

坡沟产沙关系及其侵蚀机理研究进展

肖培青^{1,2}, 郑粉莉¹, 姚文艺²

(1. 中科院水利部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 杨陵 712100;
2. 黄委会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 坡沟系统侵蚀过程及其机理研究是当前土壤侵蚀过程研究的热点和难点所在。回顾了对坡沟侵蚀形态垂直分带、坡沟侵蚀产沙特征、上方来水来沙对土壤侵蚀过程的影响、坡沟侵蚀水力学机理以及坡沟侵蚀动力学机制的研究进展。分析了研究中存在的问题, 提出了有待于进一步开展的研究工作。
关键词: 坡沟系统; 侵蚀产沙; 水动力学; 研究进展
中图分类号: S 157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2004)04-0101-04

Research Progress on Relationship of Sediment Yield and Erosion Mechanism Between Hill Slope and Gully Slope System

XIAO Pei-qing^{1,2}, ZHENG Fen-li¹, YAO Wen-yi²

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Hydraulic Research of the Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Research on hillslope- gully slope erosion process and its mechanism is the hot point and difficulty for studying soil erosion process at the present. Research progresses about vertical erosion zones of slope- gully system, erosion and sediment characteristics of hillslope- gully slope erosion, effects of up-slope runoff and sediment on down-slope erosion process as well as hydraulics mechanism and dynamics process of hillslope- gully slope system are outlined and reviewed. Furthermore, the existing problems in current research are analyzed and further research issues in the future are presented.
Key words: hillslope- gully slope system; erosion and sediment yield; hydraulics and dynamics; research progress

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的重要环境问题之一, 在黄土高原表现更为突出, 土壤侵蚀已成为区域社会经济发展的最主要制约因素。坡沟系统是小流域侵蚀产沙的主要源地, 对其侵蚀现象与规律的探究, 可以为坡沟水土保持措施优化配置提供科学依据, 对于恢复和重建生态环境也具有重要意义。坡沟侵蚀产沙关系的研究源于 20 世纪 50 年代治坡为主还是治沟为主的争论, 其实质反映了侵蚀规律研究的薄弱。随着坡沟系统土壤侵蚀研究的逐渐深入和小流域水土流失治理经验的积累, 一些学者对坡沟空间垂直分布特性及其侵蚀产沙关系的定性研究进行了有效的探讨, 取得了一批高水平的研究成果。由于黄土高原坡沟系统的复杂性和室内外试验条件的限制, 对坡沟侵蚀产沙过程及其机理的研究还相对较少。有关的坡沟系统侵蚀产沙过程及其动力学机制研究还较薄弱。因此, 为了揭示坡面和沟道侵蚀过程并分析其侵蚀产沙的机理, 现就有关坡沟系统的已有研究成果作一综述。

1 坡沟侵蚀产沙关系

1.1 坡沟侵蚀形态的垂直分带

黄土高原侵蚀垂直分布特性直接关系到水土保持综合

治理的决策和方针的制定, 引起众多科学家的关注。20 世纪 50 年代, 朱显谟^[1]从土壤侵蚀发生演变的观点, 对土壤侵蚀垂直分布给予了要领性的开创研究。承继成^[2], 陈永宗^[3]等分析了降雨、坡度、坡长对坡面侵蚀的影响, 描述了黄土丘陵地区各种地貌形态与坡面径流侵蚀的关系, 在定性描述和定量分析坡面侵蚀过程的基础上, 进行了坡面侵蚀分带性研究, 对于深入认识坡面侵蚀规律和坡面发育理论有重要意义。罗来兴^[4]根据细沟侵蚀量沿坡长变化的实测资料指出, 黄土区坡地上的冲刷量先是增强, 以后逐渐减弱, 随后又逐渐增强, 呈强弱交替变化。承继成^[2]在综合多家观点的基础上认为坡地流水作用是一个十分复杂的问题, 它取决于坡形、坡长、地表抗蚀强度、地表径流强度、降雨特征等诸多因素。总体趋势是从分水岭向下由小变大, 再由大变小, 自分水岭到坡脚划分为微弱侵蚀带—侵蚀强烈带—冲刷带—堆积带。20 世纪 80 年代, 刘元宝^[5]等根据野外考察, 对黄土丘陵沟壑区侵蚀垂直分带也进行了划分。唐克丽等^[6]总结归纳前人研究成果, 并结合“七五”工作实践, 深入系统地论述了黄土高原地区土壤侵蚀的区域特征。刘秉正, 吴发启^[7]以陕西省淳化县泥河沟流域为研究区, 结合面上调查与室内航片判

