

水蚀过程的土壤可蚀性研究述评

王彬^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}, Römken M J M³

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 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; 3. USDA-ARS National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS 38655)

摘要:土壤可蚀性是建立土壤侵蚀预报模型的重要参数,在土壤侵蚀研究中占有重要地位。该文基于土壤内在性质和侵蚀动力对土壤可蚀性评价指标与体系、土壤可蚀性的测定与计算方法以及土壤可蚀性动态变化等方面进行阐述,全面评述了目前国内外土壤可蚀性的研究进展,分析了当前土壤可蚀性研究存在的问题,指出了尚需加强的研究领域,包括土壤可蚀性评价指标体系、土壤可蚀性动态变化规律和土壤侵蚀机理研究等。

关键词:土壤可蚀性;评价指标;土壤侵蚀预报模型;动态变化;土壤侵蚀机理

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)01-0277-10

Soil Erodibility for Water Erosion: A Review

WANG Bin^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}, Römken M J M³

(1. College of Natural Resources and Environment, State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on the Loess Plateau, 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; 3. USDA-ARS National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS 38655, USA)

Abstract: Soil erodibility is one of the important parameters in soil erosion prediction model and has the priority in soil erosion research. Based on the indices and evaluation system, measurement and calculation methods as well as dynamic change of soil erodibility, this paper reviewed progresses of soil erodibility research and analyzed existing problems and deficiencies in soil erodibility research. Moreover, strengthening research fields of soil erodibility, including evaluation indicator system and dynamic change of soil erodibility were proposed as well as soil erosion mechanism.

Key words: soil erodibility; evaluation indicator; soil erosion prediction model; dynamic change; soil erosion mechanism

土壤侵蚀是全球性的重要环境问题之一,土壤侵蚀不仅造成土地资源严重退化甚至彻底破坏,而且大量径流泥沙及其挟带的污染物对水体质量和河道运行安全造成严重威胁。因此,为了针对性地防治土壤侵蚀,就必须加强土壤侵蚀定量评价研究。而土壤可蚀性作为土壤侵蚀预报模型的基础研究,在土壤侵蚀研究中占有重要地位。自 20 世纪 30 年代以来,土壤可蚀性研究一直受到高度重视,并在土壤性质与土壤侵蚀的关系、土壤可蚀性评价指标、土壤可蚀性测定与计算方法等方面取得了显著性的研究进展。但由

于土壤可蚀性影响因素复杂,且受试验条件和人们认识水平的限制,现有的研究成果与土壤侵蚀预报的要求仍有相当大的差距。尤其在人类耕垦历史悠久、地形地貌复杂、土壤类型多样的情况下,土壤可蚀性的研究成果远不能满足当前土壤侵蚀建模的需求,迫切需要开展适用于我国侵蚀环境的土壤可蚀性指标。本文基于对土壤可蚀性评价指标与体系、土壤可蚀性的测定与计算方法等研究成果的述评,分析当前土壤可蚀性研究存在的问题,提出尚需加强的研究领域,以期对土壤侵蚀定量预报提供支持。

收稿日期:2012-10-01

修回日期:2012-11-08

资助项目:国家自然科学基金项目(41271299,40871137);国家基础研究发展计划(2007CB407201)

作者简介:王彬(1983—),男,河南新乡人,博士生,主要从事土壤侵蚀与土壤可蚀性评价研究。E-mail:wangbin1836@yahoo.com.cn

通信作者:郑粉莉(1960—),女,陕西蓝田人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀机理及其环境效应评价研究。E-mail:flzh@ms.iswc.ac.cn

1 土壤可蚀性相关概念

土壤可蚀性是指土壤在雨滴打击、径流冲刷等外营力作用下被分散、搬运的难易程度^[1]。Middleton^[2]首于 1930 年先定义了土壤可蚀性 (Soil Erodibility), 并提出了评估土壤可蚀性的两个重要指标, 即侵蚀率和分散率。随后, 国内外学者基于土壤对侵蚀作用敏感程度的被动性和抵抗侵蚀的主动性, 提出了许多相关概念。目前, 国外多采用土壤可蚀性概念, 并将其分为可分离性和可搬运性^[3]。国内则多采用抗冲抗蚀性概念, 并进一步分为抗蚀性和抗冲性^[4]。其中, 抗蚀性主要指土壤抵抗水体对土粒的分散和悬浮作用; 抗冲性则指土壤抵抗水等外营力产生的机械破坏和推移的能力^[5]。抗冲抗蚀性的概念在土壤侵蚀机理研究中具有重要意义, 但由于尚不能将其从侵蚀过程中分离出来, 故不适于土壤侵蚀定量评价。

1963 年, Olson 和 Wischmeier^[6] 定义了标准径流小区, 提出土壤可蚀性因子 K , 并从侵蚀预报的角度将土壤可蚀性定义为在标准径流小区上单位降雨侵蚀力所产生的土壤侵蚀量。这一概念物理意义明确、适用性强, 在土壤侵蚀定量评价研究中具有里程碑式的意义, 目前为多数学者采用。

2 土壤可蚀性的评价指标与体系

土壤可蚀性是土壤自身性质对外营力、气候等综合作用所反映出的复杂土壤特性。因此不能简单地以某一土壤理化性质的测定来表示, 而需通过在试验条件下实测土壤流失量或测定作为土壤可蚀性指标的某些土壤性质等, 对土壤可蚀性进行评价。几十年来, 国内外学者从土壤理化性质、侵蚀动力等方面进行了大量研究, 提出了一系列土壤可蚀性指标 (表 1)。

