

近 50 年黄土高原水土流失的时空变化

信忠保¹, 许炯心², 余新晓^{1,*}

(1. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:在降水变化和人类活动的影响下,近 50a 黄土高原水土流失发生了深刻变化。利用黄土高原 115 个水文站的输沙量数据和 276 个雨量站的降水数据,分析了近 50a 来黄土高原输沙强度的时空变化特征,并评估了降水变化对其影响。研究表明:近 50a 黄土高原输沙强度呈现明显下降趋势,尤其是自 20 世纪 80 年代以来,下降趋势非常显著。从水土保持措施实施前后两时期对比来看,黄土高原输沙强度整体呈现减弱态势,并存在明显的空间差异。输沙模数 $> 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 区域的输沙强度减弱明显,其面积较前期减少了 44.3%。输沙强度减弱最为明显的区域位于无定河中下游以及山西中北部地区,输沙强度减少在 40% 以上。降水减少是近 50a 黄土高原输沙强度减弱的重要原因,它们时空变化格局在空间上一致。从黄河中游 10 条主要支流来看,人类活动对输沙量减少可能起主要作用,其贡献率在 61% ~ 93% 之间。

关键词:黄土高原;输沙模数;水土流失;降水;时空变化

文章编号:1000-0933(2009)03-1129-11 中图分类号:TV152, S157 文献标识码:A

Temporal and spatial variability of sediment yield on the Loess Plateau in the past 50 years

XIN Zhong-Bao¹, XU Jiong-Xin², YU Xin-Xiao^{1,*}

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation in Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1129 ~ 1139.

Abstract: In the past 50 years, the sediment yields of the Loess Plateau have changed significantly, due to both natural and human factors. This study analyzes the temporal and spatial variability of sediment yields of the Loess Plateau, and estimates the effect of precipitation variability on sediment yield using the annual sediment yield. Data were collected from 115 hydrological and 276 meteorological stations. The 10 main tributaries of Middle Yellow River show that the annual sediment discharge has decrease over the past 50 years, especially since 1980s. Two periods were compared; one prior to the implementation of soil conservation methods (1956 — 1969), and one post-implementation (1970 — 1989). The sediment yield decreased by 44.3%; there are also significant spatial differences between the periods. The most significant decrease was observed the Middle and Lower Wudinghe River, and in the north central Shanxi Province, where sediment yield decreased by more than 40%. A similar pattern of decline was evident for precipitation records; therefore, precipitation variation might play an important role in the decrease in the sediment mobilization from the landscape, and hence, the decrease in sediment yields. However, human activities such as soil conservation and water diversion contributed significantly more to this decline in the sediment yield than the precipitation. It is estimated that 61% — 90% of the decrease in sediment yield can be attributed to human activities.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40871136 和 40671019);国家科技支撑计划资助项目(2006BAD20B06)

收稿日期:2008-10-23; **修订日期:**2008-12-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuxinxiao111@126.com

Key Words: the Loess Plateau; sediment yield; precipitation; temporal and spatial variation

河流输沙量是流域水土流失强度的重要表现,是全球变化研究的重要内容,因此,大江大河输沙量的变化历来受到重视^[1~10]。黄土高原是世界著名水土流失区,黄河泥沙主要来源于此。近 50a 黄土高原气候暖干化趋势显著^[11,12],同期大规模地实施了水库、淤地坝等水利工程和植树造林、退耕还林还草等生态建设工程,该背景下黄土高原输沙强度的时空变化特征引人关注。虽然近 20a 来,在黄河流域径流量、输沙量的变化趋势、驱动机制等方面已做了大量工作,取得了许多成果^[13~20],并且进行了黄河流域输沙强度的编制工作^[21~25],但目前还缺乏对近 50a 黄土高原输沙强度时空变化的空间过程、驱动机制的系统研究。本文利用黄河中游 10 条支流的输沙量数据分析了近 50a 输沙量的变化趋势,利用 115 个水文站输沙模数数据分析了黄土高原输沙强度的时空变化特征,并基于 276 个气象站的降水数据评估了降水对输沙时空变化的影响。本研究以期增强对近 50a 黄土高原水土流失时空变化过程的认识,加深降水变化和人类活动对水土流失影响的理解,为目前正在进行的生态建设和环境治理提供科学支持。

1 数据和方法

1.1 降水数据

本研究采用了 276 个站的降水数据,该数据包括两部分:①国家气象局提供的 1956~2005 年黄土高原及其周边地区 99 个站点逐日降水量数据;②由中国科学院水利部水土保持研究所整编的黄土高原水土保持数据库(<http://www.loess.csdb.cn>)提供的 177 个站点逐月降水量资料。该数据的时间范围为 20 世纪 50 年代初到 80 年代末,空间范围覆盖黄河流域的主要水文观测站(图 1a)。

1.2 输沙数据

本研究使用的黄河中游 10 条主要支流 1956~2005 年输沙量数据来自黄河水利委员会发布的《黄河泥沙公报》,该数据将被用于分析黄河中游输沙量变化特征(黄河水利委员会,2000~2006 年)。黄土高原输沙模数数据主要来自黄河水利委员会刊印的《黄河流域水文资料》和《1919~1970 年黄河流域水文特征值统计》(黄河水利委员会,1973~1975 年)以及山西省水文总站刊印的《1919~1970 年山西省水文统计:海河流域部分》(山西省水文总站,1974 年)。为更多地体现黄土高原输沙强度的空间特征,在此只选用控制面积 <10000km² 和时间序列 >20a 的水文站,该数据共有 115 个水文站,时间序列为 1956~1989 年(图 1b)。

