

黄土高原典型流域次降雨径流侵蚀产沙规律研究

侯建才^{1,2}, 李占斌^{2,3}, 崔灵周⁴, 王 民²

(1 河南省水利厅, 河南 郑州 450003; 2 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3 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 7121004; 4 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325027)

【摘 要】 【目的】研究黄土高原地区小流域次降雨径流侵蚀产沙规律, 建立适宜于该地区的侵蚀产沙预报模型。【方法】根据岔巴沟流域 32 年实测的水沙资料, 采用径流侵蚀功率、地貌分形信息维数的计算模型及多元非线性回归方法, 分析了黄土高原地区岔巴沟流域的次降雨径流侵蚀产沙规律。【结果】岔巴沟流域次降雨侵蚀产沙模数 M_s 与径流侵蚀功率 E 、地貌形态分形信息维数 D_i 有很好的相关性, 模型具有较高的精度和一定的适用性。【结论】基于流域径流侵蚀功率与地貌形态分形信息维数的岔巴沟流域次降雨侵蚀产沙预报模型, 能够近似反映不同尺度流域次降雨径流侵蚀产沙特性及水沙传递的关系, 为建立具有广泛适用性和较高预报精度的黄土高原流域次降雨径流侵蚀产沙预报模型提供了理论依据。

【关键词】 黄土高原; 次降雨径流侵蚀; 径流侵蚀功率; 分形信息维数

【中图分类号】 S157.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)02-0210-05

Research on runoff erosion and sediment yield laws of typical watershed under single rainfall on Loess Plateau

HOU Jian-cai^{1,2}, LI Zhan-bin^{2,3}, CUI Ling-zhou⁴, WANG Min²

(1 Water Conservancy Bureau of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450003, China; 2 College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an, Shaanxi University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4 College of Life and Environment Sciences, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325027, China)

Abstract: 【Objective】 To study the laws of soil erosion and sediment yield under single rainfall runoff in small watershed on Loess Plateau, the soil erosion and sediment yield prediction model adapted to this region was established. 【Method】 Adopted runoff erosion power model and topographical fractal information dimension model on basis of observed data of runoff and sediment in Chabagou watershed for 32 years, the sediment yield laws under single rainfall runoff was analyzed through applying multielement nonlinear regression method. 【Result】 The result showed that there was close relation between sediment yield modulus M_s and runoff erosion power E , topographical fractal information dimension D_i , the model had good precision and definite applicability. 【Conclusion】 Based on runoff erosion power, geomorphological features and topographical fractal information dimension, the forecast model for runoff erosion in Chabagou watershed under single rainfall can roughly reflect the characteristics and its relationship with water and sediment power. This research will provide theoretical basis to establish watershed runoff erosion and sediment yield predictive model which had comprehensive applicability and preferable prediction precision on Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; runoff erosion under single rainfall; runoff erosion power; topographical

* [收稿日期] 2007-02-24

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40301026); 中国博士后科学基金项目(200333518)

[作者简介] 侯建才(1974—), 男, 河南新安人, 工程师, 博士, 主要从事水资源和水土保持研究。E-mail: houjiancai2000@126.com

fractal information dimension

黄土高原地区是世界上土壤侵蚀最严重的区域之一,剧烈的水土流失不仅给该地区生态环境、社会带来了极大危害,直接制约了当地经济的可持续发展及和谐社会的建设,而且也给黄河中下游人民群众的生命财产安全带来极大的隐患。黄土高原地区流域降雨侵蚀产沙模型研究,尤其是流域次降雨侵蚀产沙模型的研究,对该地区进行水土流失监测和预报、指导水土保持措施合理配置、优化水土资源高效利用均具有重要意义。多年来,国内外学者对此进行了大量研究,建立了一系列模型^[1-13]。一般采用径流总量(或径流深)和洪峰流量的组合因子计算流域的产沙量^[1-2,11-12],但不同尺度流域参数变异很大。针对流域地貌形态对流域侵蚀产沙的影响,不同研究者选取的因子也不尽相同^[3,6,10,12],但主要有流域面积、流域沟壑密度、主沟比降、流域平均坡度、流域植被度和地面物质的抗蚀性等,但这些地貌单因子模型难以实现以小流域为单元的地貌形态综合定量表征。

