

# 工程建设弃土弃渣水土流失过程试验研究

马春艳<sup>1</sup>, 王占礼<sup>1,2</sup>, 寇晓梅<sup>3</sup>, 谭贞学<sup>2</sup>, 刘俊娥<sup>1</sup>, 袁殷<sup>1</sup>, 张乃畅<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 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 杨凌 712100; 3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 弃土弃渣是工程建设产生的最主要地面组成物质之一。采用野外放水冲刷试验方法, 对黄河班多水电站工程区弃土弃渣水土流失过程进行了研究。(1) 不同供水流量下, 产流率随供水过程的动态变化整体呈增长趋势, 可用幂函数方程描述, 开始产流后的 5 min 内产流过程的变化幅度较大, 随后较为平缓, 并趋于基本稳定; (2) 不同供水流量下, 产沙率随供水历时的增长而减少, 可用对数相关方程描述, 小流量下变化过程波动较小, 大流量下变化幅度较大; (3) 不同供水流量下, 含沙量随着供水历时的增长而减少, 可用对数相关方程描述。各流量下的变化趋势基本一致; (4) 次产流深、次产沙模数皆随供水流量的增大而增加, 增加趋势基本相同, 皆可用对数相关方程描述。平均含沙量随供水流量的增大先增加后减小, 临界值为 7.17 L/min, 可用抛物线相关方程描述; (5) 次产沙模数随次产流深的增大而增加, 表现为很好的正相关关系, 可用对数相关方程来描述。

**关键词:** 工程建设; 弃土弃渣; 放水冲刷试验; 产流产沙过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)03-0078-05

中图分类号: S157

## Experimental Study of Soil and Water Loss Processes on Waste Soil and Residue in Project Construction

MA Chun-yan<sup>1</sup>, WANG Zhan-li<sup>1,2</sup>, KOU Xiao-mei<sup>3</sup>, TAN Zhen-xue<sup>2</sup>, LIU Jun-e<sup>1</sup>, YUAN Yin<sup>1</sup>, ZHANG Nai-chang<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Hydrochina Northwest Engineering Corporation, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** Waste soil and residue induced by project construction is one of the main ground materials. Based on field scouring experiment, the processes of runoff and sediment yield on waste soil and residue in the Banduo hydropower station project area in the Yellow River were studied and following results were obtained. (1) Under different flow rates, runoff yield varied with souring time and the relationships can be described by power equations. Runoff yield changed greatly in initial 5 min, then changed slowly, and tended to be steady eventually. (2) Under different flow rates, sediment yield decreased with souring time and the relationships can be described by logarithmic equations. (3) Under different flow rates, sediment concentration varied with souring time and the relationships can be described by logarithmic equations. The variations for different flow rates had the same trend, basically. (4) Depth of single runoff yield and modulus of single sediment yield increased with different flow rates and can be described by logarithmic equations. The averaged sediment concentration varied with souring time and the relationship can be described by a parabola equation. Critical flow rate was found to be 7.17 L/min. (5) The relationship between depth of single runoff yield and modulus of single sediment yield showed a positive correlation. Modulus of single sediment yield increased with depth of single runoff yield and the relationship can be described by a logarithmic equation.

**Keywords:** project construction; waste soil and residue; scouring experiment; process of runoff and sediment yield

收稿日期: 2009-01-10

修回日期: 2009-03-09

资助项目: 国家 973 计划课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-442); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室(科技部专项经费)项目; 西北农林科技大学创新团队建设计划(01140202)

作者简介: 马春艳(1983—), 女(汉族), 陕西省吴堡县人, 硕士生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: nldmcy2004@163.com。

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省佳县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn。

随着我国经济建设的不断发展,各地的开发建设项目日益增多,如水利工程建设、矿产资源开发、城镇开发区建设、铁路公路建设等。这些开发建设工程在开发、工程建设和生产运行中,扰动和破坏原地貌,造成新的、严重的水土流失。

