

# 黄土丘陵沟壑区第二副区山坡地 土壤侵蚀特征研究\*

王占礼 邵明安

中国科学院  
水利部水土保持研究所 陕西杨陵 712100

**摘要** 在广泛收集资料的基础上,对黄土丘陵沟壑区第二副区山坡地土壤侵蚀特征以往的研究结论进行了综合分析,结果表明:(1)影响该区山坡地土壤侵蚀的主要因素为降雨、地形及土地利用。(2)该区山坡地土壤侵蚀主要类型为水蚀,主要方式为溅蚀、片蚀、细沟及浅沟侵蚀。(3)该区多年平均侵蚀模数为  $8\,373\text{t}/\text{km}^2$ ,其中以坡度大于  $25^\circ$  的耕地和植被盖度小于  $10\%$  的荒草地侵蚀强度最大,年侵蚀模数为  $18\,000\text{t}/\text{km}^2$ ,坡度为  $15\sim 25^\circ$  的耕地及植被盖度为  $10\%\sim 30\%$  的林草地区年侵蚀模数分别为  $15\,000\text{t}/\text{km}^2$  和  $12\,000\text{t}/\text{km}^2$ 。

**关键词** 黄土丘陵沟壑区 第二副区 山坡地 土壤侵蚀特征

## Soil Erosion Characters of Slope Land in the 2nd Sub-region of Loess Plateau

Wang Zhanli Shao Ming'an

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Resources Yangling Shaanxi 712100)

**Abstract** On the basis of collected information about erosion in the 2nd Sub-region of Loess Plateau, the research results was revealed: (1) the main factors affecting soil erosion in slope land were precipitation, topography and land use, (2) the main erosion types were splash erosion, sheet erosion, rill erosion and shallow gully erosion, (3) the annunal average erosion module was  $8\,373\text{t}/\text{km}^2$ , annunal erosion module with  $>25^\circ$  slope land and  $<10\%$  cover degree was  $18\,000\text{t}/\text{km}^2$ , annunal erosion module with  $15\sim 25^\circ$  slope land and grass-forest land with  $10\%\sim 30\%$  cover degree were  $15\,000\text{t}/\text{km}^2$  and  $12\,000\text{t}/\text{km}^2$  respectively.

**Key words** hilly-gully region Loess Plateau second sub-region slope land soil erosion character

自 50 年代黄秉维先生将缺乏完整植被区域内的黄土丘陵区划分为五个副区以来,关于第二

收稿日期:1998-09-15

\*黄委会水土保持科学研究基金项目(95-04-01)、中国科学院资源与生态环境研究重大项目(KZ951-B1-211)资助。

副区的土壤侵蚀研究已做了许多工作。中国科学院水土保持研究所从70年代初期以来以该区的安塞为基地,对该区土壤侵蚀进行了较为全面系统的研究。本文重点以安塞为主,对涉及该区山坡地的研究结论进行综合分析,以期达到对该区山坡地土壤侵蚀特征的认识。

## 1 影响本区山坡地土壤侵蚀的主要因素

### 1.1 降雨

雨量和雨强是影响山坡地土壤侵蚀的两个最基本的降雨因子<sup>[1,2,17,18,23]</sup>。

根据安塞站1985~1989年6个坡度条件下的观测,本区多年平均降雨量538.68mm,全年降雨分布极不均匀,6~9月降雨量占全年降雨量的73.95%,6~9月侵蚀性降雨量占全年侵蚀性降雨量的89.56%。受其影响,该区土壤侵蚀主要发生在6~9月,6~9月侵蚀量占年总侵蚀量的95.74%(表1)。该区降雨量的年际分配也不均衡,根据安塞站1985~1989年6个坡度条件下的观测,多雨年的年降雨量是少雨年的2.08倍,多雨年6~9月降雨量是少雨年的2.77倍,多雨年的侵蚀性降雨量是少雨年的2.38倍。受其一定程度的影响,该区多雨年的侵蚀量是少雨年的13.61倍(表2)。

表1 安塞站1985~1989年6个坡度平均月降雨量及土壤侵蚀

月份	降雨量		侵蚀性降雨量		侵蚀量	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(t/km <sup>2</sup> )	(%)
1	8.00	1.48	0.00	0.00	0.00	0.00
2	6.52	1.21	0.00	0.00	0.00	0.00
3	13.96	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00
4	28.10	5.22	7.10	2.88	357.43	4.18
5	40.28	7.48	6.76	2.75	4.88	0.06
6	86.40	16.04	31.80	12.92	217.47	2.54
7	114.20	21.20	70.94	28.82	2700.60	31.55
8	120.32	22.34	89.60	36.40	5257.79	61.43
9	77.42	14.37	28.10	11.42	18.04	0.21
10	33.24	6.17	11.68	4.82	2.32	0.03
11	8.86	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00
12	1.38	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	538.68	100.00	246.16	100.00	8558.53	100.00

表2 安塞站1985~1989年6个坡度平均降雨量及土壤侵蚀

年份	降雨量	6~9月降雨量	侵蚀性降雨量	侵蚀量
	(mm)	(mm)	(mm)	(t/km <sup>2</sup> )
1985	666.8	536.2	330.7	4646.6
1986	351.3	252.8	146.5	1769.7
1987	404.8	220.8	194.0	2886.6
1988	729.2	612.0	348.5	24077.5
1989	541.3	358.3	216.8	9951.4
平均	538.7	396.4	247.3	8666.4

