

土壤因子研究综述

雷俊山, 杨勤科

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 介绍了国内外土壤因子的研究方法及研究成果, 指出我国目前土壤因子研究中存在的问题, 并结合我国土壤因子研究现状, 认为继续土壤水蚀机理的研究是今后土壤因子研究的内容之一, 同时, 随着 GIS 和 RS 技术发展, 应用 GIS 和 RS 技术研究区域土壤因子也将成为潮流。

关键词: 土壤可蚀性; 土壤抗蚀性; 土壤抗冲性

中图分类号: S 157; T P79 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 02-0156-04

Summarization on Soil Factor Researches

LEI Jun-shan, YANG Qin-ke

(Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The authors introduce the domestic and international research methods and results of the soil factor and point out some problems of soil factor researches in our country. According to the current situation of the soil factor research in our country, it indicates that going on with the study on the mechanical research of the water erosion is one of the future contents, in the meantime, with the development of the Geographical Information System and Remote Sensing technology, it will also become popular to apply the GIS and RS to the study of regional soil factor.

Key words: soil erodibility; soil anti-erodibility; soil anti-scouring

土壤作为被侵蚀的对象, 自身的可侵蚀性是水土流失发生的内在因素。土壤因子对土壤侵蚀的影响一般用土壤的抗侵蚀性来表示, 它主要通过影响侵蚀动力对土壤的分散、搬运及其它机制(如入渗) 等来影响土壤侵蚀^[1]。在实际的土壤侵蚀过程中, 土壤因子与其它因子共同作用, 影响土壤侵蚀的全过程。土壤因子是水土流失预报模型的一个重要参数, 它的水土流失综合治理, 水土保持措施的配置, 水土流失模型的建立以及水土保持规划具有重要意义。

1 国外土壤可蚀性的研究

国外土壤因子主要是研究土壤可蚀性, 这一术语最先由库克^[2]提出, 由于土壤的可蚀性是一个受多因素影响的综合因子, 因此, 人们只能用一定控制条件下土壤流失量或土壤性质的某些参数作为土壤可蚀性指标, 以达到评价其可蚀性的目的^[3]。

1.1 依据土壤性质评价土壤可蚀性的研究

贝内特^[4]于 1926 年第一个认识到土壤的抗蚀性质随土壤的不同而变化, 他测定了古巴砖红壤的质地、结构、有机质和化学组成等, 发现土壤侵蚀与 SiO₂/R₂O₃ 之间有明显的相关性, 但他当时并没有提出把 SiO₂/R₂O₃ 作为土壤可蚀性指标。1930 年, 米德尔顿^[5]比较了密苏里易蚀土壤和古巴不易蚀土壤, 以及北卡罗来纳的易蚀土壤和不易蚀土壤, 发现以分散状态存在的粉沙加黏性含量与土壤的可蚀性有明显的相关性, 他依次提出以土壤分散率、SiO₂/R₂O₃ 和侵蚀率作为估价土壤可蚀性的指标, 分散率(%) = (水散性粉沙+ 黏

粒) / (总的粉沙+ 黏粒) × 100%, 侵蚀率= 分散率/ (胶体含量/ 水分当量), 结果表明: 易蚀土壤的分散率> 15%, SiO₂/R₂O₃ 的平均值约为 9.03, 不易蚀土壤的分散率< 15%, SiO₂/R₂O₃ 平均值约为 0.52, 但他最终认为侵蚀率是土壤可蚀性最精确的指标。1933 年, 贝弗^[6]提出土壤流失预测的关系式 $E = KD/AP_p$, 式中: E ——土壤侵蚀量; K ——一个关系常数; D ——分散的难易程度; A ——土壤吸附能力; P ——渗透率; p ——土壤颗粒大小, 这个关系式得到了卢兹^[7]的进一步证实。

1935 年, 鲍尤克斯^[8]从不同角度探讨了土壤分散问题, 建议用黏粒率作为土壤可蚀性的直接指标, 黏粒率= (沙+ 粉沙) / 黏粒, 并认为黏粒率测定快速简便将会被广泛应用。皮尔^[9]等 1938 年在测定南卡罗来纳州使用石灰和有机物对黏性土壤的影响时, 用土壤渗透性作为可蚀性指标。安德森^[10]于 1954 年提出用团聚体表面率作为土壤可蚀性指标: 团聚体表面率= 大于 0.05 mm 颗粒的表面积/[团聚体的含量(粉沙+ 黏粒)]。研究中发现这个指标与美国俄勒岗州 33 个流域的悬浮沉积物有很高的相关性, 并发现酸性火成岩发育土壤的团聚体表面率为 164, 而玄武岩发育的土壤表面率只有 59。五德伯恩^[11]等于 1956 年用团聚体的稳定性和分散率作为密西西比西部 23 个流域土壤可蚀性指标, 并得出大于 0.05 mm 的水稳性团聚体的重量百分比和土壤溅蚀量具有良好的负相关关系。

