

长城沿线毛乌素沙地形成、扩展及其荒漠化效应

杜忠潮¹, 宁建宏², 惠镇江³

(1 咸阳师范学院资源环境与城市科学系, 咸阳 712000;

2. 西安煤炭科学分院环境工程研究所, 西安 710054; 3. 陕西省人民政府扶贫办, 西安 710000)

摘要:地质历史时期“河套古湖”退缩残留的湖滨沙堤受风力作用“就地起沙”, 是毛乌素沙地形成的物质基础。受自然环境动态变化与人类不合理活动的影响, 历时时期毛乌素沙地的土地利用和经济方式发生过“游牧为主—亦牧亦农—农耕为主”的反复变化。唐代以至明清时期, 长城沿线毛乌素沙地土地沙化有愈演愈烈之势, 并在不同地段, 分别以片沙蔓延、沙舌扩展、河谷沙化及宽带沙舌等形式向东南方向扩展。此种现象不仅造成本地区土地类型改变、植被摧毁和土壤侵蚀加重等, 也引起毗邻地区沙尘暴频率和影响范围增大、加重黄土区土壤侵蚀及河流粗沙输沙率等荒漠化效应。

关键词:长城沿线; 毛乌素沙地; 变迁; 扩展; 荒漠化

中图分类号: X171.1; P534

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)03-0226-03

Researches on the Formation, Expansion and Desertification Effects of Maowusu Sandy Land Along the Great Wall

DU Zhong-chao¹, NING Jian-hong², HUI Zhen-jiang³

(1. Department of Resource Environment and Urban Science, Xianyang Teachers' College, Xianyang 712000;

2. Institute of Environment Engineering, Xi'an Coal Science Branch, Xi'an 710054;

3. Office of Aid-The-Poor, the People Government Shaanxi Province, Xi'an 710000, China)

Abstract: The lake shore sandy dike in the shrinking process of “Hetao ancient lake” in the geologic period, which is suffered from the wind force function “rises right on the sandy land”, is the substantial basis of the formation of Maowusu sandy land. Suffered from the natural environmental development and the Human's inconsequential activities, Maowusu sandy land in the history has undergone the reiterative change of “the nomad way of life is the main—nomadism as well as agriculture—agriculture is the main”. From Tang Dynasty to Ming and Qing periods, the desertification of the land turned to stronger and stronger, and there were different expand modes toward the Southeast in different districts, such as spreads with sheet sand, expands with sand tongues, spreads along the river valley and expands with the wide zonal sand tongue. This desertification is not only resulted in the changes of the land's type, the destruction of the vegetation and the erosion of the soil is aggravated in the local area, but also causes the frequency and the affective scope of the sandstorm enlarges and aggravates the erosion of the soil and the rate of schlepping sand with the river in the adjacent loess areas.

Key words: along the Great Wall line; Maowusu sandy land; vicissitude; expansion; desertification

长城沿线风沙区属于毛乌素沙地的东南部及其扩展部分, 是陕西省北部唯一的风沙区。在我国荒漠化地域类型上毛乌素东南部沙地属于半干旱草原地带与荒漠化草原地带荒漠化发展区^[1], 其荒漠化的发生与扩展, 对南部黄土分布地区的农林用地, 乃至我国黄河中、下游地区河流及水资源的状况构成严重威胁, 也是西北、华北地区沙尘暴的发源地。据报道, 该地区古今皆有治理沙化、使荒漠化发生逆转的成功案例^[2]。因此, 长城沿线毛乌素沙地荒漠化的研究与治理不仅是紧迫的, 而且是可能的。问题的关键在于研究和弄清该地区土地沙化的成因机制, 沙地扩展的历史规律, 现时态势及其荒漠化效应, 为设计行之有效的治理模式和行动技术方案提供依据。

1 毛乌素地区的地质构造背景与沙物质来源

毛乌素沙地在地质构造单元上属于华北地区鄂尔多斯台向斜的陕北翘起, 它与北面的东胜隆起, 西面的陕甘宁蒙地区拗陷共同组合成一个长期以来比较稳定的地块。晚中生代(距今 2 亿多年)鄂尔多斯抬升脱离海洋, 它的东、西、南部都呈隆起, 致使其成为内陆盆地。燕山运动(距今 1.35~0.1 亿年)地台南部边缘(麟游—三原—蒲城一带)隆起成山, 陕北古地面总倾向是东南高西北低。经过第三纪准平原过程, 到喜马拉雅运动(距今 1 200 万年), 鄂尔多斯地块才转为北面掀升, 南部相对俯倾, 不过此时的抬升是缓慢的, 间歇性的^[3]。受喜马拉雅运动波及, 沿四周边缘大断裂, 阴山