土壤侵蚀虽与各种降雨量有一定的关系,并随它们的大小及年内、年际分配的不同而发生相应变化,但侵蚀强度的大小更主要地还是取决于降雨强度。该区降雨的一个主要特点是侵蚀性降雨次数少、强度大,土壤侵蚀基本全是由暴雨造成,且暴雨强度越大,造成的土壤侵蚀越严重。例如,安塞县南沟径流小区1980年6月28日和7月5日两次降雨量相近,而降雨强度后者约为前

者的13倍,对农地的侵蚀量后者为前者的9倍,对牧荒地的侵蚀量后者约为前者的51倍(见表3)。1988年8月4~5日的一次大暴雨,在茶坊6个坡度的径流小区上产生的平均侵蚀量,占全年侵蚀量的99.3%,占1985~1989年5a总侵蚀量的44.44%。1985~1989年6个坡度裸地径流小区观测的平均情况是,每年最大一次暴雨造成的土壤侵蚀占全年总侵蚀量的42.7%~86.0%,5a平均接近70.0%。

表3 降雨强度与土壤侵蚀的关系

降雨日期 (年-月-日)	降雨量 (mm)	降雨强度 (mm/min)	农地侵蚀量 (t/km <sup>2</sup> )	牧荒地侵蚀量 (t/km <sup>2</sup> )
1980-07-05	23.20	1.16	2 869.77	813.76
1980-06-28	24.50	0.09	316.11	15.98
1980-08-08	15.20	0.84	689.45	132.60
1980-08-24	14.20	0.16	927.76	11.99
1985-08-05	53.30	0.25	3 508.9	这两次降雨侵蚀资料
1986-06-27	53.60	0.06	186.70	来自茶坊径流小区

根据该区5~28°的裸地径流小区观测资料分析结果,与该区土壤侵蚀关系最密切的降雨因子指标为次降雨量与最大30min雨强的乘积,土壤侵蚀与该降雨因子指标呈幂函数正相关(表4)。关系式为:

$$M = A(PI_{30})^a \quad (1)$$

式中:  $M$  —— 次降雨侵蚀量(t/km<sup>2</sup>);  $P$  —— 次降雨量(mm);  $I_{30}$  —— 最大30min雨强(mm/min);  $A, a$  —— 待定系数与指数。

表4 降雨因子指标  $PI_{30}$  与土壤侵蚀  $M$  的关系

坡度 (°)	$M = A(PI_{30})^a$		
	$A$	$a$	相关系数 $r$
5	1.847 6	1.498	0.797
10	2.617 2	1.671	0.780
15	3.854 3	1.706	0.749
20	4.845 3	1.706	0.761
25	5.019 8	1.773	0.748
28	6.457 9	1.688	0.745

## 1.2 地形

影响土壤侵蚀的地形因子主要包括地面的坡度、坡长及坡型<sup>[1,3,16,23]</sup>。

根据对该区纸坊沟流域的制图结果,该区山坡地地面坡度较陡,坡度大于15°的面积占流域面积的80.29%,大于25°的面积占流域面积的60.12%,大于35°的面积占流域面积的31.18%(表5)。受地面坡度的影响,山坡地的土壤侵蚀强度也随坡度的变化而发生相应的改变。在纸坊沟流域的山坡地上,坡度分别为<3°、3~5°、5~15°、15~25°、25~35°、>35°的坡地,土壤侵蚀模数分别为<1 000 t/km<sup>2</sup>、<1 500 t/km<sup>2</sup>、2 000~3 000 t/km<sup>2</sup>、3 000~8 000 t/km<sup>2</sup>、5 000~10 000 t/km<sup>2</sup>、>10 000 t/km<sup>2</sup>。

表 5 纸坊沟流域山坡地坡度组成

坡 度(°)	3~5	5~8	8~15	15~25	25~35	>35
面 积(hm <sup>2</sup> )	6.86	9.53	44.67	171.98	234.24	258.09
占流域总面积 的百分比(%)	0.38	1.15	5.40	20.79	28.32	31.18
坡 地 类 型	微坡	缓坡	斜坡	陡坡	峻坡	峭坡

根据该区不同坡度的裸地径流小区观测资料分析结果,次土壤侵蚀与坡度呈幂函数正相关关系,且随降雨强度的增加,坡度的作用更加明显(表 6):

$$M = AS^a \quad (2)$$

式中:  $M$  ——次土壤侵蚀量(t/km<sup>2</sup>);  $S$  ——坡度(°);  $A, a$  ——待定系数与指数。

表 6 不同最大 30min 雨强  $I_{30}$  条件下次土壤侵蚀与坡度的关系

$I_{30}$ (mm/min)	$M = AS^a$		
	$A$	$a$	相关系数 $r$
<0.25	2.889	1.103	0.981
0.25~0.5	24.141	1.056	0.998
0.5~0.75	50.729	1.190	0.978
>0.75	151.989	1.385	0.993

根据对该区纸坊沟流域的制图结果,流域内地形高差较大,从沟谷到梁岭一般都在 100m 以上,因此该区山坡地坡长相对较长。在沟间地上,大于 60m 坡长的面积占流域面积的 66.59%,大于 200m 坡长的面积占流域面积的近 10%。在沟谷的地上,比例更大,大于 60m 坡长的面积占流域面积的 71.9%,大于 200m 坡长的面积占流域面积的近 20%。两个地貌单元合计,大于 60m 坡长的面积占流域总面积的 70%(表 7)。由于受坡长影响导致汇流的作用,使该区山坡地的土壤侵蚀从分水岭向下,侵蚀类型依次演变,侵蚀强度逐渐增大。侵蚀类型由片蚀演变到不同等级的沟蚀,侵蚀强度变化的比例关系则为:梁岭顶(0~10m):梁岭坡上部(10~50m):梁岭坡下部:沟谷坡=1:8:16:22。

