

陕北黄土高原沟道小流域形态特征分析*

陈 浩

(中国科学院地理研究所)

提 要

本文就黄土高原不同地貌类型区的小流域进行了形态量计分析。并以河网密度为地表切割程度指标,建立了河网密度与流域形态要素的复相关方程式。

沟道流域是黄土地区侵蚀地貌的基本单元,研究流域的形态特征,分析流域形态之间的相互关系,有助于认识沟道发育的规律。

为了研究的内容具有代表性,本文选取黄土丘陵区 and 黄土塬区各二个流域作为研究区域。杏树台、尚家圪塔小流域分别位于陕西省安塞县和绥德县境内,属于黄土丘陵区。南村、连达沟小流域位于陕西省黄陵县境内,属于黄土塬区,上述小流域均属于半干旱气候区,年降水量在500毫米左右,多集中在7、8、9三个月,并常以暴雨为主。

基本数据由1:10000地形图量测。量计沟谷最小长度为50米。采用A.N.Strahler的水道分级方法^[1],流域形态要素的基本数据列于表1。

一、水系结构的基本规律

将表1的数据进行统计分析,其结果列于表2。从表2可知,除塬区水道总长度与水道级别关系较差外,不同地貌类型区的其它各测量要素与水道级别皆成良好的半对数直线关系,这些关系基本与承继成等人^[2]对丘陵区分析的结果相一致。本文仅就下面的问题进行分析。

1. 关于水道总长度(L)与水道级别(S)的关系 塬区水道总长度与水道级别关系较差,其原因主要是在土质、降水量、植被复盖度相近似的条件下,地貌特征对沟道发育起到重要影响。丘陵区小流域的沟间地与沟谷地所占面积比较接近,沟间地侵蚀较强,易于发生沟蚀。塬区沟间地坡度较缓,一般仅有面蚀,强烈侵蚀主要集中在沟谷地中。由于沟谷地谷坡的坡度很大,其上发育的沟谷多以大角度汇入干流。构成干流长大支流短小的羽毛状水系,干流长度在流域中占的比例一般大于丘陵区。此外,不同地貌类型区小流域内低级水道向高级

本文1984年6月7日收到,1985年5月7日收到修改稿。

* 本文承陈永宗同志指导,景可、蔡强国等同志提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

表 1 沟道小流域的形态要素特征值
Morphological feature of small channel drainage basins

地貌类型	流域名称	水道级别 (S)	水道数目 (N _s)	流域平均面积 (平方公里) (\bar{A})	水道平均比降 (%) (\bar{I})	流域地形平均坡降 (%) (\bar{J})	水道平均长度 (公里) (\bar{L})	流域平均高差 (公里) (H)	水道总长度 (公里) (L)
丘陵区	杏树台	1	450	0.016	509	490	0.1277	0.1064	57.5
		2	100	0.08	281	407	0.2215	0.1693	22.15
		3	17	0.4247	102	269	0.5776	0.2183	9.82
		4	2	4.15	36	124	2.115	0.2833	4.23
		5	1	12.62	16	51	2.8	0.341	2.8
	尚家圪塔	1	312	0.0232	371.6	375.6	0.1513	0.0879	47.19
		2	61	0.1349	149.2	230	0.3498	0.1424	21.34
		3	14	0.505	117.1	161.1	0.5221	0.1756	7.31
		4	2	3.31	71	87	1.685	0.2593	3.37
		5	1	11.51	24.1	48	3.74	0.391	3.74
塬区	南村	1	158	0.0449	487.7	324.6	0.1493	0.0909	23.6
		2	34	0.2115	213.7	196.2	0.2629	0.1257	8.94
		3	4	0.8835	82.9	169.3	0.4675	0.1398	1.87
		4	1	9.09	21	37	4.28	0.239	4.28
	连达沟	1	68	0.0314	527.6	290.5	0.1423	0.1007	9.678
		2	12	0.1446	187.9	213.7	0.2708	0.1196	3.25
		3	2	0.543	68.6	121.7	0.465	0.145	0.93
		4	1	2.232	36.3	68.3	2.02	0.2288	2.02

