

不同时空尺度下沟壑对流域侵蚀产沙的影响 ——以黄土丘陵沟壑区岔巴沟流域为例

廖义善^{1, 2, 3}, 蔡强国³, 卓慕宁¹, 郑明国³, 罗璇²

(1. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 基于 DEM, 分别以不同的沟壑发育所需的汇水面积为阈值, 提取岔巴沟流域等 6 个不同空间尺度流域的沟壑, 并求出不同级别沟壑的差值。结合黄河子洲观测站多年的水沙观测资料, 分析不同级别的沟壑及沟壑的不同部位在不同时间尺度下对流域侵蚀产沙的影响。分析结果表明: 沟壑密度并不是简单地随着流域面积的增大而减小, 沟壑密度的空间尺度效应与所提取沟壑的级别有关; 黄土丘陵沟壑区梁峁坡、沟坡的次暴雨产沙量占流域产沙总量的比重与降雨特性有关; 重力侵蚀多发生在毛沟的中、上部及沟头处, 而支沟、干沟主干道的沟坡比较稳定, 且其发生的重力侵蚀对流域产沙的影响多为“无效”部分; 沟壑发育汇水面积的阈值为 1500、1800、2000 个栅格提取的沟壑对流域侵蚀产沙的作用较大, 同时沟壑对流域侵蚀产沙的影响与时间尺度有关, 在多年平均尺度下, 高级别沟壑只起到泥沙输送通道的作用。

关 键 词: DEM; 时空尺度; 侵蚀产沙; 黄土丘陵沟壑区; 沟壑

利用数字高程模型(DEM)提取地形特征, 国外始于 1960 年代, 而国内在 1990 年代才起步。对 DEM 提取地形特征的研究, 开始仅局限于分水线和山谷的识别与提取。随着对 DEM 诸多基础理论问题的深入研究, DEM 提取地形要素的方法日益成熟, DEM 越来越广泛应用于地形要素的提取^[1, 2], 以及分布式水文模型的构建^[3, 4]。沟壑密度是单位流域面积中沟壑的总长度, 过去沟壑的提取一般从地形图或其他图件中的水流线上量取, 工作量很大。近 20 年来, 随着地理信息系统的发展与普及, 基于 DEM 提取沟壑被广泛应用^[5, 6], 并提出了许多有效的沟壑提取算法^[7]。其中, 由 O'Callaghan 与 Mark 提出的 D8 单流向算法^[8], 被广泛采用。

沟壑密度既是表示流域侵蚀切割程度的重要指标, 又是影响流域汇流和沟道泥沙输移过程的重要因素。在相近的流域地貌条件下, 沟壑密度越大, 地面切割越破碎, 沟间地地面坡度越陡峭, 侵蚀越剧烈^[9]。沟壑密度在影响土壤侵蚀的各因素中占据重要地位, 侵蚀量与沟壑密度呈现正相关关系^[10]。

沟壑密度与年土壤侵蚀模数关系密切, 因此可用沟壑密度的变化来预测土壤侵蚀的发展趋势^[11]。但在不同时空尺度下, 沟壑对流域侵蚀产沙的贡献如何, 哪一个级别的沟壑对流域侵蚀产沙的贡献较大, 不同降雨类型对沟坡、梁峁坡侵蚀产沙的影响如何, 还有待进一步研究。笔者在不同时空尺度下, 通过对不同级别沟壑的密度及沟壑的不同部位与流域产沙模数的关系进行分析, 试图在这些方面做初步的探讨。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

岔巴沟为大理河的一级支流, 位于东经 109.5°~110.1°, 北纬 37.5°~37.8°, 流域控制面积为 205 km²(图 1)。年平均温度约 8℃, 最高气温 38℃, 最低气温 -27℃, 霜冻期约半年。蛇家沟、驼耳巷沟、三川口分别为岔巴沟的一级支流; 西庄为岔巴沟的上游部分; 杜家沟岔水文站位于岔巴沟主河道的中游。

收稿日期: 2008-07; 修订日期: 2008-12。

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点基金项目(40635027); 广东省科技攻关项目(2007B031700005, 2005B33302006); 广东省科学院台站基金(sytz200707)。

作者简介: 廖义善, 男, 广西桂林人, 硕士, 主要研究方向为流域地貌及 GIS 应用。E-mail: yishan_liao@163.com

通讯作者: 蔡强国, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为侵蚀产沙模拟。E-mail: caiqg@igsnr.ac.cn

据黄河流域子洲径流实验站 1959–1969 年的实测资料,岔巴沟流域多年平均降水量 480mm,降水季节分配不均匀,70%集中在 6–9 月,且多为强度大、历时短的暴雨,实测最大降雨强度达 3.5mm/min。流域平均产沙模数 22 200t/(km²·a),最大产沙模数达 71 100t/(km²·a),最小亦为 2 110t/(km²·a)。