南缘断陷盆地以南,以白于山、横山山脉和榆神长城梁岭为南界形成了巨大的“河套古湖”^[4]。今陕北地区(含渭北)的水系,如泾河、洛河、无定河(下游即今榆溪河)、秃尾河、窟野河和古黄河汇流其中。后来,由于禹门口和三门峡的切穿,今黄河中游各断陷盆地包括中宁—中卫断陷盆地(三门古湖、河套古湖等)连通形成黄河,上述河流便倒向南流成为黄河支流。河套古湖持续了很长时间,湖滨波浪作用形成巨大沙堤。在黄河连通之后,随着东胜隆起和陕甘宁蒙边区的拗陷作用,加之气候变化,河套古湖不断退缩,残遗湖滨沙堤保留下来。如侯仁之先生所指出的“城川古湖”(河套古湖的部分)退缩后,沙堤仍明显可见^[5]。正是河套古湖退缩过程中所遗留下来的湖滨沙堤,形成毛乌素地区沙物质的基础。换言之,毛乌素沙地是古湖滨沙堤受风力作用就地起沙形成的。

2 人类历史时期毛乌素沙地的变迁

将自然环境的动态变化与人类的不合理活动综合考虑,对本区环境变迁分如下几个时期作概略叙述。

2.1 先秦时期(公元前 221 年之前)

据考古发掘,本区长城以南黄土丘陵区发掘大量“龙山文化”遗址,出土有经过磨制的石器(斧、锄、磨盘等)及古代谷物等遗迹,表明该时期出现原始农业。春秋战国时期(公元前 770~前 475 年)白于山和横山山脉及其东北部地区、最远至秃尾河的源头,在北至陕蒙交界的红碱淖一代都有森林分布。即先秦时期本区农业开发规模零散,基本以游牧为主,自然生态环境良好。

2.2 秦汉时期(公元前 221 年~公元 220 年)

时值距今 4 000 年以来的相对暖湿期,400 mm 雨量线向西北迁移近 100 km^[6],本区自然条件较好,加之该时期秦王朝为了巩固统一地位,推行“移民实边”,迁入大批囚犯,开垦种田。汉武帝元狩四年一次就迁入 70 万人,元鼎六年又调用军队屯垦,在“上郡、朔方(今内蒙古黄河以南)、西河(山西西部)、河南(黄河以西之地)开官田,斥塞卒 60 万人,戍田之。”足见移民屯垦规模之大。内地移民先进的生产技术与生产工具一方面促进了当地农业生产的发展,另一方面使土地资源遭到破坏,引发和加剧水土流失,给大面积土地沙化埋下隐患。谭其骧先生指出黄河在西汉为“河患严重”时期^[7],其缘故当在于此。

2.3 东汉、三国至元朝时期(公元 220 年~1368 年)

时值距今 4 000 年以来的相对凉干期,本区自然条件相对较差。该时期气温波动状况分为两个阶段:一是东汉(公元以后)到南北朝中期的相对寒冷期,400 mm 雨量线向东南迁移 100 多 km。二是北魏到隋唐及宋、金、元的相对温暖期,400 mm 雨量线向西北迁移近 100 km。各不同时期的环境变动状况如下:

西汉末至东汉初年,游牧民族大量移居内地^[6],人口构成中游牧民族占主导,致使农业生产和土地利用方式进入以牧为主的时期。史载其时横山山脉有森林分布,无定河上游红柳河尚为清流。公元 413 年赫连勃勃巡游至此,北游契吴(即今榆林北城子北 35 km 处)赞叹曰,“美哉,临广泽而带清流。吾行地多矣,自马岭(今甘肃庆阳与环县之间)以北,大河(黄河)以南,未之有也。”表明当时整体为畜牧水草环境,在河流谷地有一定的农耕生产,而在河湖干涸的地方有湖泊相沉积沙地,却并未形成流动沙地和沙环境^[8]。