表 7 纸坊沟流域山坡地坡长组成

坡长 (m)	沟 间 地			沟 谷 地		
	面积(hm <sup>2</sup> )	占沟间地(%)	占流域(%)	面积(hm <sup>2</sup> )	占沟谷地(%)	占流域(%)
<20	2.41	0.81	0.29	0.19	0.03	0.02
20~30	6.07	2.04	0.73	0.87	0.87	0.55
30~40	13.78	4.64	1.66	10.70	2.02	1.29
40~50	17.23	5.82	2.08	42.16	7.94	5.09
50~60	23.23	7.94	2.86	41.80	7.88	5.05
60~80	53.69	18.09	6.49	87.22	16.44	10.54
80~120	58.88	19.84	7.12	93.28	17.58	11.27
120~200	58.15	19.59	7.03	96.56	18.19	11.67
>200	26.91	9.07	3.25	104.5	19.69	12.63

根据该区坡度为 30°的不同坡长裸地径流小区观测资料分析结果,次土壤侵蚀与坡长也呈幂函数相关关系,且随降雨强度的增加,由负相关变为正相关,降雨强度越大,坡长的侵蚀作用越明显(表 8):

$$M = AL^a \tag{3}$$

式中:  $M$  —— 次土壤侵蚀量( $t/km^2$ );  $L$  —— 坡长(m);  $A, a$  —— 待定系数与指数。

表 8 不同最大 30min 雨强  $I_{30}$  条件下次土壤侵蚀与坡长的关系

$I_{30}$ (mm/min)	$M = AL^a$		相关系数 $r$
	$A$	$a$	
<0.25	46.45	-0.107	-0.550
0.25~0.5	169.19	0.337	0.769
0.5~0.75	686.09	0.359	0.927
>0.75	3 642.41	0.414	0.997

当把坡度与坡长对土壤侵蚀的综合作用进行分析,则获得土壤侵蚀与坡度及坡长之间呈多元幂函数相关,关系式为:

$$\bar{M} = 103.38S^{1.114}L^{0.350} \tag{4}$$

式中:  $\bar{M}$  —— 年平均土壤侵蚀( $t/km^2$ );  $S$  —— 坡度( $^\circ$ );  $L$  —— 坡长(m),其中,复相关系数  $R = 0.956$ ,  $F$  检验值  $= 75.7 > F_{0.01} = 9.55$ 。

该区山坡地上各种坡型均有分布,不同坡型的坡地上土壤侵蚀差异很大。根据小区观测及推算,与平坡面相比,瓦背状地形的存在可使土壤侵蚀平均增大约 50%;横向上相同的其他条件下,不同坡型的土壤侵蚀量为汇聚型>平直型>发散型,其比例关系为 3.6 : 2 : 1。

### 1.3 土地利用

土地利用是一个综合因素,它既反映人为活动对土壤侵蚀的影响,也包括某些自然因素侵蚀作用的大小<sup>[1,2,13]</sup>。

该区由于过去长时期内人口增长快,并以单一的农业经营为主,能耕种的山坡地大部分开垦为农地,致使土地利用不合理,导致了严重的土壤侵蚀。

根据安塞县土地利用现状遥感调查与制图结果,耕地面积占全县总面积的 40.47%,其中 87.09%为坡旱地;林地面积占全县总面积的 14.57%,其中天然林的面积还不到一半,且覆盖度为 25%;牧草地面积占全县总面积的 30.65%,草场质量普遍较差,覆盖度多在 30%~50%,有的已退化成荒草地或劣地。由于不同利用类型土地侵蚀作用的差异,山坡地土壤侵蚀也表现为相应的结果。比如在该区经过治理的纸坊沟流域,占总面积 28.1%的农地的侵蚀量占总侵蚀量的 31.0%,其中有 63.0%是来源于占农地面积 39.0%的无治理措施的坡耕地;占总面积 27.4%的林地,侵蚀量仅占总侵蚀量的 9.2%;占总面积 34.0%的草地,侵蚀量约占总量的 50.5%,而其中的 90.0%又是来源于占草地面积 65.0%的天然荒坡(表 9)。

根据该区径流小区观测资料的分析结果,在其他条件相同的情况下,总的来说,农地侵蚀量大于草地,草地又大于林地,其中主要的原因是它们的盖度差异所致。例如,据 1980 年 6 月 20 日安塞县南沟径流小区观测,雨量为 24mm,历时为 33min 的降雨,在坡度为 25°的农地上的侵蚀量比荒坡地大 67.5%,比草地大 92.5%,比灌木草地大 97.9%,而这几种类型土地明显的差异是盖度的不同。该区研究分别获得了土壤侵蚀与草地植被度及林地植被度的关系。草地土壤侵蚀系数(即草地侵蚀模数与裸露地侵蚀模数的比值)与草地植被盖度之间呈现为指数函数关系:

$$K = \begin{cases} 1.0 & (C < 5\%) \\ e^{-0.0418(C-5)} & (C > 5\%) \end{cases} \tag{5}$$

