

黄土高原小流域水沙关系空间变异研究

肖学年¹, 崔灵周^{2, 3}, 李占斌⁴

- (1. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093; 2. 温州师范学院生命与环境科学学院, 浙江 温州 325027;
3. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;
4. 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 杨陵 712100)

摘 要: 小流域水沙关系空间变异规律是建立黄土高原流域土壤侵蚀预报模型和评价水土保持效益的基础。以黄土丘陵沟壑区典型流域岔巴沟为例, 结合野外实地水沙观测资料及相关分析法, 对该流域次降雨水沙关系及其空间变异性进行了定量研究。结果表明, 岔巴沟流域次降雨输沙模数与洪峰流量模数及径流深具有较强的相关性, 这种相关性随不同支流呈现明显的空间变异性, 如何消除这种空间变异性是建立以次降雨水沙作用关系为基础的黄土高原流域水土流失预报模型亟待解决的主要问题。

关键词: 水沙关系; 空间变异性; 岔巴沟流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)02-0140-03

Study on Spatial Variation of the Relationship Between Runoff and Sediment of Small Watershed on Loess Plateau

XIAO Xue-nian¹, CU IL ing-zhou^{2, 3}, LI Zhan-bin⁴

- (1. Department of Urban and Resource, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
2. School of Life and Environment Science, Wenzhou Normal College, Wenzhou 325027, Zhejiang, China;
3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The law of the spatial variation of the relationship between the runoff and sediment is the basis of the watershed soil erosion prediction model and the evaluation of soil and water conservation on Loess Plateau. Combining with the runoff, sediment data from field observation and the correlation method, the relationship between the runoff and sediment, and its spatial variation are studied quantitatively. The results show that the modulus of sediment transport, the modulus of maximum flood discharge and the runoff depth take on great positive relativity and the spatial variation of the relativity is obvious with the different sub-watershed. How to avoid the spatial variation is the chief problem of the watershed soil loss prediction model on Loess Plateau, which is based on the relationship between the runoff and sediment of the small watershed.

Key words: the relationship between runoff and sediment; spatial variation; Chabagou watershed

小流域水沙关系的空间变异性是建立具有广泛适用性的黄土高原流域水土流失预报模型的研究重点^[1, 2]。长期以来, 江忠善、卢金发、王万中、陈浩和李占斌^[1~8]等学者在黄土高原小流域降雨空间分布、土壤侵蚀空间变化、暴雨洪水侵蚀产沙特征和水沙过程变异等方面进行了大量研究, 对认识黄土高原小流域降雨侵蚀产沙时空特征进行了有益探索, 但大多注重于单因子及其过程的变异研究, 对于从定量角度

研究其相互作用关系的空间变异较少。为此, 本文以黄土丘陵沟壑区第一副区的岔巴沟流域为研究对象, 通过对该流域 11 年降雨、水文和泥沙径流观测资料分析, 揭示该流域次降雨水沙关系空间变异的定量特征, 为建立具有较强适用性的黄土高原流域降雨侵蚀产沙预报模型和水土流失综合治理效益评价提供科学依据。

收稿日期: 2004-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(40301026); 国家博士后科学基金项目

作者简介: 肖学年(1964-), 男, 陕西测绘局标准化研究所副所长, 高工, 南京大学城市与资源学系在职博士, 主要从事水土保持、地理信息系统及标准化等方面的科研工作, 现发表科研论文十余篇。

1 岔巴沟流域概况

岔巴沟位于黄土丘陵沟壑区第一副区,流域面积为 187 km²。河谷阶地和黄土丘陵沟谷是该流域的两大地貌类型,其中黄土丘陵沟谷发育十分普遍,全流域由主沟-岔巴沟和 11 条一级支沟组成。(见图 1)岔巴沟流域年平均降水量约为 450 mm,70% 集中于 7、8 月间,且多降雨强度较大而历时

