

# 不同气候带的河道与沙丘分布格局及其类型划分

李小妹<sup>1,2</sup>, 严平<sup>2</sup>, 钱瑶<sup>2</sup>, 吴伟<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 2. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院/地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 风水交互作用是干旱区常见的地貌现象和重要的地表过程, 干旱区河流通过提供物源和场所控制沙漠分布的格局, 沙漠分布与风沙活动制约河道发育和泥沙输移, 在不同时空尺度表现不一, 但关于二者交互作用的分类处于探索阶段, 尚未形成分类体系, 尤其在地貌格局分类上多为定性描述。因此, 自西向东选择位于3个气候带的中国西部克里雅河、中部毛不拉格孔兑以及东部西拉木伦河, 利用遥感影像解译获取河道与沙丘信息, 探讨近源沙丘的分布与河型之间的组合关系。结果表明: 河型、河流流向与风向之间的关系、水文以及距离河道的远近影响河道与沙丘组合的地貌格局; 在河道—沙丘尺度上, 划分为弯曲河道—对称式边滩沙丘、顺直河道—边滩沙丘、分叉河道—心滩式沙丘、网状河道—格状镶嵌式沙丘4种类型。

**关键词:** 河道; 沙丘; 风水交互作用; 分布格局; 类型划分

**文章编号:** 1000-694X(2017)05-0821-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00044

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

风水交互作用下地貌类型的划分对于风沙地貌区划<sup>[1]</sup>、多营力地貌过程<sup>[2]</sup>以及风力-水力两相作用下的侵蚀产沙过程模式的研究<sup>[3]</sup>具有重要的意义。在动力学分类上, Kirkby<sup>[4]</sup>根据水分条件的变化, 将风水复合侵蚀划分为风力过程为主、水力过程为主与风水交互作用3种类型; 史培军等<sup>[5]</sup>根据风、水两相作用在不同的时空条件下表现出的作用方式和相互配置的差异, 将风、水两相作用划分为同一时空条件下风、水共同作用形成的地貌景观及其发育过程和风、水在同一地点交替作用而形成的地貌景观及其发育过程; Liu等<sup>[6]</sup>对河道与两岸沙丘分布格局进行了划分, 划分了风力为主的、水动力为主、二者平衡型等5种类型; Al-Masrahy等<sup>[7]</sup>利用Google Maps, 将沙漠与河流交互类型划分成平行型、垂直型、网状孤立型等10种模式。在形态学分类上, Langford等<sup>[8]</sup>将风水交互作用划分为丘间低地曲流型、河谷爬坡沙丘型、沙丘阻塞河道型等6种类型; Bullard等<sup>[9]</sup>划分了非洲卡拉哈里沙漠西南的河谷风沙地貌类型; 李森等<sup>[10]</sup>和马玉凤等<sup>[11]</sup>探讨了河谷风沙地貌的分布规律以及类型划分。李小妹

等<sup>[12-13]</sup>在流域—沙区尺度上探讨了沙漠与河流分布和格局, 并将其划分为辐合水系—团块状沙地、平形状水系—分散沙地、树枝状水系—斑块镶嵌沙地、扇状水系—带状沙地、闭流区—破碎状沙地5种类型。但上述关于河道与沙丘的分类, 多是从动力、形态角度进行分类, 很少从河流本身对沙丘影响角度来进行划分。

近源沙丘(Source-bordering dunes)、区域或地带性沙丘(Regional dunes)以及二者之间的过渡型沙丘(Transitional dunes)3种沙丘<sup>[14-17]</sup>划分区别于经典的偏重于形态、风动力等要素的沙丘类型划分<sup>[18-20]</sup>, 更倾向于从分布和物源上与河流有着密切关系的沙丘类型划分, 能很好地反映干旱区风沙与流水交互作用的过程。这种沙丘类型早已被广泛地关注, 但目前没有归入风沙地貌的沙丘分类之中<sup>[9, 21-23]</sup>。

因此, 本文选择极端干旱区克里雅河、干旱区毛布拉格孔兑以及半湿润区西拉木伦河3条沙漠河流, 基于GIS工具对上述3条河流以及两岸沙丘的遥感影像解译, 尝试以上述近源沙丘、区域沙丘以及二者之间的过渡型沙丘3种沙丘类型, 探讨河流两岸风沙与流水交互作用地貌格局及其分类。这对于不同尺度下风水交互作用研究有着一定的借鉴意义。

**收稿日期:** 2016-02-02; **改回日期:** 2016-04-06

**资助项目:** 国家重大科学研究计划项目(2013CB956001); 国家自然科学基金项目(41171003); 中央高校基本科研业务费项目(GK201703047)

**作者简介:** 李小妹(1979—), 女, 安徽宿州人, 博士, 研究方向为干旱区地貌。E-mail: lixiaomei8477@sina.com

**通信作者:** 严平(E-mail: yping@bnu.edu.cn)

## 1 研究区概况

克里雅河位于塔克拉玛干沙漠南缘,发源于昆仑山主峰乌什腾格山的北坡,向北注入塔克拉玛干沙漠腹地<sup>[24]</sup>。河流总长 860 km(包括古河道 90 km),流域总面积 3.95 万 km<sup>2</sup>。克里雅河多年平均降雨量 44.7 mm,多年平均气温 11.6 °C,属暖温带大陆性气候,盛行西北风和东北风,平均风速 1.90 m·s<sup>-1</sup>,最大风速 >30.0 m·s<sup>-1</sup>,集中在 2—6 月<sup>[25]</sup>。克里雅河洪水类型包括季节性积雪融水以及暴雨洪水,水量集中在汛期(6—9 月),占全年水量的 74%。输沙量主要分布在 4—9 月汛期,而其他月份河流输沙量很小。