1.2 研究方法

通过对 1:10000 的地形图矢量化并生成空间分辨率为 5m×5m 的流域 DEM。基于流域 DEM,根据沟壑发育所需的最低汇水面积,分别以 100、250、500、1000、1500、1800、2000、4000、40000 个栅格为沟壑汇水面积的阈值,提取出流域不同级别的沟壑。计算出不同级别的沟壑密度,以及不同级别沟壑密度的差值。根据黄河流域子洲径流实验站的观测数据,分别筛选出 1963–1967 年能同时均匀覆盖(流域各区域降雨量、降雨强度变化不大)蛇家沟等 6 个小流域的 9 场次暴雨产沙数据及 1961–1967 年的年产沙数据。运用 SPSS 软件对不同级别沟壑的密度、不同级别沟壑密度的差值与次暴雨、年产沙模数进行相关分析,研究在次暴雨尺度与年尺度下不同级别沟壑对蛇家沟等 6 个小流域的侵蚀产沙影响情况。

2 不同沟壑对流域不同时空尺度下侵蚀产沙的影响

2.1 不同级别沟壑及沟壑不同部位的提取

保证沟谷发育的最低汇水面积,称为“给养面积”^[12],每一类沟谷的形态数量特征都有一定的集中范围和临界值^[13]。沈晶玉等及孙崇亮等对提取沟壑的汇水面积的阈值进行了研究^[14,15];李俊等发现汇流阈值的大小决定着所提取沟谷的致密程度与沟谷的级别特征^[16]。结合对研究区域的实地考察情况,分别以 100、250、500、1000、1500、1800、2000、4000、40000 个栅格作为沟壑发育汇水面积的阈值,提取出流域不同级别的沟壑。汇水面积的阈值为 100 个栅格时提取的沟壑为坡面切沟以上级别的所有沟壑;汇水面积的阈值为 250 个栅格时提取的沟



图 1 岔巴沟流域示意

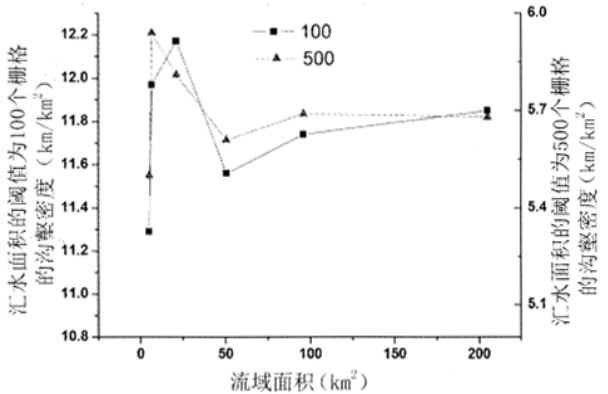
Fig.1 Sketch map of Chabagou watershed

壑为坡面大型切沟以上级别的所有沟壑;汇水面积的阈值为 500 个栅格时提取的沟壑为毛沟次级沟道以上级别的所有沟壑;汇水面积的阈值为 1000 个栅格时提取的沟壑为毛沟以上级别的所有沟壑;汇水面积的阈值为 1500、1800、2000 个栅格时提取的沟壑为毛沟的主干道(包括部分毛沟的上游)以上级别的所有沟壑;汇水面积的阈值为 4000 个栅格时提取的沟壑为毛沟(主干道的中、下游部分)以上级别的所有沟壑;汇水面积的阈值为 40000 个栅格时提取的沟壑为支沟(主干道的中、下游部分)以上级别的所有沟壑。

图 2 为汇水面积的阈值分别为 4000、40000 个栅格时在三川口流域所提取的沟壑示意图,粗线部分是汇水面积的阈值为 40000 个栅格时所提取的沟壑,该级别沟壑为三川口主河道部分。粗线与细线部分是汇水面积的阈值为 4000 个栅格时所提取的沟壑,该级别的沟壑包括三川口流域的主河道及主河道下一级沟道。由图 2 可知,用汇水面积的阈值为 4000 个栅格时所提取的沟壑减去汇水面积的阈值为 40000 个栅格时所提取的沟壑即为图 2 中沟壑的细线部分,即三川口主河道下一级沟道。根据不同级别沟壑的差值,可以提取出流域不同部位的沟壑。通过沟壑差值尝试找出流域不同部位的沟壑对侵蚀产沙的影响。汇水面积的阈值分别为

40000、4000 个栅格时沟壑的差值为毛沟及支沟的上游部分;汇水面积的阈值分别为 4000、2000 个栅格时沟壑的差值为毛沟的中、上游部分;汇水面积的阈值分别为 2000、1000 个栅格时沟壑的差值为毛沟的上游及沟头部分;汇水面积的阈值分别为 1000、100 个栅格时的沟壑差值为毛沟的下一级沟道及部分坡面切沟。

