

内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析

石迎春 叶 浩 侯宏冰 毕志伟

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄, 050061

摘 要 内蒙古南部砒砂岩分布地区的岩土侵蚀非常强烈, 外界原因是当地的气候自然条件十分恶劣, 而内在根源是当地有大量易于侵蚀的物质—砒砂岩。本文从矿物成分、化学成分、岩性组合、颗粒密度、岩体构造和工程性质等方面对砒砂岩易于侵蚀的内因进行了初步解析。

关键词 砒砂岩 岩土侵蚀 侵蚀原因 内蒙古南部

The Internal Cause of the Erosion in “Pisha” Sandstone Area, Southern Inner Mongolia

SHI Yingchun YE Hao HOU Hongbing BI Zhiwei

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei, 050061

Abstract The rock and soil erosion in Pisha sandstone area of southern Inner Mongolia has been very serious. Its external causes are local atrocious climate and awful nature conditions, whereas its internal cause seems to be the existence of abundant erodible materials—“Pisha” sandstone. The intrinsic cause for the erosion of “Pisha” sandstone has been tentatively analyzed in this paper in the light of minerals, chemical compositions, rock associations, grain size distribution, structure characteristics and engineering features.

Key words “Pisha” Sandstone rock and soil erosion cause for erosion Southern Inner Mongolia

前人对岩土侵蚀发生的原因已作了大量的探讨, 但是他们多是从气候条件、地形条件和人为活动等外界因素出发(刘志等, 1994; 高科等, 2001), 而往往忽略了某个地区易于发生侵蚀的根本原因是当地分布有大量易于侵蚀的物质。如果没有这些易蚀物质, 外界自然条件即使再恶劣, 都不会有强烈的侵蚀作用发生, 因此, 本文认为, 被侵蚀物质的物理化学性质就是侵蚀的内因因素。

内蒙古南部地区分布有大量的三叠系地层, 由于抗侵蚀能力低下, 极易受水流冲刷, 当地人称之为砒砂岩。由于特定的地表物质和较为恶劣的气候自然条件, 使这一地区的岩土侵蚀非常剧烈, 不但生态环境恶化, 对当地的经济发展和环境保护极为不利, 而且, 其主要产沙物质——砒砂岩是黄河粗沙(直径大于 0.05 mm)的重要来源之一(张平仓等, 1992)。为了能为制定合理的改造和防治岩土侵蚀措施提供

科学依据, 本文通过解剖典型地段来分析研究砒砂岩强烈侵蚀的内因原因。

1 研究区概况

此次研究在布尔洞沟进行, 布尔洞沟地处内蒙古伊克昭盟沙圪堵镇北部纳林乡境内, 属于黄土高原与鄂尔多斯高原的过渡地带, 是皇甫川流域纳林川中游的一条一级支沟, 流域总面积为 84 km²。流域内出露的基岩地层为三叠系刘家沟组砂岩, 近似水平展布, 其岩性主要为浅粉红色、灰白色长石石英砂岩与含砾中粗粒砂岩互层, 夹紫红色泥岩及粉砂质泥岩, 水平层理、交错层理极其发育, 含泥砾较多, 属河流相粗碎屑沉积^①。

研究区属典型的大陆性半干旱气候, 年平均降雨 400 mm, 6~9 月份降雨量占全年降雨量的 70%~80%, 并常以暴雨出现。年温差较大, 蒸发量

本文由中国地质调查局项目(编号: Z3·2·1)资助。

改回日期: 2003-3-25; 责任编辑: 宫月萱。

第一作者: 石迎春, 女, 1976 年生, 工程师, 主要从事环境地质方面研究; E-mail: wanyuanzhichun@sina.com。

① 本文的砒砂岩均指刘家沟组砂岩。

大大超过降雨量。大风天气较多,最大可达 8 级,远远超过当地的起沙风速。流域内沟壑纵横,沟壑面积占总流域面积的 25% 左右,平均沟壑密度可达 9.08 km/km^2 。这些不利的自然条件使当地的各种侵蚀类型都强烈发育,年平均侵蚀模数达 $2\times 10^4\text{ t/km}^2$ 。如此巨大的侵蚀模数与当地广泛分布的砒砂岩的物理化学性质有密切的联系。