分形理论可以描述流域复杂地貌的非线性特征,为地貌形态定量描述与模拟、地貌发育过程等的非线性研究开辟新的思路^[14-18]。为此,本试验以黄土高原典型流域为研究对象,深入研究径流深、洪峰流量与输沙模数的关系,采用径流侵蚀功率的计算模型,结合流域宏观地貌形态特征分形维数算法,建立了基于径流侵蚀功率和地貌形态分形信息维数的小流域次降雨径流侵蚀产沙模型,以期为该地区流域次降雨径流侵蚀产沙规律的研究提供理论依据。

1 研究区概况

岔巴沟流域位于东经 109°47′、北纬 37°31′,自然地理区划属于黄河丘陵沟壑区第一副区,是无定河支流大理河的一条支沟,全流域被大小沟道割切成支离破碎、沟壑纵横的典型黄土地貌景观。岔巴沟流域面积 205 km²,曹坪站以上集水面积 18 km²,沟道长 24.1 km。岔巴沟流域属于干燥少雨的大陆性气候,年平均气温为 8℃,多年平均降水量约为 450 mm,其中降雨量的年内分配极不均匀,70%集中于 7~8 月,且多为降雨强度较大而历时短暂的暴雨;径流的年内分配也极不均匀,62%集中于 7~9 月。该流域内降雨强度极大,土质疏松,地形破碎,植被较差,坡度很陡,土壤侵蚀极其严重,多年平均侵蚀模数高达 15 780 t/km²。输沙量在年内分配更

不均匀,7~9 月的输沙量占流域年总输沙量的比例达 90%以上。岔巴沟流域土壤侵蚀主要有片蚀、沟蚀、崩塌、滑坡和潜蚀等类型。该流域治理工作始于 1959 年,治理措施以治沟为主;从 1983 年开始,该流域综合治理力度加大;到 1990 年,治理面积达到流域面积的 28%。

2 研究方法

2.1 流域次降雨径流侵蚀功率的计算模型

2.1.1 径流深、洪峰流量和输沙模数的关系 对岔巴沟流域内不同面积小流域次降雨实测径流深、洪峰流量与输沙模数的关系进行分析,结果表明,流域次降雨径流深、洪峰流量模数与输沙模数之间均具有良好的幂函数关系,均可用下式表示:

$$M_s = ax^b. \quad (1)$$

式中: M_s 为输沙模数, x 为径流深或洪峰流量模数, a 、 b 为参数。

2.1.2 径流侵蚀功率的模型 在借鉴国内外已有研究成果的基础上,将流域次降雨径流过程的径流总量特征—径流深和径流强度特征—洪峰流量结合起来考虑,采用径流侵蚀功率 $E = Q_m H$ 的模型^[19],其中 Q_m 为流域次降雨洪峰流量模数 ($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$); H 为流域次降雨径流深 (mm)。指标 E 综合表征了在流域次暴雨侵蚀产沙过程中径流侵蚀和径流输沙的效率,不仅具有明确的物理内涵,而且实现了对流域降雨径流过程的全面准确描述,真实地反映了不同流域下垫面状况(植被、治理状况等)对降雨径流过程的综合响应。

2.2 流域地貌形态分形信息维数的计算模型与方法

2.2.1 计算模型 流域地貌形态分形信息维数的计算模型,是在应用较为广泛且简单易算的分形信息维数测定方法——盒子覆盖法及流域地貌形态表达方式为等高线的基础上提出来的,通过利用不同尺度大小的盒子覆盖流域地形图,并统计各非空盒子中等高线的复杂程度和疏密状况,以此来计算流域地貌形态分形信息维数。流域地貌形态分形信息维数的计算模型为:

$$D_i = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg \sum_{m=1}^N (1/m) P(m, r)}{\lg r}. \quad (2)$$

