壤流失和帮助农民进行保护规划的工具。

USLE 是一个集总经验田间规模模型，基于 10000 个田间地块和小流域年的侵蚀数据预测细沟和细沟间侵蚀造成的土壤损失。它最初由威施麦尔和史密斯^[8]首次在第 282 号农业手册中发表，后来由同一作者在第 537 号农业手册^[9]中发表。最初，USLE 主要用于农田或缓坡地形中的土壤侵蚀估算^[1]。它被定义为：

$$A=R*K*L*S*C*P \quad (1)$$

哪里 A 为单位面积年平均土壤损失 ($t \text{ ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)，R 为降雨径流侵蚀力因子 ($\text{MJ mm h}^{-1} \text{ ha}^{-1}\text{yr}^{-2}$)，K 为土壤可蚀性因子 ($t \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)，L 为边坡长度因子 (无量纲)，S 为边坡坡度因子 (无因次)，C 为土地覆盖和管理因子 (无维度)，P 是土壤保持或预防措施系数 (无量纲)。下图改编自阿勒韦尔等人^[26]，显示了 1977 年至 2017 年 7 月期间使用 USLE 的研究数量和每个大陆总发表数量的百分比。

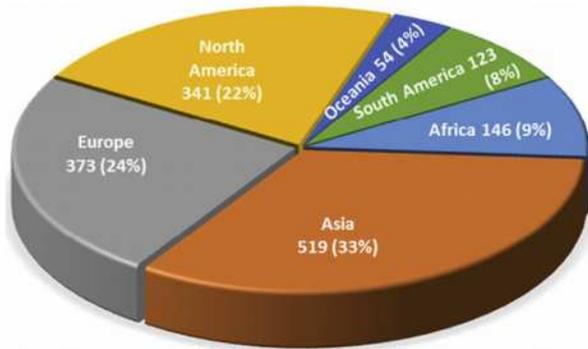


图 1. 使用 USLE 的研究和出版物数量。

2.1.1. 降雨渗透系数 (R)

R 因子测量降雨对侵蚀的影响，它旨在表示通过气候因素驱动坡面和细沟侵蚀过程的输入。它量化了降雨通过水滴和径流的影响导致土壤颗粒分离和运输的能力。它被定义为总动能乘以最大 30 分钟降雨强度 (EI30) 的乘积^[9]。根据不同国家的可用当地数据，已经制定了几种采用的公式来计算年侵蚀系数，其计算涉及长期数据收集^[27]。

2.1.2. 土壤侵蚀系数 (K)

K 因子表示土壤类型对侵蚀的敏感性，通常被视为每个侵蚀指数单位的土壤流失率^[9]。它与土壤物理财产密切相关，因此受到土壤质地 (沙子、淤泥和粘土的百分比)、有机质含量、土壤结构指数以及土壤可蚀性评估中使用的土壤渗透指数的影响^[28,27]。

2.1.3. 地形系数 (LS)

地形因子 (LS) 是表示地形对土壤侵蚀率影响的坡长梯度因子^[29]，它被定义为 22.1 米长的 9% 均匀斜坡的单位面积土壤损失与土壤损失的估计比率^[9]。它可以由以下方程联合计算。

$$LS=(\lambda/22.13)^m(65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (2)$$

其中 LS 是边坡长度因子 (无单位)， λ 是边坡长度 (m)， θ 是边坡角度 (度)，m 是基于边坡坡度的

指数。

2.1.4. 种植管理因素 (C)

根据贾祖利等人^[30]，C 因子代表种植和管理实践对侵蚀率的影响。它与土地利用类型密切相关，是减少土壤侵蚀脆弱性的一个因素。它被定义为在特定条件下种植的土地的土壤损失与清洁耕作、连续休耕造成的相应损失之比。C 值主要取决于植被类型、生长阶段和覆盖率。C 因子的范围在 1 到 0 之间。C 等于 1 表示不存在覆盖物，地表被视为贫瘠的土地，而接近零的 C 表示覆盖效应非常强，土壤受到良好保护。

2.1.5. 支持实践系数 (P)