2 砒砂岩性质与侵蚀的关系

据研究表明,砒砂岩是流域内最主要的产沙物质,其基岩产沙量占总输沙量的 68.5% (张平仓等, 1992)。本文将从以下几个方面详细讨论砒砂岩的抗侵蚀能力。

2.1 砒砂岩矿物组成

砒砂岩的基岩由各种矿物组成,因此,它的抗侵蚀能力与构成岩石的各种矿物的物理化学性质具有不可分割的联系。其矿物成分见表 1。

从表 1 可以看出,刘家沟组砒砂岩的主要矿物是石英、钙蒙脱石、长石和方解石。其中石英的质量分数平均为 50%,小于自然界砂岩中石英平均质量分数的 66.8%,这说明砒砂岩成分成熟度不高,必定会向着更成熟的方向转化。

砒砂岩中主要的碎屑颗粒是石英和长石,还有少量的石英岩岩屑或粘土岩岩屑。石英是极为稳定的一种矿物,它抵抗风化的能力非常强,而且几乎不发生化学溶解作用,因此,石英本身不是导致砒砂岩抵抗侵蚀能力弱的原因。但是,另一方面,正是由于石英颗粒的持久性,才使这些颗粒易于导致河道长期淤积。

长石在砒砂岩中的平均质量分数为 14%。根据薄片分析,解理和双晶都很发育(图 1),在当地恶劣的气候条件下,极易风化,导致岩石结构被破坏,抵抗侵蚀能力减弱。而且,长石主要的风化物——高岭石往往呈粉末状,抵抗侵蚀能力最差。因此,长石是砒砂岩抗侵蚀弱的重要原因之一。

砒砂岩中起胶结作用的是碳酸盐矿物,但有时粘土矿物也同时参与胶结作用。碳酸盐矿物的主要成分为方解石和少量白云石。因为方解石的化学性质较为活泼,一方面,它的抗风化能力较弱,另一方面,当它遇到水流后,易与水中的 CO_2 发生化学反应,被水流带走,从而减弱砂岩颗粒之间的胶结作用。

胶结作用对岩石的抗侵蚀能力至关重要,胶结力强的岩石不易被水流破坏,而胶结力弱的岩石则易遭水流的冲刷。从以上分析可以看出,刘家洞组砒砂岩属于弱胶结类型,主要有 4 方面的原因:①胶结物方解石质量分数普遍较少,除个别地点岩石样品中方解石质量分数大于 10% 外,多数都只有 5%,有的甚至只有 1%;②胶结类型多为颗粒支撑,孔隙式胶结;③相对于硅质胶结来说,方解石胶结属于较弱胶结类型,这与它本身的化学性质较为活泼有关;④砒砂岩中有些方解石晶粒虽然较为粗大,但围绕在碎屑颗粒周围呈放射状球粒集合体,还未形成较为牢固的胶结结构(图 1 至图 3)。

砒砂岩中的基质是粘土矿物,主要是蒙脱石以及少量伊利石和高岭石,它们的质量分数较高,有时甚至超过 30%,这也说明砒砂岩的结构尚不成熟。尽管砒砂岩中的粘土矿物已重结晶(图 1,图 2),属于正杂基范畴,但它们多呈细小鳞片状,再加上粘土矿物具有亲水性,所以易于被水流冲刷。其中蒙脱石的含量最高,因此它对砒砂岩的影响就更大。由于蒙脱石本身就是在风化条件下或者沉积环境中生成的,因此它在风化带中相当稳定,干燥环境下不会导致岩体破坏。但是,当它遇到水流,其膨胀的体积可达到干燥时的 150% 左右,这样就在岩体内产生巨大压力。当雨季来临,蒙脱石遇水膨胀,导致岩体微结构的破坏,为各种侵蚀营力的入侵打下基础。

另外一点需说明的是,砒砂岩中的粘土矿物并不只是作为杂基而存在,有时也作为胶结物而存在(图 3),但是,由于粘土的胶结作用比较弱,而且胶

表 1 刘家沟组砒砂岩矿物成分
Table 1 Minerals in Liujiagou Pisha sandstone

类别	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	钙蒙脱石	伊利石	高岭石
最大含量	70	25	10	26	2	35	8	6
最小含量	30	5	0	0	0	10	0	0
平均含量	49.9	11.4	2.9	10.5	1.9	18.6	3.3	1.9
标准偏差	10.3	6	3.7	8.6	0.4	6.5	3.1	2.5