毛布拉格孔兑属于黄河的一级支流,河流中下游河段穿越库布齐沙漠。主干流长 111 km,流域面积 0.13 万 km<sup>2</sup>。流域多年平均降雨量 241.1 mm,多年平均气温 5.9 °C,属半干旱草原气候,主风向为西北风,风力 5~8 级,年均风速 4.5 m·s<sup>-1</sup>,最大风速 28.7 m·s<sup>-1</sup>,全年 ≥8 级风的发生日数为 28 d,主要在春秋季节,加剧该区风沙化<sup>[26]</sup>。河道为暂时性洪沟,洪水出现的时间与暴雨相应,最大洪峰流量一般出现在 6—9 月汛期,暴雨产生峰高量少、陡涨陡落的高含沙量洪水<sup>[27]</sup>。汛期河流径流量和含沙量较高,分别占到全年 74%和 94.3%。

西拉木伦河为西辽河上游的一条支流,全长约 380 km,流域面积 3.22 万 km<sup>2</sup>,西部流经浑善达克沙地,东部穿越科尔沁沙地<sup>[28]</sup>。属于温带半湿润气候,年平均气温 5~7 °C,年降水量 300~500 mm,其中 70%集中在夏季汛期。6—9 月汛期含沙量占全年含沙量的 62%~90%,全年含沙量最大的月份为 7 月。年均风速大约为 3.5~4.5 m·s<sup>-1</sup>,大风日数(>17.2 m·s<sup>-1</sup>)多达 22.4 d,主要集中在春季(3—5 月),盛行风向为西北风,这与最大风速风向一致<sup>[29]</sup>。

文中选择 3 条河流(或支流)的上、中、下游典型河段进行河道与沙丘地貌格局分析。其中,克里雅河自上游至下游依次为 K1、K2、K3、K4,毛布拉格孔兑为 M1、M2、M3、M4,西拉木伦河为 X1、X2、X3、X4(图 1)。

## 2 数据与方法

河型分类采用 Rust<sup>[30]</sup>的弯曲度和辫指数参数,将河流分为曲流河、顺直河、辫状河(分叉河)、网状河 4 种类型(表 1)。

3 个流域的遥感图像数据为从 USGS 网站(地址: <http://glovis.usgs.gov/>)下载的 2013 年 Landsat8 OLI 数据,时相为 8 月。对下载的遥感数据经辐射、几何校正、假彩色合成(742 波段)、图像拼接、增强等一系列处理后,用于地貌类型的解译。

将 3 个流域的遥感图像和 1:5 万地形图进行校正和配准,最终合成一幅数据源图像,在此基础上结合地物波谱特征、文献资料以及个人经验对 3 个流域不同河段河道与沙丘现状进行人机交互解译,得出不同景观要素的面积、周长等信息。本文的近源沙丘、过渡型沙丘、区域沙丘主要依据各自的特征进行解译,近源沙丘 SBD 多坐落在河漫滩或低阶地空旷的地方<sup>[21,31]</sup>,河谷、河漫滩的下风向,紧邻滩地,灰白色,区别于阶地上颜色相对较深的红色沙丘<sup>[32-35]</sup>;阶地上的颜色较深的红色沙丘以及和当地广泛分布沙丘保持一致,为区域性沙丘 RD<sup>[35-36]</sup>;颜色从灰白色至较深的红色沙丘之间的淡黄色沙丘,为过渡型沙丘 TD。因此上述沙丘类型在影像上呈现出不同的分布位置和颜色特征,并辅助风沙地貌图、分辨率较高 Google Earth 进行解译,并对解译的结果,结合实地的考察加以修正。相对沙丘斑块提取,河道信息地物波谱特征较明显,可以先进行自动解译,但对于一些干河道或古河道,地物波谱特征不明显,再以目视解译辅助。

## 3 结果

### 3.1 河道与沙丘空间格局

3 个流域不同河段河道形态指数统计结果如表 2 所示。

#### 3.1.1 克里雅河

在克里雅河上游支流河段(图 2A),河流为低弯曲性,弯曲系数为 1.22,河流流向与风向相反,呈钝角相交。近源沙丘分布范围较窄,且主要分布在河流的凸岸边滩处(西岸),呈狭长带状分布,且距离河道宽度不一,从四五十米到一百多米的变化幅度,在东岸的古河道内近源沙丘发育,呈带状延伸,区域沙丘紧邻其分布。

在中下游河段(图 2B),河流的弯曲程度较大,弯曲系数为 2.15,属于高弯曲度河段,河流流向与风向总体相反,不同河曲表现不一。河型变化较大,在河流附近河流摆动的痕迹清晰可见,但摆动的幅度不大,这可能与两岸高大的沙丘阻挡有关。在河

