

贾晓鹏,王海兵,李永山,等.风沙对黄河宁蒙河段的影响研究进展[J].中国沙漠,2021,41(4):152-157.

风沙对黄河宁蒙河段的影响研究进展

贾晓鹏¹,王海兵²,李永山³,王远征¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018; 3.盐城师范学院 城市与规划学院,江苏 盐城 224007)

摘要:黄河宁蒙河段穿越腾格里沙漠、河东沙地、乌兰布和沙漠和库布齐沙漠,形成了沙漠包围河流的独特地貌景观。近50年来,由于气候变化和人类活动的影响,该河段水沙关系加剧恶化,河槽萎缩、加速形成“悬河”,已引起国家高度重视和科技界的广泛关注。本文主要从风沙对河道的淤积、河道演变和高含沙洪水的影响3个方面阐述了风沙对黄河宁蒙河段的影响,以期为该河段的“悬河”防治和区域生态保护提供依据。

关键词:风沙;淤积;高含沙洪水;河道演变

文章编号:1000-694X(2021)04-152-06

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00056

中图分类号:X43

文献标志码:A

0 引言

全球干旱、半干旱区穿越沙漠的河流,如南美的San Juan河、北美的Gila河、南非的Orange河、澳大利亚的Darling河、中国的黄河均不同程度地受地表风蚀水蚀产生泥沙的严重危害^[1-4],河道时常发生分流、迁徙、萎缩、决口改道、阻塞成湖、“悬河”发育等灾害。风水复合侵蚀作用下多源、非均匀粗泥沙的混合、分选、转换、输移与沉积是这些灾害形成的关键过程与主要根源。

河流穿越沙漠,沙漠是河流的重要粗沙沙源,河流是沙漠前移的屏障,也是沙漠粗沙的天然输送通道。沙漠与河流的相互作用是沙漠河流的共性,也是区别于湿润区河流的典型特征,这种相互作用集中表现在沙漠沙暴入河、高含沙洪水入汇和河流侧蚀沙漠(包括沙漠粗沙洪积扇)的塌岸淤床过程。该过程对沙漠河流迁徙、河道萎缩、决口改道、壅水倒流、悬河发育等灾害有突出影响。围绕沙漠河流的风沙水沙过程与灾害问题,国内外学者也进行了大量的研究工作。依靠测年技术和沉积物组分分析,对沙漠河流风沙、水沙两相交交互沉积地层,开展了泥沙搬运堆积历史过程的反演研究^[5-7];通过野外观测、水文泥沙资料分析、遥感影像解译等方法也

研究了黄河中游、中国北方干旱区、黄河上游十大孔兑等区域的风水复合侵蚀过程^[3,8-9];以间歇性、砾石质河床的沙漠沟谷为研究对象,国内外学者开展了沙漠沟谷高含沙洪水过程的研究,初步认为与湿润地区河流相比,沙漠河流河道泥沙混合程度高、粒径粗,悬移质、推移质载荷高^[4,10-11]。Tooth^[11]对干旱区河流的水文过程、泥沙输移特性进行了系统的阐述,而缺乏风沙过程对河流影响研究方面的总结。由于沙漠河流风水两相过程的特殊性与复杂性,目前对沙漠河流关键风沙水沙过程的研究大多应用湿润地区河流的结论和观点,研究机理和理论相比湿润地区河流还相当薄弱^[1,11]。

黄河宁蒙河段穿越腾格里沙漠、河东沙地、乌兰布和沙漠和库布齐沙漠,是沙漠、河流交互演化过程的典型区域,形成了沙漠包围河流的独特地貌景观(图1)。该区气候敏感、生态脆弱、沙漠过程和河流过程交织、风蚀和水蚀过程交错、风沙和水沙过程复合,分布着中国乃至世界上地表风水复合侵蚀强度最大的区域,在沙漠河流的研究中具有不可替代的优势。近50多年,由于气候变化和人类活动的影响,该河段水沙关系加剧恶化,河槽萎缩、加速形成“新悬河”长达268 km,严重威胁沿黄1万多平方千米灌区及几百万人口生命安全,已引起国家高