注:此表为 X 射线衍射分析结果。

结物结构并不成熟(图 3),因此,粘土矿物并不能改变砒砂岩的弱胶结状况。

由前面的分析得知,砒砂岩的碎屑颗粒、胶结物和杂基对岩体脆弱的抗侵蚀性起到了至关重要的作用。在当地的气候及自然条件下,长石的易于风化,蒙脱石的遇水膨胀都使本来胶结较弱的砒砂岩更是脆弱,导致岩体破碎不堪,进而使岩体完全失去抵御水流冲刷的能力。而石英尽管对岩体的抗侵蚀能力没有影响,但是被冲刷后的石英颗粒由于难以分解,导致河道下游泥沙长期堆积,使河道不畅,引起水患。

刘家沟组砒砂岩主要由 2 种岩性组成,紫红色砂岩与灰白色砂岩相互间杂,其中含有厚度不等的棕红色砂质或粉砂质泥岩,为了区别两种颜色砂岩抗侵蚀能力的强弱,分别进行解析。

根据表 2,灰白色砂岩与紫红色砂岩的石英、钾长石、方解石、白云石、伊利石和高岭石平均含量几乎相同,但灰白色砂岩的钙蒙脱石的含量稍微比紫红色砂岩高一些,前者其质量分数平均为 20%,而后者则只有 15.8%,因此,灰白色砂岩的抗侵蚀能力比紫红色砂岩稍差,这与野外所看到的处于地表的灰白色砂岩总是风化成白色豆腐渣状是相一致的。

相对于灰白色砂岩与紫红色砂岩的相似性,紫红灰白条带砂岩则又是另外一番情形。从表 2 可以看出,条带状砂岩的石英含量比灰白色砂岩与紫红色砂岩要低 8 个百分点,而造成岩石结构不稳定的

矿物长石和粘土矿物则明显比另外两种高,而且,砂岩的主要胶结物方解石含量非常少,根据前面的分析可以断定,灰白、紫红相互夹杂砂岩的抗侵蚀能力比灰白色或紫红色单色砂岩弱,这也与野外调查时见到的交错层理特别发达的地区岩石总是较破碎的现象相一致。

2.2 砒砂岩化学成分

为了深入分析砒砂岩的抵抗侵蚀能力,笔者对砒砂岩作了化学成分分析。从表 3 看,砒砂岩的化学成分在总体上虽然比较稳定(稳定组份 SiO₂ 质量分数为 76.80%,Al₂O₃ 质量分数为 10.60%,Fe₂O₃ 为 1.57%,总的质量分数超过 89%),但岩石性质活泼与否是由不稳定组份来决定的,而砒砂岩里面的不稳定组分 Na₂O、K₂O、CaO 占总化学成份的 4.41%,含量虽然远远不及稳定组份,但它们异常活泼,极易发生化学变化,因此也容易导致岩体结构的破坏,使岩体抵抗侵蚀的能力减弱。

2.3 砒砂岩的岩性组合

岩石性质不同导致其抗侵蚀能力不同,不同岩石组合在一起使岩体的抗侵蚀能力发生巨大变化,如泥岩与砂岩组合时容易引起崩塌侵蚀的发生,不同颜色的砂岩组合导致岩体易于风化等。然而,刘家沟组砒砂岩又存在多种岩性组合方式,这对其抗侵蚀能力具有重大影响。

2.3.1 砂岩与砂质泥岩组合 研究区的棕红色砂质泥岩由于泥质含量高,而且砂的颗粒也比较细小(半径常常小于 0.05mm),比表面积大,表面效应

表 2 刘家沟组三种砂岩的矿物成分
Table 2 Minerals of three sandstones in Liujiagou Formation %

矿物	灰白色砂岩				紫红色砂岩				紫红灰白条带砂岩			
	最大含量	最小含量	平均含量	标准偏差	最大含量	最小含量	平均含量	标准偏差	最大含量	最小含量	平均含量	标准偏差
石英	70	43	50.5	11.3	60	34	50.8	8.2	50	35	42.5	7.5
钾长石	25	6	10.9	5.3	20	5	10.8	5.2	25	8	16.5	8.5
斜长石	5	0	1	2.0	10	0	3.6	3.6	10	8	9	1
方解石	26	2	11	9.0	20	4	12	7.2	2	0	1	1
白云石	2	0	1.8	0.6	2	2	2	0	2	2	2	0
钙蒙脱石	35	12	20	7.0	25	10	15.8	4.8	25	23	24	1
伊利石	8	0	3	3.2	8	0	3.3	3.2	5	5	5	0
高岭石	6	0	2	2.5	5	0	2.1	2.4	0	0	0	0

