

基于GIS的农林复合经营的侵蚀控制模拟研究

唐政洪¹, 蔡强国¹, 许峰², 王忠科³, 吴淑安¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 水利部水土保持监测中心; 3 河北省张家口市水保试验站)

摘要: 根据张家口郭家梁试验场的小区资料, 建立了小流域侵蚀产沙模型以及植物篱侵蚀控制模型; 并在GIS的支持下, 从小流域数字高程模型(DEM)中提取基于地块间水沙汇流网络, 生成基于地块的水沙运移网络图, 并将地块间的水沙汇流过程引入小流域侵蚀产沙的模拟中, 实现了侵蚀产沙模型与地理信息系统(GIS)的深层次耦合, 模拟出坡面水沙在小流域的空间运动过程。1995~1999年的青边口河小流域模拟结果表明: 坡耕地、荒坡地、低覆盖的天然草地的平均侵蚀模数最大, 是侵蚀控制的重点土地利用类型。在坡耕地、荒坡地、低覆盖的天然草地配置面积占流域总面积的18.2%的植物篱-农作系统(10m带间距的二年生紫穗槐植物篱), 利用次降雨资料的计算模拟结果表明, 对径流的控制效果在8.1%~46.2%之间, 对侵蚀模数的控制效果在42.9%~50.2%之间; 养分流失的模拟分析表明, 在现有条件下有机质的损失较大, 而通过配置植物篱-农作系统可以有效地减少养分的流失。

关键词: 冀西北; 农林复合经营; 植物篱-农作系统; 汇流网络

中图分类号: S157.4, TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001)04-0170-05

Study on the GIS-based Simulation of Erosion Control for Agroforestry

TANG Zheng-hong¹, CAIQiang-guo¹, XU Feng², WANG Zhong-ke³, WU Shu-an¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing, China;

3 Experimental Station of Soil and Water Conservation in Zhangjiakou, Hebei Province, China)

Abstract: Based on the data of Guojialiang test site, soil erosion and sediment yield models and erosion control models of the hedgerow were established. The study produced water and sediment transport networks of the catchment from digital elevation model (DEM) and brought them to the models. The combination of GIS and models simulated the influence of upper-runoff to the lower-slope and the spatial process of runoff and sediment transport in a catchment. The result of the simulation from 1995 to 1999 showed that cultivated slope land, bare slope land and natural grass land with low vegetative cover have the highest erosion modulus in Qingbiankohe catchment, and they are the important regions for erosion control. Authors simulated the system of the hedgerow-crops in these regions whose area only has 18.2% of the whole catchment. The results show that the control effect for runoff is between 8% and 46% and the control effect for sediment is between 42% and 50%. The simulation results of nutrient loss shows that the loss of organic matter is severe on current conditions. However, it is an effective method to control the nutrient loss on the condition of hedgerow-crops system.

Key words: Northwest of Hebei Province; agroforestry; hedgerow-crops system; conflux networks

收稿日期: 2001-08-25

国家自然科学基金资助项目(49871053)、中科院地理科学与资源研究所知识创新工程项目CXDG-A00-05-02)、河北省山办、省科委项目(96230905)

