

文章编号: 1000-0585(1999)04-0363-10

黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究*

陈 浩¹, 王开章²

(1. 中国科学院地理研究所, 北京 100101; 2. 山东水利专科学校, 山东 泰安 271000)

摘要: 根据坡面水下沟时在沟坡(道)上“净产沙增量”的概念, 探讨了沿程含沙水流侵蚀特性的变化和坡沟侵蚀关系及产沙机理, 并采用成因分析法定量确定了典型小流域的泥沙来源。

关键词: 黄河中游; 小流域; 坡沟侵蚀关系; 泥沙来源

中图分类号: P333.4 文献标识码: A

1 概述

坡面(沟间地)与沟道(沟谷地)侵蚀关系研究源于小流域泥沙来源和水土保持治理措施设计的讨论。蒋德麒等人采用流域水量分配原理分析了不同地貌部位泥沙产生的根源, 认为黄河中游小流域的泥沙主要来自沟道, 但未考虑坡面径流通过沟坡时所增加的泥沙^[1]。关于坡面水下沟对沟道侵蚀产沙的影响首先由西峰水保站、山西水保所曾伯庆等人进行了研究, 他们认为坡面水下沟所增加的泥沙总量占小流域泥沙总量的 76% 以上^[3], 当坡面水被隔绝时, 沟坡的径流和产沙能力可分别减小 58.7% 和 77.8%^[2]。80 年代以来焦菊英等人研究表明, 由于坡面来水来沙可使沟坡的侵蚀产沙能力增加 70%^[4,5] 以上, 如果阻止坡面水下沟, 在大暴雨条件下径流和产沙量可分别减小 61% 和 84%^[6]。

但是, 由于研究方法的差异和手段的限制, 以往的许多研究并没有把坡面水下沟作为流域汇流与侵蚀产沙的动态过程来描述, 因此, 就难以把坡面水下沟的含沙水流侵蚀特性变化与坡沟侵蚀机理有效地联系起来, 也就难以解释清楚坡面水下沟时有多少坡面来的泥沙输移出沟坡、在沟坡上有无泥沙的沉积、含沙水流在搬运坡面下来泥沙时的侵蚀产沙量有多大、及当坡面水下沟时挟沙能力(含沙量)不同时, 含沙水流的侵蚀特性, 即侵蚀、输移、沉积特性的变化等, 此外, 目前小流域的泥沙来源是以地貌部位确定, 缺乏成因机制的确定成份。

本文根据黄河中游不同地貌类型区小流域水文测验资料, 在分析典型小流域坡沟侵蚀关系和产沙机理基础上, 以地貌部位成因分析法确定小流域的泥沙来源。

* 本文承蔡强国教授提出宝贵意见, 谨表谢意。

收稿日期: 1999-08-21; 修订日期: 1999-06-23

基金项目: 国家自然科学基金委和水利部联合重大基金资助课题(59890200)

作者简介: 陈浩(1954-)男, 山东鄄城人, 副研究员, 主要从事侵蚀地貌、土壤侵蚀、流水地貌等研究工作, 曾发表论文近 50 篇, 出版专著和参与编著各一部。

2 研究区概况

选定位于绥德韭园沟支沟王茂沟和离石王家沟支沟羊道沟及庆阳蒲河支沟南小河沟作为研究区，羊道沟、王茂沟位于黄土丘陵沟壑区，南小河沟位于黄土高原沟壑区，小流域的自然地理概况列于表 1。

表 1 典型小流域自然地理概况
Fig. 1 General situation of physical geography of the related small basins

项目名称		占流域面积 / %		面积比	年均雨量 / mm	土地利用	坡度 / (°)	坡度比	土 质
羊道沟	坡面	50.27		1.01	506.5	农地	17	0.472	黄土
	沟坡	49.73	47.68			荒地	36		黄土、红土
	沟床		2.05			水道	1~5		沙疆、卵石
王茂沟	坡面	44.4		0.799	518.3	农地	26.5	0.585	黄土
	沟坡	55.6	52.6			荒地	50.5		黄土、红土
	沟床		3			水道	1~5		沙岩、泥沙
南小河沟	坡面	56.86		0.799	504.1	农地	0~3	< 0.05	黄土
	沟道	43.14	42.08			农地、荒地	45~60		黄土、红土

注：坡度为观测场（丘陵区）流域（塬区）实测值；坡度比为坡面与沟坡坡度之比。

不同地貌类型区小流域的横剖面如图 1 所示，黄土丘陵区的小流域坡沟分界以蒋德麒等人的定义划分^[1]，以沟边线为界，其上为坡面，其下为沟道，在塬区坡沟分界稍有改动，以塬边分界，以上为坡面，以下为沟道。由表 1 表示，在研究区自然地理概况中地貌条件的差异较明显，塬区与丘陵区相比坡沟面积比大，坡面与沟坡的坡度比小，沟坡地形更加陡峻。在丘陵区羊道沟坡面面积稍大于沟道面积，而王茂沟坡面面积明显小于沟道，而且地面坡度均大于羊道沟。以上所选定的小流域在区域上有广泛代表性。