P 因子反映了等高线和耕作方法对土壤侵蚀的影响。根据农业用地的管理，P 因子的数值总是在 0 到 1 之间。接近 0 的 P 因子值表示良好的保护实践，接近 1 的值表示较差的保护实践。

USLE 有几个局限性，尽管方程的简单性和参数的可用性使模型相对易于使用。与许多经验模型一样，它不是事件响应模型，只预测年度土壤损失，因为它忽略了降雨、径流的过程，以及这些过程如何影响侵蚀，以及植被覆盖和土壤类型等输入的异质性^[25]。他们还表示，USLE 模型不是基于事件的，因此该模型无法识别最有可能导致大规模侵蚀的事件。威施麦尔和史密斯^[9]断言，不能建议将该方程应用于其不打算用于的目的。根据摩根^[21]的说法，由于 USLE 模型最初设计用于估计细沟间和细沟侵蚀的侵蚀，因此不应用于估计流域的产沙量或预测冲沟或河岸侵蚀。作者还报告说，在使用该模型来估计山坡侵蚀对流域产沙量的贡献时，应该注意，因为它没有估计物质的沉积或包含输沙比。在他看来，他得出的结论是，该模型不能用于估计单个风暴的土壤损失，因为该方程是用来估计长期平均年土壤损失的。

但是，现在，USLE 建模已经得到了进一步的改进，以满足许多特殊要求和特定需求。例如，巴加雷洛等人^[31]将 USLE 型模型用于基于事件的土壤侵蚀建模。该模型还被用于各种极端生态系统类型和各种管理场景，例如，斯托尔佩^[32]的智利地中海气候的火山土壤，阿纳霍尔德等人^[33]的有机农业对韩国山地季风流域土壤侵蚀率的可能缓解影响，或巴伐利亚州北部传统农业与有机农业的比较^[34]。

Model	Spatial Scale	Temporal Scale	Data Demand	Output	Overland Sediment			In-Stream Sediment			Gully Erosion	Rainfall-Runoff
					Gen.	Trans.	Dep.	Gen.	Trans.	Dep.		
USLE	Hillslope	Annual	High	Erosion	Yes	No	No	No	No	No	No	No
RUSLE	Hillslope	Annual	High	Erosion	Yes	No	No	No	No	No	No	No
SLEMSEA	Catchment	Annual	High	Soil loss, sheet erosion	Yes	No	No	No	No	No	No	No
WEPP	Small Catchment	Event	Medium	Erosion, sediment yield, runoff	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes

表 1. 模型的特点和适用性^[35]。

2.2. 修订后的通用土壤流失方程 (RUSLE)

RUSLE 发生了一些变化，包括新的降雨径流侵蚀力值、计算土地覆盖的子因子方法以及新的坡度和土壤可蚀性算法。这是一个修正的 USLE 经验模型，它保留了 USLE 关于主方程的基本结构，并具有决定土壤侵蚀损失的类似因素。RUSLE 模型的不同之处在于，因子的计

算遵循不同的计算机处理程序, 是对土壤损失的更准确估计^[23, 10]。它是预测大面积侵蚀率和估计沉积物产量的有力工具, 这可以成为流域、农田和牧场的沉积物收获, 因为这些流域的降雨量大于渗透量, 导致径流^[37]。然而, 雷纳德等人^[38]指出, RUSLE 模型最初并不是为自然森林地区设计的, 在那里没有发生地表径流或径流有限, 其他类型的侵蚀(如河岸和冲沟侵蚀)也不包括在内, 但它专注于确定发生大量地表径流的景观(如清澈的土地)的侵蚀损失。该经验方法旨在根据以下方程估计农业系统和牧场中倾斜田地的雨滴影响和相关地表径流造成的年均土壤侵蚀^[10]:

$$A=R*K*LS*C*P \quad (3)$$

雷纳德等人^[38]指出了 RUSLE 与 USLE 在降水侵蚀力方面的主要区别; 在暴雨地区的平坦地区, R 因子有降低其值的新趋势, 因为径流发生时地表的蓄水会降低降雨侵蚀力; 事实上, 系数 R 的部分计算涉及季节分布, 以允许对土壤可蚀性 K 的值以及覆盖系数和文化实践进行加权。为此, 为气候均匀的地区开发了气候数据文件, 称为城市代码, 其中集成了没有土壤结冰的天数、月降水量和温度以及 15 天内降雨量分布的信息。应该注意的是, 该程序提供了添加用户提供的数据集的空间, 这应该允许它在世界其他地区轻松使用。布朗和福斯特^[39]提出了一个新的方程来计算降雨动能的单位, 如下所示:

$$e_m=0.29 [1 - 0.72^{(-0.052I_m)}] \quad (4)$$

这里 e_m 是强度趋于无穷大时的最大单位动能, 单位为 $MJ \text{ ha}^{-1}$, I_m 是最大降雨强度, 单位为 $mm \text{ h}^{-1}$ 。

土壤可蚀性因子 K 已通过积分方程进行更新, 以计算数据很少的土壤的值, 例如缺乏沙子或有机物成分的信息, 以及由不同于美国使用的分类系统给出的质地组成。根据雷纳德等人^[38], RUSLE 模型还包括在诺模图未涵盖的条件下估计 K 值的方程, 如火山土和有机质含量高的条件。

最近, 不同的研究试图将其他形式的侵蚀纳入彭宁等人[40]在印度尼西亚进行的类似 RUSLE 的研究中, 其中使用以下方程来估计 130000 公顷流域的年总产量 Y, 单位为吨 $\text{ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$:

$$Y=A*SDR+Gl+Sb+Rs+LI \quad (5)$$

在公式中, A (吨 $\text{ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 是年土壤损失, SDR 是泥沙输移比, Gl、Sb、Rs 和 LI 是冲沟、河岸、路边和其他形式的侵蚀, 单位为吨 $\text{ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。Jaramillo^[36]在他的研究中认为, 最终的参数很难计算, 需要复杂的测量技术, 因此不确定这些子因素的添加是否真的能提高土壤损失估计的准确性。此外, 麦库尔等人指出, 在因子 C 中, 土壤表面的岩石碎片被像覆盖物一样处理, 而 K 被调整为土壤剖面中的岩石, 以考虑对径流的影响。

根据伊格韦等人^[18], 使用 RUSLE 预测土壤损失的主要因素是降雨侵蚀力和土壤可蚀性, 就像 USLE 一样。与 USLE 一样, 在 RUSLE 中, 因子 P 的值是最不准确的,

通常代表保护实践的一般影响。然而, 在俄罗斯, P 因子的值也得到了发展, 反映了牧场的保护做法。贾拉米洛^[36]指出, 作为一个经验模型, RUSLE 没有考虑径流或沉积物的分离、沉积或运输过程。

Sites	Av. Soil Loss (kg/m ²)	USLE Soil Loss (kg/m ²)	RUSLE Soil Loss (kg/m ²)	WEPP Soil Loss (kg/m ²)
Bethany	5.77	2.38	2.01	2.38
Castana	7.65	14.38	10.23	11.63
Clarksda	5.50	4.72	6.01	4.17
Clemson	5.79	8.18	8.36	5.72
Geneva	2.29	2.08	2.20	0.84
Guthrie	2.26	2.85	2.02	3.45
Haven	0.31	0.67	0.47	0.46

表 2. 美国 USLE、RUSLE 和 WEPP 预测的年均土壤损失^[42]。

2.3. 南非土壤侵蚀估算 (SLMSA)