水道入汇的数目也明显不同(表3)。丘陵区低级水道向高级水道入汇的条数基本上随水道级别的增加而减小。而塬区低级水道向高级水道入汇是极不规则的。例如南村小流域, I级支流汇入 II级支流的数目为15条, 而 I级支流汇入 IV级的为47条。因而, 塬区的水道总长度与水道级别不表现为几何级数关系。由此可见, 水道总长度规律不具有普遍意义。

2. 平均分枝比 r_b 和平均落差比 r_H 分枝比是指流域内某一级水道数目与高一级水道数目之比。流域平均分枝比 r_b 反映了流域的平均切割程度。就地形发育角度而言, 在某个流域内平均分枝比愈大, 流域内沟道数目愈多, 地形愈破碎。塬区南村和连达沟两流域的平均分枝比分别为5.25和5.6。丘陵区杏树台和尚家圪塔两流域的平均分枝比分别是4.83和5.04。

落差比是相邻二级流域高差之比, 平均落差比的大小, 反映了流域水势能的大小。C·T·Yang (1971) 从Entropy (熵) 的概念^[3], 认为流域在常态下, 即在动力平衡状态下, 落差比为1。落差比大于1, 河道处于侵蚀阶段; 落差比小于1, 河道处于堆积阶段。南村和连达沟两流域的平均落差比分别为1.44和1.37, 杏树台和尚家圪塔两流域的平均落差比分别

• 平均分枝比采用A·N·Strahler的计算方法求得。

表 2 流域形态要素与水道级别关系式
The relationship between morphological factors and stream order

地貌类型	流域名称	方 程 式	相 关 系 数 r	流域名称	方 程 式	相 关 系 数 r
丘陵陵区	杏	$\text{Log}L = 5.054 - 0.3398S$	-0.992	尙	$\text{Log}L = 7.979 - 0.3284S$	-0.956
		$\text{Log}\bar{L} = 1.631 + 0.378S$	0.984		$\text{Log}\bar{L} = 1.789 + 0.353S$	0.991
	树	$\text{Log}N = 3.3757 - 0.7129S$	-0.991	家	$\text{Log}N = 3.117 - 0.6572S$	-0.992
		$\text{Log}\bar{A} = 0.4204 + 0.7569S$	0.996		$\text{Log}\bar{A} = 3.715 + 0.6805S$	0.998
	台	$\text{Log}\bar{J} = 3.1018 - 0.2653S$	-0.967	圪	$\text{Log}\bar{J} = 2.818 - 0.2219S$	-0.995
		$\text{Log}\bar{I} = 3.163 - 0.3926S$	-0.996		塆	$\text{Log}\bar{I} = 2.858 - 0.283S$
		$\text{Log}\bar{H} = 1.934 + 0.1273S$	0.985			$\text{Log}\bar{H} = 1.798 + 0.1574S$
塬区	南	$\text{Log}L = 1.5329 - 0.29039S$	-0.8003	连	$\text{Log}L = 1.08905 - 0.2584S$	-0.784
		$\text{Log}\bar{L} = 1.4029 + 0.5284S$	0.94		$\text{Log}\bar{L} = 1.6598 + 0.3917S$	0.97
	村	$\text{Log}N_s = 3.9299 - 0.75744S$	-0.997	达	$\text{Log}N_s = 2.423 - 0.6479S$	-0.984
		$\text{Log}\bar{A} = 3.6097 + 0.7643S$	0.993		$\text{Log}\bar{A} = 3.9015 + 0.6135S$	0.999
		$\text{Log}\bar{J} = 3.007 - 0.3426S$	-0.92	沟	$\text{Log}\bar{J} = 2.7203 - 0.2168S$	-0.991
		$\text{Log}\bar{I} = 3.209 - 0.4576S$	-0.993		$\text{Log}\bar{I} = 3.0904 - 0.39696S$	-0.995
		$\text{Log}\bar{H} = 1.7956 + 0.1399S$	0.966		$\text{Log}\bar{H} = 1.8432 + 0.1229S$	0.99

