DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150043

黄土高原小流域出口断面水力几何模型

周淑梅[1] 雷廷武[2,3] 雷启祥[4] 张满良[4]

(1 河北科技大学经济管理学院河北省生态经济可持续发展研究中心 2 中国农业大学水利与土木工程学院
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 4 黄河水利委员会天水水土保持科学试验站)

摘要:流域出口断面水力几何关系能够为流域水文模型参数获取、洪水过程演变及灾害预警提供辅助工具。以黄土高原丘陵沟壑区桥子西沟和桥子东沟 2 水土流失对比流域为研究对象,首先采用幂函数、自然对数函数和二阶对数函数模型分别拟合桥子西沟流域 1987—2006 年出口断面水文观测数据,应用模型决定系数(R^2)和模拟残差平方和(RSS)评价 3 种模型拟合结果,优选平均流速-流量、水面宽-流量与平均水深-流量的水力几何模型。然后将桥子西沟流域观测数据随机分为 2 部分:1987—2002 年共 594 组数据用于率定优选模型,2003—2006 年共 362 组数据用于验证。采用均方根误差(RMSE)、模型效率系数(E)以及图形拟合等手段评价各优选模型的有效性。桥子西沟流域模型率定及验证结果表明:平均流速-流量和平均水深-流量关系适用于自然对数函数表达(RMSE 值为 19.89% 和 30.70%,E 值为 0.59 和 0.84),而水面宽-流量关系则适用于二阶对数函数表达(RMSE = 3.84%, E = 0.87)。进一步应用桥子东沟流域 1987—2006 年出口断面共 1 006 组观测数据验证各优选水力几何模型在相似流域的适用性,结果表明:平均水深-流量关系拟合效果优于桥子西沟流域,而平均流速-流量和水面宽-流量关系拟合优度稍逊于桥子西沟流域。该研究为黄土高原地区小流域洪水监测与预报提供基础。

关键词:水力几何; 黄土高原; 小流域; 模型

中图分类号:S715 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1522(2015)09-0045-08

ZHOU Shu-mei[1]; LEI Ting-wu[2,3]; LEI Qi-xiang[4]; ZHANG Man-liang[4]. **Hydraulic geometry model at small watershed outlets on the Loess Plateau of China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015) **37**(9) 45-52 [Ch,26 ref.]

1 Center for Ecological Economy and Sustainable Development of Hebei Province, School of Management and Economics, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei, 050018, P. R. China;

2 College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083, P. R. China;

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China;

4 Tianshui Soil and Water Conservation Station, Yellow River Conservation Commission, Tianshui, Gansu, 741000, P. R. China.

Hydraulic geometry at watershed outlets plays an important role in determining parameters for hydrologic models, flood process evolution and disaster warning. Taking Qiaozi-West and Qiaozi-East watersheds in the hilly and gully loess region as study areas, we first simulated observed hydraulic data from 1987 to 2006 at the Qiaozi-West Watershed outlet using the power function, natural logarithmic function and second logarithmic function models, and then evaluated the performance of the three models using the determination coefficient (R^2) and residual sum of squares (RSS), in order to determine the

收稿日期: 2015-02-06 **修回日期**: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401307)、河北科技大学博士科研启动基金项目(QD201416)。

第一作者: 周淑梅,博士。主要研究方向:流域水文和生态经济。Email:shumei1984@163.com 地址:050018 河北省石家庄市裕翔街 26 号河北科技大学经济管理学院。

责任作者: 雷廷武,教授,博士生导师。主要研究方向:土壤侵蚀和旱地农业。Email:leitingwu@cau.edu.cn 地址:100083 北京市清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

superior models for simulating hydraulic geometry relationships between discharge rate and mean flow velocity, flow width and mean flow depth. All the observed data from the Qiaozi-West Watershed were randomly separated into two groups, one group with 594 data pairs from 1987 to 2002 was used for model calibration, and the other group with 362 data pairs from 2003 to 2006 was used for model validation. The root mean square error (RMSE), model efficiency coefficient (E) and graph fitting were used to measure model validity. The model calibration and validation results indicated that the relationship between discharge rate and mean flow velocity and that between discharge rate and mean flow depth were best expressed by the natural logarithmic function model (RMSE values were 19.89% and 30.70% and E values were 0.59 and 0.84, respectively), while the discharge rate-flow width relationship was best simulated by the second order logarithmic function model (RMSE = 3.84%, and E = 0.87). Furthermore, observed data during year 1987-2006 with totally 1006 data pairs from the Qiaozi-East Watershed outlet were used to examine the universality of the determined hydraulic geometry models in similar watersheds. The results showed that the model of discharge rate-mean flow depth displayed a better performance compared with that in Qiaozi-West Watershed, while the other two models were less satisfactory. This study could provide a basic tool for flood monitoring and forecasting in small watersheds on the Loess Plateau.