图 3 为沟壑汇水面积的阈值分别为 100、500、1500、4000 个栅格时,所提取的不同级别沟壑密度随面积的变化情况。由图 3 可知,流域的沟壑密度不是简单地随着流域面积的增加而减小。随着沟壑级别的增大,沟壑密度随面积的变化有一个先增大后减小的趋势。在沟壑汇水面积的阈值为 100 个栅格时,在支沟尺度(蛇家沟、驼耳巷沟、三川口)、干沟尺度(西庄、杜家沟岔、岔巴沟)下提取的沟壑密度均随着流域面积的增大而增大,但支沟尺度的沟壑密度大于干沟尺度的沟壑密度。在沟壑汇水面积的阈值为 4000 个栅格时,所提取的沟壑密度随着流域面积的增大持续减小。低级别的沟壑发育所需要的“给养面积”比较小,在支、干沟的沟道两旁,甚至在梁、峁坡上都可以发育。而高级别的沟壑发育所需要的“给养面积”比较大,沟壑一般从靠近流域主干道开始向分水岭发育。在靠近流域分水岭的地方,由于汇水面积小,高级别沟壑不容易发育。而流域面积越大,除了支沟与支沟的分水岭,还有干沟与干沟的分水岭,流域内不能发育高级别沟壑的区域占流域面积的比重越大。因而,高级别沟壑密度随着流域面积的增大而减小。



(a)低级别沟壑密度随流域面积变化

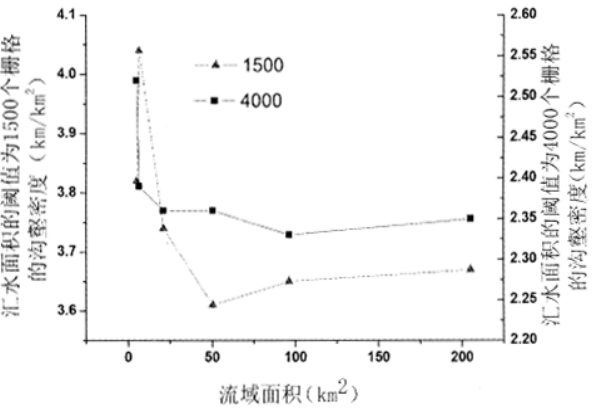


图 2 三川口流域不同汇水面积阈值下沟壑提取情况
Fig.2 The derived gully for different thresholds of drainage area

2.2 次暴雨尺度下不同级别沟壑对流域侵蚀产沙的影响

由于研究区域降雨在时空分布上存在不均匀性,本文在 1963–1967 年的次暴雨产沙资料中,挑选出能同时均匀覆盖 (在流域各区域降雨雨量、雨强变化不大)整个岔巴沟流域的 9 场次暴雨。不同空间尺度的次暴雨产沙情况见表 1。

运用 SPSS 对流域不同级别的沟壑与次暴雨产沙模数进行相关分析,表 2 为其相关矩阵。由表 2 可知,沟壑密度与产沙模数并不是简单的成正比关系,沟壑密度与产沙模数的关系不仅与沟壑级别有关,还与降雨的特性有关。如次暴雨 660828 的产沙模数与汇水面积阈值为 1500、1800、2000 个栅格所



(b)高级别沟壑密度随流域面积变化

图 3 不同级别的沟壑密度随面积的变化情况

Fig.3 The relationship between drainage density and drainage area

表 1 不同流域的次暴雨产沙模数

Tab.1 Relationship between spatial scale and unit sediment yield for the single rainfall event

流域名称	次暴雨的产沙模数/ (t.km ⁻²)								
	630603	630826	630828	640714	640802	640911	660627	660828	670826
蛇家沟	945	932	1690	3290	4880	1800	17000	587	6100
驼耳巷沟	425	33400	166	305	4410	143	4340	880	3750
三川口	3350	4370	5330	1720	786	905	2320	7240	2930
西庄	1720	5390	3100	1540	722	771	5940	12700	5960
杜家沟岔	1640	12900	3920	1740	1240	842	8570	10100	6750
岔巴沟	2210	9790	3020	1860	2190	1290	8290	6360	6420

提取的沟壑成比较好的负相关，而次暴雨 640802 的产沙模数与汇水面积的阈值为 1500、1800、2000 个栅格所提取的沟壑成比较好的正相关。从次暴雨的特点看，次暴雨 640802 是降雨强度比较小，但持续时间达几个小时，660828 是降雨强度很大，但持续时间只有几十分钟。依据王万忠等人对黄土丘陵沟壑区次暴雨的划分标准^[17]，次暴雨 640802 为黄