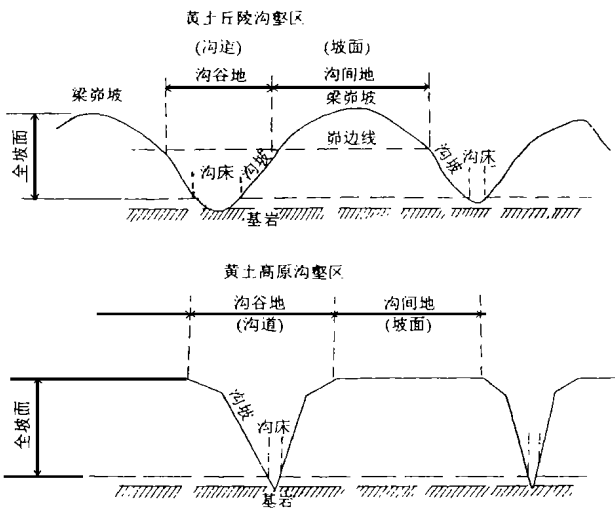


图 1 典型小流域横剖面示意图
Fig. 1 Sketch map of cross sections of typical small catchment

3 结果与分析

3.1 坡面水下沟的侵蚀作用

沟道小流域是黄河中游地区径流与泥沙的主要源地，坡面与沟道在流域的汇流与产沙中起到不同作用^[8~10]。坡面除本身的侵蚀作用外，还通过坡面水下沟影响沟道的侵蚀能力。

描述坡面水下沟在沟坡（道）中侵蚀作用的重要指标是它的“净产沙”能力，也就是说坡面水下沟搬运坡面来的泥沙时的侵蚀能力，其能力的定量指标可用“净产沙增量”表示，净产沙增量（ ΔS_n , t）是指坡面水下沟时全坡面（坡面+ 沟坡）或全流域的产沙量（ S , t）扣除坡面下来的泥沙（ S_p , t）和隔绝坡面来水时沟坡（道）产沙量（ S_w , t），可用下式表示：

$$S = S_p + \Delta S_n + S_w \tag{1}$$

$$\Delta S_n = S - S_p - S_w \tag{2}$$

满足上式的条件是 $\Delta S_n > 0$ ，当 $\Delta S_n = 0$ 时为仅考虑坡面含沙水流下沟在沟坡（道）的净产沙增量，而不考虑搬运出沟坡（道）来自坡面的泥沙及沟坡本身的侵蚀产沙，此时，坡面含沙水流已无力冲刷由侵蚀向输移或沉积转化。

实测资料表明（表2）在多次降雨条件下，羊道沟坡面水下沟在沟坡上的净产沙增量（ ΔS_n ）占全坡面产沙量（ S ）的 54.46%，而隔绝坡面来水时沟坡的产沙量（ S_w ）仅占 S 的 24.96%，坡面下来的泥沙（ S_p , t）占 20.81%，坡面下来的又输移出沟坡的泥沙（ S_b , t）占 20.58%。在羊道沟，

表2 坡面水下沟时侵蚀与搬走占产沙总量百分数
Tab.2 Percentage of ΔS_n , S_p and S_w account for total sediment yield (S) on the entire slope

项目名称		坡面	沟坡（道）			
		S_p	ΔS_n	S_w	S_b	S_c
丘陵区	羊道沟	20.81	54.46	24.96	20.58	0.23
	王茂沟	20.35	69.35	10.29	20.35	0
塬区	南小河沟	8.19	77.04	14.77	8.19	0

注：南小河沟为不同降雨重现期平均值。

坡面水下沟的侵蚀能力占全坡面产沙量（ S ）的 54% 以上，如果把坡面来的又输出沟坡的泥沙加在一起，由于坡面水下沟使沟坡的侵蚀产沙能力达到全坡面产沙量（ S ）的 75.04%，而在相同条件下，沟坡本身（不算坡面水下沟的作用）的产沙能力（ S_w ）不足 S 的三分之一。此外，在所统计的 28 场降雨中产生坡面水下沟泥沙沉积的次数为 5 次占 17.86%，泥沙沉积量平均占 5 次全坡面平均产沙量的 12.98%，而泥沙沉积总量仅占全坡面产沙总量（ S ）的 0.23%，显然，由于坡度的增加坡面水下沟时含沙水流具有较强的输移能力，从总体上看，坡面来的泥沙基本上全部输移出沟坡。在王茂沟沟坡的坡度比羊道沟还增大，坡面水下沟的净产沙增量（ ΔS_n ）已增至 S 的 69.35%，水流的输移能力也有所增加，在所分析的降雨资料中坡面下来的泥沙（ S_p ）已全部输移出沟坡，已无泥沙的沉积，输移出沟坡的泥沙量（ S_b ）与坡面产沙量（ S_p ）等量占 S 的 20.35%，而 S_w 仅占 S 的 10.29% 左右。在塬区的南小河沟，由于坡面面积大，其产流量已占流域产流量的 66.15% 以上，大量径流从塬面下泄，坡度从 3 左右增至沟道下部的 60 左右，水流具有较大的挟沙能力（ S_p 占 S 的 8.19%），坡面水下沟的净产沙增量（ ΔS_n ）增至流域产沙量（ S ）的 77.04%， S_p 与 S_b 等量，不存在泥沙的沉积。 ΔS_n 和 S_p 相加占 S 的 85% 左右，而 S_w 仅占约 15%。