1.2 ULSE 与 WEPP 中土壤可蚀性研究

1956 年, 威斯奇迈尔等人根据近万个径流小区试验资

¹ 收稿日期: 2003-11-27
作者简介: 雷俊山(1979-), 男, 陕西大荔县人, 硕士, 从事区域水土保持与环境研究。

料提出了 ULSE^[12, 13], 其表达式为: $A = RKLSCP$, K 值获取是在长 22.13 m, 宽 1.83 m, 9% 的连续坡度的小区上进行, 小区要连续耕作和没有植被, 2 年以上休闲地, 顺坡耕作, 并且把小区处理的像种植玉米的苗床一样。在测定土壤流失量期间, 要求每年春季将小区犁一次, 以防止植被生长或形成外壳。上述条件满足后, $LSCP = 1$, 然后用 $K = A/R$ 计算 K 值。虽然这种方法能真正反映自然条件下土壤的可蚀性, 但 K 值的测定所需时间较长, 花费也多。1971 年威斯奇迈尔根据土壤性质与实际土壤可蚀性 K 值, 建立了他们之间的关系式:

$$100K = 2.1M^{1.14} \times 10^{-4} (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

式中: M ——颗粒分析参数; a ——有机质百分含量; b ——土壤结构的级别参数; c ——反映土壤渗透级别的参数。

由于 ULSE 没有明确反映径流的影响, 不能进行沟蚀土壤流失量的预测, 不太适用于垄作、等高耕作等一些带状耕作措施。1992 年 10 月, 美国农业部自然资源保护局正式决定实施 RUSLE 方案。在 RUSLE 模型^[14]中, K 值被修改为一个随季节变化的量, 即在冰融化土壤变松时的春季最大, 中秋和冬季为最小, 且 K 值随季节变化值以 15 d 为间隔。

1985~1995 年, 美国农业部、农业研究局等共同开发了 WEPP 模型^[15]。WEPP 模型是一个物理过程模型, 因其适用对象不同而对应 3 种不同的版本: 坡面模型; 小流域模型和网络模型。其中网络模型适用于区域面上的土壤侵蚀预测, 可以解决区域之间的泥沙输移问题。WEPP 模型涉及的侵蚀过程包括降水入渗、灌溉、地表径流、土壤剥离、泥沙运输与沉积, 植物生长、残茬分解等, 该模型可以模拟每天多层土壤的含水量变化及作物的生长与残茬的腐烂, 还能模拟耕作方式及土壤压实对土壤侵蚀的影响。

WEPP 模型中将土壤可蚀性进一步分为沟间可蚀性 K_i , 细沟可蚀性 K_r 和土壤临界剪切力 τ_c ^[16, 17], 为了得到这 3 个参数, 1987 年和 1988 年在美国 24 个州做了 2 年人工降雨和放水冲刷试验, 但结果并不理想。因为试验得到的土壤流失量难于区分是分离的结果还是搬运的结果, 目前只能将土壤分为砂土(砂砾含量大于或等于 30%)和黏土(砂砾含量小于 30%)两组, 用 6 个简单的公式分别推算 K_i , K_r , τ_c 。

2 国内土壤抗蚀性与抗冲性的研究

相对于欧美国家来说, 我国土壤因子研究起步较晚。我国土壤因子研究主要分为土壤抗蚀性(可蚀性 K 值)研究和土壤抗冲性研究。

2.1 K 因子研究

一些学者认为 USLE 在中国具有一定适用性, 企图借用 ULSE 中土壤因子的某些方法研究中国的土壤因子, 其方法一是利用土壤性质定量计算土壤可蚀性 K 值, 并进行评价, 二是用天然降雨和人工模拟降雨试验得到适用于自己的土壤可蚀性 K 值^[18]。

