

# 岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型

周玲微<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>1,2\*</sup>, 武阳<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

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, 杨凌 712100)

**摘要:** 为了建立小流域次暴雨产流预报模型, 在岔巴沟流域选取大小不同的 4 个小流域 10 a 水文资料, 分析降雨、地貌等因素对流域产流的影响, 选取主要因素最大 30 min 雨量、最大 30 min 雨强、流域沟道比降、流域面积和流域狭长度。用无量纲参数和逐步回归分析的方法估计模型参数, 得到了岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型, 用模型预报结果与实测结果对比, 模型预报精度为 70%。结果表明, 所建立的模型具有参数少、结构简单、量纲和谐、物理意义明确的特点, 可为流域产流模型进一步研究提供参考。

**关键词:** 流域, 产流, 模型, 无量纲

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.054

中图分类号: S271

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0054-07

周玲微, 雷廷武, 武阳. 岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 54—60.

Zhou Lingwei, Lei Tingwu, Wu Yang. Event-based dimensionless models for runoff of Chabagou watersheds[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 54—60. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

黄土高原丘陵沟壑区降雨主要集中在汛期, 多为高强度暴雨, 水力侵蚀产沙剧烈, 水土流失严重, 生态与环境问题突出<sup>[1]</sup>。建立黄土区小流域次暴雨产流预报模型是水文学的基本问题<sup>[2]</sup>, 为洪水预报和水资源开发利用提供决策依据, 对水土流失的防治具有重要意义<sup>[3-7]</sup>。

前人对次暴雨模型做过很多研究, 主要有物理模型<sup>[8-10]</sup>、概念性模型<sup>[11]</sup>和经验模型<sup>[12]</sup>。虽然物理模型的参数具有明确的物理意义, 但必须经过原理和理论的推导, 用严格的数学物理方程表达各子过程, 参数不易率定, 应用比较复杂。概念模型表达的流域水文过程, 具有一定的物理基础和经验性, 模型结构简单, 适用性较强。经验模型是在一定条件下, 以观测数据为基础, 利用统计方法所获得的经验关系式, 模型预报结果与相似条件下的实际观测值较吻合。产流经验模型多是分析产流与其影响因子的关系。王孟楼等<sup>[13]</sup>研究了岔巴沟流域次暴雨有效雨量、有效雨强与产流的关系, 有效雨量和雨强按临界值划定。曹洪文等<sup>[14]</sup>分析了次暴雨径流深与降雨量、降雨强度、前期影响雨量的关系。毕华兴等<sup>[15]</sup>研究了晋西黄土区小流域次暴雨径流深与前期影响雨量、次暴雨降雨量、平均雨强、森林覆盖率的关系。张晓明等<sup>[16]</sup>研究了黄土丘陵沟壑区次降雨量、最大 30 min

雨强与洪水径流量相关, 但采用的是多年平均数据。上述研究均没有考虑地形地貌影响因子, 且水文因子选取不一。有人考虑了前期影响雨量<sup>[14-15]</sup>, 也有人认为黄土丘陵沟壑区暴雨及产流的特性使得强烈蒸散发对次暴雨产流的影响相对较小<sup>[16]</sup>, 不予考虑。赵文武等<sup>[17]</sup>分析得到陕北丘陵沟壑区地形因子中的集水面积、坡降影响产流, 而沟壑密度为非主要影响因子。金雁海等<sup>[18]</sup>认为次降雨径流深与坡度有关, 与最大 10 min 雨强成正比, 而与次降雨量相关性不强。郭清雅<sup>[19]</sup>研究了无量纲产汇流法, 即将降雨径流曲线变换成无量纲单位线, 无量纲方法并不合理。以上研究的产流参数多为径流深, 需加强以洪峰流量为产流参数的模型研究; 影响因子考虑不全面, 可综合考虑流域面积、流域形状、流域沟道比降等地形地貌因子<sup>[12]</sup>对产流的影响; 模型参数无量纲化工作不足。总之, 需要加强研究以获得次暴雨尺度下量纲和谐的产流模型。

本文根据黄土区典型代表的岔巴沟流域的产流特点和机理, 从降雨和地貌中获取产流影响因子, 将这些因子组合成无量纲变量, 进而建立岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型, 并用记录数据检验模型。

## 1 无量纲简介

物理方程的各项改写为无量纲的项后不会改变物理过程。无量纲的处理, 使理论运算简单, 数值计算方便, 便于将物理过程表达为特定的数学模型<sup>[20]</sup>。一个物理过程, 包含  $n$  个物理量, 物理量的量纲可表示

$$\ln[x_i] = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中,  $a$  为物理量的量纲指数;  $m$  为基本量纲个数,  $m < n$ 。