式中:  $K$ ——人工草地土壤侵蚀系数(0~1);  $C$ ——植被度(%); 相关系数  $r = -0.970$ 。

林地土壤侵蚀与林地植被盖度之间呈多项式关系:

$$M_f = 10\,377.87 - 271.68C + 1.78C^2 \quad (6)$$

式中:  $M_f$ ——人工林地年土壤侵蚀量( $t/km^2$ );  $C$ ——林地总覆盖度(%); 相关系数  $r = -0.997$ 。

表9 纸坊沟流域综合治理后各坡地类的侵蚀量

土地类型及措施		面积 ( $km^2$ )	占流域总面 积的%	年侵蚀模数 ( $t/km^2$ )	年侵蚀量 ( $t$ )	占流域总侵 蚀量的%
农 地	水平沟种植	0.7787	9.4	9000	7008	10.8
	无措施坡耕地	0.9033	10.9	14000	12647	19.6
	总计	2.3220	28.1		20069	31.0
林地		2.2667	27.4	2626	5953	9.2
草 地	人工草地	0.5553	6.7	3000	1666	2.6
	改良草地	0.3000	3.6	5000	1500	2.3
	天然荒坡	1.9560	23.6	15000	29340	45.4
	总计	2.8113	34.0		32506	50.3
合计		8.274	100.0		64646	100.0

## 2 本区山坡地土壤侵蚀主要类型与方式

按照土壤侵蚀的外部营力,可将本区山坡地土壤侵蚀划分为风蚀、水蚀和重力侵蚀3种类型,其中水蚀是主要的。

### 2.1 风力侵蚀

本区气候主要受内陆高压气流控制,冬末早春,干燥而强烈的西北风盛行,风力多在3~5级,最大可达6~8级,加上这个时期地面缺乏植被保护,土壤干燥而裸露,因而在一些梁峁高地、分水鞍、风口及迎风坡面上,土壤风蚀还是明显的。夏季虽然经常发生狂风暴雨,但地面常有植物保护,风力除了助长暴雨侵蚀力外,一般直接造成的土壤侵蚀是较弱的。

### 2.2 水力侵蚀

水力是本区山坡地土壤侵蚀最重要的营力,对本区土壤侵蚀的发生、发展及其演变规律影响最大。按照侵蚀方式的不同,可将水力侵蚀分为面蚀和沟蚀<sup>[1,2,4,5,9,10,15,19,21,26,27]</sup>。

2.2.1 面蚀 面蚀包括雨滴对土壤的溅蚀及薄层水流引起的片蚀。这两种形态的侵蚀广泛分布在该区山坡地的不同部位,更集中分布在山坡地上部的分水岭附近,在荒坡地上则表现为鳞片状侵蚀。

(1) 溅蚀。溅蚀是坡地上最初的水力侵蚀。溅蚀的主要作用是使土壤颗粒与母体分离。雨滴动能的大部分是消耗在分离土粒上,只有小部分能量用于使土粒飞溅。土粒飞溅的距离多不超过1m,飞溅高度也仅0.5m左右,所以溅蚀作用并不直接向沟道输送泥沙。但是,土体一旦被雨滴分离破碎后,很容易被水流运移,从而增加了水流含沙量,这是溅蚀作用的主要侵蚀效果。另外,雨滴击溅还可导致土壤板结,增加地面的抗侵蚀能力,并同时又通过减少入渗而增加地面径流及其侵蚀能力。因而雨滴的溅蚀对山坡地侵蚀有十分重要的作用。在各种溅蚀影响因素中,降雨特性的影响最为突出,其次坡度也是一个很关键的因素。根据该区裸地溅蚀观测试验的分析结果,次总溅蚀量与坡度及降雨侵蚀力之间的关系为:

$$S = [0.562 - 0.3625J / (2.6238 + 0.0378J)](EI_{30})^{0.736} + (0.520 + 0.040J - 0.00076J^2)(EI_{30})^{0.769} \quad (7)$$

式中:  $S$  ——总溅蚀量( $g/m$ );  $J$  ——地面坡度( $^\circ$ );  $EI_{30}$  ——降雨侵蚀力。

(2)片蚀。片蚀也是土壤侵蚀的一种初始形式,但它已能将侵蚀的土壤沿山坡地进行远距离搬运和产沙,因此坡面径流已开始在这种侵蚀中与降雨一起发挥重要作用,其作用的结果随坡度的不同而发生明显的变化。根据该区裸地片蚀试验观测的分析结果,片蚀随降雨动能和径流势能呈多元幂函数关系,随地面坡度的变化呈抛物线关系:

$$G = 1.0931(E)^{0.39}(E_p)^{0.812} \quad (8)$$

式中:  $G$  ——次片蚀量( $g/m^2$ );  $E$  ——次降雨动能( $J/m^2$ );  $E_p$  ——次径流势能( $J/m^2$ )。

$$G = -0.2606J^2 + 178.07J + 0.362 \quad (9)$$

式中:  $G$  ——年平均片蚀量( $g/m^2$ );  $J$  ——地面坡度( $^\circ$ )。

(3)鳞片状侵蚀。鳞片状侵蚀作为片蚀的一种特殊形式,主要取决于植被覆盖度的大小。该区山坡林草地的盖度由于大部分小于 50%,因此,鳞片状侵蚀在该区山坡林草地中还是很严重的。根据以往的研究,该区山坡地鳞片状侵蚀与植被盖度的关系为表 10。

表 10 安塞山坡地鳞片状侵蚀与植被盖度的关系

植被盖度 (%)	侵蚀模数 ( $t/km^2 \cdot a$ )
<10	18 000
10~30	12 000
30~50	8 000
50~70	4 000
70~90	2 000
>90	900