作者简介: 唐政洪, (1974-), 中国科学院地理科学与资源研究所博士研究生, 主要从事流域侵蚀产沙模拟、流域原理信息系统方面的研究。

1 引言

农林复合经营(Agroforestry)又称复合农林业、复合农林系统,是指在同一土地单元内将多年生木本植物(如乔木、灌木)与其他农作物(粮食作物、饲料作物、经济作物等)及动物生产在时间、空间上有机结合在一起的土地利用方式^[1]。从本质上看,属于系统组合中强调木本植物与其他植物结合的一类生态农业系统。由于农林复合经营对空间的充分利用和对土地退化的有效控制等特点,使得以等高植物篱、地埂植物篱、间作等主要模式,受到人们的普遍关注。我国坡地整治大多以小流域为基本单元,目前坡地农林复合经营的实践也必须落实到小流域的具体配置。但传统的小区研究方法在小区实验和小流域配置的效果之间还缺乏数量化的、空间针对性的联系,只能小流域输沙观测资料来衡量农林复合经营的侵蚀控制效益,难以为农林复合经营的规划、空间配置、效益评价提供依据。地理信息系统(GIS)技术的发展,则为空间模拟小流域农林复合经营的侵蚀控制提供了可能。本研究以小流域地理信息空间数据库为基础,在相应的计算机硬件和GIS软件的支持下,能够对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示,以地块为单元,把农林复合系统和其它土地利用单元的土壤侵蚀和养分流失过程及其相互联系在流域空间得以实现,适时提供多种空间和动态的地理信息,为小流域农林复合经营的规划设计、配置、效益评价提供了良好的空间信息支持和有力依据。GIS技术在坡地农林复合经营研究中的应用,需要众多领域的信息支持和高度的综合,是地学的新兴研究领域之一。本研究以冀西北黄土丘陵区青边口河典型小流域为例,利用GIS技术支持,分析和探讨坡地应用等高植物篱-农作复合经营系统的侵蚀控制效果。

2 资料来源及小流域数据库

2.1 资料来源

2.1.1 青边口河小流域 河北省宣化县青边口河小流域的地貌、土壤、气候特点在冀西北黄土丘陵区具有很强的代表性。该小流域总面积31.4 km²。整个小流域地形北高南低,最高海拔1750.0 m。流域内土壤类型主要是黄土,同时具有土石山区的特点,有基岩分布,由于该区域内的黄土抗蚀性较差,植被

覆盖较低,长期受严重水土流失的影响,在地貌特征上地形破碎,沟壑纵横。青边口河小流域属半干旱大陆性季风气候,一般年份降水在340~400 mm之间,降水量年际及月际分配都不均。

青边口河小流域1995~1999年气象资料来自其所在的东望山乡的自记雨量计资料;青边口河地形图比例尺为1:10 000,土地利用图、土壤图等基础专题图件为实地调绘所得。

2.1.2 张家口郭家梁试验场 本研究建模所需的资料来自张家口郭家梁试验场(东经114°30',北纬40°47'),观测时间从1992年至今;坡度小区共7个试验小区,坡度分别为0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°。小区投影面积均为2 m×5 m。小区常年休耕,耕层土质为粉质沙壤土。坡长小区宽度为2 m,坡长分别为5, 10, 15, 20, 25, 40 m,坡度为16.5°。小区常年休耕,耕层土质为粉质沙壤土。1997年起在坡长小区,1998年在坡度小区开始紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)植物篱的侵蚀控制效益观测,植物篱布设的带间距10 m,每带2行,行距30 cm。

2.2 小流域数据库

本研究是基于GIS技术,小流域侵蚀产沙及养分流失过程进行模拟,它依托于小流域数据库:空间数据库、属性数据库、模型数据库。空间数据库主要是小流域图像数据库,包括小流域数字高程模型(DEM)、土地利用图、土壤类型图、植被覆盖图、农业管理措施图、汇流网络图等。小流域属性数据库是指与小流域空间数据库相联结的属性数据,它包括小流域各种有关的属性数据。小流域模型数据库是指模型运算所必需的各类侵蚀产沙关系式、子模型等。对于小流域空间图像的处理,首先使用ARC/INFO软件进行编辑、修改和建立拓扑关系与属性文件,然后转入基于WINDOWS平台的DRISI软件,建立ACCESS格式的小流域空间数据库,并通过地块的属性编码与小流域属性数据库和空间数据库的有机结合。

3 小流域侵蚀过程的空间模拟

要模拟小流域的侵蚀及其控制过程,必须考虑两个过程:一是流域内不同土地利用单元的土壤侵蚀、养分流失及其控制过程;二是水沙从坡面运移到流域出口的输移过程。国际上流行的流域侵蚀产沙模型大多针对北美、欧洲地区的缓坡条件,以栅格作为计算单元能较好地反映地表状况及输移过程,而

针对我国黄土丘陵区等复杂地貌条件下的水沙输移研究一直是研究的难点, 由于水沙在小流域的运移过程十分复杂, 目前国内的侵蚀产沙模型大都采用“灰箱”模式, 即不考虑水沙运移的中间过程, 这种处理方式不能很好地反映小流域侵蚀产沙的空间分布; 近年来, 能反映小流域侵蚀产沙空间分布的模型是研究侵蚀产沙研究的新动向^[2]。