土高原典型的 C 型雨，660828 为黄土高原典型的 A 型雨。表 2 中汇水面积阈值为 1500、1800、2000 个栅格提取的沟壑为岔巴沟的二级支流(毛沟)以上级别的沟壑。图 4a、4b 为不同类型次暴雨与相同级别沟壑密度的关系图，由图中可知，由于降雨特性的不同，沟壑密度与产沙模数有可能成正比也有可能成反比。

表 2 不同级别沟壑密度与次暴雨产沙模数的相关矩阵

Tab.2 Correlation matrix between drainage density and unit sediment yield for the single rainfall event

不同级别沟壑	次暴雨的产沙模数/ (t.km ⁻²)								
	630603	630826	630828	640714	640802	640911	660627	660828	670826
100	0.511	0.424	0.340	-0.669	-0.374	-0.604	-0.868	0.077	-0.708
250	0.236	0.599	0.066	-0.679	-0.040	-0.642	-0.741	-0.247	-0.826
500	0.019	0.797	-0.129	-0.878	-0.017	-0.842	-0.794	-0.179	-0.773
1000	-0.441	0.873	-0.601	-0.711	0.503	-0.690	-0.409	-0.603	-0.674
1500	-0.593	0.709	-0.739	-0.389	0.781	-0.382	-0.043	-0.846	-0.562
1800	-0.595	0.532	-0.725	-0.159	0.866	-0.167	0.153	-0.922	-0.499
2000	-0.591	0.619	-0.728	-0.274	0.823	-0.279	0.050	-0.886	-0.545
4000	-0.469	-0.249	-0.493	0.621	0.784	0.578	0.765	-0.712	0.044
40000	-0.894	0.751	-0.831	-0.336	0.656	-0.314	0.264	-0.469	0.268