表 1 土壤可蚀性指标

研究者	年份	土壤可蚀性指标	类型	研究者	年份	土壤可蚀性指标	类型
Bennett ^[7]	1926 年	硅铝铁率	a	Wischmeier 等 ^[20-21]	1969 年	≥1 mm 的砂粒含量、有机质含量、土壤结构等级、土壤渗透等级等	a
Middleton ^[2]	1930 年	土壤浸湿热、侵蚀率、分散率	a	Chandra 等 ^[22]	1978 年	侵蚀系数	b
Baver ^[9]	1933 年	渗透性指数	a	史德明等 ^[23]	1983 年	团聚体分散性、水稳性指数	b
Bouyoucos ^[10]	1935 年	(砂粒%+粉粒%)/黏粒%	a	Farres 等 ^[24]	1985 年	团聚体风干率	a
Pelle ^[11]	1937 年	渗透率、悬浮率、分散率	a	李建牢等 ^[25]	1987 年	打散 0.7~1 cm 土粒所需水滴数	b
Voznesenski ^[1]	1938 年	$E=dh/a$	b	Lafren 等 ^[26]	1991 年	关系系数	
Gussak ^[12]	1946 年	冲刷 100g 土壤所需的水流量	b	Ekwue ^[27]	1992 年	土壤渗透性	a
Ellison ^[3]	1947 年	土壤可分离性、土壤可搬运性	b	杨玉盛 ^[28]	1992 年	分散率、侵蚀速率	a
朱显谟 ^[13]	1954 年	土壤膨胀系数、静水崩解	a	Bajracharya ^[29]	1992 年	团聚体稳定性、抗冲强度	a, b
朱显谟 ^[4]	1960 年	水冲穴深度	b	周佩华等 ^[30]	1993 年	单位径流深所对应的土壤流失量	b
Woodburn 等 ^[14]	1956 年	团聚体稳定性、分散率	a	王佑民等 ^[31]	1994 年	水稳性团聚体、腐殖质及黏粒含量	a
Olson 等 ^[6]	1963 年	土壤可蚀性因子 K	b	Amezketta 等 ^[32]	1996 年	土壤结构、抗剪强度	a, b
蒋定生等 ^[15-16]	1963 年 1995 年	单位水量所冲走的土量、可冲刷系数	b	安和平 ^[33]	2000 年	≥0.25 mm 水稳性团聚体	a
田积莹等 ^[17]	1964 年	团聚体总量、1~10 mm 团聚体量、团聚度、团聚体分散度、分散率、侵蚀率	a	赵晓光等 ^[34]	2003 年	抗剪强度	b
唐克丽 ^[18-19]	1964 年	土壤理化性质、黏土矿物构成、微结构	a				

注: a 为基于土壤内在性质的指标; b 为基于侵蚀动力的土壤可蚀性评价指标。

2.1 基于土壤内在性质的土壤可蚀性评价指标与体系

20 世纪 30 年代起, 各国学者便从土壤内在性质出发, 寻求适宜的指标用以评价土壤可蚀性。其中, 美国的研究最多。早期的研究多集中于土壤矿物组成和质地等基本属性对土壤可蚀性的影响。如 Bennett^[7] 首先通过测定和比较土壤质地、结构、有机质含量及化学组成等对土壤可蚀性的影响程度, 提出二氧化硅和氧化硅与氧化铁之比与土壤侵蚀之间存在显

著相关关系, 建议采用硅铝铁率判定土壤侵蚀程度。尔后, Middleton^[2] 发现土壤浸湿热与土壤侵蚀率成正比, 提出可将侵蚀率和分散率作为土壤可蚀性的评价指标。Bouyoucos^[10] 则推荐使用土壤中粉沙含量与黏粒含量的比率作为土壤可蚀性指标, 并通过试验发现它与土壤可蚀性之间具有正比关系。而其它学者则将土壤入渗率考虑在内, 认为渗透性指数、渗透率与悬浮率和分散率组成土壤可蚀性的最佳评价指

标体系^[9,11]。随着研究的深入,人们逐渐认识到土壤团聚体对可蚀性产生重要影响,相继提出团聚体表面率(≥ 0.05 mm 颗粒表面积与团聚体含量之比)、 > 0.5 mm 水稳性团聚体含量、水稳性团聚体风干率等指标作为土壤可蚀性指标^[14,29]。土壤可蚀性是一种复杂的土壤特性,而早期研究结果却多以一个或几个土壤基本属性构成指标体系,与实际情况相差较大。鉴于此,Wischmeier^[20-21]等人通过大量的分析计算,最终确立了以粉粒+极细砂含量(0.002~0.1 mm)、 ≥ 1 mm 的砂粒含量、有机质含量、土壤结构等级、土壤渗透等级 5 项指标构成的土壤可蚀性评价体系。这一评价体系的建立为土壤可蚀性定量化研究奠定了基础,目前仍被多数学者作为基本体系采用,并被广泛用作土壤侵蚀建型中表征土壤参数的定量指标。

我国土壤可蚀性领域的相关研究始于 20 世纪 50 年代。1954 年,朱显谟^[4]通过测定土壤膨胀系数及分散速率与土壤侵蚀的关系,发现土体的易分散性与土壤抗蚀力及土体吸水后的膨胀度有关;同时,朱显谟等^[13]指出土壤透水性是影响土壤侵蚀的主要原因,土体在静水中的崩解情况可作为土壤抗冲性指标。尔后,田积莹等^[17]通过对子午岭林区不同植被条件下 8 个土壤剖面的土壤物理性质进行研究,提出土壤团聚体总量、1~10 mm 团聚体总量、团聚度、团聚状况、团聚体分散度以及分散率和侵蚀率可作为土壤抗蚀性指标。唐克丽^[18-19]则从土壤物理化学、黏土矿物组成及微结构等土壤内在性质出发,研究了土壤侵蚀的发生发展过程与其抗蚀性能的作用机理。这些研究为我国土壤可蚀性研究的开展积累了丰富的资料,但由于研究较为分散,未能形成较为完善的评价体系。20 世纪 90 年代后,随着土壤可蚀性研究的发展,学者们在前人的研究基础上,结合国外先进的经验对不同地区的土壤可蚀性进行了研究。其中,杨玉盛^[28]通过研究不同土地利用方式下紫色土的可蚀性,提出侵蚀率、分散率、结构体破坏率可较好评价土壤可蚀性。王佑民等^[31]认为影响黄土高原土壤抗蚀性的主导因子是腐殖质及黏粒含量,水稳性团聚体含量为最佳指标。安和平^[33]在北盘江中游地区进行了类似的研究,指出 ≥ 0.25 mm 的水稳性团聚体含量可作为土壤抗蚀性指标。总结这些研究可以发现,基于土壤自身性质的土壤可蚀性评价指标中除水稳性团聚体外,其余均具有一定的不稳定性,其指标组合会随地区不同而产生变化。