本研究根据闫国年(1997)针对黄土丘陵区的复杂地形提出的算法^[3], 我们采用 C 语言编程, 从小流域数字高程模型 (DEM) 与小流域地块单元图中提取基于地块间水沙汇流网络, 确定各地块之间的最大汇流数及汇流方向, 进而确定地块之间的主流路, 最终生成基于地块的水沙运移网络图。小流域水沙汇流网络为模型提供了三个重要参数: 提供了小流域地块间水沙汇流的顺序, 这将决定模型自动计算的顺序; 提供了地块间水沙关系的分配, 这将作为模型的重要参数参与模型计算; 提供了地块间主流路长度, 作为地块坡长参与模型计算, 这也是对传统栅格法计算坡长的重要改进, 使得地块坡长更能反映其在侵蚀产沙中的作用。

将地块间的水沙汇流过程引入小流域侵蚀产沙的模拟中, 深化了对于小流域地表状况的描述, 弥补了传统上的侵蚀产沙经验关系式的不足; 实现了侵蚀产沙模型与 GIS 的深层次耦合, 为模型利用外部数据提供了可能; 可更好地模拟出上坡水沙对于流域产沙的影响以及模拟坡面水沙在小流域的空间运动、被阻拦的过程, 使不同培植农林复合经营的侵蚀控制效果分析得以实现; 同时以小流域地块为侵蚀产沙基本单元进行研究, 符合小流域土地利用状况, 同时避免了在引入 GIS 进行模拟研究时, 采用栅格划分方法对小流域自然地貌单元的破坏以及栅格法计算时所产生了累计偏差。

4 小流域地块间侵蚀产沙关系的模拟

本研究建立的小流域侵蚀产沙模型以地块作为计算的基本单元, 着重考虑了水沙在地块间的输移过程, 模型可分为无上坡来水地块的侵蚀产沙关系式和有上坡来水地块的侵蚀产沙关系式; 并通过对次降雨侵蚀产沙的计算, 完成对全年侵蚀产沙的模拟。

4.1 无上坡来水地块的侵蚀产沙关系式

利用张家口郭家梁试验场 1992 年以来坡度小区、坡长小区天然降雨的侵蚀观测资料, 建立了最大 30 mm 雨强 (I_{30}/mm)、坡长 (L/m)、坡度 (S , 以正切

表示) 与为次降雨侵蚀模数 ($M_i/t \cdot \text{km}^{-2}$), 为次降雨径流量 ($H_i/\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$) 的侵蚀产沙关系式; 并进行植被覆盖、农业管理措施以及前期影响雨量的修正; 从而得到全流域无上坡来水地块的侵蚀产沙计算关系式。

$$M_1 = 0.1025 P^{0.254} I^{300.899} L^{0.6825} S^{0.64} \eta \Gamma Q \quad (n=38, r=0.812^{**})$$

$$H_1 = 0.5854 P^{0.276} I^{300.976} L^{0.741} S^{0.695} \eta \Gamma Q \quad (n=38, r=0.680^{**})$$

式中: η ——植被覆盖修正系数; Γ ——农业管理措施修正系数, 如梯田耕作、等高耕作、应用植物篱-农作系统等的地块侵蚀量与无覆盖坡耕地的比例; Q ——前期降雨量影响修正系数。

由于青边口河小流域的分水岭边界以下分布着一定面积的基岩裸露区, 位处小流域高程分带的最上部。由于基岩区和土壤覆盖坡面的巨大差异, 基岩区土壤侵蚀量很小, 但径流量很大。在计算中只考虑基岩区的产流以及产流对于下坡的影响, 由于基岩区在大雨强降雨时很少渗透, 计算时径流系数可取 1。

