

风蚀对窟野河流域产沙贡献的时间尺度特征

李秋艳¹, 蔡强国^{2*}, 方海燕²

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 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 地貌与流域过程研究室, 北京 100101)

摘要: 风蚀在黄土高原风水蚀复合区的侵蚀产沙中扮演着重要的角色。利用窟野河流域神木水文站水沙资料及有关气象资料, 分析了风蚀对窟野河神木水文站以上流域产沙贡献的时间尺度特征。结果表明, 风力的侵蚀搬运对窟野河流域产沙起着重要的作用。月时间尺度上, 风沙入河量存在“存储—释放”的过程; 风蚀产沙贡献在3月和11—12月出现峰值, 4—9月风蚀贡献率逐渐降低; 冬春季淤积的泥沙, 在夏季逐渐被冲走, 到了9月, 把淤积的泥沙最大限度冲走而开始新的淤积过程; 月时间尺度上风蚀贡献率与风蚀气候因子分布趋势一致; 7、8两月的风沙贡献量占年风蚀贡献总量的80.5%, 风沙贡献量的峰值出现在7月, 约 7.75×10^6 t。季尺度上, 夏季风蚀贡献率最低, 仅7.8%。秋、冬季逐渐升高, 春季达到最高, 风蚀贡献率为28.6%。年尺度上, 风力作用对神木水文站以上流域的产沙贡献为17.2%, 风蚀贡献量为 12.7×10^6 t/a。

关键词: 风蚀产沙; 风蚀气候因子; 风水复合侵蚀

中图分类号: TV141 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)04-0674-09

黄土高原侵蚀最严重的地区, 不是出现在降雨量最多的水蚀地区, 而是在降雨量为400 mm左右的风蚀水蚀交错区^[1-2]。黄土高原风蚀水蚀区是黄河粗泥沙的主要来源区, 风蚀在流域侵蚀产沙中扮演着重要的角色^[3]。在黄土高原风蚀水蚀区开展风蚀对流域泥沙贡献的尺度变化研究, 对风蚀水蚀区的环境整治、减少粗泥沙入黄和地区的可持续发展都具有重要的意义。

自20世纪60年代中后期钱宁等提出“集中治理黄河中游粗沙来源区”以来, 不少学者就黄河中游风蚀对流域泥沙的贡献进行了研究。黄土高原风蚀水蚀交错带侵蚀营力主要包括风力和水力^[4-5]。毛乌素沙漠的运移和风沙侵袭, 都直接或间接地为黄河提供了较丰富的粗泥沙补给物^[6]。流域风沙入河量是指直接进入河流里的风力侵蚀量, 同时也包括停留在岸边在高水位时被水流带走的风蚀物, 以及重力作用下岸边风蚀物坍塌量等^[7-8]。目前有关风蚀对流域产沙贡献的研究, 虽然已取得了一定的研究成果, 但就风蚀贡献的大小研究争论较大。

收稿日期: 2010-03-25; 修订日期: 2010-10-30。

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-442); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-225); 水利部黄河泥沙重点实验室开放课题(2010007); 中国博士后科学基金资助项目(20090460421); 中国科学院院长奖获得者科研启动专项。

第一作者简介: 李秋艳(1978-), 女, 山东金乡人, 博士后, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: lqymily@163.com

*** 通信作者简介:** 蔡强国(1946-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟研究。E-mail: caiqg@igsnrr.ac.cn

部分学者认为粗泥沙主要来自黄土,风蚀产粗沙数量较少。陈永宗等^[9]认为,风沙对黄河粗泥沙的贡献量只有 7% 左右;吴成基等^[10]认为,河龙区间 6 条流域风蚀产粗沙仅为 9.8%;黄土高原科学考察^[11]认为黄土高原北部风沙区的年风沙入黄总量约占黄河输沙量的 10%。部分学者认为风蚀产沙对黄河粗泥沙的补给占有重要地位,其产沙量相当可观。冯国安^[8]认为,黄河中游粗泥沙主要来自风沙,基岩对流域粗沙提供有限。杨根生等^[7]认为,通过沙地的若干支流,两岸流沙风季进河,洪水季节通过支流将沙带入黄河,影响黄河粗泥沙量,分布于鄂尔多斯高原东南毛乌素沙地地区及覆沙黄土丘陵沟壑区支流,尤其是窟野河、无定河和秃尾河几条支流风沙对黄河的影响最大。而张胜利等^[12]的研究表明,黄河中游风蚀产沙对黄河粗泥沙有一定影响,但为量不大,风蚀产沙不是黄河粗泥沙的主要来源。许炯心^[13]将风力、水力作用纳入到一个系统内考虑,认为风水两相共同作用形成的高含沙水流,使得风沙和基岩对黄河粗沙都有相当的贡献。此外,风沙区与流域的相互空间位置不同,风蚀对流域产沙的贡献也会有所差异。师长兴^[14]研究发现靠近风沙区并有零星片沙分布地区的黑木头川风蚀产沙的比例在 10% 左右,而黄土丘陵沟壑区南部丁家沟与川口站上游流域风蚀产沙约在 0~6% 之间。