Key words hydraulic geometry; the Loess Plateau; small watershed; model

流域出口断面水力几何关系直接影响流域洪水波形状[1]、泥沙运移能力[2],进一步影响与水沙系统密切相关的污染物质迁移转化过程[3]。Leopold等[4]于1953年正式提出水力几何理论,认为流量与平均流速、水面宽及平均水深3个水力变量存在幂函数关系,通过分析美国中部大平原和西南干旱区的20多条河流近70年的断面观测数据,确定平均流速、水面宽及平均水深3个幂函数指数均值分别为0.34、0.26、0.40。尽管幂函数模型被地貌学家、水文学家和生态学家广泛用于表达水力几何关系,然而诸研究表明,世界不同地区不同河道之间幂函数指数存在较大差异[3,5-6]。Merigliano[7]指出幂函数指数取值与研究沟道形态和沟道内冲淤过程、水流阻力、河岸阻力及抗蚀能力有关。Stewardson[3]认为水面宽及平均水深幂函数指数取值对野外测量方法及横截面所在位置具有较强的敏感性,特定区域可视为常数。Richards[8]研究发现河道糙率随流量的非线性变化导致水深及流速随流量也呈非线性变化,并提出二阶对数函数模型用于表达河道断面水力几何关系。Knighton[9]进一步对Richards提出的二阶对数函数模型进行了验证。

近年来,国内相关研究多是对幂函数模型的直接应用[10-13],对其区域适用性研究鲜见。马元旭等[14]通过分析毛乌素沙漠与黄土高原交界区的无定河及其支流水文测站数据发现,某些水文站点断面水力几何关系并不遵循幂函数关系。黄土高原地区土层深厚,地形支离破碎,地质气候条件极为特殊,水力几何关系的适宜表达式及参数取值尚不明确。基于此,Zhou等[15]将流域出口断面看作一种近似稳定的河道断面,应用水力几何幂函数和自然对数函数模型拟合黄土丘陵沟壑区4个小流域出口断面的平均流速-流量关系,结果发现幂函数模型的总体模拟效果优于对数函数模型,但个别研究流域幂函数模拟效果并不理想。此外,水面宽-流量和平均水深-流量关系应该采用何种函数关系表达尚不明确,有待进一步探讨。

本研究选取黄土高原丘陵沟壑区桥子西沟、东沟2流域为研究对象,通过分析研究流域1987—2006年期间数据系列相对完整的12年出口断面测站观测数据,优选水力几何关系适宜表达式,确定水力几何模型参数取值,以期为黄土高原小流域洪水预报提供基础。

1 研究区概况

桥子沟流域(105°42′ ~ 105°43′E、34°36′ ~ 34°37′N)系黄土丘陵沟壑区第三副区罗玉沟下游左侧斜坡发育起来的切沟型沟谷。该流域水土流失观测站是1956年根据前苏联专家扎斯拉夫斯基的意见,按照"相似流域、平行对比"的指导思想布设,分非治理(桥子西沟)与治理(桥子东沟)流域,进行对比观测(图1)。桥子西沟流域面积1.14 km^2,年均降水量522 mm,年均径流模数13 979 m^3/km^2,年均侵蚀模数4 761 t/km^2;桥子东沟流域面积1.36 km^2,年均降水量496 mm,年均径流模数6 220 m^3/km^2,年均侵蚀模数2 026 t/km^2(统计年份为1988—2000年)。桥子西沟、东沟2流域出口各设有一处径流

泥沙监测站。桥子西沟流域测站断面近似为梯形，而桥子东沟流域测站断面近似为三角形，2 测站均深约 2 m，上宽约 4.5 m。1987—2006 年研究期间 2 测站均有过修建，但沟道形状无大的改变，本研究认为研究期间流域测站断面稳定。测站流量通过测定水位和浮标法测速计算，具体公式参照文献[15]。桥子西沟流域与桥子东沟流域从地貌特征、土壤组成、面积、坡度上都极其相似，唯有流域土地利用存在较大差异（表 1）。