开发建设项目造成的水土流失,是以人类生产建设活动为主要外营力形成的水土流失类型,主要体现在项目建设区的水资源、土地资源及其环境的破坏和损失,包括岩石、土壤、土状物、泥状物、废渣、尾矿、垃圾等多种物质的破坏、侵蚀、搬运和沉积<sup>[1]</sup>,是人类生产建设活动过程中扰动地表和地下岩土层、堆置废弃物、构筑人工边坡而造成水土资源和土地生产力的破坏和损失,是一种典型的人为加速侵蚀<sup>[2]</sup>。开发建设项目水土流失常以“点状”或“线型”、单一或综合的形式出现,具有流失量大,集中,突发性强,危害大等特点<sup>[3]</sup>。

工程建设对原生地面造成的破坏、扰动及由此产生的水土流失已成为重要的环境问题及新的水土流失形式,受到全社会和各级政府广泛关注。

蔺明华等<sup>[4]</sup>以降雨—入渗—产流原理、土壤侵蚀原理及河流输沙理论为基础,根据天然降雨、人工降雨、放水冲刷等试验研究成果及典型区域开发建设新增水土流失量分析,提出了适用于开发建设项目新增水土流失评价的数学模型法、新增土壤侵蚀系数法和水土流失系数法等3种方法。王利军等<sup>[5]</sup>通过对分别位于北京山区和平原区两种地貌类型的2个开发建设项目新增水土流失预测的研究,提出了原地貌和扰动地表水土流失的预测方法。该方法主要采用实测数据、类比法、水文资料查阅法以及模数修正法等来确定原地貌和扰动地表土壤侵蚀模数。宁建国<sup>[6]</sup>针对广东省西南部地区的自然地理特征和土壤流失现状,详细阐述了在不具备控制站等传统方法监测的工程项目中,采用简易径流观测场、侵蚀沟体积量测法监测土壤侵蚀强度和流失过程,总结出广东省西南部地区开发建设项目的土壤流失特点。孙虎等<sup>[7-8]</sup>针对城镇建设引起的水土流失,对人为弃土堆积斜坡和人为弃土堆进行了降雨侵蚀实验,结果表明在短历时,高强度降雨条件下,人为弃土斜坡可发生剧烈的土壤侵蚀,坡面的细沟侵蚀占有较大比重,侵蚀产沙与降雨产流历时具有幂函数或对数函数关系。苏彩秀等<sup>[9]</sup>论述了工程建设对水土流失的影响及测定工程建设土壤侵蚀的方法,针对研究中存在的问题及薄弱点,提出了一些见解,并着重指出采用修正的土壤流失方程(RUSLE)和GIS评估工程建设中产生的土壤流失量将是今后的发展趋势。

开发建设工程中的水土流失预测是水土保持方案的重要内容之一,是水土保持方案编制的基础,但工程区土壤侵蚀过程、特征及其预测的研究目前为薄弱环节。开展工程建设扰动地面水土流失过程研究可为工程建设区评价新增水土流失,设计水土保持措施,重建生态及与监测环境演变,编制科学合理的水土保持方案提供重要科学依据。本文采用野外放水冲刷试验的方法,研究黄河班多水电站工程区弃土弃渣堆积面的水土流失动态变化过程,为工程侵蚀的评价与水土保持方案的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河班多水电站位于青海省海南州兴海县与同德县交界处的班多峡谷出口处,为黄河干流龙羊峡以上茨哈至羊曲河段规划的第2个梯级电站。坝址区两岸地形平缓,阶地发育,左岸发育有一级阶地,二级阶地阶面高程2760~2770m,右岸局部残留有二级阶地基座。属于青藏高原气候系统,为典型的大陆性气候,表现为冷热两季交替、干湿两季分明,多年平均降水量为425.2mm,坝址区黄河多年平均流量为567m<sup>3</sup>/s。坝址区及库区土壤属于青藏高原高山草甸土壤带土壤类型,地面组成物质主要为第四纪沉积物,土石混杂,砾石含量高。黄河班多水电站工程占地面积171.89hm<sup>2</sup>,工程建设中形成的最主要扰动地面类型为工程建设产生的弃土弃渣,其堆积体组成物质为粒径大小不等的土石混合物。弃土弃渣被倾倒形成堆积体过程中,顶部受到倒渣车轮碾压,渣体外围则是在这种顶部压实而侧面临空状况下形成的自然斜坡,坡面10cm厚度的平均容重为1.197g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计与观测