从  $n$  个物理量中, 选择  $m$  个相互独立的基本量, 设为  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , 剩余物理量可用基本量表示

收稿日期: 2009-06-16 修订日期: 2010-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40635027)

作者简介: 周玲微 (1985—), 女, 浙江舟山人, 研究方向: 水土资源与环境。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: zlw0520@163.com

\*通信作者: 雷廷武 (1958—), 湖北洪湖人, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会高级会员, 主要研究方向: 从事农业水土工程研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院 151 信箱, 100083。

Email: ddragon@public3.bta.net.cn

$$\ln[x_{m+j}]=b_{1j}\ln[x_1]+b_{2j}\ln[x_2]+\cdots+b_{mj}\ln[x_m] \quad (j=1, 2, \cdots, n-m) \quad (2)$$

写成分量行式为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{1j} \\ b_{2j} \\ \cdots \\ b_{mj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1,m+j} \\ b_{2,m+j} \\ \cdots \\ b_{m,m+j} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $b$  为幂指数。  
则用基本量表示可得无量纲量

$$x_{m+j} = \pi_{m+j} x_1^{b_{1j}} x_2^{b_{2j}} \cdots x_m^{b_{mj}} \quad (4)$$

即

$$\pi_{m+j} = x_1^{-b_{1j}} x_2^{-b_{2j}} \cdots x_m^{-b_{mj}} x_{m+j} \quad (5)$$

原物理问题可以表示为函数关系

$$f(1,1,\cdots 1,\pi_{m+1},\pi_{m+2},\cdots \pi_n)=0 \quad (6)$$

这些无量纲数由  $\pi$  来表示，故称为  $\pi$  定理<sup>[21]</sup>。应用前，应根据研究的物理过程，确定主要影响因素。

2 研究区概况

岔巴沟位于东经 109°47′，北纬 37°31′。属于黄土丘陵沟壑区第一副区，在无定河流域的西南部和无定河的支流大理河相汇，流域面积 205 km<sup>2</sup>，沟道长 26.5 km，流域形状基本对称。该流域属于半湿润大陆性气候，多年平均降水量 500 mm 左右，降雨年际、年内分配极不均匀。降雨主要集中在汛期（6—9 月），多年平均汛期雨量占年雨量的 81%，降雨多为暴雨，全年降水量主要集中于几场暴雨，每逢暴雨干支流均会出现较大的洪水和高含沙水流。产流方式为超渗产流。

本研究从岔巴沟流域选取主沟岔巴沟和刘家沟、驼耳巷沟、蛇家沟 3 条支沟，每条支沟上选取 1 个测站、主沟选取 3 个测站，即 4 个小流域上 6 个测站（表 1），以黄河水利委员会黄河流域子洲径流实验站水文实验资料（1959—1969 年）为基础，在历年水文资料中得到洪水统计特征值，包括每次洪水发生的时间、洪峰流量、降雨量过程。

表 1 岔巴沟流域特征信息  
Table 1 Basic information of Chabagou watersheds

站 名	面积/km <sup>2</sup>	平均沟道长度/km	平均沟道宽度/km	沟壑密度/(km·km <sup>-2</sup> )	主沟比降/‰	流域狭长度 $R_e$	$1/R_e^2$
主沟岔巴沟	曹坪	187.00	24.10	7.22	1.05	7.57	2.60
	杜家沟岔	96.1	14.30	6.73	1.06	8.36	1.69
	西庄	49.00	8.54	5.73	1.01	15.00	1.18
支沟	刘家沟	21.00	6.54	3.22	0.79	2.23	1.60
	驼耳巷沟	5.74	3.63	1.58	0.63	2.70	1.83
	蛇家沟	4.26	4.50	1.05	0.78	11.5	3.43

注： $R_e = 2\sqrt{A}/(\sqrt{\pi} \cdot L)$ 。式中  $A$  为流域面积，km<sup>2</sup>； $L$  为流域长度，m。

3 主要因子对流域产流的影响

岔巴沟流域次暴雨产流洪峰高，历时短，采用洪峰流量  $Q_w$  表征次暴雨的峰值流量。考虑到以往研究<sup>[12-18]</sup>，本文从降雨<sup>[13-16]</sup>和地形地貌<sup>[12,17-18]</sup>两方面分析提取产流影响因子<sup>[4]</sup>。

3.1 降雨对产流的影响

据黄河流域子洲径流实验站水文实验资料显示，流域洪峰皆产生于强度大的降雨时段，洪峰流量与降雨量、平均雨强的相关性极差。洪峰流量与最大 30 min 雨强  $I_{30}$ 、最大 30 min 雨量  $P_{30}$  的相关关系最好，见表 2。