三国、两晋至南北朝,毛乌素沙地一带先后为前赵(匈奴)、前燕(鲜卑)、后秦(羌)等游牧民族占据,农业耕作受到抑

制。土地利用由农变牧,减轻土壤侵蚀及减少黄河的泥沙量,对黄河在东汉以后出现一个长期安澜的局面起到一定作用^[7]。

隋唐统一时期。唐初国势日强,在陕北高原设 9 州 36 县,多以养牛、马、驼、羊为主,长城沿线的银州(今横山县党岔)、夏州(今靖边县白城子)为养马之地,森林植被破坏严重。唐代实行寓兵于农,发展屯垦,靖边一带修建了延化渠,发展灌溉农业。“安史之乱”以后,唐朝政府鼓励无地少地的贫苦农民垦种“荒闲陂泽山原”及官营牧场牧监的土地,且 5 年内不征赋税。其时人口剧增,城镇聚落发展,滥垦愈演愈烈、森林草原遭到破坏。至唐末、五代时(即统万城建成后的 400 年)出现沙化,“竟至野无刍牧”。《新唐书》记载:“唐长庆 2 年(公元 822 年)10 月,夏州(今无定河上游)大风,飞沙为堆,高及城堞”。窖延水由清流变为混浊且游荡不定,改称无定河。

宋、金、元时期(公元 960~1368 年)。宋代边患颇重,兵屯规模大、范围广,且随战事起落而游移。《宋史·兵志四》记载:“宝元、庆历中,赵元昊反,屯兵 40 余万”。故北宋时期,因长期民族融合,实行农牧兼营,垦种之风尚盛,森林、草原破坏严重。至淳化五年(公元 994 年),下令毁弃夏州城(统万城)时,其已“深在沙漠”。至元朝时期,虽然军屯民屯皆兴盛,尤其是榆林为防守重镇,横山山脉地区既屯田,又放牧,屯垦规模不逊前朝。但游牧民族占领下的毛乌素地区,沙化得到一定控制,生态有所恢复。

2.4 明清时期(公元 1368 年~1911 年)

明清时期是气候波动的寒冷期,400 mm 雨量线向西北迁移近 100 km。明初沿长城修建榆林等 9 个军事重镇,号令士兵“七分屯田,三分城操”。据《榆林府志》^[9]记载,城西 15 里有柳河,“长湖数顷,其地可耕,成化中植柳树数千株,万历中剪伐待尽”,表明军屯颇盛。农垦更甚,明万历二十年(公元 1592 年)前后,仅榆林卫屯田 37 900 余顷。如此使沙地植被遭到破坏,土地沙化。

清代寒冷气候持续的 200 余年间,长城依然作为农牧业交界线,种植业向边疆地区拓展。清康熙年间放蒙荒,允许汉农越过长城合伙垦殖租种,称为“伙盘地(亦称伙场)”^[10]。榆林神府四县当时在边墙内有 3 300 个村庄,而边墙外的伙盘有 1 515 个^[9]。东自府谷,西至定边营,东西绵亘 1 300 余里,南北纵深 25~100 km,已开垦土地 9.51 hm²,长城内外所留“草地仅十之二、三”(5)。造成垦荒土地“就地起沙”,在强烈风蚀作用下,长城内外成为茫茫沙海,南部丘陵地区水土流失更为加剧。

民国年间,黄土高原和陕北毛乌素沙区林草植被的垦殖破坏有增无减。黄河下游水患激增,溢、决、徙 103 次,频数高达 4 次/a^[11]。

3 长城沿线毛乌素沙地不同地段的扩展方式

从毛乌素沙地环境变迁的历史序列及其成因分析中不难看出,唐代以来,尤其是明清至民国时期,以农居优的社会经济和军事战争活动加剧了对林草的破坏,使生态环境渐趋恶化,遂使土地沙化及土壤侵蚀愈演愈烈。河床下切至基岩并不断溯源侵蚀,导致湖沼水体外泄乃至干涸、地下水位下降的水系变迁,地表植被生存条件丧失殆尽,从而风沙滩地区出现“古沙新翻”而沙化。在北部风沙滩区发生起沙之后,受干旱多风的气候条件制约,并在干旱季节(10 月—翌年 4 月)主风向的控制下开始蔓延,主要是由西北向东南方向扩展,长城沿线成为风沙蔓延的主要场所。实地考察并对照遥