采用野外放水冲刷试验方法研究工程建设弃土弃渣水土流失过程。试验在班多水电站工程建设弃土弃渣堆积体坡面上进行。

试验供水系统主要设备包括水泵和溢流箱等。供水系统中,汽车载水箱将从水源地运至试验地,发电机带动水泵将水通过水管抽到溢流箱,供水流量大小通过安装在扬程水管出口的控制阀调节。溢流箱置于小区顶端,并嵌入地面一定深度,使溢流面与小区坡面刚好接触。通过溢流箱对水管出流的消能缓冲等作用,保证流入小区的水流为均匀薄层状。

试验小区由1mm厚的钢板插入地面以下0.15m围成,钢板高出地面0.10m,试验小区投影面积4m×0.5m。试验坡度取36°。试验的供水流量分别为4,6,8,10,12L/min。试验时间为30min。

整个试验过程中,开始产流到试验结束期间,在小区出口处定时收集径流泥沙样进行观测。开始产流时取样一次,产流后的前 6 min,分别每隔 1,2,3 min 取一次样,以后皆每隔 3 min 取一次样,试验结束时再取一次。试验结束后,用量筒测定径流泥沙样体积,经沉淀并用工业酒精烧干后称重测定取样泥沙重量。另外,在试验之前测定了试验坡面 0—10 cm 深度的弃土弃渣含水量及容重。

## 2 结果与分析

### 2.1 弃土弃渣坡面产流率变化过程

将不同供水流量条件下产流率随供水过程的动态变化试验数据绘制成图 1,相关分析结果详见表 1。

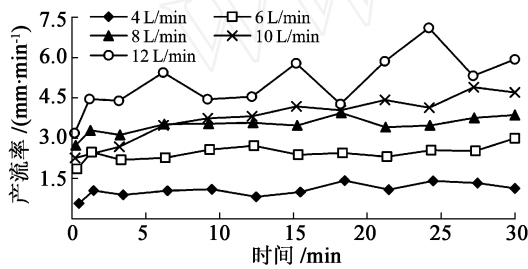


图 1 产流率随供水过程的变化

表 1 产流率随供水过程变化的经验方程

供水流量/(L·min <sup>-1</sup> )	经验方程	相关系数
4	$H = 0.7453t^{0.1511}$	0.7630
6	$H = 2.1197t^{0.0633}$	0.7305
8	$H = 3.0609t^{0.0587}$	0.8683
10	$H = 2.6625t^{0.1543}$	0.9478
12	$H = 3.9725t^{0.1084}$	0.7834

注:  $H$ ——产流率(mm/min);  $t$ ——时间(min)。

从表 1 可以看出,不同供水流量条件下,产流率随供水过程的动态变化皆可用幂函数方程描述。通过对图 1 进行分析,在相同坡度、坡长,不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面产流率随供水过程的变化整体呈增长趋势。整个供水过程中,在开始产流后的 5 min 内,产流率随供水过程的变化幅度较大,以后变化较为平缓,只有在大流量条件(12 L/min)下变化幅度较大。

弃土弃渣坡面产流率随供水过程发生这种变化的原因是在供水开始后的前期,堆积体坡面表层含水量小,入渗率大,产流率低。随着供水的进行,表层逐渐接近饱和,入渗速度接近饱和入渗率,相应的产流过程也就必然逐步增大,且相对比较稳定。

### 2.2 弃土弃渣坡面产沙率变化过程

将不同供水流量条件下产沙率随供水过程的动态变化试验数据绘制成图 2,相关分析结果见表 2。

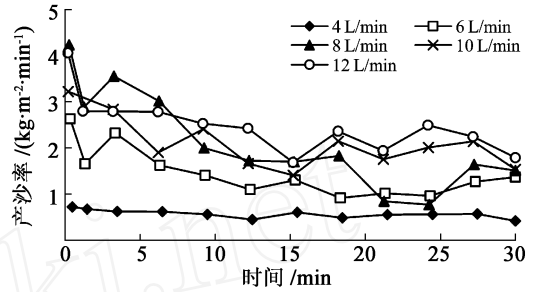


图 2 产沙率随供水过程的变化

表 2 产沙率随供水过程变化的经验方程

供水流量/(L·min <sup>-1</sup> )	经验方程	相关系数
4	$M = -0.05391nt + 0.6896$	0.7926
6	$M = -0.33061nt + 2.1693$	0.8582
8	$M = -0.65401nt + 3.5136$	0.8933
10	$M = -0.30731nt + 2.7819$	0.8046
12	$M = -0.36171nt + 3.2358$	0.8891

