

# 我国黄土地区土壤侵蚀研究历史与进展

牛振华, 王占礼, 黄新会

(中国科学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)

摘 要: 回顾了我国黄土地区土壤侵蚀研究历史。简要总结了土壤侵蚀的研究进展。重点介绍了坡面侵蚀定量研究进展。最后对土壤侵蚀的发展作了展望。

关键词: 黄土地区; 土壤侵蚀; 研究历史; 研究进展

中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2004) 04-0169-05

## Research History and Progress in Soil Erosion in Loess Regions of China

NIU Zhen-hua, WANG Zhan-li, HUANG Xin-hui

(The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Our country's research history of soil erosion was reviewed. The research progress in soil erosion was summarized briefly, of which soil erosion quantitative prediction on hillslope was emphatically introduced. At last, the trend of soil erosion was forecasted.

**Key words:** loess regions; soil erosion; research history; research progress

我国对土壤侵蚀的研究历史可追溯到 2 300 多年前, 其中《禹贡》一书对我国许多地区的侵蚀现象作了详细的记述和概括。公元前 10 世纪的西周就有“平治水土”的说法。秦汉时期就有把黄河称作“浊河”的记载。西汉末年张戎在《汉书·沟洫志》中用“一石水而六斗泥”来形容黄河多沙的特点。到了宋、元、明时期, 侵蚀在坡耕地上已十分严重。当时就有“治河, 垦田事相因, 水不治田不可治; 田治, 则水当益后, 事相表里”和“使天下人人治田, 则人人治河”的重要思想。明代徐贞明提出“治河先治源”的思想。清代胡定分析了黄河泥沙来源, 提出了“汰沙澄源”的治黄方针, 充分反映了人们对耕作与侵蚀关系的认识和理解。

19 世纪后期到上世纪 40 年代末, 黄土高原地区的地质地理研究工作有了新的进展, 主要表现在中外学者纷纷来此地调查, 发表了许多专著。美国水土保持专家 W. C. Lowdermilk 先后两次来我国考察工作, 对我国西北黄土高原水土保持进行了一系列研究, 并参与了天水 and 西安荆峪沟

水土保持实验站的建立。这些实验站的建立, 对我国水土保持工作的进展具有重要意义<sup>[20]</sup>。

这些实验站中, 以傅焕光、叶培忠、任承统等为代表的水土保持工作者, 仿效美国的水土保持研究方法采用径流小区和小流域径流泥沙测验以观测水土流失规律和水土保持效益, 为研究黄土区侵蚀规律积累了宝贵的资料。

新中国成立后, 党和政府对水土保持工作寄予了高度的重视。这一时期的研究主要集中在黄土高原现代侵蚀的研究中, 各地区的土壤侵蚀调查研究如雨后春笋般的蓬勃发展, 也是我国土壤侵蚀研究的黄金时期<sup>[9]</sup>。正是在这个时期, 我国对黄土高原现代侵蚀的研究取得了大量而重要的成果。

近年来, 我国土壤侵蚀研究工作取得了新的进展。土壤侵蚀历史过程研究的突破, 为决策者提供了有关的历史数据<sup>[8]</sup>; 总结了以小流域为单元, 全面规划, 综合治理的经验<sup>[43]</sup>; 土壤侵蚀动力机制研究不断深化, 加深了人们从本质上认识土壤侵蚀现象; 随着分析手段的提高以及计算机技术

① 收稿日期: 2004-07-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-442); 国家自然科学基金委员会重点项目“黄土高原小流域分布式水蚀预报模型研究”(40335050); 中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿专项经费资助项目“坡面土壤侵蚀预报物理模型”

作者简介: 牛振华(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀过程及预报模型。

的迅猛发展,坡面侵蚀定量过程研究取得新的进展<sup>[30]</sup>;土壤侵蚀模型研究和模拟技术越来越受到人们的重视<sup>[39]</sup>。随着“3S”技术的深入运用,为侵蚀研究获得第一手资料,进行观察分析以及建立土壤侵蚀数据库产生巨大的推动作用和潜在的发展空间。结合以上论述,笔者对近年来我国土壤侵蚀研究的进展做了简要总结。