马至尊^[19]1989 年探讨应用卫星影像估算海河流域太行山区土壤流失方程式各因子时, 选用诺谟图来计算不同土壤的可蚀性因子 K 值。1992 年, 陈法扬^[20]根据 USLE 在小良水土保持试验站应用诺谟图进行了土壤可蚀性 K 值的估算, 并用月平均气温来校正, 结果表明: 纯桉树林 K 值的逐月变化范围为 0.56~1.45, 光板地逐月变化范围为 0.7~1.47, 冬季普遍大于夏季。吕玺喜, 沈荣明^[21]应用二次样条插值法完成了把土壤质地从苏联制转换成美国制, 并用威斯奇

迈尔建立的土壤可蚀性 K 值计算公式计算了我国南方易蚀土壤的 K 值, 结果表明: 第四纪红色黏土发育土壤的 K 值最大, 其值为 0.38, 其次是紫色土, 最低的为酸性紫色土, 其值仅为 0.20。

陈明华, 周伏建^[22]等通过人工模拟降雨和天然降雨实验, 测出了我国南方不同土壤样品的可蚀性 K 值, 结果表明: 试验测出来的 K 值普遍比用美国公式计算出来的 K 值小, 福建红壤区土壤的可蚀性 K 值介于 0.038 和 0.284 之间, 他分析了影响 K 值的因素, 并结合土壤理化性质建立我国南方土壤可蚀性数学模型:

$$K = 10^{-3} (164.80 - 2.31x_1 + 0.38x_2 + 2.26x_3 + 1.31x_4 - 14.67x_5)$$

式中: K ——土壤可蚀性; x_1 ——细粒(1~3 mm)% ; x_2 ——细砂(0.05~0.25 mm)% ; x_3 ——粗粉粒(0.01~0.05 mm)% ; x_4 ——细粉粒(0.005~0.01 mm)% ; x_5 ——有机质含量(10 g/kg)。

史学正^[23]等人通过径流小区研究土壤可蚀性 K 值与土壤性质关系后, 建立了我国东部丘陵区土壤可蚀性 K 值的非线性方程式:

$$K = 0.0871 - 0.05264 \lg(v) + 0.0604(\text{pH}) - 0.0031(\text{Fe}^{3+}) + 0.5147(M) + 0.4046(C)$$

式中: K ——土壤可蚀性(0.132 h/Mj·mm); v ——表层 0~20 mm 土壤容重(g/cm³); pH——土壤酸度; Fe^{3+} 是表层 0~20 mm 土壤游离铁含量(g/kg); M 和 C 分别为土壤有机质因子和土壤黏性因子, 计算公式分别为:

$$K = 0.8243 - 1.6297\sin(O_m) - 0.2079\sin^2(O_m) + 5.0465\sin^3(O_m) + 1.7092\sin(O_m) - 3.5244\sin^5(O_m) \\ C = 0.1260 + 0.0694\exp[\sin(2Nc)]$$

式中: O_m ——土壤有机质含量(g/kg); Nc ——粒径小于 0.002 mm 土壤黏粒含量(%)。该方程式对土壤可蚀性 K 值的复相关系数 R 为 0.998 8, 期望方差为 0.997 7。

2.2 土壤抗冲性研究

国内土壤的抗冲性的研究, 其研究方式主要有: 仪器测定法, 小区放水法和观测资料统计法:

2.2.1 仪器测定法

这类方法是用一定的仪器, 如古萨克抗冲槽、索波列夫抗冲仪、威廉斯基的滴水器、奥尔德曼的试验装置以及我国蒋定生设计的抗冲槽等, 对原状土壤的某些性质进行定量测试, 评价其抗冲性。我国研究土壤抗冲性最早的试验方法是采用 5 cm 见方的原状土壤, 放在静水中测其崩解速度, 崩解速度越大说明抗冲性越弱, 反之较强。朱显谟院士利用此方法测定了黄土区甘肃中部地区原状土体的崩解速度, 以此作为衡量该地区土壤抗冲性强弱的指标。这种方法的优点在于简单, 方便, 获取资料周期短, 花费少。但土壤在静水中的崩解, 与径流冲刷土壤的实际情况相差甚远, 虽然测出的结果与土壤抗冲性有一定的相关关系, 但很难真正反映径流冲刷土壤的实质。

朱显谟^[24]认为水冲穴的深浅在一定程度上也可以反映出土体抵抗雨滴打击和地面径流的冲击等破坏作用的强弱。他曾于 1955 年在晋西地区采用索波列夫装置, 分别用 50 kPa 和 100 kPa 压的股水进行试验, 所得结果大体上与土体在静水中崩解的情况一致。蒋定生^[25]应用原状土冲刷水槽法测定了黄土地区农、林、草地的土壤抗冲性, 认为单位水量所冲走的土量可以作为评价土壤抗冲性的指标, 并将土壤抵抗流水冲刷的能力分为 4 个等级。赵兴实, 顾仁德^[26]等用抗冲槽在研究黑土的抗冲抗蚀性时, 建议用土壤的抗冲强度和

