

黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究^X

王占礼^{1,2}, 靳雪艳², 马春艳², 谭贞学^{1,3}

(1. 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;

2. 西北农林科技大学 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; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 降雨及其产生的径流是引起黄土高原土壤侵蚀的主要动力, 开展黄土区降雨产流产沙过程研究可为土壤侵蚀过程模型研发奠定基础, 为该区水土保持与生态建设提供重要科学依据。该文基于收集分析子洲径流试验站天然非恒定降雨、产流、产沙过程观测资料, 应用非线性模拟技术, 对黄土坡面降雨产流产沙动态变化过程及响应关系进行了研究, 结果表明, 黄土坡面累积降雨量随降雨历时的变化过程、累积径流深随产流历时的变化过程、累积侵蚀产沙模数随产沙历时的变化过程、累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程的响应、累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应均呈现为非线性关系, 可分别划分为两种类型, 并分别可用扩展S型曲线模型和扩展幂函数模型进行数学描述。

关键词: 黄土坡面; 降雨; 产流; 产沙

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2008)02-0024-05

Research on Processes and Responses of Rainfall-Runoff-Sediment Yield on Loess Hillslope

WANG Zhan-li^{1,2}, JIN Xue-yan², MA Chun-yan², TAN Zhen-xue^{1,3}

(1. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: Rainfall and runoff are the main dynamic factors which cause soil erosion on the Loess Plateau. Research on processes of rainfall, runoff and sediment yield can serve as development of process-based mode of soil erosion, soil and water conservation, and ecology construction on loess region. Based on analyzing the data of natural unsteady rainfall, runoff and sediment yield processes observed in Zizhou field experimental station, and applying non-linear modelling technology, the dynamic variational processes and responded relationship of rainfall - runoff - sediment yield on loess hillslope are studied. The research results show that the variation processes of accumulated rainfall amount with rainfall time, the variation processes of accumulated runoff depth with runoff time, the variation processes of accumulated erosion modulus with sediment yield time, the responses of variation processes of accumulated runoff depth to variation processes of accumulated rainfall amount, the responses of variation processes of accumulated erosion modulus to variation processes of accumulated runoff depth are all displayed with non-linear relationships. All of them can be divided into two types and can be described with extended S curve model and extended power function model respectively.

Key words: loess hillslope; rainfall; runoff; sediment yield

1 引言

降雨及其产生的径流引起的侵蚀产沙, 是全球性的严重环境问题之一, 在我国黄土区表现尤为突出。我国黄土地区是全球黄土分布面积和厚度最大的区域, 该区地表植被覆盖差, 土壤抗侵蚀能力弱, 地形破碎复杂, 降水强度大, 尤其多以暴雨形式降落, 极易形成暴涨暴落的山坡洪流, 因此, 黄土地区早已成为全球土壤侵蚀最严重的区域。该区强烈的土壤侵蚀不仅造成当地土壤严重退化及生态环境严重破坏, 而且也成为黄河泥沙的症结所在, 给黄河下游地区造成严重威胁。因此, 开展黄土区坡面降雨产流产沙过程及响应关系研究具有重要理论与实践意义, 可为该区水土保持与生态建设、土地利用规划、土壤资源永续利用及黄河泥沙灾害治理等提供科

X 收稿日期: 2007-10-19

基金项目: 国家“973”计划课题(2007CB407201); 西北农林科技大学创新团队建设计划(01140202); 国家自然科学基金重点项目(40335050); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-182)