式中: D_i 为流域地貌形态特征的分形信息维数; r 为盒子的尺度; N 为给定尺度大小盒子中最大可能包

含的非零分形集元素(等高线)数; m 为非零分形集元素(等高线)数; $P(m,r)$ 为盒子尺度为 r 时,有 m 个非零分形集元素(等高线)盒子出现的概率。

2.2.2 计算方法 流域地貌形态分形信息维数计算的数据源是地形图,通过对流域地形图的数字化,为利用分形分析软件计算公式(2)中的相关参数提供基本输入数据。利用分形分析软件,输入流域地形图数字化得到的等高线栅格影像数据文件,给定盒子规格尺度,即可进行流域地貌形态分形信息维数计算模型所涉及的给定尺度(r)非空盒子总数 $N(r)$ 、各非空盒子中包含的非零分形集元素(等高线)数 m 、各非空盒子中最大可能包含的非零分形集元素(等高线)数 N 、通过 m 个非零分形集元素(等高线)盒子数 $Nm(r)$ 、通过 m 个非零分形集元素(等高线)盒子出现的概率 $P(m,r)$ 等相关参数的计算。

根据分形信息维数的定义和上文所计算出的流域地貌形态分形信息维数相关参数,以 $\lg \sum_{m=1}^N (1/m) \times$

$P(m,r)$ 为横坐标,以 $\lg r$ 为纵坐标,将各种尺度规格盒子的计算结果点绘在双对数坐标系统中,利用最小二乘法可拟合出一条直线,即:

$$\lg \sum_{m=1}^N (1/m) P(m,r) = K - D \lg r.$$

(3)

式中: K 为拟合直线的截距, D 为拟合直线的斜率。
最后根据所拟合的直线确定出无标度区(即所拟合直线相关程度最高的尺度范围),在无标度区范围内所拟合直线的斜率 D ,即为流域地貌形态分形信息维数 D_i 。

3 结果与分析

3.1 流域径流侵蚀功率与输沙模数回归模型的分析
利用岔巴沟 6 个流域的水沙资料对径流侵蚀功率和输沙模数的关系进行研究,分别用线性和非线性回归方法进行了径流侵蚀功率 E 与输沙模数 M_s 的回归模型分析,结果见表 1。

表 1 岔巴沟流域及其 6 个支流流域径流侵蚀功率与输沙模数的回归模型

Table 1 Regressions models of sediment yield modulus with runoff erosion power in Chabagou Watershed and its five branch catchments

流域名称 Watershed name	流域面积/km ² Watershed area	线性回归模型 Linear regression model		非线性回归方程 Non-linear regression model	
		表达式 Equation	相关系数 Related index	表达式 Equation	相关系数 Related index
岔巴沟 Chabagou	187	$M_s = 91.90E^{0.530}$	0.916	$M_s = 141.78E^{0.469}$	0.950
杜家沟岔 Dujiagoucha	96	$M_s = 143.82E^{0.499}$	0.916	$M_s = 185.84E^{0.460}$	0.967
三川口 Sanchuankou	21	$M_s = 124.16E^{0.602}$	0.943	$M_s = 214.58E^{0.500}$	0.945
驼耳巷 Tuo'erxiang	5.74	$M_s = 180.38E^{0.619}$	0.925	$M_s = 277.77E^{0.524}$	0.996
黑矾沟 Heifangou	0.133	$M_s = 1430.21E^{0.685}$	0.920	$M_s = 1262.82E^{0.524}$	0.983
水旺沟 Shuiwanggou	0.107	$M_s = 1075.72E^{0.707}$	0.945	$M_s = 1842.23E^{0.471}$	0.980

表 1 表明,两种分析方法均说明径流侵蚀功率与输沙模数之间有很好的幂函数关系,其中非线性回归模型更好地反映了二者的关系。

3.2 流域地貌形态分形信息维数的计算结果

以岔巴沟流域 1:10 000 的 17 幅地形图为基

本数据源,利用上文所提出的流域地貌形态分形信息维数计算模型和方法,得到了岔巴沟流域及其流域内杜家沟岔、西庄、三川口、驼耳巷、蛇家沟、黑矾沟、水旺沟 7 条支流流域的地貌形态分形信息维数,结果见表 2。