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050, 50239080); 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-422)
作者简介: 肖培青(1972-), 女, 河南卫辉人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程模拟方面的研究。

读等方法,分别从沟谷系统的结构、发育特征及主要影响因素等方面研究了黄土塬区沟谷系统的侵蚀发展,阐明了沟间地与沟谷中沟谷侵蚀发育的异同,从而为黄土高原沟壑区沟谷侵蚀的理论研究和综合治理提供了依据。所有这些研究成果,大大深化了人们对于黄土高原侵蚀环境及其侵蚀区域分异规律的认识,为从定量和动力学角度研究土壤侵蚀规律奠定了重要基础。

1.2 坡沟侵蚀产沙特征

黄土高原坡沟侵蚀产沙关系的研究,在定性和定量研究方面,皆取得了一定的进展。蒋德麒等^[8]指出,黄土丘陵沟壑区第一副区韭园沟梁峁坡片蚀、细沟、浅沟为主的侵蚀占总侵蚀量的 28.7%。唐克丽等^[9]通过对杏子河流域侵蚀产沙研究得出,坡耕地侵蚀产沙以细沟侵蚀、浅沟侵蚀为主,其侵蚀产沙量占总输沙量的 25%~30%。龚时等^[10]根据几条沟道小流域的试验观测资料得出,沟间地侵蚀量占 43.3%~61.8%,农耕地侵蚀量约占总侵蚀量的 50% 以上。曾伯庆^[11]通过分析山西羊沟道资料得出沟坡地接受沟间地径流的侵蚀产沙量是沟坡地不接受沟间地径流的 4.5 倍。徐雪良得出^[12]韭园沟流域沟间地径流量占 35.3%,泥沙占 30.8%。陈永宗等^[13]分析子洲团山沟黄土沟坡受沟地径流下沟影响的侵蚀产沙量是不受径流下沟影响侵蚀产沙量的 5 倍。张科利等^[14]通过小区试验对黄土坡面的产沙分配规律进行了研究,得出片蚀细沟侵蚀带侵蚀量约占沟间地侵蚀量 30%,浅沟侵蚀带约占 70%。焦菊英等^[15]的观测分析结果表明,山西羊沟道流域沟坡地接受沟间地径流的侵蚀产沙量是沟坡地不接受沟间地径流的 1.8 倍。同时,她对不同估算方法的优劣进行了评价^[15],并提出用系统法计算黄土丘陵区小流域沟间地与沟谷地的侵蚀产沙量。尽管各种方法均有缺陷,但从前人的研究中,人们仍然获得了一些有益的结论。首先从侵蚀模数的比较可以看出,沟谷地的侵蚀强度一般大于沟间地。其次,就黄土台状地沟壑区而言,泥沙绝大多数来自沟谷。就典型黄土丘陵沟壑区而言,如果沟谷地和沟间地面积相近,则泥沙主要来自沟谷地;如果沟间地面积比沟谷地大得多(如团山沟的情况),则泥沙大部分来自沟间地。

近期,郑粉莉等^[16]通过分析子午岭林区林地开垦后沟间地径流下沟对沟坡地侵蚀产沙的影响,得出林地沟间地径流下沟对沟谷地侵蚀产沙几乎不产生影响,而林地被开垦后,沟间地径流下沟增加沟谷地的侵蚀产沙量随着开垦年限的增加而增加,其增加幅度为 1.7~1.8 倍。此研究结果为正确评价人类活动在现代土壤侵蚀中的作用提出了新的论证资料。