4.2 有上坡来水地块侵蚀产沙关系式

对于上坡来水来沙的影响, 主要根据郭家梁试验场的坡长小区及坡度小区资料进行建模。在每次降雨中, 坡长小区(坡度一致)侵蚀量、径流量(均换算成每 km^2 的侵蚀模数和径流量)都有差异; 以 10 m 小区的侵蚀量减去 5 m 小区的侵蚀量可以得出 5~10 m 处的侵蚀量, 以 15 m 小区的侵蚀量减去 10 m 小区的侵蚀量可以得出 10~15 m 处的侵蚀量, 同样可以得出 15~20 m、20~25 m、25~40 m 处的侵蚀量、径流量等。由各坡段的侵蚀量、径流量(可视为本坡侵蚀量、径流量)和综合了上一坡段的侵蚀量、径流量(可视为坡长为前一级的小区侵蚀量、径流量)影响的侵蚀量、径流量(即小区侵蚀量、径流量)资料可以建立存在上坡来水来沙影响的地块实际侵蚀模型。

$$M_3 = 0.3244 M_{i-1}^{0.3411} M_i^{0.6466} \quad (n=48, r=0.9039^{**})$$

$$H_3 = H_{i-1}^{0.041} H_i \quad (n=48, r=0.8336^{**})$$

式中: H_{i-1} ——上坡来水; M_{i-1} ——上坡来沙; H_i ——本坡段地块径流量; M_i ——本坡段地块产沙; H_3 ——小区径流量; M_3 ——小区产沙量。

依据流域坡面水流流路, 可以至上而下计算出流域内每一个地块的实际产流和产沙量。

4.3 植被覆盖因子的确定

对任何有植被覆盖的地类, 植被覆盖度随季节

变化, 因此计算次降雨侵蚀量的 V 值并不固定。植被覆盖度的季节变化与植被类型有关。在青边口河小流域, 植被覆盖类型主要有灌木林、经济林(以果园为主)、天然草地、粮食作物。

参考与冀西北研究区相近的毗邻地区的研究和当地水土保持部门提供的资料, 确定草地的 V 值:

(1) 草地的 V 值:

当覆盖度 5% 时, $V = 1$;

当覆盖度(式中 c) > 5%; $V = 0.929e^{-0.04035(c-5)}$
($n = 8, r = -0.879^{**}$)

(2) 林地和灌木林地的 V 值有^[4]:

$V = 1$

$V = e^{-0.00085(c-5)^{1.5}}$ 当覆盖度 5%

当覆盖度(式中 c) > 5% ($n = 9, r = -0.965^{**}$)

(3) 不同农作物的季节性 V 值。不同农作物在各个生长期的覆盖度差异很大, 由于当地侵蚀性降雨主要发生在 4~10 月, 根据青边口河小流域主要农作物发育期、生长期、成熟期、留茬期覆盖度变化的一般情况(平均覆盖度), 根据张家口水土保持试验站提供的资料, 确定了当地 6 种主要农作物 4~10 月(中甸)的季节性覆盖度修正系数(即 V 值)(表 1):

表 1 青边口河小流域主要农作物 V 值的季节性修正系数

月份	小麦	马铃薯	黍子	玉米	向日葵	大豆
4 月	0.90	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00
5 月	0.75	0.90	1.00	0.85	0.95	1.00
6 月	0.50	0.70	0.95	0.50	0.85	0.90
7 月	0.30	0.50	0.70	0.50	0.70	0.70
8 月	1.00	0.30	0.45	0.30	0.40	0.20
9 月	1.00	0.25	0.15	0.25	0.35	0.10
10 月	1.00	1.00	0.95	0.55	1.00	1.00

4.4 前期影响雨量修正系数

根据蔡强国采用从前期雨量推算土壤前期含水量的方法^[5]以及王治华确定的前期降雨量的修正系数^[6], 利用降雨前 9 天的降雨量, 确定前期影响雨量的修正系数 P 值:

$$P = \begin{cases} 2.29 & (\text{前期多雨量, 降雨量} > 10 \text{ mm}) \\ 0.22 & (\text{前期久无雨}) \\ 1.0 & (\text{前期降雨量 } 0 \sim 10 \text{ mm}) \end{cases}$$