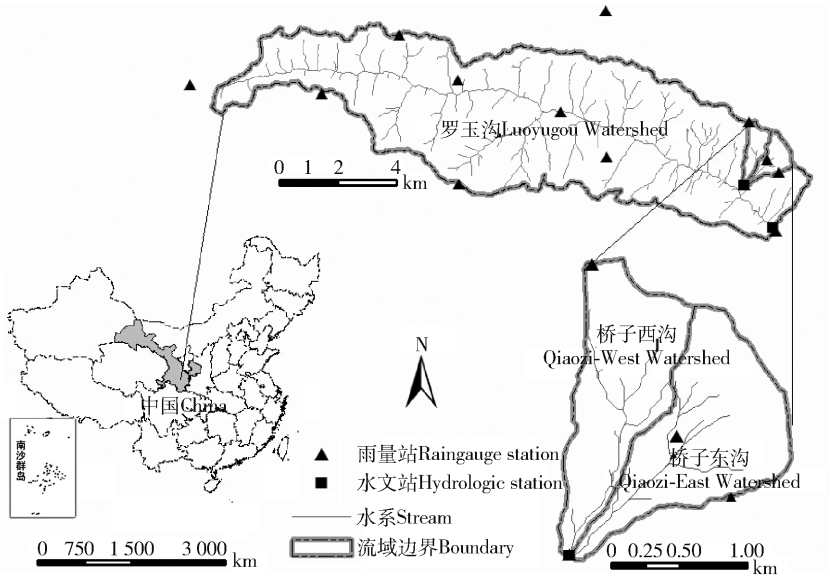


图 1　研究流域图

Fig. 1　Location of study watersheds

表 1　2004 年桥子西沟、桥子东沟流域土地利用情况

Tab. 1　Land use of Qiaozi-West and Qiaozi-East watersheds in 2004　　%

流域名称 Watershed name	农地 Farmland		林地 Forest land		草地 Grass land	居民地 Residential area	道路 Road	未利用土地 Unused land		合计 Total
	山坡地 Slope farmland	梯田 Terrace	经济林 Economic forest	人工林 Plantation				荒坡 Barren slope	难利用地 Unusable land	
桥子西沟 Qiaozi-West Watershed	36.42	0.69	38.26	11.01	0.00	2.39	1.56	3.49	6.19	100.00
桥子东沟 Qiaozi-East Watershed	4.45	1.06	28.93	58.82	2.91	0.29	1.84	1.70	0.00	100.00

注：表 1 数据来源于参考文献[16]。Note: Data in table 1 is cited from reference [16].

2　方　　法

2.1　幂函数模型

$$V = a_1 q^{a_2} \tag{1}$$

$$W = b_1 q^{b_2} \tag{2}$$

$$D = c_1 q^{c_2} \tag{3}$$

式中：q、V、W、D 分别为流量、平均流速、水面宽和平均水深；a_1、b_1、c_1 和 a_2、b_2、c_2 分别为模型系数及指数。

2.2　自然对数函数模型

Zhou 等[15]通过对黄土高原丘陵沟壑区不同尺度小流域出口断面的水文数据进行统计发现，流速与流量观测数据呈现良好的对数函数关系，因此构建自然对数函数模型：

$$V = d_1(\ln(q + d_2) - \ln d_2) \tag{4}$$

$$W = e_1(\ln(q + e_2) - \ln e_2) \tag{5}$$

$$D = f_1(\ln(q + f_2) - \ln f_2) \tag{6}$$

式中：d_1、d_2、e_1、e_2、f_1、f_2 均为模型参数。

2.3　二阶对数函数模型

Richards[8]建议采用更为灵活的数学表达方式修正 Leopold 和 Maddock 的简单幂函数模型，应用一组二阶对数函数关系表达水力几何关系，以 e 为底的二阶对数函数表达为：

$$\ln V = t_1(\ln q)^2 + t_2 \ln q + t_3 \tag{7}$$

$$\ln W = m_1(\ln q)^2 + m_2 \ln q + m_3 \tag{8}$$

$$\ln D = n_1(\ln q)^2 + n_2 \ln q + n_3 \tag{9}$$

式中：t_1、t_2、t_3、m_1、m_2、m_3、n_1、n_2、n_3均为模型参数。

2.4 模型评价

采用 Grapher 8.0 软件拟合桥子西沟流域出口断面水力几何观测数据，作散点图并添加幂函数、自然对数及二阶对数函数趋势线。根据不同函数拟合效果确定不同变量水力几何关系最优模型，并应用 SPSS 16.0 统计软件最终确定最优模型参数取值。

首先将观测值与模拟值作散点图直观分析模型拟合效果，然后采用均方根误差 RMSE（Root mean square error）[17] 和模型效率系数 E[18]（Nash and sutcliffe efficiency）2 种数学评价指标定量评价模型拟合效果。RMSE 描述模拟值与观测值的总体差异，用百分数表示。RMSE 值越小，模型模拟精度越高。模型效率系数 E 对比模型刻画观测数据效果与观测数据均值刻画观测数据效果，E 值越接近于 1，表明模拟效果越好。RMSE 和 E 的数学表达式分别为：

$$\mathrm{RMSE} = \frac{100}{\overline{O}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (O_i - S_i)^2 / n} \tag{10}$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \tag{11}$$