风沙入河及其对流域产沙贡献受地形、风力、水力、河流与风向夹角以及河流形状等多个因素的影响,使得在目前的研究手段和设备条件下还很难较为准确地计算风沙入河量;研究流域大小的不同、流域与风沙区的相对空间位置关系以及研究方法上的差异等,均有可能是造成目前研究结论分歧很大和研究很不系统的重要原因。

然而,在同一个流域内,风蚀对流域的贡献,在某种意义上直接与风蚀强度有关,即风蚀强度越大,风沙入河量越多,风蚀对流域产沙的贡献越大,从而可为研究风蚀对于流域产沙的贡献提供了新的研究思路与方法,避免了以往直接计算或监测河流系统风沙入河量所带来的种种困难。因此,可以从相同时段流域风蚀量、降雨及产流和流域产沙量变化的角度,在时间尺度上系统开展风蚀对流域产沙的贡献研究。本文选择处于黄土高原北部风水蚀交错区的窟野河流域,利用神木水文站多年的水沙及相关数据,定量分析风蚀对窟野河流域产沙贡献的时间尺度特征。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

窟野河是黄河一级支流,位于东经 109°28'~110°45',北纬 38°22'~39°50'之间,窟野河流域发源于内蒙古东胜市柴登乡巴定沟,流经内蒙古、陕西两省(自治区),在陕西省神木县贺家川乡沙峁头村汇入黄河,全长 242 km,落差 758.1 m,流域面积 8 706 km²。水系结构呈对称的树枝状格局(图 1)。流域地处黄土高原和毛乌素沙地过渡地带的东段,地势西北高东南低。流域上游为风沙草滩区,新月形沙丘和沙梁绵延起伏;中游为盖沙、片沙黄土丘陵区;流域下游为黄土丘陵沟壑区,河口段为土石山区。

流域地处干旱、半干旱地区,属于中温带大陆性季风气候,年均温度 8.4℃,降水年际变化大,多年平均年降水量约 348.1 mm,6—9 月份降雨量占全年降水量的 78%,其中 7、8 两月降水量 215 mm,占年降水量的 62%。冬春季多大风,尤其是 3—4 月份常有大风和沙暴天气,年均风速 2.2 m s⁻¹,风向以 NW 为主。流域内植被稀少,气候干旱,生态环境脆弱,水土流失严重,水力侵蚀和风蚀是本流域的主要侵蚀方式。

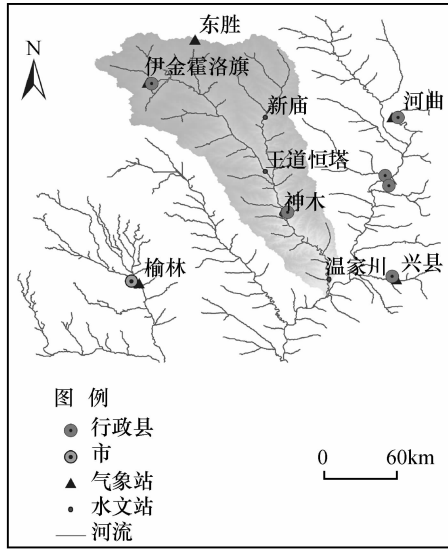


图1 窟野河流域概图

Fig. 1 The Kuyeye River watershed

神木水文站控制流域面积为 $7\,298\text{ km}^2$, 属于窟野河流域的上中游段, 风水蚀作用强烈, 水土流失严重, 年均产沙量为 $0.74 \times 10^8\text{ t}$ (表1)。冬春季节风力强劲时沟头和河流岸边常有风沙堆积, 而夏季汛期时可被洪水冲走, 是开展风水蚀研究很好的流域。1970年后水利水保措施等人类活动的大量开展, 很难用于研究自然状况下风力、水力作用对流域产沙的影响, 因此本文分析的时段限定在1956至1970年间。