缓冲系数来表示土壤的抗冲能力的强弱, 研究表明: 黑土由轻度、中度、到重度侵蚀其抗冲力越来越弱, 而极重度侵蚀的土壤抗冲能力反而增强了(黑土层已被全蚀蚀掉, 残留的是坚硬的 B 层)。李勇^[27], 朱显谟等用 100 kPa 下水的冲力, 冲击黄土高原各种类型土壤剖面 1 min, 用冲刷掉的土量表征土壤抗冲性的大小, 结果表明黄土高原土壤抗冲性强弱依次为: 灰褐土> 黑垆土> 黄绵土> 灰钙土, 他通过分析土壤剖面理化性质和土壤冲刷量的关系, 认为影响土壤抗冲性的主导因素依次是粗粉粒、砂粒、紧实度、水稳性团聚体含量和总孔隙度。刘国彬^[28, 29]等用抗冲槽法, 结合土壤理化性质分析, 研究了黄土高原植被恢复过程中土壤抗冲性的情况, 结果表明林草地根系缠绕的土壤抗冲性明显增强, 随着植被恢复, 产沙时间缩短, 冲刷量减少, 他建议选择水土保持草种时选用毛根丰富的。

2.2.2 放水冲刷法和观测资料统计法

即在野外设置一定面积的小区, 在其上按不同流量放水使土壤在已知径流作用下进行对比冲刷试验, 根据土壤流失量来衡量土壤的抗冲性强弱。由于在野外实地小区放水, 土壤不受扰动, 而且地形、汇流和土壤受力情况都保持原有状态, 克服了冲刷槽之不足, 但其需水量大, 供水困难。周佩华、郑世清^[30]把放水冲刷法和径流小区资料统计法结合起来, 研究了黄土高原不同地区土壤的抗冲性, 发现冲刷量和次降雨径流深具有很好的幂函数关系, 他以单位面积单位径流深的土壤冲刷量作为土壤抗冲性评价指标, 结果表明, 用两种方法所得出来的土壤抗冲性指标随着坡度和土地利用变化的不同而有着相同的变化趋势, 但放水冲刷法结果稍微大一些, 尤其是在翻耕以后的农耕地。杨文元^[31]选用同样的评价指标和同样的方法研究了紫色丘陵区土壤抗冲性, 结果表明, 在自然降雨条件下, 径流强度增大, 土壤抗冲指标值越大, 径流时间越长, 土壤抗冲指标值越小。

3 国内区域土壤侵蚀评价中的土壤因子研究

3.1 定性研究

黄义端^[32]认为土壤的分散率、侵蚀率、分散系数、团聚度等均可反映土壤抗水的分散悬移能力, 故可作为土壤抗蚀性能的指标。土层的松紧度、厚度以及土块在水中的崩解和冲失情况可反映土体抵抗径流冲刷的能力, 故可作为土壤抗冲性指标。他根据上述指标并参考与之有关的因素, 将土壤的抗蚀、抗冲性能划分为极弱、弱、中、强、极强 5 个等级。研究表明, 凡在土状沉积物、厚层土被、砂质堆积物、结晶岩及其变质岩上的深厚风化壳和松软的易风化岩层的地区, 都有一种或几种较为严重的侵蚀现象, 而在坚硬致密的基岩分布区的薄层残积土被上, 土壤侵蚀都较为轻微, 且很少有沟蚀发生。

3.2 定量测试研究

蒋定生^[18]从土壤抗冲, 崩解, 抗剪切力和渗透等方面对黄土高原土壤进行了较为系统研究, 得出黄土高原浅层土壤的抗冲系数, 崩解速率和抗剪强度由西北向东南逐渐增加的结论。对于渗透, 蒋定生则提出了下式估算土壤在积水情况下土壤的瞬时入渗速率:

$$f = 6.4 - 5.4 d_2 + 0.2 m + (91.2 - 68.6 d_1 + 5.4 d_2 + 0.3 h - 0.2 m) t^{-a}$$

式中: f —— t 时的瞬时入渗速率; d_2 ——土壤底层(20~50 cm)的土壤容重, m ——大于 0.25 mm 的水稳性团粒含量; d_1 ——土壤表层容重, h ——含水量, a ——待定系数。(在黄土高原地区的均值为 1.36)。