短暂的暴雨;年平均侵蚀模数为 15 780 t/km²,7、8、9 月份的输沙量所占流域年总输沙量的 90% 以上。岔巴沟流域土壤侵蚀类型主要包括片蚀、沟蚀、崩塌、滑坡和潜蚀等类型,其中沟蚀是该流域主要的侵蚀类型,它使沟头溯源发展,沟谷加深加宽,沟蚀作用沿梁峁四周发展,有单个分布在坡度较大的山坡上,亦有成群成片密布在陡壁上或布满梁峁腰部。

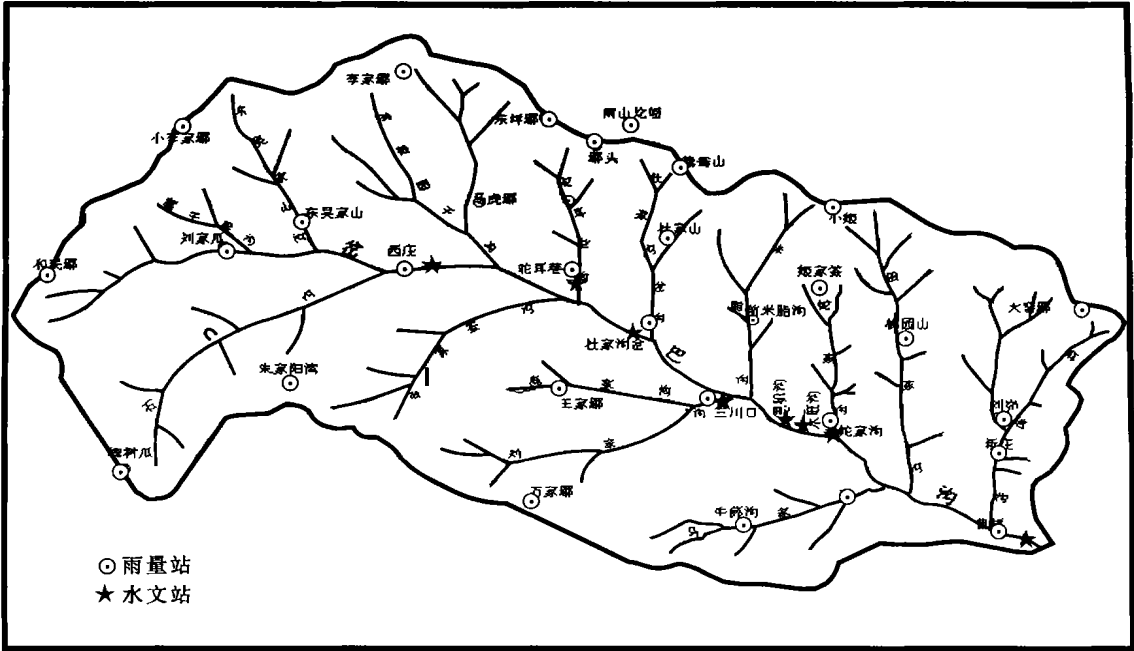


图 1 岔巴沟流域沟网空间分布图

2 岔巴沟流域次降雨水沙关系空间变异性

为了进一步研究岔巴沟流域次降雨水沙关系空间变异特征,在该流域 1959~1969 年水文站径流泥沙观测资料为基础,对岔巴沟及各支流流域次降雨产生的洪水径流与侵蚀产沙之间的作用关系进行了全面的定量分析。

2.1 各支流流域次降雨水沙关系回归分析

表 1 是岔巴沟流域及各支流流域输沙模数 M_s 与洪峰流量模数 Q_m 及径流深 h 进行多元回归统计分析结果。表中洪水特征采用洪峰流量模数 Q_m (m³/s·km²) 和径流深 h (mm/km²) 来定量描述,其中洪峰流量模数 Q_m 表征次降雨所形成洪水的强度,径流深 h 表征次降雨所形成洪水的总量;输沙特征采用次降雨输沙模数 M_s (t/km²) 定量描述,表征次降雨的输沙强度。