长期以来,我国的一大批科学工作者扎根于黄土地区,为我国的水土保持事业做出了巨大的贡献。特别是建国以来,科技工作者对黄土高原现代侵蚀的研究取得了大量的科学成果,为土壤侵蚀研究提供了新的思路和方法,也为研究侵蚀积累了丰富的经验和理论知识。概括起来主要有以下几方面:

### 1 对土壤侵蚀类型及其影响因素的研究

黄秉维<sup>[13]</sup>根据地面植被覆盖的完好程度,主要侵蚀营力和地貌形态特征编制的“黄河中游土壤侵蚀分区图”将黄土高原的侵蚀营力分为自然营力和人为营力,再按照外营力的性质将土壤侵蚀分为水力侵蚀、重力侵蚀和风力侵蚀三种。朱显谟<sup>[48]</sup>等对黄土区的侵蚀类型又作了详细的划分。他们依据土壤侵蚀营力类型、强度、发展趋势以及治理途径在一定区域内的相似性和区域间的差异性将黄土高原分为3个一级区,12个二级区25个三级区。其中3个一级区为:鄂尔多斯高原风蚀地区,黄土高原北部风蚀水蚀地区,黄土高原南部水蚀地区。随后,罗来兴和朱震达<sup>[26]</sup>主编了1100万的黄土高原水土流失和水土保持图,为进一步认识土壤侵蚀规律,进行防治提供了依据。

针对不同的侵蚀类型,国内学者对其影响因素作了大量的研究。朱显谟<sup>[47]</sup>研究了黄土地区植被因素对水土流失的影响。谢云、刘宝元等<sup>[34]</sup>认为黄土高原坡面侵蚀的侵蚀性降雨雨量的标准为12mm,雨强标准为0.04mm/min。周佩华等<sup>[45]</sup>对黄土高原土壤侵蚀特点与植被对土壤侵蚀的影响进行了研究。西北林学院的刘秉正等(1997)研究了地形-植被与侵蚀之间的关系。蔡强国<sup>[21, 22]</sup>研究了坡长与侵蚀量的关系,认为当径流小区坡面产流量相同时,20m坡长小区单位面积的侵蚀量最大。陈永宗<sup>[9]</sup>提出水蚀的临界坡度为28.5°。曹银真<sup>[6]</sup>对黄土地区重力侵蚀的机理进行了研究。朱震达<sup>[35]</sup>对风蚀进行了大量研究。

### 2 对水土流失的区域分异进行了研究

黄土高原侵蚀类型繁多,其地域分布深受自然环境的制约,表现出明显的地域分异规律<sup>[41]</sup>。地理学家根据黄土高原侵蚀类型的地带性分布模式将其划分为:干旱荒漠草原带,半干旱草原带和半湿润森林草原带。

依据非地带性分布模式将其划分为:以面蚀、沟蚀、滑坡为主的黄土塬区侵蚀区;以面蚀、沟蚀、潜蚀为主的厚层黄土

梁峁沟蚀侵蚀区;以面蚀、沟蚀、重力侵蚀为主的薄层黄土梁峁沟谷侵蚀区和黄土梁涧地区。

### 3 侵蚀垂直分带性为研究不同部位的侵蚀方式提供了理论依据

黄土地貌具有明显的垂直分带性,坡面侵蚀产沙也存在垂直分异规律。20世纪50年代以来,我国科技工作者对黄土坡面的垂直分带性进行了深入研究,并取得了一系列成果。认为黄土丘陵沟壑区从分水岭到坡脚线表现为溅蚀片蚀带,细沟侵蚀带和浅沟侵蚀带等。承继成<sup>[49]</sup>在研究坡长、坡度、降雨对坡面侵蚀影响的基础上,进行了坡面侵蚀分带性的研究,将坡面侵蚀从分水岭到坡底划分为微弱侵蚀带—侵蚀强烈带—冲刷带—堆积带。陈永宗<sup>[50]</sup>、刘元保等<sup>[23]</sup>也对黄土高原丘陵沟壑区侵蚀的垂直分带性进行了划分。