表 2 岔巴沟流域洪峰流量和降雨参数相关关系矩阵  
Table 2 Correlation coefficient matrix of rainfall indexes and the peak runoff of Chabagou watersheds

	最大 10min 雨强 $I_{10}$	最大 10min 雨量 $P_{10}$	最大 20min 雨强 $I_{20}$	最大 20min 雨量 $P_{20}$	最大 30min 雨强 $I_{30}$	最大 20min 雨量 $P_{30}$
刘家沟洪峰流量	0.725	0.725	0.740	0.740	0.830	0.830
蛇家沟洪峰流量	0.512	0.479	0.460	0.460	0.461	0.483
曹坪洪峰流量	0.722	0.728	0.731	0.766	0.765	0.771
驼耳巷洪峰流量	0.547	0.547	0.558	0.558	0.570	0.570
西庄洪峰流量	0.734	0.696	0.832	0.832	0.783	0.838
杜家沟岔洪峰流量	0.547	0.547	0.558	0.558	0.694	0.782

举实际降雨过程分析，驼耳巷沟 1963 年 8 月 26 日次暴雨如图 1 所示。

洪峰流量值为 239 m<sup>3</sup>/s，出现在 19:45， $P_{30}$  发生在 19:20—19:50，表现在累计降雨量过程线为 30 min 时段内斜率最大的那部分。18:05 降雨开始至 19:20 时段内降雨量为 3.87 mm，19:20 时的径流量为 2 m<sup>3</sup>/s，远小于洪

峰流量值，因此产生这部分径流的降雨量可不计在内，即降雨初期产流对洪峰流量影响不大。 $P_{30}$  相当于剔除了降雨初期和后期对洪峰流量贡献不大的雨量，为有效产流降雨量<sup>[22]</sup>。

各小流域测站  $P_{30}$  与  $Q_w$  相关关系均较好，如图 2 所示。

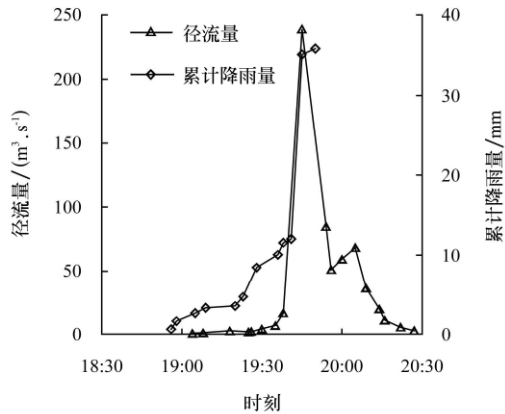


图1 驼耳巷 1963 年 8 月 26 日次暴雨径流量和累计降雨量过程图

Fig.1 Event-based cumulative rainfall and runoff processes for Tuorxiang watershed on August 26th, 1963

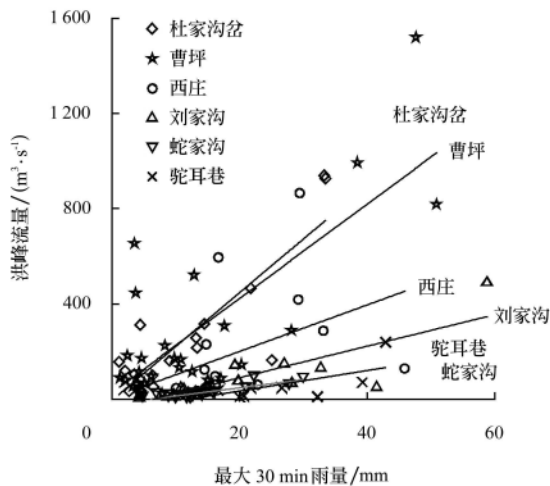


图2 岔巴沟流域洪峰流量与最大 30 min 雨量的关系图

Fig.2 Peak flow and the maximum rainfalls in 30 minutes of Chabagou watersheds

图 2 中直线斜率的变化趋势为：主沟测站（杜家沟岔、曹坪、西庄）大于支沟测站（刘家沟、驼耳巷、蛇家沟）；随流域面积的增大而增大。直线斜率  $K$  表示洪峰流量随降雨量的变化率。 $K$  越大，表示随着降雨量增大，次暴雨洪峰流量增加越快。这表明，主沟、支沟的产流响应不同，主沟产流快于支沟产流；不同空间尺度流域对降雨的产流响应也不同，流域面积越大，响应越快。分析原因，主沟不仅有主沟坡地的径流而且汇集支沟流入主沟的径流；而流域面积大，相同雨强下，流域出口汇集沿途产生的径流越多，洪峰流量也越大。