注:  $M$  为产沙率(kg/(m<sup>2</sup>·min));  $t$  为时间(min)。

从表 2 可以看出,不同供水流量条件下,产沙率随供水过程的动态变化可用对数相关方程描述。通过对图 2 进行分析,在相同坡度、坡长,不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面产沙率随供水历时的增长而减少。整个供水过程中,产沙率在两个小供水流量条件下随供水历时的变化过程波动较小,在 3 个大流量条件下随供水历时的变化幅度较大。

弃土弃渣坡面产沙率随供水过程发生这种变化的根本原因是弃土弃渣堆积体的剖面组成物质为土石混杂,含石量高,随着供水过程的进行,可供地表产流侵蚀携带的土壤物质逐渐减少,所以产沙率随供水历时增长呈减小趋势。

### 2.3 弃土弃渣坡面水流含沙量变化过程

将不同供水流量条件下产流水流含沙量随供水过程的动态变化试验数据绘制成图 3,相关分析结果见表 3。

从表 3 可以看出,不同供水流量条件下,含沙量随供水时间的动态变化可用对数相关方程描述。通过对图 3 进行分析,在相同坡度、坡长,不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面水流含沙量随供水历时的增长而减少。在不同供水流量条件下,产流开始时含沙量都很高,但很快下降并随供水历时的延长下降幅度逐渐减小,并显现出趋于相对稳定的趋势,且各供水流量下的变化趋势基本一致。

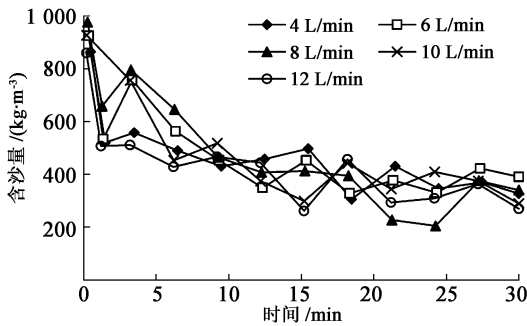


图 3 含沙量随供水过程的变化

表 3 含沙量随供水过程变化的经验方程

供水流量/(L·min <sup>-1</sup> )	经验方程	相关系数
4	$Y = -103.16 \ln t + 691.56$	0.898 2
6	$Y = -116.67 \ln t + 739.12$	0.878 7
8	$Y = -146.94 \ln t + 800.30$	0.918 3
10	$Y = -126.94 \ln t + 756.55$	0.925 7
12	$Y = -96.823 \ln t + 630.71$	0.909 7

注:  $Y$  为含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $t$  为时间( $\text{min}$ )。

侵蚀过程中的含沙量变化是产流、产沙及水沙关系消长与演变的重要指标。随供水过程的进行,弃土弃渣坡面水流含沙量呈现减少的变化特征表明,在整个供水过程中,产流与产沙的变化过程是不一致的,水沙变化特征为产流相对于产沙越来越多,产沙相对于产流则越来越少。弃土弃渣坡面组成物质结构松散、颗粒粒径相差悬殊、土石混杂于一体,在产流初期不仅产流率小,可供侵蚀的物质,尤其是细颗粒物质供应充足,所以含沙量很高。随着产流历时的进行,产流率逐渐增大或趋于稳定,而能被侵蚀的细颗粒物质不断减少直至很少,所以含沙量的变化必然表现为不断减小,直到显现出趋于稳定的趋势。

