

砧砂岩地区小流域毛沟侵蚀特性分析^{*}

李怀恩¹, 谢毅文^{1, 2}, 蔡明¹, 李越³, 张康¹

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

3 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

[摘要] 为探讨砧砂岩地区毛沟的形成机理, 以内蒙古鄂尔多斯市东一支沟小流域 2005-05 地形及毛沟特征要素详细测量数据为基础, 分析了该流域的毛沟分布规律。结果表明, 该流域毛沟数量和单位面积毛沟长度从下游到上游呈递增趋势; 按毛沟的成因将其划分为自侵式毛沟和汇入式毛沟两类, 并从毛沟数量、沟底比降、毛沟长度、沟底宽、沟深等方面分析了这两类毛沟的主要特征。研究结果有利于深化人们对砧砂岩地区小流域毛沟侵蚀特性的认识。

[关键词] 砧砂岩; 毛沟侵蚀; 毛沟特征要素; 自侵式毛沟; 汇入式毛沟

[中图分类号] S157.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)03-0245-06

Analysis of rill erosion characteristics for small watershed in soft rock area

L I Huai-en¹, X I E Yi-wen^{1, 2}, CA I Ming¹, L I Yue³, ZHANG Kang¹

(1 Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education,

X i'an University of Technology, X i'an, Shaanxi 710048, China;

2 Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

3 Pearl River Water Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510611, China)

Abstract: To investigate the formation mechanism of rills in soft rock area, the paper focused on the geographical and rill characteristics of Dongyizhigou small watershed 2005-05 in Erdos, Inner Mongolia, and analyzed the distribution law of rills in this watershed. The results showed that the average quantity of rills and the rill length per unit area in this watershed increased from lower reach to upper reach; and the rills in this watershed could be divided into two types according to their formation cause: self-eroded rill and confluent rill. Finally, the distribution and main characteristics of these two types' rills were analyzed in aspects such as the number, ditch slope, length, width and the depth of rill. To sum up, the findings are beneficial to the recognition of rill erosion characteristics for small watershed in soft rock area.

Key words: soft rock; rill erosion; rill characteristics; self-eroded rill; confluent rill

砧砂岩地区位于鄂尔多斯高原、陕西内蒙接壤区域直接汇入黄河的一级支流和十大孔兑地区^[1]。由于砧砂岩岩质松软而易于侵蚀, 故砧砂岩地区千沟万壑, 地形独特, 是黄河流域基岩集中产沙的主要来源区^[2]。对砧砂岩地区沟道侵蚀前人已有不少研究^[3-5], 但都是从宏观上对整体沟道进行研究而不

够细致。为此, 本文通过实地调研和实测资料分析, 把沟道划分为支干沟道和毛沟, 针对毛沟的各项特征要素按上、中、下游进行深入细致的分析, 探讨砧砂岩地区小流域的毛沟特性, 以期为该地区的水土保持与生态建设提供科学依据。

^{*} [收稿日期] 2006-02-14

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50479067)

[作者简介] 李怀恩(1960-), 男, 陕西商南人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水文与水环境保护研究。E-mail: lhuaien@mail.xaut.edu.cn

1 毛沟初步分析

毛沟是指流域内最先产流的、具有一定深度的末级沟道。毛沟作为汇水成流的最前沿沟道, 象微血管一样伸入到流域的每一个角落, 所以砒砂岩地区到处都有毛沟的分布。毛沟控制绝大部分流域面积, 降雨等形成的径流绝大部分经毛沟汇入支干沟道。由于砒砂岩极易发生径流侵蚀^[6-8], 故只要坡面上存在具有一定流速和流量的径流, 就很容易侵蚀出毛沟, 这就是毛沟大量存在的主要原因。

毛沟的特征要素包括流域内的毛沟数量、毛沟总长、平均沟深、平均沟底宽、控制流域面积、沟谷坡顶流域坡面比降和沟底比降等。沟谷坡顶流域坡面比降是指毛沟所控制的沟谷坡顶流域坡面的比降(图 1), 其中沟谷坡顶流域坡面是指沟谷坡顶以上相对于沟谷坡面较平缓的坡面。假设毛沟侵蚀发生以前, 沟谷坡顶流域坡面平整而未发生沟壑切割, 则可用沟谷坡顶流域坡面比降表征毛沟侵蚀发生初期, 径流在沟谷坡顶流域坡面上的流速大小。