5 植物篱的控制效益分析

植物篱-农作系统的侵蚀控制特点不同与梯田, 根据郭家梁试验场的二年生植物篱小区天然降雨侵蚀观测表明, 当坡面次降雨侵蚀量较大时, 侵蚀量越大, 植物篱-农作系统的侵蚀量与对照坡耕地的比例越小, 植物篱控制侵蚀的效果越好。从对植物篱带间坡形变化的分析认为, 带间坡面次降雨侵蚀

量较大时, 定植不久的植物篱带基部易于堆淤形成篱前淤积带; 若带间距较短, 侵蚀控制在细沟侵蚀发生之前, 侵蚀量越大, 篱前淤积带堆淤越宽, 且在植物篱茎近地基部易于相连, 对坡上来沙来水的阻滞效果越好。由 1997~1998 年实验区对二年生紫穗槐植物篱(带间距 10 m)小区和对照坡耕地的天然降雨实验观测资料可以建立如下关系:

$$M_s = 0.5261e^{-0.0001Q_s} \quad (n = 13, r = 0.7921^{**})$$

$$M_R = e^{-2 \times 10^{-5} Q_R} \quad (n = 13, r = 0.8101^{**})$$

以上两式中: M_s ——植物篱-农作系统侵蚀量与对照坡耕地之比; M_R ——植物篱-农作系统径流量与对照坡耕地之比; Q_s ——对照坡耕地侵蚀量; Q_R ——对照坡耕地径流量。

6 结果及讨论

6.1 不同地类的侵蚀产沙模拟

本研究利用已建立的小流域侵蚀产沙模型, 对 1995~1999 年土地利用现状条件下的侵蚀产沙过程进行计算, 结果表明(表 2)坡耕地、荒坡地、天然草地是流域侵蚀产沙的最主要来源, 也是需要重点治理的地区。

表 2 青边口河小流域不同地类 1995~1999 年年均侵蚀模数表

土地利用类型	坡耕地	荒坡地	天然草地	梯田	经济林	灌木林
1995~1999 年年均侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	6544.3	5347.9	4393.2	222.6	1698.2	1499.6

6.2 植物篱-农作系统减沙减流效益模拟分析

本研究模拟了陡坡耕地、荒坡地、低覆盖度的天然草地等侵蚀强烈的地段布置为植物篱-农作系统, 植物篱品种为一年生紫穗槐, 带间距为 10 m, 总配置面积 571.7 hm^2 , 占流域总面积的 18.2%, 进行植物篱-农作复合经营系统进行侵蚀产沙及养分流失的模拟研究, 根据前文建立的小流域侵蚀产沙模型及植物篱控制效益模型, 侵蚀控制模型, 计算在这些地块配置植物篱后的地块侵蚀量、径流量以及改变了上坡来水来沙后其下地块的侵蚀产流, 以 1995~1999 年的青边口河小流域为例, 据此对布设植物篱后的侵蚀产沙效果进行模拟测算。

计算的结果表明(表 3): 在侵蚀严重的坡耕地、荒坡地、天然草地配置等高物篱-农作复合经营系统后, 仅配置面积占流域总面积 18.2% 的二年生紫穗槐植物篱即能减少流域侵蚀模数 42.9%~50.2%; 该系统对径流的控制效果稍逊, 在 8.1%~46.2% 之间。侵蚀控制效果年际差异不大, 而径流控

制效果差异较大。1995~ 1999年的侵蚀产沙分析

表 3 1995- 1999 年青边口河小流域植物篱- 农作系统减沙减流模拟分析

年份	1995	1996	1997	1998	1999
年降雨量/mm	514.9	361.1	293.0	418.4	226.3
现有条件下径流量/mm	86.6	75.8	110.1	147.6	76.8
植物篱- 农作系统下的径流量/mm	79.5	60.5	59.13	102.4	50.3
减流效率/%	8.1	20.2	46.2	30.6	34.4
现有侵蚀模数/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	1124.2	1255.6	2608.6	3387.5	1705.1
植物篱- 农作系统下侵蚀模数/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	655.1	716.7	1298.4	1857.5	890.9
减沙效率/%	45.7	42.9	50.2	45.1	47.8