式中：O_i和 S_i分别为流域出口断面观测值和模拟值；n 为样本数；$\overline{O}$ 为观测值均值；i 变化在 1 ~ n 之间。

3 结果与分析

3.1 模型率定

首先应用幂函数模型、自然对数函数模型和二阶对数函数模型拟合桥子西沟流域 1987—2006 年出口断面各实测年份的流量、平均流速、水面宽和平均水深观测数据，并计算各模型各实测年份的决定系数（R^2）（表 2）及模拟残差平方和（RSS）（表 3）。

表 2 桥子西沟流域 3 种模型模拟平均流速（V）、水面宽（W）和水深（D）与流量（q）关系的 R^2 值

Tab. 2 R^2 values for the three function models to simulate relationships between mean flow velocity (V), flow width (W), mean flow depth (D) and discharge rate (q) in the Qiaozi-West Watershed

统计指标 Statistical indexes	$q-V$			$q-W$			$q-D$		
	Pow	Ln	Qua-ln	Pow	Ln	Qua-ln	Pow	Ln	Qua-ln
年度 Year	12	12	12	12	10	12	12	12	12
Max	0.88	0.93	0.94	0.89	0.85	0.99	0.98	0.99	0.98
Min	0.20	0.20	0.21	0.70	0.54	0.82	0.83	0.72	0.83
Med	0.72	0.72	0.74	0.81	0.75	0.94	0.94	0.91	0.95
Ave	0.60	0.65	0.64	0.80	0.73	0.93	0.92	0.91	0.93

注：Max、Min、Med、Ave 分别表示最大值、最小值、中值和算术平均值；Pow、Ln 和 Qua-ln 分别表示幂函数、自然对数函数和二阶对数函数模型。下同。Notes: Max, Min, Med and Ave indicate maximum, minimum, mean and arithmetic mean values; Pow, Ln and Qua-ln indicate the power function, natural logarithmic function and second logarithmic function models, respectively. The same below.

表 3 桥子西沟流域 3 种模型模拟平均流速（V）、水面宽（W）和水深（D）与流量（q）关系的 RSS 值

Tab. 3 RSS values for the three function models to simulate relationships between mean flow velocity (V), flow width (W), mean flow depth (D) and discharge rate (q) in Qiaozi-West Watershed

统计指标 Statistical indexes	$q-V$			$q-W$			$q-D$		
	Pow	Ln	Qua-ln	Pow	Ln	Qua-ln	Pow	Ln	Qua-ln
年度 Year	12	12	12	12	10	12	12	12	12
Max	98.64	42.38	90.57	7.45	19.92	0.46	14.45	0.13	14.35
Min	0.61	1.65	0.57	0.02	0.09	0.01	0.50	0.00	0.48
Med	2.45	3.73	1.65	0.19	0.64	0.03	2.66	0.02	2.43
Ave	17.60	11.76	13.72	0.94	3.15	0.13	3.80	0.04	3.64

表 2 显示，平均流速-流量关系自然对数函数模型和二阶对数函数模型对应 R^2 值近似，幂函数模型 R^2 值略低；水面宽与流量关系中，R^2 值从大到小依次为二阶对数函数模型、幂函数模型和自然对数函数模型；平均水深与流量关系中，幂函数和二阶对数函数模型 R^2 值近似，自然对数函数模型 R^2 值略低于其他 2 模型的 R^2 值。就整体模拟效果而言，平均水深-流量关系模拟效果最优，其次为水面宽-流量关系和平均流速-流量关系。

表 3 中，模拟平均流速-流量关系时，自然对数模型 RSS 值较其他 2 模型偏低。尽管其他 2 模型 RSS 偏低时，对数函数模型 RSS 值相对偏高，但对

整体拟合效果影响不大；水面宽-流量关系采用二阶对数函数模型模拟时 RSS 值最低，而自然对数函数模型拟合平均水深-流量关系效果最优。

为进一步分析 3 种模型的 R^2 值和 RSS 值是否存在统计上的显著差异，应用 SPSS 16.0 统计软件对 3 种模型的 R^2 和 RSS 值进行单一因素方差分析（One way ANOVA analysis），并采用 Befferoni（重复数不同）和 Turkey（重复数相同）方法进行多重比较，分析结果见表 4。

表 4　桥子西沟流域 3 种模型模拟结果 R^2 和 RSS 的单一因素方差分析结果

Tab. 4　Results of One-way ANOVA analysis for R^2 and RSS of simulations by the three function models at the Qiaozi-West Watershed

变量 Variables	模型 Models	R^2			RSS		
		Pow	Ln	Qua-ln	Pow	Ln	Qua-ln
$q-V$	Pow	×	×	×	×	×	×
	Ln	×	×	×	×	×	×
	Qua-ln	×	×	×	×	×	×
$q-W$	Pow	×	×	√	×	×	×
	Ln	×	×	√	×	×	×
	Qua-ln	√	√	×	×	×	×
$q-D$	Pow	×	×	×	×	√	×
	Ln	×	×	×	√	×	√
	Qua-ln	×	×	×	×	√	×

注：× 表示差异不显著，√ 表示差异显著（$P<0.05$）。Notes: × indicates the difference is insignificant, while √ indicates the difference is significant at $P<0.05$ level.