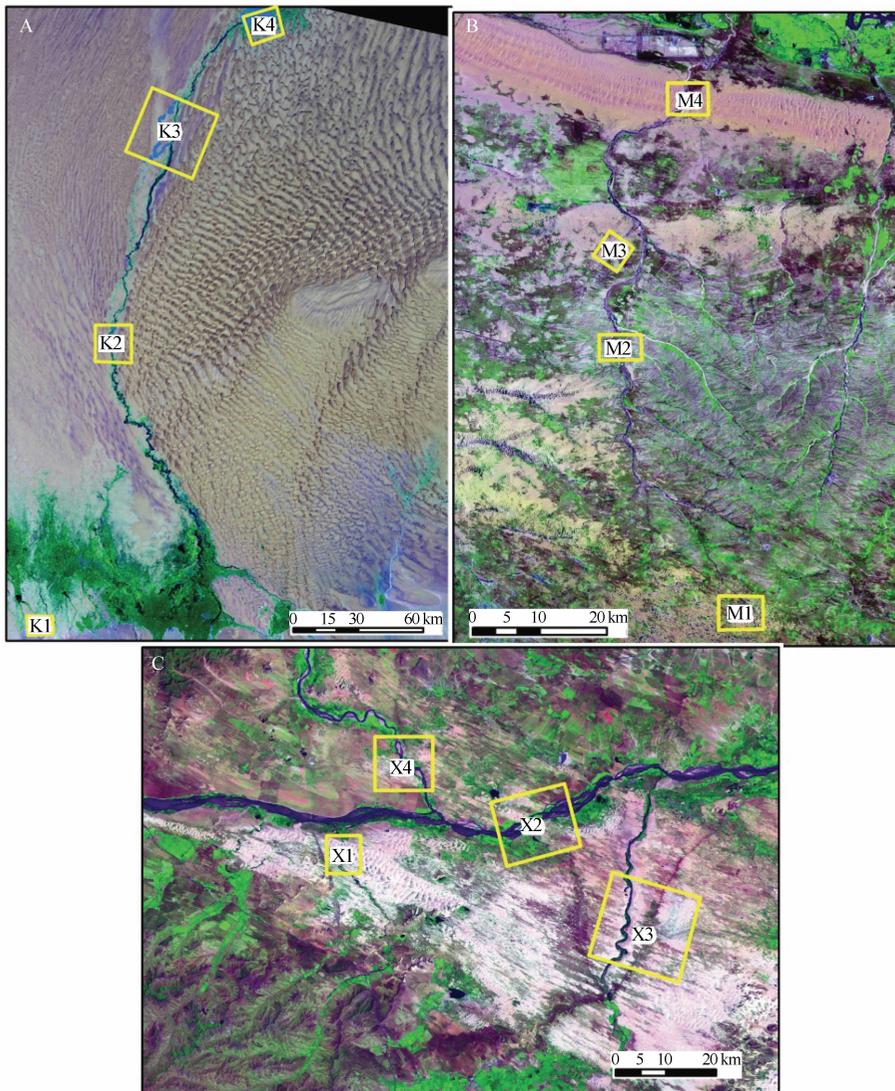


图 1 克里雅河(A)、毛布拉格孔兑(B)、西拉木伦河(C)典型河段位置示意图

Fig. 1 Map showing the location of the typical channels of the Keriya River (A), Mu Bulag River (B), and Xar Moron River (C)

表 1 依据弯曲度和辫指数的河型分类<sup>[30]</sup>

Table 1 Channel classification according to the sinuosity and braiding parameter<sup>[30]</sup>

弯曲度	单河道(辫指数<1)	多河道(辫指数>1)
<1.5	单河道低弯度河(顺直河)	多河道低弯度河(辫状河)
>1.5	单河道高弯度河(曲流河)	多河道高弯度河(网状河)

表 2 不同河段河道形态参数

Table 2 Morphological parameters of channels of different rivers

流域	河段	河道长度/km	直线距离/km	河流弯曲系数
克里雅河	K1	3.132	2.577	1.215
	K2	22.726	10.597	2.145
	K3	22.728	19.511	1.165
	K4	18.672	11.049	1.690
毛布拉格孔兑	M1	12.632	7.340	1.721
	M2	10.706	9.097	1.177
	M3	4.664	3.514	1.327
	M4	5.213	4.409	1.182
西拉木伦河	X1	9.154	4.370	2.095
	X2	7.255	5.216	1.391
	X3	8.695	5.628	1.545
	X4	12.412	11.224	1.106

流两岸凸岸边滩近源沙丘呈间隔式对称分布,但东岸较西岸规模大,且东岸近源沙丘在偏西风作用下不断向阶地延伸,形成近源沙丘、过渡型沙丘以及区域沙丘依次带状镶嵌分布。凹岸则多为区域型大沙丘紧逼河道,风季沙丘沙会蔓延至河床,形成满床皆沙,在风力作用下河床上会形成锥形的新月形沙丘或沙丘链,雨季则被流水削平。

在下游河段(图2C),河流摆动幅度加大,西岸

明显有高弯曲度的古河道分布,与现代河道距离在 1~3 km,这可能与沙丘向东移动,迫使河流向东改道有关<sup>[25]</sup>。现代的河道较顺直,弯曲系数为 1.17,风向与流向相反,呈钝角分布。沙丘分布格局为现代河流凸岸边滩和沿古河道附近有近源沙丘分布,前者呈斑块状,后者呈带状分布。现代河道的凹岸为区域性沙丘逼近河道分布,而古河道两侧依次有

近源沙丘、过渡型沙丘和区域沙丘镶嵌河岸分布。

在河流尾间段(图 2D),水流呈漫流状,支流相通,形成网格状河道特征,河道弯曲度较大,平均弯曲系数为 1.69。河流沿着高大垄状沙丘的丘间地蔓延,区域沙丘呈格状镶嵌在河漫滩之间,滩地植被分布状况较好,近源沙丘因缺乏发育空间而呈狭窄带状环绕在河流岸边。