表 3 低级水道向高级水道入汇数目表
The number of low order stream intersected to high order stream

流域名称	水道数目	级别									
		I-I	I-II	I-IV	I-V	I-II	I-IV	I-V	II-IV	II-V	IV-V
杏 树 台		324	82	27	17	67	19	14	10	4	2
尙 家 圪 塆		236	44	17	12	36	8	17	11	6	2
南 村		94	15	47		13	21		4		
连 达 沟		40	10	18		5	7		2		

为1.31和1.46。

上述4例的平均分枝比在4.8到5.6之间,表明黄土高原地面十分破碎,平均落差比都大

于 1，表明本区的水系正处于侵蚀发育阶段。

此外，虽然丘陵区小流域的整体地形要比塬区破碎，但上述 4 例中各流域的平均分枝比，塬区却大于丘陵区。这主要与不同地貌条件下的水系形态有关。塬区水系呈羽毛状结构，使其支流再分枝产生困难，故分枝比较丘陵区的树枝状水系大。不过，由于塬区流域有较大面积的未被分割的沟间地，其沟道侵蚀发展的潜在威胁要大于丘陵区。

3. 平均入汇角 ($\bar{\theta}$) 平均入汇角是指流域内某级水道向高级水道入汇的平均角度。R·E·Horton (1932)¹⁾ 曾指出，水道入汇角主要取决于支流与干流的比降差。比降差愈大，入汇角愈大。在无特殊的构造运动影响下，水道的入汇角一般以 90 度为极限。

从地形图上量测经计算得出各级水道平均入汇角列于表 4。塬区各级水道的平均入汇角大于丘陵区。而且平均入汇角随水道级别的增加而增大。流域内水道的级别愈高，总的平均比降差愈大，故平均入汇角相应增大。平均入汇角 ($\bar{\theta}$) 与水道级别 (S) 存在半对数直线关系 (图 1)，其关系式杏树台流域为 $\text{Log}\bar{\theta} = 1.7298 + 0.0565S$ ，相关系数 (r) 为 0.968，尕家圪塔流域有 $\text{Log}\bar{\theta} = 1.7251 + 0.054S$ ， $r = 0.97$ ，南村流域为 $\text{Log}\bar{\theta} = 1.746 + 0.0685S$ ， $r = 0.995$ ，连达沟流域有 $\text{Log}\bar{\theta} = 1.7274 + 0.0606S$ ， $r = 0.99$ 。可以看出，不同地貌类型区回归方程式的直线截距基本相同，差异在直线的斜率上。塬区方程式的直线斜率较大于丘陵区，说明随水道级别的增加塬区水道的入汇角增加速率要大于丘陵区。据上述特点，可建立不同地貌类型区水道入汇角与水道级别关系的综合方程式：

$$\text{丘陵区} \quad \text{Log}\bar{\theta} = 1.732 + 0.05289S \quad (1)$$

$$\text{相关系数: } r = 0.974$$

$$\text{塬区} \quad \text{Log}\bar{\theta} = 1.7346 + 0.06375S \quad (2)$$

$$\text{相关系数: } r = 0.999$$

此外，分别统计 I 级水道直接汇入 I、III、IV、V 级水道的入汇角，则汇入水道的级别愈高平均入汇角愈大 (表 5)。这进一步证实了支流与干流的比降差愈大，入汇角愈大的规律。

表 4 小流域各级水道的平均入汇角
Mean joining angles of different order streams

流域名称	水道级别			
	I	II	III	IV
杏 树 台	59.53	72.94	74.57	90
尕 家 圪 塔	62.16	68.4	73	90
平 均 值	60.85	70.67	73.79	90
南 村	65.89	75	90	
连 达 沟	60.86	72.22	80	
平 均 值	63.38	73.61	85	

1) 陈永宗译：河流及其流域的侵蚀发育，黄委会设计院印，1981年。

表 5 低级水道向高级水道入汇的平均角度
Mean angles of Low stream intersected to height order stream