由以上分析可知, 坡面水下沟时在全坡面或流域的侵蚀产沙中起决定性作用。
现代流域坡沟空间地貌形态特征的不同组合方式是地质时期至现代包括水蚀在内的内外力塑造的结果, 而现代地貌条件又反馈制约影响着径流和侵蚀产沙特性, 从坡面水下沟的侵蚀作用看, 塬区大于丘陵区; 在丘陵区地面坡度陡峻的王茂沟要大于地形相对平缓的羊道沟。

3.2 坡面水下沟时 Q_{Li} 与 S 的关系

就水蚀而言, 流域系统中侵蚀产沙的时空差异性, 主要取决于降雨与径流的时空变化特征。就泥沙从坡面向沟道输移而言, 几乎只取决地表径流的机械作用, 径流发生区就是产沙区^[11]。对于塑造地貌形态(微形态)而言, 地表径流起主要作用。因此, 在汇流的条件下坡面径流量就是影响沟道侵蚀产沙的主要侵蚀力指标。

由坡面水下沟时, 坡面来水率 (Q_{Li} , m^3/m) 分别与全坡面产沙率 (S_i , kg/m)、在沟坡上净产沙率 (ΔS_{ni} , kg/m) 的关系可以看出 (图 2), Q_{Li} 与 S_{ni} 呈幂函数关系 (表 3), 由方程式的基本性质可知, 指数 $0 < b < 1$, S_i 、 ΔS_{ni} 随 Q_{Li} 的增加而增大, 速率增加的愈来愈慢。比较在不同地貌条件下 Q_{Li} 相同时净产沙率 (ΔS_{ni}) 的速率变化, 将 ΔS_{ni} 与 Q_{Li} 关系式求导, 可以得到 ΔS_{ni} 随 Q_{Li} 变化的速率方程 (V):

羊道沟

$$V = 90.43Q_{Li}^{-0.508} \tag{3}$$

王茂沟

$$V = 510.8Q_{Li}^{-0.214} \tag{4}$$

由上式可以看出, 当 Q_{Li} 为 1 时, 王茂沟速率是羊道沟的 5 倍以上。因此, 在坡面水下沟时, 坡面来水率 (Q_{Li}) 就可以作为表征坡面水流侵蚀影响的水力特征指标。

表 3 Q_{Li} 与 ΔS_{ni} 、 S_i 的关系式

Tab.3 Equation of relationship of among Q_{Li} with S_i , and ΔS_{ni}

流域名称	方程式	相关系数 r	样本数量 n
羊道沟	$\Delta S_{ni} = 183.8Q_{Li}^{0.492}$	0.55	23
	$S_i = 569.9Q_{Li}^{0.682}$	0.765	28
王茂沟	$\Delta S_{ni} = 649.9Q_{Li}^{0.786}$	0.931	9
	$S_i = 1052.2Q_{Li}^{0.841}$	0.951	9