黄土高原土壤侵蚀垂直分带性为研究坡面不同侵蚀分带之间的侵蚀产沙关系和机理提供了新的途径,也为科学建立土壤侵蚀产沙模型和合理制订水土保持措施与水土保持规划提供了理论根据。

### 4 坡面侵蚀研究向定量化方向发展

侵蚀是一种做功过程。坡面作为构成山地、丘陵和台塬最基本的地貌单元,是研究水土流失规律,反映土壤侵蚀强度主要形态参数最基本的地形。定量研究坡面侵蚀对研究土壤侵蚀规律,可为建立坡面侵蚀模型预报提供理论根据,为有效防止水土流失和进行水土保持规划提供科学依据。

国外从20世纪20年代起对坡面侵蚀开始定量研究,并发展了以USLE和WEPP为代表的模型。针对我国黄土高原坡陡、沟深的特点,我国学者进行了一系列的侵蚀定量化研究,重点研究了坡面雨滴溅蚀、薄层水流侵蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀。

#### 4.1 对雨滴溅蚀的研究

溅蚀是雨滴打击地面而引起地面物质迁移和破坏土壤结构的一种侵蚀现象。近年来我国科技工作者对溅蚀的研究主要集中在雨滴物理特性对溅蚀的影响和溅蚀模型两大方面。窦葆璋、周佩华<sup>[11]</sup>研究了用色斑法测定雨滴直径的方法,并拟合出了色斑直径与雨滴直径的关系。试验证明,雨滴直径*d*与降雨强度*I*具有密切的关系。江忠善等<sup>[14]</sup>通过研究得到雨滴直径与降雨强度呈幂函数相关关系。雨滴终速取决于雨滴大小和形状,牟金泽<sup>[27]</sup>考虑到雨滴下落过程中的形态变化,提出了雨滴终速的计算方法,即当雨滴直径*d*<1.9mm时,终速用修正的沙玉清公式计算:

$$v = 0.496anti \lg \left[ \frac{28.320 + 6.254 \lg 0.1d - (\lg 0.1d)^2 - 3.665}{1} \right]$$

(1)

当雨滴直径*d*≥1.9mm时,终速用修正的牛顿公式计

算:

$$v=(17.2-0.844)\sqrt{0.1d}\tag{2}$$

式中: $v$ ——雨滴降落速度(m/s); $d$ ——雨滴直径(mm)。

雨滴动能是侵蚀的动力来源,对雨滴动能的研究,许多学者将雨滴动能与降雨强度相联系,建立了统计方程。周佩华等<sup>[44]</sup>根据人工模拟降雨试验资料,提出雨强( $I$ )与动能( $E$ )的关系式为:

$$E=23.49I^{0.29}\tag{3}$$

江忠善<sup>[14]</sup>根据黄土区天然降雨资料求得普雨型与短阵雨型降雨条件下,雨强( $I$ )与动能( $E$ )的关系分别为:

$$E=29.64I^{0.29}\tag{4}$$

$$E=33.88I^{0.23}\tag{5}$$

雨滴溅蚀作用与雨滴的物理特性有密切的关系<sup>[33]</sup>。许多学者依据自己的试验建立了大量的溅蚀量与降雨特性统计模型,周佩华<sup>[44]</sup>、蔡强国<sup>[4]</sup>、注忠善<sup>[16]</sup>、高学田<sup>[12]</sup>、认为溅蚀量与降雨动能呈指数关系。江忠善<sup>[15]</sup>在黄土高原沟壑区系统研究了降雨能量、短历时最大雨强和坡度对溅蚀量的影响,研究结果为:

(1) 溅蚀量和降雨能量与短历时最大雨强的复合关系为:

$$S_i=a(EI_t)^b\tag{6}$$

式中: $S_i$ ——水平地面单宽溅蚀量( $g/m$ );( $EI_t$ )——降雨的动能 $E$ 乘相应10~60 min 不同时段的最大雨强(mm/min); $a$ 、 $b$ ——待定系数。

(2) 溅蚀量和坡度的关系为:

$$S_i=30.8+1.1884J-J/(2.6238+0.0378J)-0.02258J^2\tag{7}$$

式中: $J$ ——坡度。

此外王万忠<sup>[31]</sup>、江忠善<sup>[17]</sup>、刘秉正等<sup>[22]</sup>针对美国通用土壤流失方程(USLE)中的降雨侵蚀力因子( $R$ )有较多的研究。与此同时对土壤可蚀性<sup>[46, 7, 24]</sup>研究也取得了大量成果。

#### 4.2 坡面薄层水流侵蚀力的研究

片蚀是薄层水流与土壤表层作用而发生的动力学过程,是降雨强度超过地面入渗强度而发生超渗产流,进而引起土壤表层被水流分散和输移的过程。由于坡面薄层水流动力学特性的复杂性和试验研究存在一定的困难,已有的研究基本上都是将坡面薄层水流看作恒定非均匀沿程变量,用明渠水力学的方法进行研究<sup>[33]</sup>。

孔亚平、张科利<sup>[19]</sup>认为黄土高原坡耕地坡面侵蚀输沙能力从上坡到下坡依次增加,在5~7.5 m 坡度急剧增加,雨强小于2 mm/min 时,在5~7.5 m 坡段发生跳跃式的增加。江忠善(1985)将坡面作为不稳定流处理,通过分析资料得出了坡面流速( $V/cm\cdot s^{-1}$ )与坡度( $S/\%$ )和单宽流量( $q/cm^3\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}$ )的关系为:

$$v=2.0q^{0.5}S^{0.35}\tag{8}$$

吴普特<sup>[51]</sup>依据达西- 渗透公式,经实测资料分析,得出了坡面薄层水流的阻力公式为:

$$f=8gh\sin\alpha/v^2\tag{9}$$

式中: $h$ ——水层厚度(mm); $g$ ——重力加速度; $\alpha$ ——地面坡度; $v$ ——坡面流速(cm/s)。

蔡强国<sup>[5]</sup>根据野外模拟降雨资料,建立了估算坡面水流输移能力方程:

$$T_e=0.0018E_t^{1.55}\tag{10}$$

式中: $T_e$ ——水流输移力( $kg/m^2$ ); $E_t$ ——水流侵蚀力( $N/m^2$ )。谭宽祥<sup>[28]</sup>根据力学原理揭示的面状侵蚀产沙模式对定量描述面蚀提供了新的思路。

#### 4.3 对细沟侵蚀的研究

细沟侵蚀是由于坡面径流的差异性所形成的一种侵蚀方式。郑粉莉<sup>[33]</sup>将细沟侵蚀解释为细沟小股流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程。细沟侵蚀的发生取决于坡面水流的水力学特性和坡面土壤条件。关于细沟侵蚀的描述,唐克丽<sup>[29]</sup>认为细沟的宽深变化在1~10 cm。郑粉莉等<sup>[42]</sup>研究认为细沟侵蚀深度一般小于20 cm,宽度小于30 cm,而陆兆熊等<sup>[25]</sup>认为坡面出现细沟侵蚀的标志是1~2 cm 深的小沟。孔亚平、张科利<sup>[19]</sup>认为黄土高原坡耕地细沟侵蚀占坡面侵蚀的74.6%。郑粉莉<sup>[42]</sup>、蔡强国<sup>[5]</sup>分别从坡度、降雨动能、与细沟侵蚀模数的关系来研究细沟侵蚀,取得了一定的成果。郑粉莉等<sup>[33]</sup>从机制上对细沟间与细沟侵蚀作了定性描述。