表1 窟野河神木水文站水文特征值表

Table 1 Hydrological characteristics of Shenmu hydrological station in the Kuyeye River watershed

集水面积 /km ²	多年平均输 沙量/10 ⁶ t	年平均输沙 率/(t s ⁻¹)	年平均流量 /(m ³ s ⁻¹)	多年平均径 流量/10 ⁶ m ³	年径流模数 /(dm ³ s ⁻¹ km ⁻²)	年输沙模数 /(t km ⁻²)	时段
7 298	74	2.34	17.9	565.4	2.46	10 100	1956—1970年

1.2 研究方法

影响风蚀水蚀区流域产沙的动力因素主要有风力、重力和水力3种, 其中重力在风力和水力作用之间起到转换的作用^[8]。风力、水力作用是风水蚀交错区流域产沙的根本动力因素, 而风蚀气候因子是综合反映流域风蚀能力的因素^[14]。

文中气象资料来自中国气象局气象中心资料室, 水文资料为黄河水利委员会刊印。采用窟野河流域周围的伊金霍洛旗、东胜、榆林、兴县和河曲5个站1956—1970年气象资料, 以各气象站到神木水文站以上流域几何中心的距离的倒数为权重计算神木水文站以上流域的风蚀气候因子。风蚀作用的大小用联合国粮农组织给出的风蚀气候因子 $C^{[14-16]}$ 表示:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} \bar{u}^3 \left(\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right) d \quad (1)$$

式中, \bar{u} 为2 m高处的月平均风速, ETP_i 为月潜在蒸发量(mm), P_i 为月降水量(mm); d 为月天数。潜在蒸发量采用气温相对湿度公式^[17]求得:

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2(1 - r_i) \quad (2)$$

式中, T_i 为月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), r_i 为月相对湿度 (%)。

为了分析输沙量与降雨量和风蚀气候因子的关系, 这里对输沙量与降雨量和输沙量与风蚀气候因子分别建立一元线性回归方程, 并对相关系数的显著性进行检验, 结果表明, 相关关系是显著的 ($p < 0.05$)。输沙量的大小不仅与降雨量有关, 而且取决于风蚀气候因子的变化。为了对降水量 P 、风蚀气候因子 C 对于输沙量 W_s 的影响进行初步近似估算, 建立基于流域 P 、 C 和 W_s 的二元线性回归方程:

$$W_s = a_0P + b_0C + c_0 \quad (3)$$

由于式(3)中各个变量的数量级不同, 不能直接根据回归系数的大小来判定各变量贡献的大小, 因此对各变量的数据进行标准化, 再重新进行回归计算, 得到标准回归方程为

$$W_s = aP + bC \quad (4)$$

式(4)中标准回归系数 a 、 b 绝对值的大小可以反映降水量 P 、风蚀气候因子 C 对输沙量 W_s 贡献的大小^[18]。由此可以求出降水量 P 对 W_s 的贡献率 C_p 和风蚀气候因子 C 对 W_s 的贡献率 C_c 分别为:

$$C_p = \frac{|a|}{|a| + |b|} \times 100\% \quad (5)$$

$$C_c = \frac{|b|}{|a| + |b|} \times 100\% \quad (6)$$

2 结果

2.1 C 与 P 分布

窟野河流域 C 介于 30 ~ 140 之间, 平均值为 98。年际变化大, 1956、1964 年在 40 左右, 风蚀气候侵蚀力较低; 而 1960、1962、1963、1965、1966 年风蚀气候因子值高达 120 以上, 达到风蚀气候侵蚀力极重 ($C \geq 100$) 分级程度[图 2(a)]。窟野河流域属于季风气候, 风蚀气候侵蚀力月、季差异明显。风蚀气候侵蚀力夏季最弱, 冬、秋季逐渐升高, 春季达到最强, 季间 C 差值达 17 以上, 季节变化大。7、8 月汛期 C 最小, 风蚀气候侵蚀力最弱。4 月份 C 最大, 风蚀气候侵蚀力最强[图 2(b)]。