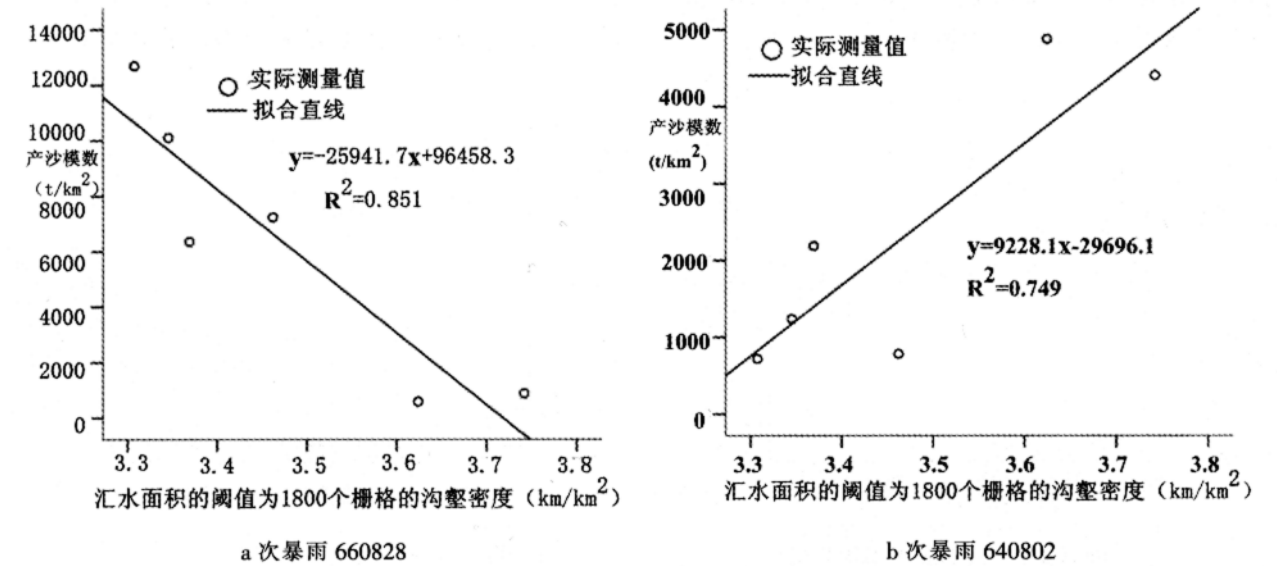


图 4 产沙模数与沟壑密度的关系

Fig.4 Relationship between gully density and unit sediment

在不同降雨条件下,黄土丘陵沟壑区梁峁坡、沟坡对流域产沙的贡献有所不同。对于强度比较小的降雨,由于梁峁坡坡长较长,植被较差,梁峁坡上不易产流,沟坡易于先产流。坡面产流量和径流挟沙有限,坡面上的产沙比较少。而沟坡的产流能力较梁峁坡要强,同时沟坡的坡度较梁峁坡要大,沟坡单位体积径流的能量要大于梁峁坡坡面单位体积径流的能量。地表径流在沟坡容易造成比较强烈的水蚀甚至重力侵蚀。此时,沟坡的产沙能力要大于梁峁坡,沟坡是流域产沙的主要场所。对于降雨强度比较大的暴雨,易于发生坡面汇流,径流在梁峁坡产生强烈冲刷作用,特别是细沟产生后径流含沙量非常大。同时,坡面与沟坡边缘,沟坡与沟道边缘,由于坡度的骤然变化,径流的能量会在边缘处产生一些损失,坡面径流在进入沟坡的过程中能量下降。有研究证明,在全坡面汇流过程中沟坡输出的最大水流平均含沙量已小于梁峁坡输入水流的 最大平均含沙量^[17]。这表明,坡面径流在进入沟坡前径流的含沙量已经很大,且坡面径流进入沟坡时能量有所下降,因而,沟坡径流的挟沙能力相对有限。沟坡大量侵蚀物质不能被搬运走,沟坡处新增产沙量不大。虽然上坡来水量与来沙量非常大,沟坡容易造成重力侵蚀,但由于径流的挟沙能力有限,沟坡上部分侵蚀物质不能被搬运走,在沟坡下部堆积。笔者在岔巴沟的实地考察中经常见到在毛沟主沟道的中上部有大量的崩塌、堆积物。此时,可认为沟坡上的产沙比较少,坡面是流域产沙的主要场所。在 C 型降雨时,单位时间内径流量不大,沟坡是流域产沙的主要场所。该级别的沟壑密度越大,沟坡在流域中所占的面积比重越大,沟坡对流域侵蚀产沙的影响越大,沟壑密度与次暴雨产沙模数成

正比。而在 A 型降雨时,单位时间径流量比较大,坡面的侵蚀产沙量接近、甚至大于沟坡,此时坡面是流域产沙的主要场所。沟壑密度越大,坡面所占流域面积越小,沟壑密度与次暴雨产沙模数成反比。同时,流域产沙模数与沟壑密度的相关性还受流域内地貌、土层、土地利用方式等因素的影响,因而二者相关性没有以前学者叙述的那样好。

通过求出不同级别沟壑密度的差值,提取出沟壑的不同部位,并运用 SPSS 对流域沟壑不同部位的沟壑密度与次暴雨产沙模数进行相关分析。发现次暴雨 630603 在不同空间尺度内的产沙模数与毛沟的次一级沟壑及毛沟上游呈现比较好的正相关关系(相关系数均在 0.8 以上)。次暴雨 660627 在不同空间尺度内的产沙模数与其毛沟以下级别的沟壑呈现很好的负相关(相关系数大多数在-0.8 以上),与毛沟上游及沟头部分的沟壑密度关系尤为密切。这表明,毛沟上游及沟头部分的沟壑、沟间地对流域产沙的影响最大,是流域重要的沙源地。除此之外,在次暴雨尺度下与产沙模数有一定相关性的沟壑部位比较分散,既有切沟,毛沟上游、沟头部分,也有支沟主干道部分,这主要是由不同次暴雨之间降雨差异性太大造成的。

2.3 年尺度下不同级别沟壑对流域侵蚀产沙的影响

为了减小降雨在时空分布上存在不均匀性,及重力侵蚀发生的随机性对流域侵蚀产沙的影响,本文选择 1961-1967 年蛇家沟等 6 个小流域的产沙数据,在年尺度上分析不同级别沟壑及沟壑的不同部位对流域侵蚀产沙的影响。运用 SPSS 对流域不同级别沟壑的沟壑密度与年尺度下流域产沙模数进行相关分析,表 3 为相关矩阵。

由表 3 可知,除降雨、产流均比较小的 1965 年

表 3 不同级别沟壑密度与年产沙模数的相关矩阵

Tab.3 Correlation matrix between drainage density and unit sediment yield

不同级别沟壑	年产沙模数/(t.km ⁻²)						
	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
100	0.160	0.403	0.564	-0.626	0.336	-0.402	-0.230
250	-0.136	0.130	0.655	-0.416	0.372	-0.666	-0.427
500	-0.161	0.072	0.847	-0.548	0.599	-0.567	-0.263
1000	-0.634	-0.462	0.763	-0.091	0.485	-0.797	-0.482
1500	-0.818	-0.706	0.522	0.288	0.265	-0.857	-0.612
1800	-0.874	-0.780	0.323	0.483	0.071	-0.875	-0.681
2000	-0.857	-0.739	0.405	0.390	0.135	-0.896	-0.681
4000	-0.720	-0.771	-0.495	0.921	-0.564	-0.398	-0.540
40000	-0.300	-0.530	0.636	0.179	0.707	-0.181	0.261