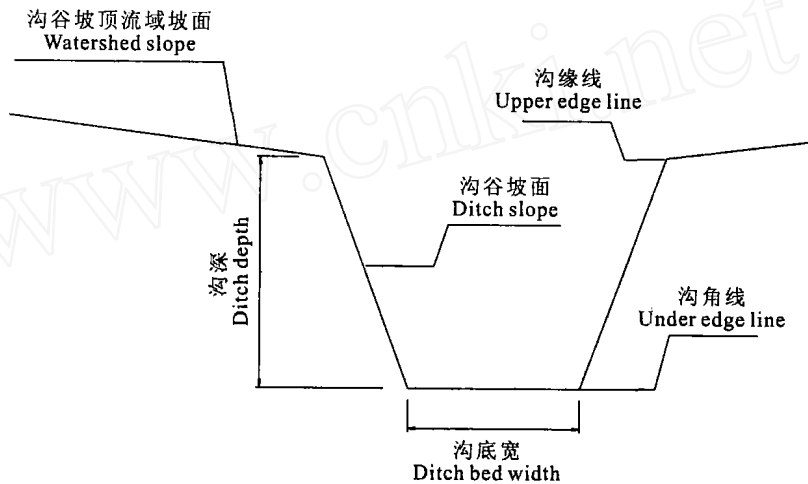


图 1 沟道特征要素示意图

Fig 1 A bridged general view of the characteristic factors of gully

虽然砒砂岩地区不同流域的土壤结构、地质组成、植被覆盖和暴雨径流特性等侵蚀因子差别较大, 但对于特定流域的一定时段, 这些因子基本确定, 则在特定流域内毛沟侵蚀主要受一些变化较大的因素影响, 如毛沟的沟深、沟底宽、沟长、数量、所控制沟谷坡顶流域坡面的面积和比降等特征要素。这些因素与毛沟侵蚀密切相关且在流域内各处差别较大, 可以作为特定流域内影响毛沟侵蚀的主要因素进行研究。

考虑到毕慈芬等^[11]已在东一支沟开展了较多研究, 本文亦选择该流域。东一支沟位于内蒙古鄂尔多斯市以东约 30 km 处, 2005-05 笔者对东一支沟沟道的基本特征及地形进行了测量。东一支沟 1[#] 谷坊以上流域面积 0.26 km², 流域内砒砂岩裸露, 沟道发育, 土壤侵蚀严重。本文的研究对象为沟深大于 1.5 m 的毛沟, 按照沟谷坡顶流域坡面比降的变化将东一支沟流域划分为上游、中游、下游 3 部分, 毛沟的主要特征要素测量及统计结果见表 1。

表 1 东一支沟流域毛沟特征要素实测结果

Table 1 Survey results of rills in Dongyizhigou watershed

位置 Location	毛沟 数量/条 Quantity of rills	流域 面积/km ² Area of watershed	毛沟 总长/m Total rill length	毛沟平均 长度/m Mean length per rill	平均沟深/m Mean ditch depth	平均 沟底宽/m Mean ditch bed width	沟底比降 Ditch bed gradient	沟谷坡顶流域 坡面比降 Watershed slope gradient
上游 Upper reach	23	0.114 7	2069.05	89.96	2.87	2.18	0.120 8	0.072 6
中游 Middle reach	7	0.050 2	264.21	37.74	3.04	5.84	0.192 7	0.051 4
下游 Lower reach	6	0.070 6	198.54	33.09	2.58	5.99	0.205 9	0.047 8

1.1 毛沟数量与沟谷坡顶流域坡面比降的关系

砭砂岩地区小流域上、中、下游的毛沟数量分布不均,东一支沟流域上游有23条毛沟,而中游和下游分别只有7条和6条毛沟。上游之所以毛沟多是因为上游的沟谷坡顶流域坡面比降较大,达0.0726;而中、下游的沟谷坡顶流域坡面比降较小,分别为0.0514和0.0478,毛沟数量也较少。从表1可知,毛沟的数量随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而增加。

东一支沟流域上、中、下游控制的流域面积大小不同,但每条毛沟的平均控制流域面积从下游向上游呈递减趋势。由于毛沟内的径流量主要受其控制的流域面积影响,也就是说在上游只需要较小径流量就能侵蚀出一条毛沟。