2.2.2 沟蚀 沟蚀主要以坡面集中径流的方式侵蚀地面,并在坡地上形成大小不同的侵蚀沟,按其发育的程度及形态可分为以下几种:

(1)细沟侵蚀。细沟侵蚀多发生在  $10^\circ$  以上的坡面,更集中地分布在坡面面蚀带之下。细沟是一种暂时性的沟道,耕作后即可消失。根据调查结果,该区细沟宽度

73.7%集中在 5~20cm 之间,最宽达 40cm,深度在 2~10cm 之间的占 71.6%,间距在 15~95cm 之间的占 71.5%。平均宽、深、间距分别为 12.63cm、7.87cm、87.41cm(表 11、12、13)。但该区也有很特殊的细沟出现,如 1977 年 7 月 4~6 日延安特大暴雨(日雨量大于 200mm)以后坡面上发育的大量细沟,其宽深比高达 1:5,有的细沟深达 1m。在降雨条件一定的情况下,细沟侵蚀主要受坡长、坡度和耕作措施的影响。根据 1988 年 8 月 4 日和 1989 年 7 月 16 日两次暴雨产生的细沟侵蚀调查(降雨量分别为 139.1mm 和 105.3mm),在坡度为  $30^\circ$ ,水平投影为 10、20、30、40m 坡长的裸地径流小区上,细沟侵蚀量随坡长的增加呈近线性增大,且细沟侵蚀量在总侵蚀量中所占的比例也随坡长的增加而增加。细沟侵蚀随坡度的变化则表现为坡度小于  $20^\circ$  时,随坡度的增大而增大,大于  $20^\circ$  时呈基本不变或呈下降趋势。至于在不同农作物地上的表现,则是翻耕后的休闲麦地最大,其余依次为荞麦地、水平沟谷子地及一般耕作的黄豆地。将调查的两次暴雨细沟侵蚀量与同期径流小区实测值进行比较,细沟侵蚀量可占坡耕地总侵蚀量的 50%~75%。

表 11 安塞山坡地细沟宽度分布

宽度(cm)	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	>30
条数	16	51	43	24	16	3	7
比例(%)	10	31.8	26.9	15.0	10	1.9	4.4

表 12 安塞山坡地细沟深度分布

深度(cm)	2~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30
条数	39	77	27	14	1	1
比例(%)	24.5	48.5	17.0	8.8	0.6	0.6

表 13 安塞山坡地细沟间距分布

间距(cm)	15~35	35~55	55~75	75~95	95~115	115~135	135~155	>155
条数	22	41	27	21	10	10	5	17
比例(%)	14.4	26.8	17.6	13.7	6.5	6.5	3.3	11.2

(2)浅沟侵蚀。浅沟侵蚀是发育在该区广泛存在的瓦背状地形(由径流与耕作作用共同导致)底部的一种沟蚀,也是该区山坡地最重要的一种土壤侵蚀方式。浅沟区出现的坡面径流大量集中是导致该区(也是整个黄土高原)严重土壤侵蚀的根本所在。浅沟侵蚀分布区的面积要占沟间地总面积的75%以上。浅沟侵蚀常常分布于梁峁坡的中下部,随坡面形态的不同,分布形式有辐散状、平行状和辐合状。浅沟侵蚀主要发生于18~35°的坡面上,且集中分布于22~31°之间。浅沟侵蚀的临界坡度大体为18°,临界坡长约为40m。浅沟分布的间距变化于几m到30余m之间,以相距15~21m占多数。浅沟侵蚀的深度变化于15~120cm之间,宽度则变化于20~80cm之间,且以30~50cm居多。影响浅沟侵蚀的因素有坡度、坡型、坡长、汇水面积等,其中汇水面积的大小对浅沟侵蚀程度强弱的影响尤为重要。对实地调查结果进行分析表明,浅沟侵蚀强度与汇水面积之间呈对数相关(图1),关系式为:

$$M = 1.6775 \ln S - 0.87715 \quad (10)$$

式中:  $M$  —— 浅沟侵蚀模数( $t/km^2$ );  $S$  —— 汇水面积( $m^2$ ); 相关系数  $r = 0.7585$ 。试验观测和调查还表明,浅沟侵蚀量可占坡面侵蚀量的10%~70%,就该区农地坡面的平均情况而言,浅沟侵蚀量约占坡面侵蚀量的35%。

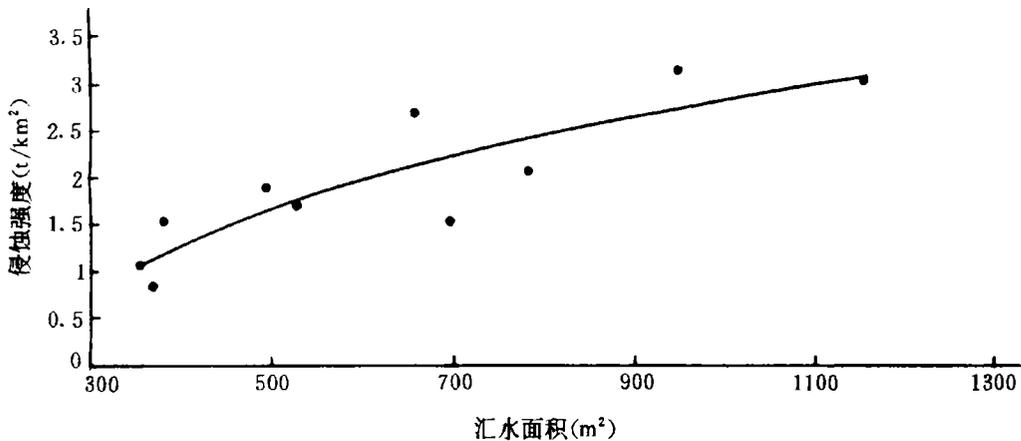


图 1 浅沟侵蚀与汇水面积的关系

(3)切沟侵蚀。切沟虽位于该区山坡地,但大多已无法利用,但切沟侵蚀蚕食可利用的山坡地,因此在山坡地整治过程中要充分考虑切沟侵蚀的影响。切沟侵蚀主要分布在沟谷地,发生的坡度大多在35°以上。切沟的汇水面积并不大,其侵蚀动力主要来自瓦背状地形提供的径流,因此有效地阻止径流在瓦背状地形上的大量汇集也是防止切沟侵蚀的根本途径。