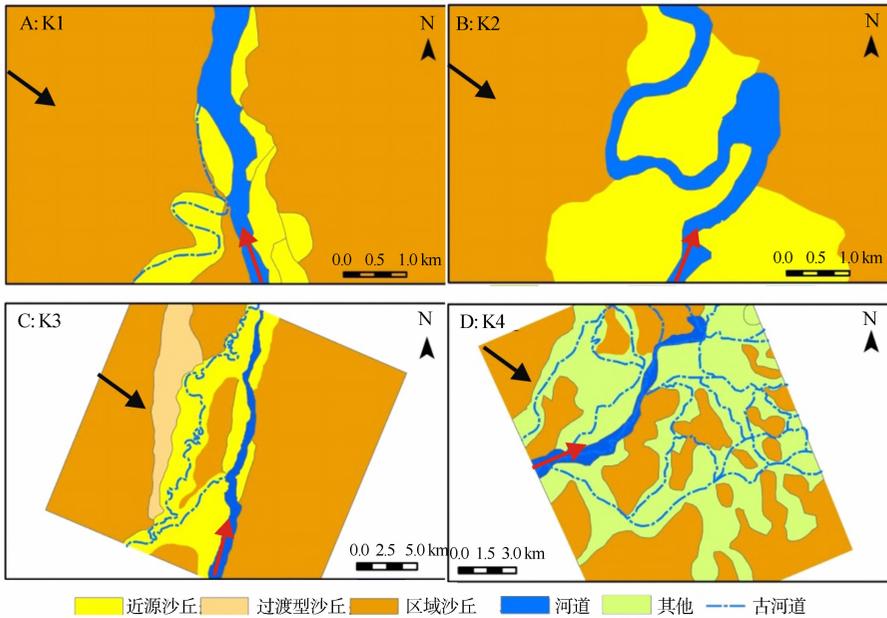


图 2 克里雅河河道与沙丘分布格局(黑色箭头为主风向,红色箭头为流向)

Fig. 2 Distribution pattern of sand dunes and channels in the Keriya River

### 3.1.2 毛布拉格孔兑

在毛布拉格孔兑河源(图 3A),为古湖盆,沙地

遍布,清晰可见古河道交织密布,呈网状分布,湖泊星罗棋布,河流蜿蜒在丘间低地,河流平均弯曲系数

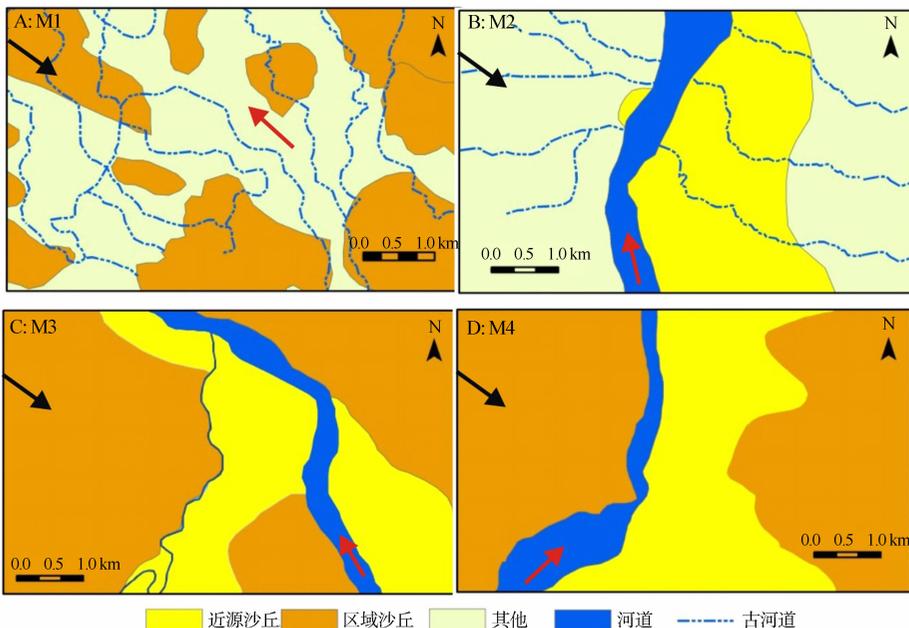


图 3 毛布拉格孔兑河道与沙丘分布格局(黑色箭头为主风向,红色箭头为流向)

Fig. 3 Distribution pattern of sand dunes and channels in the Mu Bulag River

在 1.72。由于河流附近水分充足, 植被分布较好, 区域型流动沙丘呈斑块状镶嵌在滩地之中。沙丘多由古湖盆沉积的第四纪松散沉积物就地起砂形成, 现代河流提供物源较少, 近源沙丘沿支流呈狭长状镶嵌在干河沟之间, 近源沙丘规模较小, 较小仅有十几米宽度。

上游河段为冲沟-河谷系统(图 3B), 河谷沟深坡陡, 河道较为顺直, 两岸为不对称深切冲沟, 河流流向与风向近乎垂直。河流东岸的凸岸边滩, 来自于干流和冲沟携带的松散沉积物, 沙源丰富, 加上河漫滩地形开阔, 近源沙丘大量发育, 沿边滩呈带状分布。西岸支流相对较为短小, 凹岸掏蚀, 河谷陡深, 支流携带沙源进入河床, 近源沙丘难以发育。

在中下游河段(图 3C), 河流变弯曲, 弯曲系数为 1.33, 河流流向与风向近乎相反。东岸凸岸泥沙沉积, 在下风方向形成近源沙丘, 向阶地延伸与区域沙丘紧邻, 凹岸为区域沙丘紧逼河道。西岸区域性沙丘紧逼河道, 但在支流入口处, 大量泥沙沉积, 近源沙丘发育, 镶嵌在两河交汇处。支流流向与风向垂直, 北岸区域沙丘紧逼河道, 南岸近源沙丘呈带状沿河分布, 与阶地区域沙丘相连。

在下游干河道(图 3D), 河流穿越流沙区; 河道此河段弯曲系数为 1.18, 河流流向与风向相反, 呈钝角相交。同样在河流西岸, 高大的垄状区域沙丘紧逼河道, 风季时, 高大流动沙丘在偏西风作用下, 向河床延伸, 呈现出沙丘翼角伸入河道, 雨季, 洪水冲开沙丘, 将大量沙丘沙带入河中, 在下一个凸岸堆积, 为近源沙丘发育提供物源。

