

周畅,杨林海.雅鲁藏布江河谷爬坡沙丘研究进展[J].中国沙漠,2026,46(4):120-134.

雅鲁藏布江河谷爬坡沙丘研究进展

周 畅,杨林海

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院/钱学森沙产业陕西省高等学校重点实验室,陕西 西安 710119)

摘要:雅鲁藏布江(简称雅江)河谷作为全球高海拔河流-风沙系统分布区,风沙地貌普遍发育且十分典型,其中以发育在谷坡上的爬坡沙丘最具特色。爬坡沙丘是雅江流域荒漠化景观的重要构成单元,过去相关研究主要在爬坡沙丘的分布与形态、物质组成、动力学及流场特征等方面,对于其物质来源及其与水沙等其他物源的迁移转化过程和较长时间尺度的形成演化过程的研究还比较薄弱。系统的年代学工作是研究沙漠、沙地演化过程以及正确认识沙丘形成发育气候背景的基础。目前雅江流域风成沙的年代数据主要集中在30 ka BP以来,特别是13 ka BP以来,之前的风沙记录存在缺失。雅江流域爬坡沙丘的形成及其演化机制是今后的研究重点,其中,利用有效的钻孔取芯技术,选择多个地点的爬坡沙丘,在其延伸方向和垂直堆积方向上获取高分辨率的年代数据和沉积物指标数据,是重建其形成演化历史的关键。

关键词:雅鲁藏布江河谷;风沙地貌;爬坡沙丘;年代

文章编号:1000-694X(2026)04-120-15

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00284

中图分类号:P931.3

文献标志码:A

0 引言

青藏高原是对全球气候变化响应的敏感地区。独特的地形、气候环境及人类活动,使高原地区荒漠化过程较为复杂^[1-3]。横贯藏南谷地的雅鲁藏布江(简称雅江)是世界海拔最高的大河,河谷内风沙地貌普遍发育且十分典型。雅江河谷内沙丘成群分布,形态复杂,其中以发育在谷坡上的爬坡沙丘最具特色,不仅形态多样,而且爬升高^[4]。雅江河谷作为全球高海拔河流-风沙系统分布区,因生态脆弱性及对全球气候变化的高度敏感性而备受关注^[5]。该区域广泛分布的爬坡沙丘不仅是荒漠化景观的重要构成单元,也是河谷风沙活动的产物,其覆盖山体、埋压植被并威胁着区域内人类的生产和生活空间^[6-7]。

Hack^[8]认为爬坡沙丘是风沙流在遇地形障碍后沿迎风坡堆积的沙粒沉积体,属于地形障碍沙丘。地形障碍沙丘包括回涡沙丘、爬坡沙丘、崖顶沙丘、背风沙丘或风影沙丘、下落沙丘等^[9-11]。20世纪40年代至今,关于爬坡沙丘的研究集中于海岸地区的

南非海岸^[12-14]、中国海南岛西海岸^[15]、西班牙西北部海岸^[16-17]和秘鲁北部海岸^[18]等,干旱与半干旱地区的美国加利福尼亚的莫哈韦沙漠^[19-21]、以色列的内盖夫沙漠^[22]等,高海拔地区的青藏高原的雅江河谷地区^[23-24]等,火星的Valles Marineris地区^[25]等。目前相关研究在海岸带的关注度显著高于干旱区,而针对高原河谷爬坡沙丘的研究仍较为匮乏。风沙地貌是青藏高原传统研究中被忽视的部分^[1],爬坡沙丘不仅是风沙活动的直接产物,更是对雅江河谷区域综合自然过程的响应。因此,研究爬坡沙丘的形成演化过程对于阐释高海拔地区河流-风沙系统的演变机理具有重要价值。

雅江地区是青藏高原南部风成沉积物的典型分布区,目前对于雅江地区爬坡沙丘的相关研究大多关于河谷风沙地貌^[1,6,26-27]、沉积物理化特征^[28-34]、空气动力学特征^[35-36]、形成与演化^[37]等。作为高原河谷风沙地貌系统中发育历史较长、形态结构最为复杂的部分,爬坡沙丘所蕴含的连续古环境代用指标对于重建区域风沙活动历史、完善风沙地貌理论体系具有重要意义。本文试图系统梳理雅江河谷

收稿日期:2025-06-03; 改回日期:2025-12-01

资助项目:国家自然科学基金项目(42271004)