表明, 植物篱 5 年平均减流效益在 27.9%, 5 年平均减流效益在 46.3%, 这表明植物篱的减流与减沙效果都很好, 由于以上计算仅考虑配置二年生的植物篱的静态方案, 而将植物篱的生长考虑其中, 植物篱

的减沙效益会更好。由于在坡面配置植物篱- 农作复合经营系统, 不仅能较好地控制坡面侵蚀产沙, 更为重要的是能控制坡面泥沙下沟, 从而减少水沙作用对下坡的影响, 从而减少全流域的侵蚀产沙。

6.3 植物篱- 农作系统养分流失的模拟分析

对郭家梁试验场 1997~ 1999 年坡度及坡长小区的观测分析表明: 天然降雨时连续坡面处于下坡的径流养分含量接近于空白雨水; 通过对小区坡面养分损失组成分析结果也表明, 植物篱小区坡面养分损失以侵蚀泥沙携带的养分损失为主; 通过对植物篱小区 1999 年次降雨条件雨前表土和侵蚀泥沙养分的分析, 得到了该区域侵蚀泥沙养分的富集度: 有机质为 1.75, 有效氮为 3.02, 有效磷为 1.99, 有效钾为 1.06。因此根据小流域 1995~ 1999 年侵蚀计算结果以及侵蚀泥沙的平均养分富集度来模拟计算全流域年养分流失状况(表 4)。

表 4 1995~ 1999 年青边口河小流域植物篱- 农作系统养分流失模拟分析

	现状条件下养分流失					植物篱- 农作系统条件下养分流失模拟				
	1995	1996	1997	1998	1999	1995	1996	1997	1998	1999
有机质	36.39	40.64	82.87	109.55	55.05	27.13	29.83	54.68	78.06	37.88
有效氮	0.11	0.12	0.26	0.34	0.17	0.08	0.09	0.16	0.22	0.11
有效磷	0.0041	0.0046	0.0095	0.012	0.0063	0.0031	0.0034	0.0062	0.0088	0.0043
有效钾	0.21	0.24	0.50	0.65	0.33	0.15	0.16	0.29	0.41	0.20

根据张家口水保试验站的调查, 在冀西北研究区旱地的中等年平均施肥水平为总氮 150 kg/hm²、总磷 240 kg/hm²、总钾 30 kg/hm² 左右。由 5 年中侵蚀较严重的 1998 年计算值和青边口河小流域内所有农耕地计算, 以有效养分形式坡面损失的氮占农耕地施用氮肥的 5.7%, 磷占 0.1%, 钾占 14.1%。虽然绝对比例不大, 但考虑到每年施用肥料的相当大部分难以转化为易被植物吸收利用的有效形态, 氮和钾的坡面流失仍是不应忽视的。有机质的损失远大于氮、磷、钾, 以小流域内表层 20 cm (坡面径流和表土的作用深度很少超过 20 cm) 的土壤容量(以

平均容重 1.3 t/m³ 计) 换算, 一年内坡面有机质的损失(1998 年) 相当于使表土有机质含量下降 0.42 g/kg。当地近年有机肥施用逐年减少, 严重的坡地侵蚀对土壤肥力的保持是很不利的。对于植物篱- 农作在小流域侵蚀减沙中的作用, 尤其植物篱的侵蚀控制模型与植物篱类型、带间距、生长年限的相互关系; 另外, 上坡来水来沙对下坡侵蚀的影响是相当复杂的过程, 植物篱如何改变地表微地形以及水沙运移路线而改变上坡水沙对于全流域侵蚀产沙的影响, 还有许多有待研究的问题。

参考文献:

- [1] 李文华, 赖世登. 中国农林复合经营[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 1~ 20
- [2] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108~ 117.
- [3] 阎国年, 钱亚东, 陈钟明. 黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(2), 131~ 137.
- [4] 江忠善, 王志强, 刘志等. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 1(2), 1~ 9.
- [5] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京, 科学出版社, 1998, 30~ 199.
- [6] 王治华, 黄联捷. 降雨与产沙——黄土高原产沙模型研究之一[A]. 见: 孙亚梅, 何建邦, 彭望录等主编. 黄土高原重点产沙区信息系统研究(续集)[M]. 北京: 测绘出版社, 1993 116~ 125.