### 3.1.3 西拉木伦河

西拉木伦河上游河段, 河道蜿蜒曲折, 河身宽窄相间呈藕节状, 游荡型河段, 河型不稳定, 在窄段, 水流平顺, 单一河道。在宽段, 河身宽浅, 河床冲淤变化迅速, 主流摆动不定, 形成分汊河道。两岸沙丘分布格局较为稳定, 北岸为固定的古沙丘分布, 南岸为流动沙丘。其中以南岸的现代流沙与河道作用比较活跃<sup>[37-38]</sup>。从南岸流沙区依稀可见多条古河道痕迹, 并显示自南向北曾穿越流沙区汇入干流, 仅有个别河流目前还有长流水。如图 4A 所示支流(仗房河), 水流蜿蜒曲折, 河道弯曲度较大, 弯曲系数为 2.10, 河流流向与风向近乎相反。在穿过流沙区, 部分河段被区域沙丘掩埋, 河流作用微弱, 近源沙丘发育受限, 两岸为区域沙丘逼近河道。

下游的南岸支流(响水河)(图 4C), 两岸沙地多为固定、半固定沙丘, 河道与两岸的沙丘均处于相对

稳定状态。河道有长流水, 河道较为弯曲, 河流的弯曲系数为 1.55, 河流流向与风向近乎相反。在河道右侧分布有古河道, 表明河流曾向东摆动至现在位置。古河道的西侧为区域沙丘逼近河道, 东侧有近源沙丘发育。现代河道的东岸近源沙丘呈带状分布, 其边界形态和河曲一致, 且近源沙丘在风力作用下不断向阶地延伸, 和阶地上的区域沙丘相连。西岸近源沙丘呈斑块状分布在凸岸边滩, 呈不连续分布。

北岸支流(查干木伦河)(图 4D), 有长流水存在, 河道有明显的分汊, 属于分汊型河道, 河道弯曲度为 1.11, 河流流向和风向一致, 呈锐角分布。在两分汊河道之间的江心洲, 以及河道的狭窄处或弯度较大的凸岸, 近源沙丘发育, 且东岸分布较西岸要宽。

在河流下游(图 4B), 地形变得更加平坦, 水流呈分散状, 在两股较大的水流之间形成“心滩”式近源沙丘, 且在现代河道与古河道之间, 规模较大的近源沙丘呈片状分布。

## 3.2 河道与沙丘空间格局分类

综合 3 条河流不同河段的沙丘分布格局, 可以将河道与沙丘景观格局划分成以下 4 种类型:

### 3.2.1 弯曲河道一对称式(交错)边滩沙丘

沙漠中弯曲型河道较为常见, 这是由于河流自上游进入下游沙漠段时, 随河谷比降骤减, 水流变缓, 河流携带大量的松散物以堆积作用为主, 加上两岸松散堆积物对河流横向摆动的约束作用较小, 河曲在很大程度上可以自由发展。因此, 河流弯曲程度较大, 弯曲系数多在 1.5 以上, 形成凸、凹相间的边滩和深槽的河道形态。河流流向与风向的夹角在不同河曲表现不一, 相应两岸沙丘呈不同形态分布, 河流凸岸以堆积为主, 在较宽阔的河漫滩发育一系列的新月形沙丘或沙丘链, 在物源充足情况下, 沙丘不断向阶地延伸, 与阶地上区域沙丘相连, 距河道依次为近源沙丘、过渡型沙丘、区域沙丘, 呈裙摆式镶嵌在河岸边, 沙丘类型之间的界限较明显, 并与河曲的弧形保持一致; 在河流凹岸, 由于流水摆动和掏蚀作用, 阶地区域型沙丘紧逼河道, 在风力作用下, 阶地的流沙可能不断沿坡向河床延伸, 形成沙丘翼角伸入河床。如克里雅河中游河段(图 2B)、毛布拉克孔兑中游河段(图 3C)和西拉木伦河上游支流段(图 4A)、中游干流(图 4B)、下游支流段(图 4C)。