基于土壤自身性质对侵蚀作用敏感性所选取的大量指标在土壤可蚀性评价中已被广泛采用。这些

指标的提出有助于分析土壤性质与土壤侵蚀之间的关系,为土壤可蚀性指标体系的建立奠定了基础。

2.2 基于侵蚀动力的土壤可蚀性评价指标与体系

20 世纪 40 年代起,部分研究者开展了基于土壤侵蚀动力的土壤抗冲性研究,并借助水滴或水流直接冲刷土样的微型试验设备测定土壤可蚀性。1938 年,Voznesenski^[1]首次提出了土壤可蚀性指数的概念 $E = dh/a$ (d 为分散率, h 为土壤亲水性, a 为在 1 h 强度为 1.7 cm/h 的水流冲刷下保留的 ≥ 0.25 mm 团聚体量)。此概念首次将土壤自身性质与外营力侵蚀作用相结合,为土壤可蚀性研究提供了新思路。一些学者延续该思路进行了大量研究,如 Gussak^[12]于 1946 年设计了古萨克抗冲槽,将不同水流流速下冲走 100 cm³ 土壤所需要的水量作为土壤抗冲性指标。但通过大量试验,他发现不同土壤对流速的敏感性存在显著的差异。随后,Ellison^[3]提出侵蚀动力是由分离能力和搬运能力两个相互独立因素组成,建议将土壤可蚀性研究分为土壤可分离性和土壤可搬运性两个部分。这一概念的提出,加深了人们土壤侵蚀过程的认识。

1963 年,Olson 等^[6]提出土壤可蚀性 K 因子的概念,并将土壤可蚀性定义为在标准小区上单位降雨侵蚀力所引起的土壤侵蚀量。这一概念的提出为土壤侵蚀预报做出了巨大贡献,使土壤可蚀性研究发生了质的飞跃。此后,学者们从可分离性和可搬运性两个方面开展了更为深入的研究,设计制造了索波列夫仪等类似的测定装置,并提出可用水滴破坏土体数、水冲坑大小等指标对土壤可蚀性进行描述^[8,11]。其中,Chandra 等^[22]提出侵蚀系数以判断土壤可蚀性大小,并推导出计算式:

$$K = (2.303/t) \times \lg[X/(X-x)] \quad (1)$$

式中: K ——侵蚀系数; X ——被侵蚀前土壤样品重量; x ——被侵蚀后土壤样品重量; t ——侵蚀历时。经分析得出侵蚀系数与侵蚀率,分散率,黏粒率等相关性较好。

国内学者朱显谟^[4]将土壤抗侵蚀性分为抗冲性和抗蚀性。他认为水冲穴的深度能够在一定程度上反映出土体抵抗雨滴打击及地面径流冲刷等作用破坏的程度;并于 1955 年在晋西地区采用索波列夫装置进行试验观测,所得结果与土体在静水中崩解的情况基本一致。蒋定生^[15]则改进了古萨克原状土冲刷水槽,提出可采用控制条件下(相同坡度和流量)单位水量冲刷的土量作为土壤抗冲性评价指标,并将土壤抗冲性分为四个等级。随后,窦保障^[35]采用蒋定生的改进土壤冲刷槽,对不同土地利用条件下的黄绵土抗

冲性进行了测定,得到了相似的结论。黄义端^[36]在总结前人研究成果后认为:“土壤分散率、侵蚀率、分散系数、团聚度等均可作为土壤抗冲性能的指标”,并提出土壤抗蚀性主要与黏粒及有机质含量或胶体性质有关,而土壤抗冲性则主要与土体的紧实度及植物根系数量和固结情况有关。此后,部分学者在不同地区开展了土壤抗蚀性研究,分别提出了土壤团聚体分散性、水稳性指数、土壤结构特征以及单个水滴打散 0.7~1 cm 土粒所需要水滴数等评价指标^[23,25,37]。李勇^[38-39]和刘国彬等^[40-41]使用抗冲槽等试验设备,在黄土高原地区进行冲刷试验研究,提出了植物根系能够有效强化土壤抗冲性,并指出影响土壤抗冲性的主导因素为:粗粉粒含量(0.01~0.05 mm)、砂粒(>0.05 mm)含量、土壤紧实度、水稳性团聚体含量及土壤容重等。周佩华等^[30]通过对土壤抗冲抗蚀性的试验方法进行分析发现,单位径流深所对应的侵蚀模数可作为表征土壤抗冲性的指标。但随后部分学者通过试验分析,发现该指标值随坡度发生较大变化,稳定性差^[42]。蒋定生等^[16]提出可冲刷性系数 $C=Qt/W$ 这一指标(Q 为冲走 W 克土壤所需要的水量, t 为冲走 W 克土壤所需要的时间),并指出土壤可冲刷系数是一个动态参数值,它应为土壤属性、地形条件、降水特征和人为活动共同作用的函数。目前,部分国内学者考虑到土壤力学性质,认为土壤抗剪强度可作为较为理想的土壤可蚀性评价指标^[43-44]。

3 土壤可蚀性的测定与计算

自 20 世纪 50 年代起,研究者们就开始运用数学方法定量描述各因子对土壤侵蚀的影响,并将土壤可蚀性作为土壤侵蚀预报模型的必要参数进行研究,建立了土壤侵蚀量与主导因子间的经验模型或诺谟图以及物理过程模型。同时,人工模拟降雨和小区试验逐渐发展,于 20 世纪 60 年代被广泛应用于土壤可蚀性的测定,大大加快了土壤可蚀性定量研究的进程。

3.1 人工模拟降雨及小区试验

根据 Olson 等^[6]提出的土壤可蚀性指标定义,研究者们可通过小区观测数据直接求算土壤可蚀性值,并能对不同地区的土壤可蚀性值进行比较。但使用该方法必须建立和维持小区试验,存在耗费高且观测周期长的缺点。为解决此问题,Wischmeier 等^[20]利用人工模拟降雨的方法,分析计算了 55 种土壤的理化性质指标与可蚀性因子 K 值的关系,得出包含 24 个变量的土壤 K 值估算方程。运用该方程,虽可解决无小区观测资料地区的 K 值估算问题,但由于其包含变量太多,使得方程的理解和应用都存在极大困