SLMSA 被设计为开发当地土壤侵蚀模型的框架, 该模型考虑了从津巴布韦获得的数据中南非当地的环境条件^[13]。根据德维亚等人^[21]的说法, 该模型还旨在评估不同农业系统造成的侵蚀, 以建议适当的保护措施。这项技术已在非洲大陆各国采用, 特别是在南非^[44, 45]。根据布雷茨克等人^[43]的说法, SLMSA 是在 USLE 的基础上开发的, 以使 USLE 模型适应非洲环境。它通过一组控制变量进行操作, 如降雨能量、植被强度等。这些变量的值很容易确定, 并且具有一些合理的物理意义。这些控制变量形成了三个子模型的输入, 当这些子模型组合在一起时, 可以提供土壤损失的估计。这个方程是由埃尔韦尔^[13]提出的:

$$Z=K \times X \times C \quad (6)$$

式中, Z 是预测的年平均土壤损失 ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), K 是在没有杂草的裸露休耕条件下, 2.5° 斜坡上 30 米长、10 米宽、已知土壤可蚀性 (F) 的标准农田的年平均土地损失 ($t \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)。K 系数描述了土壤可蚀性 (F) 和降雨能量 (E)。根据 Elwell^[46], 可蚀性值 F 已根据影响土壤财产的管理实践进行了修改。使用 F 值, K 的值由以下等式得出:

$$\ln K=b \ln E+a \quad (7)$$

$$E=9.28 P - 8.838 \quad (8)$$

式中, $a=2.884 - 8.1209 F$, $b=0.74026 - 0.09436 a$, E 为年平均降雨能量, 单位为 Jm^{-2} , P 为年平均降水量, 单位为 mm。

摩根^[21]指出, SLMSA 和 RUSLE 使用相似的参数来估计土壤损失。但是, 根据作者的说法, 两个模型之间存在的显著差异是 K 的定义是每单位侵蚀力的土壤流失率。他报告说, 在 SLEMSA 中, K 因子取决于降雨能量, 它与降雨能量呈指数关系, 而不是线性关系, 以及无量纲土壤可蚀性指数 F。他还表示, SLMSA 比 RUSLE 具有优势, 因为 SLMSA 将土壤侵蚀因素视为单独的实体, 因为模型组件之间的相互作用可能会导致 RUSLE 模型的复杂性。

SLMSA 在山区的适用性表明, 土壤损失的估计对坡度 (S) 和降雨能量 (E) 的变化非常敏感。该模型在由于坡度 (S) 和坡长 (L) 因子之间的共线而导致的土壤损失值的明显高估方面存在弱点。该问题随着坡度的增加而加剧, 这表明如果要提高 SLMSA 在崎岖地形中的

预测能力, 就应该修改地形子模型。

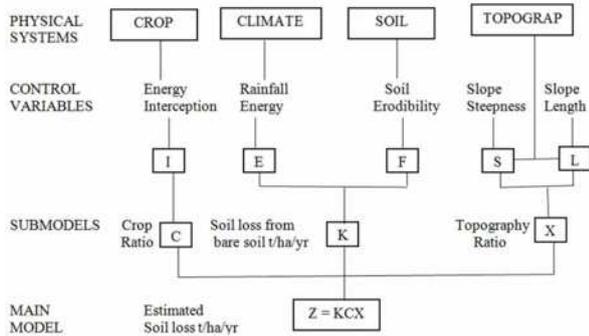


图 2.SLMSA 模型的结构 [47, 23]。

上面的结构描述了模型由四个组件组成, 即物理系统、控制变量、子模型和主模型, 每个组件都单独处理。定义作物对侵蚀影响的变量是截留的雨水能量的百分比, 气候是由降水能量定义的, 土壤是由其可蚀性指数定义的, 地形是由土地的坡度或倾斜度和山坡长度定义的 [23]。据埃尔韦尔 [47] 所述, 对于 SLEMSA 来说, 任何对土壤财产有影响的做法, 如耕作或其他处理, 都会在土壤系统中加以考虑, 而与文化相关的任何其他因素都会纳入文化系统中, 认为这种方法与 USLE 在概念上不同, 因为耕作和耕作都是文化和文化实践的组成部分, C。

表 3 表明, SLMSA 估计的土壤损失大于 USLE 估计的土壤流失。与 SLEMSA 值相比, USLE 低估了各种管理实践的土壤损失。两种方法估计的一些土壤损失值之间的差异可归因于两种模型对其输入因子的敏感性差异。