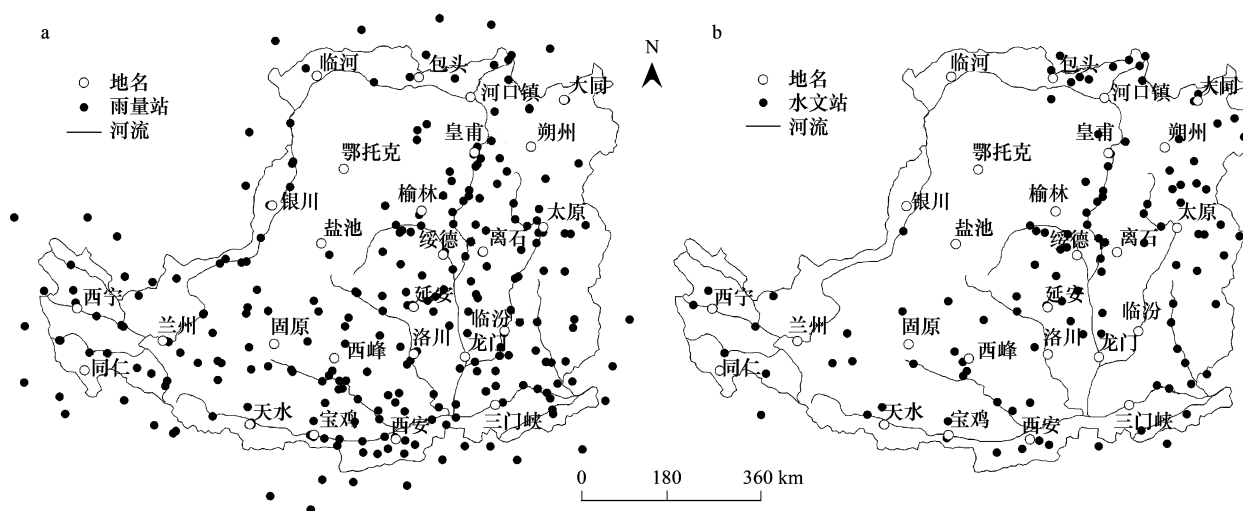


图1 黄土高原气象站(a)和水文站(b)的空间分布格局

Fig. 1 The Loess Plateau of China meteorological stations (a) and hydrological stations (b)

1.4 研究方法

1.4.1 站点数据栅格化

将 115 个水文站不同时期的年输沙模数进行平均,然后,基于 ArcGIS9.0 平台采用反距离加权方法 (inverse distance weighted, IDW) 经过空间插值得到黄土高原不同时期的 1km 分辨率的输沙模数空间分布图。采用同样方法获得黄土高原逐年栅格化降水数据,并以黄河流域 10 条主要支流的流域边界图为掩膜提取每流域逐年面上降水量。

1.4.2 双累积曲线法

双累积曲线法常被用于降水-输沙关系的阶段性分析和转折年份的判定。在研究黄河中游输沙量的变化过程中,采用降水-输沙双累积曲线法判断降水和输沙关系发生变化的年份,这在评估降水变化对输沙影响时,确定基准期截止年份提供依据。

1.4.3 两阶段对比法

利用黄土高原不同时期输沙模数平均值表征其输沙强度,通过两个时期的对比揭示期间输沙强度的时空变化特征。采用输沙模数变化百分率表征期间输沙强度的变化强度和空间特征,它是两期输沙模数变化量所占前期输沙模数的百分比,正值表示输沙强度增加,负值表示减少。

1.4.4 降水变化对输沙影响的评价方法

本研究以没有大规模实施水土保持措施的时期为基准期,以大规模实施水土保持措施的后期为措施期。通过建立基准期降水-输沙关系,用以计算措施期预期自然输沙量,将其与基准期平均输沙量相比得到降水变化对输沙的影响量,将其与实际观测输沙量对比,得到人类活动影响量。这里人类活动影响量是前后两时期输沙变化量中扣除降水变化影响量之外的部分,包括水库、淤地坝、植树造林等水利水保措施拦沙量,开矿、修路造成的人工增沙量以及农田灌溉引沙量等。流域输沙变化总量 ΔS 是措施期实测输沙量 Q_{s2} 与基准期输沙量 Q_{s1} 之差,它包括人类活动的影响量 ΔS_1 和降水变化的影响量 ΔS_2 (公式 1)。人类活动对流域输沙的影响量 ΔS_1 是实测措施期输沙量 Q_{s2} 与基于降水-输沙关系模拟的措施期输沙量 Q'_{s2} 之差 (公式 2),而降水变化对输沙的影响量 ΔS_2 是措施期模拟输沙量 Q'_{s2} 与基准期实测输沙量 Q_{s1} 之差 (公式 3):

$$\Delta S = Q_{s2} - Q_{s1} = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (1)$$

$$\Delta S_1 = Q_{s2} - Q'_{s2} \quad (2)$$

$$\Delta S_2 = Q'_{s2} - Q_{s1} \quad (3)$$

式中, ΔS 是输沙变化量, ΔS_1 和 ΔS_2 分别是人类活动和降水变化对输沙变化的影响量, Q_{s1} 是基准期实测输沙量, Q_{s2} 是措施期实测输沙量, Q'_{s2} 是基于降水-输沙关系计算的措施期输沙量 (t/a)。

2 黄河中游输沙量变化特征

黄河中游是黄土高原水土流失最为剧烈的区域,黄河泥沙主要来源于黄河中游,尤其是黄河中游的多沙粗沙区,因此,黄河中游输沙变化具有很好的代表性。限于 1990 年以来,黄土高原多站点输沙量数据获取的实际困难,本研究以黄河中游 10 条主要支流年输沙量数据进行 1956 ~ 2005 年输沙量变化趋势分析。

2.1 输沙量变化趋势

利用 SPSS 软件计算了每条支流年输沙量时间序列与年份的相关系数,同时还计算了消除降水影响后的偏相关系数。结果表明:黄河中游 10 条主要支流的输沙量呈明显的下降趋势,3 种相关系数大都能通过 $p < 0.01$ 显著性水平检验,趋势性最弱的泾河、延河、北洛河等 3 条支流,它们的 Pearson 相关系数也通过了 $p < 0.05$ 显著性水平检验。

考虑到不同流域降水-输沙关系受到人类活动的影响程度不同,在此利用降水-输沙双累积曲线法确定二者关系转折年份,进而为定量评估时提供基准期划分依据。研究表明:1956 ~ 2005 年黄河中游 10 条主要支流的降水和输沙关系变化过程基本一致,双累积曲线的斜率都有减小的变化趋势,即意味着同量降水所产生的输沙量有下降的趋势。降水-输沙关系发生明显转折的年份在不同流域稍有不同,但大多集中在 20 世纪 70

年代初期或末期(表 1)。

表 1 1956~2005 年黄河中游主要支流输沙量变化趋势和阶段

Table 1 Variation tendency and stages of sediment discharge of the middle Yellow River in the period 1956~2005