难。故此 Wischmeier 等^[21]又通过主成分分析等方法,最终选用粉粒+极细砂含量(0.002~0.1 mm)、 ≥ 1 mm 的砂粒含量、有机质含量、土壤结构等级、土壤渗透等级 5 项土壤特征指标,建立了查找土壤可蚀性 K 的诺谟图及关系式。该成果为人们提供了一种简便获取土壤可蚀性值的方式,同时也为今后土壤可蚀性定量计算提供了模板。随后,研究者们根据不同地区的实际情况,提出了不同的土壤可蚀性计算方法。如对于粉粒和极细砂含量之和小于 70% 的土壤,可以用下式计算:

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

式中: M = (粉砂含量+极细砂含量) \times (100 - 黏粒含量); OM —— 土壤有机质含量; S —— 结构系数; P —— 渗透性等级。

上述指标不仅形式简单,而且均能通过常规试验测定或土壤剖面描述确定。考虑到上式的适用范围有限,部分学者便利用不同地区的大量数据对土壤可蚀性值进行求算,得到了适用范围更广的计算方法。对于温带中等质地土壤,利用公式(2)计算 K 值^[45]。对于热带火山灰土壤,利用公式(3)计算 K 值^[46]:

$$K = -0.03970 + 0.00311X_1 + 0.00043X_2 + 0.00185X_3 + 0.00258X_4 - 0.00823X_5 \quad (3)$$

式中: X_1 —— 大于 0.25 mm 的非稳定性团聚体的比例; X_2 —— 修订的粉砂(0.002~0.1 mm)含量与修订的砂粒(0.1~2 mm)含量之积; X_3 —— 基础饱和度; X_4 —— 原土中粉砂含量; X_5 —— 修订的砂粒含量。

对含有 2:1 型晶架结构类黏土矿物的土壤,利用公式(4)^[47]或公式(5)^[48]计算 K 值:

$$K = -0.204 + 0.385X_6 - 0.013X_7 + 0.247X_8 + 0.003X_2 - 0.005X_9 \quad (4)$$

$$K = 0.004 + 0.00023X_{10} - 0.108X_{11} \quad (5)$$

式中: X_6 —— 团粒系数; X_7 —— 土壤中蒙脱石的含量; X_8 —— 深为 50~125 mm 土层土壤的平均容重(g/cm^3); X_9 —— 土壤分散率; X_{10} —— 修订粉砂(0.002~0.1 mm)含量与修订砂粒(0.1~2 mm)含量之积; X_{11} —— 土壤中用 CDB(柠檬酸盐—硫酸盐—碳酸盐)可提取氧化物(Al_2O_3, Fe_2O_3)的百分比。

若土壤不属于公式(2)至公式(5)的计算范围,且无充分资料的情况下,建议使用公式(6)或公式(7)^[48-49]计算 K 值:

$$K = 7.594 \times \left\{ 0.0034 + 0.0405 \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg D_g + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

$$K = 7.594 \{ 0.0017 + 0.0494 \times$$

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg D_g + 1.675}{0.6986}\right)^2\right] \quad (7)$$

式中: D_g ——土壤颗粒的几何平均粒径。

在国内,史学正^[50-51]、邢廷炎等^[52]先后采用人工模拟降雨法和田间实测法对比研究了我国亚热带 7 种代表性土壤的可蚀性,得出土壤可蚀性 K 值以紫色土最高,第四纪红黏土发育的土类最低的结论。随后,一些学者考虑到人工模拟降雨的组合形式及入渗性能等因素对土壤可蚀性的影响,在南方主要水蚀类型区开展了试验研究^[53-55]。其中,于东升等^[53-54]得出采用间歇式降雨模式可获得较为可靠的土壤可蚀性 K 值的研究结论,同时指出土壤表层饱和入渗率与土壤可蚀性之间存在负相关关系。

3.2 经验模型和诺谟图

通用土壤流失方程(USLE, Universal Soil Loss Equation)是土壤可蚀性研究中最具影响力的模型之一。1958 年,美国土壤保持局最先将 USLE 用于土壤侵蚀预报与评估。经过 20 余年的应用与资料积累,Wischmeier 等^[56]通过修正模型参数,提出了新版的通用土壤流失方程。随后又相继颁布了应用范围更广的修正土壤流失方程(RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation)及其不同更新版本^[45,57-59]。根据上述方程中土壤可蚀性 K 值的内涵,研究者们应用数学方法推求出了大量的土壤可蚀性计算公式,并计算了不同土壤类型的土壤可蚀性。随后,Sharply 等^[60]在 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)模型中,得出土壤可蚀性的计算公式为:

$$K = \{0.2 + 0.3e^{[-0.0256SAN(1-SIL/100)]}\} \times \left(\frac{SIL}{CLA+SIL}\right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + e^{(3.72-2.95C)}}\right] \times \left[1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + e^{(22.9SN_1-5.51)}}\right] \quad (8)$$

式中:SAN——砂粒百分含量(%);SIL——粉砂粒含量(%);CLA——黏粒含量(%);C——有机碳含量(%); $SN_1 = 1 - SAN/100$ 。

我国研究者也对土壤可蚀性 K 值的计算方法进行了大量的研究。吕喜玺等^[61]通过二次样条函数插值法转换土壤质地并结合土壤可蚀性 K 值经验计算模型,计算了我国南方主要易蚀土壤的 K 值,结果表明,第四纪红黏土发育的红壤 K 值最大,紫色土次之,花岗岩发育的红壤最小。杨子生^[62]则通过对滇东北山区耕地土壤的多年小区实测,建立了适合于该地区的修正诺谟公式,并指出犁底层土壤 K 值明显大于耕层。随后,安和平^[33]采用等级系数混合模型算法,得到了土壤可蚀性预测模型。在 K 值图编制方面,卜兆宏等^[63-64]最早通过查图表法获得了剖面点 K