Treatment	Measured soil loss (t/ha/yr)	SLEMSA	USLE
2015			
T1	31.8	20.84	18.38
T2	4.25	5.00	0.5
T3	2.62	5.00	0.03
T4	4.6	3.75	1.89
T5	9.19	7.50	5.29
2016			
T1	13.9	16.49	6.015
T2	0.12	3.96	0.096
T3	0.00	3.96	0.009
T4	0.49	2.97	0.481
T5	1.83	5.94	1.732

表 3. 尼日利亚马库尔迪使用 USLE 和 SLEMSA 估算的土壤损失比较 [48]。

(T1) 裸地休耕; (T2) 4 t ha⁻¹ 表层覆盖物 + 玉米; (T3) 8t ha⁻¹ 表层覆盖物 + 玉米; (T4) 玉米 + 豇豆; (T5) 玉米。

2.4. 水蚀预测项目 (WEPP)

R/USLE 模型已经用于预测世界各地的长期平均土壤损失几十年了。根据金内尔 [49], 随着时间的推移, 人们已经认识到在短时间内预测土壤损失是必要的, 这导致了 WEPP 模型的发展。WEPP 模型由美国农业部开发, 是 USLE 的一个基于过程的继承。该模型是使用 50 个试验农田和牧场的数据开发的, 以准确模拟导致土壤侵蚀的潜在水文过程 [50]。根据弗拉纳根和尼尔林 [51] 的

法, WEPP 模型是一个每日模拟模型, 用于估计单个山坡或小流域的坡面和细沟侵蚀造成的土壤和沉积物输送损失。他们还指出, 该模型包括水文和土壤侵蚀组成部分, 包括侵蚀和沉积、耕作对土壤的扰动、天气生成、冻土、残留物分解、积雪和融化、植物生长、灌溉、水平衡、渗透和地表径流水力学。该模型的水文组成部分计算了峰值流量、有效持续时间和有效降水强度等变量。WEPP 基于稳态泥沙连续性方程, 该方程描述了泥沙沿斜坡的输运 [52]。

$$\frac{dQ_s}{dx} = D_f + D_i \quad (9)$$

其中, x 是下坡距离 (m), Q_s 是单位时间内单位宽度的输沙量 (kg s⁻¹ m⁻¹), D_f 是细沟流分离或沉积的速率 (kg s⁻¹ m⁻²), D_i 是细沟间侵蚀分离的颗粒向细沟流的输送速率 (kg s⁻¹ m⁻²)。

根据梅里特等人 [25] 的说法, WEPP 模型的基本输出包括逐月、月、年和年均的径流和侵蚀汇总。WEPP 和 R/USLE 模型之间的一个基本区别是, 泥沙连续性方程应用于细沟中, 而不是使用均匀流动水力学 [53]。还认为, WEPP 模型估计了异地侵蚀率, 包括斜坡剖面中的沉积物收集及其富集率, 以及现场侵蚀率, 如清除率和沉积率。

汉等人 [53] 在应用 WEPP 模型时观察到, WEPP 模拟的径流量和产沙量预测在坡度尺度上与实测值相对一致, 但在流域尺度上, 径流和侵蚀的模拟值都高于实测值。钱德拉蒙哈等人 [20] 指出, 由于与土壤和作物管理相关的大量数据需求和模型参数, 该模型预测不足, 无法在大规模研究中收集或测量。它相对于经验模型的主要优势在于, 作为一个基于物理的模型, 它考虑了影响侵蚀的过程 / 事件。

Basin	Area (ha)	Measured soil loss (t)	USLE soil loss (t)	USLE (% error)	WEPP soil loss (t)	WEPP (% error)
A	3.27	68.50415.67	99.84	45	63.20	8
B	2.69	53.64411.62	79.52	48	46.20	14
C	0.48	10.5244.24	6.21	41	4.56	57
D	0.75	10.4643.57	13.00	25	7.92	24
E	1.09	16.2047.20	22.34	38	16.37	1
Total	8.48	159.52	222.50	39	139.22	11