1.2 毛沟长度与沟谷坡顶流域坡面比降的关系

由表1可见,东一支沟流域上、中、下游的毛沟长度不同,上游的毛沟总长为2069.05 m,占全流域毛沟总长的81.72%;而中游和下游只有264.21 m和198.54 m,分别占全流域的10.44%和7.84%。可见,毛沟总长随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而增加。同样,单位流域面积的毛沟长度随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而增加;毛沟的平均长度也呈现出相同的变化趋势。

1.3 成因分析

假设在最初未发生沟道侵蚀时,沟谷坡顶流域坡面较为平整。由于微地形的差异,降水在沟谷坡顶流域坡面上形成的径流分散为许多股流。当流域面积一定时,沟谷坡顶流域坡面比降越大,坡面上的径流流速就越大,这些分散的股流易于侵蚀出毛沟。当沟谷坡顶流域坡面比降较小时,由于流速较小而难以形成毛沟,在向下游流动的过程中随着径流的汇集,特别是到坡面比降较大的地方出现较大的流速,从而侵蚀出毛沟。

一方面,流域面积一定,当沟谷坡顶流域坡面比降较大时,径流早在坡面的上游部分就具有较大的流速,易于形成较长的毛沟,因此毛沟平均长度较大;当沟谷坡顶流域坡面比降较小时,径流在靠近支干沟道的坡面下游部分才具有较大的流速,因而毛沟长度较小。可见,当流域面积一定时,毛沟长度随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而增大。

另一方面,流域面积一定时,当沟谷坡顶流域坡面比降较大时,分散而数量较多的股流各自都具有较大的流速,从而侵蚀出数量较多的毛沟;当沟谷坡顶流域坡面比降较小时,分散的股流因汇集而数量

减小,从而形成的毛沟数量较少。所以,流域面积一定时,毛沟数量随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而增加。反过来可知,毛沟平均控制流域面积随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而减小。

此外,流域面积一定时,沟谷坡顶流域坡面比降越大,毛沟长度就越大,毛沟数量越多,则单位流域面积的毛沟总长也就越大。所以,单位流域面积的毛沟长度随沟谷坡顶流域坡面比降的增大而增大。

1.4 毛沟的分类

由上面的讨论可知,一部分毛沟在毛沟控制的坡面上游已经形成,而另一部分毛沟则在坡面的下游才会出现。由此,可将毛沟划分为两种不同类型,即自侵式毛沟和汇入式毛沟。自侵式毛沟主要分布在流域上游,由径流在沟谷坡顶流域坡面上侵蚀而成。由于上游沟谷坡顶流域坡面比降较大,径流易于侵蚀出沟道,随着侵蚀发展,径流侵蚀出较深的毛沟,这些毛沟径流的汇集,进一步侵蚀出支、干沟道。所以,支、干沟道是由毛沟的汇集发展而来的。

汇入式毛沟主要分布在流域中游和下游,由径流在支干沟道附近的沟谷坡面上侵蚀而成。中游和下游因沟谷坡顶流域坡面比降较小,径流流速小而难以侵蚀出毛沟,但随着径流在坡面上的汇集,在支干沟道附近的沟谷坡面处,形成具有较大流量和较大流速的股流,冲刷侵蚀而形成的毛沟,即为汇入式毛沟。

2 自侵式毛沟和汇入式毛沟的特征分析

2.1 毛沟数量

东一支沟上游23条毛沟中只有2条属于汇入式毛沟,其余21条均为自侵式毛沟。按数量计,上游的汇入式毛沟数量只占全部毛沟数的8.7%,而自侵式毛沟占到91.3%。按沟长计,上游的汇入式毛沟总长为64.84 m,只占全部毛沟总长的3.1%;而自侵式毛沟总长为2004.21 m,占全部毛沟总长的96.9%。

中游7条毛沟中有2条属于自侵式毛沟,5条为汇入式毛沟。中游的自侵式毛沟数量只占全部毛沟数量的28.6%,而汇入式毛沟占71.4%。中游的自侵式毛沟总长为126.73 m,占全部毛沟总长的48.0%;而汇入式毛沟总长为137.48 m,占全部毛沟总长的52.0%。可见,流域中游的汇入式毛沟在数量上占优势,但沟长与自侵式毛沟基本相当。