作者简介:周畅(1999—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: zhouchang910@snnu.edu.cn

通信作者:杨林海(E-mail: ylh@snnu.edu.cn)

爬坡沙丘的研究成果,探讨已有研究中存在的问题,旨在为进一步深入全面认识雅江爬坡沙丘提出研究方向上的建议。

1 沙丘分布与形态

雅江位于青藏高原南部(28°00′—31°16′N, 82°01′—97°06′E),发源于日喀则地区仲巴县与阿里地区普兰县交界的杰玛央宗曲^[38]。作为世界海拔最高的大型河流系统,其中国境内干流全长2 057 km,流域面积24.05万 km²^[39],河床平均海拔约4 000 m^[40]。雅江河谷是下切高原面的典型负向地形,其相对切割深度呈现显著的空间分异,上游段0~105 m,至中

游下段可达2 000 m,受构造控制河谷自西向东呈现出宽窄交替的地貌格局^[40-42],这种地形特征直接影响了爬坡沙丘的空间分布模式。河谷内的风积地貌形态多样(图1),宽谷段风成沉积广泛发育,爬坡沙丘呈斑块状分布^[43-45],而在宽谷之间较短的局部峡谷地段,因狭管效应导致风速增强,风沙堆积受限,几乎没有爬坡沙丘。此外,爬坡沙丘的分布还呈现出明显的岸向分异,在加查山以西爬坡沙丘主要发育在北岸,而在加查山以东爬坡沙丘主要发育在南岸。从流域尺度看,风沙地貌的面积和扩张速率自上游向下游呈现递减的趋势,但下游爬坡沙丘的数量较上游更多,这一空间规律与河谷地形、水汽输送和风场特征的系统性变化密切相关。

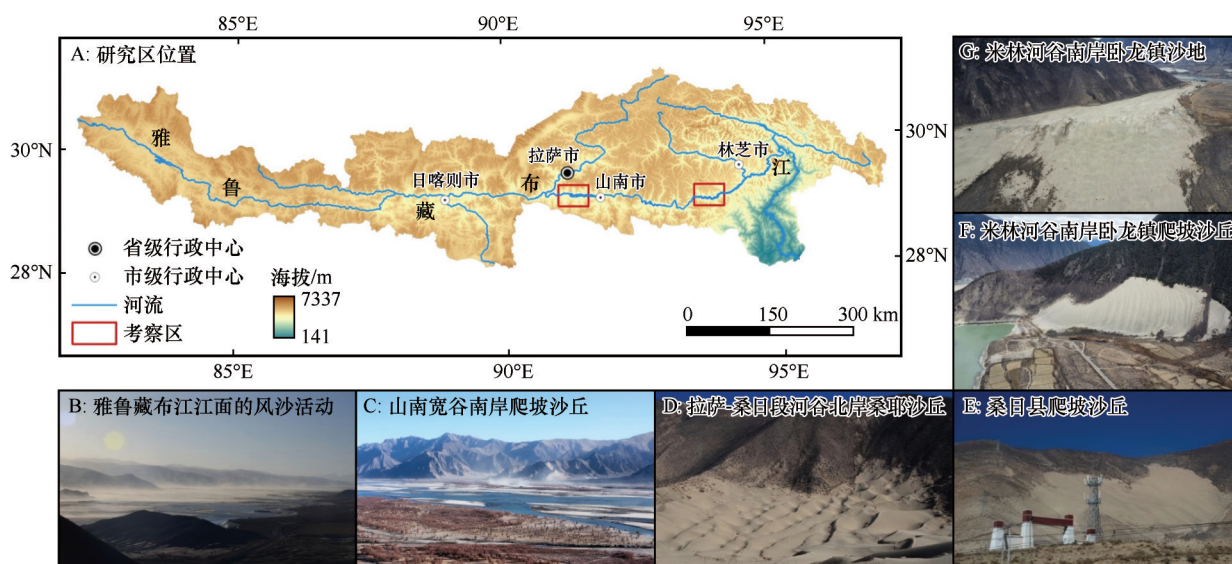


图1 研究区位置及雅鲁藏布江河谷内的风沙地貌景观

Fig.1 The location of research area and aeolian landforms in Yarlung Zangbo River Valley