值,编制了我国第一张地区级土壤可蚀性 K 值图;此后他又对 K 值图的编制方法进行进一步完善,首次制出了具有准确几何位置可与地形图配准的土壤可蚀性 K 值图。尔后,姜小三等^[65]、刘吉峰等^[66]采用数学模型和 GIS 分析相结合的方法,通过对各因子的修正计算出各地土种的土壤可蚀性 K 值,并做出了相应区域的土壤可蚀性 K 值分布图。

由表 2 可见,我国研究者目前大多采用 USLE 模型的 K 值求算方法,而在国外已被广泛采用的 RUSLE 及 RUSLE2 模型的 K 值求算方法使用甚少;另外,不同学者在进行 K 值求算时选用的标准小区规格不统一,且计算降雨侵蚀力 R 值的方法也各不相同,使得不同区间土壤可蚀性 K 值的横向比较存在极大不便。尽管如此,这些研究工作仍为我国不同地区土壤可蚀性因子 K 值的研究奠定了基础。

3.3 WEPP 模型

由于 USLE 等经验模型不能对单场降雨所产生的土壤流失量、侵蚀过程、沉积位置等进行预测,难以模拟复杂坡面的侵蚀状况。20 世纪 80 年代中期美国农业部开展了用以替代 USLE 的新一代水蚀预报模型 WEPP(Water Erosion Prediction Project)的开发^[27,73],并于 1995 年正式颁布,目前颁布的最新版本是 WEPP(v2008.907)^[74]。土壤可蚀性作为 WEPP 的重要参数,被进一步划分为细沟间可蚀性(K_i)、细沟可蚀性(K_r)、临界剪切力(τ_c)。其中,细沟间侵蚀是指侵蚀的初期雨滴和层流造成的土体分离和搬运过程^[27],细沟侵蚀则指由于水流的冲刷力大于临界剪切力而造成的土体分离。目前,通常将土壤分为砂土(砂粒体积分数 $\geq 30\%$)和黏土(砂粒体积分数 $< 30\%$)两组,并考虑农田土壤与牧场土壤的不同特性,用较为简单的公式分别推算 K_i 、 K_r 和 τ_c ^[75-79]。

4 土壤可蚀性动态变化研究

早期研究认为土壤可蚀性由土壤性质决定,故针对某一特定土壤,其土壤可蚀性为定值^[8,80]。但随着研究的深入,研究者们发现土壤可蚀性受空间、气候及人为活动的影响而发生变化,土壤可蚀性应为一相对概念,其动态变化主要表现为空间和时间变化。20 世纪 70 年代以来,土壤特性空间变异性的研究逐渐受到关注,随后这个概念被引入土壤侵蚀领域,并成为土壤可蚀性研究的一个热点。部分学者通过对不同地区土壤可蚀性的研究^[31,81-85],证实了其空间变异性的存在,并得出区域性的土壤可蚀性分布规律。

表 2 我国学者对土壤可蚀性值的部分研究结果

研究者	年份	地点	土壤类型	计算方法	可蚀性 K 值	单位	备注
张宪奎 ^[67]	1992 年	黑龙江	黑土	USLE	0.26	t/hm ²	$R=E_{60} I_{30}$ 坡度 9°
			暗棕壤		0.28		
			白浆土		0.31		
金争平 ^[68]	1992 年	内蒙古	黄土	USLE	0.02	(t · hm ² · h)/ (hm ² · MJ · mm)	坡度 6°
			砒砂岩		0.03		
			沙质黄土		0.015		
			风沙土		0.0075		
			红壤		0.29~0.38		
吕喜奎 ^[61]	1992 年	南方	黄岩壤	EPIC	0.22~0.25	(t · acre · h)/ (100acre · ft · t · in)	仅用土壤有机碳、 土壤颗粒分析,未 用实测值进行验证
			黄红壤		0.25		
			黄壤		0.26		
			黄棕壤		0.28		
			山地灌丛草甸土		0.30		
			黄棕壤型土		0.33		
			紫色土		0.37		
酸性紫色土	0.20						
周佩华 ^[30]	1993 年	山西	黄土	侵蚀量/径流深	0.0713~0.4467	kg/(m ² · mm)	小区实测
吴普特 ^[69]	1993 年	甘肃	黄土	侵蚀量/径流深	0.007~0.302	kg/(m ² · mm)	小区实测
卜兆宏 ^[63]	1994 年	河北 张家口	黏土	似 USLE	0.21	(sht, t) · acre · h/ [100acre · ft · (sht, t) · in]	利用查图表法计 算,未用实测值进 行验证
			黏壤土		0.28		
			壤土		0.38		
			砂壤土		0.27		
			砂土		0.05		
蒋定生 ^[19]	1995 年	陕西	黄土	Qt/W	0.01~0.544	(L · s)/g	冲刷试验
史学正 ^[51]	1997 年	江西鹰潭	红色土	USLE	0.104	0.132 (t · h)/ (MJ · mm)	自然降雨 $R=EI_{30}$ 小区面积 12 m ²
			黏淀红壤		0.277~0.228		
			普通红壤		0.232~0.438		
			紫色土		0.440		
于东升 ^[53]	1997 年	江西鹰潭	准红壤	USLE	0.256	(sht, t) · h/ [100ft · (sht, t) · in]	人工模拟降雨
			红色土		0.181~0.135		
			黏淀红壤		0.120~0.292		
			普通红壤		0.045~0.373		
			紫色土		0.322~0.327		
林素兰 ^[70]	1997 年	辽宁	准红壤	诺谟公式	0.223~0.171		
			黄土状棕壤		0.36~0.38		
刘文耀 ^[71]	1999 年	云南昭 通坝区	潜育型水稻土	USLE	0.39~0.43	t/(hm ² · a)	$R=EI_{15}$
			潜育型水稻土		0.51~0.56		
			淹育型水稻土		0.31~0.35		
			山地黄壤		0.50~0.58		
杨子生 ^[62]	1999 年	滇东北 山区	紫色土	USLE	0.55~0.59	t/(hm ² · a)	坡度 5° $R=E_{60} I_{30}$
			红壤		0.360		
			黄壤		0.301		
梁音 ^[72]	1999 年	东部丘 陵区	紫色土	USLE	0.410	未给出单位	通过土壤质地转化 计算,未用实测值 进行验证
			砖红壤		0.228		
			红壤		0.231		
			黄壤		0.191		
			黄棕壤		0.219		
卜兆宏 ^[64]	2002 年	太湖 流域	紫色土	USLE	0.343	(sht, t) · acre · h/ [100acre · ft · (sht, t) · in]	未用实测值进行验 证
			黄白土		0.4792		
			粉沙土		0.4612		
			黄泥土		0.3344		
			粗骨土		0.2277		
			黄棕壤		0.0559		
			侵蚀性赤红壤		0.226		
黄沙土	0.323						