张爱国^[33]用同样的测试方法, 对全国土壤抗冲系数、渗透速率、崩解速率和抗剪强度等进行了定量测试, 结果表明, 土壤抗冲性自北向南、自东向西逐渐变大, 出现两个抗冲系数低值区——黄土高原和东北黑土区, 有三个抗冲系数高值区——青藏高原、贵州高原和淮北山地。土壤稳渗速率由南向北逐渐变小, 但在黄土高原地区较高, 土壤崩解由北向南明显降低, 抗剪强度的相对高值区是贵州高原、黄土高原、淮北山地、闽西山区; 低值区为东北南部、甘肃西部和西秦岭地区。

他通过分析各个测点土壤的理化性质和测试指标的关系, 建立了抗冲系数, 崩解速率, 渗透速率, 抗剪强度与土壤理化性质的 4 个统计模型。他还提出评价土壤因子的综合指标——土壤可侵蚀性指数, 即单位时间内、单位面积上的土壤、由单位体积径流量所产生的推移质和悬移质重量之和, 并建立了全国土壤指数与土壤理化性质关系的统计模型:

$$S = 661 - 3.2 X_1^2 + 0.4 X_2 - 1.1 X_3 - 2.8 X_4 - 28.3 X_5 - 105.5 X_6 - 0.02 X_7^2 + 4 X$$

式中: S ——土壤可蚀性指数($t \cdot L^{-1} \cdot a^{-1} \cdot km^{-2}$); X_1 ——有机质含量(%); X_2 ——粉黏比; X_3 ——大于 0.25 mm 风干土水稳性团粒含量(%); X_4 ——有效根密度($mm \cdot 1000^{-1} \cdot cm^{-3}$); X_5 ——pH 值; X_6 ——容重(g/cm^3); X_7 ——含水量(%)。

4 存在问题与研究趋势

欧美国家在土壤因子方面起步较早, 也比较成功。我国水土保持研究工作是在新中国成立以后迅速发展起来的, 就目前的土壤因子研究来说, 我国不少科学家企图套用国外一些成功的土壤因子的研究方法和经验公式来达到评价我国土壤因子的目的, 但我国地域辽阔, 不同地区的土壤性质有很大的差别, 国外的研究成果在我国的适用性不是很强。就目前我国土壤因子来说, 存在着不少问题: (1) 评价指标极不统一, 我国土壤因子的评价指标分为抗蚀性指标和抗冲性指标, 但目前我国土壤因子的评价指标有数十种之多, 有些指标甚至被混用(如崩解速率)。一般来说, 评价指标的选取要遵循综合、科学、实用的原则。(2) 试验小区极不统一, 试验小区不同, 测定的结果没有可比性, 严重阻碍了试验成果的交流, 影响我国土壤侵蚀研究的进度。标准试验小区的拟定要有类比性, 即与实地相结合, 有推广性。刘保元^[34]和张科利^[35]一致认为我国土壤可蚀性研究的测试小区应该为 15° 坡度、20 m 坡长、5 m 宽清耕休闲地。(3) 土壤抗侵蚀性的机理不明确, 土壤的抗侵蚀性主要表现为抗蚀方面土壤与水所发生的物理化学变化和抗冲方面土壤与径流之间相互作用力的变化两个方面。目前这两方面的研究比较笼统, 并没有从微观角度研究清楚。土壤抗侵蚀性机理的研究对水土保持规划、水土流失治理以及确定土壤抗侵蚀性和建立水土流失模型都有重要意义。在今后的土壤因子研究中, 我们要从一个科学的角度, 继续研究土壤抗侵蚀性的根本性问题——土壤抗侵蚀性的机理, 这个问题是研究土壤因子以来一直没有彻底解决的问题, 土壤水蚀实际上是降雨和径流对土壤的剪切作用而使土壤颗粒分离, 从剪切力的角度研究土壤抗侵蚀性是我们今后要开展的工作。另外, GIS 和 RS 等先进技术应用用于区域土壤因子研究已经成为一种趋势, 在水土流失严重区这个大的系统中, 坡面和小流域治理的意义不大, 所以, 水土流失应从大区域着手, 综合治理, 在这一过程中, 区域土壤因子的系统评价及分级分区研究就显得尤为重要。区域土壤因子的研究, 目前比较好的方法^[34]是在研究区内选择一些