收稿日期:2021-04-22; 改回日期:2021-05-06

资助项目:国家重点基础研究发展计划课题(2011CB403302);国家重点研发计划课题(2016YFC0402401);国家自然科学基金项目(41101005)

作者简介:贾晓鹏(1982—),男,山东临沂人,博士,副研究员,主要从事风沙灾害理论研究。E-mail: jiaxp@lzb.ac.cn

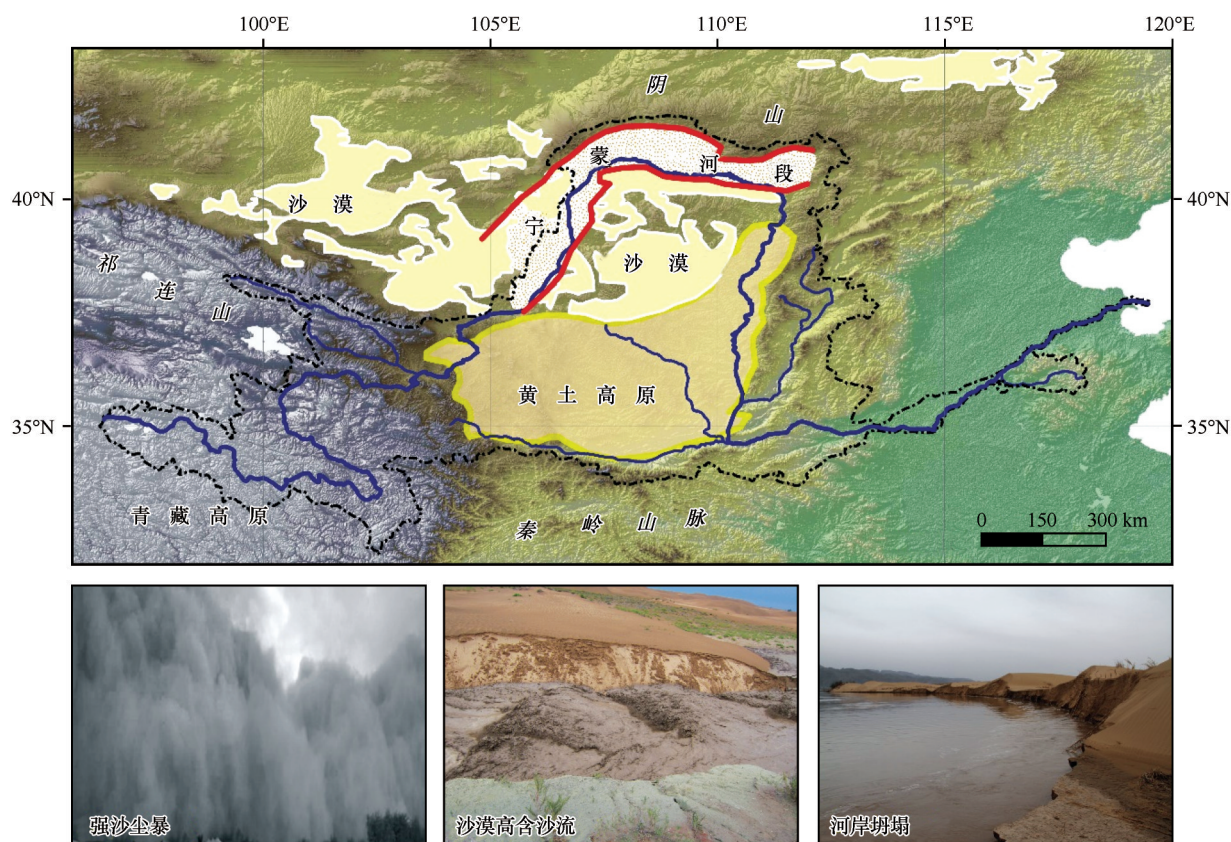


图1 黄河宁蒙河段位置及其关键过程

Fig.1 Location and main land surface processes of the Ningxia-Inner Mongolian Reach of the Yellow River