流域 Basin ^①	Pearson 相关系数	Spearman 相关系数	偏相关系数	临界年份 Critical year
皇甫川 Huangfuchuan River	-0.425 **	-0.478 **	-0.379 **	1979
窟野河 Kuyehe River	-0.445 **	-0.466 **	-0.447 **	1979
汾河 Fenhe River	-0.645 **	-0.804 **	-0.619 **	1971
无定河 Wudinghe River	-0.582 **	-0.562 **	-0.517 **	1971
泾河 Jinghe River	-0.304 *	-0.261	-0.267	1979
延河 Yanhe River	-0.323 *	-0.308 *	-0.214	1979
北洛河 Beiluohe River	-0.304 *	-0.341 *	-0.254	1979
沁河 Qinhe River	-0.629 **	-0.653 **	-0.641 **	1971
渭河 Weihe River	-0.439 **	-0.446 **	-0.367 **	1979
伊洛河 Yiluohe River	-0.579 **	-0.810 **	-0.389 **	1979

相关系数 Correlation coefficient; ** 表示相关系数通过 0.01 的显著性水平检验 Correlation is significant at the 0.01 level; * 表示相关系数通过 0.05 的显著性水平检验 Correlation is significant at the 0.05 level; ①下同 the same below

2.2 输沙量年代间变化特征

从年代尺度上对黄河中游 10 条支流年输沙量的统计表明,黄河中游输沙量呈明显的下降趋势(表 2)。20 世纪 60 年代和 70 年代两个年代的距平百分率多为正值,较常年输沙量偏多,之后 3 个时期的输沙量较常年输沙量显著偏小。据此可将研究时段大致划分为 1956~1979 年相对丰沙期和 1980~2005 年相对少沙期,前一时期输沙量较常年输沙量偏多 43.6%,而后一时期输沙量与常年相比偏少 40.2%,与前期相比偏少达 55.3%。

表 2 1956~2005 年黄河中游主要支流输沙量的距平统计表

Table 2 Abnormal percentages of decadal sediment discharge of the middle Yellow River in the period 1956~2005

流域 Basin	1960~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000~2005	1956~1979	1980~2005	1980~2005 *
皇甫川	12.2	39.1	-4.8	-43.3	-73.4	38.4	-35.4	-53.3
窟野河	31.2	54.9	-25.7	-28.3	-91.3	45.3	-41.8	-60.0
汾河	79.9	-0.1	-76.5	-83.5	-97.8	91.1	-84.1	-91.7
无定河	59.8	-0.7	-54.9	-28.0	-63.3	50.4	-46.5	-64.4
泾河	14.3	9.7	-21.3	0.2	-41.7	19.2	-17.7	-30.9
延河	37.8	1.5	-30.8	-7.1	-43.0	26.6	-24.5	-40.4
北洛河	28.3	11.2	-37.0	11.3	-56.5	24.9	-23.0	-38.3
沁河	68.8	-5.4	-41.8	-79.0	-70.7	68.0	-62.8	-77.8
渭河	28.0	12.7	-19.1	-18.9	-47.2	27.6	-25.5	-41.6
伊洛河	66.4	-36.7	-18.4	-91.5	-90.7	68.5	-63.2	-78.2
平均值	39.5	9.8	-29.9	-34.8	-66.6	43.6	-40.2	-55.3

除 1980~2005 * 是与 1956~1979 年相比的距平百分率之外,其它皆为与多年平均输沙量(1956~2005 年)相比的距平百分率(%) the abnormal percentages of sediment yield is the decadal averaged sediment yield comparing with the averaged sediment yield of the period 1956~2005, except the abnormal percentages of 1980~2005 * which comparing with the averaged sediment yield of the period 1956~1979

从各支流输沙量变化的比较来看,输沙量下降程度存在明显的空间分布特征,即黄土高原中东部河流的输沙量下降程度明显较西南部显著。输沙量下降最为显著的伊洛河、沁河和汾河 3 条支流,在 1980~2005 年输沙量较前期分别下降了 78.2%、77.8% 和 91.7%,它们都位于黄土高原的东部地区。

3 输沙强度的时空变化特征

自 20 世纪 70 年代以来,黄土高原大规模地实施了水库、淤地坝、植树造林、退耕还林还草等水利水保工

程,这已深刻地改变了黄土高原水沙关系^[19]。因此,在研究黄土高原输沙强度时空变化时,常以 1970 年为界划分为前后两个时期,前期看作相对自然状态下的基准期,而后期由于受人类活动影响较重,通常视作措施期。下面将对相对自然状态下的基准期和人类活动影响下的措施期两个时期的输沙强度的空间格局进行分析,在此基础上通过两个时期的对比,揭示期间黄土高原输沙强度的时空变化特征。

3.1 自然状态下输沙强度的空间特征

为更大程度上体现黄土高原自然状态下的侵蚀产沙状况,在此选用受人类活动影响相对较少的 1970 年以前的输沙模数数据。在此,将黄土高原 115 个水文站的 1956 ~ 1969 年输沙模数进行多年平均后,采用反距离权重法(IDW)进行空间插值,获得输沙强度空间分布格局。参照水电部水土流失强度分级标准(1984)将黄土高原输沙强度化分为微弱($< 1000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、轻度($1000 \sim 2500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、中度($2500 \sim 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、强度($5000 \sim 8000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、极强度($8000 \sim 15000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)、剧烈($> 15000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)等 6 个级别^[26]。

黄土高原输沙强度存在明显的空间分布特征,从西北向东南,黄土高原输沙强度先增大后减小,呈明显的地带性分布(图 2a)。输沙模数 $> 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的强烈输沙区呈带状分布于西峰-延安-绥德-皇甫一带,这与黄土丘陵沟壑区范围基本一致,其中输沙模数 $> 8000 \text{ t}/\text{km}^2$ 的极强度输沙区与黄土高原多沙粗沙区范围基本吻合。

黄土高原输沙强度的地带性特征是由降水、植被、土壤等地理要素的空间分布决定,遵循 Langbein-Schumm 曲线规律^[27,28]。黄土高原西北部地区地表植被稀疏、表土软弱易蚀,但由于降水稀少,土壤侵蚀和泥沙输送的动力不足,致使输沙强度很弱;而黄土高原东北部虽降水丰沛,但由于地表植被覆盖较好,地表抗蚀性较强,其输沙强度也不大;位于中部的黄土高原丘陵沟壑区,这里地形崎岖、黄土深厚、植被稀疏、暴雨集中,并且还存在风水两相侵蚀、高含沙水流和泥沙粗细最优搭配等特殊的泥沙输送机制,致使黄土高原丘陵沟壑区成为世界著名的强烈侵蚀产沙区^[29~31]。