流域名称	平均入汇角	水道级别									
		I-I	I-II	I-IV	I-V	II-II	II-IV	I-V	II-IV	II-V	IV-V
杏 树 台		53.43	68	69	81	67	81	85	70	85	90
尙 家 圪 塔		58.44	67.8	74.41	78.3	63.2	72.86	72.5	68.75	77	90
南 村		59.35	66	74.67		74.09	75.5		90		
连 达 沟		52.93	56.67	74.25		61.67	77.5		80		

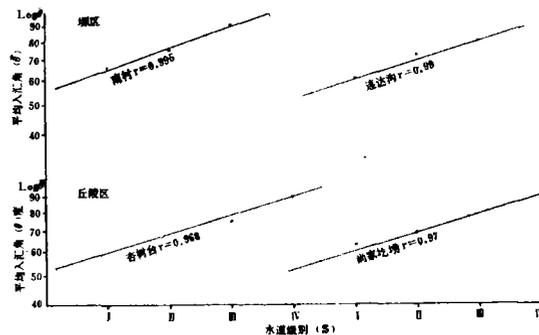


图 1 平均入汇角与水道级别的关系

The relationship between mean stream joining angles (θ) and stream order (S)

二、流域形态要素之间的关系

流域形态特征是长期侵蚀的结果。各形态要素之间应存在一定的关系。以上述小流域中所有 I 级沟道流域为样本进行回归分析的结果列于表 6。由表 6 看出,流域面积分别与干流长度和流域高差成正相关。如果流域面积一定,流域高差增加,水道处于侵蚀阶段,流域高差减小,水道下游处于堆积阶段。支流入汇角与干流比降成反相关;与流域面积正相关。即干流比降愈大,与支流比降的差值愈小,入汇角愈小。流域面积愈大,干流比降愈小,与支流比降的差值增大,入汇角愈大。

流域面积与地形坡降反相关(图 2),干流长度与干流比降也呈反相关。这些关系表明,流域面积愈大,地形坡降与水道比降愈小。由图 2 所示,流域面积约在 0.1 平方公里处是地形坡降由大变小的转折点,据水力学原理,此处应是地表汇流能量的转换点。小于 0.1 平方公里小流域的地面坡度陡,水流冲刷力强,侵蚀强度大,故是黄土高原沟道的主要产沙区。因此,黄土高原小流域的治理应首先注重于小于 0.1 平方公里的小流域。

表 6 流域形态要素之间相关系数表
The correlational coefficient among morphological factors of the second order drainage basin

地貌类型	流域名称	形态因子		流域名称										
		相关系数	形态因子	T	A	I	J	H	θ	T	A	I	J	H
丘陵陵区	杏树台	T	~	0.685	-0.458	-0.657	0.37	0.339	~	0.881	-0.667	-0.68	0.45	0.286
		A	~	-0.563	-0.56	0.4273	0.38	~	-0.756	-0.743	0.377	0.416		
		I	~	~	0.555	x	-0.294	~	~	0.664	x	-0.31		
		J	~	~	~	x	-0.39	~	~	~	x	-0.344		
		H	~	~	~	~	x	~	~	~	~	x		
		θ	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	x	
样本数目		100	61											
塬区	南村沟	T	~	0.468	-0.592	-0.443	0.456	0.212	~	0.703	-0.707	-0.623	0.586	0.335
		A	~	~	-0.337	-0.731	0.505	0.259	~	~	-0.854	-0.912	0.457	0.408
		I	~	~	~	0.381	-0.319	-0.37	~	~	~	0.768	-0.549	-0.202
		J	~	~	~	~	x	-0.417	~	~	~	~	x	-0.262
		H	~	~	~	~	~	x	~	~	~	~	~	0.539
		θ	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
样本数目		34	20											

表注: *寺沟小流域位于陕西省黄陵县境内。由于连达沟 I 级流域样本较少, 所以未采用。T——干流 (I 级) 长度; A——流域面积; I——干流比降; J——地形比降; H——流域高差; θ ——I 级水道汇入 I 级水道的平均角度。x——表示两因子无关; ~——表示两因子无关;