表 3 砒砂岩的化学成分
Table 3 The chemical composition of the "Pisha" sandstone %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	CO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃
76.8	10.6	1.57	1.69	1.27	0.63	0.88	2.90	2.90	0.23	0.67	0.070	0.021	0.02

较强,因此,易遭水化、水解及淋滤作用,易于风化。尽管该地区的砂岩风化也较快,但和砂质泥岩比较,砂岩风化还是相对慢一些。当砂岩与砂质泥岩组合在一起时,由于砂质泥岩具有亲水性,很易被软化崩解成细小的碎块,这些小碎块又很易被水流带走。不断往复,在一定的时间内,坡面就会凹凸不平,砂岩相对凸出,砂质泥岩相对凹进,砂岩上部由于裸露易于风化,下部则形成临空面,再加上该区的砂岩交错层理与裂隙都较发育,因此,砂岩就很容易发生重力崩塌侵蚀。

2.3.2 紫红色砂岩与灰白色砂岩组合 灰白色砂岩与紫红色砂岩呈条带状产出时的抗侵蚀能力比单纯的灰白色砂岩或紫红色砂岩弱。条带越窄,抗侵蚀能力越差,这不仅仅是矿物成分有差别的缘故,另外也与岩体的颜色有关。浅色物质与深色物质的吸热能力是不一样的,这种吸热能力的差异会导致岩石中各矿物胀缩体积不同,从而导致岩石结构遭到破坏,使岩石的抗侵蚀能力进一步降低。研究区内,灰白色砂岩与紫红色砂岩互层的现象随处可见,白天,白色砂岩吸收的热量少,紫红色砂岩吸收的热量多,夜间,灰白色砂岩释放的热量也比紫红色砂岩释

放的热量少,变化热量的差异导致两种砂岩的层间结构易于破坏被侵蚀。

2.4 砒砂岩粒度成分

基岩的粒度成分与岩石的抗风化能力和渗透能力紧密联系。相同的矿物成分,等粒结构的岩石比不等粒结构的岩石抗风化能力强,这主要是因等粒结构的胀缩性比不等粒结构岩石的胀缩性均一所导致。根据表 4 和表 5(金争平等,1992)分析,研究区内的砒砂岩岩体都属于不等粒岩,因为不均匀系数 C_u 大于 5,曲率系数 C_q 大于 3,粗细颗粒较为混杂。由于砂粒的大小不均,不但使砂岩的抗风化能力变差,而且由于大颗粒形成的小空隙都被小颗粒占据,从而导致砒砂岩的渗透能力也较差。较差的渗透力使地表容易形成地表径流,导致水力侵蚀发生。据金争平等(1987)的测定,砒砂岩土的渗透能力约为黄土类土的三分之一,风沙土的四分之一(表 6)。因此,砒砂岩粒度的不均匀是其抗侵蚀能力差的重要原因之一。

2.5 砒砂岩体的构造影响

研究区内最常见的构造是垂直的风化裂隙,一般分布在沟坡岩体的顶部。一块岩体往往被两组或

表 4 砒砂岩粒度分析

Table 4 Grain size distribution of the "Pisha" sandstone %

岩性	2~0.25 mm	0.25~0.10 mm	0.10~0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm
灰白色砒砂岩	34.0	44.0	6.5	8.0	7.5
棕红色砒砂岩	5.5~18.0	64.0~27.0	10.5~30.0	11.0~20.0	9.0~5.0

注:引自金争平等(1987)。

表 5 砒砂岩不均匀系数(C_u)与曲率系数(C_q)计算值

Table 5 Calculated value of "Pisha" sandstone's non-uniformit coefficient C_u and curvature coefficient C_q

岩性	d_{10}	d_{30}	d_{60}	C_u	C_q
灰白色砒砂岩	0.019	0.13	0.24	12.63	3.71
棕红色砒砂岩	0.009~0.016	0.1~0.058	0.17~0.13	18.89~8.13	6.54~1.62

注: d_{60} -相应于累计百分含量为 60%的粒径,单位为 mm; d_{30} -相应于累计百分含量为 30%的粒径,单位为 mm; d_{10} -相应于累计百分含量为 10%的粒径,单位为 mm。

表 6 砒砂岩与其他土类的渗透率比较

Table 6 Comparison of permeability coefficient about "Pisha" sandstone and other soil