1.3 上方来水来沙对土壤侵蚀过程的影响

由于黄土地貌具有明显的垂直分带,坡面侵蚀产沙也存在垂直分异规律。陈浩^[17,18]定量研究了坡面来水来沙在沟坡上的净产沙量和搬运量及含沙水流的侵蚀特性,提出了坡面水下沟“净产沙增量”的概念,认为坡面来水来沙在小流域产沙中起决定性作用。另外,他还用一个简易的来水来沙装置来模拟上方来水与输沙,进行了上坡来水在坡面产沙中作用的人工降雨实验研究。资料表明,上坡来水含沙量愈大,坡面水流挟沙能力越大,不同地形部位在汇流过程中随着水流动能增加,坡面侵蚀量随着增加。但实验未涉及高含沙水流问题,上部来沙装置需不断搅拌,且供沙强度不均匀。雷阿林^[19]通过建立实体模型,研究了上坡来水对不同坡段产沙地贡献,结果表明有无上坡来水各坡段产沙量呈明显地差

异,上坡来水对坡段产沙地贡献很大,由于上坡来水的作用,梁峁坡的产沙量增大了 20.2%~63.5%,谷坡的产沙量增大了 42.9%~74.5%。

郑粉莉等^[20,21]在富县子午岭林区的裸露坡耕地和安塞梁坡休闲坡耕地,对不同侵蚀带之间的侵蚀产沙关系及其机理进行了研究。结果表明,上方来水来沙使细沟侵蚀带的侵蚀产沙量增加 13.5%~37.3%,使浅沟侵蚀带的侵蚀产沙量增加 6.5%~82.8%。上方来水来沙增加坡下方侵蚀量的多少取决于上方来水量及其来水含沙量,降雨特征和下垫面侵蚀状况。郑粉莉等^[21]利用室内双土槽径流小区系统,定量研究了陡坡地(20°)上方来水来沙对坡下方无浅沟侵蚀带和有浅沟侵蚀带侵蚀产沙的影响,郑粉莉、肖培青^[22~24]利用改进的双土槽试验小区定量研究了在不同降雨强度下上方来水来沙对陡坡地细沟侵蚀产沙过程及其细沟水流水力学特征参数与细沟侵蚀产沙量的关系。结果表明:上方来水对细沟水流水力学参数有重要影响,建立了净侵蚀产沙量与细沟水流流速、雷诺数和阻力系数的统计模型。

纵观最近的研究进展,对坡沟空间垂直分布特性及其侵蚀产沙关系的定性研究进行了有效的探讨,然而,研究内容较少涉及到坡面来水来沙对沟道水流泥沙搬运能力的影响及其反馈机制,没有完善的坡沟水沙传递关系理论,坡沟侵蚀机制研究还很薄弱。

2 坡沟侵蚀产沙的水动力学机制

2.1 坡沟侵蚀的水力学机理

国内的上述研究成果为从定量认识黄土地区坡沟产沙规律做了重要贡献,国外研究成果更偏重于坡面和侵蚀沟的机理研究。降雨产流后,径流顺坡向下运动,分别形成坡面薄层水流、细沟、浅沟流及沟道流等多种水流类型,研究不同水流类型的流水的水力学特性和产沙输沙的力学特征,必将促使人们从动力学角度认识土壤侵蚀动态变化和垂直分异的本质原因。

Horton^[25]于 20 世纪 30 年代最早从水文学角度对坡面流的特性进行了系统的定量研究,他对光滑河床层流进行研究后发现,水流平均流速与表面水流速度之比为 0.67。Horton^[26]于 40 年代提出,径流冲刷强度自分水线向下开始逐渐增强,到一定距离后又逐渐减弱,因而划分成无侵蚀带、侵蚀强烈带和堆积带,并将出现冲刷的地点到分水线间的水平距离称之为“出现冲刷的临界距离”,并给出了计算公式:

$$x_c = \frac{65}{q_s n} \left(\frac{R_i}{f(s)} \right)^{5/3}$$

式中: x_c ——出现冲刷的临界距离; q_s ——径流强度; n ——地表糙率; R_i ——地表抗蚀强度; s ——地面坡度。

Yoon^[27]、姚文艺^[28]、Abrahams^[29]也据实验资料,分析过坡面流的阻力规律。Foster^[30]曾通过不同条件下的实验研究和理论分析探讨过细沟流的流速及分布、水力半径及阻力系数的表达式。Gerard^[31]根据野外调查和实验研究,建立了细沟流的流量、流速与过水断面面积间的关系。Julien^[32]运用量纲分析方法,建立了坡面流输沙能力的无量纲关系式。Lu 和 Casso^[33]通过实验分析了坡面流的泥沙运动方式。Guy^[34]据实验资料,分析了降雨对坡面流输沙能力的影响,通过试验证明了坡面流输沙能力的两个经验公式,并将两者相加作为坡面流输沙能力的计算公式。Liebenow^[35]提出了

被 WEPP 水蚀预报模型采用的片蚀经验模型。

$$D_i = k_i I^B S_f$$

式中, D_i ——片蚀输沙率; k_i ——片蚀侵蚀力; I ——雨强; S_f ——坡度因子。

澳大利亚学者 Rose^[36]将坡面侵蚀过程分为降雨分离、径流分离与搬运和泥沙沉积三个过程, 在假定坡面水流为恒定稳定流情况下, 利用明渠水流力学的理论与方法, 根据质量守恒提出了坡面流输沙的理论模型。

$$\frac{\partial q_{st}}{\partial x} + \frac{\partial (c_y)}{\partial t} = e_i + r_i - d_i$$

式中: q_{st} ——单宽输沙率; c_y ——泥沙浓度; y ——水深; e_i ——降雨对土壤的分散率; r_i ——坡面流挟沙率; d_i ——泥沙沉积率。

雷阿林等^[37]提出了坡沟系统土壤侵蚀链的新构想, 以黄土丘陵沟壑区的坡沟系统为原形, 在人工降雨条件下研究了不同侵蚀方式的动力临界和各种水沙流运行的动力学机理, 但是研究内容没有涉及到对于坡沟水沙传递的动态过程分析。

至今为止, 对于沟道流, 人们已注意到它与一般明渠水流的差别, 也认识到重力侵蚀在沟道侵蚀中的重要作用, 但从水力学角度研究其侵蚀产沙与输沙特征还相对较少。

2.2 坡沟侵蚀动力学机制

坡面侵蚀物理过程的研究以 20 世纪 40 年代 Ellison^[38~40]将水蚀过程分为 4 个子过程, 即雨滴侵蚀过程、径流侵蚀过程、雨滴搬运过程和径流搬运过程为标志。Negev^[41]依据 Ellison 的理论提出了一个具有物理基础的产沙模型, 该模型考虑了雨滴击溅、坡面径流输移及细沟和冲沟侵蚀和输移过程。

其中: 雨滴溅蚀量: $D_r = K_1 I^\alpha$

式中: I ——雨强; α ——指数; K_1 ——土壤及植被系数。坡面径流输沙量: $T_r = k_2 (\sum D_r) q^B$,

式中: $\sum D_r$ ——有效溅蚀量; q ——坡面径流量; B ——指数; k_2 ——影响流速的地表特征参数。

细沟和冲沟侵蚀量: $E_{rg} = K_3 q^Y$

式中: Y ——指数, k_3 ——决定于细沟与冲沟特征参数。

该模型的缺点是用基本稳定态的函数来模拟过程各环节, 但提出了坡面侵蚀的一种基本形式, 为其他模型研究奠定了基础。

Meyer and Wischmeier^[42]根据 Ellison 的物理过程概念模型, 将坡面侵蚀过程分为四个子过程, 分别建立了各侵蚀子过程的定量关系:

降雨分散量: $D_r = S_{DR} A_i I^2$

参考文献:

[1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99–115.
[2] 承继成. 坡地流水作用的分带性[A]. 中国地理学会 1963 年学会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1965. 99–104.
[3] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵沟壑区坡地的侵蚀发育[J]. 地理集刊, 1976, (10): 35–51.
[4] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区沟间地和沟谷地的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 22(3): 201–221.
[5] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 第 7 集: 5–8.
[6] 中国科学院黄土高原综合考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 53–77.
[7] 刘秉正, 吴发启. 黄土塬区沟谷系统的侵蚀发展研究[J]. 西北林学院学报, 1993, 8(2): 7–15.