表 4.USLE 和 WEPP 在加拿大尼斯流域土壤流失预测中的效率比较 [54]。

3. 结论和建议

本文通过回顾不同作者先前对土壤侵蚀模型的研究, 讨论了土壤流失估算模型及其适用性。几位作者一致认为, R/USLE 模型由于其通用性、简单性和易用性, 在世界各地都得到了常规应用。然而, 一些研究认为, 模型必须根据当地的环境条件进行明智的调整和校准。先前的作者一致认为, 通过对研究地点进行验证, R/USLE 模型可以应用于不同的土地区域。但是, 它们不能用来模拟来自冲沟和河岸的侵蚀。R/USLE 模型仅预测长期土壤损失, 但不能用于估计基于事件的侵蚀。作者报告说, USLE 只预测了薄层和细沟侵蚀, 而没有预测流动过程和运输材料的过程。另一方面, 一些作者一致认为, RUSLE 模型比 USLE 模型更准确, 并且有不同的计算程序来确定参数。与 USLE 类似, RUSLE 模型作

为一个经验模型，没有考虑径流或侵蚀过程。

对 SLMSA 进行的研究一致认为，最初开发 SLMSA 是为了使 USLE 模型适应非洲的情况。SLMSA 在概念上与 USLE 的不同之处在于，耕作和耕作都是文化和文化实践因素的一部分。对 SLMSA 的研究还表明，它使用与 RUSLE 相似的参数来估计侵蚀。但是，与 RUSLE 不同的是，SLMSA 模型对 K 因子有不同的定义。研究 WEPP 模型的作者一致认为，该模型可以准确预测小流域的短期侵蚀，但不能大规模使用。他们还一致认为，WEPP 模型与 R/USLE 不同，因为泥沙连续性方程应用于细沟中，而不是使用均流水力学。因此，根据本次审查的结果，得出的结论是，所评估的模型在适用性方面存在局限性。根据这次审查的结果，提出了以下建议；R/USLE 中使用的参数需要升级，以便考虑河岸和冲沟侵蚀来估计给定区域的总土壤损失，应修改 SLMSA 的地形子模型，使该模型能够准确估计崎岖地形的土壤损失，并将必要的参数纳入 WEPP 模型，以估计大型集水区的侵蚀。

参考文献

- [1] Ganasri, B. P., and Ramesh, H. 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS—A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7 (6); 953–961.
- [2] Dawit, K. 2020. Participatory Identification of Major Natural Resource Constraints and Potentials Under Koka–Lewate Watershed, Tembaro Woreda, Kambata Tambaro Zone of Southern Ethiopia. *International Journal of Energy and Environmental Science*, 5 (1); 1–6.
- [3] Mohammed, S., Alsafadi, K., Talukdar, S., Kiwan, S., Hennawi, S., Alshihabi, O., Sharaf, M., and Harsanyie, E. 2020. Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using RUSLE integrating geo informatics approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20; 1–14.
- [4] Han, J., Wenyan Ge, Hei, Z., Cong, C., Ma, C., Xie, M., Liu, B., Wei Feng, F. W., and Juying Jiao. 2020. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 301.
- [5] Phinzi, K., Abriha, D., Bertalan, L., Holb, I., and Szabó, S. 2020. Machine Learning for Gully Feature Extraction Based on a Pan–Sharpened Multispectral Image: Multiclass vs. Binary Approach. *International Journal of Geo-Information*, 9; 252.
- [6] Zhao, J., Yang, Z., and Govers, G. 2019. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: evidence from erosion plot data. *Geoderma*, 337; 729–741.
- [7] Karydas, C. G., Panagos, P., and Gitas, I. Z. 2014. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7 (3); 229–250.
- [8] Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. 1965. Predicting Rainfall–Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. In *USDA Agricultural Handbook* (p. 282).
- [9] Wischmeier, W. H., and Smith, D. D. 1978. Predicting Soil Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. In *USDA Agricultural Handbook* (p. 537).
- [10] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., and Porter, J. P. 1997. RUSLE: revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv*, 46; 30–33.
- [11] Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., and Finkner, S. C. 1989. A process–based soil erosion model for USDA–water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE*, 32; 1587–1593.
- [12] Morgan, R. C. P. 1995. *Soil Erosion and Conservation* (p. 198). Longman Group UK Limited, London.
- [13] Elwell, H. A. 1978. Modelling Soil losses in Southern Africa. *J. Agric. Eng. Res.* 23; 117–127.
- [14] Knisel, W. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, US Department of Agriculture Research Service Report No. 26.
- [15] Beasley, D. B., Huggins, L. F., and Munke, E. J. 1980. ANSWERS – a model for watershed planning. *Trans Am Soc. Agric Eng.*, 23; 938–944.
- [16] Granata, F., Gargano, R., and Marinis, G. 2016. Support Vector Regression for Rainfall–Runoff Modeling in Urban Drainage: A Comparison with the EPA’s Storm Water Management Model. *Water*, 8 (3); 13.
- [17] Beven, K. J. 2012. *Rainfall–Runoff Modelling*. In *The Primer* (2nd ed.). Wiley–Blackwell.
- [18] Igwe, P. U., Onuigbo, A. A., Chinedu, O. C., Ezeaku, I. I., and Muoneke, M. M. 2017. Soil Erosion: A Review of Models and Applications. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 14 (12); 138–150.
- [19] Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Mucche, M., and Avant, B. 2017. An Overview of Rainfall–Runoff Model Types.
- [20] Chandramohan, T., Venkatesh, B., and Balchand, A. N. 2015. Evaluation of Three Soil Erosion Models for Small Watershed. *International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE) Aquatic Procedia*, 4; 1227–1234.
- [21] Morgan, R. P. C. 2005. *Soil Erosion and Conservation*, 3rd Edition. Blackwell Publishing, Malden,