3.2 人类活动影响下输沙强度的空间特征

将 115 个水文站 1970 ~ 1989 年平均输沙模数通过 IDW 空间插值得到人类活动影响下的侵蚀产沙空间特征数据。黄土高原后期输沙强度较前期明显减弱,但输沙强度的空间结构保持相对稳定(图 2a 和 2b)。从

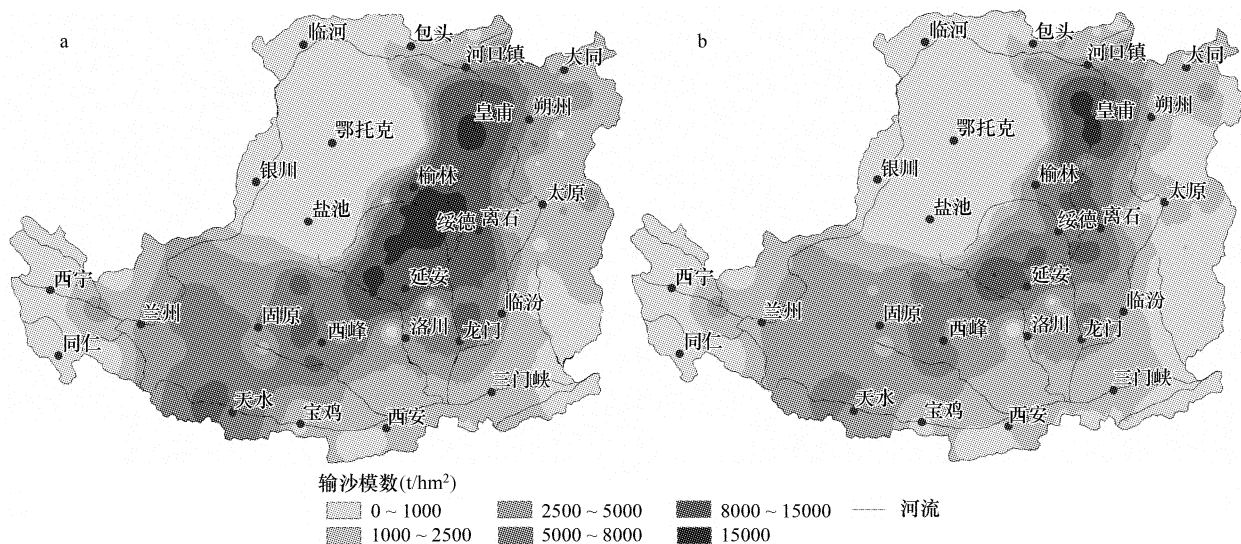


图2 黄土高原侵蚀产沙的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of sediment yield of the Loess Plateau

a: 治理之前的侵蚀产沙格局(1956 ~ 1969 年) The mean annual sediment yield during 1956 ~ 1969; b: 治理之后的侵蚀产沙格局(1970 ~ 1989 年) The mean sediment yield during 1970 ~ 1989

输沙强度等级来看,低等级输沙强度区域在扩大,而高等级输沙强度区域的范围在缩小,尤其是输沙模数 $>5000\text{t}/\text{km}^2$ 的高强度输沙区域,范围萎缩显著。前期输沙模数 $>8000\text{t}/\text{km}^2$ 极强度输沙区域呈带状分布在延安-绥德-皇甫一带,在后期萎缩成为几个斑块,面积显著减小。黄土高原输沙强度空间结构相对稳定是由地貌、黄土、植被、降水等自然地理条件稳定性决定。

3.3 时空变化特征

采用两期输沙模数对比的方法研究输沙强度空间变化特征,绿色代表输沙模数下降,水土流失强度在减缓,而红色代表输沙模数上升,水土流失强度在加强,颜色越深表示程度越严重。图 3a 是黄土高原治理前后输沙强度变化的空间分布格局,从图可知期间输沙强度整体呈减缓态势,其中无定河中下游和山西中北部地区输沙强度减弱最为明显,减少在 40% 以上。不同变化程度的面积统计表明:输沙强度呈减少趋势的区域占总面积的 88%,而只有 12% 的面积呈增大趋势,其中输沙强度减少 20% 以上的区域占总面积的 45.6%,减少 40% 以上的占 19.0%,甚至有 5.8% 的地区减少 60% 以上,而输沙强度增加 20% 的区域只有 1.5%,且多与后期发生了暴雨有关。

为深入揭示自 1970 年以来输沙强度变化的空间分布特征,在此对 20 世纪 70 年代和 80 年代输沙强度进行了对比分析。结果表明:80 年代黄土高原地区侵蚀产沙较 70 年代整体呈现显著减弱趋势,输沙强度减弱范围与水保措施实施前后的变化范围相似,主要分布在黄河中游河口-龙门区间和山西全境(图 3b)。从图 3a 和图 3b 来看,自 1970 年以来,海河流域在山西的部分输沙强度减弱程度最为显著。