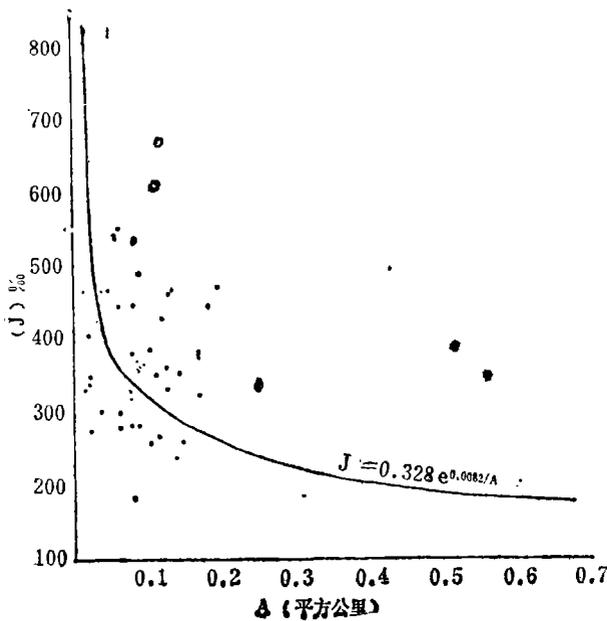


图 2 流域面积与地形坡降的关系
The relationship between the basin area and drainage density

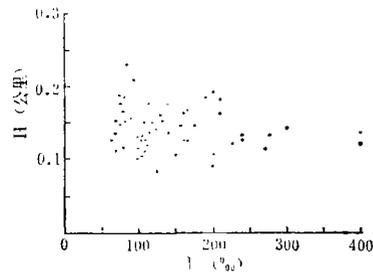


图 3 流域比降与流域高差的关系
The relationship between the channel gradient height difference between channel head and mouth

此外，用相关系数表示两形态要素之间的相关显著性，可以看出，塬区明显存在相关峰值。其中流域面积与地形坡降相关十分显著，相关系数分别达到-0.731和-0.912。另外，水道比降与流域高差也存在一定关系。而丘陵区相关程度较均衡，水道比降与流域高差的关系较散乱（图3），相关不明显。显然，这些差异是由于地貌条件不同所致。

三、河网密度与流域形态要素之间的关系

河网密度受气候、岩性、地貌和人类活动等因素的综合影响。如果其它因素相似，河网密度主要受地貌条件影响。换句话说，流域形态与河网密度应有内在关系。所以用河网密度作为单位面积上沟道切割程度指标，可以把流域形态要素之间的关系定量的联系起来，

我们仍以 I 级流域的形态资料为基础，建立了丘陵区小流域的河网密度与流域面积，地形坡降和水道比降的关系（表 7）。由表 7 可以看出，河网密度与流域面积与水道比降有关。就小流域的几何形态而言，流域面积愈大，河网密度愈小；就水流的动力条件而言，水道比降愈大，河网密度愈大。但是，流域面积对河网密度的相关显著性明显地大于水道比降的影响。这可能与河网密度与流域面积存在一定的自相关成分有关，所以相关显著性有所夸大。不过，河网密度的大小，反映了不同地貌单元流域的沟道切割程度。由于流域面积愈大，地形坡降愈小，所以缓坡地的水流损失增加，水流冲蚀能力减弱。因此，流域面积愈小，单位面积上沟道切割程度愈大。

表 7 河网密度与形态要素相关系数表
The correlational coefficient between the
drainage density and morphological factors of basin

流域名称	相 关 系 数	形态要素			相关系数 临界值 (10%)
		A	J	I	
杏 树 台	D_d	-0.657	0.1	0.168	0.1659
尚 家 圪 坊	D_d	-0.333	0.182	0.24	0.2148