下游6条毛沟全为汇入式毛沟,总长为198.54

m。其实,在下游也可能形成自侵式毛沟,如在东一支沟的下游东侧就有一条自侵式毛沟,沟长 80.06 m,沟底比降为 0.081 0,沟谷坡顶流域坡面比降为 0.100 9。

这说明只要有合适的条件,即较大的沟谷坡顶流域坡面比降,也能在中游和下游形成自侵式毛沟。当然,如果具备条件,在上游也能形成汇入式毛沟。但总的来看,自侵式毛沟主要集中在上游,而汇入式毛沟则主要集中在中、下游。

2.2 沟底比降

两种类型毛沟的沟底比降实测统计结果见表 2。由表 2 可见,汇入式毛沟的沟底比降明显大于自

侵式毛沟。汇入式毛沟中沟底比降最小值为 0.185 4,也较自侵式毛沟的最大值(0.154 3)大。那么汇入式毛沟的沟底比降是否会随着侵蚀的发展而逐渐减小,并最终发展成一条较长的自侵式毛沟,回答这个问题的关键在于汇入式毛沟沟口从哪里开始算起。假设汇入式毛沟各处径流对沟底的侵蚀厚度相等,由图 2 可知,随着侵蚀的长期发展,沟口和沟头位置后移,在沟口前侵蚀出一个平台(称为沟口平台)。如果按新的沟口位置计算,则沟底比降和沟长不变;若按原来的沟口位置计算,沟底比降减小,沟道变长。按原沟口位置算,经过长期侵蚀,汇入式毛沟将发展成自侵式毛沟。

表 2 不同类型毛沟沟底比降测量结果

Table 2 Survey results of rill bed gradient of different type

毛沟类型 Rill type	平均值/m Mean	最小值/m Min	最大值/m Max
自侵式 Self-eroded rill	0.112 5	0.066	0.154 3
汇入式 Confluent rill	0.209 3	0.185 4	0.242 2

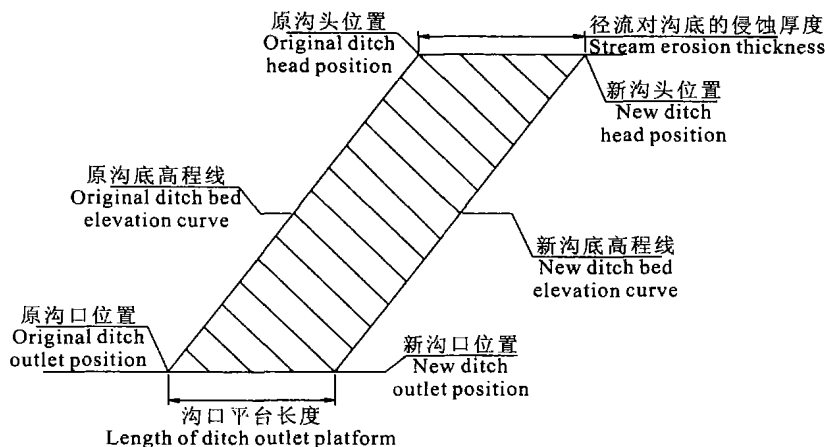


图 2 径流对汇入式毛沟沟底长期侵蚀的结果

Fig. 2 A influx platform is formed after a long-time runoff erosion on confluent rill bed

在砒砂岩地区沟口平台较为常见,在东一支沟下游 6 条汇入式毛沟中有 3 条存在沟口平台,中游 6 条汇入式毛沟中有 1 条存在沟口平台,上游的汇入式毛沟中未发现沟口平台。可见,沟口平台具有从下游往上游递减的趋势,这可能是由于支干沟道的沟底比降从下游往上游逐渐递增所致。

在上游自侵式毛沟中有 2 条毛沟(称为沟 1、沟 2)的沟底比降接近 0.15,它们具有沟谷坡顶流域坡面比降较小(与其所在毛沟群所控制流域的坡面比

降值 0.087 1 相比),沟口处沟深较大及沟长较短的汇入式毛沟的特征(表 3)。沟 1 和沟 2 有相当大的沟底比降值和汇入式毛沟特征但未将其归入汇入式毛沟范围,是因为这 2 条毛沟都处在最上游段,它们最终汇入其他毛沟而不是支干沟道,沟口处的沟深是径流侵蚀的结果。这种沟底比降大的自侵式毛沟,可能是本身沟深较大的自侵式毛沟向上游延伸时,其所产生的分支遇到沟谷坡顶流域坡面比降较小的地形而形成的。