感卫星影像,不难看出陕北长城沿线不同地段风沙蔓延的状况,其方式和速度是各不相同的。

3.1 东北段一片沙蔓延为主

该地段(即乌南木伦河西侧分水岭以东地区,包括牦牛川流域、孤山川上游流域及其邻近地区)盛行西北风,地势从西北向东南降低、加强风势。严重的风蚀,产生较多风蚀残墩,风蚀光板地。由于上风源沙物质堆积较少,沙地蔓延后,流沙以片状覆盖于黄土丘陵。梁峁坡、谷地有片沙或断续分布的沙丘,土地沙化严重,是风沙不断扩展的前沿地带。片沙或沙丘活动性较大,多沿河谷、梁峁坡面不断向东南移动。覆盖在黄土层上的片沙层厚度不大,一般不超过 1 m。甚至只有几厘米厚,沙丘较小,一般高 1~2 m。沙层、沙丘多呈小块状分布于低洼、平缓地段。除风蚀外,流水侵蚀和重力侵蚀也很活跃,水土流失严重。往往旱季(4~6 月)风积流沙充填于沟壑之中,到雨季,被洪水冲走,所以,侵蚀模数较大,达 15 000~20 000 t/km²[1]。

3.2 东段一沙舌扩展明显

东段(由窟野河到无定河的长城沿线)系东北—西南走向的长城梁岭,绵延 130 km,多为盖(覆)沙黄土梁地,一般海拔 1 200~1 400 m。因窟野河、秃尾河、榆溪河等河流的分割,成为断续梁岭地,明长城沿其顶部东西贯穿。从卫星照片上可以清晰地看出,风沙蔓延并非像东北段那样铺天盖地向南推进,而是受风和地形的控制,借长城梁岭形成的若干风口,以沙舌形式向前挺进。扩展明显的沙舌有:

3.2.1 窟野河沙舌

窟野河西源从考考乌素河到西沟之间,由于常家沟、芦草沟(又名麻家塔沟),石头沟(又名西沟),其源于较低梁岭,与西北部风沙滩区相对高差仅 20~30 m,不足以阻挡风沙东南移,梁峁沟道几乎被流沙覆盖,但是窟野河及其支流西沟河谷深切,沟坡陡峭,风沙未能越过河谷。流沙吹入河谷沟道且顺河道前进,遇雨季被洪水冲蚀,使河漫滩及谷坡阶地沙化,形成沙舌。这也是窟野河神木以上粗沙含量较高的主要因素。

3.2.2 解家堡沙舌

窟野河至秃尾河之间,长城梁岭阻挡了风沙的东南移动。从西沟、沙石岭河与柏林河源头处顺柏林河(也叫解家堡河)而下,有一条宽 2.5 km 左右,长 20 km 的沙舌,伸入长城以南黄土丘陵区。我们称之为解家堡沙舌。该段长城梁岭与北部风沙滩相对高差 50~70 m,沙舌根部几条河溪溯源侵蚀,形成了一个低槽鞍地,成为西北风东南下的风口,风沙通过风口,柏林河与风向相同,河谷产生“狭管效应”,风力加强,受风向和河道的控制,沙舌顺柏林河北岸直向前进。

3.2.3 秃尾河沙舌与芦家铺沙舌

秃尾河长城以南河谷段与窟野河相似对风沙东南移有阻挡作用,西侧支流大河塔河下游段与西沟相似阻挡着风沙南移,故形成秃尾河沙舌。大河塔河上游,由于杨家畔沟(秃尾河支流),与芦家铺沟(开光川支流)的溯源侵蚀而形成了风口,风沙越过风口顺风直行,形成了延伸 20 km,宽 2 km 左右,向东南延伸的沙舌,到芦家铺由于开光川河谷阻挡而止。称之为芦家铺沙舌。其他明显的沙舌还有秃窟沙舌、佳芦河沙舌等。

3.3 西段一河谷沙化严重

从无定河到三边滩地。芦河在杨桥畔以东,深入基岩数十米,经几处瀑布,跌落峡谷之中。横山脉大致与其平行,呈西南—东北向延伸,是黄土覆盖的梁状山地,梁地平均海拔 1 400~1 500 m,沟谷深,阻挡了西北方向风沙的前进,

在芦河河谷产生风管效应,南风频率增大,并有西南风。河谷严重沙化,无定河芦河口至榆溪河口(鱼河镇)段,走向近东西方向,谷型开阔,谷底宽达 2 000 m,水流分散。其南山峭立,挟沙风从西北方向到河谷后受地形作用和河谷风管效应受阻改向,沙子沉落于河道后,被水冲蚀,所以,形成了无定河的高沙,粗沙。