有代表性的点, 在各点测定土壤的一些性质, 如抗冲、抗剪、崩解和渗透, 并采样在室内分析土壤的物理化学性质和土壤的力学性质, 甚至对区域内某些典型的土壤类型, 在人工模拟降雨大厅进行不同坡度、不同流量的放水冲刷试验, 这样,

就得到各测点的系统而全面的土壤因子数据, 结合 GIS 软件把各测点的研究结果转化到区域尺度上, 完成区域土壤因子的分级区划。区域土壤因子的研究为区域水土流失的综合治理, 区域水土流失土壤因子模型的建立具有实际意义。

参考文献:

[1] 王占礼. 关于黄土高原土壤抗冲性研究的认识[A]. 见: 李锐, 杨勤科. 区域水土流失快速调查与管理信息系统研究[M]. , 郑州: 黄河水利出版社, 2000. 74– 77.

[2] Cook, H L. The nature and control variables of water erosion process[J]. Soil Sic. Soc. Am. Proc, 1936, 1: 487– 494.

[3] 史学正, 邓西海, 等. 土壤可蚀性研究现状及展望[J]. 中国水土保持, 1993, (5): 25– 29.

[4] Bennet, H H. Some comparisons of properties of humid-temperate american soils with special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties[J]. Soil Sci. , 1926, 21: 349– 375.

[5] Middleton, H E. Properties of soils which influence soil erosion[J]. USDA Tech. Bull. , 1930, 178: 16.

[6] Bryan, R B. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility[J]. Geoderma, 1968, 2: 5– 26.

[7] Lutz, J F. The physio-chemical properties of soil affecting erosion[J]. Mississippi State Coll. Agr. Expt. Sta. Bull. 1934, 212: 1– 45.

[8] Bouyoucos, G J The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. J. of American Society of Agronomy. 1935, 27: 738– 741.

[9] Peele, T C, et al. The effect of time and organic matter on the erodibility of Cecil clay[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc, 1938, 3: 289– 295.

[10] Anderson, H W. Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil and land use[J]. Trans. Am. Geophys. Union. , 1954, 35: 268– 281.

[11] Woodburn, R, Kozachyn, J. Study of relative erodibility of a group of Mississippi gully soils[J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1956, 37: 749– 753.

[12] Wischmeier, W H, Smith, D D. Rainfall– Erosion Losses From Cropland East of the Rocky Mountains, Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation[A]. Agricultural Handbook[M]. Washington, D. C. 1965. No. 282.

[13] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses–A Guide to Conservation Planning USDA[A]. ARS, Agricultural Handbook[M]. Washington, D. C. 1978, No. 537.

[14] Renard K G , et al. Revised universal soil loss equation[J]. J. of Soil and Water Conservation, 1991, 46: 30– 33

[15] Laflen, J M, Lane, L J, Foster, G R. WEPP a new generation of erosion prediction technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 34– 38.

[16] Renard K G, Foster G R. RUSLE– A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation [A]. U SDA Agricultural Handbook[M]. 1997, No. 703.

[17] Laflen JM, Elliot W J, Simanton J R. WEPP soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils[J]. J Soil and Water Cons. , 1991, 46(1): 39– 44.

[18] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

[19] 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨[J]. 中国水土保持, 1989, (3): 24– 27.

[20] 陈法扬. 通用水土流失方程在小良水土保持试验站上的应用[J]. 水土保持通报, 1992. 12(1): 22– 41.

[21] 吕喜玺, 沈荣明, 等. 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.

[22] 陈明华. 土壤可蚀性因子研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 19– 24.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 蒋定生. 黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究[J]. 土壤通报, 1979, (4): 20– 24

[26] 赵兴实, 欣仁德, 祁国贵, 等. 黑土侵蚀区土壤理化特性及抗冲性能初探[J]. 中国水土保持, 1981, (6): 25– 29.

[27] 李勇, 吴钦孝, 等. 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.

[28] 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– 111.

[29] 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的抗冲性特征[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 112– 121.

[30] 周佩华, 郑世清. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 47– 58.

[31] 杨文元, 张奇. 紫色丘陵区土壤抗冲性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 22– 28.

[32] 黄义端. 我国几种主要地面物质抗侵蚀性能的初步研究[J]. 中国水土保持, 1980, (1): 41– 43.

[33] 张爱国, 张平仓, 杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003.

[34] 刘保元. 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): 346– 352.

[35] 张科利. 土壤侵蚀预报研究中的标准小区问题论证[J]. 地理科学, 2000, 19(3): 297– 303.