

# 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估

王 随 继

(中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘 要:** 黄河中游, 尤其是以黄土丘陵沟壑区为代表的那些多沙区的侵蚀产沙是引起黄河下游河道严重淤积的主要原因。在这些地区, 水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀是其主要的外侵蚀因素。其中水力侵蚀已经得到比较深入的研究, 风力侵蚀也已引起人们的空前重视, 而对该区的冻融侵蚀的关注却相对薄弱。实际上, 冻融侵蚀对这些地区沟道的作用非常显著。从黄河中游丘陵沟壑区冻融侵蚀的环境背景、作用机理和表现方式等方面展开论述, 并根据沟道的岩性特点、沟道侵蚀量大小及对一些实测资料对比, 初步认为砒沙岩区的冻融侵蚀量可以达到沟道产沙量的一半左右, 最大可达流域侵蚀量的 1/3 左右。

**关键词:** 黄河中游; 丘陵沟壑区; 多营力侵蚀; 冻融侵蚀; 产沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2004)06-0001-05

中图分类号: S157.1

## Characteristics of Freeze and Thaw Weathering and Its Contribution to Sediment Yield in Middle Yellow River Basin

WANG Sui-ji

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Sediment yield and delivery in the middle reaches of the Yellow River basin, especially at the loess hill and gully areas, is a primary cause of rapid bed accretion at the lower reaches of the Yellow River. Water flow, wind and freeze and thaw weathering are the important external erosion forces contributing to sediment yield and delivery. Of these three factors, freeze and thaw weathering has not received adequate attention from researchers, given the magnitude of its contributing effects. The environmental background, action mechanisms and representative modes of freeze and thaw weathering occurring in the loess hill and gully areas of the middle Yellow River basin are described and discussed. The sediment yield generated by freeze and thaw weathering in the sandstone area is about 1/2 the sediment yield generated by gully erosion in the area and 1/3 of the total sediment yield of stream catchments, with variations depending on gully lithology, gully sediment yield and other measured data.

**Keywords:** the middle reaches of the Yellow River; loess hill and gully area; multiple agent; freeze and thaw weathering; sediment yield

流域侵蚀是导致土壤流失和下游河道严重淤积的直接原因, 目前, 我国研究者根据作用力类型将侵蚀作用基本上划分为水力侵蚀(降水及地表径流导致的侵蚀)、风力侵蚀(地表附近气流引起的侵蚀)、重力侵蚀(万有引力诱发的侵蚀)、冻融侵蚀(气候条件周期性变化引起的侵蚀)、冰川侵蚀(冰川行进过程中所引起的侵蚀)和人为侵蚀(毁林、开荒和各类工程等引起的侵蚀)等几类<sup>[1-2]</sup>

黄河中游地区, 尤其是丘陵沟壑区的侵蚀产沙, 是引起黄河下游河道严重淤积的主要物源区<sup>[3-4]</sup>。在该区, 尽管沟道区面积往往只有流域总面积的

30%~40%, 但沟道区的侵蚀产沙在黄土丘陵沟壑区第一副区则可以达到 60%~70%<sup>[5]</sup>。毕慈芬<sup>[6]</sup>进一步指出, 黄土丘陵沟壑区坡面的产沙量通常小于流域总产沙量的 30%, 而沟道产沙量往往超过流域总产沙量的 70%, 甚至达到 90%。

显然, 黄土丘陵沟壑区的沟道产沙是黄河下游泥沙灾害的主因。沟道产沙的成因非常复杂, 常常是各类因素叠加的复合结果, 其外在驱动力主要是水力、风力、冻融等侵蚀营力, 并通过重力而发生作用。为了达到产沙区水土保持的目的以及减少黄河下游的淤积, 就必须深入认识并有效地控制上述地域的侵蚀

收稿日期: 2004-04-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(40271019); 国家自然科学基金黄河联合基金项目(50239080)

作者简介: 王随继(1966—), 男(汉族), 博士, 副研究员, 从事沉积学、地貌学、水土保持研究。在国内外核心期刊上发表论文 40 多篇。电话 (010) 64889036, E-mail: wangsj@igsnrr.ac.cn。