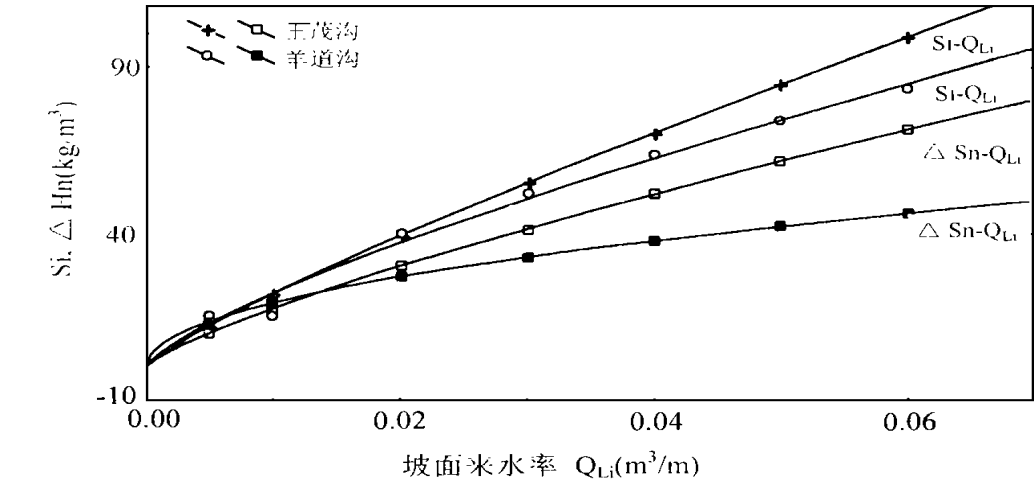


图 2 Q_{Li} 与 S_i 、 ΔS_{ni} 的关系

Fig.2 Relationship of among Q_{Li} with S_i , and ΔS_{ni}

3.3 坡面水下沟时含沙水流的侵蚀特性

坡面水下沟时含沙水流的侵蚀特性是指单位水体含沙量不同时水流侵蚀能力的变化，也就是说当坡面水下沟时搬运来自坡面的泥沙时侵蚀产沙增量的变化。它涉及到坡面径流侵蚀作用分带性的讨论，目前尚未达到统一的认识^[7]。国内外一般存在以下几种观点，一种认为由径流深度的增加而增大；一种认为由于含沙量自上而下增加，水流的能量主要用于输沙，相应的侵蚀能力减小；一种认为基于上述原因的存在，冲刷强度从上而下是相同的；另外二种观点是针对黄河中游地区黄土坡地的，一种由均匀坡面的研究认为，当坡长增加时，由于受入渗损失的影响，存在侵蚀率发生变化的临界坡长，另一种针对小流域横剖面研究认为，由于坡度的增加使水流动能增大，小流域横剖面具有侵蚀方式、入参与产流及侵蚀强度的垂直分带性。上述分歧的存在客观反映了不同自然地理环境及降雨特性和下垫面差异的综合影响，由于人们分析问题的角度不同结论也不会相同。此外，由于研究手段的限制也是难以确定含沙水流特性变化时冲刷、搬运和沉积能力变化的重要原因。

由坡面水下沟坡面输入水流平均含沙量 (H_{si} , kg/m^3) 与沟坡 (道) 输出的水流平均含沙量 (H_{so} , kg/m^3) 的关系，并由净产沙概念和原理得到坡面水下沟时单位体积水流 (单位水体) 侵蚀特性变化时的侵蚀、输移和沉积的定量特征值，可用下式表示：

$$H_{so} = H_{is} + H_w + \Delta H_n \tag{5}$$

$$\Delta H_n = H_{so} - H_{si} - H_w \tag{6}$$

式中 ΔH_n 为单位水体净产沙增量 (kg/m^3)， H_w 为隔绝坡面来水时沟坡平均含沙量 (kg/m^3)。

黄河中游黄土地区是易形成高含沙水流地区，据研究黄土丘陵区坡面上形成细沟时的含沙量已达 $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，全坡面的相对极限含量可达 $990 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[12]。根据实测资料，羊道沟次降雨坡面最大含沙量达到 $818 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。由表 4 中坡面输入的最大、平均、最小含沙量 (H_{si}) 与它在沟坡上单位水体侵蚀特性的变化可以看出，坡面输入的含沙量 (H_{si}) 愈小，单位水体的净产沙能力 (ΔH_n) 愈大，反之， H_{si} 输入的愈大，单位水体的 ΔH_n 就愈小，并当 H_{si} 达到某个临界值后，坡面来水单位水体出现泥沙的沉积，之后随 H_{si} 的增加泥沙的沉积能力增大。不过由表 4 中 H_{si} 与 H_{so} 的变化可知，当输入 H_{si} 值增加时，沟坡输出的 H_{so} 具有同

表 4 H_{si} 不同时，含沙水流侵蚀特性变化特征值

Tab. 4 Erosion characteristic of flow with silt content in gully slope for various H_{si}

项目名称		坡面		沟坡 (道)							
		H_s	H_{so}	$Z/\%$	ΔH_n	H_w	H_s	ΔQ	$H_{so}/H_{is}/\%$	$\Delta H_n/H_{is}/\%$	
丘陵区	羊道沟	最大	818	889		- 324	395	71	15	109	- 40
		平均	372	626	168	- 29	283	254	10	168	- 8
		最小	33	625		410	181	592	2	1 875	1 232
	王茂沟	最大	679	783		- 201	305	104	13	115	- 30
		平均	293	557	190	43	222	264	7	190	15
		最小	13	333		308	11	319	1. 6	2 577	2 390
塬区 南小河沟		平均	89	701	790	321	291	612	202 284	7 897	362

注：南小河沟 H_{is} 在 $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下，取不同重现期的平均值；为消除随机影响在丘陵区的最大含沙量为在 $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 范围内最大含沙量平均值。 $H_s = H_{so} - H_{is}$ ，沟坡扣除坡面来沙的含沙量； ΔQ ——是全坡面 (流域) 产流量减去坡面产流量。

步增大的绝对值, 因此, 当输入沟坡的含沙量增加时, 单位水体的沉积和输移能力成比例增大, 由于沟坡的坡度较陡水流的输移能力 (H_{so}/H_{si}) 要明显大于沉积能力 ($-\Delta H_n/H_{si}$), 不同地貌条件相比较, 南小河沟坡面来水量大含沙量较小, 水流的挟沙能力和单位水体的净产沙能力 (ΔH_n) 最大 (平均), 坡面与沟道输入与输出含沙量的增加率 ($Z, \%$) 是丘陵区小流域的 4 倍以上。在丘陵区, 王茂沟与羊道沟相比, 坡面水下沟时的单位水体净产沙能力和输移能力 ($Z, \%$) 均有明显增强。