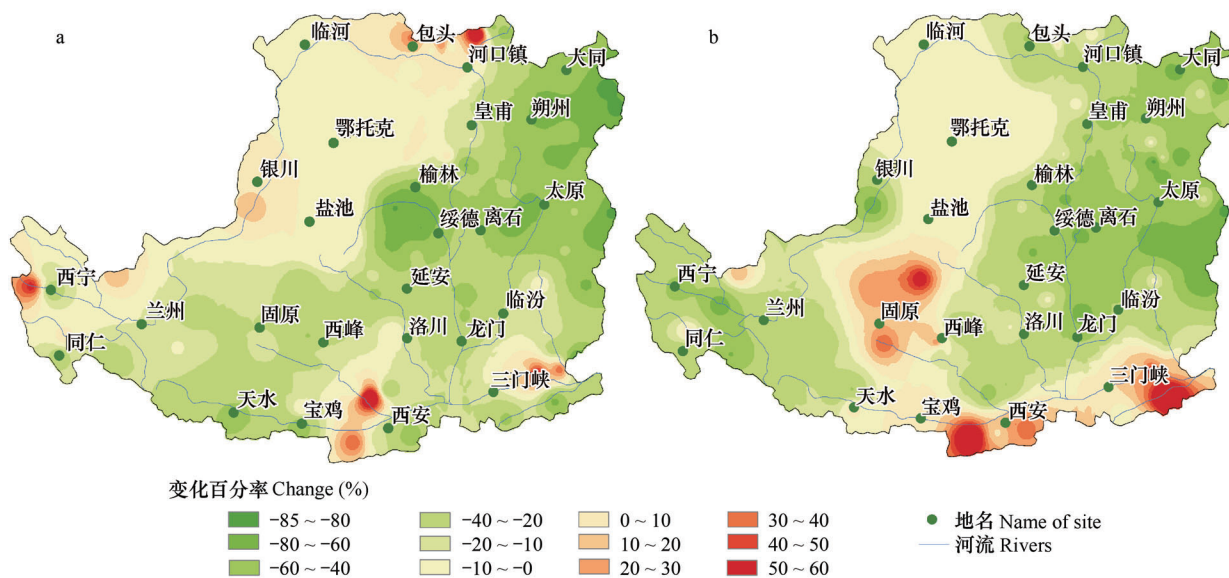


图 3 黄土高原侵蚀产沙时空变化特征

Fig. 3 Temporal and spatial variation of sediment yield of the Loess Plateau

a: 水土保持措施实施前后侵蚀产沙变化的空间格局 Sediment yield variation between the period of 1956 ~ 1969 and 1970 ~ 1989; b: 20 世纪 70 年代与 80 年代侵蚀产沙变化的空间格局 Sediment yield variation between the 1970s and 1980s; 绿色表示侵蚀产沙减弱,红色表示侵蚀产沙增强 The increased areas of the sediment yield to be showed by green color and the decreased areas to be showed by red color

3.4 时空变化的定量统计

为进一步揭示黄土高原输沙强度的时空变化特征,在此从不同变化程度的站点数量和期间不同变化程度的面积两个方面进行定量统计,以期进一步地认识该过程。

3.4.1 水文站变化强度

从输沙模数不同变化强度的站点数量来看,水土保持措施实施后的输沙模数低于前期的站点数量明显多于增加的站点,表明输沙模数下降是主要趋势。具体来看,115 个水文站中有 97 个输沙模数表现为下降趋

势, 占总站点数的 84%, 其中输沙模数下降 20%、40% 和 60% 以上的分别有 72 个、45 个、20 个, 分别占总站点数的 63%、39% 和 17%, 而只有 16% 的站点输沙量呈现增加趋势, 并且输沙量超过 40% 的站点只占总站点的 3%。

3.4.2 水土保持前后输沙强度变化

在此从两时期不同等级输沙强度所占比重和输沙强度转移矩阵两个方面, 对黄土高原水土保持措施实施前后两时期输沙变化进行定量统计。在 Arc/Info 的 Grid 模块中, 将两时期输沙模数数据按照从微弱到剧烈重新编码分类为 1~6, 进而在其属性表中输出每类面积。然后, 通过公式(4) 计算得到每个侵蚀强度等级向其他等级的转移方向和强度。例如, 计算结果中 31 表示由前期中度输沙转为后期微弱输沙, 62 是由前期剧烈输沙转为后期轻度输沙。为了便于不同等级间转移强度比较, 这里采用转移面积占该类前期面积的百分比进行统计分析。

$$SSY_Change = SSY_{前期} \times 10 + SSY_{后期} \tag{4}$$

从表 3 输沙强度转移矩阵可知, 黄土高原不同等级的输沙强度区域都在向输沙减弱方向转移, 输沙强度存在减弱趋势。输沙模数 $> 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的区域由先前占总面积的 29.6%, 降为后期占总面积的 16.5%, 减少了 44.3%, 而同期 $< 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的区域面积增加了 28.8%。输沙强度为极强度和剧烈两个等级的面积分别较前期减少了 60% 和 79.9%, 而微弱、中度等级的区域分别增大了 28.8%、31.4%。从表 3 中还可以跟踪前期每个等级的输沙强度区域的转移方向及其强度, 比如前期为剧烈输沙强度转移为中度、强度、极强度等输沙强度的面积, 占总面积的比重分别为 11.3%、44.6%、33.3%。

表 3 水土保持前后黄土高原不同等级输沙强度的转移矩阵

Table 3 Sediment yield change matrix in Chinese Loess Plateau from 1956~1969 to 1970~1989

编码 Code	前期 Earlier period	后期 Later period						面积比重 Percentage of area (%)		变化率 Change rate (%)
		微弱 Weak	轻度 Slight	中度 Moderate	强度 Intensive	极强度 Very intensive	剧烈 Extremely intensive	前期 Earlier period	后期 Later period	
1	微弱 Weak	99	1	0	0	0	0	28.6	36.8	28.8
2	轻度 Slight	33.7	65.4	0.9	0	0	0	24.4	23.9	-2.0
3	中度 Moderate	1.8	42.3	55.5	0.4	0	0	17.4	22.8	31.4
4	强度 Intensive	0	1.5	77.9	20	0.5	0	15.3	11.2	-26.6
5	极强度极强度 Very intensive	0	0.9	6.5	58.9	31.5	2.2	11.6	4.7	-60.0
6	剧烈剧烈 Extremely intensive	0	0	11.3	44.6	33.3	10.7	2.7	0.6	-79.9
$< 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$								70.4	83.5	18.6
$> 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$								29.6	16.5	-44.3

3.4.3 1970~1989 年输沙强度变化统计

对 20 世纪 70 和 80 年代的不同输沙强度等级的变化情况也进行了统计, 研究表明: 80 年代输沙强度等级为强度、极强度和剧烈侵蚀的面积与 70 年代相比分别降低了 31.6%、74.9% 和 67.1%, 而微弱输沙区面积增加了 30.9%。输沙模数 $> 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的区域有先前的 20.2%, 降为后期的 10.1%, 减少了 50%, 而同期 $< 5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的区域面积增加了 12.7%。

4 降水变化对输沙量变化的影响

降水是影响径流和输沙的主要动力因素之一, 流域输沙量与降水量关系密切^[32~34]。本研究通过建立黄河中游 10 条主要支流在基准期的降水量与输沙量回归关系, 在此基础上进行降水变化和人类活动对输沙量变化影响进行定量评价。

4.1 降水对输沙量变化影响的定量评价

将 267 个站点的降水数据在 Arc/Info 中使用 IDW 命令对逐年降水量进行空间插值, 然后, 以 10 个支流

的流域图为掩膜,提取每个流域每年的年降水量。在 SPSS 中计算基准期内河流的年降水量和输沙量的相关系数,相关性分析表明:黄河中游支流的输沙量与降水量之间存在显著的相关性,除延河之外,相关系数都能通过 $p < 0.01$ 显著性检验(表 5)。

表 4 黄土高原 1970 ~ 1989 年不同等级输沙强度的转移矩阵

Table 4 Sediment yield change matrix in Chinese Loess Plateau from 1970s to 1980s