对表 2 ~ 4 分析表明，自然对数函数模型表达平均流速、平均水深与流量关系较适宜，而水面宽与流量关系则适宜采用二阶对数函数模型表达。进一步将研究期间桥子西沟流域观测数据随机分为 2 组：1987—2002 年期间共 594 对数据用于模型率定；2003—2006 年期间共 362 对数据用于模型验证。表 5 为流量与平均流速、水面宽及平均水深的水力几何模型率定结果，粗体表示优选出的水力几何模型。

表 5　桥子西沟流域平均流速、水面宽及平均水深水力几何模型优选结果

Tab. 5　Hydraulic geometry model optimization results of mean flow velocity, flow width and mean flow depth at the Qiaozi-West Watershed

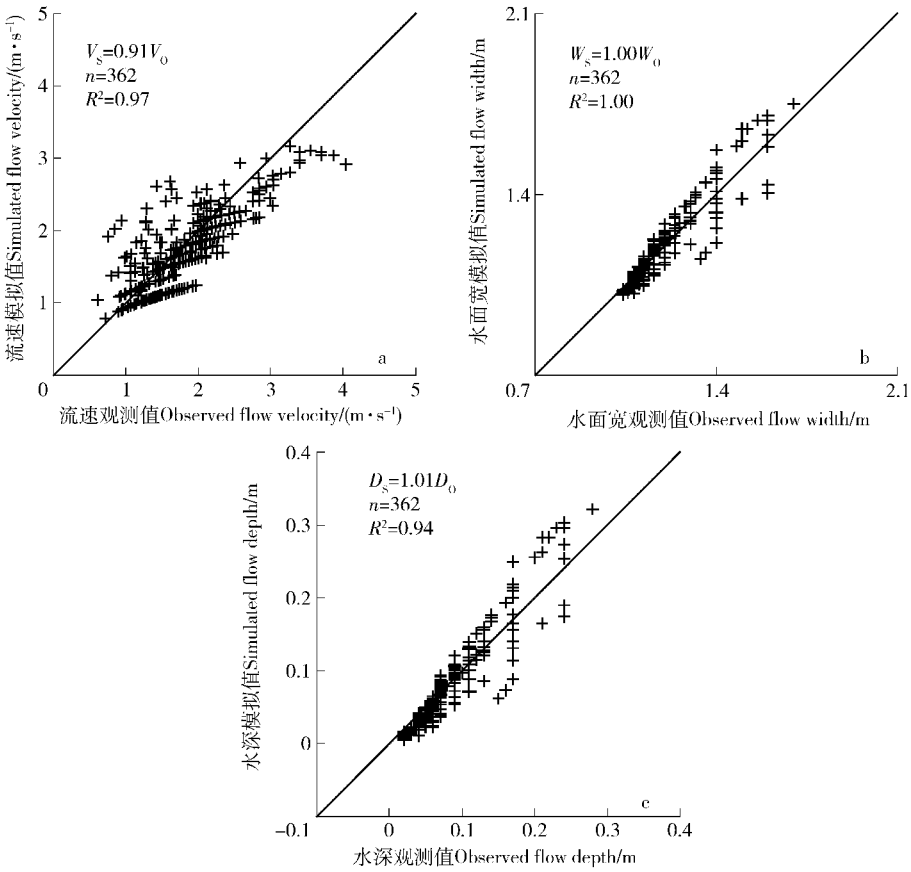
变量 Variables	模型 Models	模型表达式 Model expressions	RSS	R^2	显著性水平 Significant level
$q-V$	pow	$V=2.85\mathrm{pow}(q, 0.30)$	205.24	0.43	$P<0.05$
$q-V$	**ln**	$\boldsymbol{V=0.54\ln(q+0.0045)+2.93}$	**138.39**	**0.75**	$\boldsymbol{P<0.05}$
$q-V$	Qua-ln	$\ln V=-0.014\mathrm{pow}(\ln q, 2.00)+0.25\ln q+1.04$	203.78	0.43	$P<0.05$
$q-W$	pow	$W=1.56\mathrm{pow}(q, 0.11)$	7.16	0.75	$P<0.01$
$q-W$	ln	$W=0.17\ln(q+0.000078)+1.64$	34.95	0.59	$P<0.01$
$q-W$	**Qua-ln**	$\boldsymbol{\ln W=-0.027\mathrm{pow}(\ln q, 2.00)+0.22\ln q+0.46}$	**1.61**	**0.94**	$\boldsymbol{P<0.01}$
$q-D$	pow	$D=0.22\mathrm{pow}(q, 0.61)$	31.80	0.95	$P<0.05$
$q-D$	**ln**	$\boldsymbol{D=0.21\ln(q+0.42)+0.18}$	**0.60**	**0.94**	$\boldsymbol{P<0.05}$
$q-D$	Qua-ln	$\ln D=-0.01\mathrm{pow}(\ln q, 2.00)+0.56\ln q-1.51$	30.69	0.95	$P<0.05$