### 3.2.2 顺直河道一边滩沙丘

顺直河道相对弯曲型河道较平直, 随着河床比降的减小将会向弯曲河型发展。顺直河流是冲积河

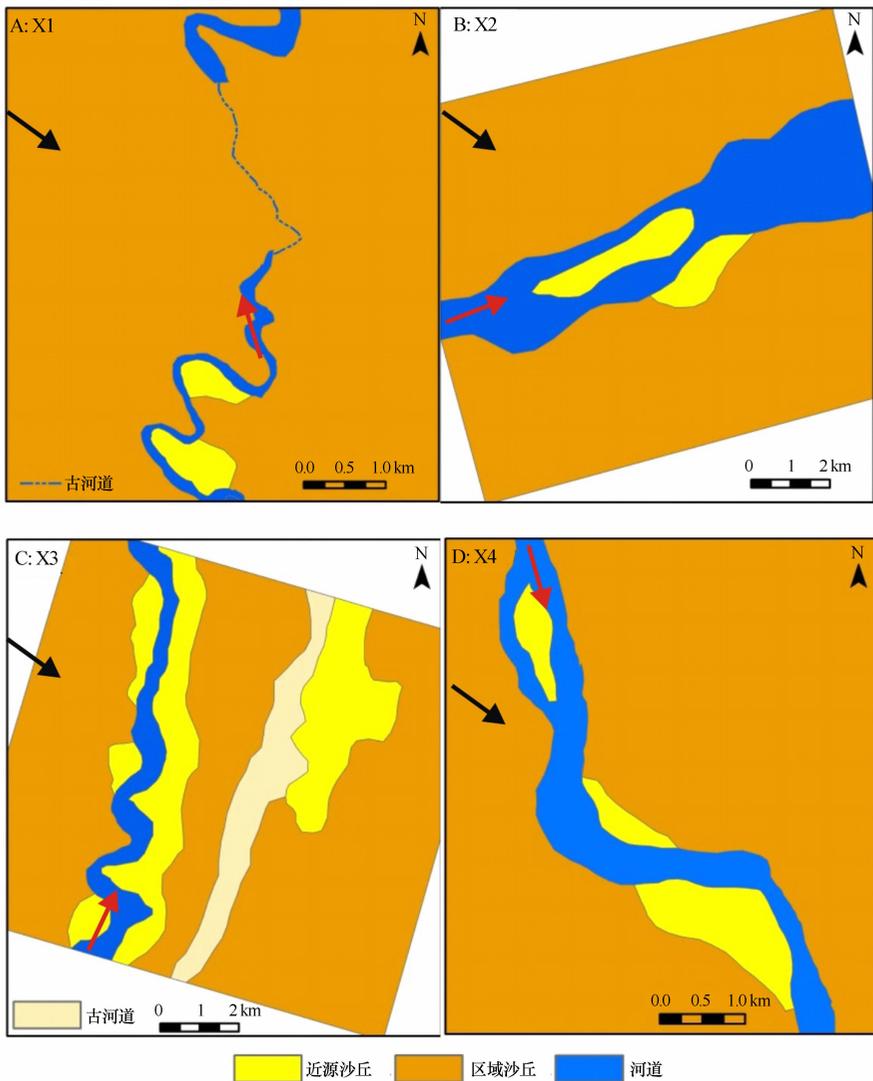


图4 西拉木伦河河道与沙丘分布格局(黑色箭头为主风向,红色箭头为流向)

Fig. 4 Distribution pattern of sand dunes and channels in the Xar Moron River

流在一定条件下或一定发展过程中暂时存在的形态<sup>[39]</sup>,河流两岸形成交错边滩。这种河型的形成一般与河岸带的植被发育程度密切相关,植被越发育,就越易形成顺直河流<sup>[39-40]</sup>。在其河流两岸多分布有固定、半固定区域型沙丘,沙源不足,发育空间有限,近源沙丘较难发育,一般在河流由宽变窄处或在有支流汇入处,沙源较多,在迎风岸的边滩形成斑块状的近源沙丘,如克里雅河上游河段(图2A)和下游河段(图2C)、毛布拉格孔兑中游河段(图3B)和下游河段(图3D)以及西拉木伦河中游主河道(图4B)。

### 3.2.3 分汊河道—江心洲沙丘

分汊河流的河道平面形态主要表现为单河道段和多河道段的交替分布,由单一河道向多河道转折时,河道中水流的流速大幅度降低,高含沙水流沉

积,在宽浅的两股河道中间会形成江心洲<sup>[41-42]</sup>。江心洲沙源在风力作用下发育形成雏形新月形沙丘<sup>[43]</sup>,随河流流向与风向的不同,近源沙丘形态和延伸方向不同。洪水期,水流会带走部分的沙物质,沙丘形态和规模发生改变,下一个枯水期再次沉积,不断往复循环。因此这种近源沙丘规模较小,很不稳定,除非发生河流袭夺或改道,原河道废弃,沙源不断累积,发育成较大的沙丘或沙丘链,如西拉木伦河的下游河段(图4B)及其支流(图4D)。

### 3.2.4 网状河道—格状镶嵌式沙丘

网状河流是由发育植被的河间地分开的、比降较小、中等弯曲、相互连通的河道组成的稳定的多河道体系<sup>[44]</sup>。网状河流的河间地是从连续的泛滥平原上切割形成的,其规模远大于河道的尺寸<sup>[45]</sup>。对于沙漠中河流,一般分布在河流源头和河流尾间三

角洲,河道分别呈辐合状和放射状漫流,前者如毛布拉格孔兑河源段(图3A),后者如克里雅河尾间段(图2D),河道沿着区域沙丘的丘间低地蜿蜒漫流,形成一种沙丘、河湖镶嵌的格局。由于发育空间的限制,近源沙丘则镶嵌河道边缘分布,呈狭窄的环状分布。由于丘间低地水源充足,植被发育较好,更多的近源沙丘被植被所固定,成为灌丛沙堆。这种沙丘与河道交织镶嵌分布格局相对较为稳定,与稳定的沙源供给和稳定的河道系统有关。

## 4 讨论

不同的流域水系特征不同,除地质构造因素之外,气候是影响其形态的重要因素之一。不同的气候条件下发育着不同流域水系与沙丘景观,且呈现出水系与沙丘景观彼此相适应的分布格局<sup>[46]</sup>。其中克里雅河以高弯曲河型穿越流沙区为特点,西拉木伦河以多条分汊河道漫流固定、半固定沙丘分布区,毛布拉格孔兑兼有上述两种特点。

3个流域均存在明显的风季和洪水期,河流提供物源以及动力条件存在明显的季节性,河道两岸近源沙丘在形态和规模上也相应发生变化。但在洪水期不同河流挟沙能力不同,克里雅河洪水期时挟沙具有“多来多积”的特点,为河流两岸沙丘形成提供丰富的物源,近源沙丘发育比较充分;毛布拉格孔兑洪水期时挟沙具有“多来多排”的特点,大量泥沙输入黄河,为两岸沙丘发育提供物源有限,限制了近源沙丘发育的程度与规模;西拉木伦河同样属于外流河,大量泥沙汇入辽河,为两岸沙丘发育提供物源较少。因此前者以规模较大边滩式近源沙丘分布比较普遍,后两者以江心洲式近源沙丘分布较多,边滩沙丘分布规模相对较小。

同一河流不同河段的河型以及沙丘分布也不尽相同,克里雅河上游河段相对较为顺直,近源沙丘发育与形成受空间场所限制,呈斑块状镶嵌分布,下游河段河流弯曲度较大,边滩—近源沙丘和深槽—区域沙丘交错分布比较明显,下游尾间段,现代河道与古河道纵横交错,高大沙丘镶嵌分布;毛布拉格孔兑上游河段和克里雅河下游尾间段很相似,中下游穿越流沙区,沙丘逼近河道成为普遍现象;西拉木伦河上、中、下游河道呈藕节状交替分布,在宽谷段,分汊河道形成江心洲式沙丘分布,窄段以及支流汇入处形成斑块状边滩近源沙丘分布。