为了确定坡面水下沟时含沙水流由侵蚀向输移转化的临界条件, 由单位水体净产沙增量 (ΔH_n) 与输入水流含沙量 (H_{si}) 的关系可以看出 (图 3), 坡面输入水流含沙量 (H_{si}) 增加时它在沟坡上的净产沙增量 (ΔH_n) 呈递减的线性关系, 可用下式描述:

羊道沟
$$\Delta H_n = 251.99 - 0.7895H_{si} \quad r = 0.782 \quad n = 28 \tag{7}$$

王茂沟
$$\Delta H_n = 294.29 - 0.813H_{si} \quad r = 0.735 \quad n = 9 \tag{8}$$

由图 3 所示, 若仅考虑坡面水下沟的侵蚀作用 (ΔH_n , 不算坡面泥沙从沟坡的输出量), 当坡面输入的水流含沙量 (H_{si}) 增加时, 其单位水体的侵蚀能力不断减小, 并当输入水流含沙量 (H_{si}) 达到某个临界值时, 已无力冲刷, 当输入的 H_{si} 继续增加时, 坡面来水单位水体是以沉积的方式为主, 并随 H_{si} 的增加沉积能力不断增大。而事实上 (图 3) 坡面水下沟时是不会单独作用于沟坡上的, 沟坡出口的侵蚀产沙量受到坡面水流搬运能力和沟坡本身 (不考虑坡面水下沟的作用) 侵蚀产沙的影响和相互作用。虽然含沙量增加时水流的能量主要用于搬运泥沙, 而产沙能力减小, 但由于坡面水下沟时坡面水流搬运能力 (H_p) 和沟坡本身的侵蚀产沙能力 (H_w) 随坡面单位水体输入泥沙量 (H_{si}) 的增大而增加, 所以, 沟坡输出断面仍然具有坡面输入量 (H_{is}) 越大沟坡输出量 (H_{so}) 越大的产沙特征, 只不过是处于坡面水下沟含沙量的增加使冲刷能力减小, 致使沟坡输出增大的速率不断减小。因此, 坡面水下沟时输入 H_{si} 的临界值实际上反映了含沙水流在沟坡上由冲刷分离向输移搬运转化的水流能量转换点。当 H_{si} 达到临界值之前, 含沙水流的能量在搬运坡面来的泥沙时冲刷土壤挟带泥沙, 只是含沙量越大挟带泥沙的能力越小。当 H_{si} 达到临界值挟沙能力达到饱和时, 下沟坡面水流转为搬运泥沙, 并当小流量时挟沙能力达到饱和造成泥沙的沉积。含沙

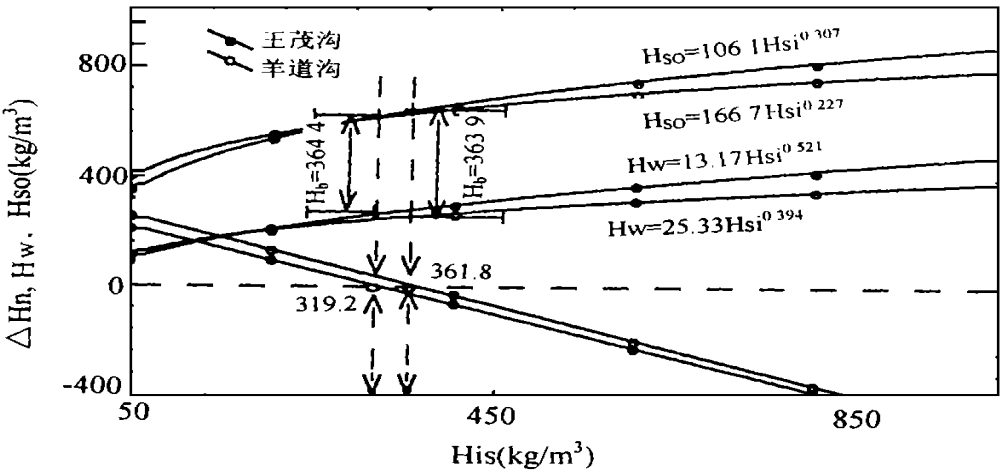


图 3 ΔH_{si} 与 ΔH_n 、 H_{so} 、 H_w 的关系

Fig.3 Relations among H_{si} with ΔH_n , H_w , and H_{so}

水流侵蚀与输移的临界转化点提供了一个重要信息,当 H_{si} 达到临界值之前,坡面水下沟的侵蚀能力大,泥沙产生的地貌部位主要是沟坡,当 H_{si} 达到临界值之后,泥沙主要来自坡面。经回归模型的计算可得到羊道沟和王茂沟坡面水下沟时在沟坡上冲刷与搬运能量转化的临界坡面输入含沙量(H_{si})分别为 319.2 kg/m^3 和 361.8 kg/m^3 。