产沙现象。研究区的水力侵蚀、风力侵蚀已经受到关注<sup>[7-8]</sup>,而该区的冻融侵蚀尚未引起足够重视<sup>[6-9]</sup>。

本文侧重探讨黄河中游丘陵沟壑区冻融侵蚀的有关表现特征,并初步估计其在重力参与下的沟道产沙贡献。

### 1 冻融侵蚀区的气候特征

冻融侵蚀发生的基本气候条件是气温和降水 2 个因素。冻融侵蚀发生的地区,首先是其年内有必要长的气温低于 0℃的天数,能足以使地球表层中积聚的水体完全凝结成冰,同时还要有足够长的高于 0℃的天数,以便上述冰体完全消融。显然,包括黄河中游地区在内的温带地区能够满足这个条件。这是冻融侵蚀发生的必要条件。另一必要条件是要具备一定的降水量,尤其以秋天后期降水量的多少最为关键。这些降水能够下渗到地表内必要的深度,作为冻融作用的驱动主体。

黄河中游包括黄土高原丘陵沟壑区在内的地区处于温带,年 0℃ 以下天数基本局限于 105~125 d/a (图 1),大致是年总天数的 1/3 左右。该研究区的多年平均降雨量主要在 300~600 mm/a 之间(图 2),而汛期降雨量达到全年的 70% 以上。显然,研究区具备冻融侵蚀作用发生的气候条件。

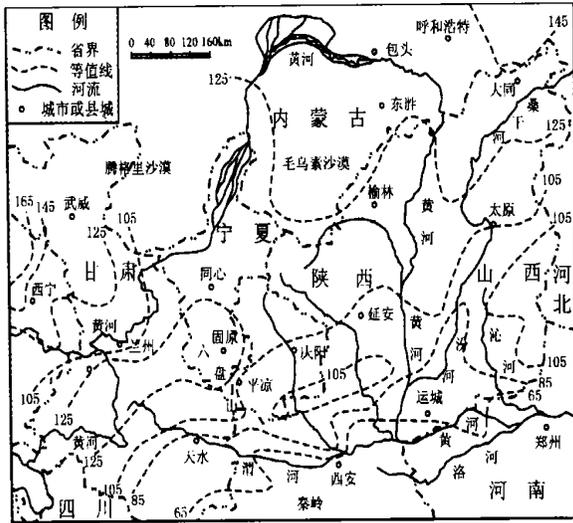


图 1 黄土高原年小于零度天数等值线图(d/a)

### 2 冻融侵蚀区的地质特征及物质组合

陆地表层的侵蚀作用是地貌演变的一个非常重要的方面,是内外营力长期相互作用的结果,内营力造就了不同地貌的骨架,而外营力驱动着地貌轮廓的演变。黄土高原本身就是地球内部构造营力作用下形成的高地,在其形成过程中岩层所发生的褶皱、节

理、断层等,为随机的外营力作用提供了可选择的地形条件<sup>[2]</sup>,也即地球内营力驱使地表的随机侵蚀向定向侵蚀发展。包括风积黄土在内的第四系沉积物以及露头基岩又为侵蚀提供了可蚀的物质条件。外营力的侵蚀驱动和自重应力使得被侵蚀泥沙初步汇聚在沟道等低洼地。地表径流、近地表气流等为侵蚀物质的输移提供了动力条件。植被的消长、以及近年来加剧的一种特殊外营力——人类侵蚀活动对侵蚀作用施加了强烈的非自然驱动力。