3.2　模型验证及评价

3.2.1　桥子西沟流域数据验证

应用桥子西沟流域水文观测数据对各优选水力几何模型进行验证，做流域水文观测值与模拟值散点图，见图 2。

图 2 表明，桥子西沟流域平均流速、水面宽和平均水深的观测值与各优选模型模拟值所得到的回归直线斜率变化在 0.91 ~ 1.01 之间，决定系数变化



Vs、*Ws*、*Ds* 和 *Vo*、*Wo*、*Do* 分别表示平均流速、水面宽和平均水深的模拟值和观测值。*Vs*, *Ws*, *Ds* and *Vo*, *Wo*, *Do* represent simulated and observed values of mean flow velocity, flow width and mean flow depth, respectively.

图2 桥子西沟流域出口测站观测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison between observed and simulated values at the hydrologic station from the Qiaozi-West Watershed outlet

在0.94~1.00之间,拟合效果比较满意。其中,水面宽模拟效果最好(图2(b)),其次为平均水深(图2(c))、平均流速模拟效果(图2(a))。计算各水力几何模型RMSE和*E*值见表6。其中,水面宽优选模型RMSE值最小,而*E*值为3模型中最大,模拟效果最好。图2与表6分析结果均表明,平均水深优选模型模拟效果优于平均流速优选模型。

表6 桥子西沟流域优选水力几何模型模拟结果评价

Tab. 6 Valuation of simulation results by the determined hydraulic geometry models for the Qiaozi-West Watershed

评价标准 Evaluation criteria	*q*-*V*	*q*-*W*	*q*-*D*
RMSE/%	19.89	3.84	30.70
E	0.59	0.87	0.84

3.2.2 桥子东沟流域数据验证

应用1987—2006年桥子东沟流域出口测站断面共1 006组水文观测数据对优选水力几何模型进行验证,评价模型适用性。根据模型模拟结果计算RMSE和*E*值,结果见表7。对比表6,平均流速-流量关系模拟中,RMSE值有所降低但幅度不大,*E*值有所降低;水面宽-流量关系模拟中,RMSE值升高且幅度较大,*E*值虽有降低但幅度不大;平均水深流量关系模拟中,不仅RMSE值降低,而且*E*值升高。

表7 优选水力几何模型在桥子东沟流域的模拟结果评价

Tab. 7 Valuation of simulation results by the determined hydraulic geometry models for the Qiaozi-East Watershed

评价标准 Evaluation criteria	*q*-*V*	*q*-*W*	*q*-*D*
RMSE/%	19.46	41.06	24.08
E	0.28	0.73	0.92

4 讨论与结论

4.1 讨 论

诸多研究表明,世界各地水力几何形态存在较大变异。Rhodes[19]研究得出平均流速指数变化区间为0.03~0.99,水面宽指数变化区间为0~0.84,平均水深指数变化区间为0.01~0.84,3个指数的

平均值均偏离 Leopold 和 Maddock 确定的理论值。Park[5] 收集了前人文献中 139 个测站和 72 个沿程河道的指数数据，应用直方图分析各指数变异性的结果表明，平均流速指数分布在 0.07 ~ 0.70，水面宽指数分布在 0 ~ 0.59，而平均水深指数取值集中在 0.30 ~ 0.40，3 个指数中仅水深指数与理论值 0.40 较接近。马元旭等[14] 利用无定河及其支流 1959—1969 年的实测水文资料，分析了 34 个河段的断面水力几何形态指数，得到平均流速指数变化区间为 0.29 ~ 0.43，水面宽指数变化区间为 0.02 ~ 0.56，平均水深指数变化区间为 0.15 ~ 0.58，并且发现不同等级河道的指数取值存在较大差异。冉立山等[11] 对黄河上游内蒙古河段 4 个不同河型段的代表性河道断面数据分析得出，平均流速指数取值区间为 0.25 ~ 0.70，水面宽指数取值区间为 0 ~ 0.37，平均水深指数取值区间为 0.10 ~ 0.55，并且不同河型指数取值存在差异。笔者应用桥子西沟流域出口断面实测数据确定出的幂函数模型平均流速指数取值区间为 0.12 ~ 0.34（除去异常值 0.79），水面宽指数取值区间为 0.034 ~ 0.150，平均水深指数取值区间为 0.56 ~ 0.77。其中，平均流速指数与理论值较为接近，而水面宽和平均水深指数取值范围均不包含理论值，且偏差较大。与理论值相比，水面宽指数取值偏小，而平均水深指数取值偏大，说明流域出口断面随着流量的增加，宽深比减小，沟道变得窄深。笔者初步推断是由于出口断面为水泥浆砌石修筑，结构较稳定，随着流量的增加，水深的增量会超过水面宽的增量，从而使宽深比减小。