度重视和科技界的广泛关注。从20世纪80年代至今,研究人员对该区域的自然地理环境特征、环境问题(土壤侵蚀、风沙水沙过程与危害等)以及农、工、矿、交通、人口等问题进行了系统、综合的研究^[12-16],为以后的研究工作提供了丰富的基础数据。本文在前期研究的基础上,主要从风沙对河道的淤积、河道演变和高含沙洪水的影响3个方面阐述目前的研究进展,以期为该河段的“悬河”防治和区域生态保护提供依据。

1 风沙对黄河宁蒙河段河道粗泥沙淤积的影响

粗泥沙对黄河河道的淤积是黄河“悬河”、洪泛、凌汛等洪水灾害的根源。现已查明,黄河下游河道淤积的粗泥沙主要来源于黄河中游黄土高原区 $>0.05\text{ mm}$ 的粗泥沙^[17-18]。由于沙漠地表过程变化的复杂性和不确定性,区域风沙过程和沙丘前移变化存在很大的差异,导致沙漠对黄河影响的研究结果呈现出很大的随机性和不确定性。杨根生等^[19]连续3年(1985—1987年)在沙漠区进行野外实地观

测,发现沙漠风沙进入黄河的总量约为1.6亿t,黄河宁蒙河段淤积泥沙80%来源于沙漠^[20-21]。有的学者甚至认为黄河粗泥沙主要来自沙漠风沙^[22],而随着气候变化和人类活动的影响,现阶段风沙年入河量却大大减少^[23]。但也有一些观点认为,沙漠风沙对黄河河道粗泥沙的贡献很少,不足5%^[18,24]。围绕黄河上游粗泥沙来源问题形成“沙漠源”与“黄土源”两种学术观点,在沙漠学与河流泥沙学之间进行长期的争执。黄河宁蒙河段河道淤积的粗泥沙主要有两大潜在源区:一是黄河上游黄土高原区^[18,24];二是宁蒙河段风沙区^[13]。黄土区粗泥沙粒径主要为 $0.05\text{—}0.10\text{ mm}$ ^[18],风沙区粒径多大于 0.10 mm ^[13],在黄河上游物理风化过程为主的背景下,现代河流沉积物基本上继承了源区泥沙的物理化学组成特征。以河道淤积物为研究对象,开展了不同时空尺度的粗泥沙源汇示踪研究。通过两根浅层河床钻孔的粒径及SEM形貌对比分析,杨根生^[13]证实了该河段的淤积物主要是 $>0.1\text{ mm}$ 的沙漠沙和砒砂岩碎屑颗粒物。而黄河干流河道248根3—6 m深度的钻孔资料表明,黄河内蒙古河段河床下

伏沉积层是粒径 $>0.08\text{ mm}$ 的粗沙层,而在心滩表面覆盖细沙薄层,粗沙层和细沙层之间的转换阈值是 0.08 mm ^[25]。河道大断面资料,悬移质泥沙浓度与径流的关系及其在洪水过程中的输移特征^[26-27],表明黄河宁蒙河段河道淤积的细颗粒泥沙具有可调性,悬移质与推移质经常相互转换,而粗泥沙则具有不可调性。黄河宁蒙河段河道淤积泥沙与潜在源区泥沙的粒径、元素和矿物等判别指标的空间分布格局进一步表明黄河宁蒙河段河道沉积物70%以上是 $>0.08\text{ mm}$ 的推移质粗泥沙,而且主要来源于当地的风沙区^[28-31]。特别地,锆石U-Pb测年结果表明^[32],黄河宁蒙河段淤积的粗泥沙与近源沙漠区粗泥沙中的锆石U-Pb年代相一致,呈现出典型的450 Ma和250 Ma前双峰结构,但与黄河中游粗泥沙中锆石U-Pb年代存在显著差异,锆石U-Pb年代表现为250 Ma前的单峰特征。该研究结果进一步证实了黄河宁蒙河段淤积的粗泥沙与其近源沙漠区的粗泥沙来源相同。以上研究探明了黄河宁蒙河段河道粗泥沙主要来源于近源沙漠沙与下伏砒沙岩沙,解决了粗泥沙“沙漠源”与“黄土源”的长期争论。