土 类	稳定渗透率/mm·min ⁻¹
砒砂岩土类	0.6~1.2
黄土土类	2.1~3.1
风沙土类	3.0~3.5

两组以上的垂直裂隙切割,长度几十厘米至几米不等,多数都在 1~2 m 之间,裂隙张开宽度通常小于 0.1 m,水平裂隙较少见。裂隙是风化营力(水流、气体等)侵袭岩体的入侵之门和深入岩体内部的良好通道,对加深及加速岩石的风化起了有力的促进作用,从而使砂岩的抗侵蚀能力减小。研究区内基岩沟坡顶部有很多风化成柱状或椎状的砂岩块体(图 4),这些砂岩锥或砂岩锥极易崩塌,形成重力侵蚀。

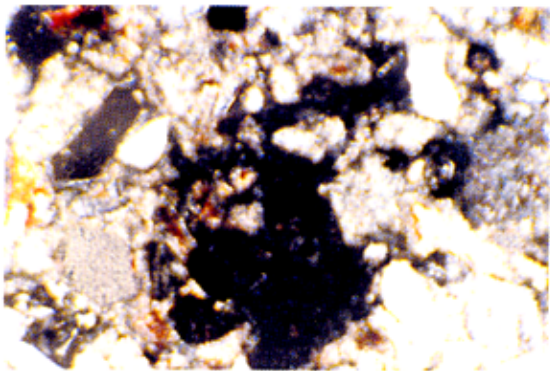


图 1 长石解理双晶发育,解理缝被铁质充填。杂基多为粘土矿物,大部份已重结晶,呈细小鳞片状。胶结物为方解石,胶结类型为杂基支撑,基底式胶结

Fig.1 The cleavages and twin crystals of feldspar are well developed and the cleavage sutures are filled by ferruginous. Most of the foreign matters are clay minerals, and the majority recrystallized and is fine scale aggregates. The cement is calcite. The type of cementation is foreign matter supporting and basal cement



图 3 粘土矿物呈隙晶带状。碳酸盐矿物零星散布于岩石中。粘土矿物和碳酸盐岩矿物胶结碎屑。颗粒支撑,孔隙式胶结

Fig.3 The clay minerals are microlitic texture and zonal distribution. The carbonate minerals fragmentarily disperse in rocks. The carbonate minerals and clay minerals cement grains together. The type of cementation is grain supporting and porous cement

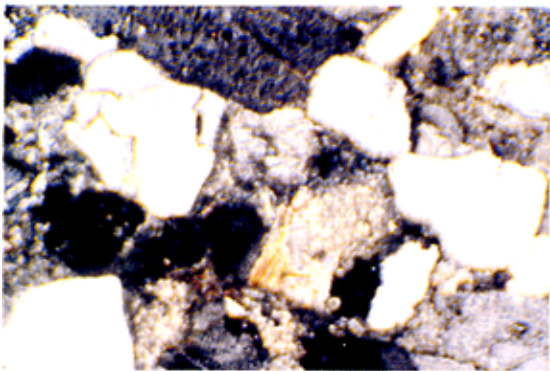


图 2 杂基粘土已重结晶,呈细小鳞片状,胶结物主要为方解石,胶结类型为颗粒支撑,孔隙式胶结

Fig.2 The foreign matters recrystallized and are fine scale aggregates. The primary cement is calcite. The type of cementation is grain supporting and porous cement

2.6 砒砂岩的工程性质

岩体抵抗侵蚀能力的强弱也与岩体工程性质密切相关。岩体工程性质优良,抗侵蚀能力就一定强,工程性质差,则抗蚀能力一定弱。而工程性质又决定于岩体本身的性质—岩体完整、胶结强,且抗风化能力强的岩体工程性质好,裂隙密布、胶结力弱且抗风化能力弱的工程性质相应地就较弱。布尔洞沟砒砂岩的弱胶结、易风化、裂隙发育等特征都是工程性



图 4 砒砂岩中的垂直裂隙
Fig.4 The cracks in “Pisha” sandstone

质差的表现,所以可以断定其抗侵蚀能力也较弱。为了进一步证实这个结论,我们对原状砒砂岩块体做了工程性质实验。

在各种工程性质中,与基岩抗侵蚀能力最相关的是抗剪强度和饱水抗剪强度。饱水抗剪强度决定了岩石在水流条件下抵抗侵蚀的能力,而抗剪强度则决定了坡面上发生重力侵蚀的难易程度。降雨季节,汇集的水流总是从侧面冲刷岩体,尽管水流对岩体施加的剪力往往不能使之发生破坏,但由于这里的裂隙比较发育,二者联合起来就使岩体遭受破坏的可能性大大增强。而发生在陡坡面上的重力