图 2 中 6 条直线反映的流域面积对  $Q_w$  与  $P_{30}$  回归系数的影响趋势如下

$$y = 1.69A^{0.48}, R^2 = 0.906 \quad (7)$$

式中， $y$  为洪峰流量与最大 30 min 雨量的回归系数； $A$  为流域面积， $\text{km}^2$ 。

超渗产流取决于降雨强度<sup>[22]</sup>。 $I_{30}$  与  $Q_w$  正相关关系较好，如图 3 所示。

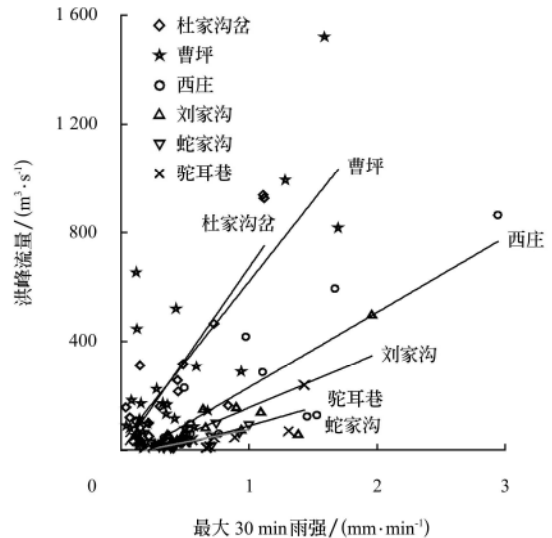


图3 岔巴沟流域洪峰流量与最大 30 min 雨强的相关关系图

Fig.3 Peak flow and the maximum intensities in 30 minutes of Chabagou watersheds

图 3 中直线斜率的变化趋势与图 2 相似。 $Q_w$  与  $I_{30}$  回归系数与流域面积的关系如下

$$y = 48.6A^{0.5}, R^2 = 0.924 \quad (8)$$

公式 (7) 和公式 (8) 比较，幂指数相近，前式的系数是后式的 1/28，可见不同空间尺度下，次暴雨洪峰流量随  $I_{30}$  的变化程度更明显，即最大 30 min 雨强对洪峰流量的影响更剧烈。

### 3.2 流域地形地貌对产流影响

由上节分析，洪峰流量受流域尺度影响，洪峰流量随流域面积呈递增趋势。流域形状影响径流，引入流域狭长度  $R_e$ <sup>[23]</sup> 作为流域形状指标， $R_e$  大时流域呈圆形或卵形，径流路径短，向流域出口集中过程较短。 $R_e$  小时流域呈狭长形，洪水宣泄比较缓慢均匀。

$$R_e = 2\sqrt{A}/(\sqrt{\pi} \cdot L) \quad (9)$$

式中  $L$  为流域长度，km。

图 4 和 5 均反映了流域  $R_e$  值大，次暴雨洪峰流量增加，洪峰提前。驼耳巷沟和蛇家沟的流域面积几乎相近，驼耳巷沟的  $R_e$  值大于蛇家沟。1967 年 7 月 17 日次暴雨情况下，两个测站的径流量过程线形状和洪峰出现时间不同，如图 4 所示，驼耳巷沟径流量过程线呈瘦高型，蛇家沟流量过程线呈扁平型；驼耳巷沟的洪峰超前于蛇家沟。图 5 反映，1966 年 8 月 15 日次暴雨情况下，西庄和杜家沟岔的径流量过程线形状相似，且杜家沟岔的洪峰滞后。分析原因，虽然西庄的面积是杜家沟岔的 1/2，单因子影响下，西庄的洪峰流量应小于杜家沟岔。但是西庄的  $R_e$  值大，径流路径短，容易向流域出口集中，洪峰超前且洪峰流量增大。

流域沟道比降综合反映流域的地貌特征<sup>[24]</sup>，沟道比降越陡，水流的动能越大<sup>[25]</sup>，洪峰流量越大。流域面积也是常用的产流影响因子<sup>[12,17]</sup>。综上，选用流域狭长度、流域沟道比降、流域面积为地形地貌定量指标。