表 2 岔巴沟及其 7 条支流流域地貌形态分形信息维数的计算结果

Table 2 Caculating values of topography fractal information dimension of Chabagou watershed and its seven branch catchments

流域名称 Watershed name	流域面积/km ² Watershed area	地貌形态分形信息维数 Topography fractal information dimension	相关系数 Related index
岔巴沟 Chabagou	187	0.996 5	0.994 6
杜家沟岔 Dujiagoucha	96	0.966 1	0.998 3
西庄 Xizhuang	49	0.941 9	0.998 1
三川口 Sanchuankou	21	0.893 5	0.997 5
驼耳巷 Tuo'erxiang	5.74	0.830 8	0.998 4
蛇家沟 Shejiagou	4.72	0.814 0	0.997 9
黑矾沟 Heifangou	0.133	0.636 8	0.997 9
水旺沟 Shuiwanggou	0.107	0.582 1	0.992 0

3.3 流域次降雨侵蚀产沙模型的建立与验证

3.3.1 径流侵蚀功率与输沙模数的分析 在全面

分析岔巴沟流域 32 年(1959~1990 年)径流泥沙观测资料和流域地貌形态分形特征研究的基础上,选

择该流域及其支沟杜家沟岔、三川口、驼耳巷、黑矾沟、水旺沟小流域的地貌形态分形信息维数 D_i 和 162 场侵蚀性降雨水沙特性,利用多元非线性回归统计法建立了岔巴沟流域基于径流侵蚀功率、地貌形态分形信息维数的侵蚀产沙预报模型(表 3)。

表 3 岔巴沟流域径流侵蚀功率及地貌形态分形信息维数与输沙模数的回归模型

Table 2 Regression of sediment yield modulus with runoff erosion power and topographical fractal information dimension

回归方程 Regression equation	复相关系数 Multi-related index	样本数 Swatch number	回归检验 Regression test
$M_s=75\,982.64E^{0.5016}\times 0.001428D_i$	0.988 4	162	4 835.826 **

注: ** 表示 F 检验值 $>F(0.01)(1,161)$ 。
Note: ** Denoting F -test value $>F(0.01)(1,161)$.

从表 3 可以看出,岔巴沟流域次降雨侵蚀输沙模数 M_s 与径流侵蚀功率 E 、地貌形态分形信息维数 D_i 有很好的相关性,多元回归的复相关系数 r 高达 0.988 4, F 回归检验在 0.01 水平上达极显著水平。
3.3.2 模型验证 为进一步检验本研究所建立的岔巴沟流域侵蚀输沙模数与径流侵蚀功率、地貌形态分形信息维数关系模型,预报次降雨侵蚀产沙模数的准确性,采用该流域的西庄(流域面积 49 km²)和蛇家沟(流域面积 4.72 km²)2 个支流 57 次侵蚀性降雨的实际观测值与模型计算值进行对比,其相关系数 $r=0.977\,6$, 校验 $F=1\,246.561$, 相关系数达极显著水平。表明本研究所建立的模型具有较高的精度和可靠性。