由坡面输入的 H_{si} 与 H_{so} 、 H_w 、 ΔH_n 的关系变化可以看出(图3),当 H_{si} 达到临界值前单位水体坡面输移量(H_b , kg/m^3)是 H_{so} 与 ΔH_n 或 H_w 的差值,而当 H_{si} 达到临界值后 H_b 就是 H_{so} 与 H_w 的差值,将坡面水下沟时坡面输入的 H_{si} 达到临界值前后 ΔH_n 、 H_b 、 H_w 值列于表5,可以反映坡面水下沟时含沙水流侵蚀特性的变化规律。

表5 临界 H_{si} 值前后 ΔS_n 、 S_b 特征值

Tab.5 Characteristics of ΔH_n , H_b and H_w before and after reaching critical values (H_{sic})

H_{si}	100	200	临界 319.2	400	800	H_{si}	100	200	临界 319.2	400	800
ΔH_n	1783	94	0	- 64	- 380	ΔH_n	213	94	0	- 31	- 356
羊道沟 H_b	301	345	364	373	396	王茂沟 H_b	224	332	364	370	397
H_w	159	210	253	277	265	H_w	145	208	284	298	429

此外,表4中 H_{si} 的变化与沟坡上的产流能力(ΔQ , m^3)成正比,不存在入渗损失,所以坡面水下沟时单位水体的能量变化主要与水流的挟沙能力有关。

3.4 Q_L 、 H_{si} 对 S 影响的交互作用

如上所述,坡面来水量(Q_L)和输入水流含沙量(H_{si})是影响沟坡(道)侵蚀产沙和水流侵蚀特性变化的重要因素。由于在天然降雨条件下坡面汇入水量和含沙量是不确定的,相同的水量含沙量不一定相同。为了揭示坡面来水来沙对沟坡的侵蚀机理,就要认识当 Q_L 或 H_{si} 定时或均发生改变时对 S 的影响和交互作用。由实测资料统计与分析可以得到 Q_L 、 H_{si} 对 S 影响的二元幂函数关系:

羊道沟 $S = 0.505Q_L0.727H_{si}0.273 \quad r = 0.76 \quad n = 28$ (9)

王茂沟 $S = 0.533Q_L0.606H_{si}0.317 \quad r = 0.961 \quad n = 9$ (10)

由实测资料选定 Q_L 、 H_{si} 的设计值,经多项式回归分析,并通过 $F_{0.01}$ 水平检验保留显著项,得到 Q_L 、 H_{si} 对 S 的影响的二元二次正交多项式回归模型:

羊道沟 $S = - 0.4077 + 0.962Q_L + 0.0119H_{si} + 0.0007Q_LH_{si} - 0.0116Q_L^2 - 0.00001H_{si}^2$ (11)

王茂沟 $S = - 1.084 + 2.922Q_L + 0.008H_{si} + 0.0006Q_LH_{si} - 0.1047Q_L^2 - 0.000005H_{si}^2$ (12)

由于模型中存在 Q_L 或 H_{si} 对 S 的影响的交互作用项(Q_LH_{si}),因此,偏回归系数随 Q_L 、 H_{si} 取值水平而异,当 Q_L 或 H_{si} 取值水平一定时, S 随 Q_L 或 H_{si} 的变化呈二次抛物线关系(图4),由图4可以看出,当 Q_L 一定时, S 随 H_{si} 的增加而增大,增加速率愈来愈慢,并当 H_{si} 增加到某个临界值时 S 达到最大值,随后 H_{si} 增加 S 有减小的趋势, Q_L 取值水平变化时, S 随 H_{si} 变化的临界值也随之改变, Q_L 值愈濒临临界坡面来水含沙量(H_{si})值愈小,反之, Q_L 值愈大临界 H_{si} 值就愈大。当 H_{si} 取值水平一定时, H_{si} 值愈小达到临界 Q_L 值就愈小, H_{si} 值