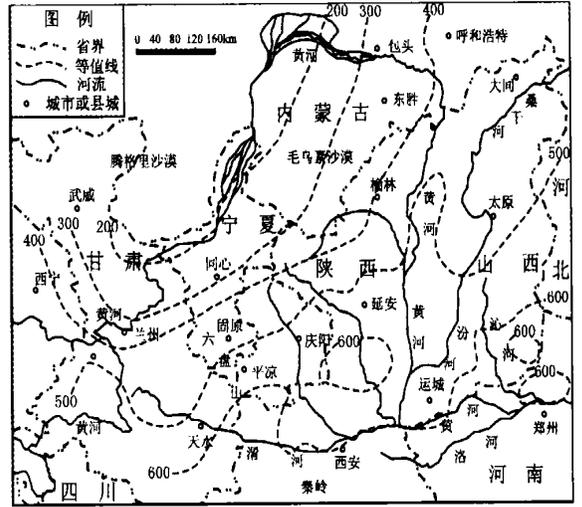


图 2 黄土高原多年平均降水量等值线图(mm/a)

冻融侵蚀的场所自然是上述有关内外营力共同作用下创造的侵蚀环境,除了前述的气候条件外还包括地质构造条件、地貌条件、物质条件等。地质构造条件使得原始沉积地层能够出露于地表,并能提供冻融发生的有关露头面、层理面和构造面;地貌条件造就了冻融侵蚀发生所需要地形、坡度甚至朝向等因子;物质条件主要指易于发生冻融侵蚀的物质,显然,对于古代岩层来说,质地坚硬的变质岩和火成岩难以发生冻融侵蚀;而陆源碎屑沉积岩由于原生孔隙以及各类沉积构造面的发育而有利于冻融侵蚀的发生;另外,第四纪沉积物包括黄土也是与冻融侵蚀有关联的物质。黄河中游的冻融侵蚀主要发生于流域的沟坡上,实际上也就是这些沟坡具有有利于冻融侵蚀发生的地质、地貌和物质条件的组合。

冻融侵蚀的发生还需要透水性和聚水性地层在空间上呈现有效的组合。由于黄土本身的透水性较强,因此,单纯的黄土地层中不易发生冻融侵蚀。常见的冻融侵蚀发生在黄土地层与基岩接触面附近,或者发生在疏松的碎屑沉积岩层的露头上。前一种物质组合主要分布在黄土高原丘陵沟壑区第 3 副区及部分第 2 副区的谷坡上(图 3a),透水性较强的黄土

层比较厚,在谷坡上出露的比例相对其下的非透水性基岩层(主要是致密的第 3 系红层)要厚得多,因此,冻融侵蚀基本发生在谷坡与沟谷分界处的坡麓带——也即 2 类岩性接触面的上部有限区域。后一种物质组合主要发生在黄土高原丘陵沟壑区第一副区的谷坡上(图 3b),这些地区现有的黄土层比较薄,其谷坡上以中生界碎屑沉积岩露头为主。

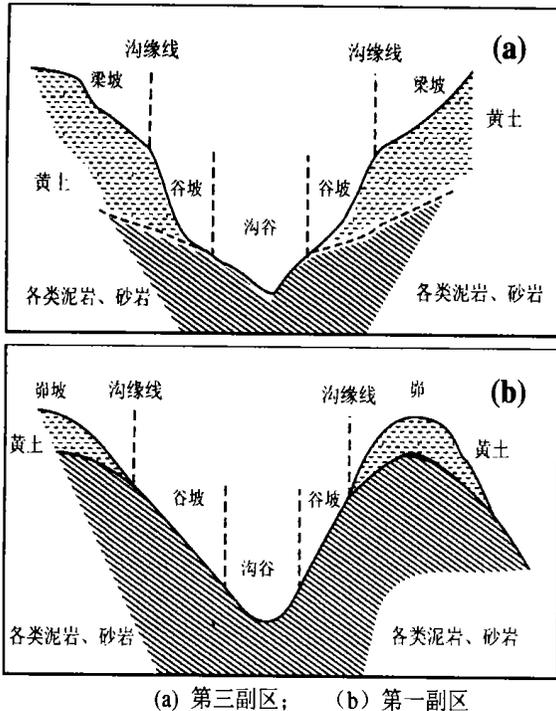


图 3 黄河中游沟壑物质特征示意图(d/a)