2 风沙对沙漠沟谷高含沙洪水产输过程的影响

沙漠区沙暴、高含沙洪水活动频繁,对河流泥沙输移与河道变化有着十分突出的影响。在一些沙丘-沟谷系统,受沟谷反向环流的影响,风沙流携带的跃移质沙粒很难穿越沟谷,迅速沉积在沟谷内,致使许多活动沙丘常终止于季节性沙漠河流

中,给河道贡献了大量风沙物质^[33-34]。如阿萨巴斯沙漠威廉河段、喀拉哈里沙漠奥伦治河河段、辛普森沙漠芬克河河段,在某些河段甚至出现沙漠阻断河流的现象^[35-36]。而当暴雨形成洪水通过沟谷时,侵蚀搬运流域坡面细泥沙与沟道内松散的粗风沙物质形成高含沙洪水,携沙向下游输移、分选与沉积,形成特殊的“风沙淤积-洪水冲刷”模式,源源不断地将沙漠沙向下游输送。近期零星的研究资料表明,与湿润地区河流相比,干旱、半干旱区沙漠间歇性河流的径流过程以洪水过程为主,径流变异大,变异系数通常大于1^[11],常形成高含沙洪流;河道推移质载荷高,约是湿润地区河流的几百倍,甚至几千倍以上^[10]。

从南到北穿过库布齐沙漠的十大孔兑,区域内沙暴、洪水过程极其活跃^[13]。冬春季节,以风力侵蚀为主,在西风的作用下风沙常沉积在流域的坡面和沟道内;夏秋季节,以水力侵蚀为主,高强度暴雨形成突发性洪水,携带梁地砒砂岩沙与沙漠区的风沙,形成高含沙洪水,在半干旱区沙漠分布流域形成独特的覆沙坡面和沙丘沟谷的风水复合侵蚀地貌景观(图2)。形成的高含沙洪水进入黄河后,除堵塞黄河河道,抬高河床,冲毁水利设施,淹没村庄、农田外,还向下游输送大量泥沙,致使河道不畅,严重威胁人民生命财产安全,制约着经济的可持续发展^[13]。洪水携带的粗沙组分也成为黄河上游河道粗泥沙的主要来源^[13],对黄河内蒙古河段泥沙输移及“悬河”的形成发育产生了十分突出的影响。然而,自20世纪90年代以来,随着水土保持工程陆续实施,十大孔兑流域植被盖度明显增加,产