事实上, 河网密度受其流域形态要素的综合影响。因此我们采用多元逐步回归分析的方法*, 把干流长度 (T)、流域面积 (A)、流域高差 (H)、地形坡降 (J)、水道比降 (I)、入汇角 (θ)、(流域面积/流域长度)² (A/B^2) 等流域形态要素与河网密度 (D_d) 一起送入计算机, 取其对应河网密度起主要影响的因素, 建立河网密度与流域形态要素的经验关系式。得到杏树台流域为: $D_d = 4.48 (T)^{0.3449} (A)^{-0.745} (H)^{0.437}$, 相关系数 (r) 为 0.801, 相关系数临界值 (1%) 为 0.2566。尚家圪坊流域为: $D_d = 4.3397 (T)^{0.291} (A)^{-0.462} (H)^{0.084}$, $r = 0.586$, 相关系数临界值 (1%) 为 0.3277。写成基本方程式为:

$$D_d = K (T)^m (A)^{-n} (H)^l \quad (3)$$

由上式可知, 干流长度和流域高差与河网密度成正比关系, 流域面积与河网密度成反比。其中流域面积是影响河网密度的最主要因素。如果就某个现状流域而言, 流域面积、干流长度和流域高差均为一定, 河网密度一定。从地形发育的角度看, 河网密度的变化主要决定于流域高差。流域高差增加, 干流处于侵蚀阶段, 河网密度增大, 流域形态愈来愈趋于狭长; 流域高差减小, 流域形态愈来愈圆。因此, 采用工程措施抬高基准面, 减小流域高差, 是减小沟道侵蚀强度的关键。就面积大小不同的流域而言, 流域面积愈大, 干流长度与流域高差愈大, 流域沟道产沙总量可能增加。不过, 单位面积上的切割程度主要与地面坡度有关。因此, 沟道治理的重点应首先放在流域面积小地面坡度大的小流域。

黄土塬区 I 级流域的河网密度值普遍小于丘陵区。这表明塬区小流域的塬面大小对河网密度有很大影响。塬区的流域面积对地形坡降的影响比对其余因子的影响显著得多 (见表 6)。把河网密度与形态要素建立关系 (表 8), 可以看出, 塬区的流域面积和地形坡降都与河网密度存在较密切的关系 (图 4—5), 在塬区面积较大的小流域, 地形坡降大于流域面积对河网密度的影响。因此, 我们在建立河网密度与流域形态组合关系时, 初步按塬面大小, 把塬区的 I 级流域分为塬面较完整区 (塬面较大) 和塬面破碎区 (梁峁状地带为主地区)。回归计算的结果得出如下方程式: 南村流域 $D_d = 17.387 (J)^{1.189} (A/B^2)^{0.517}$, $r = 0.888$, 相

* 多元逐步回归程序由蔡强国同志提供, 并给予指导, 深表谢意。

* 以塬区南村小流域中 I 级流域为例。

表 8 塬区小流域河网密度与形态要素的关系
The relationship between the drainage density and morphological factors of small basins in Yuan regions

流域名称	形态要素	形态要素			相关系数 临界值 (10%)	备 注
		A	J	I		
南 村	D_d	-0.769	0.839	0.25	0.275	塬面较大
寺 沟	D_d	-0.468	0.419	0.323	0.3598	塬面较小

关系系数临界值(5%)为0.475。寺沟流域 $D_d = 2.759 (T)^{0.1484} (A)^{-0.291}$, $r = 0.511$, 相关系数临界值(5%)为0.511。可以看出, 不同地貌类型区其小流域的河网密度与流域形态要素的组合关系存在差异。塬面破碎区与丘陵区较接近, 但在塬面较完整区则与丘陵区差异较大。

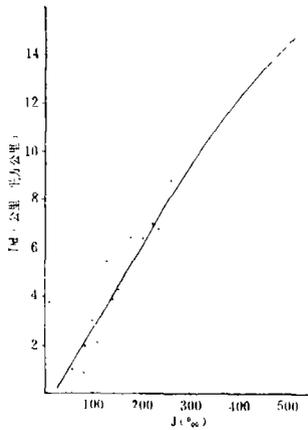


图 4 河网密度与地形坡降的关系

The relationship between the drainage density and gradient of the relief in yuan regions