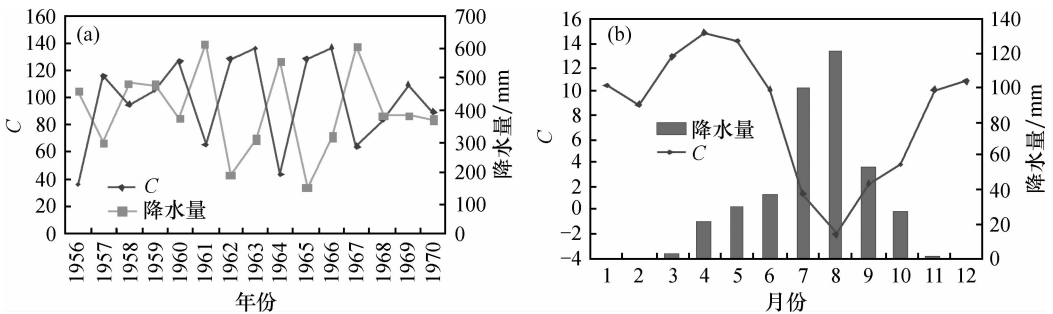


图2 神木水文站以上流域时间尺度上的风蚀气候因子与降水量变化

Fig. 2 Wind erosion climatic factor and rainfall of catchments upstream of Shenmu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed during the period 1956–1970

在年、季和月尺度上, 研究区 P 分布特征与 C 均呈现相反趋势。 C 有明显的四季变化, 即 P 稀少的年份以及风大而多的春季成为 C 最大的季节, 而 P 多的年份以及风小、 P 多的夏季 C 则小。

2.2 风蚀贡献

月时间尺度上 C_e 与 C 分布基本趋势一致, C_e 在 3 月出现一个极大值; 3 月以后降低, 9 月最小, 而 10 月后 C_e 又开始增大, 11—12 月, 风蚀气候因子急剧增大, 12 月, C_e 再一次出现高峰值 [图 3(a)]. 然而, 由于流域产沙主要是在汛期, 冬、春季节流域产沙很少, 虽然 3 月 C_e 很大, 但风蚀贡献量却很小, 而 7 月 C_e 很小, 但由于汛期总产沙量很大, 使得风蚀贡献量在全年中最大, 月风力侵蚀量占年风蚀总量的比例在 7 月达到最大值 (60% 之上), 风沙贡献量约 7.75×10^6 t [图 3(b)]. 7、8 两月的风沙贡献量占年风蚀贡献总量的 80.5%, 而 3 月风力侵蚀量却还占不到年风蚀总量的 10% [图 3(a)]. 在季节尺度上, 夏季 C_e 最小, 仅 7.8%. 秋、冬季 C_e 逐渐升高, 春季 C_e 达到最高, 为 28.6% (图 4). 在年时间尺度上, 研究时段年均 C_e 为 17.2%, 风蚀贡献量为 12.7×10^6 t (表 2).

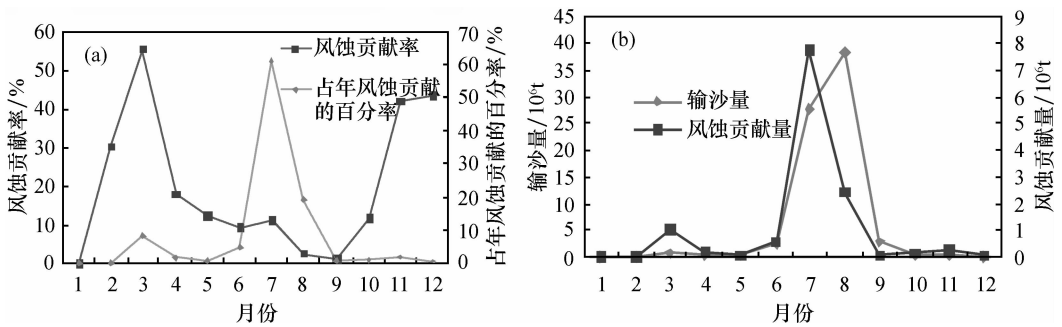


图 3 神木水文站以上流域月尺度上的风蚀贡献率

Fig. 3 Wind erosion contribution rate of catchments upstream of Shenmu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed at monthly scale during the period 1956–1970