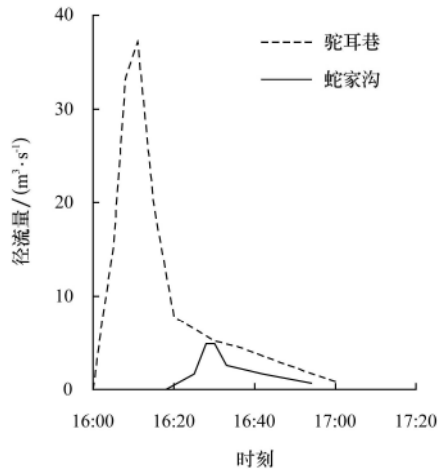


图 4 1967 年 7 月 17 日次暴雨驼耳巷沟和蛇家沟径流量过程线  
Fig.4 Event-based runoff processes for Tuoerxianggou and Shejiagou watersheds on July 17th, 1967

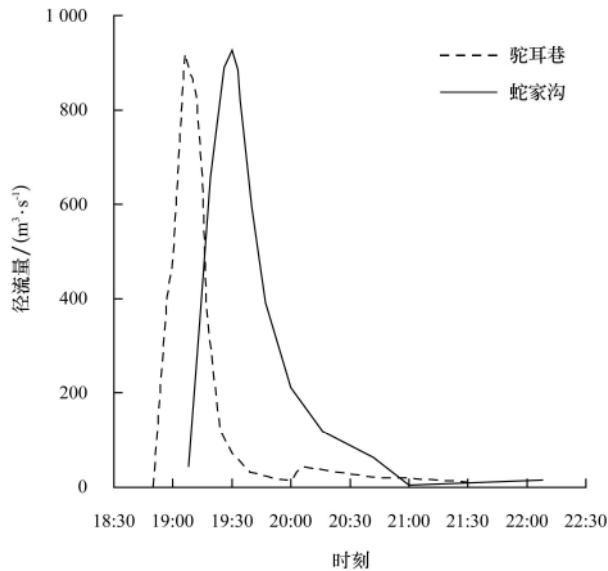


图 5 1966 年 8 月 15 日次暴雨杜家沟岔和西庄径流量过程线  
Fig.5 Event-based runoff processes for Dujiagoucha and Xizhuang watersheds on August 15th, 1966

通过 3.1 小节与 3.2 小节分析, 本研究选取影响岔巴沟流域次暴雨产流的主要单因子: 最大 30 min 雨强<sup>[26]</sup>、最大 30 min 雨量、流域狭长度<sup>[23]</sup>、流域面积、流域沟道比降<sup>[25]</sup>, 综合反映了降雨和地形地貌因子<sup>[27]</sup>对产流的影响。

## 4 产流无量纲模型

### 4.1 无量纲组合变量

洪峰流量与最大 30 min 雨量、最大 30 min 雨强、流域沟道比降、流域面积、流域狭长度等因素的关系为

$$Q_w = f(P_{30}, I_{30}, J_0, R_e, A) \quad (10)$$

式中  $J_0$  为流域沟道比降。

上式共有物理量个数  $n=6$ , 物理量的基本量纲由长度  $L$  和时间  $T$  来表示, 即  $m=2$ , 选择  $P_{30}$  和  $I_{30}$  为基本物

理量。

$$\begin{pmatrix} P_{30} & I_{30} & Q_w & J_0 & R_e & A \\ L & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ T & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{pmatrix}$$

量纲代入得

$$\begin{pmatrix} P_{30} & I_{30} & Q_w & J_0 & R_e & A \\ L & 1 & 1 & 3 & 0 & 0 & 2 \\ T & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由基本物理量组成的无量纲均等于 1, 即

$$\pi_1 = \pi_2 = 1$$

另外 4 个无量纲变量由

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{vmatrix}$$

解得

$$\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

根据式 (5) 得到以下无量纲变量

$$\pi_3 = \frac{Q_w}{P_{30}^2 \cdot I_{30}}, \quad \pi_4 = J_0, \quad \pi_5 = R_e, \quad \pi_6 = \frac{A}{P_{30}^2}$$

根据  $\pi$  定理得无量纲产流模型

$$\frac{Q_w}{P_{30}^2 \cdot I_{30}} = f\left(1, 1, J_0, R_e, \frac{A}{P_{30}^2}\right) \quad (11)$$