青藏高原河谷地区的爬坡沙丘面积占青藏高原爬坡沙丘总面积的12.6%^[6],其中雅江河谷内谷坡风积地貌的面积约为240 km²,谷底风积地貌的面积约为1 680 km²^[4]。爬坡沙丘沿河谷横向分布,规模差异显著,长度35~1 800 m,宽度15~1 600 m,垂直方向上平均攀爬高度达191 m,最大和最小攀爬高度分别为1 416 m和3 m;水平延伸方面观察到的最大爬升距离达6 km^[46]。根据李森等^[23]提出的河谷风沙地貌发育模式,爬坡沙丘从河漫滩等河谷平地的初级区,到低河流阶地的主体区,最终延伸至高阶地、冲积扇和谷坡后逐渐消亡,这一演化模式最终形成雅江河谷特有的风沙-植被景观。爬坡沙丘属于地形障碍类沙丘,Rowell等^[47]认为其形态分类需要考虑沙丘规模、与山坡的连接关系、表面特

征及次生沙丘发育状况等多重要素;Zhou等^[48]认为风沙地貌沿雅江流域呈不连续分布,并在米林段划分了3类风沙带;Dong等^[6]提出了青藏高原地区爬坡沙丘的系统分类模式。上述研究为受地形控制的爬坡沙丘形态分类提供了借鉴,但在实际的面积统计中,爬坡沙丘往往与山前较为平缓区域内堆积的沙丘相连,其边界的界定仍较为模糊。

根据爬坡沙丘的活动状态可将其划分为流动型和固定/半固定型两类,其中流动型爬坡沙丘主要表现为加积和延伸两种动态特征。在形态学特征方面,自谷底向谷坡爬坡沙丘形态愈发复杂^[4],常见的爬坡沙丘有片状、新月形、线形、网格状及不规则状等^[49-50]。在辫状水系发达河段,迎风坡山脚和高阶地多见横向沙丘和线性沙丘,支流汇入口和山体

转向处存在星形以及复合新月形沙丘链等复杂形态。相比之下,分布于植被覆盖良好的斜坡上的爬坡沙丘由于受到地形屏障和植被固定的双重影响,沙丘形态趋于简单,主要表现为沙片、沙坡和新月形等基本形态。

2 沉积物特征

2.1 粒度

沉积物粒度特征是不同沉积条件下多种物源及传输动力的综合反映,是风沙动力学的主要研究内容和风沙地貌研究的关键指标,充分了解雅江流域爬坡沙丘的粒度特征是揭示该区域风沙动力学过程的第一步^[51-53]。根据雅江河谷典型爬坡沙丘的研究,沉积物粒度特征在流域尺度上并无统一的空间变化规律,山南宽谷朗赛岭的爬坡沙丘表层沉积物以细砂(49.48%)和中砂(42.32%)为主,此处具有爬升潜力的粒径是细砂和中砂,分布表现为单峰型^[54];米林宽谷段卧龙镇河流右岸的爬坡沙丘以细砂(48.23%)和极细砂(43.66%)为主,不含极粗砂,其下部沉积物粒径为三峰特征,最顶部粒径为双峰特征^[30];而米林宽谷段佛掌沙丘上叠置的新月形沙丘以中砂为优势粒组(45.91%),为粗偏的单峰型^[55]。

从整个河谷断面来看,河漫滩、阶地和爬坡沙丘表层的沉积物粒度分布受控于沙源供给和风动力过程。沿河漫滩—阶地—迎风坡—背风坡的横向剖面,粒径呈现细—粗—细—粗的规律性变化。雅江中下游河段发育的3个典型爬坡沙丘(朗赛岭、卧龙镇、佛掌沙丘)均受流域干湿季分明的气候影响,冬春枯水季时大面积出露的河漫滩为沙丘提供了丰富的沙源。尽管河流中游的输沙量较大,但沙丘显著高于河漫滩,且沙物质在风力驱动下从河岸向山谷斜坡移动的分选效率更好^[56],故河流分选作用和河流动力不是引起爬坡沙丘粒度变化的主导因素^[57]。河漫滩、阶地和爬坡沙丘表面的粒径特征具有继承性,阶地沙丘物质主要来源于河漫滩沉积和阶地风蚀产物,在风力的长期筛选下细颗粒被选择性吹蚀,导致阶地沙丘沉积物整体偏粗^[58]。在单个爬坡沙丘尺度上,粒度分布呈现明显的空间分异,从迎风坡坡脚至坡顶沙粒粒径呈递减趋势,3~4 Φ (62.5~125 μm)的沙粒可以通过跃移或悬移的方式沿山体爬升逾百米^[30]。对于爬坡沙丘链,沿输沙