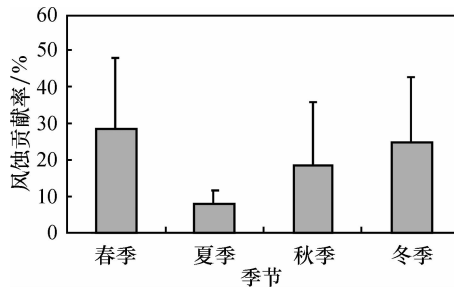


图 4 神木水文站以上流域季尺度上的风蚀贡献率

Fig. 4 Wind erosion contribution rate of catchments upstream of Shenmu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed at seasonal scale during the period 1956–1970

表 2 神木水文站以上流域年尺度上的风蚀贡献率

Table 2 Wind erosion contribution rate of catchments upstream of Shenmu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed at yearly scale during the period 1956–1970

	回归方程	决定系数 R^2	F 检验结果	显著性概率	风蚀贡献率/%	时段
标准化前	$W_s = 0.426P + 1.017C - 194.801$	0.424	4.42	0.036		1956—1970 年
标准化后	$W_s = 0.611P + 0.127C$	0.720	16.70	0.0003	17.2	1956—1970 年

3 讨论

3.1 风水蚀作用过程

窟野河流域一般在冬春枯水季节风力作用较大,风力搬运的泥沙除一部分直接进入河道中,其余往往会暂时堆积于河道或沟道中,到了夏秋洪水季节,暴雨径流使土壤受到侵蚀,形成了含有大量细泥沙的浑水并汇入沟道和河道,进而使前期存贮的粗颗粒泥沙悬浮而被搬运,形成输送能力极强的高含沙洪水。3月,气温上升,地表和沟壑冻结层开始解冻,土壤疏松,抗蚀能力降低,风蚀侵蚀力大,冲入河面的风沙量也大,而降雨量却很小,使得 C_e 高达55%以上,春季 C_e 为28.6%,但由于此时流域总产沙量小,风蚀贡献量也较小。4月后尤其到了7、8月汛期,降雨量大大增加,风蚀气候因子达到最低点,夏季 C_e 仅7.8%,而到了9月,因为夏季汛期已经带走了大部分可蚀物质,流域泥沙供应不足, C_e 为全年的最低点(仅1%)。但由于流域总产沙量大,7月流域总的风蚀贡献量达到 7.75×10^6 t,7—8月风蚀贡献量占到年总量的80.5%。10月后,降水量逐渐减小, C 逐渐增大, C_e 又开始增大,11—12月 C_e 再一次出现高峰值,而风蚀贡献量却在变小。在1月,温度低(约为 -10 °C左右),河水已有结冰,降雨量很小,入河风沙量很难流出,相当一部分的泥沙堆积在坡底、岸边或沟道内, C_e 和风蚀贡献量都很小(图5)。以上表明,年内月尺度上风沙入河量存在“存储—释放”的过程。