### 2.4 供水流量对弃土弃渣坡面产流产沙及其含沙量的影响

将不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面次产流深、次产沙模数、次平均含沙量随供水流量变化的试验数据绘制成图 4—6,并进行相关分析,结果显示,次产流深、次产沙模数随供水流量的变化皆可用对数相关方程来描述,次平均含沙量随供水流量的变化可用抛物线相关方程来描述,其经验方程分别为。

$$H = 105.26 \ln Q - 115.05 \quad (R = 0.9869)$$

$$M = 48.974 \ln Q - 49.012 \quad (R = 0.9892)$$

$$Y = -2.6891 Q^2 + 38.55 Q + 355.77 \quad (R = 0.9999)$$

式中:  $H$ ——次产流深( $\text{mm}$ );  $M$ ——次产沙模数( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $Y$ ——次平均含沙量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $Q$ ——供水流量( $\text{L}/\text{min}$ )。

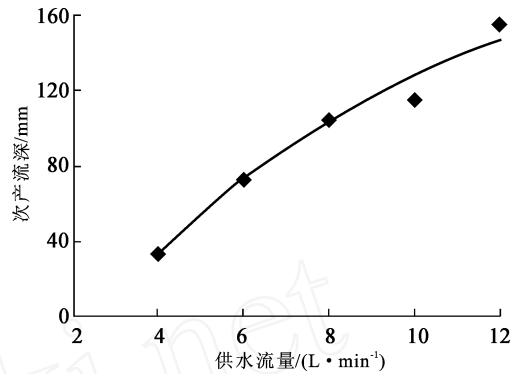


图 4 次产流深随供水流量的变化

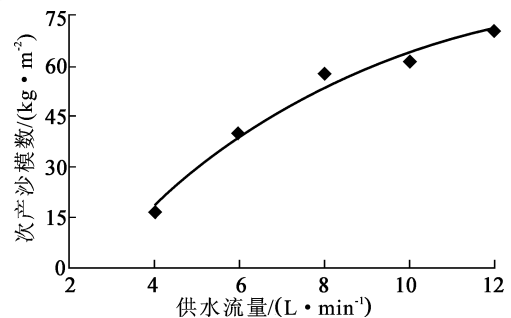


图 5 次产沙漠数随供水流量的变化

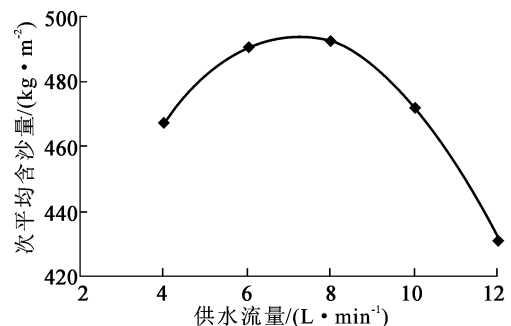


图 6 次平均含沙量随供水流量的变化

从图 4,5 可以看出,在不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面次产流深、次产沙模数皆随供水流量的增加表现为一直增大,且增大的趋势也基本相同。

从图 6 可以看出,次平均含沙量随供水流量的变化存在一个临界值,通过计算得出该值对应的供水流量为 7.17 L/min,供水流量小于 7.17 L/min 时,次平均含沙量随供水流量的增大而增大,表明沙相对于水增多。供水流量大于 7.17 L/min 时,次平均含沙量随供水流量的增大而减小,表明沙相对于水减少。

由于随供水流量增大,相同供水时间内供水总量必然增大。土壤饱和导水率虽然在发生侵蚀的下垫面状况下也发生变化,但远不如设计的供水流量变化大。所以,随供水流量增大,次产流深就必然增大。随次产流深的增大,引起侵蚀的动力增强,侵蚀能量

增大,对于流经下垫面组成物质为相同的弃土弃渣而言,它造成的侵蚀总量则必然会增大。

土壤侵蚀是侵蚀动力与可侵蚀性相互作用的结果。供水流量小于 7.17 L/min 时,弃土弃渣物质不仅不成为制约侵蚀的因素,而且在供水流量增大,产流及其侵蚀能力增强的扰动状况下,还有利于侵蚀的发展,使得沙的增加相对大于水的增加,故次平均含沙量随供水流量的增大而增大。但当供水流量大于 7.17 L/min 后,相对而言,弃土弃渣物质已成为侵蚀发展的制约因素,虽然随供水流量增大,产流及其侵蚀能力增强,侵蚀也会增大,但沙的增加相对小于水的增加,故次平均含沙量随供水流量的增大而减小。