外,其他年份的流域产沙模数均与某些级别的沟壑密度呈现比较好的相关关系。其中 1963 年各流域的产沙模数与汇水面积阈值为 500、1000 个栅格提取的沟壑成比较好的正相关关系,而 1961、1962、1966、1967 年各流域的产沙模数与汇水面积阈值为 1500、1800、2000 个栅格提取的沟壑成较好的负相关关系,说明在年尺度上,流域产沙模数受毛沟主沟道以上级别的沟壑密度的影响比较大。在对岔巴沟流域的实地考察中发现,毛沟特别是毛沟的中、上部位是重力侵蚀频繁发生的部位,是流域侵蚀产沙的重要沙源地。该级别沟壑对流域侵蚀产沙影响最大。但产沙模数的大小不仅仅与沙源是否充沛有关,还与地表径流对泥沙的搬运能力有关。毛沟主沟道以上级别的沟壑,特别是主沟的中下游沟谷,沟底宽阔,比降较小,横剖面呈 U 型,部分沟床基岩出露,边滩和阶地平缓,因此,易于水流的入渗损失,坡面的汇流作用减小,主要以各级沟道网汇流的作用为主,沟道的侵蚀作用较小,主要是输沙的通道^[18]。因而毛沟主沟道以上级别的沟壑密度与产沙模数多成比较好的负相关关系。而 1963 年降雨强度不大,由前面分析,次暴雨产流不多时,沟坡是流域产沙的主要场所,沟壑密度大反而促进侵蚀产沙。1964 年各流域的产沙模数与汇水面积阈值为 4000 个栅格提取的沟壑成极好的正相关关系,这主要是 1964 降雨量比较大,当汛期产流比较大时,把上一年沉积在主沟道上的泥沙搬运走。此时,支沟主干道也是流域产沙的沙源地之一。

通过求出不同级别沟壑密度的差值,提取出沟壑的不同部位,并运用 SPSS 对流域沟壑不同部位与年产沙模数进行相关分析。通过相关分析发现,在年尺度上,与产沙模数相关性比较好的沟壑级别较次暴雨尺度下发生了变化。年产沙模数与沟壑密度的相关性比较好的沟壑级别比较集中,相关性比较好的级别不包括最大级别的沟壑(支沟以上的沟壑)与最小级别的沟壑(毛沟次级沟道以下的沟壑)。次暴雨间由于产沙、降雨波动比较大,与最大或最小级别的沟壑都存在比较好的相关性。而流域年尺度的产沙量是次暴雨产沙与部分时段基流产沙之和,减弱了次暴雨产沙的随机性与差异性,年尺度间的产沙模数变化要小于次暴雨尺度间的产沙模数变化。因而,在年尺度的产沙模数与中间级别沟壑密度的相关性比较好。由不同级别的沟壑密度的差值与年产沙模数的相关性分析可知,在年尺度

上,对侵蚀产沙影响比较大的沟壑为毛沟主沟道、支沟上游部分(即毛沟次级沟道以上,干沟主沟道以下级别的沟壑)。

2.4 不同级别沟壑与流域侵蚀产沙关系的探讨

沟壑不仅是泥沙的主要输移渠道,也是重要沙源地之一。重力侵蚀是黄土高原重要的侵蚀方式,朱同新等^[19]在晋西黄土地区研究发现,重力侵蚀量约占总侵蚀量的 35%~46%。重力侵蚀方式及强度与沟谷的不同发育阶段密切相关^[20],重力侵蚀在切沟、毛、支、干沟和河沟 3 个沟谷发育阶段的比例依次为 3%、92%和 5%。重力侵蚀在沟谷发育阶段的比例是以支毛沟的发育阶段为主。

根据沟壑的级别不同,对沟壑中产生的重力侵蚀物质进行分类,把沟壑不同部位产生重力侵蚀的物质分为对流域产沙“有效”与“无效”两部分。在岔巴沟以及部分支沟主干道,沟道大而平缓,两岸沟坡比较稳定,重力侵蚀也偶有发生,但由于该部位沟坡上部汇水面积不大,同时,沟道比较宽,在沟道径流比较小时,沟道中径流不经过重力侵蚀所产生的物质处,沟道旁、沟坡下虽然存在大量的重力侵蚀物质,但流水并不能将其搬运走(并不能产沙或产沙量非常小)。所以,在次暴雨这种小的时间尺度内,这部分重力侵蚀产生的物质对流域侵蚀产沙影响不大,可把这部分重力侵蚀物质归为“无效”部分。而小的沟壑(如毛沟中、上部)正在发育,沟道中重力侵蚀频繁发生,且沟道比较窄、径流比较集中,径流一般经过重力侵蚀产生的物质处。同时,由于小沟道中比降比较大,因而径流流速比较大,容易把重力侵蚀产生的物质带走。这部分重力侵蚀产生的物质对流域侵蚀产沙贡献比较大,可把这部分重力侵蚀产生的物质归为重力侵蚀对流域产沙的“有效”部分。因而,沟壑不同部位的沟壑密度对侵蚀产沙的影响也有所不同,在岔巴沟流域产生的重力侵蚀物质对产沙的“有效”部分主要是毛沟主沟道、支沟上游部分(即毛沟次级沟道以上,干沟主沟道以下级别),对流域侵蚀产沙的影响较大。