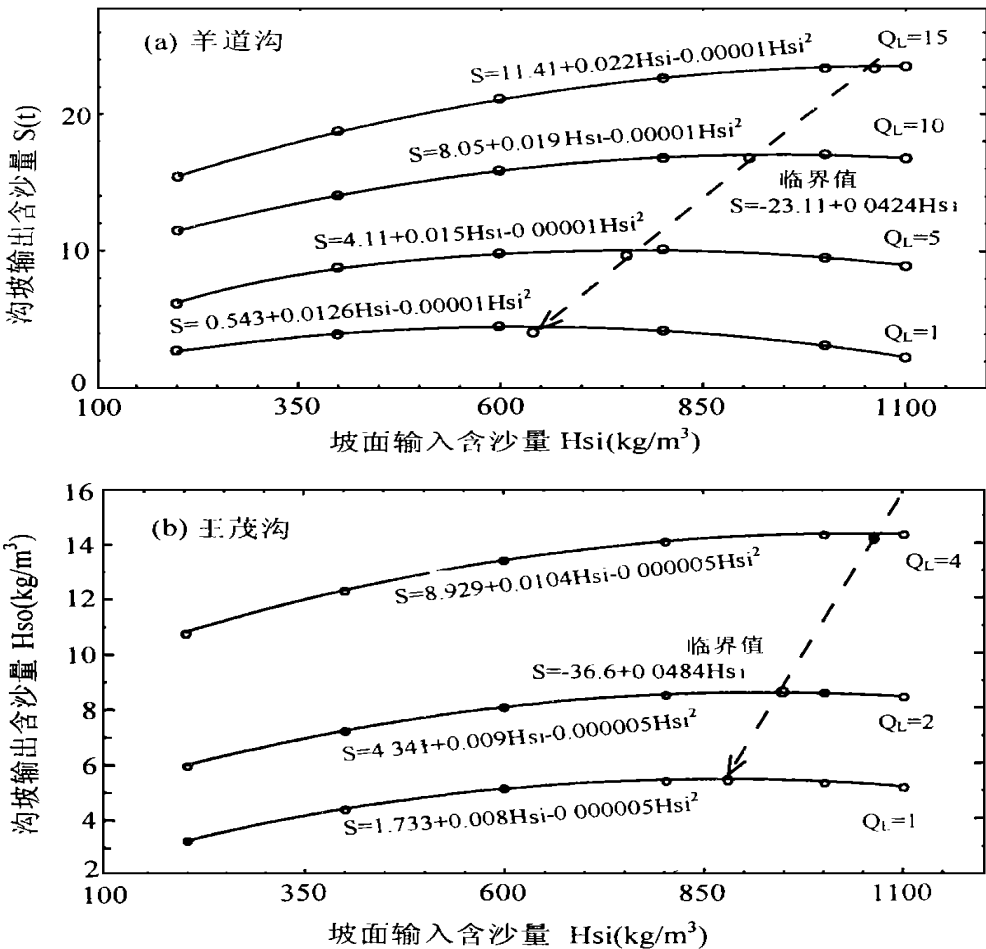


图4 Q_L 、 H_{si} 对 S 影响的交互作用

Fig.4 Interactions of Q_L and H_{si} with sediment yield (S)

愈大 Q_L 值愈大, Q_L 与 H_{si} 对 S 影响相辅相成的变化规律。因此,当坡面输入含沙量增加时,尤其是当高含沙水流汇入时,相同水流含沙量 Q_L 值愈小,水流的挟沙能力就愈先达到饱和,易先发生泥沙的沉积。在王茂沟, Q_L 、 H_{si} 对 S 的影响的交互作用差异是在偏回归系数上,当 Q_L 或 H_{si} 取值水平一定时,达到 H_{si} 临界值时的 Q_L 较小而产沙极值明显增大(表6)。当 Q_L 一定时, S 随 H_{si} 变化的变化的临界坡面输入含沙量,就是坡面水下沟时含沙水流输移向沉积转化的临界转换点,由表6所示, Q_L 值愈大含沙水流输移向沉积转化的 H_{si} 值就愈大,不过 Q_L 与实测资料 H_{si} 输入相对照,除羊道沟当 Q_L 值较低时($Q_L=1$)与实测资

表6 Q_L 不同时临界 H_{si} 特征值

Tab.6 Critical values of H_{si} in gully slope for various Q_L

Q_L/m^3		1	2	4	Q_L/m^3		1	5	10	15
王茂沟	临界 H_{si}	873	934	1 058	羊道沟	临界 H_{si}	626	761	920	1 095
	极值/t	5.54	8.7	14.53		极值/t	4.47	7.34	16.67	23.4

料相符外, 其它不论是羊道沟或王茂沟 Q_L 的设计值的实测含沙量 (H_{si}) 均小于坡面输入含沙量, 均未达到输移向沉积转化时的临界值, 表明坡面水下沟时随 H_{si} 的输入沟坡水流仍具有挟沙能力, S 值随 H_{si} 值的增加而增大, 只是增加的速率愈来愈慢。

3.5 小流域的泥沙来源

确定小流域的泥沙来源一直是有关研究和管理部门关注的问题, 由于它涉及到在什么地貌部位, 采取何种措施优化小流域水土保持治理与决策。自 50~60 年代至今一直是人们不断探索的问题之一。

自蒋德麒等人的小流域泥沙来源研究以来, 目前一般存在二种意见, 一种认为泥沙主要来自沟道; 另一种认为来自沟道的泥沙主要受坡面水下沟的影响, 并引发坡沟关系的讨论。但在确定小流域的泥沙来源时, 包括已讨论过坡沟关系的研究在内均是以地貌部位确定^[2, 3], 也就是不论坡面来水的侵蚀作用如何, 最终是以泥沙产生的具体部位确定。这样, 黄河中游的小流域泥沙主要来源于沟道。

但是, 以地貌部位确定泥沙来源其泥沙成因不够明确, 不能体现所确定的地貌部位在流域汇流与产沙过程中所起到的侵蚀作用和产沙地位, 就有可能夸大或减小某个地貌部位的侵蚀作用, 而且所确定的地貌部位并不一定是优先考虑治理的最佳部位, 例如, 如上所述, 把坡面水下沟的侵蚀作用在沟坡上增加的泥沙算在沟道的帐上, 显然削弱了坡面在流域汇流与产沙中的作用, 也与黄河中游地区“治坡为主, 坡沟兼治”的治理方针在概念上也不完全一致。所以, 从小流域坡沟泥沙产生的成因机理分析与确定小流域的泥沙来源, 不仅可体现坡沟在流域汇流与产沙中的作用, 而且所确定的地貌部位泥沙来源更具有直观性和合理性。