从表 1 可以看出,岔巴沟流域及各支流流域输沙模数 M_s 与洪峰流量模数 Q_m 及径流深 h 均表现为幂乘关系;复相关系数 r 除西庄为 0.899 外,其余均保持在 0.971 以上,最大可达 0.989 (水旺沟); F 检验均达到极显著水平。从预测值与实测值相对误差来看,对较小洪水预测精度不高,尤其对于输沙模数在 100 t/km² 以下的洪水,有出现相对误差较大的情况,但绝对误差较小。在所有预测误差中,相对误差小于 30% 的洪水次数占总洪水次数的比例除西庄、三川口和驼耳巷在 75% 左右外(分别为 78.8%、75.1% 和 73%),其余均在 85% 以上,最高可达 94.2% (蛇家沟)。可见岔巴沟流域及各支流的降雨径流与侵蚀产沙之间具有显著的关系,尤其在输沙模数 M_s 与洪峰流量模数 Q_m 及径流深 h 之间表现最为明显。

表 1 岔巴沟流域洪峰流量模数 Q_m 、径流深 h 与侵蚀模数 M_s 回归分析表

流域名称	流域面积/km ²	回归方程	复相关系数	洪水次数	回归检验	相对误差< 30% 的洪水比例
曹坪	187	$M_s = 943.34 Q_m^{0.296} h^{0.824}$	0.973	40	$F = 337.89^{**}$	0.875
杜家沟岔	97	$M_s = 999.82 Q_m^{0.277} h^{0.703}$	0.971	35	$F = 277.2^{**}$	0.857
西庄	49	$M_s = 810.03 Q_m^{0.362} h^{0.731}$	0.899	33	$F = 65.62^{**}$	0.788
三川口	21	$M_s = 669.39 Q_m^{0.485} h^{0.795}$	0.972	40	$F = 333.2^{**}$	0.751
驼耳巷	5.74	$M_s = 478.47 Q_m^{0.467} h^{0.728}$	0.979	22	$F = 226.2^{**}$	0.730
蛇家沟	4.72	$M_s = 571.02 Q_m^{0.241} h^{0.892}$	0.982	31	$F = 408.6^{**}$	0.942
黑矾沟	0.133	$M_s = 370.23 Q_m^{0.432} h^{0.982}$	0.982	8	$F = 80.75^{**}$	0.875
水旺沟	0.107	$M_s = 222.10 Q_m^{0.703} h^{0.710}$	0.989	15	$F = 308.1^{**}$	0.933

2.2 岔巴沟流域次降雨水沙关系的空间变异分析

虽然岔巴沟流域及各支流流域次降雨输沙模数 M_s 与洪峰流量模数 Q_m 及径流深 h 呈现较强的正相关性,多元回归均表现为乘幂关系且 F 检验均达到极显著水平,但不同支流流域存在较大差别。就次降雨输沙模数 M_s 与洪峰流量模数 Q_m 及径流深 h 的复相关指数 r^2 来看,蛇家沟、黑矾沟和水旺沟均大于0.980,曹坪、杜家沟岔、三川口和驼耳巷均大于0.971,而西庄仅为0.899。从次降雨输沙模数 M_s 与洪峰流量模数 Q_m 及径流深 h 多元回归所得乘幂函数关系表达形式来看,其常数系数在222.10~999.82范围内变化,曹坪、杜家沟岔、西庄和三川口较大,分别为943.34、999.82、810.03和669.39;其次为驼耳巷和蛇家沟,分别为478.47和571.02;黑矾沟和水旺沟最小,分别为370.23和222.10。洪峰流量模数 Q_m 的幂指数最大为水旺沟(0.703),其余依次为三川口(0.485)、驼耳巷(0.467)、黑矾沟(0.432)、西庄(0.362)、曹坪(0.296)、杜家沟岔(0.277)和蛇家沟(0.241)。径流深 h 的幂指数最大为黑矾沟(0.982),最小为杜家沟岔(0.703),其余依次为蛇家沟(0.892)、曹坪(0.824)、三川口(0.795)、西庄(0.731)、驼耳巷(0.728)和水旺沟(0.710)。