2.5 不同时间尺度下不同级别沟壑侵蚀产沙探讨

沟壑对流域侵蚀产沙的影响,不仅与沟壑的级别有关,还与侵蚀产沙的时间尺度有关。降雨量的变化量对重力侵蚀的影响极为显著^[21],丰水年尤其是有连绵阴雨季节的年份,往往会出现大型的地表水诱发型滑塌,在枯水年,水流掏蚀型及地表水诱发型崩塌明显减少。可以根据沟壑的发育阶段把不

同级别的沟壑分为现代沟与早期沟。汇水面积的阈值为 500 个栅格以下的沟壑为毛沟次级沟道以下的现代冲沟、切沟;汇水面积的阈值为 1000 个栅格以上的沟壑为毛沟以上的沟道,多为早期沟。现代沟(浅沟、切沟、悬沟)在汇流过程中仍然受水力侵蚀的影响,以下切、溯源侵蚀的方式为主,沟道本身是产沙的来源地之一。同时,现代沟正在发育,沟坡不大稳定,沟坡常有重力侵蚀发生,现代沟是流域侵蚀产沙的重要沙源地。而早期沟的沟坡由于经历了长时间的重力侵蚀,变得比较稳定,虽然重力侵蚀偶有发生,但对流域侵蚀产沙多为“无效”部分,主要侵蚀部位在沟头。早期沟的中下游一般比降比较小,且沟道流域的中下游沟床大多已经下切到基岩,沟道基本上无侵蚀。无论是在次暴雨尺度、年尺度、甚至多年平均尺度上,级别低的沟壑(现代沟)均可为流域产沙提供侵蚀、搬运物质。而级别比较高的沟壑(早期沟),在次暴雨尺度上,由于产流差异,在有的次暴雨事件中沟道有可能发生泥沙沉积,在有的次暴雨事件中有可能把沟道中沉积的泥沙搬运走,因而对流域侵蚀产沙还是有所影响。但在黄土丘陵沟壑区多年泥沙输移比接近于 1,即早期沟道中基本达到冲淤平衡,所以早期沟在年尺度,特别是多年平均尺度上,只起着泥沙输移通道的作用,不是流域产沙的沙源地,对流域侵蚀产沙影响不大。因而,在次暴雨尺度上,某些次暴雨产沙模数与汇水面积的阈值为 40000 个栅格以上的沟壑相关性比较好,而在年尺度下年产沙模数与汇水面积的阈值为 40000 个栅格以上的沟壑相关性不好。

3 结论

(1)沟壑密度并不是简单地随着流域面积的增大而减小,沟壑密度的空间尺度效应与所提取沟壑的级别有关。在黄土丘陵沟壑区,一般大级别沟壑的密度随着流域面积的增大而减小。

(2)黄土丘陵沟壑区梁峁坡、沟坡在次暴雨中产沙的比重大小与降雨特性有关。

(3)沟壑密度与产沙模数不是简单的成正相关关系,也不是每个级别沟壑密度都能与产沙模数成比较好的相关关系。沟壑密度与产沙模数的相关性大小受当地降雨特性、沟道级别等因素影响。在本研究领域,汇水面积的阈值为 1500、1800、2000 个栅格提取的沟壑对流域侵蚀产沙的作用较大。

(4)在黄土丘陵沟壑区重力侵蚀非常普遍,直接影响流域产沙量的大小,但重力侵蚀对流域产沙的作用可以分为“有效”与“无效”两部分。把重力侵蚀进行分类,对研究重力侵蚀对侵蚀产沙的贡献有重要意义。

(5)侵蚀产沙的时间尺度不同时,不同级别的沟壑对侵蚀产沙的影响也不一样。在次暴雨尺度大型沟道(早期沟)存在冲、淤变化,对流域产沙有影响,而在多年平均尺度,大型沟道(早期沟)内冲、淤平衡,只起到泥沙通道的作用;小型沟道(部分现代沟)无论是次暴雨尺度还是多年平均尺度下均是流域产沙来源地之一,对流域侵蚀产沙有影响。