作者简介: 王占礼(1960-), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

学依据,为土壤侵蚀过程模型研究奠定基础,并进一步丰富侵蚀产沙理论,促进土壤侵蚀科学发展。

针对降雨产流产沙规律,以往诸多学者从不同的角度进行了研究。王万忠以黄土高原水文气象部门和水土保持试验站的实测资料为基本数据,对黄土高原水土流失区降雨侵蚀产沙与黄河输沙的时空分布特征、变化规律以及相互间的关系进行了系统研究^[1]。刘志、江忠善基于野外观测资料,分析探讨了天然降雨因素及地面坡度对片状侵蚀的影响^[2]。郑粉莉基于野外观测资料,研究了黄土梁峁坡面不同侵蚀带侵蚀产沙特点、相互影响及降雨强度和能量对坡面侵蚀产沙分配的影响^[3]。吴发启等研究了降雨动能对产流与侵蚀产沙、径流能量对侵蚀产沙的影响^[4]。孙飞达采用人工模拟降雨试验方法,研究了不同立地条件下径流量、侵蚀模数随雨强的变化^[5]。肖培青、郑粉莉利用变坡度坡沟系统模型人工模拟降雨试验,研究了坡沟系统累积径流和产沙量随降雨时间的变化^[6]。王玉宽^[7-8]、吴普特^[9]在野外与室内人工模拟降雨试验条件下对黄土地区的入渗、暴雨产流、产沙过程及薄层水流侵蚀过程进行了研究。

综合以往众多学者对降雨产流产沙的研究,在野外观测试验的研究中,主要进行了基于变雨强降雨条件下的侵蚀总量观测研究,在人工模拟降雨试验的研究中,主要进行了基于恒定雨强降雨条件下的侵蚀过程观测研究,而对变雨强降雨条件下的侵蚀动态变化过程则研究甚少。本文针对黄土区降雨产流产沙问题,通过分析子洲径流试验站天然降雨坡面产流产沙过程观测资料,着重对自然界客观存在的非恒定降雨产流产沙过程进行研究,试图通过分析探讨这种降雨、产流、产沙皆随历时变化的动态规律,阐明黄土地区坡面降雨产流产沙动态过程及其响应关系。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况

研究区选择在黄河水利委员会黄河流域子洲径流试验站。该站位于陕西省子洲县内大理河的一级支流岔巴沟上,于1958年建站,1969年撤销。岔巴沟流域属于黄土丘陵沟壑区第 副区,面积为205 km²。对1959~1969年实测资料分析得出多年平均降水量为480 mm,其中70%集中在6~9月,且多为强度大、历时短的暴雨,实测最大降雨强度3.5 mm/min,流域平均侵蚀模数为22 200 t/(km²·a)。流域沟谷发育、地形陡峻,暴雨降落时洪水来势猛,导致坡面漫流与沟道汇流的挟沙能力皆很大。该区植被稀疏,坡地耕种方式不合理,加剧了水土流失。在观测时期(1959~1969年),子洲径流站的设立地点及名称屡有变迁。1959~1960年在麻地沟设径流场,1960年在蛇家沟开始设径流场,1963年以后改称团山沟径流场。1963~1964年团山沟共有9个径流场,起名为团山沟1号径流场、团山沟2号径流场……团山沟9号径流场。1965年以后又增设3个径流场。

本文选取1961年蛇家沟3号径流场、1963~1969年团山沟3号径流场8年的次降雨径流产沙过程进行研究。团山沟3号径流场坡度404‰,坡长60 m,坡宽15 m,面积900 m²,土质为黄绵土。

2.2 研究方法

2.2.1 资料收集与选取 包括收集子洲野外径流试验站3号径流场降雨产流产沙过程观测资料及从收集的资料中选取供分析的资料。第一步,由于3号径流场采用斜面雨量桶进行观测,根据坡面接收雨量与坡度的关系^[10],将斜面雨量换算成水平面雨量;第二步,收集的资料中有些年份只记载产流时的降雨量,通过查找相应时间的降水量补全对应的降雨过程;第三步,统计径流场各次产流产沙过程的相应降雨过程:其方法为,单次降雨产流产沙事件的降雨过程取降雨开始至径流终止,间歇性连续降雨(一次降雨)而产流产沙数次的事件,对应于第一次产流产沙的降雨过程取降雨开始至第一次径流终止,对应于第二次产流产沙的降雨过程取第一次径流终止至第二次径流终止,其余依次类推;第四步,选取供分析研究使用的资料:研究中收集的子洲径流站1961年蛇家沟3号径流场、1963~1969年团山沟3号径流场资料中可供分析的降雨次数共42场。黄土高原侵蚀性降雨的雨型可分为A型(短历时局地雷暴雨)、B型(锋面性降雨夹有雷暴性降雨)和C型(长历时锋面雨)3种类型^[11]。42次降雨事件中,A型、B型和C型降雨的发生次数分别为21次、17次和4次,分别占侵蚀性降雨总次数的50.0%、40.5%和9.5%。从统计结果看,研究区的侵蚀性降雨以A型的发生次数最多。本文以这种短历时局地雷暴雨(A型侵蚀性降雨)为研究对象,分析其次降雨产流产沙过程及其响应关系。