随着人们对细沟侵蚀认识的不断深入,近年来的研究已经从经验模型转向理论研究,用细沟流的水力学特征来描述细沟流的侵蚀能力,对细沟流侵蚀参数如水深、阻力系数、流速和径流剪切力等进行了较为深入的研究。

张光辉等<sup>[37]</sup>用变坡水槽对坡面径流分离土壤的水动力学进行研究表明,土壤分离速率是流量、水深、坡度的函数,随着流量和坡度的增大,土壤分离速率也在增大,当坡度较小时流量对土壤分离速率的影响明显大于坡度,当坡度达到26.8%以上时,水深对土壤分离速率大于坡度。并证明平均流速与土壤分离速率呈密切的函数关系,其关系式为:

$$D_r=6.201v^{4.117}\tag{11}$$

式中: $D_r$ ——土壤分离速率( $kg/s\cdot m^2$ ); $V$ ——平均流速(m/s)。

孔亚平、张科利<sup>[19]</sup>认为2.5 m 坡长小区的产沙量( $S$ )与上方来水量( $Q_L$ )呈线性关系,关系式为:

$$S=1316Q_L-295.16\tag{12}$$

张科利、唐克丽<sup>[39]</sup>根据前人的研究成果<sup>[1~3]</sup>研究得出黄土坡面上发生细沟侵蚀的临界切应力为7(Pa),Manning 糙率系数 $n$ 为0.035~0.071之间,平均为0.053 6,并建立了

细沟流的平均流速与径流量和坡度之间的函数相关关系:

$$v = 5.544Q^{0.2636}J^{0.2513} \quad (13)$$

式中:  $V$ ——平均流速 (cm/s);  $Q$ ——径流量 (cm<sup>3</sup>/s · m);  $J$ ——坡度(%)。

上述在实验条件下取得的研究结果具有重要参考价值, 随着研究的不断深入, 运用多种流量及坡度变化以及各种级的土壤进行试验研究, 通过研究上方来水来沙对侵蚀的影响, 提高有关系数的通用性, 可为建立具有明确物理意义的侵蚀预报模型奠定重要基础。

4.4 浅沟侵蚀研究

浅沟是坡面细沟进一步发育的产物。浅沟的形成加速了坡面土壤侵蚀, 增大了土壤侵蚀量。浅沟发育的显著标志是具有明显的集水面积和固定的沟床。浅沟侵蚀也是主要出现在我国黄土高原的一种坡面侵蚀的方式。目前, 国内对浅沟侵蚀的研究仍局限于浅沟侵蚀量<sup>[40]</sup>、浅沟发生的临界坡长与坡度<sup>[38]</sup>、集水面积、浅沟横断面形态<sup>[18]</sup>及其影响因素等方面。王文龙、雷阿林等<sup>[32]</sup>对浅沟流动力机制进行初步研究表明, 浅沟流量是细沟出现时的 5~6 倍, 流速与水力半径已是其 2~3 倍, 雷诺数是其 5 倍并认为紊动和急流冲刷是浅沟侵蚀的重要特征, 重力侵蚀与水力侵蚀交互作用是浅沟侵蚀的一大特点。

从以上可以看出, 国内对浅沟侵蚀的研究主要是定性的, 深入了解浅沟侵蚀过程, 还需要从浅沟侵蚀的水力学特性、浅沟侵蚀泥沙输移关系以及侵蚀的动力机制来定量化研究, 从而健全我国坡面土壤侵蚀定量研究, 为坡面侵蚀预报模型提供理论支撑。

另外, 我国学者也建立了适合一定范围的小流域产沙模参考文献:

[1] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics (I): velocity relationship[J]. Trans. of ASAE, 1984, 27(3): 790– 796.

[2] Huang Chi-hua, Bradfora J M, Laflen J M. Evaluation of detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 734– 739.

[3] 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. of ASAE, 1989, 32(5): 1 587– 1 593.

[4] 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究, 1989, (4): 84– 96.

[5] 蔡强国. 黄土丘陵沟壑区典型小流域产沙过程模拟[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108– 115.