实际上,这些看似疏松的沉积岩常常由非常薄的泥岩、粉砂岩和砂岩的多重交互层构成。尽管在地下,泥岩常常比较致密而成为不透水层,砂岩具有较高的空隙度而成为透水层,但在地表露头(常常表现为经受各类外营力改造的断裂带)上,这些薄层的易碎的泥岩因含有大量的黏土矿物而吸水膨胀,从而导致其变得疏松;相对于泥岩而言,砂岩由于透水性强而容易接纳雨水。这为冻融侵蚀创造了必要的条件。显然,冻融侵蚀不但可以发生在黄土与基岩的接触面附近(主要在黄土丘陵沟壑区第 3 副区),而且能够发生在整个沉积岩的沟道露头中(主要在黄土丘陵沟壑区第一副区)。

### 3 冻融侵蚀的表现方式

在黄河中游的多沙粗沙地区,沟道中的侵蚀产沙量占绝对优势。据唐克丽的资料<sup>[10]</sup>,皇甫川流域前第四系基岩产沙量占总产沙量的 69.51%,而黄土中来沙量仅占 30.37%。众所周知,研究区的沉积基岩

是古代沉积环境中松散沉积物经过压实、固结和成岩作用而形成的,相对于从未固结成岩的黄土来说,则具有更强的抗蚀能力。那么,是什么原因导致上述地区沟道中如此之高的基岩产沙量呢?这主要归功于冻融风化侵蚀作用,因为风力和降水对这类基岩的直接侵蚀能力并不可观。

#### 3.1 岩层内部的冻融侵蚀作用

黄河中游的多沙粗沙地区集中在黄土丘陵沟壑区第一副区,沟谷中出露中生界砂岩、泥岩,个别沟道中出露变质页岩。这些地层本来已固结成岩,但是,随着其出露之后,泥岩的吸水膨胀使得其变得疏松;而厚层砂岩孔隙中水体会渗入其中。随着气温的下降,孔隙中的水体发生由液态到固态的相变。在水到冰的相变期间,其体积增加 9.2%<sup>[11]</sup>。因为结冰首先发生在岩体表层,从而使表层孔隙较早封闭。随着持续降温,近表层的孔隙中水体也逐渐结冰,孔隙水因结冰而发生膨胀,这种比容的变化对孔隙壁产生的挤压可达  $6000 \text{ kg/cm}^2$ <sup>[11]</sup>,这样巨大的压力容易使岩体中颗粒发生错动,从而消除了原始胶结物的粘结作用。当冰体消融后,已松动的颗粒就会坠落。

#### 3.2 岩石节理面及断裂面上的冻融侵蚀作用

地质构造作用是黄土高原的主要内营力,它会导致岩层中存在较多的节理面、裂隙面甚至较大的断裂面。与岩体表层的化学风化作用不同,这些构造面的深度较大,有利于水体渗入较深的部位。冰冻时节,这些构造缝内近地表层的水体同样会结冰,从而对构造面产生强烈的挤压作用(冰辟作用)。水体的结冰膨胀导致这些渗水面的间距扩大,对周围岩层进行挤压从而使之破碎。当冰体随着气温的升高而消融后,这些破碎的岩屑就会发生塌落,并聚集在沟道中,在汛期极易被流水搬运。显然,冻融侵蚀起着决定性的作用。

#### 3.3 层面上的冻融侵蚀作用

黄土高原多沙粗沙区的基岩除了一些厚层的砂岩外,最常见的是被称为“砒沙岩”的岩层(图 4),其特点是薄层的杂色泥岩和粉细砂岩互层,由于该区的泥岩比较致密,而粉细砂岩的透水性相对较高,其层面成为物理性状差异的分界面。秋末的降水在渗入该类层面后会适量保存,严寒时发生结冰,从而在层面内形成类似冰辟作用的冻融侵蚀作用。冰冻作用的直接后果是导致露头基岩表层变得疏松和发生破碎。而冰体消融作用导致疏松的泥岩大幅度剥落以及破碎粉细砂岩的坠落(图 4a),或者导致顺层面的差异滑落(图 4b),从而在沟道中聚集了非常可观的泥沙,这也为雨季流水的输移创造了充足的物质条件。