2.2.2 分析方法 对收集选取的各次降雨产流产沙过程观测资料,进一步计算出降雨产流产沙过程中不同时间的累积降雨量、累积径流深及累积侵蚀产沙模数,建立便于分析的数据库,分别作出描述各次降雨、产流、产沙过程及其响应关系的全部实测值图,基于比较分析,运用非线性模拟技术对降雨产流产沙过程及其响应关系进行模拟,建立描述方程,并结合水文学、土壤侵蚀学理论阐明非线性机理。

3 结果与分析

3.1 累积降雨量变化过程及降雨特征

通过对选取的团山沟3号径流场21场短历时局地雷暴雨累积降雨量的变化过程进行分析表明,累积降雨量随降雨历时的增加,总体上都表现为先不断增大,达到一定的降雨时间后则变化很小,其图上显示为累积降雨量实测值散点的变化有一个较明显的转折,转折点之后累积降雨量增加速度非常小,演化过程趋于平缓,相应的降雨强度非常低,基本上为不产流降雨。虽然累积降雨量的变化过程总体上有这样的特征,但各场之间存在着具体的差异,可以比较明显地划分为两种类型:第一类,其典型特征是在降雨开始后的几分钟到十几分钟内累积降雨量的增加速度较慢,之后随时间快速增加,再往后则转为较平缓的变化趋势,整体上呈类似于“S”形的变化,可用 $P = \frac{A}{(B_0 + \sum_{i=1}^n B_i e^{-c_i t})^m}$ 形式的扩展S型曲线模型对这种类型的累积降雨量变化过程进行拟合;

第二类,其典型特征是降雨开始后累积降雨量随时间一直快速增加,变化过程较陡直,一定时间后转为很平缓的变化趋势,可用 $P = (B_0 + \sum_{i=1}^n B_i t^{\frac{1}{i}})^m$ 形式的扩展幂函数模型对这种类型的累积降雨量变化过程进行拟合。

对1969年5月12日一场降雨历时为61 min的累积降雨量过程进行数学模拟,得出的描述方程为:

$$P = \frac{16}{(0.991538 + 27.789691e^{-0.13t} + 1220.198841e^{-0.95t})^{1.11}} \quad R^2 = 0.977624 \quad (1)$$

对1964年7月14日一场降雨历时为35 min的累积降雨量过程进行数学模拟,得出的描述方程为:

$$P = (5.758839 - 0.312492t^{0.5} - 9.687352t^{-0.5})^{\frac{10}{3}} \quad R^2 = 0.996625 \quad (2)$$

式中: P —— 累积降雨量(mm); t —— 降雨历时(min)。

式(1)和式(2)表明,代表两种类型累积降雨量变化过程的两场降雨,分别用扩展S型曲线模型和扩展幂函数模型进行描述,其模拟结果均达到高度显著。

对统计的21场短历时局地雷暴雨的降雨特征进行分析得出,暴雨降雨量介于2.05~55.33 mm之间,降雨历时介于25~491 min之间。总体上,短历时局地雷暴雨历时在80 min以内的发生次数最多,占统计总次数的61.90%,降雨量主要集中在40 mm以内,占统计总次数的90.48%。