表 2 径流深 h 、洪峰流量模数 Q_m 相近时各支流流域侵蚀产沙特征对比表

站名	流域面积/ km^2	洪号	降雨量/ mm	洪峰流量模数/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2})$	径流深/ mm	最大含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	输沙模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2})$
水旺沟	0.107	670829	10.0	0.29	0.47	950.0	50.19
黑矾沟	0.133	670822	34.4	0.23	0.58	766.0	112.78
驼耳巷沟	5.74	600810	57.1	0.23	0.65	372.0	167.42
三川口	21.0	610801	14.9	0.17	1.19	484.0	312.86
曹坪	187.0	640917	9.9	0.17	1.27	829.0	844.92
水旺沟	0.107	610722	9.4	0.48	0.56	163.0	77.86
黑矾沟	0.133	670825	10.0	0.47	0.54	508.0	160.90
驼耳巷沟	5.74	640714	11.6	0.44	0.58	694.0	304.86
蛇家沟	4.72	610813	60.3	0.42	3.42	558.0	1055.085
驼耳巷沟	5.74	640705	83.9	0.46	3.19	535.0	1179.443
曹坪	187.0	630523	24.2	0.44	3.19	1020.0	2171.123
三川口	21.0	620811	27.8	2.60	4.71	793.0	3257.143
西庄	49.0	590825	10.6	2.69	4.80	1040.0	5083.673
水旺沟	0.107	640705	91.2	6.67	6.53	480.0	3879.439
蛇家沟	4.72	640802	18.4	6.50	6.64	733.0	4406.780

3 结 语

岔巴沟流域次降雨输沙模数与洪峰流量模数及径流深具有显著的相关性,利用这种水沙作用关系来建立黄土高原流域水土流失预报模型是可行的,由于该作用关系的空间变异性十分显著,由此所建立的流域水土流失预报模型的通用参考文献:

[1] 卢金发. 黄河中游流域特性对产沙量与降雨关系影响[J]. 地理学报, 2000, 55(6): 737- 743
[2] 江忠善, 王志强, 刘志. 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, 2(1): 1- 9
[3] 王万中, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996
[4] 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, (1): 12- 16
[5] 李长兴, 等. 黄土地区小流域降雨空间变化特征分析[J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 12- 16
[6] 李占斌, 符素华, 鲁克新. 秃尾河流域暴雨洪水产沙特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 88- 91
[7] 陈浩, 陆中臣. 黄河中游流域系统水沙过程变异研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 46- 52
[8] 冉大川, 高健翎, 赵安成, 等. 皇甫川流域水沙特性分析及其治理对策[J]. 水利学报, 2003, (2): 122- 127.

为进一步揭示岔巴沟流域及各支流流域次降雨水沙关系空间变异性内在机理,本文对岔巴沟各支流流域在径流深 h 和洪峰流量模数 Q_m 相近条件下的侵蚀产沙特征进行了对比分析(见表2)。由4可以看出,在径流深 h 和洪峰流量模数 Q_m 相近条件下,流域的侵蚀产沙特征(如含沙量和输沙模数)主要受流域形态特征(如面积)影响。例如,在洪号为610.722和670.825的两次降雨中,水旺沟的洪峰流量模数($0.48 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$)和径流深(0.56 mm)均大于黑矾沟的洪峰流量模数($0.47 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$)和径流深(0.54 mm),但水旺沟的输沙模数($77.86 \text{ t}/\text{km}^2$)远小于黑矾沟的输沙模数($160.9 \text{ t}/\text{km}^2$),原因在于水旺沟和黑矾沟的流域面积存在差别,其中水旺沟的流域面积(0.107 km^2)小于黑矾沟的流域面积(0.133 km^2)。与此类似的还有洪号为630.523和640.705两次降雨的曹坪和驼耳巷、洪号为640.705和640.802两次降雨的水旺沟和蛇家沟等。可见当径流深 h 和洪峰流量模数 Q_m 相近时,岔巴沟流域及各支流流域输沙模数 M_s 主要受流域面积影响,且流域面积越大,相应输沙模数 M_s 也越大。可见,流域面积成为岔巴沟流域及各支流流域次降雨水沙关系空间变异主要原因之一。