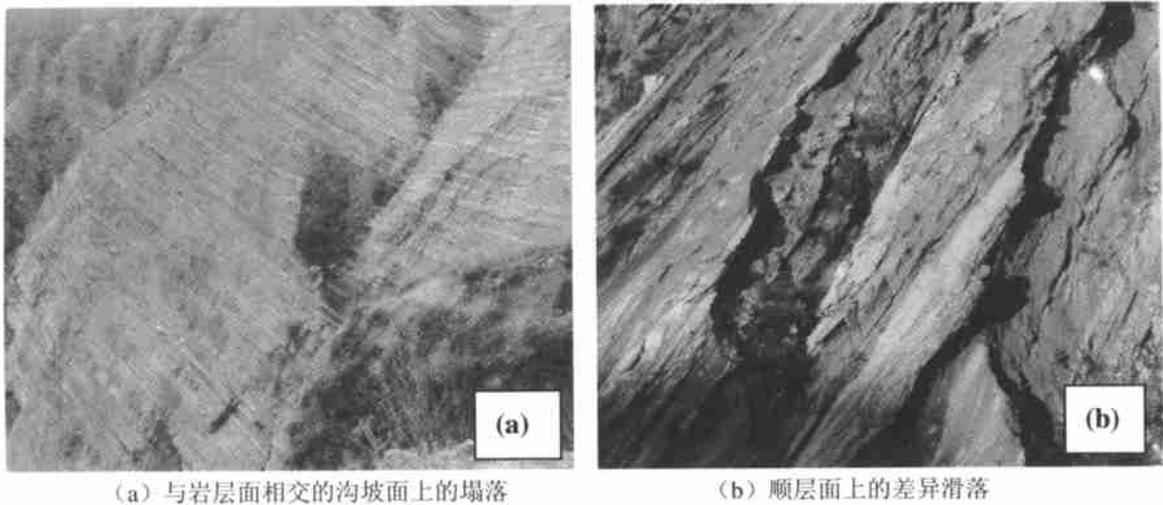


图 4 砒沙岩区沟坡上的冻融侵蚀特征( d/a)

### 3.4 黄土与基岩接触面上的冻融侵蚀作用

前述的几类冻融侵蚀的客体是基岩, 而这类冻融侵蚀的客体则是黄土地层。相对于黄土来说, 其下伏基岩的透水性却要差得多, 对于黄土丘陵沟壑区第 3 副区来说尤其明显, 因为其下伏基岩主要是非常致密的第 3 系红层。深秋的降水在沟坡黄土层中将下渗, 由于基岩透水性能相对较差, 水体在基岩面附近的黄土层中相对富集。随着气温的下降, 发生水到冰的相变从而导致其体积发生膨胀, 巨大的压力会导致含水层上部层位的黄土松动, 但难以造成下部致密基岩的破碎。气温回升时的消融作用使得含水层黄土湿松, 并沿基岩面发生滑塌或泻溜, 这些滑塌及泻溜的发生会导致其上部层位的黄土失稳, 从而产生继发性崩塌。

这样会导致沟道中黄土质泥沙的大量堆积, 是汛期前几次大雨或暴雨高强度输沙的主要泥沙来源之一。

## 4 冻融侵蚀产沙能力评估

前已述及, 黄河中游沟道产沙在流域总产沙中的贡献具有举足轻重的地位, 其中冻融侵蚀产沙究竟占多大的比例目前还没有人试图给出。对于冻融侵蚀比较发育的黄土高原北部的一些典型砒沙岩地区, 毕慈芬曾调查发现<sup>[6]</sup>: 西召沟东一支沟在 1998 年的冻融风化层平均厚 5 cm; 西召沟主沟道 1999—2000 年均冻融风化层厚度为 1.94 cm。在皇甫川也曾观测量到 10 cm 厚的冻融风化层。窟野河的流量和输沙量资料(表 1) 从另一方面反映了冻融侵蚀的严重性。