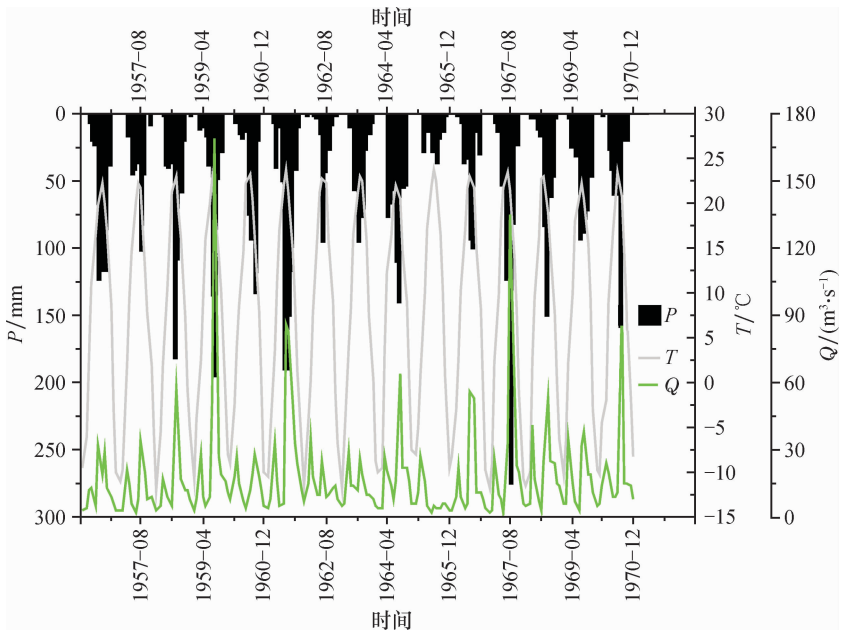


图5 神木水文站以上流域月时间尺度上的降水量(P)、气温(T)和流量(Q)变化

Fig. 5 Precipitation (P), temperature (T) and flow discharge (Q) of catchments upstream of Shennu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed at monthly scale during the period 1956–1970

3.2 粒径分布特征

窟野河河道宽浅,河床淤厚3~8 m,属于淤积性河道^[19],冲淤变化主要取决于来水来沙条件^[20]。河道是大水时冲,小水时淤,汛期冲,汛后淤,含沙量的增减与河床淤积层冲淤变化紧密相关,泥沙主要产自河床淤积层而不是基岩。从6月至9月,粒径 >0.05 、 0.1 、

0.25 mm 的沙重百分比逐渐减小,9月达到全年的最低值,10月迅速增大。冬季粗沙沙重百分比最低,春季粗沙沙重百分比比较高。而粒径 <0.01 mm 的沙重百分比冬春季趋于平缓,到了汛期则逐渐增大,9月达到最高值,10月迅速减小(图6),与史学建等^[21]研究的风沙区粗泥沙含量规律是一致的。洪水中泥沙粒径分布与风蚀贡献率表现的一致性特征,说明利用 C 、 P 和 W_s 建立的二元线性方程定量分析风蚀对流域产沙的贡献是可行的。

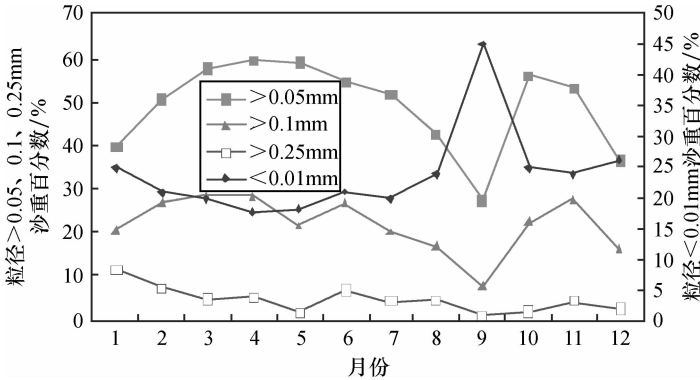


图6 神木水文站月尺度上平均悬移质颗粒级配

Fig. 6 Grading of suspension load of Shenmu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed at monthly scale

六道沟小流域是本文研究区内的一个子流域,在土地覆盖、植被类型和地貌特征上与本文研究区具有很大的相似性。利用粒径分析方法,结合3a的野外实地监测,张平仓等^[22]得出年风力侵蚀量占流域总产沙贡献的24%,稍大于本文年际尺度上的 C_e (17.2%),考虑到流域泥沙输移过程中粗泥沙颗粒的沉积,因而本文得到的风蚀对流域总产沙的贡献率是可信的。在神木水文站以上的窟野河流域,吴成基等^[10]根据野外采样,通过粒度分析法得出流域风沙产沙占流域产沙的10.4%左右,比本研究的结果稍小,是因为吴成基等认为流域产沙量受黄土、基岩和风沙等多个因素的影响,而本文估算的流域产沙量主要是由风、水两相作用完成的,基岩、重力等其它产沙过程是在风力、水力共同作用下完成的,基岩产沙是风化剥落在先,水力冲刷在后,重力在风力与水力作用之间起着转换作用。在风水蚀复合区无定河流域,也与师长兴^[14]计算得到1970年以前风蚀贡献率约为16.7%的结论一致。以上研究,进一步证实了本研究中采用式(6)计算风蚀对流域侵蚀产沙贡献的可行性和正确性。