同一河段不同河岸、风向与流向关系、支流汇入等不同,沙丘分布格局不同。一般凹岸为区域沙丘

紧逼河道,凸岸可能形成近源沙丘,且位于盛行风下风地带的凸岸近源沙丘分布较迎风岸规模大。下风向的凹岸区域沙丘易塌陷形成泻溜卷入河床,迎风岸则沙丘顺风不断蔓延,形成翼角伸入河床。河流流向与风向关系不同,沙丘发育和风沙入河的方式也不同,一般来说平行于河谷的分向量气流控制着河道沙丘的形态,垂直于河谷的分向量气流控制着河道沙丘向谷坡阶地的延伸方向,即河流流向与风向保持一致或夹角成锐角、钝角时,会促使边滩近源沙丘的形成与发展,紧逼河道阶地区域沙丘沙则不易进入河床;风向与流向垂直,促使一侧边滩近源沙丘不断朝阶地延伸,与阶地区域沙丘相连,另一侧阶地区域沙丘则可能侵入、阻塞河道。

近源沙丘、过渡性沙丘以及区域沙丘的沙丘类型划分,与已有的沙丘分类<sup>[16]</sup>有一定的关联,如Breed等<sup>[47]</sup>从形态学角度提出将沙丘分成简单型沙丘(singler dunes)、复合型沙丘(compound dunes)和复杂型或综合型(complex dunes)三大类,与河道毗邻的沙丘多为简单型的新月形沙丘、鱼鳞状沙丘等,而位于高阶地上多为复合型垄状沙丘和沙丘链以及沙山或者叠加而成的复杂型沙丘,且随距离河道越远,沙丘变得越复杂,与近源沙丘、过渡型沙丘以及区域型沙丘分布格局有着较好的对应关系。系统融合上述两种沙丘分类体系,对于揭示沙丘复杂性与下伏地形之间的关系,构建以发育空间(下伏地形骨架)为主导因素的河谷沙丘分类体系至关重要。

## 5 结论

弯曲型河道、顺直河道以及分汊河道等不同河型,河岸沙丘分布格局迥异;同样随河流流向与风向夹角的不同,河岸沙丘分布、形态、规模以及延伸方向也不同。一般位于河漫滩沙丘为简单的新月形沙丘为主,高阶地为高阶地上多为复合型垄状沙丘、沙丘链以及沙山叠加而成的复杂型沙丘。

河道—沙丘尺度上,初步划分出不同河型下沙丘分布模式,即弯曲河道—对称式(交错)边滩沙丘、顺直河道—边滩沙丘、分汊河道—心滩式沙丘、网状河道—格状镶嵌式沙丘4种类型。

### 参考文献:

- [1] 董治宝,屈建军,钱广强,等.库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J].中国沙漠,2010,31(4):805-814.
- [2] 师长兴,许炯心,蔡强国,等.地貌过程研究回顾与展望[J].地理研究,2010,29(9):1546-1560.
- [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.