径流分散量: $D_f = S_{DF} A_i S^{2/3} Q^{2/3}$

降雨输移能力: $T_r = S_{TR} S I$

径流输移能力: $T_f = S_{TF} S^{5/3} Q^{5/3}$

式中: A_i ——坡段之面积; S ——比降; I ——雨强; Q ——流量; S_{DR} , S_{DF} , S_{TR} , S_{TF} ——系数,

Foster^[43, 44]等依据坡面侵蚀原理和泥沙输移的连续性将坡面侵蚀分为两部分: 细沟间侵蚀率用降雨特征值(E_{I30})、坡度、坡长和细沟间土壤可蚀性进行定量表述, 细沟侵蚀率则用水流特征值(径流有效剪切力)、地形和细沟土壤可蚀性表征。坡面输沙量受侵蚀量和输沙能力的制约和细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主, 细沟侵蚀以径流侵蚀为主的侵蚀概念模型, 即为新一代水蚀预报模型(WEPP)^[45]物理基础, 坡面分散速率用下列公式描述:

$$D_r = a(T_c - q_s),$$

式中: D_r ——分散率; T_c ——运输能力; q_s ——沉积量; a ——是系数。

3 坡沟侵蚀关系研究中存在的问题及展望

3.1 存在的问题

以往的研究揭示了小流域空间侵蚀方式与坡沟侵蚀形态垂直分带的基本格局, 给出了坡沟泥沙来量分布的统计结果, 对坡沟侵蚀的水动力学机理进行了分析。纵观国内外研究进展, 这些研究成果为从定量和动力学角度研究坡沟关系奠定了基础。但是, 国外地形多为缓坡地, 现有研究多侧重于坡面侵蚀的物理过程模拟, 其研究手段和方法具有一定参考意义。国内已有的研究成果主要问题为: (1) 已有成果基于野外径流场观测资料研究了坡面水下沟的作用, 由于野外试验操作的困难性, 缺乏坡沟侵蚀产沙过程及其机理分析; (2) 关于坡沟系统侵蚀链水流水力学参数的关系取得了一些成果, 研究内容还较少涉及到到上方来水来沙的定量作用以及坡沟系统侵蚀过程中不同水流的水动力学参数与水流剥离、搬运能力的表达。

3.2 尚需开展的研究工作

综上所述, 坡沟侵蚀产沙关系的研究取得了不少的研究成果。但由于侵蚀过程的复杂性, 侵蚀产沙过程中许多问题仍然不清楚。未来的工作应借助 GIS 技术和 REE 示踪技术从以下几方面入手: (1) 坡面沟道侵蚀–沉积–搬运过程的时空变化; (2) 坡沟侵蚀过程中的水动力参数分析筛选及其与泥沙搬运的关系; (3) 坡沟泥沙输移过程的定量表达及其影响因子分析; (4) 坡沟系统的水沙和能量传递特征; (5) 量测设备更新和新技术应用的进一步探讨和完善。