4 结论

窟野河流域风蚀气候因子指数平均值为98,风蚀气候侵蚀力较强。年际变化大,有明显的四季变化。风蚀气候侵蚀力基本上以夏季最弱,冬、秋季逐渐升高,春季达到最强。7、8月汛期风蚀气候因子达到最低值,风蚀气候侵蚀力最弱。4月达到最大值,风蚀气候侵蚀力最强。年内月尺度上风沙入河量存在“存储—释放”的过程。风沙是河床淤积物的重要来源。冬春季淤积的泥沙,到了夏季,逐渐被冲走,到了9月,把淤积的泥沙最大限度冲走而开始了新的淤积过程。7、8两月的风沙入河量很大,占年风蚀量的80.5%。窟野河流域风沙贡献量的峰值出现在7月。年内月时间尺度上风蚀贡献率与风蚀气候因子分布趋势一致。夏季风蚀贡献率最低,仅7.8%,秋、冬季逐渐升高,春季达到最高,风蚀贡献率为28.6%。风力的侵蚀搬运对窟野河流域的产沙起着重要的作用。风力作用对神木水文站以

上流域的产沙贡献为 17.2%, 风蚀贡献量为 12.7×10^6 t/a。

参考文献 (References):

- [1] 查轩, 唐克丽. 风蚀水蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97-100. [ZHA Xuan, TANG Ke-li. Study on comprehensive control model of small watershed ecoenvironment in water and wind crisscrossed erosion zone. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 97-100.]
- [2] Li M, Li Z B, Liu P L, et al. Using Cesium-137 technique to study the characteristics of different aspect of soil erosion in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau of China [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2005, 62: 109-113.
- [3] 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. [XU Jiong-xin. The wind-water two-phase erosion and sediment-producing processes in the middle Yellow River basin, China. *Science in China Series D*, 2000, 30(5): 540-548.]
- [4] 高学田, 唐克丽. 风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征[J]. 水土保持通报, 1996, 16(3): 27-31, 60. [GAO Xue-tian, TANG Ke-li. Study on erosion energy of wind-water erosion region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(3): 27-31, 60.]
- [5] 许炯心. 黄河中游支流悬移质粒度与含沙量、流量间的复杂关系[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 39-48. [XU Xiong-xin. Complicated relationships between suspended sediment grain-size, water discharge and sediment concentration in tributaries of middle Yellow River. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 39-48.]
- [6] 陈正宜. 毛乌素沙漠与黄河粗泥沙来源的遥感分析[J]. 遥感信息, 1991(3): 22-24. [CHEN Zheng-yi. Remote sensing analysis of Mu Us Desert and the source of coarse sand of the Middle Yellow River. *Remote Sensing Information*, 1991(3): 22-24.]
- [7] 杨根生, 刘阳宣, 史培军. 黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J]. 科学通报, 1988, 33(13): 1017-1017. [YANG Gen-sheng, LIU Yang-xuan, SHI Pei-jun. Estimates of aeolian sand encroachment into the Yellow River. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(13): 1017-1017.]
- [8] 冯国安. 黄河中游粗沙的来源主要是风沙[J]. 中国水土保持, 1992(3): 45-47. [FENG Guo-an. Sand is the main resource of coarse sand of the Middle Yellow River. *Soil and Water Conservation in China*, 1992(3): 45-47.]
- [9] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988. [CHEN Yong-zong, JING Ke, CAI Qiang-guo. *Modern Erosion and Management in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1988.]
- [10] 吴成基, 甘枝茂, 孙虎, 等. 河龙区间六条流域产粗沙量研究[J]. 人民黄河, 1997(4): 21-24. [WU Cheng-ji, GAN Zhi-mao, SUN Hu, et al. Amount of coarse sand of six valley in Hekou-Longmen zone. *Yellow River*, 1997(4): 21-24.]
- [11] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区北部风沙区土地沙漠化综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1991. [Loess Plateau Scientific Survey Team of Chinese Academy of Sciences. *Land Desertification of the Northern Loess Plateau in China*. Beijing: Science Press, 1991.]
- [12] 张胜利, 陈发中. 黄河中游多沙粗沙区风蚀产沙对黄河粗泥沙影响分析[J]. 中国水土保持, 1997(9): 13-18. [ZHANG Sheng-li, CHEN Fa-zhong. Influences of wind erosion on coarse sand yield in coarse sediment region of the Middle Yellow River. *Soil and Water Conservation in China*, 1997(9): 13-18.]
- [13] 许炯心. 风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(9): 899-906. [XU Jiong-xin. Hyperconcentrated flows as influenced by coupled wind-water processes. *Science in China Series D*, 2005, 35(9): 899-906.]
- [14] 师长兴. 风力侵蚀对无定河流域产沙作用定量分析[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 285-293. [SHI Chang-xing. A quantitative analysis of the effects of wind erosion on sediment yield in the Wuding River watershed. *Geographical Research*, 2006, 25(2): 285-293.]
- [15] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7. [DONG Yu-xiang, KANG Guo-ding. Study on the wind erosion climatic erosivity in arid and semiarid areas in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8(3): 1-7.]
- [16] FAO. A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment [M]. Rome, 1979.
- [17] 程天文, 程维新. 农田蒸发与蒸发力的测定及其计算方法[C]//地理集刊, 第 12 号, 水文分析与实验. 北京: 科