表 1 窟野河温家川站不同时段的径流量、输沙量比较

年份	径流量/ $10^8 \text{ m}^3$ <sup>①</sup>			输沙量/ $10^8 \text{ m}^3$ <sup>①</sup>			径流比/%		输沙比/%		含沙量/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	
	$W_a$	$W_b$	$W_c$	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$W_a/W_b$	$W_a/W_c$	$S_a/S_b$	$S_a/S_c$	$S_a/W_a$	$S_c/W_c$
1954	1.87	9.20	12.98	1.11	2.25	2.27	20.30	14.40	49.30	48.90	0.59	0.17
1964	0.82	4.60	8.20	0.41	1.11	1.16	17.80	10.00	36.50	34.90	0.49	0.14
1976	1.98	5.92	8.35	1.76	2.86	2.88	33.40	23.70	61.50	61.10	0.89	0.34
1984	0.45	3.19	5.46	0.50	0.74	0.78	14.10	8.20	67.60	64.20	1.11	0.14

注: ①表中的径流量和输沙量原始资料收集于相应年份的《黄河水文资料》(黄河水利委员会内部资料)。W——径流量; S——输沙量; a——最大一日; b——6—9月; c——全年。

表 1 资料表明, 窟野河的最大一日径流的输沙量占 6—9 月输沙量的 36.5%~67.6%, 占全年的 34.9%~64.2%, 也即达到全年输沙量的 1/3~2/3; 而最大一日径流量则分别占 6—9 月和全年径流量的 14.1%~33.4% 和 8.2%~23.7%, 也即约为年径流量的 1/10~1/4。显然, 最大一日径流的水力侵蚀不可能有如此之强。这说明最大一日的输沙来源绝大多数是沟道中积聚的早期侵蚀沙。唐克丽认为<sup>[10]</sup>, 皇甫川流域中的产沙量中, 源自基岩的占 69.51%,

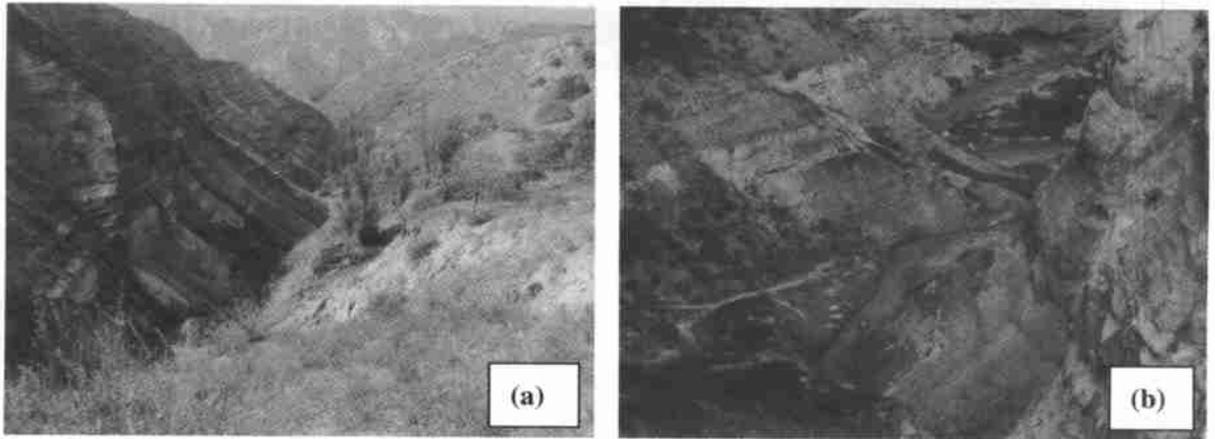
而来自黄土的占 30.37%。对于砒沙岩地区而言, 这些早期侵蚀沙大部分是露头基岩经受冻融侵蚀的产物, 图 5a 清晰地表明, 沟道产沙主要是砒沙岩露头一坡(图片左部), 而发育植被的黄土坡(图片右部)显然产沙有限。基岩的冻融风化侵蚀作用为该区沟道产沙的基础, 而风力作用和重力作用只是在冻融侵蚀充分作用下的后续作用力。图 5b 表明洪水过后沟道中早期的侵蚀沙基本被完全带走, 这主要归功于最大一日的径流, 因为较次级的 4 d 径流量的输沙量很小。