编码 Code	70 年代	80 年代						面积比重 Percentage of area (%)		变化率 Change rate (%)
		微弱	轻度	中度	强度	极强度	剧烈	前期 1970s Earlier period	后期 1980s Later period	
1	微弱 Weak	97.8	2.2	0	0	0	0	33.0	43.2	30.9
2	轻度 Slight	42.7	54.5	2.8	0	0	0	24.8	23.4	-5.6
3	中度 Moderate	1.5	36.4	58.3	3.8	0	0	22.0	23.4	6.4
4	强度 Intensive	0	8.8	61.5	29.6	0.1	0	11.4	7.8	-31.6
5	极强度 Very intensive	0	1.8	35.2	44.7	18.3	0	8.0	2.0	-75.0
6	剧烈 Extremely intensive	0	0	1.6	0	65.6	32.9	0.8	0.3	-62.5
<5000 t/(km ² ·a)								79.8	89.9	12.7
>5000 t/(km ² ·a)								20.2	10.1	-50.0

表 5 降水变化对黄河中游输沙量变化的影响

Table 5 impact of precipitation variation on sediment discharge in the middle Yellow River

流域 Basin	基准期 Reference period	相关系数	降水变化 Precipitation change		人类活动 Human activities	
			影响量(×10 ⁸ t)	贡献率(%)	影响量(×10 ⁸ t)	贡献率(%)
皇甫川	1956 ~ 1979	0.591	-0.106	31.8	-0.226	68.2
窟野河	1956 ~ 1979	0.594	-0.160	20.3	-0.627	79.7
汾河	1956 ~ 1971	0.698	-0.136	32.8	-0.278	67.2
无定河	1956 ~ 1971	0.685	-0.399	27.5	-1.051	72.5
泾河	1956 ~ 1979	0.775	-0.330	37.8	-0.543	62.2
延河	1956 ~ 1979	0.454	-0.076	32.2	-0.160	67.8
北洛河	1956 ~ 1979	0.580	-0.075	19.7	-0.307	80.3
沁河	1956 ~ 1971	0.758	-0.019	26.4	-0.052	73.6
渭河	1956 ~ 1979	0.613	-0.698	38.6	-1.111	61.4
伊洛河	1956 ~ 1979	0.713	-0.010	6.9	-0.133	93.1
平均 Average		0.646		27.4		72.6

相关系数是基准期内年输沙量与降水量的相关系数, Correlation coefficient is the correlation between annual sediment yield and annual precipitation in the base period; 人类活动, 主要包括水土保持措施和水利工程, human activities, which mainly including soil-water conservation measures and hydraulic engineering works; 影响量 the influence quantity (×10⁸t), 贡献率 the contribution percentages (%)

基于基准期降水和输沙的线性回归关系, 采用线性外推的方法定量地评价了降水变化和人类活动对河流输沙量变化的影响量和相对贡献量。评价结果表明: 由于降水变化和人类活动的空间差异, 致使降水变化和人类活动对黄土高原不同流域影响的相对贡献量存在很大差别。整体来看, 人类活动是黄河中输沙量减少的主要原因, 其相对贡献量平均为 72.6%, 在 61.4% ~ 93.1% 之间, 而降水贡献量平均为 27.4%。

4.2 降水变化和输沙变化的关系

黄土高原输沙强度的时空变化是各种自然要素和人类活动共同作用的结果, 降水减少和人类活动是自 20 世纪 70 年代以来黄土高原输沙减弱的重要驱动因素。近 50a 黄土高原降水整体呈现下降趋势, 黄河中游的河口-龙门区间以及山西中西部下降趋势最为显著, 这也与同期黄土高原输沙强度变化的空间特征非常相似(图 3a 和 4a)。为揭示黄土高原输沙强度变化与同期降水变化的空间关系, 利用前后两个时期的降水和输

沙数据,采用公式(5)和公式(6)分别计算它们的变化百分率:

$$SSY - \text{Change} = \frac{SS_{\text{前期}} - SSY_{\text{后期}}}{SSY_{\text{前期}}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Rainfall} - \text{Change} = \frac{\text{Rainfall}_{\text{前期}} - \text{Rainfall}_{\text{后期}}}{\text{Rainfall}_{\text{前期}}} \quad (6)$$

式中, $SSY - \text{Change}$ 是两个时段输沙模数的变化率(%), $SSY_{\text{前期}}$ 是前期平均输沙模数($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$), $SSY_{\text{后期}}$ 是后期平均输沙量($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); $\text{Rainfall} - \text{Change}$ 是两个时段降水量的变化率(%), $\text{Rainfall}_{\text{前期}}$ 是前期平均降水量(mm), $\text{Rainfall}_{\text{后期}}$ 是后期平均降水量(mm)。

根据 1956 ~ 1969 年输沙模数大小将研究区划分 100 等份,然后以其为掩膜提取不同侵蚀产沙强度下水保前后两时段期间的降水变化率和输沙变化率。黄土高原西北部地区输沙强度极小且大多为内流区,在点绘降水量变化率和输沙量变化率的关系时并没考虑该部分(占总面积面积 6%),因此,有效样本数为 94 个。

从图 4b 可知,黄土高原输沙量变化和降水变化呈现明显的正相关关系,降水减少越显著,同时输沙减少也越明显,二者变化在空间上具有显著的一致性。它们线性回归的斜率是 5.17,由此推知,输沙减少的趋势较降水更为显著,输沙减少是降水减少的 5 倍。黄土高原是我国水土保持重点治理区,自 70 年代以来进行了大规模的水库、淤地坝等水利水保措施的建设工作,大量的泥沙被拦截。前人研究表明:水土保持措施是导致 70 年代以来黄土高原河流输沙的主要驱动因素,在黄河中游河龙区间降水作用只占 30%^[35,36]。水利水保措施的拦沙减沙作用与降水减少的减沙作用,在空间上是一致的,因此,图 4b 潜在地包含了人类活动对输沙强度的影响。