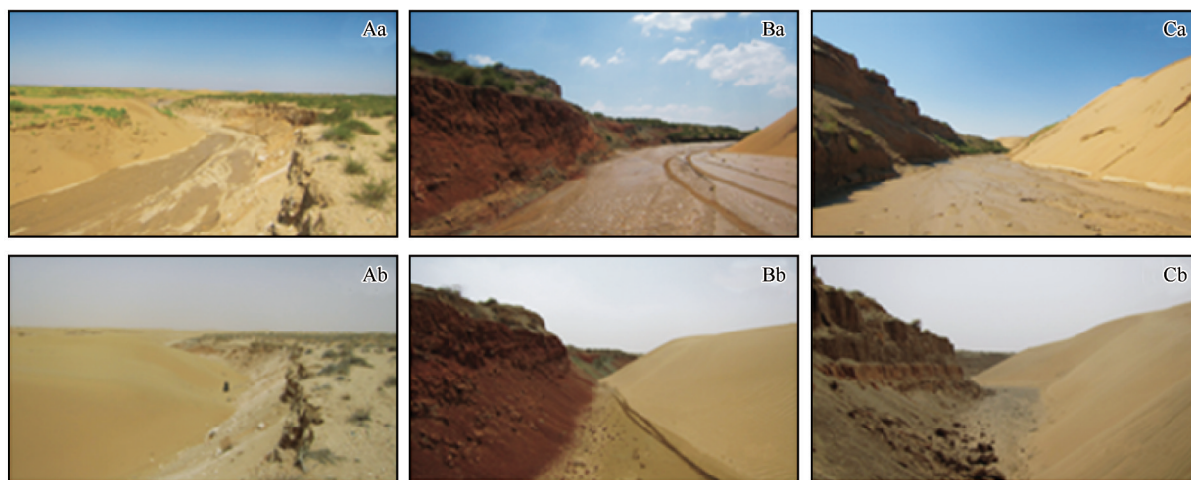


图2 洪水前(a)后(b)沙漠沟谷沟道对比

Fig.2 River channel before and after flood

水产沙剧烈减少,洪水的频次也急剧降低^[37]。

风沙对沙漠沟谷高含沙洪水产输过程影响的研究主要体现在两个方面:一是风沙入沟量估算。野外风沙活动监测的结果表明,20世纪80年代年风沙入沟总量为1 806万t,毛不拉孔兑为217.97万t^[12],而依据三维激光扫描仪和遥感影像分析的结果表明,由于气候变化和人类活动的影响,现阶段风沙入沟量大大减少,毛不拉孔兑仅为14.94万t^[38];二是高含沙洪水中风沙的贡献。对黄河干流西柳沟沟口进行河床浅层钻孔取样,结合泥沙SEM形貌分析,杨根生^[13]发现河床7 m厚的淤沙层在0.1 mm以上风成沙占72.21%。对毛不拉孔兑苏达拉尔沙漠沟谷2011—2013年5次洪水事件的野外原型观测结果表明,洪水浓度高达1.2—1.45 t·m⁻³;沙漠高含沙洪水主要搬运的是沙漠粗泥沙,而不是坡面细泥沙,风沙过程对流域水土流失的贡献率大于50%^[39-41]。沙漠高含沙洪水的形成发育与区域暴雨及沙暴频率密切相关^[40]。该研究成果将风蚀与水蚀动力过程耦合起来,构建了沙漠高含沙洪水形成发育的风-洪传输动力学模式,为半干旱区流域水土流失的治理提供了新思路。

3 风沙对黄河宁蒙河段河道演变的影响

传统的河流泥沙动力学关于河道演变的研究主要考虑水沙关系、边界条件和基准面三要素,忽视了风沙入河过程对泥沙输移与河道演变的作用与影响,对沙漠河流的认识存在局限性。对沙漠河流河道演变,国外学者初步认为沙漠河段风沙活动越强烈,河道分叉越多,河道辫状河型越发育^[42-43]。对黄河宁蒙河段的河道演变的研究,目前大多依靠遥感手段和断面监测资料,阐述了河道侵蚀淤积及其演变的变化特征^[44-45]。利用长期的水文资料,结合实地野外观测实验和数值模拟等研究手段,国内外学者近期发现了宁蒙河段存在两种风沙入河模式——风沙聚岸-冲岸入河模式与风沙覆坡/入沟-高含沙流入河模式,分别调控着沙漠辫状与弯曲河道的发育^[16,46]。根据第一种模式,风沙入河后,在横向环流与自重力的作用下推移入槽,河道随之分叉、沙坝发育、主河槽横向摆动频率加快,导致河道向宽浅、散乱与游荡河型发展。径流量越大,沙漠沙丘河岸坍塌入河量越多,河道分叉指数越高^[46-47];径流量小,主河道偏离沙丘河岸时,反向环流则向