3.4 西南段一宽带沙舌、东西延伸

白于山为东西走向的厚层黄土覆盖的梁状山地,在定边、靖边两县中部,其梁顶面较平缓,海拔 1 600~1 800 m,是陕北北部地势最高处,且南北两坡不对称,北坡短,多土崖峭壁。在距白于山北侧,有一条大致与其平行、且相对距离固定(约 30 km,年际间略有摆动)的“毛乌素沙带”。自定边孟家沙窝至靖边高家沟,呈东西走向,带宽一般为 1~3 km,与盆地相对高差一般为 20~30 m。沙带基底为白垩纪,早第三纪红色沙页岩或湖积物,上覆厚层流沙,沙带中心多为格状沙丘,高度一般 7~15 m,两侧为新月型沙丘链,高度一般 3~7 m。受白于山地形影响,三边滩地风沙向东延伸,使上述毛乌素沙带越过长城(此处南北走向)跨过芦河,受东端白于山阻挡减弱。在风向和地形的控制作用下折向东南、直达横山县双城附近,延伸 27 km。由于地形高差较小,未形成明显风口,呈宽带沙舌。

4 毛乌素沙地扩展沙化所致的荒漠化环境效应

历史时期长城沿线毛乌素沙地的演变及其扩展,对本地区及毗邻地区环境造成一定影响,引起土地退化等荒漠化现象。

4.1 研究区域内所致的荒漠化现象

4.1.1 改变了土地类型结构

风沙流越过山梁以后沙粒沉落,以片沙形式披覆于背风坡,形成该地带独特的片沙黄土地貌;片沙和沙舌推移的进一步发育形成沙丘地貌。原黄土坡地就演变为风沙地,这种新的土地类型(风沙地类)随着沙化的发展,比重逐渐增大,使土地类型结构发生深刻地改变,产生土地明显退化。据其在黄土上的披覆厚度,风沙地类分为薄层沙地(小于 50 cm)、中层沙地(50~100 cm)、厚层沙地(100~200 cm)和沙丘地(大于 200 cm)。

4.1.2 摧毁植被

土地类型结构的变化,改变了自然植被的生存条件和土地利用方式。沙化改变了原黄土地植物群落退化的渐进过程,急速、彻底地摧毁了原植物群落及其生存条件。即使流沙未覆盖的地块,植被退化速度也大大加速。新的流动沙地短期内变成无植被裸地,之后沙生植被开始发育,但其群落结构与属性已根本改变。流沙湮没了农田草场,可利用土地减少,整体土地生产力下降,增大未沙化土地的承载压力,促使其荒漠化速度加快。

4.1.3 影响局地小气候

沙地的形成,改变了原土壤植被系统的水分涵养能力,进而改变了地气系统的水分循环过程,也改变了地面对太阳辐射的吸收和反射条件,从而影响到局地小气候。总的来看使水分条件变干、热量条件变得不稳定(较差增大)、风力加强,在特殊的下垫面条件下,扬尘浮沙乃至沙尘暴等灾害性天气的频率加大。

4.2 对毗邻地区的荒漠化环境效应

4.2.1 加强了沙尘暴的危害

长城沿线沙质荒漠化地区是我国北方沙尘暴源地之一。在北风和西北风影响下,这里的沙尘暴殃及延安市、铜川市、
(下转第 232 页)

平均 *NDVI* 呈增加的趋势,但量的变化不大。

(3)流域降水、平均气温是影响 *NDVI* 变化的主要气候因子。流域 *NDVI* 的变化与降水、平均气温的变化在时间上基本上一致,都具有很强的季节性。流域降水量的变化与流域

NDVI 的变化在时间上基本上同步。流域平均气温的增加比流域 *NDVI* 增大的时间早 3 个月。*NDVI* 与降水量的其流域平均线性相关系数达 0.77,对数相关系数为 0.7;流域站点 *NDVI* 与平均气温线性相关系数为 0.72,对数相关系数约为 0.68。

参考文献:

[1] Justice C O, Hoben B N, Gwynne M D. Monitoring East African vegetation using AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7: 1453—1474.

[2] Turker C J, Townshend J R G, Goff T E. African land—cover classification using satellite data[J]. Science, 1985a, 227: 369—375.

[3] Tucker J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of the Environment, 1979, 8: 127—150.

[4] Defries R S, Townshend J R G. *NDVI*—derived land cover classification at a global scale[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(17): 3567—3586.

[5] 李晓兵,王瑛,李克让. *NDVI* 对降水季节性和年际变化的敏感性[J]. 地理学报, 2000, 55(增刊): 82—89.