更多研究者则对土壤可蚀性的时间变化产生了浓厚兴趣,并分别从干湿交替和冻融交替两个方面对土壤可蚀性的影响开展研究。一些学者认为,土壤可蚀性的主要决定因子——土壤结构及团聚体稳定性对干湿交替作用敏感^[86]。从这一角度出发开展了大量研究,证明暴雨间的持续干旱会引起土壤条件发生明显改变,以致土壤可蚀性发生变化^[87];并建议在进 USLE 推广时,应按干湿季分别计算 K 值,以避免由于可蚀性在干湿季节产生的较大差异而引起的预报精度降低的问题^[46,88]。其中, Misra^[89]通过人工模拟降雨试验研究了土壤干湿变化与可蚀性的相关关系,结果却表明由于土壤抗剪切强度随土壤特性发生变化,土壤可蚀性的变化具有不确定性。由此可见,干湿交替作用对土壤可蚀性确实存在影响,但其作用机制目前尚无定论。另外一些学者则从气温变化、冻融交替作用对土壤性质的影响方面,对土壤可蚀性的动态变化进行了深入研究。Mutchler 等^[84]较早通过对美国缅因州径流小区 6 a 的观测数据进行分析,指出土壤可蚀性的年内季节变化呈余弦关系,一年内出现两个极值:2 月达到最高值为年平均可蚀性的 1.69 倍,8 月达到最低值为年平均可蚀性的 0.31 倍。同时指出,土壤可蚀性与温度变化有高度相关关系。随后, Kirby^[90-91]等在魁北克西南部的试验得到了类似结论,并分析产生峰值的原因有可能是由于土壤表层融化导致表层土壤饱和而下层仍为冻土所致。Coote^[92]也认为土壤在春季解冻时比生长季节更容易发生侵蚀。但他认为导致土壤可蚀性变化的主要因素是土壤抗剪切力和团聚体稳定性随着时间变化,同时土壤水分和温度的重新组合会影响土壤对侵蚀的抵抗能力。更多的学者延续这一假设并进行了更为深入的研究,同样得出了类似的结论,并提出了诸如土壤稳定性团聚体在冬季减少、融雪造成土壤表层含水量增大等影响土壤可蚀性发生变化的原因及提高其计算精度的初步解决办法^[13,85,93-95]。其中, Salvador 等^[96]探讨了气候因素对土壤可蚀性动态变化的影响,并通过按月平均土壤可蚀性数据的分析得出,当地气候类型对土壤可蚀性具有显著的影响。同时指出,实验室测定的土壤特性,如:土壤质地、有机质含量等因素,由于在温热环境或干寒环境的掩盖下与土壤可蚀性的直接关系不强。目前,美国农业部 ARS 最新颁布的 RUSLE2 已考虑到土壤可蚀性的时间变化,在 K 值计算时加入了夏季模块、冬季模块及冬夏混合模块,以避免季节变化对土壤侵蚀预报精度的影响^[97]。但国内对于这一方面的研究鲜见报道,张科利等^[98]运用野外观测资料计算分析了我国黑

土、黄土及日本火山灰土等土壤可蚀性的季节变化规律,并研究了其随次降雨强度、不同强度段降雨组合的变化趋势。结果表明,土壤可蚀性具有明显的季节性变化,而且其变化规律还存在地带性差异。

5 存在的问题与建议

5.1 存在的问题

纵观国内外研究现状,土壤可蚀性研究目前存在或有待解决的主要问题有:(1) 缺乏较为统一的土壤可蚀性评价指标体系。由于研究目的及内容等的不同,导致土壤可蚀性评价指标选取各异,使得不同区域的土壤可蚀性资料无法共享。(2) 尚无适用于我国实际情况的标准小区定义。部分学者定义了我国标准小区规格^[42-43,99-100],但由于地区差异性 & 实际条件不同,尚无被大家普遍认可的标准小区规格,这在一定程度上限制了我国土壤可蚀性研究的发展。(3) 土壤可蚀性动态变化方面的研究甚少。土壤可蚀性存在动态变化的事实已被多数学者认同,但其发生机理、主要影响因素至今尚无定论。此外,土壤可蚀性的变化与人类的活动以及侵蚀的强度与方式也存在密切关系^[14,42,84,101],而目前此方面的研究基本为空白。(4) 土壤侵蚀机理研究尚待深入。

5.2 建议研究重点

(1) 土壤可蚀性评价指标体系:在确立适用于我国特殊侵蚀环境的标准径流小区基础上,利用统一的研究方法和测试手段,系统化研究我国主要水蚀类型区土壤可蚀性与土壤内在性质及侵蚀过程的关系,建立测定方法简单、应用简便、适用性强的土壤可蚀性评价指标体系,为侵蚀预报模型建立提供支持。

(2) 土壤可蚀性动态变化:针对我国不同水蚀类型区特殊的侵蚀环境,研究主要水蚀区土壤可蚀性动态变化规律,为提高我国土壤侵蚀预报精度提供理论支持。

(3) 土壤侵蚀过程机理。结合土壤侵蚀发生发展的过程,深入研究土壤可蚀性与土壤侵蚀的作用机理,从侵蚀动力学角度揭示土体分离、剥蚀和搬运作用机理,为土壤侵蚀防治提供理论基础。

参考文献:

- [1] Zachar D. Soil Erosion[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publisher Co., 1982:164-167.
- [2] Middleton H E. Properties of soils which influence soil erosion[M]. USDA. Technical Bulletin, 1930: 173-176.
- [3] Ellison W D. Soil erosion studies-Part I [J]. Agri. Eng., 1947,28:145-146.