3.2 累积径流深变化过程及径流特征

通过对选取的团山沟3号径流场21场短历时局地雷暴雨产流的累积径流深变化过程进行分析表明,累积径流深随径流历时的变化过程总体上都表现为先不断增大,达到一定的产流时间后或产流即将结束之前变化减到很小。综合分析21场产流过程,根据各次变化过程特征的差异,可将累积径流深随径流历时的变化过程划分为两种类型:第一类,其典型特征是累积径流深在产流初期随时间的增加呈较缓慢的增大,且持续时间较短,随径流历时进一步增加,累积径流深急剧增大,几乎呈直线上升,后期累积径流深的增量突然转到非常小,累积径流深过程线非常平缓,并持续较长的时间,可用 $H = \frac{A}{(B_0 + \sum_{i=1}^n B_i e^{-c_i t})^m}$ 形式的扩展S型曲线模型对这种类型的累积径流深变化过程进行拟合;第二类,其典型特征是在产流过程中,累积径流深一直呈上升趋势,径流末期累积径流深增加的速度小于径流初期增加的速度,可用 $H = (B_0 + \sum_{i=1}^n B_i t^{\frac{1}{i}})^m$ 形式的扩展幂函数模型对这种类型的累积径流深变化过程进行拟合。

对1964年8月2日一场径流历时为24 min的累积径流深变化过程进行数学拟合,取得的描述方程为:

$$H = \frac{15.5}{(1.007367 + 6.345697e^{-0.55t})^4} \quad R^2 = 0.996584 \quad (3)$$

对1968年7月19日一场径流历时为11 min的累积径流深变化过程进行数学模拟,取得的描述方程为:

$$H = (1.022550 - 0.003040t^{0.5} - 0.0620773t^{-0.5})^{100} \quad R^2 = 0.997275 \quad (4)$$

式中: H —— 累积径流深(mm); t —— 径流历时(min)。

式(3)和式(4)表明,代表两种类型累积径流深变化过程的两场降雨的产流,分别用扩展S型曲线模型和扩展幂函数模型进行描述,其模拟结果均达到高度显著。

对统计的21场短历时局地雷暴雨产生的径流进行分析表明,暴雨产流最大径流深是22 mm,径流历时介于5~40 min之间。径流深主要集中在20 mm以内,占总统计次数的95.24%,径流历时则以10~30 min之间居多,占总统计次数的57.14%。

3.3 累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程的响应

对选取的团山沟3号径流场21场短历时局地雷暴雨产生的次产流累积径流深变化过程对相应累积降雨量变化过程的响应关系进行分析表明,总体上,产流开始后累积径流深对累积降雨量的变化具有大体相似的响应趋势,即随着时间的增加二者基本都表现为较大或一定增大的走势,但产流过程中累积径流深与累积降雨量的变化在不同时间增加的速率不同,综合分析21场降雨产流过程,根据各次降雨与产流变化过程特征的差异,可将累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程的响应关系划分为两种类型:第一类,其典型特征是产流初期,累积径流深增加的速度小于累积降雨量增加的速度,随后,随降雨历时的增加,累积径流深以与累积降雨量基本相等的速度迅速增加,再往后,累积降雨量仍以较大增速随时间的增长而增加,但累积径流深的变化则呈现为近于稳定不变的状态,这种类型的累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程的响应关系可用扩展S型曲线模型进行拟合;第二类,其典型特征是产流初期,累积降雨量增加速度大于累积径流深增加的速度,但在随后的产流过程中,累积径流深的变化速度与累积降雨量的变化速度基本一致,这种类型的累积径流深变化过程对累积降雨量的变化过程的响应关系可用扩展幂函数方程进行描述。

对1964年8月2日一场径流历时为24 min的累积径流深与累积降雨量关系进行模拟,得到表述方程为:

$$P = \frac{15.5}{(0.990558 + 2.355118e^{-0.8H} + 0.566223e^{-0.15H})^{14.85}} \quad R^2 = 0.995107 \quad (5)$$

对1964年8月23日一场径流历时为11 min的累积径流深与累积降雨量关系进行模拟,得表述方程为:

$$P = (0.284828 + 0.271581H^{0.55})^{10} \quad R^2 = 0.995764 \quad (6)$$

式中: P ——累积降雨量(mm); H ——累积径流深(mm)。

式(5)和式(6)表明,代表两种类型累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程响应关系的两场降雨产流,分别用扩展S型曲线模型和扩展幂函数模型进行描述,其模拟结果均达到高度显著。坡面径流是由降雨经土壤入渗后产生的结果,黄土性土壤的坡面产流属于超渗产流,产流变化过程始终由降雨强度及土壤承雨后导水率等特征的动态变化所制约,成因较复杂。虽然如此,经过一定时间的产流前期降雨及雨滴对地面的打击及造成的细颗粒对土壤孔隙的填充、密封,使得开始产流后土壤特征变化相对较小,虽然还一直处于动态变化,但产流过程中的径流率大小变化趋势更多地符合于降雨强度的变化,只是二者对于产流变化的贡献程度随雨强大小的变化而随时波动,因此,反映在累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程的响应关系上,表现为二者总体上呈正相关趋势,但在不同时间阶段,径流响应的变化速度并不完全与降雨的变化一致,未形成线性关联,而是一种非线性响应关系。