方向丘顶物质的粒径也呈现出逐渐细化的趋势^[19]。

沉积物的粒度特征不仅反映了风对物质的运移和分选,也反映了地形和植被等地表特征对风沙运动的影响。雅江流域的沉积物物源包括风化(残余)来源、湖积(冲积)来源和风成来源^[59-63],沙源是控制爬坡沙丘发育的核心因素。由于受雅江河谷的地形限制,大量由风携带的沉积物堆积在平缓的宽谷河岸^[64-65],因此爬坡沙丘本身离物源很近,且沙脊线的特征也指示雅江南岸与北岸沙粒的运动方向不同。雅江河谷沿岸的沙丘可以同时发育在缓坡地区和陡坡地区,这也证明河谷内的沙丘发育和河岸边坡自身的特点没有必然联系^[62]。总体来说,爬坡沙丘属于近源沙丘,其物源决定了不同区域爬坡沙丘主要粒径组分的差异,而同一爬坡沙丘在不同地貌部位的粒度特征差异应由风力分选所主导。

2.2 地球化学元素及矿物学特征

地球化学特征和矿物学特征是揭示雅江河谷内风沙沉积物质来源及其与河流沉积物等其他物质来源之间迁移转换关系的重要证据,但目前相关研究仍较为薄弱。雅江河谷爬坡沙丘沉积物普遍处于未受化学风化或较弱的化学风化初期,其程度弱于黄土高原的黄土,表层常量元素组成特征基本相似,以Si、Al、Fe、Ca等为主^[66]。常量氧化物以SiO₂(70%)和Al₂O₃(10%)为主,CaO和Fe₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O含量次之,多为1%~4%^[54]。与上陆壳(UCC)相比,除SiO₂有一定富集外,其他氧化物都存在一定的亏损,其中上游马泉河段仲巴附近的亏损程度较高,可能是盛行西风对细颗粒物质不断吹蚀的结果^[67],中下游元素亏损程度相对减弱,这可能是局地物源贡献增强或风力分选效应减弱的结果。

气候环境通过影响沉积物的淋溶和风化强度,从而影响爬坡沙丘沉积物的常量元素氧化物组成,半湿润区爬坡沙丘沉积物中的氧化物以SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃为主,干旱和半干旱区多以SiO₂、Al₂O₃、CaO、Na₂O为主^[68]。这种区域差异反映了气候条件对元素迁移和富集过程的控制作用,其中CaO的富集变异系数最为显著,MgO次之,这主要源于半湿润气候条件下Ca、Fe、Mg等元素在风沙搬运过程中经历的强烈淋溶与富集过程^[69]。爬坡沙丘不同地貌部位的沉积物具有明显的同源性,但常量元素氧

化物的分布受控于粒度分异,其中 SiO_2 在粗颗粒中富集,而 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 在粉砂、黏土中富集^[7]。这种元素-粒度的关系在空间上呈现规律性变化:由河漫滩—阶地—迎风坡—背风坡,粒径呈现细—粗—细—粗的交替分布,故 SiO_2 主要分布在阶地和背风坡等粗颗粒优势区,而 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 主要分布在河漫滩和迎风坡区域^[56]。

雅江爬坡沙丘的矿物学特征研究较少,以日喀则市江当宽谷的风成沙为例^[70],不同地貌部位风成沙的重矿物含量和成分差异明显。河流高阶地沙丘中的重矿物平均含量为1.8%,其主要成分是钛铁矿、石榴子石等稳定矿物,占重矿物的60%;河漫滩、干河床附近的流动沙丘及山地片沙的重矿物平均含量为8%,其主要成分为普通角闪石、辉石和绿帘石等不稳定矿物,占重矿物的66.2%;河漫滩和河流阶地沙丘的重矿物特征与相应部位的河流冲积物类似,主要受附近地表堆积物类型的影响。