- 学出版社, 1980: 74-83. [CHENG Tian-wen, CHENG Wei-xin. The methods of determination and calculation of evaporation and potential evapotranspiration in farmland//Memoirs of Geography (12), Hydrographical Analysis and Experiment. Beijing: Science Press, 1980: 74-83.]
- [18] XU Jiong-xin, HU Chun-hong, CHEN Jian-guo. Effect of suspended sediment grain size on channel sedimentation in the lower Yellow River and some implications [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(8): 2330-2339.
- [19] 冯国安. 黄河中游粗沙的来源主要是风沙(续) [J]. 中国水土保持, 1992(4): 44-47. [FENG Guo-an. Sand is the main resource of coarse sand of the Middle Yellow River (continue). *Soil and Water Conservation in China*, 1992(4): 44-47.]
- [20] 方学敏. 黄河干流宁蒙河段风沙入黄沙量计算[J]. 人民黄河, 1993(4): 1-3. [FANG Xue-min. Estimates of aeolian sand encroachment into the Yellow River in Ning-Meng reach. *Yellow River*, 1993(4): 1-3.]
- [21] 史学建, 刘宇梁, 黄静, 等. 再谈黄河中游粗泥沙的来源[J]. 人民黄河, 2007, 29: 62-63. [SHI Xue-jian, LIU Yu-liang, HUANG Jing, et al. The resource of coarse sand of the Middle Yellow River. *Yellow River*, 2007, 29: 62-63.]
- [22] 张平仓, 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域不同地层侵蚀产沙量及其特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 1-9. [ZHANG Ping-cang, ZHA Xuan, TANG Ke-li. The watershed erosion-sediment yield and characteristics of different stratum in water-wind erosion crisscross region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(1): 1-9.]

Contribution Characteristics of Wind Erosion to the Sediment Yield in the Kuyehe River Watershed at Time Scales

LI Qiu-yan¹, CAI Qiang-guo², FANG Hai-yan²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Wind erosion plays an important role on sediment yield in complex erosion zone by wind and water of the Loess Plateau. Contribution characteristics of wind erosion to the sediment yield in the Kuyehe River watershed at time scales was estimated based on the sediment discharge records at Shenmu Hydrological Station and meteorological measurements recorded at meteorological stations in and around the watershed. The results reveal that wind erosion is a principal contributor to sediment yield of the Kuyehe River watershed. At the monthly scale, sediment yield from wind erosion had a restore – release process. Wind erosion contribution rate was the highest in March and November – December, and was lower from April to September. Alluvial sediment in winter and spring was gradually discharged in summer. The wind erosion contribution rate at the monthly scale was consistent with the wind erosion climatic factor. The amount of sediment of July and August from wind erosion occupied 80.5% of the total amount of a year. At the seasonal scale, wind erosion contribution rate in summer was the lowest of 7.8%, and gradually increased in autumn and winter, then reached the highest in spring of 28.6%. At yearly scale, wind erosion contribution rate is about 17.2% at catchments upstream of Shenmu Hydrological Station in the Kuyehe River watershed during the period 1956–1970.

Key words: wind erosion contribution to sediment yield; wind erosion climatic factor; complex erosion by wind and water