[6] Weiss, J L, Gutzler, D S, Allred Coonrod, J E. et al. Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57: 507—534.

[7] 龚道溢,史培军,何学兆. 北半球春季植被 *NDVI* 对温度变化响应的区域差异[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 505—514.

[8] 陈云浩,李晓兵,史培军. 1983~1992 年中国陆地 *NDVI* 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716—720.

[9] 李本纲,陶澍. AVHRR—*NDVI* 与气候因子的相关分析[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 898—902.

[10] 谢力,温刚,符淙斌. 中国植被覆盖季节变化和空间分布对气候的响应[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 181—188.

[11] 毕晓丽,王辉,葛剑平. 植被归一化指数(*NDVI*)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 284—288.

[12] 李震,阎福礼,范湘涛. 中国西北地区 *NDVI* 变化及其与温度和降水的关系[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 308—313.

[13] 唐海萍,陈玉福. 中国东北样带 *NDVI* 的季节变化及其与气候因子的关系[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 318—325.

[14] 杨胜天,刘昌明,孙睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J]. 地理学报, 2003, 57(1): 679—692.

[15] 孙睿,刘昌明,朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 667—672.

[16] 李春晖,杨志峰. 黄河流域 *NDVI* 时空变化及其与降水/径流关系[J]. 地理研究, 2004, 23(6): 753—759.

[17] 杨建平,丁永建,陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 *NDVI* 记录[J]. 地理学报, 2005, 60(3): 467—478.

[18] 除多. 基于 NOAA AVHRR *NDVI* 的西藏拉萨地区植被季节变化[J]. 高原气象, 2003, 22(增刊): 145—151.

(上接第 228 页)

西安市、渭南市,甚至影响到山西省太原市、临汾市、运城城市以及河南省的郑州市、洛阳市等。据分析,西安市的扬沙和浮尘天气多来自陕北的沙尘暴。

4.2.2 加强了黄土区的土壤侵蚀

研究区风蚀沙化,改变了其本身的气候及下垫面状况,有利于南下风势的增强,使黄土地区遭受较强的风力侵蚀作用。进而造成土壤质地变轻,黏粒成分减少,抗冲性降低,水力侵蚀增强,致使土地贫瘠化。从而影响到土地生产力及其利用效益,陷入“愈垦愈穷”的怪圈。

参考文献:

[1] 刘彦随, Jay Gao. 陕北长城沿线地区土地退化态势分析[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 443—450.

[2] 王涛,吴薇. 我国北方的土地利用与沙漠化[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3): 355—358.

[3] 朱士光. 黄土高原地区环境变迁及其治理[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1999.

[4] 陕西省农牧厅. 陕西农业自然环境变迁史[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1986.

[5] 侯仁之. 从红柳河上的古城废墟看毛乌素沙漠的变迁[J]. 文物, 1973, (1): 35—41.

[6] 郭绍礼,杨根生,史培军. 晋陕蒙接壤地区环境整治与农业发展研究(环境整治对策研究)[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1995.

[7] 谭其骧. 何以黄河在东汉以后会出现一个长期安流的局面—从历史上论证黄中游的土地合理利用是消弭下游水害的决定性因素[J]. 学术月刊, 1962, (2): 23—35.

[8] 王崇义,董靖保. 统万城的性肺与毛乌素沙地变迁[J]. 地理研究, 2001, 20(3): 347—353.

[9] 榆林地方志办复制本. 榆林府志[M]. 清道光年纂修, 1987(刊印).

[10] 榆林地方志办复制本. 横山县志[M]. 民国纂修, 1987(刊印).

[11] 陕西省志编委会. 陕西省志. 黄土高原志[M]. 西安:陕西人民出版社, 1995.

4.3 风蚀沙化对河流泥沙的影响

长城沿线地带是黄河中游重要的多沙粗沙区,流沙与黄土产沙相结合,可形成浓度较高的粗颗粒泥沙,并以极强的输沙率进入黄河及其支流。其产沙量既大于单纯细沙来源区(如黄土区),也大于单纯粗沙来源区(如风沙区)。研究显示,受毛乌素沙地影响的孤山川、窟野河、秃尾河、佳芦河、无定河等河流对黄河粗泥沙的贡献最大,诸河流的控制面积(测站控制面积)占黄河龙门站控制面积的 9.23%,粒径大于 0.05 mm 的粗泥沙却占 64.05%^[11]。