应用桥子西沟流域出口断面观测数据优选出的水力几何模型拟合桥子东沟流域观测数据时，平均流速和水面宽二者与流量的关系模拟效果较桥子西沟流域模拟效果稍差，笔者初步推断是 2 流域土地利用存在较大差异所致。桥子西沟流域无水土保持措施，降雨径流中的含沙量远高于桥子东沟流域（图 3），而高含沙水流的黏性系数、流速分布、水流阻力等与低含沙水流有质的区别[20]，进一步影响水力几何关系。图 3 表明研究期间桥子西沟、东沟 2 流域 19 场径流事件中，桥子西沟流域有 16 场径流沙峰值高于桥子东沟流域，占径流事件的 84%，部分证实了上面的推论。

马元旭等[14] 研究发现，不规则矩形或梯形断面河道中，水面宽与流量之间呈自然对数函数关系，而平均水深与流量之间则表现为二次函数关系。本研究将流域出口断面近似看作稳定阶段下的河道断面，桥子西沟流域出口断面近似为梯形，水面宽与流量关系适宜采用二阶对数函数关系表达，平均水深、

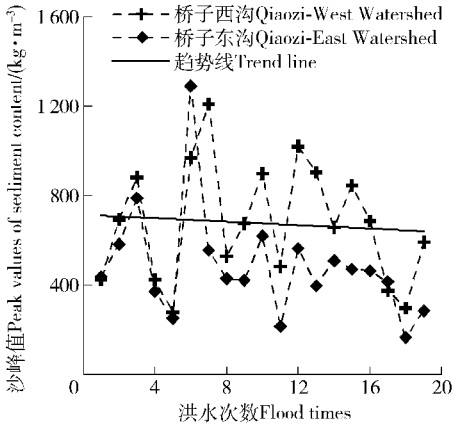


图 3　研究期间桥子西沟、桥子东沟 2 流域 19 场洪水沙峰

Fig. 3　Peak values of sediment content for 19 flood events in the two study watersheds during study course

平均流速与流量关系则适宜用自然对数函数关系表达。该研究结论与马元旭等[14] 研究所得结论存在差异，可能原因是不同研究区河道底部及河岸材质，河岸及沟底植被分布[21-22]、河岸抗蚀性[7] 等局地综合条件存在差异所致。由于幂函数模型不能完全表达河流水力几何形态的本质特征[23]，部分学者采用分段幂函数解释水力几何形态变异性[24-25]。Navratil 等[26] 在法国 10 ~ 1 700 km^2 流域上的 15 条冲积河流河段上验证了分段线性对数（分段幂函数）模型刻画水力几何关系的合理性。笔者曾尝试应用分段线性对数（分段幂函数）模型拟合研究流域出口断面观测数据，发现分段趋势并不显著。

4.2　结　　论

本研究选取黄土丘陵沟壑区桥子西沟和桥子东沟 2 水土流失对比流域为研究区，结合流域出口断面长时间系列观测数据，探讨流量与平均流速、水面宽和平均水深关系的适宜模型表达，初步得出以下结论：

1）幂函数模型并不适用于刻画黄土高原地区小流域出口断面水力几何关系。桥子西沟流域出口断面平均流速 - 流量关系和平均水深- 流量关系适用于自然对数函数模型拟合，水面宽与流量关系则遵循二阶对数函数关系。

2）优选水力几何模型在桥子西沟和桥子东沟流域分别进行了验证，研究结果可进一步为黄土高原地区小流域产流产沙过程预报提供基础。

参　考　文　献

[1] WESTERN A W, FINLAYSON B L, MCMAHON T A, et al. A method for characterising longitudinal irregularity in river channels [J]. Geomorphology, 1997, 21(1): 39-51.

[2] RICHARDS K. Rivers: form and process in alluvial channels [M]. London: Methuen & Co Ltd, 1982:358.

[3] STEWARDSON M. Hydraulic geometry of stream reaches [J]. Journal of Hydrology, 2005, 306(1-4): 97-111.

[4] LEOPOLD L B, MADDOCK T J. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications [C] // U S geological survey professional paper. Washington: US Government Printing Office, 1953: 1-57.