参考文献

- [1] 杨传国,余钟波,林朝晖等.大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究.地理科学进展,2007,26(1):68~76.
- [2] 何福红,李勇,张晴雯等.基于 GPS 不同测量间距的 DEM 地形信息提取沟蚀参数对比.水土保持学报,2006,20(5):116~120.
- [3] 刘昌明,李道峰,田英等.基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究.地理科学进展,2003,22(5):437~446.
- [4] 王中根,朱新军,夏军等.海河流域分布式 SWAT 模型的构建.地理科学进展,2008,27(4):1~6.
- [5] Gandolfi C,Bischetti G B.Influence of the drainage network identification method on geomorphological properties and hydrological response.Hydrological Process,1997,11:353~375.
- [6] 朱红春,张友顺,汤国安等.基于 DEM 的黄土地貌类型提取与制图——以黄土高原丘陵沟壑实验样区为例.地球信息科学,2003,4:110~113.
- [7] 刘光,李树德,张亮.基于 DEM 的沟谷提取算法综述.地理与地理信息科学,2003,19(5):11~15.
- [8] O'Callaghan J F,Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data.Computer Vision,Graphics,and Image Processing,1984,28:323~344.
- [9] 卢金发.黄河中游流域地貌形态对流域产沙量的影响.地理研究,2002,21(2):171~178.
- [10] 吴成基,甘枝茂,孙虎等.陕北和陇中土壤侵蚀区域差异的地质地貌之剖析.水土保持学报,1995,9(4):49~55.
- [11] 白占国.从地貌空间结构特征预测土壤侵蚀的研究——以神府、东胜煤田区为例.中国水土保持,1993,12:23~24.
- [12] Schumm S A. The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy New Jersey.Geol.Soc.Am. Bull., 1956,67(3):596~646.
- [13] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1998,5~171.
- [14] 沈晶玉,史昌明,田玉柱等. DEM 网格尺寸与沟谷提取精度研究.中国水土保持,2007 (2):56~59.

- [15] 孙崇亮,王卷乐. 基于 DEM 的水系自动提取与分级研究进展. 地理科学进展,2008,27(1):119~124.
- [16] 李俊,汤国安,张婷 等. 利用 DEM 提取陕北黄土高原沟谷网络的汇流阈值研究. 水土保持通报,2007,27(2):75~78.
- [17] 王万忠,焦菊英,郝小品. 黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系.水科学进展,1999,10(2):165~169.
- [18] 陈浩,景可,蔡强国 等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究. 北京:气象出版社,1993,204~213.
- [19] 朱同新, 陈永宗. 晋西黄土地区重力侵蚀产沙分区的模糊聚类分析. 水土保持通报,1989,9(2):27~34.
- [20] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟壑类型. 地理科学,1984,4(4):321~327.
- [21] 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. 北京:科学出版社,1998,150~156.

Influence of Channel Networks on the Sediment Yield Under Variant Temporal and Spatial Scales:A Case Study of Chabagou Watershed

LIAO Yishan^{1,2,3}, CAI Qiangguo³, ZHUO Muning¹, ZHENG Mingguo³, LUO Xuan²

(1. Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Science, Guangzhou 510650, China;

2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University. Wuhan 430070, China;

3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Different threshold areas of catchments, expressed in 100, 250, 500, 1000, 1500, 1800, 2000, 4000 and 40000 pixels, were selected based on the DEM. The channel networks of six watersheds lying in Chabagou gully with different spatial scales and the deviation between them were extracted. Employing the long-term field observation data of Zizhou hydrological station within the Yellow River, the influence of different spatial scales channel networks and variant places of channel on sediment yield of watershed were analyzed. The results showed that no simple decreasing relationship existed between gully density and area of watershed and the spatial scale effects of gully density associated with the level of extraction. When the threshold areas of catchments equal to 4000 pixels, the gully density decreased gradually with the increase of areas of watersheds. The characteristics of rainfall event have impacts on the ratio of sediment yield during single rainfall events of the channel slopes to the total sediment yield of the watershed. The sediment yield of channel slopes composed the main source of the total sediment yield when the rainfall intensity was relatively low. But, the upslope makes a main contribution to the total sediment yield when the rainfall intensity was comparatively great. Mass movement developed frequently at the upriver and head of the gully, but the slopes of branch ditch and main ditch were fairly stable; furthermore, the mass movements of those places were inefficiency to the sediment yield of the watershed. The channel network extracted under threshold areas of 1500, 1800 and 2000 had the most significant contribution to the total sediment yield; meanwhile, the influence of channel network on the sediment yield of watershed associate with the time scales. The high-level channel was merely a transport passage of sediment under long-term time scale.

Key words: digital elevation model; temporal and spatial scales; sediment yield; loess hilly-gully area; gully