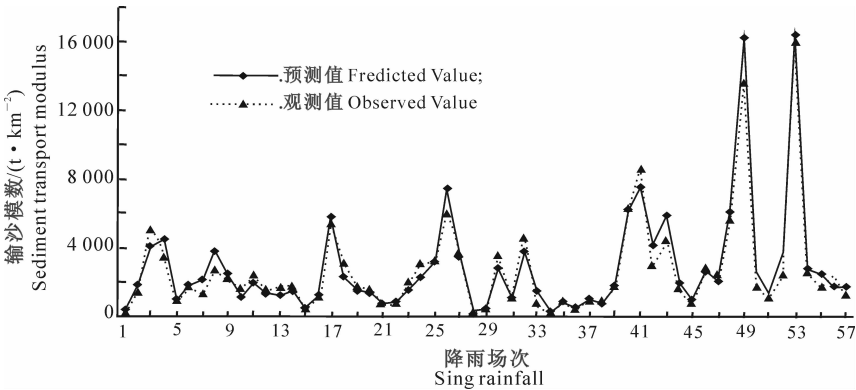


图 1 岔巴沟流域西庄、蛇家沟流域 57 次侵蚀性降雨输沙模数观测值与预测值的比较
Fig. 1 Contrast between observed values with calculated values of sediment yield modulus under 57 single erodible rainfall in Xizhuang and Shejiagou catchments in Chabagou watershed

为了进一步验证模型的适用性,利用该模型对流域面积 41.5 km²、非治理的裴家崙沟流域(治理程度低,尚属非治理沟)1959~1976 的 70 次侵蚀性降雨的输沙模数进行了预测,结果见图 2。

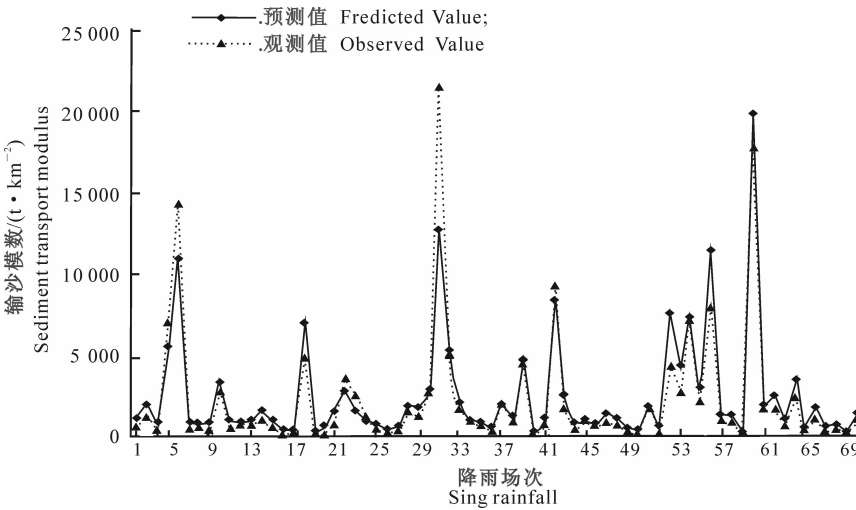


图 2 裴家崙沟流域 70 次侵蚀性降雨输沙模数观测值与预测值的比较
Fig. 2 Contrast between observed values with calculated values of sediment yield modulus under 70 single erodible rainfall in Peijiamao watershed

由图 2 可知,该模型预测结果较好,裴家崾沟流域 70 次侵蚀性降雨输沙模数观测值与预测值的相关系数 $r=0.936\ 2$,校验 $F=480.37$,相关关系达极显著水平。表明本研究所建立的模型具有较高精度、可靠性和一定的适用性。从图 1、图 2 对比来看,该模型对裴家崾沟流域的预测精度低于岔巴沟流域的西庄和蛇家沟 2 个支流,这可能是由于该模型是在岔巴沟流域建立的,而裴家崾沟流域的下垫面和岔巴沟流域有差异所致。

综上所述,该模型对黄土高原丘陵沟壑区治理流域和非治理流域均适用。这说明对于复杂的流域次降雨侵蚀产沙系统,利用该模型能近似刻画流域次降雨侵蚀产沙的非线性特性,为流域次降雨侵蚀产沙规律的研究提供了依据。