[5] PARK C C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: an analysis and some observations [J]. Journal of Hydrology, 1977, 33(1-2): 133-146.

[6] RIDENOUR G S, GIARDINO J R. The statistical study of hydraulic geometry: a new direction for compositional data analysis [J]. Mathematical Geology, 1991, 23(3): 349-366.

[7] MERIGLIANO M F. Hydraulic geometry and stream channel behavior: an uncertain link [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(6): 1327-1336.

[8] RICHARDS K S. Hydraulic geometry and channel roughness: a non-linear system [J]. American Journal of Science, 1973, 273(10): 877-896.

[9] KNIGHTON A D. Comments on log-quadratic relations in hydraulic geometry [J]. Earth Surface Processes, 1979, 4(3): 205-209.

[10] 冉立山,王随继,范小黎,等. 黄河上游主河道水力几何形态的年际变化特征分析 [C]//海峡两岸环境与资源学术研讨会学术论文集. 北京: 中国水土保持学会,2007: 93-102.
RAN L S, WANG S J, FAN X L, et al. Analysis of characteristics of interannual variability of hydraulic geometry for the main channels in the upper reaches of the Yellow River [C] // The conference proceedings of cross-strait symposium on environmental and resources. Beijing: Chinese Society of Soil and Water Conservation, 2007: 93-102.

[11] 冉立山,王随继. 黄河内蒙古河段河道演变及水力几何形态研究[J]. 泥沙研究, 2010(4): 61-67.
RAN L S, WANG S J. Study on channel evolution and hydraulic geometry in the Inner Mongolia Reach of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2010(4): 61-67.

[12] 王随继,魏全伟,谭利华,等. 山地河流的河相关系及其变化趋势:以怒江、澜沧江和金沙江云南河段为例 [J]. 山地学报, 2009, 27(1): 5-13.
WANG S J, WEI Q W, TAN L H, et al. River regime and its variety of the mountainous rivers: Nujiang, Lancangjiang and Jinshajiang Rivers for their reaches in Yunnan Province of China [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 5-13.

[13] 付春兰,董学阳,韩晓羽,等. 黄河下游河道横断面变化特点分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(3): 179-181.
FU C L, DONG X Y, HAN X Y, et al. Analysis of the change characteristics of river transversal section in downstream of the Yellow River [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(3): 179-181.

[14] 马元旭,许炯心. 无定河及其各支流的断面水力几何形态[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 345-353.
MA Y X, XU J X. The hydraulic geometry of Wuding River and its tributaries [J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 345-353.

[15] ZHOU S M, LEI T W, WARRINGTON D N, et al. Does watershed size affect simple mathematical relationships between flow velocity and discharge rate at watershed outlets on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 444-445: 1-9.

[16] 原翠萍,李淑芹,雷启祥,等. 黄土丘陵沟壑区治理与非治理对比小流域侵蚀产流比较研究 [J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(6): 95-101.
YUAN C P, LI S Q, LEI Q X, et al. Study on water erosion from two small watersheds with and without management on the Loess Plateau [J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(6): 95-101.

[17] WILLMOTT C J, ACKLESON S G, DAVIS R E, et al. Statistics for the evaluation and comparison of models [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C5): 8995-9005.

[18] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models (I): a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

[19] RHODES D D. The b-f-m diagram; graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry [J]. American Journal of Science, 1977, 277(1): 73-96.

[20] 郑委,郭庆超,陆琴. 高含沙水流基本理论综述 [J]. 泥沙研究, 2011(2): 75-80.
ZHENG W, GUO Q C, LU Q. Review of basic theories of hyperconcentrated flows [J]. Journal of Sediment Research, 2011(2): 75-80.

[21] HUANG H Q, NANSON G C. Vegetation and channel variation: a case study of four small streams in southeastern Australia [J]. Geomorphology, 1997, 18(3-4): 237-249.

[22] EATON B C, GILES T R. Assessing the effect of vegetation-related bank strength on channel morphology and stability in gravel-bed streams using numerical models [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(5): 712-724.

[23] KLEIN M. Drainage area and the variation of channel geometry downstream [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1981, 6(6): 589-593.

[24] THORNES J B. The hydraulic geometry of stream channels in the Xingu-Araguaia Headwaters [J]. The Geographical Journal, 1970, 136(3): 376-382.

[25] BATES B C. A statistical log piecewise linear model of at-a-station hydraulic geometry [J]. Water Resources Research, 1990, 26(1): 109-118.

[26] NAVRATIL O, ALBERT M B. Non-linearity of reach hydraulic geometry relations [J]. Journal of Hydrology, 2010, 388(3-4): 280-290.

(责任编辑 李 契
责任编委 余新晓)