3.4 累积侵蚀产沙模数变化过程及侵蚀产沙特征

对选取的团山沟3号径流场21场短历时局地雷暴雨产生的累积侵蚀产沙模数变化过程进行分析,并根据21场侵蚀产沙变化过程特征的差异,可将累积侵蚀产沙模数随产沙历时的变化过程划分为两种类型:第一类,其典型特征是累积侵蚀产沙模数在产沙初期随产沙历时的增长,增加幅度较小,之后以很大的增幅急速上升,过程线近乎于斜率很大的直线,后期又转变为增幅极小、几乎不变的稳定延续状态,过程线变化平缓,可用 $E = \frac{A}{(B_0 + \sum_{i=1}^n B_i e^{-a_i t})^m}$ 形式的扩展S型曲线模型对这种类型的累积侵蚀产沙模数变化过程进行拟合;第二类,在产沙过程中,累积侵蚀产沙模数以相对稳定的变化幅度随产沙历时的增加而增大,进入产沙末期,累积侵蚀产沙模数增加的速度明显减小,可用 $E = (B_0 + \sum_{i=1}^n B_i t^{\frac{1}{i}})^m$ 形式的扩展幂函数模型对这种类型的累积侵蚀产沙模数变化过程进行拟合。

对1964年8月2日一场产沙历时为24 min的累积侵蚀产沙模数变化过程进行拟合,得到拟合方程为:

$$E = \frac{8}{(1.008941 + 4.624903e^{-0.55t})^5} \quad R^2 = 0.997758 \quad (7)$$

对1968年7月19日一场产沙历时为11 min的累积侵蚀产沙模数变化过程进行模拟,得到拟合方程为:

$$E = (2.041166 - 0.071205t^{0.3} - 1.033744t^{-0.05})^{100} \quad R^2 = 0.996822 \quad (8)$$

式中: E ——累积侵蚀产沙模数(kg/m²); t ——产沙历时(min)。

式(7)和式(8)表明,代表两种类型累积侵蚀产沙模数变化过程的两场降雨的侵蚀产沙,分别用扩展S型曲线模型和扩展幂函数模型进行描述,其模拟结果均达到高度显著。

对统计的21场短历时局地雷暴雨产生的侵蚀产沙模数进行分析得出,侵蚀产沙模数介于2~19560 t/km²

之间。21 场降雨中,有 5 场降雨引起的侵蚀产沙模数占侵蚀产沙模数总量的 84.55%,而降雨次数仅占总统计次数的 23.81%,说明研究区引起严重土壤流失的仅仅是少数几场侵蚀性降雨。

3.5 累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应

对选取的团山沟 3 号径流场 21 场短历时局地暴雨条件下的累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应关系进行分析表明,总体上,随累积径流深增大,累积侵蚀产沙模数也增大,但二者的变化过程并不平行,存在一定的差异。综合分析 21 场产流产沙过程,可将累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应关系划分为两种类型:第一类,其典型特征是产流产沙早期,累积产流产沙增速都较小,但产流的增速大于产沙,产流产沙中间时段,累积产流产沙增速都很大,且产流与产沙的增速基本一致,产流产沙后期,累积产流产沙增速又都降低,且产沙的增速低于产流,这种类型的累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应关系可用扩展 S 型曲线模型进行拟合;第二类,其典型特征是产流产沙初期,累积产流产沙增速大且接近一致,中间阶段累积产流增速明显快于累积产沙增速,结束期累积产流产沙趋于一致呈基本不增加的状态,这种类型的累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应关系可用扩展幂函数模型进行拟合。