[6] 曹银真. 黄土地区重力侵蚀机理及预报[J]. 水土保持通报, 1981, (4): 19– 23.

[7] 陈明华, 周伏建. 土壤可蚀性因子的研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 19– 34.

[8] 陈永宗. 我国土壤研究的新进展[J]. 中国水土保持, 1989, (9): 7– 11.

[9] 陈永宗, 景可, 等. 黄土高原现代侵蚀治理[M]. 北京: 科学技术出版社, 1998.

[10] 肖培青, 郑粉莉, 等. 黄土坡面侵蚀垂直分带性及其产沙研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 46– 48.

[11] 窦葆璋, 周佩华. 雨滴的观测和计算方法[J]. 水土保持通报, 1982, 2(2): 43– 47.

[12] 高学田, 包忠谟. 降雨特性和土壤结构对减蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 24– 26.

[13] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训[A]. 见: 陈永宗, 景可, 等. 黄土高原现代侵蚀治理[C]. 北京: 科

型, 用来指导本地区的水土保持工作, 也为今后建立更加通用的黄土高原产沙模型提供了基础。随着科技的发展, “3S” 技术及核示踪技术等一系列研究方法正在或将要应用到土壤侵蚀的定量研究中, 为我国的土壤侵蚀研究迈向更深、更细、更广的领域提供了广阔的发展空间。

5 土壤侵蚀研究展望

从地质学角度看, 我国的土壤侵蚀仍将继续发生, 加上全球气候变化和一些未知因素的存在会使侵蚀方式不断复杂化。但是随着人们对生态环境保护意识的不断提高和研究方法、研究手段的进一步深入, 土壤侵蚀强度必将得到不同程度的缓解。未来的研究会向更深、更细、更广的方向发展。将主要体现在三个方面:

(1) 研究层次更加深入。未来土壤侵蚀研究必将基于物理过程的定量描述, 来建立更加准确、通用的侵蚀预报模型, 为预测预报土壤侵蚀和土壤保持决策发挥更加重要的作用。

(2) 研究方法更加先进。遥感(RS), 地理信息系统(GIS) 和全球定位系统(GPS) 是将来对地观测系统中空间信息获取、存储管理、更新、分析和应用的 3 大技术, 也是土壤侵蚀研究走向定量化描述的方法之一。放射性核素及 REE (Rare Earth Elements) 示踪技术, 以及磁性示踪等示踪技术的应用将为土壤侵蚀研究提供新的研究方法。

(3) 研究范围更加广阔。从全球尺度来看, 随着侵蚀发生的复杂性和人们认识水平的不断提高, 侵蚀的研究趋向于从坡面—小流域—区域—全球模式发展。土壤侵蚀研究与全球气候变化、农业生产、环境污染(尤其是面源污染) 紧密结合是今后侵蚀研究的趋势。

学技术出版社, 1998.

[ 14] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[ J] . 中国水土保持, 1983, ( 3): 32– 36.

[ 15] 江忠善, 李秀英. 坡面流速试验研究[ J] . 中科院西北水土保持研究所集刊, 1985, 第 7 集: 46– 50.

[ 16] 江忠善, 刘志, 贾志伟. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究[ J] . 水土保持学报, 1989, 3( 2): 29– 35.

[ 17] 江忠善, 宋文经. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[ A] . 北京河流泥沙国际学术讨论会论文集[ C] . 北京: 水利出版社, 1981. 63– 72.

[ 18] 姜永清, 王占礼, 胡光荣. 瓦背状浅沟分布特征分析[ J] . 水土保持研究, 1999, 6( 2): 181– 184.

[ 19] 孔亚平, 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟试验研究[ J] . 泥沙研究, 2003, ( 1): 33– 38.

[ 20] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[ M] . 西安: 陕西人民出版社, 1997.

[ 21] 刘秉正, 等. 刺槐林地土壤抗冲性的时试验研究[ J] . 西北林学院学报, 1984( 1): 27– 30.