### 4.2 产流无量纲模型建立

将多元非线性回归化为多元线性回归<sup>[28]</sup>, 对上述 4 个无量纲变量进行多元线性回归分析。对曹坪 26 组、杜家沟岔 18 组、西庄 19 组、刘家沟 21 组、驼耳巷沟 11 组、蛇家沟 16 组实测数据运用 SPSS 统计分析软件的逐步回归功能 (stepwise), 估计模型参数。SPSS 自动对无量纲变量边进行显著性检验边入选或剔除, 最后获得只含有重要变量  $Q_w / (P_{30}^2 \cdot I_{30})$ ,  $J_0$ ,  $R_e$ ,  $A / P_{30}^2$  的最优回归方程。即岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型

$$\frac{Q_w'}{P_{30}^2 \cdot I_{30}} = \left(\frac{A}{P_{30}^2}\right)^{0.90} \cdot J_0^{0.38}, \quad R^2 = 0.865 \quad (12)$$

$$\left(Q_w' = \frac{Q_w}{R_e^{2.09}}\right)$$

式中  $Q_w'$  为消除流域形状对洪峰流量作用后的洪峰流量,  $m^3/s$ 。

因变量表示单位集中降雨综合指标下的洪峰流量值。 $Q_w'$  表示径流集中程度,  $P_{30}^2 \cdot I_{30}$  表示短历时降雨的集中程度, 鉴于径流系数定义的方式, 因变量可定义为径流集中系数。

模型第一个自变量和因变量中,  $P_{30}$  的幂指数近似, 作消去公约数处理, 可见产流的主要降雨影响因素是雨强, 即雨强对洪峰流量的影响掩盖了雨量的影响。 $Q_w' / I_{30}$  在该产流模型中也可定义为径流集中系数, 径流集中系数与流域面积呈正相关关系。即形状相似的流域、相同

降雨情况下,面积越大,径流量越大,洪峰流量越大。流域面积从“数量”的角度影响产流。

流域沟道比降  $J_0$  反映流域地貌特征<sup>[29]</sup>,与径流集中系数呈正相关关系。等面积形状相似的流域,流域沟道比降越大,水流的动能越大,径流速度越快,洪峰流量越大。流域沟道比降从“能量”的角度影响产流。

模型反映出流域面积、流域沟道比降分别从“数量”、“能量”角度影响流域径流集中系数。

#### 4.3 模型合理性分析

相同降雨情况下,主沟小流域产流大于支沟小流域。为检验岔巴沟流域产流无量纲模型式(12)的合理性,建立主沟小流域次暴雨产流无量纲模型式(13)和支沟小流域次暴雨产流无量纲模型式(14),如下

$$\frac{Q_w}{P_{30}^2 \cdot I_{30}} = \left( \frac{A}{P_{30}^2} \right)^{1.20} \cdot J_0^{0.60}, R^2 = 0.92 \quad (13)$$

$$\frac{Q_w}{P_{30}^2 \cdot I_{30}} = \left( \frac{A}{P_{30}^2} \right)^{0.66} \cdot J_0^{0.55}, R^2 = 0.87 \quad (14)$$

式(13)、(14)反映流域沟道比降对主、支沟小流域产流影响相近;流域面积对主沟小流域产流的影响程度大于支沟小流域,其指数比近2:1。

式(12)岔巴沟流域次暴雨产流模型除包含主、支沟产流模型已有无量纲参数外,含有流域狭长度

$$R_e^{2.09} \approx R_e^2 = \frac{4B}{\pi L} \approx 1.27 \frac{B}{L}$$

式中  $B$  为流域宽度, km。

和以往研究所用的流域形状系数  $B/L$  类似。表1反映,  $1/R_e^2$  扩大主、支沟的预报产流值,且支沟扩大倍数比主沟大,消除了主、支沟对产流响应的差异。式(12)(岔巴沟流域产流模型)中  $J_0$  的幂指数为0.38,较式(13)、式(14)中的幂指数小,即能回调扩大的产流值,因此岔巴沟流域产流模型兼顾了主沟与支沟小流域的产流特点,模型符合该地区的产流规律。

#### 4.4 模型精度检验

为了检验模型预报精度,用模型预报结果与实测结果对比,从岔巴沟流域历年资料中选取20组建模以外的次暴雨数据点代入产流模型,式(12)整理得

$$Q_w = P_{30}^{0.20} \cdot I_{30} \cdot A^{0.9} \cdot J_0^{0.38} \cdot R_e^{-2.09} \quad (15)$$

并计算预报洪峰流量相比较于实测洪峰流量的平均相对误差。

预报洪峰流量精度如图6所示,平均相对误差计算结果为30%,预报精度达70%。模型预报洪峰流量比实测值大,尤其是曹坪站特大洪水预报值比实测值普遍偏大,其中偏大30%的就占了总场次的25%。理论上,曹坪站位于整个流域的下游,本身流域上有产流,且汇集上游、中游和下游小流域的径流。但岔巴沟总长26.5 km,流域出口处的洪峰流量可能受径流沿程水头损失<sup>[30]</sup>能量衰退<sup>[31]</sup>的影响,因此实测洪峰流量比理论的预报值小,反映出该产流模型对于流域出口处的监测预报偏大偏安全的特点。