表 3 沟 1、沟 2 的特征要素

Table 3 Survey results of characteristic factors of rill 1 and rill 2

毛沟名称 Rill's name	沟底比降 Ditch bed gradient	沟谷坡顶流域坡面比降 Watershed slope gradient	沟口处沟深/m Depth of ditch outlet	沟长/m Ditch length
沟 1 Rill 1	0.146 0	0.057 9	4.12	33.17
沟 2 Rill 2	0.149 6	0.068 2	4.85	22.47

2.3 毛沟长度

对于自侵式毛沟, 由于沟谷坡顶流域坡面比降较大, 径流在较长的坡面距离上具有较大的流速, 故能侵蚀出很长的沟道。而对于汇入式毛沟, 虽然沟谷坡面很陡但其范围小, 汇入式毛沟很难延伸到距离

沟谷坡面很远的地方, 故汇入式毛沟长度较短(表 4)。由表 4 可见, 东一支沟的自侵式毛沟平均长度为 96.15 m, 汇入式毛沟平均长度为 29.75 m, 汇入式毛沟长度一般不超过 50 m。

表 4 不同类型毛沟沟长测量结果

Table 4 Survey results of rill length of different type

毛沟类型 Rill type	平均值/m Mean	最小值/m Min	最大值/m Max
自侵式 Self-eroded rill	96.15	22.47	189.89
汇入式 Confluent rill	29.75	22.41	47.58

2.4 沟底宽

由表 1 可知, 东一支沟上游毛沟(主要是自侵式毛沟)的平均底宽为 2.18 m, 中游和下游毛沟(主要是汇入式毛沟)的平均底宽分别为 5.84 和 5.99 m, 均明显大于上游毛沟的平均底宽。这表明汇入式毛沟的沟底宽大于自侵式毛沟。

东一支沟上游的毛沟平均控制流域面积为 0.005 km², 中游和下游分别为 0.007 2 和 0.011 8 km²。说明汇入式毛沟控制流域面积较自侵式毛沟大, 所以汇入式毛沟内的径流流量较自侵式毛沟大; 加上汇入式毛沟的沟底比降较自侵式毛沟大, 因此汇入式毛沟的径流流速也较自侵式毛沟大。在流量大流速又快的情况下, 汇入式毛沟内径流对沟底床面和冻融堆积物的冲刷能力较自侵式毛沟强, 所以汇入式毛沟沟底宽的扩展速度较快, 这是汇入式毛沟沟底宽大于自侵式毛沟的主要原因。

2.5 沟 深

东一支沟上游毛沟的平均沟深为 2.87 m, 中游和下游毛沟的平均沟深为 3.04 和 2.58 m, 相互间差异不明显。自侵式毛沟由于较大的沟谷坡顶流域坡面比降和长时间的侵蚀, 故可以形成较大的沟深; 支干沟道的沟谷坡面高差(沟口处沟深)一般大于 4 m, 故汇入式毛沟也可能具有较大的沟深。

将东一支沟流域按上、中、下游和支干沟道切割情况划分为 7 个子流域。对 7 个子流域的毛沟特征数据的分析发现, 毛沟平均沟深 h 主要与沟谷坡顶

流域坡面比降 i 和单位流域面积毛沟长度 L 有关; 经分析, 平均沟深的 3 次方与单位流域面积毛沟长度的乘积及沟谷坡顶流域坡面比降 i 之间的关系最为密切(图 3), 其关系可由下式表示:

$$h^3 \cdot L = 661.89e^{88.439 \cdot i} \quad (r = 0.970\ 9)。$$
 (1)

由于 $L = L_m/A$, 其中 A 为毛沟的平均控制流域面积, 即流域总面积与毛沟数量的比值; L_m 为毛沟平均长度, 即子流域内的毛沟总长与毛沟数量的比值。将其代入式(1)中得

$$h = \sqrt[3]{\frac{661.89 \cdot e^{88.439 \cdot i} \cdot A}{L_m}}。$$
 (2)