- [4] Kirkby M J. The stream head as a significant geomorphic threshold[D]. Leeds, UK: University of Leeds, 1978.
- [5] 史培军, 王静爱. 论风水两相作用地貌的特征及其发育过程[J]. 内蒙古林学院学报, 1986, 8(2): 88—97.
- [6] Liu B L, Coulthard T J. Mapping the interactions between rivers and sand dunes; implications for fluvial and aeolian geomorphology[J]. *Geomorphology*, 2015, 231: 246—257.
- [7] Al-Masrahy M A, Mountney N P. A classification scheme for fluvial-aeolian system interaction in desert-margin settings[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 67—88.
- [8] Langford R P, Chan M A. Fluvial-aeolian interactions: part II, ancient systems[J]. *Sedimentology*, 1989, 36: 1037—1051.
- [9] Bullard J E, Nash D J. Valley-marginal sand dunes in the south-west Kalahari: their nature, classification and possible origins[J]. *Journal of Arid Environment*, 2000, 45: 369—38.
- [10] 李森, 董光荣, 申建友, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌形成机制与发育模式[J]. 中国科学: D辑, 1999, 29(1): 91—95.
- [11] 马玉凤, 严平, 张登山. 基于 GIS 的青海共和盆地风水交互侵蚀格局初析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 152—156.
- [12] 李小妹, 严平. 中国北方地区沙漠与河流景观格局[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1198—1208.
- [13] 李小妹. 中国北方典型流域沙漠与河流交互关系及其表现[D]. 北京: 北京师范大学, 2015.
- [14] Page K J. Australian landform example No. 20. Riverine source bordering sand dune[J]. *Australian Geographer*, 1971, 11: 603—605.
- [15] Page K J, Dare-Edwards A J, Owens J W, et al. TL chronology and stratigraphy of riverine source bordering sand dunes near Wagga Wagga, New South Wales, Australia[J]. *Quaternary International*, 2001, 85: 187—193.
- [16] Bullard J E, McTainsh, G H. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments; examples, concepts and Australia case study[J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27: 471—501.
- [17] Ivester A H, Leigh D S. Riverine dunes on the coastal plain of Georgia, USA[J]. *Geomorphology*, 2003, 51: 289—311.
- [18] Wasson R J, Hyde R. Factors determining desert dune type[J]. *Nature*, 1983, 304: 337—339.
- [19] Livingstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology: An Introduction[M]. Essex, UK: Addison Wesley Longman Limited, 1996.
- [20] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 17—24.
- [21] Wopfner H, Twidale C R. Formation and age of desert dunes in the Lake Eyre depocentres in central Australia[J]. *Geologische Rundschau*, 1988, 77: 815—834.
- [22] Goudie A S. Encyclopedia of Geomorphology (Volume 1) [M]. London, UK: Routledge Ltd, 2004.
- [23] Maroulis J C, Nanson G C, Price D M, et al. Aeolian-fluvial interaction and climate change: source-bordering dune development over the past ~ 100 ka on Cooper Creek, central Australia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26: 386—404.
- [24] 新疆克里雅河及塔克拉玛干科学探险考察队. 克里雅河及塔克拉玛干科学探险考察报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.
- [25] Yang X P, Zhu Z D, Jaekel D. Quaternary palaeoenvironment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China; the relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in foreland desert regions[J]. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 155—166.
- [26] 许林军, 杨亚娟, 朱莉莉, 等. 毛不拉孔兑水土流失特征与防治布局[J]. 水土保持应用技术, 2011(6): 32—34.
- [27] 许炳心. 黄河内蒙古古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1641—1649.
- [28] 杨文斌, 林凤友, 樊忠成. 西拉木伦河流域防洪治理工程水土保持措施探讨[J]. 内蒙古水利, 2014(2): 79—80.
- [29] Han G, Zhang G F, Dong Y X. A model for the active origin and development of source-bordering dunefields on a semiarid fluvial plain: a case study from the Xiliaohe Plain, Northeast China[J]. *Geomorphology*, 2007, 86: 512—524.
- [30] Rust B R. A classification of alluvial channel systems[M]// Miall A D. *Fluvial Sedimentology*. Eenvr, USA: Stacs Data Service Ltd, 1978: 187—198.
- [31] Nanson G C, Chen X Y, Price D M. Aeolian and fluvial evidence of changing climate and wind patterns during the past 100 ka in the western Simpson Desert, Australia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 113: 87—102.
- [32] Lancaster N. Control of eolian dune size and spacing[J]. *Geology*, 1988, 16: 972—997.
- [33] Twidale C R, Wopfner H. Dune fields[M]// Tyler M J, Twidale C R, Davies M, et al. *Natural History of the North East Deserts*. Adelaide, Australia: Royal Society of South Australia, 1990: 45—60.
- [34] Bullard J E, Nash D J. Linear dune pattern variability in the vicinity of dry valleys in the southwest Kalahari[J]. *Geomorphology*, 1998, 23(1): 35—54.
- [35] Han G, Zhang G F, You, Li, et al. Deflated rims along the Xiangshui River on the Xiliaohe Plain, Northeast China: a case of active fluvial-aeolian interactions [J]. *Geomorphology*, 2016, 257: 47—56.
- [36] 王勇, 韩广, 杨林, 等. 响水河中游右岸沙丘群粒度分布特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 26—32.
- [37] 韩广, 张桂芳. 河流演变在科尔沁沙地形成和演化中的作用初探——以科尔沁沙地南部教来河中游沙地为例[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 130—133.
- [38] 秦小光, 刘嘉麒, 裴善文, 等. 科尔沁沙地及其古水文网的演化变迁[J]. 第四纪研究, 2010, 31(1): 80—95.
- [39] 倪晋仁, 王随继. 论顺直河流[J]. 水利学报, 2000(12): 14—20.
- [40] Begin Z B. The relationship between flow-shear stress and stream pattern[J]. *Journal of Hydrology*, 1981, 52: 307—319.
- [41] 王随继, 倪晋仁, 王光谦. 古河型演化模式及其影响因素的沉

积体系分析[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 102—105.

[42] 王随继. 两类多河道河流的形成模式及河道稳定性比较[J]. 地球学报, 2002, 23(1): 89—93.

[43] Zhou N, Zhang C L, Wu X X, et al. The geomorphology and evolution of aeolian landforms within a river valley in a semi-humid environment; a case study from Mainling Valley, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geomorphology*, 2014, 224: 27—38.

[44] Smith D G, Smith N D. Sedimentation in anastomosed river systems; examples from alluvial valleys near Banff, Alberta [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1980, 50: 157—164.

[45] Knighton A D, Nanson G C. Anastomosis and the continuum of channel pattern [J]. *Earth Surface and Processes Landforms*, 1993, 18: 613—625.

[46] 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.

[47] Breed C S, Fryberger S G, Andrews S, et al. Regional studies of sand seas using Landsat (ERTS) imagery[M]//Mckee E D. *A Study of Global Sand Seas*, 1979: 305—397.

## Distribution Patterns and Its Classification at the Scale of Channel-Sand Dune in Different Climate Zones

Li Xiaomei<sup>1,2</sup>, Yan Ping<sup>2</sup>, Qian Yao<sup>2</sup>, Wu Wei<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management/State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Aeolian-fluvial interaction is a common landform phenomenon and an important earth surface process in the arid regions. The rivers in the arid regions significantly influence the form and distribution of the sand dunes by providing sediments and accommodation. In return, the distributions of the sand dunes and the sand activities have restricted the growth of the river channel and the transportation of the sediment in different temporal-spatial scale. However, the research on the classification system of aeolian-fluvial interaction has not been formed in the exploration stage, especially in the landscape pattern classification on qualitative description. This research selected the main river basins and deserts in the northern China, including the three typical river basins, the Keriya River in the west, the Mu Bulag River in the middle and the Xar Moron River in the east of the northern China to observe such interactions between fluvial and aeolian system. By employing the knowledge and methods of geomorphology and landscape ecology based on the data of remote sensing, this thesis provides a comprehensive understanding of the landscape distribution pattern between river channel and sand dunes. Furthermore, the types of the interactions between sand dunes and rivers are classified. The main results show that at the scale of channel—sand dune, the distribution patterns of sand dunes and rivers was divide as four types, meandering channel—symmetrical interleaving dunes, straight channel—riverside dunes, anabranches channel—river-island dunes and anastomosing channel—grid-like dunes.

**Key words:** river channel; sand dune; aeolian-fluvial interaction; spatial distribution pattern; classification