[ 22] 刘秉正, 吴发启. 黄土塬区沟谷系统的侵蚀发展研究[ J] . 水土保持学报, 1993( 2): 31– 36.

[ 23] 刘元保, 朱显谟. 黄土高原土壤垂直分带性研究[ J] . 中科院西北水土保持研究所集刊, 1988, 第 7 集: 5– 8.

[ 24] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 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): 345– 350.

[ 25] 陆兆熊, 蔡强国, 朱同新. 土壤侵蚀过程研究[ J] . 中国水土保持, 1991, ( 11): 19– 22.

[ 26] 罗来兴, 朱震达. 编制黄土高原水土流失与水土保持图的说明与体会[ A] . 见: 陈永宗, 景可, 等. 黄土高原现代侵蚀治理[ C] . 北京: 科学技术出版社, 1998.

[ 27] 牟金泽. 雨滴速度计算公式[ J] . 中国水土保持, 1983, ( 3): 13– 17.

[ 28] 谭宽祥. 黄土地区坡度与面状侵蚀产沙研究[ J] . 泥沙研究, 1991, ( 2): 64– 68.

[ 29] 唐克丽. 黄土高原地区侵蚀区域特征及治理途径[ M] . 北京, 中国科学技术出版社, 1990. 19– 22.

[ 30] 杨明义, 田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展[ J] . 地球科学进展, 2000, 15( 6): 649– 653.

[ 31] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力 R 指标的研究[ J] . 水土保持通报, 1995, 15( 3): 28– 32.

[ 32] 王文龙, 雷阿林, 李占斌. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究[ J] . 水科学进展, 2003, 14( 4): 471– 475.

[ 33] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[ J] . 地理科学, 2003, 23( 2): 230– 235.

[ 34] 谢云, 刘宝元. 侵蚀性降雨标准研究[ J] . 水土保持学报, 2000, 14( 4): 6– 11.

[ 35] 朱震达. 中国沙漠概论( 修订版) [ M] . 北京: 农业出版社, 1979.

[ 36] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[ J] . 水科学进展, 2002, 13( 3): 389– 396.

[ 37] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力实验研究[ J] . 土壤学报, 2002, 39( 6): 882– 886.

[ 38] 张科利, 唐克丽. 浅沟发育与陡坡开垦历史的研究[ J] . 水土保持学报, 1992, 6( 2): 59– 67.

[ 39] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力水动力学试验研究[ J] . 土壤学报, 2000, 37( 1): 9– 15.

[ 40] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟特征值的研究[ J] . 水科学进展, 2003, 14( 4): 471– 475.

[ 41] 张宗桢, 等. 黄土高原区域环境地质问题及治理[ M] . 北京: 科学出版社. 1996: 55– 59.

[ 42] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生发展和防止途径的探讨[ J] . 水土保持学报, 1987, 1( 1): 36– 48.

[ 43] 郑粉莉, 张薇. 中美水土保持成就对比[ J] . 水土保持通报, 2003, 23( 2): 67– 69.

[ 44] 周佩华. 降雨能量的试验研究初报[ J] . 水土保持通报, 1981, 1( 1): 51– 60.

[ 45] 周佩华, 刘炳武, 王占礼, 等. 黄土高原土壤侵蚀特点与植被对土壤侵蚀的影响的研究[ J] . 水土保持通报, 1991, 11( 5): 26– 31.

[ 46] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[ J] . 水土保持学报, 1993, 7( 1): 28– 34.

[ 47] 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.

[ 48] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[ J] . 土壤学报, 1956, 4( 2): 99– 115.

[ 49] 承继成. 坡地流水作用的分带性[ A] . 中国地理学会 1963 年学会文论文集[ C] . 北京: 科学出版社, 1965. 99– 104.

[ 50] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育[ J] . 地理集刊, 第 10 号, 北京: 科学出版社, 1976, ( 10): 35– 51.

[ 51] 吴普特. 动力水蚀实验研究[ M] . 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.