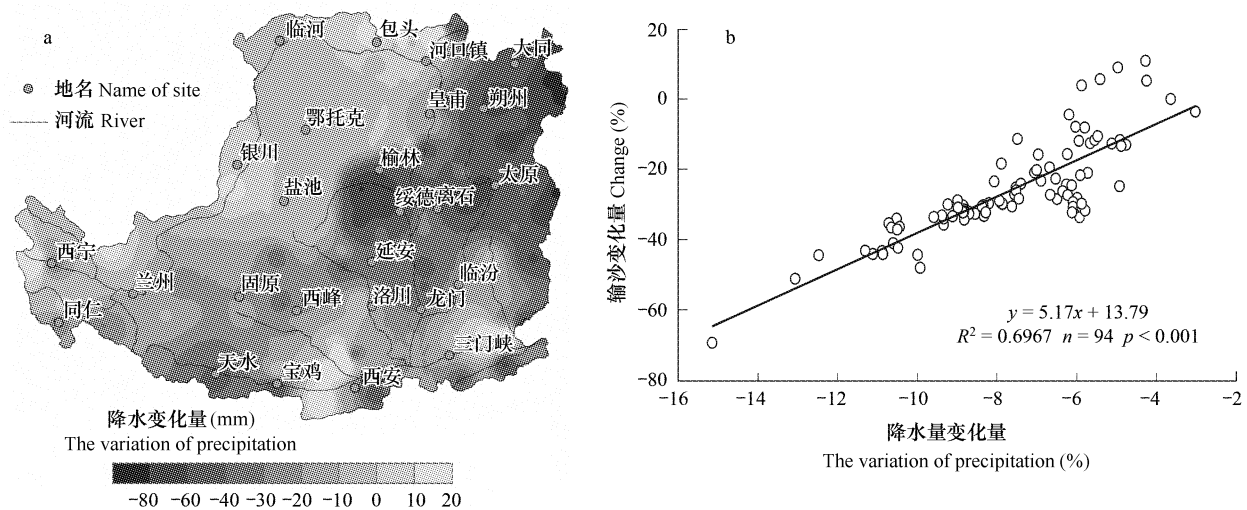


图 4 黄土高原降水变化及其与输沙变化的关系

Fig. 4 Relationship between the variation of precipitation and sediment yield

(a) Temporal and spatial variation of precipitation and (b) the relationship between the variation of precipitation and sediment yield

5 结论和讨论

5.1 结论

(1) 近 50a 黄河中游 10 条主要支流的输沙量呈明显的下降趋势。自 20 世纪 80 年代以来输沙量明显减少,大致可以分为 1956 ~ 1979 年和 1980 ~ 2005 年两个时期,后期输沙量较前期偏少达 55.3%,其中伊洛河、沁河和汾河等 3 条支流分别下降了 78.2%、77.8% 和 91.7%。

(2) 黄土高原输沙强度呈明显的地带性分布,输沙模数 $> 5000 \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的强烈输沙区呈带状分布于西峰-延安-绥德-皇甫一带。输沙强度在后期发生了明显减弱,高强度输沙区明显萎缩,但输沙强度的空间结构保持稳定。

(3) 黄土高原输沙强度整体呈减弱的态势, 期间输沙模数 $> 5000 t/(km^2 \cdot a)$ 的区域较前期减少了 44.3%。从站点数量来看, 输沙强度下降 20%、40% 以上的站点分别占总站点的 63%、39%。从面积来看, 输沙强度减少 20% 以上的面积占总面积的 45.6%, 减少 40% 以上的占 19.0%。输沙强度减弱最明显的区域位于无定河、中下游、山西中北部地区, 减少都在 40% 以上。

(4) 黄土高原输沙变化和降水变化呈现明显的空间一致性, 降水变化是输沙减少的重要影响因素。但基于降水-输沙关系的评价结果表明, 人类活动是黄河中输沙量减少的主要原因, 其相对贡献量在 61.4% ~ 93.1% 之间, 平均为 72.6%, 而降水贡献量只有 27.4%。

5.2 讨论

(1) 输沙模数是水文站控制区域的平均输沙强度, 它与气温、降水等站点数据存在明显差别。本文基于 115 个水文站点的输沙数据, 通过 IDW 空间插值的方法分析黄土高原侵蚀产沙的空间特征, 还存在一些方法上的不足。从实测输沙模数与插值得到的输沙模数的对比来看, 二者呈现显著的正相关关系 ($r^2 = 0.856$, $n = 115$), 但更为精确的输沙强度制图方法还有待进一步研究。

(2) 在评估降水变化对输沙变化贡献时, 基准期没有进行大规模水土保持只是一种理想假设。从泾河、延河、北洛河等流域降水与输沙相关性并不高可以推知, 这些流域期间可能已进行了相当的水土保持建设工作。采用降水-输沙关系线性外推的方法, 评估降水变化和人类活动对措施期输沙量变化的影响, 还存在很大的不确定性。

(3) 从黄河中游 10 条支流年输沙量来看, 近 20a 黄河流域输沙量呈显著减少趋势, 因此, 迫切需要多站点输沙数据更具体地揭示黄土高原近期水土流失的时空特征。自 20 世纪 70 年代以来, 黄土高原水库、淤地坝等水利水保工程措施已经拦截了大量泥沙, 因此, 用于评估泥沙空间存储的分布式侵蚀产沙模型还有待建立。

References:

- [1] Holeman J N. The sediment yield of major rivers of the world. *Water Resources Research*, 1968, 4:737—747.
- [2] Milliman, J D, Meade, R H. Worldwide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 1983, 91:1—21.
- [3] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, 39:111—126.
- [4] Xu J X. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: Example of the Huanghe River, China. *Environmental Management*, 2003, 31(3): 328—341.
- [5] Syvitski J P M, Vorosmarty C J, Kettner A J, *et al.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 2005, 308:376—380.
- [6] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the Worlds Rivers. *Geomorphology*, 2006, 79:192—216.
- [7] Cheng T W, Zhao C N. Runoff volumes and sediment discharges of large rivers in China and their influence on the coastal zone. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(4): 460—471.
- [8] Liu S G, Yang S Y, Ding J, *et al.* Variation of Sediment Discharge into the Ocean of Exterior Rivers in Asia. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(5):32—40.
- [9] Dai S B, Yang S L, Gao A, *et al.* Trend of sediment flux of main rivers in China in the past 50 years. *Journal of Sediment Research*, 2007, (2): 49—58.
- [10] Liu C, Wang Z Y, Sui J Y. Analysis on variation of seagoing water and sediment load in main rivers of China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (12): 1444—1452.
- [11] Yao Y B, Wang Y R, Li Y H, *et al.* Climate warming and drying and its environmental effects in the Loess Plateau. *Resources Science*, 2005, 27(5):146—152.
- [12] Liu X Q, Zhao J B, Yu X F, *et al.* Study on the climatic warming-drying trend in the Loess Plateau and the countermeasures. *Arid Zone Research*, 2006, 23(4):627—631.
- [13] Chen Y Z, Jing K, Cai Q G. *Modern Erosion and Management in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1988. 35—37.
- [14] Ye Q C. *Researches on environmental changes of the Yellow River basin and laws of water and sediment transportation*. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1994.
- [15] Wang W Z, Jiao J Y. *Rainfall and erosion sediment yield in the Loess Plateau and sediment transportation in the Yellow River basin*. Beijing: Science Press, 1996. 268—289.
- [16] Jing K, Lu J F, Liang J Y, *et al.* The erosion environmental characteristic and variation tendency in the middle Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1997. 138—154.
- [17] Zhang S L. *The reason and development direction of runoff and sediment in the rich and coarse sediments area in the middle reaches of Yellow River*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1998.
- [18] Ran D C, Liu L W, Zhao L Y, *et al.* Soil and water conservation and runoff and sediment variation in the middle reach of the Yellow River.

- Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2000.
- [19] Wang G, Fan Z. Study on runoff and sediment variation of Yellow River (Vol. 2). Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002.
- [20] Xu J X. Recent tendency of sediment reduction in the middle Yellow River and some countermeasures. *Journal of Sediment Research*, 2004, (2): 5—10.
- [21] Gong S Y. Sedimentation source and delivery of the Yellow River. *Yellow River*, 1979(1):7—9.
- [22] Zhi J F, Li S M, Qiu B C. A study on source and distribution of the coarse sand in the Yellow River valley. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(2):7—9.
- [23] The Yellow River Conservancy Committee of Ministry of Water Resources. Huanghe river atlas. Beijing: China Cartographic Publishing Press, 1989. 247—250.
- [24] Liu B Y, Tang K L, Jiao J Y. Atlas of runoff and sediment in Yellow River. Beijing: Science Press, 1993.
- [25] Wang W Z, Jiao J Y. Temporal and spatial variation features of sediment yield intensity on Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(2): 210—217.
- [26] Ministry of Water Resources, PRC. Standards for classification and gradation of soil erosion. Beijing: China Water Power Press, 1997.
- [27] Xu J X. Zonal distribution of river basin erosion and sediment yield in China. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(16):1356—1361.
- [28] Xu J X. Precipitation-vegetation coupling and its influence on erosion on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2005, 64:103—116.
- [29] Xu J X. The wind-water two-phase erosion and sediment producing processes in the middle Yellow River basin. *Science in China*, 2000, 43(2): 176—186.
- [30] Xu J X. Hyperconcentrated flows as influenced by coupled wind-water processes. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(11):1990—2000.
- [31] Xu J X. Impact of fluvial and aeolian interaction near the Yellow River middle reach on domain distribution of the sediment yield. *Progress in Natural Science*, 2007, 11(1):19—56.
- [32] Liu Y B, Tang K L, Cha X, *et al.* Experiment on the soil and water loss of slope land with different ground cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1):25—29.
- [33] Chen H. The synthetic effect of rainfall characteristics and runoff from upper slope on sediment generation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(2): 17—23.
- [34] Jiang Z S, Wang Z Q, Liu Z, *et al.* Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 12(1): 1—9.
- [35] Xu J H, Niu Y G. Impact of water and soil conservation measures to the sediment-laden and coarse sand area in middle Yellow River on runoff, sediment of Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2000. 158—174.
- [36] Mu X M, Ba S C L, Zhang L, *et al.* Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2007, (2):36—41.

参考文献:

- [7] 程天文,赵楚年.我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响. *海洋学报*,1985,7(4):460~471.
- [8] 刘曙光,杨守业,丁坚,等.亚洲入海河流输沙量的区域性变化规律. *海洋通报*,2000,19(5):32~40.
- [9] 戴仕宝,杨世伦,邵昂,等.近 50 年来中国主要河流入海泥沙变化. *泥沙研究*,2007,(2):49~58.
- [10] 刘成,王兆印,隋觉义.我国主要入海河流泥沙变化分析. *水利学报*,2007,38(12):1444~1452.
- [11] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等.中国黄土高原气候变暖干化及其对生态环境的影响. *资源科学*,2005,27(5):146~152.
- [12] 刘晓清,赵景波,于学峰,等.黄土高原气候变暖干旱化趋势及适应对策. *干旱区研究*,2006,23(4):627~631.
- [13] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1988.
- [14] 叶青超.黄河流域环境演变与水沙运行规律研究.济南:山东科学技术出版社,1994.
- [15] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙.北京:科学出版社,1996.268~289.
- [16] 景可.黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势.郑州:黄河水利出版社.1997.138~154.
- [17] 张胜利.黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势.郑州:黄河水利出版社.1998.
- [18] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化.郑州:黄河水利出版社,2000.
- [19] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究(第2卷).郑州:黄河水利出版社,2002.
- [20] 许炯心.黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因. *泥沙研究*,2004,(2):5~10.
- [21] 龚时旸,熊贵枢.黄河泥沙来源和地区分布. *人民黄河*,1979,(1):7~11.
- [22] 支俊峰,李世明,丘宝冲.黄河流域粗泥沙来源及分布研究. *水土保持学报*,1992,6(2):7~9.
- [23] 水利部黄河水利委员会.黄河流域地图集.北京:中国地图出版社,1987.188~191.
- [24] 刘宝元,唐克丽,焦菊英,等.黄河水沙时空图谱.北京:科学出版社,1993.1~397.
- [25] 王万忠,焦菊英.黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征. *地理学报*,2002,57(2):210~217.
- [26] 水电部.关于土壤侵蚀类型划分和强度分级标准的规定,1984.1~36.
- [27] 许炯心.我国流域侵蚀产沙的地带性特征. *科学通报*,1994,39(11):1019~1022.
- [28] 许炯心.黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程. *中国科学(D辑)*,2000,30(5):540~548.
- [29] 许炯心.风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响. *中国科学(D辑)*,2005,35(9):899~906.
- [30] 许炯心.黄河中游风水两相作用对侵蚀产沙地域分布的影响. *自然科学进展*,2007,17(1):49~56.
- [31] 刘元保,唐克丽,查轩,等.坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究. *水土保持学报*,1990,4(1):25~29.
- [32] 陈浩.降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响. *水土保持学报*,1992,6(2):17~23.
- [33] 江忠善,王志强,刘志,等.黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*,1996,2(1):1~9.
- [34] 徐建华,牛玉国.水利水保工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响的研究.郑州:黄河水利出版社,2000.158~174.
- [35] 穆兴民,巴桑赤烈,ZHANG Lu,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应. *泥沙研究*,2007,(2):36~41.