U.S.A.

- [22] Devi, G. K., Ganasri, B. P., and Dwarakish, G. S. 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007.
- [23] Mateus, A., and Salumbo, D. O. 2020. A Review of Soil Erosion Estimation Methods. *Agricultural Sciences*, 11; 667–691.
- [24] Atinafu, D. 2015. Surface Water Potential Assessment and Demand Scenario Analysis in Omo Gibe River Basin. MSc Thesis, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia.
- [25] Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A. J. 2003. A Review of Erosion and Sediment Transport Model. *Environmental Modelling and Software*, 18; 761–799.
- [26] Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., and Panagos, P. 2019. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modeling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7 (3); 203–225.
- [27] Gia, T. P., Degener, J., and Kappas, M. 2018. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6 (2); 99–110.
- [28] Millward, A. A., and Ersey, J. E. 1999. Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. *Journal of Catena*, 38 (2); 109–129.
- [29] Balabathina, V. N., Raju, R. P., Muluaem, W., and Tadele, G. 2020. Estimation of soil loss using remote sensing and GIS-based universal soil loss equation in northern catchment of Lake Tana Sub-basin, Upper Blue Nile Basin, Northwest Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 7 (35); 1–32.
- [30] Jazouli, A. El, Barakat, A., Ghafiri, A., Moutaki, S. El, and Ettaqy, A. 2017. Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco). *Geoscience Letters*, 4 (25); 1–12.
- [31] Bagarello, V., Di Stefano, C., Ferro, V., and Pampalona, V. 2017. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models, *Catena*. 155; 10–19.
- [32] Stolpe, N. B. 2005. A comparison of the RUSLE, EPIC and WEPP erosion models as calibrated to climate and soil of south-central Chile. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B Soil and Plant Science*, 55 (1); 2–8.
- [33] Arnhold, S., Lindner, S., Lee, B., Martin, E., Kettering, J., and Nguyen, T. T. 2014. Conventional and organic farming: Soil erosion and conservation potential for row crop cultivation. *Geoderma*, 219; 89–105.
- [34] Auerswald, K., Kainz, M., and Fiener, P. 2003. Soil erosion potential of organic versus conventional farming evaluated by USLE modeling of cropping statistics for agricultural districts in Bavaria. *Soil Use and Management*, 19 (4); 305–311.
- [35] Hajigholizadeh, M., Melesse, A. M., and Fuentes, H. R. 2018. Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15; 518.
- [36] Jaramillo, F. 2007. Estimating and Modelling Soil Loss and Sediment Yield in the Maracas–St. Joseph River Catchment with Empirical Models (RUSLE and MUSLE) and a Physically Based Model (Erosion 3D). Masters thesis, McGill University, Montreal.
- [37] SWCS (Soil and Water Conservation Society) 1995. Revised Universal Soil Loss Equation, User Guide (1.04). Soil and Water Conservation Society, Ankeny.
- [38] Renard, K. G., Laflen, J. M., Foster, G. R., and McCool, D. K. 1994. The Revised Soil Loss Equation. pp. 105–126. In Lal, R. (ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Conservation Society, Ankeny.
- [39] Brown, L. C., and Foster, G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Transactions of the ASAE*, 30 (2), 379–0386.
- [40] Penning de, V., F. W. T., Agus, F., and Kerr, J. 1998. Soil Erosion at multiple scales: Principles and methods for assessing causes and impacts. CABI Publishing, United Kingdom.
- [41] McCool, D. K., Foster, G. R., Renard, K. G., Yoder, D. C., and Weesies, G. A. pp. 11–15. 1995. The Revised Universal Soil Loss Equation. In: Department of Defense/ Interagency Workshop on Technologies to Address Soil Erosion on Department of Defense Lands San Antonio, TX.
- [42] Tiwari, A. K., Risse, L. M., and Nearing, M. A. (2000). Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43 (5), 1129.
- [43] Breetzke, G. D., Koomen, E., and Critchley, W. R. S. 2013. GIS-Assisted Modelling of Soil Erosion in a South African Catchment: Evaluating the USLE and SLEMSA Approach. *Water Resources Planning, Development and Management*, 54–71.
- [44] Igwe, C. A., Akamigbo, F. O. R., and Mbagwu, J. S. C. 1999. Application of SLEMSA and USLE erosion models for potential erosion hazard mapping in South-eastern Nigeria. *International Agrophysics*, 13 (1); 41–48.
- [45] Bobe, B. 2004. Evaluation of soil erosion in the Harerge region of Ethiopia using soil loss models, rainfall simulation and field trials. Doctoral Dissertation, University of