- [4] 朱显谟. 黄土地区植被因素对水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-121.
- [5] 蒋德麒, 朱显谟. 水土保持[C]//中国农业土壤论文集. 上海: 上海科学技术出版社, 1962.
- [6] Olson T C, Wischmeier W H. Soil erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1963, 27: 590-592.
- [7] 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 Sci., 1926(21): 349-375.
- [8] Huson N. Soil Conservation[M]. AMES: Iowa State University Press, 1995.
- [9] Baver L D. Some factors effecting erosion [J]. Agri. Eng., 1933, 14: 51-52.
- [10] Bouyoucos G J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. Journal of American Society of Agronomy, 1935, 27: 738-741.
- [11] Pelle T C. The relation of certain physical characteristics to the erodibility of soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1937(2): 97-100.
- [12] Gussak V B. A device for the rapid determination of erodibility of soils and some results of its application [J]. Abstract in soils and Fertilizers, 1946(10): 41.
- [13] 朱显谟. 泾河流域土壤侵蚀现象及其演变[J]. 土壤学报, 1954, 2(4): 209-222.
- [14] R. 拉尔. 土壤侵蚀研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [15] 蒋定生. 黄土抗蚀性的研究[J]. 土壤学报, 1978(4): 20-23.
- [16] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 论晋陕蒙接壤区土壤抗冲性与水土保持措施体系[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 1-7.
- [17] 田积莹, 黄义端. 子午岭连家砭地区土壤物理性质与土壤抗侵蚀性能指标的初步研究[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-121.
- [18] 唐克丽. 生草灰化与黑钙土的团粒结构—抗蚀性能[C]//全苏土壤侵蚀会议论文集, 1961.
- [19] 唐克丽. 生草灰化与黑钙土的抗蚀性能及其提高途径[C]//中国科学情报所中国留学生论文, 1964.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D. Evaluation of soil properties to its erodibility[J]. Soil Sic. Soc. Am. Proc., 1969, 33(1): 131-137.
- [21] Wischmeier W H, Johnson C B. A soil erodibility nomograph for farmland and conservation sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193.
- [22] Chandra S, De S K. A simple laboratory apparatus to measure relative erodibility of soils[J]. Soil Science, 1978, 125: 115-121.
- [23] 史德明, 杨艳生, 姚宗虞. 土壤侵蚀调查方法中的侵蚀试验研究和侵蚀量测定问题[J]. 中国水土保持, 1983(6): 15-19.
- [24] Farres P J, Cousen S M. An improved method of aggregate stability measurement [J]. Earth Surface Processes Landforms, 1985(10): 321-329.
- [25] 李建牢, 刘世德. 罗玉沟流域土壤抗蚀性分析[J]. 中国水土保持, 1987(11): 34-37/8.
- [26] Laflen J M, Elliot W J, Simanton J R. WEPP soil erodibility experiments for rangeland and crop land soils [J]. Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 39-44.
- [27] Ekwue E I. Effect of organic and fertilizer treatments on soil physical properties and erodibility[J]. Soil and Tillage Research, 1992, 22(3): 199-209.
- [28] 杨玉盛. 不同利用方式下紫色土可蚀性的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 52-58.
- [29] Bajracharya R M, Lal R. Seasonal soil loss and erodibility variation on a Miamian silt loam soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992(56): 1560-1565.
- [30] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性试验研究方法探讨[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 29-34.
- [31] 王佑民, 郭培才, 高维森. 黄土高原土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 11-16.
- [32] Amezketa E, Singer M J, Le Bissonnais Y. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation [J]. Soil Sci. Soc. Am., 1996, 60(3): 888-894.
- [33] 安和平. 北盘江中游地区土壤抗蚀性及预测模型研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 38-42.
- [34] 赵晓光, 石辉. 水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 12-16.
- [35] 窦葆璋. 土地利用方式对黄绵土抗冲性的影响[C]//陕西省土壤学会 1978 年学术年会论文集, 1978.
- [36] 黄义端. 我国主要地面物质抗蚀性能初步研究[C]//中国科学院西北水土保持研究所, 黄土高原水土流失综合治理科学讨论会资料汇编, 1981.
- [37] 余新晓, 陈丽华. 黄土高原沟壑区土壤抗蚀性的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 1988, 10(1): 28-34.
- [38] 李勇, 吴钦孝, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 1-16.
- [39] 李勇, 朱显谟. 黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J]. 科学通报, 1990, 35(5): 390-393.
- [40] 刘国彬, 梁一民. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程: I. 草地植被恢复生物量特征[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 102-110, 121.
- [41] 刘国彬. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程 II. 植被恢复不同阶段土壤抗冲性特征[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 111-121.