以小流域不同地貌部位泥沙产生的成因机制确定泥沙来源, 就要把来自沟道的泥沙与部分坡面水下沟产生的泥沙区分开来, 按成因分析法这部分的泥沙就应算在坡面起的侵蚀作用上。由于塬区南小河沟资料涵盖了整个小流域, 故可按成因分析直接确定(表 7)。由于黄土丘陵区资料来源于黄土沟坡, 因此需要利用折算系数 (K) 来修正。根据山西

表 7 典型小流域的泥沙来源

Tab. 7 Sediment sources of small basins

项目名称		成因分析法	地貌部位确定法
		平均占流域产沙量/ %	平均占流域产沙量/ %
羊道沟	坡面	55.98	17.882.2
	沟道	44.02	
南小河沟	坡面	85.23	8.19
	沟道	14.77	91.81

注: 南小河沟为不同降雨重现期 5、10、20 年一遇平均值。

水保所羊道沟具有横向可比性九种地类平衡计算的成果资料, 可以得到多年次降雨条件下确定的小流域泥沙来源。并可由下式求得:

来源于坡面的泥沙为
$$L_p = (\alpha_i M_p + \beta k M_g \alpha_c) / M \tag{11}$$

式中 M 为流域侵蚀模数 (t/km^2), M_g 、 M_p 为沟道和坡面侵蚀模数, α 、 α_c 为坡、沟占流域面积比, k 为沟坡土质折算系数, 由黄土沟坡与其它三种沟坡中微地貌类型黄土与红土比例系数(如黄土沟坡, 黄土沟头凹型坡 $k=1$, 红土沟坡 $k=M_{红}/M_{黄}$, M 是某种土质沟坡侵蚀模数)求平均得到 $k=0.891$; β 为沟道中坡面水下沟侵蚀模数折算系数, 次降雨 β 由式(2)换算求得。

来源于沟道的泥沙为
$$L_g = \alpha_c (M_g - M_g k \beta) / M \tag{12}$$

由表 7 用成因分析法确定的小流域泥沙来源, 羊道沟与南小河沟坡面分别占 55.98%

和 85.23%，沟道分别占 44.02 和 14.77。

以上分析表明，在黄河中游小流域采取“治坡为主，坡沟兼治”的治理方针是十分正确的。

参考文献:

- [1] 蒋德麒, 赵诚信 等. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析[J]. 地理学报, 1966(1): 20~25.
- [2] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水土流失规律及其治理效益[J]. 人民黄河, 1980(2): 34~39.
- [3] 西峰水保站. 南小河沟流域综合治理增产减沙效益分析[J]. 山西水土保持科技, 1976(2).
- [4] 焦菊英, 刘元宝 等. 小流域沟间与沟谷地径流泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报, 1992(2): 24~28.
- [5] 陈浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 17~23.
- [6] 蔡强国, 王贵平 等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 科学出版社, 1998. 146~147.
- [7] 陈浩 等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究[M]. 气象出版社, 1993. 46~50.
- [8] 陈永宗. 黄土高原沟道流域产沙过程初步分析[J]. 地理研究, 1983, 2(1): 35~47.
- [9] 景可, 陈永宗. 我国土壤侵蚀与地理环境关系研究[J]. 地理研究, 1990, 9(2): 29~38.
- [10] 陆中臣. 流域侵蚀产沙和物质转移[J]. 地理研究, 1989, 8(2): 101~111.
- [11] 柯克比 M J 等著. 王礼先 等译. 土壤侵蚀[M]. 水利出版社, 1985. 183~187.
- [12] 王兴奎, 钱宁 等. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程[J]. 水利学报, 1982(70): 26~35.

A study on the slope-gully erosion relationship on small basins in the loess areas at the middle reaches of the Yellow River

CHEN Hao¹, WANG Kai-zhang²

(1. Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Shandong Water Conservancy Technical College, Shanong Taian 271000, China)

Abstract: The erosion characteristics of the upper slope runoff and the slope-gully erosion relationship are discussed based on the data of runoff and sediment yield from gauging stations in the loess areas at the middle reaches of the Yellow River. Sources of sediments in typical small catchment are determined based on the concept of net increment of sediment yield by using analytical method of sediment formation at different positions in a catchment. The result shows that sediments in a small catchment at the middle reaches of the Yellow River mainly come from slopes. This paper indicated that the sediment sources from slopes are roughly 55, and 85 percent of the total sediment yield of the small catchments in Yangdaogou, and Nanxiaohogou, respectively, due to impacts of varying degrees from upper slope runoff. Under a critical condition, erosion characteristics of slope would change. In yangdaogou and wangmaogou, the critical value are about 319 kg/m³ and 362 kg/m³ under multi years (or multi times) rainfall condition, respectively.

Key words: small watershed; slope-gully erosion relationship; sediment sources; the middle reaches of the Yellow River