对 1969 年 5 月 12 日一场产沙历时为 19 min 的累积侵蚀产沙模数对累积径流深的响应过程进行拟合:

$$E = \frac{1}{(0.999989 + 0.000163e^{-1.2H} + 0.000268e^{-10.5H})^{20000}} \quad R^2 = 0.999\ 020 \quad (9)$$

对 1968 年 8 月 22 日一场产沙历时为 29 min 的累积侵蚀产沙模数对累积径流深的响应过程进行拟合:

$$E = (-1.013747 + 1.536053H^{21/100} + 0.055020H^{-11/25})^{10/7} \quad R^2 = 0.996\ 477 \quad (10)$$

式中: E —— 累积侵蚀产沙模数(kg/m²); H —— 累积径流深(mm)。

式(9)和式(10)表明,代表两种类型累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程响应关系的两场产流产沙,分别用扩展 S 型曲线模型和扩展幂函数模型进行描述,其模拟结果均达到高度显著。

降雨及其产生的径流是造成土壤侵蚀的动力,虽然降雨雨滴对地面土壤的直接打击作用能导致土壤溅蚀,使土壤物质从母体上分离,形成处于分散状态的土壤颗粒,但能将土壤物质带走,造成土壤流失,形成侵蚀产沙的动力主要来自径流,因此,坡面侵蚀产沙变化对于径流变化具有密切的响应。随着径流的增加,侵蚀产沙总的一定增大,但由于侵蚀产沙过程复杂,影响因素多,侵蚀过程中土壤可蚀性的变化、径流沿程含沙变化、土壤临界抗剪强度、被分散土壤的临界起动力、降雨与径流分离能力、径流携沙能力等都影响和制约着侵蚀产沙及其变化,因此,累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应关系在总体呈正相关的前提下,必然体现为非线性响应。

4 结 论

针对黄土区降雨产流产沙问题,应用非线性模拟技术,基于分析黄河水利委员会黄河流域子洲径流试验站 3 号径流场 8 年 21 场短历时局地暴雨及其导致的坡面产流、产沙过程观测资料,对黄土坡面降雨产流产沙皆随历时变化的动态过程及响应关系进行了研究,结果表明,黄土坡面累积降雨量随降雨历时的变化过程、累积径流深随产流历时的变化过程、累积侵蚀产沙模数随产沙历时的变化过程,以及累积径流深变化过程对累积降雨量变化过程的响应关系、累积侵蚀产沙模数变化过程对累积径流深变化过程的响应关系具有相似特征,均呈非线性相关关系,都可划分为两种类型,分别用 $Y = A / (B_0 + \sum_{i=1}^n B_i e^{-C_i X})^m$ 和 $Y = (B_0 + \sum_{i=1}^n B_i X^{\frac{1}{i}})^m$ 形式的扩展 S 型曲线模型和幂函数模型进行数学描述。

参考文献:

- [1] 王万忠,焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [2] 刘志,江忠善. 降雨因素和坡度对片蚀影响的研究[J]. 水土保持通报,1994,14(6):19-22,61.
- [3] 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):422-428.
- [4] 吴发启,赵晓光,朱首军. 黄土高原南部侵蚀能量的产沙特征及其作用[J]. 水土保持学报,2000,14(5):83-86.
- [5] 孙飞达,王立,龙瑞军,等. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究,2007,14(2):16-18.
- [6] 肖培青,郑粉莉,姚文艺. 坡沟系统侵蚀产沙及其耦合关系研究[J]. 泥沙研究,2007(2):30-35.
- [7] 王玉宽,王占礼. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J]. 水土保持学报,1991,5(2):25-31.
- [8] 王玉宽,周佩华. 单次暴雨小流域产流产沙分布的定量研究[J]. 水土保持学报,1992,6(3):36-41.
- [9] 吴普特,周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. 水土保持学报,1996,10(1):40-45.
- [10] 蒋定生,刘梅梅,黄国俊. 降水在凸—凹形坡上再分配规律初探[J]. 水土保持通报,1987,7(1):45-50.
- [11] 孙全敏,王占礼,邵明安. 生物种群 Logistic 扩展模型灰色增量生成参数辨识方法及应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(8):106-113.