2.2.3 重力侵蚀 该区重力侵蚀的方式有滑塌、崩塌和泻溜3种。大型滑塌常发生在三趾马红土上覆地层中,或基岩与黄土的接触面上,多属于古滑坡。浅层滑塌多出现在黄土地层中,是

沟谷坡中现代重力侵蚀的主要方式。从区域上看,流域的上游比下游滑坡明显。三趾马红土构成的谷坡以泻溜侵蚀为主。暴雨洪水期间径流淘刷常导致沟壁的崩塌。

### 3 本区山坡地土壤侵蚀强度及分布

#### 3.1 土壤侵蚀强度

3.1.1 土壤侵蚀强度评价模型<sup>[12,21,22]</sup> 根据该区布设试验多年观测资料的分析结果,计算该区沟间山坡地次土壤侵蚀强度的模型为:

$$M_s = M_0 H C \eta \quad (11)$$

其中:

$$M_0 = 5.097 P^{0.999} I_{30}^{2.637} S^{0.888} L^{0.286} \quad (12)$$

$$H = 1 + \frac{S - 15}{15} [1.003 (P I_{30}^{0.103} - 1)] \quad (13)$$

C 分为  $C_1, C_2, C_3$ 。

$$C_1 = e^{-0.0418(V-5)} \quad (14)$$

$$C_2 = 1.0 \quad (V \leq 5\%) \quad (15)$$

$$C_2 = e^{-0.0085(V-5)^{1.5}} \quad (V > 5\%) \quad (16)$$

$C_3$  按表 14 计算,  $\eta$  按表 15 计算。

上述各式中:  $M_s$ ——侵蚀模数 ( $t/km^2$ ),  $M_0$ ——裸地基准状态下的次降雨侵蚀模数 ( $t/km^2$ ),  $P$ ——次降雨量 (mm),  $I_{30}$ ——次降雨最大 30 min 雨强 (mm/min),  $S$ ——地面坡度 ( $^\circ$ ),  $L$ ——坡长 (m),  $H$ ——浅沟侵蚀系数(无量纲),  $C$ ——植被影响系数(无量纲),  $C_1$ ——人工草地植被影响系数(无量纲),  $V$ ——植被覆盖度 (%),  $C_2$ ——林地植被影响系数(无量纲),  $C_3$ ——农作物地植被影响系数(无量纲),  $\eta$  为水土保持措施影响系数。

表 14 农作物地水土流失系数

月份	4	5	6	7	8	9	10	全年
C 值	1.00	0.88	0.67	0.60	0.58	0.62	0.76	0.61

表 15 实施水土保持措施后的土壤流失系数

措施	$\eta$ 值	措施	$\eta$ 值
水平梯田	0.02~0.05	垄沟种植	0.60
坡式梯田	0.50	草粮带状间轮作	0.40~0.50
水平沟种植	0.55	草灌带状间作	0.20~0.40

3.1.2 不同地类的土壤侵蚀强度 该区多年平均土壤侵蚀模数为  $8373t/km^2$ , 其中以坡度大于  $25^\circ$  的耕地和植被覆盖度小于 10% 的荒草地侵蚀强度最大, 年侵蚀模数为  $18000t/km^2$ , 占总土地面积的 14.41%; 其次是坡度为  $15\sim 25^\circ$  的耕地及植被覆盖度为 10%~30% 的林草地, 年侵蚀模数分别为  $15000t/km^2$  和  $12000t/km^2$ , 占总土地面积的 27.99%; 再次是植被覆盖度为 30%~50% 的林草地, 年侵蚀模数为  $8000t/km^2$ , 占总土地面积的 20.35%; 其余各类地(包括一些不属于山坡地上的地类)的年侵蚀模数在  $4000t/km^2$  以下, 占总土地面积的 38.24%(表 16)。

表 16 安塞县各类地土壤侵蚀强度及面积

土地类型特征	年侵蚀模数(t/km <sup>2</sup> )	面积比例(%)
耕地,水浇地、平旱地和缓坡旱地	1 000	22.45
耕地,坡度 15°~25°	15 000	13.42
耕地,坡度>25°	18 000	4.6
荒草地,植被覆盖度<10%	18 000	9.81
林草地,植被覆盖度 10%~30%	12 000	13.57
林草地,植被覆盖度 30%~50%	8 000	20.35
林草地,植被覆盖度 50%~70%	4 000	4.52
林草地,植被覆盖度 70%~90%	2 000	4.52
林草地,植被覆盖度>90%	900	2.25
水面、道路、建筑用地等	0	4.5