显然,这些沙量中相当一部分是沟道中非水力侵蚀产生的泥沙的早期汇聚体,沟坡当然是其主要源区。

考虑到沟道中沟坡主要为基岩物质,而风力、水力对它的直接侵蚀能力有限,单纯的重力作用也不至于产生大量的坍塌,因此可以初步归结出在以砒沙岩为主的黄土丘陵沟壑区第一副区,其冻融侵蚀产沙量至少可以达到其沟道产沙量的一半以上,最大可以达到这些流域总侵蚀产沙量的  $1/3$  左右,当然,不能排除这里面也有重力复合作用的贡献。而在黄土丘陵沟壑区第 3 副区,由于物质条件的限制,其比例应该

更小一些,其产物主要是开春后的黄土泻溜物质,以前通常被研究者归结在重力侵蚀类别中。

这里冻融侵蚀产沙量的估计仅仅是初步分析的结果,无论如何,它在黄土高原多沙粗沙区以出露“砒沙岩”为特征的沟道产沙中具有重要的地位,而通常的人工预防侵蚀的措施对此却无能为力。淤地坝尽管在沟道拦沙(包括对冻融侵蚀产物的拦截)中效果不错,但也无法减小冻融侵蚀作用。因此,有关该区冻融侵蚀的现象、机理、方式的更深入的研究和对其产沙的精确估计,必将是研究者非常关注的论题。



(a) 左坡为砒沙岩,右坡为发育植被的黄土层

(b) 两侧都是砒沙岩

图 5 沟道中产沙输沙状况(d/a)

## 5 结 论

(1) 黄河中游的冻融侵蚀是在气候、地质、地貌、物质组成等多因素相互作用的条件下,以水体的冰冻和消融为其主驱动力,并通过重力发生作用的一种重要的地表侵蚀作用过程。

(2) 通过初步的分析可以得出,在以大面积出露砒沙岩为特征的黄土丘陵沟壑区第一副区,其冻融侵蚀主要发生在沟道中,在有重力作用参与的情况下,冻融侵蚀产沙量至少可以达到沟道产沙的  $1/2$  左右,最多可以达到这些特殊流域侵蚀产沙量的  $1/3$  左右。而在黄土丘陵沟壑区第 3 副区则相对小一些。

(3) 砒沙岩冻融侵蚀具有年复一年、周而复始的特点,又是多营力侵蚀产沙驱动力中一支不可抗拒的作用力,需要对其产沙量进行更深入的估算,在侵蚀灾害治理方面也需要引起人们的足够重视。

### [参 考 文 献]

[1] 孙中峰,宋朝峰,李文淑,等. 浅析冻融侵蚀机理与防治对策[J]. 黑龙江水利专科学校学报, 1999, 26(3): 34—35.  
[2] 张翼. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究进展[J]. 水土

保持学报, 2001, 15(2): 121—125.

- [3] 许炯心. 黄河上中游产水产沙系统与下游河道沉积系统的耦合关系[J]. 地理学报, 1997, 52(5): 421—429.  
[4] 王随继. 黄河下游河型的特性及成因探讨[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 73—78.  
[5] 韩学士, 宋日升. 伊克昭盟砒沙岩侵蚀特征及治理对策[J]. 人民黄河, 1996(1): 31—33.  
[6] 毕慈芬. 黄土高原基岩产沙区治理对策探讨[J]. 泥沙研究, 2001(4): 1—6.  
[7] 张平仓. 水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究—以神木六道沟小流域为例[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 93—94.  
[8] 唐政洪, 蔡强国, 李忠武, 赵怀玉. 内蒙古砒沙岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 25—29.  
[9] 杨具瑞, 方铎, 毕慈芬, 等. 砒沙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, 12(2): 87—93.  
[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[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 49—55.  
[11] 刘宝君. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980. 497.