4 结论与讨论

流域降雨产流产沙是一个极其复杂的动力过程,本研究在分析研究流域次降雨径流侵蚀功率、地貌形态分形信息维数基础上,利用多元非线性回归统计法建立了岔巴沟次降雨流域侵蚀产沙预报模型,即:

$$M_s = 75\ 982.64E^{0.501\ 6}0.001\ 428D_i。$$

通过岔巴沟流域西庄、蛇家沟两个支流 57 场及裴家崾沟流域 70 场侵蚀性降雨输沙模数观测值和模型预测值的对比分析,验证了预报模型的精度、可靠性和适用性。因此,基于流域径流侵蚀功率与地貌形态分形信息维数的岔巴沟流域次降雨侵蚀产沙预报模型,能够近似反映不同尺度流域次降雨径流侵蚀产沙特性及水沙传递的关系,提高了用单一水沙关系预报次降雨输沙模数的精度和可靠性,且具有计算简便易用、物理概念清楚等优点,为建立具有广泛适用性和较高预报精度的黄土高原小流域侵蚀产沙预报模型提供了科学理论依据。

径流侵蚀功率、地貌形态分形信息维数只是影响流域次降雨侵蚀产沙的主要因素,今后应对流域次降雨侵蚀产沙的各种影响因素进行综合分析并引入到所建立的水沙响应关系中,以提高预报精度;本研究所建模型对“小水大沙”和“大水小沙”等特殊类型洪水的流域次降雨产沙计算相对误差尚较大,还有待于进一步完善;今后应利用更多不同尺度流域的次降雨水沙、地貌形态资料对本研究所建立的流域次降雨水沙响应关系进行验证,在验证模型合理性的同时,寻找模型参数的区域分布规律,为模型在无长系列资料流域的应用奠定基础。

[参考文献]

- [1] Dragoun F J. Rainfall energy as related to sediment yield [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(4): 1495-1506.
- [2] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology [J]. Transaction of the ASAE, 1977, 20(6): 1100-1104.
- [3] 尹国康, 陈钦宏. 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式 [J]. 地理学报, 1989, 44(1): 32-44.
Yin G K, Chen Q L. Characteristic index and statistical model of sediment yield in small drainage basins of Loess Plateau in China [J]. Journal of Geographical Science, 1989, 44(1): 32-44. (in Chinese)
- [4] 王孟楼, 张仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究 [J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 11-18.
Wang M L, Zhang R. Study on the storm-sediment yield model of the Chaba gully basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(1): 11-18. (in Chinese)
- [5] 王治华, 黄联捷. 降雨与流域产沙——黄土高原产沙模型研究之一 [J]. 中国科学: B 辑, 1992(9): 1987-1993.
Wang Z H, Huang L J. Rainfall and sediment yield of watershed——Model study of basin soil loss in the Loess Plateau of China I [J]. Science in China: Ser B, 1992(9): 1987-1993. (in Chinese)
- [6] 曹文洪, 张启舜, 姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究 [J]. 泥沙研究, 1993(1): 1-13.
Cao W H, Zhang Q S, Jiang N S. The study on mathematical model for sediment yields caused by one storm in Loess Zone [J]. Journal of Sediment Research, 1993(1): 1-13. (in Chinese)
- [7] 王治华, 杜明亮, 姚宁, 等. 下垫面与侵蚀强度及其产沙量——黄土高原产沙模型研究之二 [J]. 中国科学: B 辑, 1992(10): 1094-1100.
Wang Z H, Du M L, Yao N, et al. Underlying surface, erosion intensity and sediment yield——Model study of basin soil loss in the Loess Plateau of China II [J]. Science in China: Ser. B, 1992(10): 1094-1100. (in Chinese)
- [8] 李占斌, 靳顶, 符素华. 窟野河暴雨洪水泥沙特性 [J]. 西安理工大学学报, 1997, 13(1): 12-18.
Li Z B, Jin D, Fu S H. The characteristics of runoff and sediment in Kuye River Watershed [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1997, 13(1): 12-18. (in Chinese)
- [9] 李怀恩, 沈冰, 樊尔兰. 黑河流域水沙模型及其应用 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 62-65.
Li H E, Shen B, Fan E L. Relationship between sediment and runoff in Heihe Basin and its application [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(4): 62-65. (in Chinese)
- [10] 蔡强国, 刘纪根, 刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型 [J]. 地理研究, 2004, 23(4): 434-439.
Cai Q G, Liu J G, Liu Q J. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 23(4): 434-439. (in Chinese)