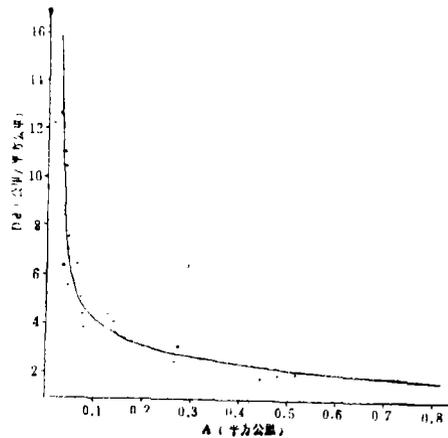


图 5 河网密度与流域面积的关系

The relationship between the drainage density and basin area in Yuan regions
注: 以南村小流域 I 级流域为例

为检验回归方程式的精度, 点绘计算值与实测值之间的关系(图 6)*, 并把河网密度的平均误差值列于表 9。

以上根据对黄土高原不同地貌类型区沟道流域的形态特征的分析, 按其流域形态要素之间的相关性趋势, 建立了形态要素之间及河网密度与形态要素之间的定量方程式。但是, 上述定量关系与流域产沙的联系, 以及塬区分区尺度的标准和代表性, 还有待于进一步进行研究。

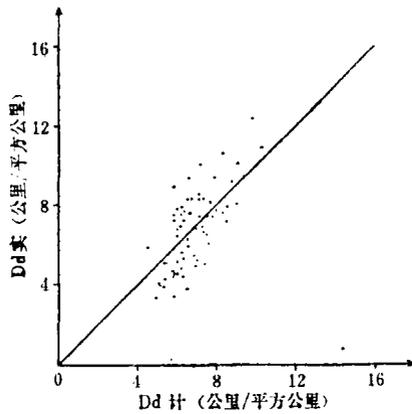


图 6 河网密度的实测值与计算值比较
The calculated value and measuring value of drainage density

注：以尙家圪塔Ⅰ级流域为例

表 9 河网密度计算值的平均误差
Average error of the calculated value of drainage density

地貌类型	流域名称	平均		
		平均 实测值	平均 误差	误差
丘陵区	杏树台	10.646	2.375	23.32%
	尙家圪塔	7.199	1.3024	18.09%
塬区	南村	5.9196	1.3256	22.39%
	寺沟	4.7559	1.1035	23.2%

参 考 文 献

- (1) Strahler, A.N., Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and channel Network, chow, V.T. (ed), Hand book of Applied Hydrology, McG-Yaw-Hill Inc., New York, 1964.
- (2) 承继成、郭树桂：形态量计定律在陕北黄土丘陵区应用过程中的一些体会，中国地理学会 1965 年地貌学术讨论会文集，科学出版社。
- (3) C.T. Yang, Potential Energy and stream Morphology, Water Resources Research, Vol, 7, pp, 1971, 311—322.

A PRELIMINARY STUDY ON GEOMORPHIC FEATURES OF SMALL DRAINAGE BASINS ON THE LOESS PLATEAU IN NORTHERN SHANXI

Chen Hao

(Institute of Geography, Academia Sinica)

Abstract

Using the data measured from the topographic map of Northern Shanxi Province with a scale of 1:10000, a relationship between four small drainage basins in different geomorphic units of the Loess Plateau and the second order watershed morphic factors has been obtained. We can see that the law of total stream length with stream order is not available elsewhere at all. As the watershed system is in a developing stage, in Yuan regions, the damage made by channel erosion is more serious than that in hilly regions. There exists a semi-logarithmic relationship between the average intersectional angle ($\bar{\theta}$) and the stream (S) order.

Among geomorphic factors of drainage basin, a closer correlation exists.

If the drainage density is regarded as the downcutting index of the earth surface, then, the larger the drainage basin area, the smaller the downcutting degree per unit area is. In a small-current drainage basin, the drainage density increases with height difference between the head and mouth of the drainage basin.

A multi-correlation is among the drainage area (A), height difference between the head and mouth (H) of the drainage basin, the length of the main channel (T) and the drainage density (Dd). It may be described by the regression equation, as follows: $Dd = K (T)^m (A)^{-1} (H)^t$ where K is coefficient and m, n, t are powers, $n < 0$, m and $t > 0$.