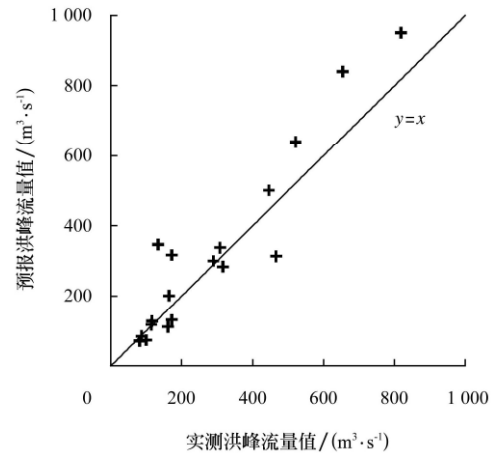


图6 标准线下岔巴沟流域产流模型预报精度  
Fig.6 Prediction precision of runoff models for Chabagou watersheds

## 5 结论

本文选取岔巴沟4个小流域上6个测站的10 a观测数据建模,分析得到影响流域产流的主要因素为30 min最大雨量和雨强、流域沟道比降、流域面积、流域狭长度。将以上因素进行无量纲组合,用SPSS软件逐步回归分析,得到了岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型,用模型预报结果与实测结果对比,所构建的模型预报精度达70%。

模型结构简单、物理意义明确、量纲和谐,为今后流域产流统计模型的建立提供新的建模思路和方法。

#### [参 考 文 献]

- [1] 宋献方,刘鑫,夏军,等.基于氢氧同位素的岔巴沟流域地表水—地下水转化关系研究[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(1):8—13.  
Song Xiafang, Liu Xin, Xia Jun, et al. Interactions between surface water and groundwater in Chabagou catchment using hydrogen and oxygen isotopes[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [2] Rosso R. An Introduction to Spatially Distributed Modeling of Basin Response[M]. Bergamo: Water Resources Publication, 1992: 3—30.
- [3] 屈丽琴,雷廷武,赵军,等.室内小流域降雨产流过程试验[J].农业工程学报,2008,24(12):25—30.  
Qu Liqin, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 25—30. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王小平,牛四平.晋西王家沟小流域产流产沙分析[J].中国水土保持,2000,(9):12—14.  
Wang Xiaoping, Niu Siping. Analysis of runoff and sediment yield from Wangjiagou watershed in western Shanxi[J]. Soil and Water Conservation in China, 2000, (9): 12—14. (in Chinese with English abstract)