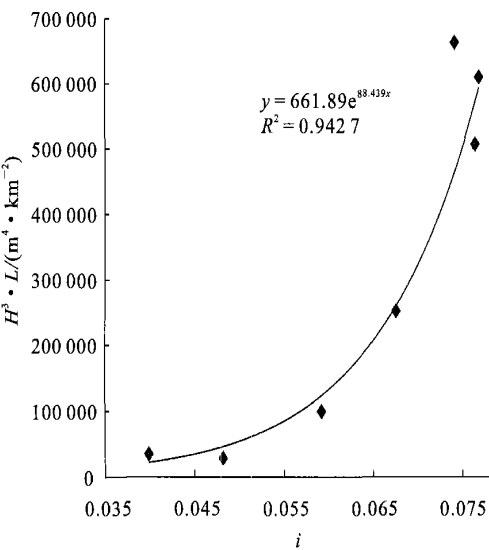


图 3 毛沟特征要素的关系曲线

Fig. 3 Correlation diagram of characteristic factors of rill

由式(2)可知,在其他条件不变的情况下,沟谷坡顶流域坡面比降越大,毛沟平均控制流域面积越大或毛沟平均长度越小,毛沟的沟深 h 越大。则可以认为:

(1)假设最初未发生沟道侵蚀时,沟谷坡顶流域坡面较平整,在其他条件不变的情况下,沟谷坡顶流域坡面比降越大,坡面上的径流流速越大,所以侵蚀出的毛沟沟深越大。

(2)在其他条件不变的情况下,毛沟平均控制流域面积越大,相当于流量越大,所以径流侵蚀出的毛沟沟深越大。

(3)毛沟平均长度越小,说明毛沟在其所控制坡面的靠下游位置才开始形成,即在靠近支干沟道的沟谷坡面处形成。由于支干沟道的沟谷坡面落差较大,距离较短,沟底比降较大,所以径流流速很大。另一方面,在沟谷坡顶流域坡面的下游,较多分散的股流汇集后,径流流量随之增大。因此毛沟(主要是汇入式毛沟)平均长度越小,其平均沟深就越大。

由此可见,毛沟沟深的形成与多方面的因素相关,是由沟谷坡顶流域坡面比降、毛沟长度、毛沟控制流域面积等因素共同作用的结果。从这个角度看,影响两类毛沟形成的因素基本相同,但各自的主要因素有所差别。

3 结 论

通过对砭砂岩地区东一支沟小流域进行实地调

查和实测资料分析,初步讨论了该流域的毛沟分布规律。根据成因将毛沟划分为自侵式毛沟和汇入式毛沟;从毛沟数量、沟底比降等要素按上、中、下游进行了深入细致的分析讨论,得出了这两类毛沟的主要特征与差异。本文研究结果对深化砭砂岩地区小流域沟道形成过程与侵蚀特征的认识具有积极意义。由于本文是以东一支沟小流域为对象进行讨论的,有关结果与结论尚需采用砭砂岩地区其他小流域的资料进行进一步对比和验证。

[参考文献]

- [1] 毕慈芬,王富贵,李桂芬,等.砭砂岩地区沟道植物“柔性坝”拦沙试验[M].//面向二十一世纪的泥沙研究.四川:四川大学出版社,2000.
- [2] 杨具瑞,方 铎,毕慈芬,等.砭砂岩区小流域冻融风化侵蚀模型研究[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(2): 87-93.
- [3] 杨具瑞,方 铎,毕慈芬,等.沙棘在砭砂岩区小流域冻融风化侵蚀中的作用[J].水土保持学报,2002,16(4): 41-44.
- [4] 许炯心.黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程[J].中国科学(D 辑),2000,30(5): 540-548.
- [5] 金争平,史培军,侯福昌,等.黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[M].北京:海洋出版社,1992: 65-66.
- [6] 石迎春,叶 浩,侯宏冰,等.内蒙古南部砭砂岩侵蚀内因分析[J].地球学报,2004,25(6): 659-664.
- [7] 高 科,任于幽,郑明军,等.科尔沁沙地风、水侵蚀原因及其动态研究[J].水土保持研究,2001,8(1): 110-115.
- [8] 张平仓,刘玉民,张仲子.皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J].水土保持通报,1992,12(2): 15-24.