沙丘河岸输送细泥沙,沉积扩大冲积滩地,由此抑制了风沙入河过程,促使辫状河流向单一弯曲河道的转变^[46-47]。Schuurman等^[47]以黄河宁蒙河段为对象,利用Delft 3D模拟了不同洪峰流量下河道心滩发育数量,发现洪峰流量越大,分叉越强。该研究成果也不同于之前沙漠河流河道演变的研究观点:气候越干,风沙活动越强,干旱区河流辫状指数越高。根据第二种模式,主要是风沙入河后,河道附岸沙坝快速交替出现,促使河道缩狭、曲率增加,形成小曲流镶嵌在大曲流内部的镶嵌结构,进一步促使弯曲河道的发育演化^[16,48]。该研究成果提出了沙漠河流不稳定的风沙驱动的新观点,为沙漠河流泥沙输移与河道演变研究提供新思路、新方法。

4 研究展望

黄河流域是中国重要的生态屏障和重要的经济地带,在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位,黄河流域生态保护和高质量发展已上升为国家战略。尽管黄河流域水沙治理已取得显著成效,但是黄河流域气候目前表现为低风速、低雨强特征,加之生态系统人工化趋势显著^[49],区域强风沙过程以及暴雨引发的高强度水土流失风险仍然存在,黄河“悬河”安澜仍然面临巨大挑战。黄河宁蒙河段“悬河”问题严重,风沙-水沙-河道相互作用过程复杂,目前针对该河段已经开展了丰富的研究,取得了很多的研究结果。本文仅从风沙入沟/入河的角度出发,初步总结了目前风沙对河道的淤积、河道演变和高含沙洪水产输的影响等方面的研究工作。由于过去研究较少,风沙水沙观测数据时间尺度较短。应在以下几个方面加强研究:

风沙入黄对河道粗泥沙淤积的影响。一是风沙入河过程复杂,入河量变率大。风沙入河过程与沙漠风沙过程和河流水沙过程关系密切。风沙入河量在不同时空尺度上的变化目前尚不清楚,值得以后进一步深入研究。二是黄河宁蒙河段水沙异源,多源粗泥沙交汇于此,尤其在现代气候变化和人类活动影响下,亟需开展现代河道泥沙淤积特征和物源辨识研究。

风沙对沙漠沟谷高含沙洪水产输过程的影响。由于十大孔兑流域沙丘沟谷地貌组合单元复杂多样,沙丘区与砒砂岩区空间上呈非对称分布,而且风速与降雨存在时空差异,地表也呈现不同程度的风沙与水沙过程。需要在已有研究的基础上,做进

一步深入的对比观测研究,而且该区域仅有3个水文监测站,站点数量较少,亟需利用现有实验条件开展高含沙洪水过程模拟研究。

风沙对黄河宁蒙河段河道演变的影响。一是黄河宁蒙河段辫状和弯曲型河道发育,由于缺乏长期的观测资料,目前的研究也相对较少,亟需开展河道水下地形,泥沙输移和水流流量等方面的系统研究,以进一步探清河道演变的内在过程;二是在河道演变的模拟研究方面,应进一步考虑使用先进的模型,结合研究区的实际情况,优化模型参数,做出比较好的预测结果。

另外,黄河宁蒙河段河岸沙质松软,遇洪水随机性塌岸。塌岸时空分布的差异性与跳跃性问题值得进一步研究。

参考文献:

- [1] Bullard J E, McTainsh G H. Aeolian-fluvial interactions in dry-land environments: examples, concepts and Australia case study [J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27(4): 471–501.
- [2] McIntosh R J. Floodplain geomorphology and human occupation of the upper inland delta of the Niger [J]. *Geographical Journal*, 1983, 149: 182–201.
- [3] Knighton A D, Nanson G C. Waterholes and their significance in the anastomosing channel system of Cooper Creek, Australia [J]. *Geomorphology*, 1994, 9: 311–324.
- [4] 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.
- [5] 宋阳, 刘连友, 严平. 风水复合侵蚀研究述评[J]. *地理学报*, 2010, 61(1): 77–88.
- [6] Harrison J B J, Yair A. Late Pleistocene aeolian and fluvial interactions in the development of Nissana dune field, Negev Desert, Israel [J]. *Sedimentology*, 1998, 45: 507–518.
- [7] Lancaster N. Linkages between fluvial, lacustrine, and aeolian systems in drylands. A contribution to IGCP project 413 [J]. *Quaternary International*, 2003, 104: 1.
- [8] Zhang X, Li Z B, Li P, et al. A model to study the grain size components of the sediment deposited in aeolian-fluvial interplay erosion watershed [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 330: 132–140.
- [9] Yan P, Li X M, Ma Y F, et al. Morphological characteristics of interactions between deserts and rivers in northern China [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 225–233.
- [10] Laronne J B, Reid L. Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert river [J]. *Nature*, 1993, 366: 148–150.
- [11] Tooth S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research [J]. *Earth Science reviews*, 2000, 51: 67–107.
- [12] 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.
- [13] 杨根生. 黄河石嘴山-河口镇段河道淤积泥沙来源分析及治理对策[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [14] 舒安平, 张科利, 余明辉, 等. 塌岸淤床动力过程[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [15] 师长兴, 王随继, 许炯心, 等. 黄河宁蒙段河道洪峰过程洪-床-岸相互作用机理[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [16] 吴保生, 王平, 张原锋. 黄河内蒙古河段河床演变研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [17] 钱宁, 王可钦, 闫林德, 等. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响[M]//钱宁论文集. 北京: 清华大学出版社, 1990: 615–621.
- [18] 景可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] 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, 13: 1017–1021.
- [20] 徐建华, 吕光欣, 张胜利等. 黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
- [21] 拓万全. 黄河沙漠粗泥沙研究进展[M]//王涛. 中国寒旱区环境与工程研究所科学50年. 北京: 科学出版社, 2010.
- [22] 冯国安. 黄河粗泥沙主要来自风沙[J]. *中国水土保持*, 1992, 3: 45–47.
- [23] Tian S, Yu G A, Jiang E. Reevaluation of the aeolian sand flux from the Ulan Buh Desert into the upper Yellow River based on in situ monitoring [J]. *Geomorphology*, 2019, 327: 307–318.
- [24] 陈永宗, 景可, 蔡国强. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [25] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. Downstream fining in contrasting reaches of the sand-bedded Yellow River [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25: 3693–3700.
- [26] Wang H B, Jia X P, Li Y S, et al. Selective deposition response to aeolian-fluvial sediment supply in the desert braided channel of the upper Yellow River, China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15: 1955–1962.
- [27] 汪宏芳, 贾晓鹏, 王海兵. 黄河内蒙古段淤积泥沙洪水冲刷效应[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(4): 1143–1149.
- [28] Jia X P, Wang H B, Xiao J H. Geochemical elements characteristics and sources of the riverbed sediment in the Yellow River's desert channel [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64: 2159–2173.
- [29] Jia X P, Li Y S, Wang H B. Bed sediment particle size characteristics and its sources implication in the desert reach of the Yellow River [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 950.
- [30] Pan B T, Pang H L, Zhang D, et al. Sediment grain-size characteristics and its source implication in the Ningxia-Inner Mongolia sections on the upper reaches of the Yellow River [J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 255–262.
- [31] 石晓萌, 贾晓鹏, 王海兵, 等. 黄河宁蒙河段粗泥沙重矿物特征及其指示意义[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1143–1149.
- [32] Nie J S, Stevens T, Rittner M, et al. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8511.