- [8] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖.黄河中游小流域泥沙来源初步分析[J].地理学报,1966,32(1): 20– 35.
- [9] 唐克丽,杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J].水土保持通报,1983,3(5): 43– 48.
- [10] 龚时,蒋德麒.黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理[J].中国科学,1978,(6): 671– 678.
- [11] 曾伯庆.晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律及治理效益[J].人民黄河,1980,(2): 20– 25.
- [12] 徐雪良.韭园沟流域沟间地、沟谷地来水来沙量的研究[J].中国水土保持,1987,(8): 23– 26.
- [13] 陈永宗,等.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1988.170– 181.
- [14] 张科利.黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J].泥沙研究,1991,(4): 39– 45.
- [15] 焦菊英,刘元宝,唐克丽.小流域沟间地与沟谷地径流泥沙来量的探讨[J].水土保持学报,1992,6(2): 24– 28.
- [16] 郑粉莉,唐克丽,白红英.林地开垦后坡沟侵蚀产沙关系的研究[J].中国水土保持,1994,(8): 19– 20.
- [17] 陈浩,王开章.黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究[J].地理研究,1999,18(4): 363– 372.
- [18] 陈浩,等.流域坡面与沟道的侵蚀产沙关系研究[M].北京:气象出版社,1993.139– 172.
- [19] 雷阿林.坡沟系统土壤侵蚀动力机制模拟试验研究[D].陕西杨陵:中科院西北水土保持研究所.1996.
- [20] 郑粉莉,康绍忠.黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J].地理学报,1998,53(5): 422– 427.
- [21] 郑粉莉,高学田.黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M].西安:陕西人民出版社,2000.96– 119.
- [22] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J].水土保持通报,2001,21(1): 23– 25.
- [23] 肖培青,郑粉莉,张成娥.细沟侵蚀过程与细沟水流水力学参数的关系研究[J].水土保持学报,2001,15(1): 54– 57.
- [24] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J].泥沙研究,2002,(4): 69– 74.
- [25] Horton R E, Leach H R, Vliet V R. Laminar sheet– flow[J]. Transaction of the American Geophysical Union, 1934, 15: 393– 404.
- [26] Horton, R E. Development of streams and their drainage basins, Hydrophysical approach to quantitative morpholopy [J]. Bull. Geo. Soc. Am., 1945, 56: 275– 370.
- [27] Yoon N Y, Wenzel G H. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall[J]. ASCE, 1971, 97(9): 1367– 1386.
- [28] 姚文艺.坡面阻力规律试验研究[J].泥沙研究,1996,3(1): 74– 81.
- [29] Abrahams A D, Gang Li Parsin A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope in the Southern Arizona[J]. Earth Surface Process and Landforms, 1996, 21: 35– 47.
- [30] Foster G R, et al. A laboratory study of rill hydraulics: 1. velocity relationships[J]. Trans. ASAE, 1984, 27: 790– 796.
- [31] Gerard Govers. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17: 515– 528.
- [32] Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow[J]. Trans of ASAE. 1985, 28(3): 775– 761.
- [33] Lu J Y, Casol E A. Sediment transport relationships for shallow flow conditions[A]. Proceedings of the fourth international symposium on river sedimentation[C]. Beijing: China Ocean Press, 1989. 1923– 1931.
- [34] Guy B T, Dickison W T, Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30: 1378– 1386.
- [35] Liebenow A M, Elliot W J, Laflen J M et al. interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils[J]. Transctions of the ASAE, 1990, 33: 1882– 1888.
- [36] Rose C W, Willans J R. A mathematical model of soil erosion and deposition process[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47: 991– 995.
- [37] 雷阿林,唐克丽,王文龙.土壤侵蚀链概念的科学意义及特征[J].水土保持学报,2000,14(3): 79– 83.
- [38] Ellison W D. Soil erosion studies– Part I: [J] Agric. Eng., 1947, 28: 145– 146.
- [39] Ellison W D, Ellison O T. Soil erosion studies – Part VI: Soil detachment by surface flow[J]. Agric. Eng. 1947, 28: 402– 408.
- [40] Ellison, W D, Ellison O T. Soil erosion studies – Part VII: Soil transportation by surface flow[J]. Agric. Eng., . 1947, 28: 442– 444, 450.
- [41] 陈国祥.土壤侵蚀与流域产沙的物理过程及预报模型[A].全国泥沙基本理论研究学术讨论会会议论文集[C].北京:水利水电出版社,1992.242– 243.
- [42] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water[J]. Trans of ASAE, 1969, 12: 754– 758.
- [43] Forster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles [J]. Trans. of ASAE. 1977, 20(4): 678– 672.
- [44] Foster G R, Meyer L D. A closed-form soil erosion equation for upland areas[A]. In: Shen H W (ed.). Symposium of Sedimentation[C]. Colorado: State Univ. , Ft. Collins. Co., 1972. 12– 19
- [45] Ascogh J C, Baffaut C, Nearing M A. The WEPP watershed model: . Hydrology and erosion[J]. Trans of the ASAE, 1996, 40(4): 921– 933.