### 2.5 弃土弃渣坡面次产流产沙关系

将不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面次产沙模数随次产流深变化的试验数据,并进行相关分析,结果显示,次产沙模数随次产流深变化的关系可用对数相关方程来描述,其回归方程为。

$$M = 35.562 \ln H - 108.73 \quad (R = 0.9947)$$

式中:  $M$  ——次产沙模数 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $H$  ——次产流深 ( $\text{mm}$ )。

在不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面次产沙模数随次产流深的增大而增加,次产流深小于 80 mm 时,次产沙模数随次产流深的增大而增加较快,以后相对趋于平缓。工程建设弃土弃渣是一种物质组成极不均匀的土石混杂物质,且含石量极高。在恒定供水流量的产流产沙过程中,由于随着水沙过程的推进及侵蚀分选过程的存在,坡面可供产流侵蚀携带的物质减少,使得产流产沙关系往往表现为随供水过程的进行,产流不变或增大较小,而产沙减小幅度较大,结果产流产沙关系表现为负相关关系(如图 1,2)。虽然如此,但在不同供水流量条件下,由于随供水流量增大,次产流深增大,侵蚀能量增强,径流搬运携带粗粒径泥沙的能力增强,次侵蚀总量或模数必然增大。

## 3 结论

采用野外放水冲刷试验的方法对工程建设弃土弃渣坡面水土流失过程进行了研究。

(1) 不同供水流量条件下,产流率随供水过程的动态变化可用幂函数方程描述。整个供水过程中,产流率随供水过程的变化整体呈增长趋势。在开始产流后的 5 min 内,产流率随供水过程的变化幅度较大,随后变化较为平缓,只有在大流量条件(12 L/min)下变化幅度较大。

(2) 不同供水流量条件下,产沙率随供水过程的动态变化可用对数方程描述,产沙率随供水历时的增长而减少。整个供水过程中,产沙率在两个小供水流量条件下随供水历时的变化过程波动较小,在 3 个大流量条件下随供水历时的变化幅度较大。

(3) 不同供水流量条件下,水流含沙量随供水过程的动态变化可用对数相关方程描述,随供水历时的增长而减少。在不同供水流量条件下,产流开始时含沙量都很高,但很快下降并随供水历时的延长下降幅度逐渐减小,并显现出趋于相对稳定的趋势,且各供水流量下的变化趋势基本一致。

(4) 在不同供水流量条件下,弃土弃渣坡面的次产流深、次产沙模数皆随着供水流量的增加而增大,其增大的趋势基本相同,皆可用对数相关方程来描述;次平均含沙量随供水流量的变化可用抛物线相关方程描述,发生变化的临界供水流量为 7.17 L/min,小于该供水流量时,水沙变化表现为沙相对于水增多,大于该供水流量时,水沙变化表现为沙相对于水减少。

(5) 不同供水流量条件下,次产沙模数随次产流深的增大而增加,表现为很好的正相关关系,可用对数相关方程来描述。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 赵永军. 开发建设项目水土保持方案编制技术[M]. 北京: 中国大地出版社, 2006: 38.
- [2] 高旭彪, 黄成志, 刘朝晖. 开发建设项目水土流失防治模式[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 93-97.
- [3] 冀秉信, 王海卫, 高秀娟. 论开发建设项目与水土保持[J]. 山西科技, 2002(增刊): 55.
- [4] 蔺明华, 杜靖澳, 张瑞. 黄河中游地区开发建设新增水土流失预测方法研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 61-67.
- [5] 王利军, 鲍永刚. 北京市不同地貌类型开发建设项目新增水土流失预测方法研究[J]. 北京水务, 2008(2): 48-51.
- [6] 宁建国. 广东西南部地区开发建设项目土壤侵蚀强度监测方法探讨[J]. 中国水土保持, 2006(11): 51-53.
- [7] 孙虎, 唐克丽. 城镇建设中人为弃土降雨侵蚀实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 29-35.
- [8] 孙虎, 甘枝茂. 城市化建设人为弃土引发的侵蚀产沙过程研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 1998, 26(3): 95-98.
- [9] 苏彩秀, 黄成敏, 唐亚, 等. 工程建设中产生的水土流失评估研究进展[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 168-170, 174.