- [33] Smith N D, Smith D G. William River: an outstanding example of channel widening and braiding caused by bed-load addition [J]. *Geology*, 1984, 12: 78–82.
- [34] Thomas D S G, Stokes S, Shaw P A. Holocene aeolian activity in the southwestern Kalahari Desert, southern Africa: significance and relationships to late-Pleistocene dune-building events [J]. *Holocene*, 1997, 7: 273–281.
- [35] Teller J T, Lancaster N. Lacustrine sediments at Narabeb in the central Namib Desert, Namibia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 56: 177–195.
- [36] Anderson S P, Anderson R S. Debris-flow benches: dune-contact deposits record paleo-sand dune positions in north Panamint Valley, Inyo County, California [J]. *Geology*, 1990, 18: 524–527.
- [37] 姚海芳, 师长兴, 顾珍逵. 气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响 [J]. *干旱区地理*, 2018, 41(3): 472–479.
- [38] Yang H, Shi C X. Spatial and temporal variations of aeolian sediment input to the tributaries (the Ten Kongduis) of the upper Yellow River [J]. *Aeolian Research*, 2018, 30: 1–10.
- [39] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. The contribution of aeolian processes to fluvial sediment yield from a desert watershed in the Ordos Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29: 80–89.
- [40] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. Aeolian process induced hyper-concentrated flow in a desert watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 220–228.
- [41] 李永山, 斯庆毕力格, 马启民, 等. 沙漠沟谷暴雨洪水侵蚀产沙特征 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(2): 96–104.
- [42] Singer M B. Downstream patterns of bed material grain size in a large, lowland alluvial river subject to low sediment supply [J]. *Water Resource Research*, 2008, 44(12): 5121–5127.
- [43] Church M. Bed material transport and the morphology of alluvial river channel [J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2006, 34(34): 325–354.
- [44] Ta W Q, Xiao H L, Dong Z B. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs' operation [J]. *Geomorphology*, 2008, 97: 249–259.
- [45] 侯素珍, 常温花, 王平, 等. 黄河内蒙古河段河床演变特征分析 [J]. *泥沙研究*, 2010, 35(3): 44–50.
- [46] 李永山, 彭文昌, 任亮, 等. 近50年黄河乌兰布和沙漠段辫状河道演变 [J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1689–1694.
- [47] Schuurman F, Ta W Q, Post S, et al. Response of braiding channel morphodynamics to peak discharge changes in the Upper Yellow River [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43: 1648–1662.
- [48] Zhang Y F, Wang P, Wu B S. An experimental study of fluvial processes at asymmetrical river confluences with hyperconcentrated tributary flows [J]. *Geomorphology*, 2015, 230: 26–36.
- [49] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 38–41.

Research progress on effect of the coarse aeolian sand on the Ningxia-Inner Mongolian Reach of the Yellow River

Jia Xiaopeng¹, Wang Haibing², Li Yongshan³, Wang Yuanzheng¹

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. College of Urban and Planning, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, Jiangsu, China)

Abstract: The Ningxia-Inner Mongolian Reach of the Yellow River passes through the Tengger Desert, Hedong Desert, Ulan Buh Desert and Kubuqi Desert, forming a unique landform landscape of river surrounded by desert. In the past 50 years, due to the impact of climate and human activities, the relationship between water and sediment in this reach has worsened, the channel has shrunk and accelerated the formation of “hanging river”, which has aroused great attention of the state and the scientific and technological community. In this paper, the effects of aeolian sand on the Ningxia-Inner Mongolian Reach of the Yellow River were discussed from three aspects of sediment siltation, river channel evolution and flood with high sediment content, in order to provide a basis for the prevention and control of “hanging river” and regional ecological protection in this reach.

Key words: aeolian sand; siltation; hyper-concentrated flow; evolution of river channel