侵蚀也是如此,当重力或其分力对岩体所施加的作用力大于陡坡面上的将崩塌块体的残余抗剪强度时,崩塌作用就会发生。所以,岩体的工程性质对岩石抗侵蚀能力的影响是很大的(表 7)。

根据表 7 得知,砒砂岩的工程性质非常差,其干抗剪强度多数都在 0.09~0.47 MPa 之间,平均为 0.30 MPa,而较致密的侏罗系延安组砂岩的该项指标在 2.5~4.2 MPa 之间,是砒砂岩的 8~15 倍。更为糟糕的是,该地 90% 的岩块根本没有饱水抗剪强度,一入水中即完全松散,即使抗剪实验做成功,其强度也只有 0.10 MPa,这是因为砒砂岩的胶结作用较弱,再加上主要胶结物方解石与水中的 CO₂ 发生反应,导致石英、长石颗粒从岩块上脱落下来的缘故。砒砂岩这种入水即散的性质可通过崩解实验得到验证(表 8)。

表 7 砒砂岩与其他砂岩工程力学性质比较
Table 7 Comparison of engineering characters about
“Pisha” sandstone and other sandstone MPa

岩性	干抗剪强度		饱水抗剪强度
	平均值	范围	
砒砂岩	0.3	0.09~0.47	0~0.1
延安组砂岩	3.5	2.5~4.2	—

表 8 砒砂岩崩解实验结果
Table 8 The results of disintegrate experiment of
“Pisha” sandstone

样品编号	实验结果
XQP1-4-1-2	1 分钟开始发生剥落,5 分钟崩解完。
XQP2-1-1-2	5 分钟开始发生剥落,17 分钟崩解完。

3 结论

砒砂岩地区的侵蚀之所以如此强烈,与岩体本身的矿物成分、化学成分、岩性组合、粒度成分、构造

特征和工程性质是分不开的,而矿物方解石所起的弱胶结作用是导致岩体抗侵蚀能力差的最直接原因,易于风化的长石和遇水膨胀的蒙脱石、不同的岩性组合和不同的粒度组合对减弱抗蚀能力起了巨大的推动作用。值得注意的是,岩体各种性质对侵蚀的影响并不是孤立的,而是互相影响,互为统一,共同作用导致砒砂岩的抗侵蚀能力极其低下。

参考文献

高科, 任于幽, 郑明军等. 2001. 科尔沁沙地风、水侵蚀原因及其动态研究. 水土保持研究, 8(1): 110~115.
金争平, 史培军, 侯福昌等. 1992. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式. 北京: 海洋出版社, 65~66.
金争平, 史培军. 1987. 内蒙古半干旱地区土壤侵蚀过程的研究. 干旱区资源与环境, 1(2): 67~75.
刘志, 江忠善. 1994. 降雨因素和坡度对片蚀影响的研究. 水土保持通报, 14(2): 19~23, 61.
张平仑, 刘玉民, 张仲子. 1992. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析. 水土保持通报, 12(2): 15~24.

References

Gao Ke, Ren Yuyou, Zheng Mingjun et al. 2001. Study on causes of wind and water erosion and dynamic state in Horqin sandy land. Research of Soil and Water Conservation, 8(3): 110~115(in Chinese with English abstract).
Jin Zhengping, Shi Peijun, Hou Fuchang et al. 1992. Soil erosion system and harnessing mode in Huangfuchuan watershed, Yellow River. Beijing: Ocean Press, 65~66 (in Chinese).
Jin Zhengping, Shi Peijun. 1987. Study on the soil erosion process in semi-dryland of Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1(2): 67~75 (in Chinese).
Liu Zhi, Jiang Zhongshan. 1994. Study on the effect of natural rainfall factors and slopes on sheet erosion. Bulletin of Soil and Water Conservation, 14(2): 19~23, 61 (in Chinese).
Zhang Pingcang, Liu Yumin, Zhang Zhongzi. 1992. The features of sediment production and the analysis of genesis by erosion in Huangfuchuan watershed. Bulletin of Soil and Water Conservation, 12(2): 15~24 (in Chinese).