在该区经一定程度治理的纸坊沟流域内,各种强度的年土壤侵蚀及其它们占沟间地、沟谷地和总土地面积的百分比如表 17。

表 17 纸坊沟流域年土壤侵蚀强度及其分配

侵蚀强度	指标(t/km <sup>2</sup> )	面积(hm <sup>2</sup> )		合计(hm <sup>2</sup> )	占总面积的百分比(%)
		沟间地	沟谷地		
微度	≤1 000	135.88	116.72	525.6	30.53
轻度	1 000~2 500	36.16	42.54	78.7	9.51
中度	2 500~5 000	71.55	113.61	185.10	22.38
强度	5 000~10 000	79.89	61.68	141.57	17.11
极强度	10 000~20 000	49.52	62.62	112.14	13.55
剧烈	≥20 000	3.69	53.52	57.21	6.91

该区 1988 年 8 月 4 日和 6 日以及 1989 年 7 月 16 日的三次暴雨(分别代表两次降雨间隔时间短及大暴雨的特点),在寺岷岷沟的雨量为 76.0mm、51.0mm、127.6mm,平均雨强分别为 7.2mm/h、28.7mm/h、15.5mm/h,最大 30min 雨强分别为 0.67mm/min、1.00mm/min、1.50mm/min。3 次暴雨在寺岷岷沟(流域面积为 3.554km<sup>2</sup>)各地类产生的次侵蚀强度及侵蚀量如表 18。

表 18 寺岷岷沟各地类次侵蚀强度及侵蚀量

土地利用	类别	占总面积(%)	1988 年 4 月~6 月			1989 年 7 月 16 日		
			侵蚀模数(t/km <sup>2</sup> )	侵蚀量(t)	总量%	侵蚀模数(t/km <sup>2</sup> )	侵蚀量(t)	总量%
农地	坡耕地	28.18	12 950.9	13 158.1	33.46	29 573.8	30 047.0	30.81
	水平梯田	12.43	38 509	172.9	0.44	1 213.3	543.6	0.56
	草粮带作	3.25	8 366.0	978.8	2.49	20 257.7	2 370.1	2.43
	小计	44.48	9 051.1	14 309.8	34.39	20 848.0	32 960.7	33.80
林地	经济林	1.58	1 543.7	88.0	0.22	4 383.0	247.8	0.25
	乔灌木	6.32	1 356.7	309.3	0.79	4 444.2	1 013.3	1.04
	小计	8.02	1 394.1	397.3	1.01	4 421.4	1 261.1	1.29
草地	土质荒坡	39.78	15 930.4	22 844.2	58.09	40 859.5	58 592.5	60.07
	土石质荒坡	7.08	6 984.3	17 773.9	4.51	18 568.6	4 716.4	4.84
	小计	47.50	14 584.2	24 617.8	62.60	37 505.3	63 308.9	64.91
全流域	100	10 910.5	39 324.6	100	27 540.3	97 530.7	100	

上述 3 种不同的表达方式,充分反映了该区山坡地不同地类的土壤侵蚀强度变化。

### 3.2 土壤侵蚀时空分布

该区山坡地土壤侵蚀基本全部由暴雨及其产生的坡面超渗径流造成,因此该区暴雨的时间分

配,从一个方面反映了该区山坡地土壤侵蚀的时间变化<sup>[1,2,11]</sup>。根据对收集到的安塞附近延安气象站 1956~1985 年 30a 长系列的土壤侵蚀暴雨资料进行分析,该区多年平均年降暴雨次数为 6.27 次,年际之间极不平衡,统计年中,最多的一年可降 15 次,最少的一年降了一次。年内分配也很不平衡,在统计年中,11 月~次年 3 月无暴雨,4~10 各月暴雨次数占年总暴雨次数的百分比依次为:4 月 0.48%,5 月 3.19%,6 月 14.83%,7 月 36.20%,8 月 34.61%,9 月 9.57%,10 月 1.12%。可以看出,该区暴雨高度集中在 7、8 两月,共占 70.81%,且两月的次数基本相等,6 月大于 9 月,6、7、8 三个月占 85.64%,7、8、9 三月占 80.38%,6、7、8、9 四月占 95.21%。由于我们统计的是土壤侵蚀暴雨,因此这里暴雨次数的年际年内分配,实际就是该区土壤侵蚀次数的分配。从该区 1985~1989 年 6 个坡度 5a 短系列的径流小区观测资料也反映出了类似的时间变化(表 1 及表 2)。5a 6 个坡度径流小区观测资料的平均值表明,该区最多年的年侵蚀模数为最少年的 13.6 倍。年内 11 月~次年 3 月无侵蚀发生,4~10 月各月侵蚀量占年侵蚀量的百分比依次为:4 月 4.2%,5 月 0.06%,6 月 2.54%,7 月 31.55%,8 月 61.43%,9 月 0.21%,10 月 0.03%,其中 7、8 两月就占了 92.98%。

该区山坡地土壤侵蚀的空间变化主要体现在由于受地形条件的影响而导致暴雨径流沿坡面的重新分配产生的土壤侵蚀垂直分异上。由分水岭向下,土壤侵蚀垂直带谱的表现依次为:面状侵蚀带——细沟侵蚀带——细沟、浅沟侵蚀过渡带——浅沟侵蚀带——切沟侵蚀带。这种土壤侵蚀的垂直分异在强度上也有类似的表现。在该区 1988 年 8 月 4~5 日的两次暴雨中,该区寺岷岷沟流域的山坡地上,由分水岭——梁峁坡上部——梁峁坡中下部——梁峁坡下部——沟缘线附近的谷坡——沟谷坡中上部——沟谷坡下部,侵蚀模数( $t/km^2$ )的变化为由  $<1\ 000\sim 2\ 500$ —— $2\ 500\sim 5\ 000$ —— $5\ 000\sim 10\ 000$ —— $10\ 000\sim 20\ 000$ —— $30\ 000\sim 40\ 000$ —— $20\ 000\sim 30\ 000$ —— $10\ 000\sim 20\ 000$ 。该区山坡地土壤侵蚀的水平空间变化则一般表现为从流域上游的山坡地到流域下游的山坡地侵蚀强度减弱。