Pretoria, South Africa.

[46] Elwell, H. A. 1976. Soil Loss Estimator for Southern Africa. Natal Agricultural Research Bulletin No 7, Department of Agricultural Technical Services, Natal.

[47] Elwell, H. 1980. A Soil Loss Estimator Technique for Southern Africa. pp. 281-292. In: Morgan, R. (eds.), Soil Loss Conservation, Problems and Prospects. Wiley, Hoboken.

[48] Ajon, A. T., Obi, M. E., and Agber, P. 2018. Prediction of Soil Loss using SLEMSA and USLE Erosion Models for an Agricultural Field in Makurdi, Benue State, Nigeria. International Journal of Innovative Agriculture & Biology Research, 6 (3); 21-30.

[49] Kinnell, P. I. A. 2017. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas. Science of the Total Environment, 596 - 597; 32-42.

[50] Laflen, J. M., Lane, L. J., and Foster, G. R. 1991.

WEPP: a new generation of erosion prediction technology. J. Soil Water Conserv, 46 (1); 34-38.

[51] Flanagan, D. C., and Nearing, M. A. 1995. USDA-WaterErosion Prediction Project: hillslope profile and watershed model documentation. Nserl Rep 10, 1-123.

[52] Foster, G. R., and Meyer, L. D. 1972. A Closed Form Soil Erosion Equation for Upland Erosion. In: Shen, H. W. (eds.), Sedimentation. Colorado State University, Ft Collins, Colorado, 12.

[53] Han, F., Ren, L., Zhang, X., and Li, Z. 2016. The WEPP Model Application in a Small Watershed in Loess Plateau. PLoS ONE, 11 (3); 1-11.

[54] Meinen, B. U., and Robinson, D. T. 2021. Agricultural erosion modelling: Evaluating USLE and WEPP field-scale erosion estimates using UAV time-series data. Environmental Modelling and Software, 137.