- [42] 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):1687-1695.
- [43] 赵晓光,石辉.水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J].干旱区地理,2003,26(1):12-16.
- [44] 查小春,贺秀斌.土壤物理力学性质与土壤侵蚀关系研究进展[J].水土保持研究,1999,6(2):98-104.
- [45] Renard K D, Forste G D, Weesies G A. Prediction Rainfall Erosion by Water: A Guild to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. USDA Agricultural Handbook No. 703,1997.
- [46] EI-Swaify S A, Dangler E W. Erodibility of Selected Tropical Soils in Relation to Structural and Hydrologic Parameters[C]// Soil Erosion: Prediction and Control. Ankeny, Iowa; Soil Cons. Soc. Am., 1977.
- [47] Young R A, Mutchler C K. Erodibility of some Minnesota soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1977,32(4):180-182.
- [48] Römkens M J M, Roth C B, Nelson D W. Erodibility of selected clay sub-soils in relation to physical and chemical properties[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1977, 41(5):954-960.
- [49] Shiriza M A, Boerama L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984,48 (1):142-147.
- [50] 史学正,于东升,吕喜玺.用人工模拟降雨仪器研究我国亚热带土壤的可蚀性[J].水土保持学报,1995,9(3): 38-42.
- [51] 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[J].土壤学报,1997,34(4):399-405.
- [52] 邢廷炎,史学正,于东升.我国亚热带土壤可蚀性的对比研究[J].土壤学报,1998,35(3):296-302.
- [53] 于东升,史学正,梁音,等.应用不同人工模拟降雨方式对土壤可蚀性 K 值的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2):53-57.
- [54] 于东升,史学正.低丘红壤干旱地土壤渗透性与可蚀性定量关系的研究[J].土壤学报,2000,37(3):316-322.
- [55] 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.
- [56] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses[M]// Agricultural Handbook 537. Washington D C, USDA,1978.
- [57] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE: revised universal soil loss equation[J]. Soil and Water Conservation, 1991,46(1):30-33.
- [58] Renard K G. Computerized calculations for conservation planning[J]. Agricultural Engineering, 1992,73 (4):16-17.
- [59] Foster G R, Yoder D C, Weesies G A, et al. The design philosophy behind RUSLE2: Evolution of an empirical model[Z]. Soil Erosion Research for the 21st Century, Proc. Int. Symp. (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA). Eds. J. C. Ascough II and D. C. Flanagan. St. Joseph, MI; ASAE. 701P0007.
- [60] Sharply A N, Williams J R. EPIC-Erosion/Productivity impact calculator I: Model documentation[Z]. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990. No. 1768.
- [61] 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.
- [62] 杨子生.滇东北山区耕地土壤可蚀性因子[J].山地学报,1999,17(Z1):10-15.
- [63] 卜兆宏,李全英.土壤可蚀性(K)值图编制方法的初步探讨[J].遥感技术与应用,1994,9(4):22-27.
- [64] 卜兆宏,杨林章,卜宇行,等.太湖流域苏皖汇流区土壤可蚀性 K 值及其应用的研究[J].土壤学报,2002,39 (3):296-300.
- [65] 姜小三,潘剑君,杨林章,等.土壤可蚀性 K 值的计算和 K 值图的制作方法研究:以南京市方便小流域为例[J].土壤,2004,36(2):177-180.
- [66] 刘吉峰,李世杰,秦宁生,等.青海湖流域土壤可蚀性 K 值研究[J].干旱区地理,2006,29(3):321-326.
- [67] 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.
- [68] 金争平,史培军,侯福昌,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.
- [69] 吴普特,周佩华,郑世清.黄土丘陵区(Ⅲ)土壤抗冲性研究:以天水站为例[J].水土保持学报,1993,7(3):19-36.
- [70] 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):251-253.
- [71] 刘文耀.云南昭通盆地降雨侵蚀与土壤可蚀性的初步研究[J].云南地理环境研究,1999,11(2):76-82.
- [72] 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.
- [73] Flanagan D C, Livingston S J. Inspector[J]. USDA, 1995(7):740.
- [74] Water Erosion Prediction Project [EB/OL]. USDA-ARS, 2008. [2008/12/08] <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/wepmain/>
- [75] 郑粉莉,杨勤科,王占礼.水蚀预报模型研究[J].水土保持研究,2004,11(4):13-24.
- [76] 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]. Trans ASAE, 1989,32 (5):1587-1593.
- [77] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of

- hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4):127-142.
- [78] 刘宝元, 史培军. WEPP 水蚀预报流域模型[J]. *水土保持通报*, 1998, 18(5):6-12.
- [79] 谢春燕, 陈晓燕, 何炳辉, 等. 土壤可蚀性在 WEPP 模型中的应用[J]. *水土保持科技情报*, 2003(4):6-9.
- [80] Bouyoucos G J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. *Journal of American Society of Agronomy*, 1935, 27(9):738-741.
- [81] 陆兆雄, 陈浩. 土壤抗剪力及可蚀性的时空变化规律[C]//晋西黄土高原土壤侵蚀规律研究文集, 北京:水利电力出版社, 1990.
- [82] 蒋定生, 范兴科, 李新华, 等. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(2):1-8.
- [83] 王艳忠, 胡耀国, 李定强, 等. 粤西典型崩岗侵蚀剖面可蚀性因子初步分析[J]. *生态环境*, 2008, 17(1):403-410.
- [84] Mutchler C K, Cater C E. Soil Erodibility Variation During the Year [M]. *Transactions of the ASAE*, 1983:1102-1104.
- [85] Rejman J, Turski R, Paluszek J. Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 46(1):61-68.
- [86] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [87] Giovannini G, Vallejo R, Lucchesi S. Effect of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 147(1):15-23.
- [88] Hosoyamada K. The effect of rainfall and soil properties on farmland conservation[J]. *Irrig Eng. And Rural Planning JPN. SOC. Irrig and Reclamation Eng.*, 1986(9):5-14.
- [89] Misra R K, Teixeira P C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength [J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 59(1/2):81-93.
- [90] Kirby P C, Mebuys G. R. The seasonal variation of soil erosion by winter in South-Western Quebec[J]. *Can. J. Soil Sci.*, 1987, 67:55-63.
- [91] Kirby P C, Mebuys G R. Seasonal variation of soil erodibility in SouthWestern Quebec[J]. *J. Soil & Water Conserv.*, 1987, 42(3):211-215.
- [92] Coote D R, Malcolm C A, Wall G J, et al. Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils[J]. *Can. Soil Sci.*, 1988, 68:405-416.
- [93] Bryan R B. The influence of forest action on soil-aggregate stability [J]. *Trans. Inst. Br. Geog.*, 1971, 54:71-88.
- [94] Vliet L J P, Wall G J. Soil erosion losses from winter runoff in Southern Ontario[J]. *Can. J. Soil Sci.*, 1981, 61:451-454.
- [95] Parysow P, Wang G X. Spatial uncertainly analysis for mapping soil erodibility based on Joint Sequential Simulation[J]. *Catena*, 2003, 53(1):65-78.
- [96] Salvador Sanchis M P, Torri D, Borselli L, et al. Climate effects on soil erodibility [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, Doi:10.1002/esp.1604
- [97] USDA-Agricultural Research Service. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2[M/OL]. Washington D C, USDA-ARS, 2008[2008-11-28]. <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=6010>.
- [98] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 土壤可蚀性动态变化规律研究[J]. *地理学报*, 2001, 56(6):673-681.
- [99] 江忠善, 郑粉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):66-69.
- [100] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. *泥沙研究*, 2005(4):1-6.
- [101] 刘效雨, 刘益军. 火灾对毛竹林地土壤抗蚀性与渗透性的影响[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2007, 32(6):114-118.