#### 参考文献

- 1 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测. 北京:科学出版社,1995
- 2 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京:科学出版社,1992
- 3 中国科学院、水利部西北水土保持研究所. 黄土高原综合治理试验示范专题地图集. 北京:测绘出版社,1991
- 4 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀特征及其治理途径. 北京:中国科学技术出版社,1990
- 5 武春龙,江忠善等. 安塞县纸坊沟流域土壤侵蚀类型遥感制图. 水土保持通报,1990,10(4):6~12
- 6 周佩华,武春龙. 黄土高原小流域综合治理减沙效益的计算问题探讨. 水土保持通报,1991,11(1)
- 7 中国科学院、水利部西北水土保持研究所茶坊课题组. 安塞实验区水土保持综合治理及减沙效益(英文). 见:黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业研究(下册). 杨陵:天则出版社,1990
- 8 周佩华. 略述黄土高原水土保持的减沙效益问题. 水土保持通报,1991,11(2):1~3
- 9 王玉宽,王占礼等. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析. 水土保持学报,1991,5(2):25~31
- 10 刘元保等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988,第7集
- 11 刘元保等. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988,第7集
- 12 姜永清等. 安塞县土壤侵蚀类型遥感调查制图. 见:黄土高原遥感调查试验研究. 北京:科学出版社,1998
- 13 陈德华等. 安塞县土地利用现状遥感调查与制图. 见:黄土高原遥感调查试验研究. 北京:科学出版社,1998
- 14 陈光伟. 安塞遥感试验区自然条件和社会经济概况. 见:黄土高原遥感调查试验研究. 北京:科学出版社,1998
- 15 郑粉莉等. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨. 水土保持学报,1987,1(1)

(下转第 97 页)

松,一行刺槐。

表2 梁峁坡乔木混交林刺槐生长过程表

树龄 (a)	地径(cm)			树高(m)			材积(m <sup>3</sup> )		
	总生	平均生	连年生	总生	平均生	连年生	总生	平均生	连年生
	长量	长量	长量	长量	长量	长量	长量	长量	长量
3	3.4	1.13	1.13	1.5	0.50	0.5	0.002 62	0.000 87	0.000 87
6	5.4	0.9	0.67	3.5	0.58	0.67	0.010 04	0.001 67	0.002 47
9	7.1	0.79	0.57	4.8	0.53	0.43	0.018 65	0.002 07	0.002 87
12	8.1	0.68	0.33	5.9	0.49	0.37	0.029 72	0.002 48	0.003 69
15	9.1	0.61	0.33	6.9	0.46	0.33	0.035 04	0.002 33	0.001 77

表3 梁峁坡乔木混交林油松生长过程表

树龄 (a)	地径(cm)			树高(m)			材积(m <sup>3</sup> )		
	总生	平均生	连年生	总生	平均生	连年生	总生	平均生	连年生
	长量	长量	长量	长量	长量	长量	长量	长量	长量
3	3.2	1.07	1.07	0.24	0.08	0.08	0.000 07	0.000 02	0.000 023
6	5.4	0.90	0.73	0.80	0.133	0.187	0.000 6	0.000 1	0.000 177
9	7.2	0.80	0.60	1.94	0.216	0.38	0.002 7	0.000 3	0.000 7
11	8.6	0.78	0.70	3.18	0.287	0.62	0.005 1	0.000 46	0.001 2

### 3 结 论

黄土高原丘陵沟壑区有许多比较优秀的山坡地林草植被配置模式,这些模式是广大水土保持工作者多年实践、多年研究的结晶,因地制宜地推广这些模式,对于加快黄土高原地区林草植被建设速度,促进山坡地的生态稳定与经济持续发展具有重要的现实意义。

(上接第21页)

- 16 江忠善等.地形因素与坡地水土流失关系的研究.中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊,1990,第12集
- 17 贾志伟等.降雨特征与水土流失关系的研究.中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊,1990,第12集
- 18 王玉宽等.单次暴雨小流域产流产沙分布的定量研究.水土保持学报,1992,6(3)
- 19 陈永宗等.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1998
- 20 中国科学院西北水土保持研究所.黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持.西安:陕西科学出版社,1986
- 21 江忠善等.应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究.水土保持研究,1996,3(2)
- 22 贾绍凤.根据植被估算黄土高原的自然侵蚀和加速侵蚀——以安塞县为例.水土保持通报,1995,15(4)
- 23 刘志等.降雨因素和坡度对片蚀的影响.水土保持通报,1994,14(6)
- 24 孟庆枚.黄土高原水土保持.郑州:黄河水利出版社,1996
- 25 黄河水利委员会水土保持局.黄河流域水土保持研究.郑州:黄河水利出版社,1997
- 26 王玉宽.小流域土壤侵蚀分布的定量研究[硕士论文].陕西杨陵:中科院水利部水土保持研究所,1990
- 27 张科利.陕北黄土丘陵沟壑区坡耕地浅沟及其防治途径[硕士论文].陕西杨陵:中科院水利部水土保持研究所,1988