- [5] 王兴奎, 徐世涛, 李丹勋, 等. 黄土丘陵沟壑区降雨产流产沙特性及治理模式[J]. 清华大学学报, 2001, 41(8): 108—109.  
Wang Xingkui, Xu Shitao, Li Danxun, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in gullied-hilly loess areas and soil conservation measures[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(8): 108—109. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 1—5.  
Zhou Peihua, Wang Zhanli. A study on rainstorm causing soil erosion in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李占斌, 符素华, 鲁克新. 秃尾河流域暴雨洪水产沙特性的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 88—91.  
Li Zhanbin, Fu Suhua, Ke Luxin. Characteristic of rainstorm, flood and sediment yield in Tuwei river watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(2): 88—91. (in Chinese with English abstract)
- [8] 解河南, 郝振纯, 杨红卫, 等. 岔巴沟流域分布式产流产沙的计算机模型[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3393—3396.  
Xie Hehai, Hao Zhenchun, Yang Hongwei, et al. Computer simulation of distributed runoff yield and sediment yield in Chabagou catchment[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3393—3396. (in Chinese with English abstract)
- [9] 肖琳, 张国庆, 张成才. 干旱半干旱地区产流模型的研究及应用[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(2): 114—148.  
Xiao Lin, Zhang Guoqing, Zhang Chengcai. Development and application on the catchment runoff yield model in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Wuhan University of Hydrology and Electricity, 1995, 28(2): 114—148. (in Chinese with English abstract)
- [10] Aizen V, Aizen E, Glazirin H A, et al. Simulation of daily runoff in central Asian alpine watersheds[J]. Journal of hydrology, 2000, 238(1/2): 15—34.
- [11] 留兆存, 金生, 韩丽华. 国内流域产汇流模型与应用分析[J]. 地球信息科学, 2007, 9(3): 97—103.  
Liu Zhaocun, Jin Sheng, Han Lihua. A review of the research and application of domestic watershed runoff yield and runoff models[J]. Geo-information Science, 2007, 9(3): 97—103. (in Chinese with English abstract)
- [12] 任树梅, 朱仲元. 工程水文学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 146—173.
- [13] 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(2): 11—18.  
Wang Meng, Zhang Ren. Study on the storm-sediment yield model of the Chaba gully basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(2): 11—18. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曹文洪, 张启舜, 姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙模型的研究[J]. 泥沙学报, 1993, (1): 1—13.  
Cao Wenhong, Zhang Qishun, Jiang Naisen. 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 with English abstract)
- [15] 毕华兴, 朱金兆, 张学培. 晋西黄土区小流域场暴雨径流泥沙模型研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 67—69.  
Bi Huaxing, Zhu Jinzhao, Zhang Xuepei. Small watershed runoff and sediment model in the western Shanxi province in Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(6): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张晓明, 余新晓, 武思宏. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用-土地覆盖变化水文动态响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 414—422.  
Zhang Xiaoming, Yu Xinxiao, Wu Sihong, et al. Response of land use/ land cover change to hydrological dynamics in typical watershed in loess gullied- hilly region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 414—422. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 陕北黄土丘陵沟壑区地形因子与水土流失的相关性分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 67—69.  
Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Liding. Correlations between topographical factors and soil and water loess in hilly and gully area of Loess Plateau in northern Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [18] 金雁海, 柴建华, 朱智红, 等. 内蒙古黄土丘陵区径流及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 292—295.  
Jin Yanhai, Chai Jianhua, Zhu Zhihong, et al. Researches of the effects of influence factors on surface flow in hilly and gully region of the loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5): 292—295. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郭清雅. 无量纲产汇流法在洪水预报中的应用[J]. 水文, 1996, (5): 27—29.
- [20] 刘峰, 贾多杰, 李晓礼, 等. 无量纲化的方法[J]. 安顺学院学报, 2008, 10(3): 78—79.  
Liu Feng, Jia Duoje, Li Xiaoli, et al. Method of normalization[J]. Journal of Anshun University, 2008, 10(3): 78—79. (in Chinese with English abstract)
- [21] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 102—105.
- [22] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 21—28.  
Wang Wanzhong, Jiao Juying. Statistic analysis on variation of rainfall and runoff-sediment yield process on slope surface in Loess Plateau region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(5): 21—28. (in Chinese with English abstract)
- [23] 尹国康, 陈钦畹. 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): 33—43.  
Yin Guokang, Chen Qinluan. Characteristic index and statistical model of sediment yield in small drainage basins of Loess Plateau in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(1): 33—43. (in Chinese with English abstract)
- [24] 汪丽娜, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土丘陵区产流输沙量对地

- 貌因子的响应[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 956—959.
- Wang Lina, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Response of runoff and sediment yield to geomorphologic factors in loess hilly area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 956—959. (in Chinese with English abstract)
- [25] 景可, 陈永宗, 李凤新, 等. 黄河泥沙与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 152—160.
- [26] 高军侠, 党宏斌, 刘作新, 等. 黄土高原南部裸露耕地产流产沙试验研究[J]. 生态学报, 2004, 23(3): 138—140.
- Gao Junxia, Dang Hongbin, Liu Zuoxin, et al. Research of soil and water loss law in uncovers sloping field of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(3): 138—140. (in Chinese with English abstract)
- [27] 龚时旸. 黄河泥沙的来源和输移[M]. 北京: 光华出版社, 1980: 33—70.
- [28] 庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 198—202.
- [29] 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—438.
- Cai Qiangguo, Liu Jigen, Liu Qianjin. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin[J]. Geographical Research, 2004, 23(4): 434—438. (in Chinese with English abstract)
- [30] Gbiley J E, Kottwite E R, simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of American Society of Agriculture Engineers, 1990, 36(6): 1900—1906
- [31] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 335—362.
- Chen Hao. Relationship between erosion and sediment yield in drainage basins of loess gully-hilly areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 335—362. (in Chinese with English abstract)

## Event-based dimensionless models for runoff of Chabagou watersheds

Zhou Lingwei<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>1,2\*</sup>, Wu Yang<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, the Ministry of water resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to establish the prediction models of the event-based runoff in small watersheds, the observed event-based runoff data of 10 years from 4 Chabagou watersheds were used to analyze the effects of rainfalls and landforms on runoff. It was found that such factors as the maximum rainfalls and intensities in 30 minutes, the gradient of main channels, the areas of watershed, and the ratios of watershed lengths to widths were key factors which affect runoff. Dimensionless parameters and step-wise regression were used to quantify the parameters of the event-based runoff model. The established model used few parameters with simple structure. The featured with clearly defined physical meanings with 70% of prediction accuracy, which could supply a basis for further research of models for watershed runoff prediction.

**Key words:** watersheds, runoff, models, dimensionless