因此,雅江不同河段常量元素氧化物含量的空间分异主要受控于物源组成和气候条件的区域差异,而同一爬坡沙丘不同地貌部位的常量元素氧化物含量变化由风动力过程驱动的粒度分异所主导。在未来的工作中应系统研究爬坡沙丘的风成沙和雅江江心滩上的河流沙的地球化学元素特征和矿物学特征^[62],并结合数值模拟等技术手段,定量半定量描述爬坡沙丘风成沙和雅江水沙之间的迁移转换过程。根据已有的粒度、地球化学和矿物学研究结果,基本可以确定的是,雅江河谷地区的风成沉积物主要来源于附近的松散沉积物,而上游河流沉积物的远源传输对下游风成沙的贡献相对有限^[63]。

3 动力学与流场特征

3.1 风动力

雅江自西向东贯穿西藏南部,气候差异显著,上游的马泉河谷为亚寒冷和半干旱气候,中游的山南河谷转变为温带和半干旱季风气候,中下游的米林河谷转变为半湿润季风气候。风对沉积物的侵蚀、搬运、堆积有着重要的作用,副热带西风急流与山谷风环流的叠加风系是雅江河谷风沙地貌形成的主要动力,雅江河谷的粉尘可被风吹扬到1 000 m以上的高度^[71-72]。当风速大于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,马泉河谷段以WSW为主风向,在拉萨河口一带以东转为

NW向,进入山南宽谷后风向辐合,在加查山以东的河段受印度季风的影响出现“东风倒灌”。山南宽谷段以W和S为主风向,SSW和ENE为次风向;在米林宽谷段以SW和SSW为主风向,NE为次风向^[73]。相比拉萨河河谷,雅江河谷与盛行的季风风向平行,受到风力搬运、侵蚀、堆积的影响更为明显。相关研究表明雅江河谷的输沙势具有较强的空间异质性,上游地区表现出典型的高风能环境特征,合成输沙方向为偏NE向,中游地区输沙势季节差异显著,与季风环流转换密切相关,而下游地区则整体表现为中低风能环境,合成输沙方向转向SW向^[74]。对雅江沿岸4 676个沙丘的风向及风况的剖析表明,在宽谷地区(河段宽度 $>2 \text{ km}$),促使沙丘形成的风向与大尺度环流风场合成的输沙方向相符,而较窄河谷(河段宽度 $<1 \text{ km}$)内的沙丘更易受局部地形作用,临近山麓的沙丘易在坡面加速效应影响下形成爬坡沙丘^[62]。

3.2 水动力

雅江河谷受印度夏季风和东亚夏季风的共同影响^[75],流域年降水量的60%~90%发生在6—9月^[76],而爬坡沙丘位于谷坡风水两相作用带,较湿润地区的爬坡沙丘雨季时遭受流水冲刷侵蚀,表层出现沟槽。控制雅江沿岸爬坡沙丘发育的关键因素是沙源供应,其中最重要的因素就是河流沉积物暴露的具体机制^[62]。雅江季节径流量相差悬殊,洪水期河漫滩被淹没,限制了物质向两岸的输移,同时坡麓堆积的泥质坡积物也影响了爬坡沙丘的发育。因此,水力作用是爬坡沙丘消减的逆过程,爬坡沙丘在风动力作用下形成发育,在水动力作用下被改造。现有相关研究提及河漫滩等地貌部位存在风水交互特征^[56],但未系统解释水动力影响爬坡沙丘沙源供给、运移及沉积作用的具体机制,爬坡沙丘形成演化过程中风水动力的协同作用未被量化,还需要更多基于观测数据和数值模拟工作的深入剖析。

3.3 近地表流场特征

爬坡沙丘的形成过程较平坦地表的沙丘更为复杂,近地表流场因不同尺度地形的凹凸起伏和下垫面热力作用发生一系列变化,风携沙失去能量无法越过地形障碍物而发生沉积,从而影响爬坡沙丘

的位置、大小、形状和走向,其沉积环境及形态示意如图2所示。爬坡沙丘上的气流呈现为爬升-环流模式^[15],河谷内近地层气流受到河流弯道、谷坡和岛山阻滞后,形成爬升流和绕流,爬升流与绕流受地形参数(高度、坡度、走向)和气流特性(风速、层

结稳定性)的影响。在爬升流和绕流的作用下,形成了迎风阻滞沉积和弯道绕流沉积^[23]。可将近地层风沙流经过地形障碍物时存在的功能区划分为迎风坡脚低速区、遇阻抬升区、集流加速区、减速沉降区和消散恢复区5个部分^[77-78]。

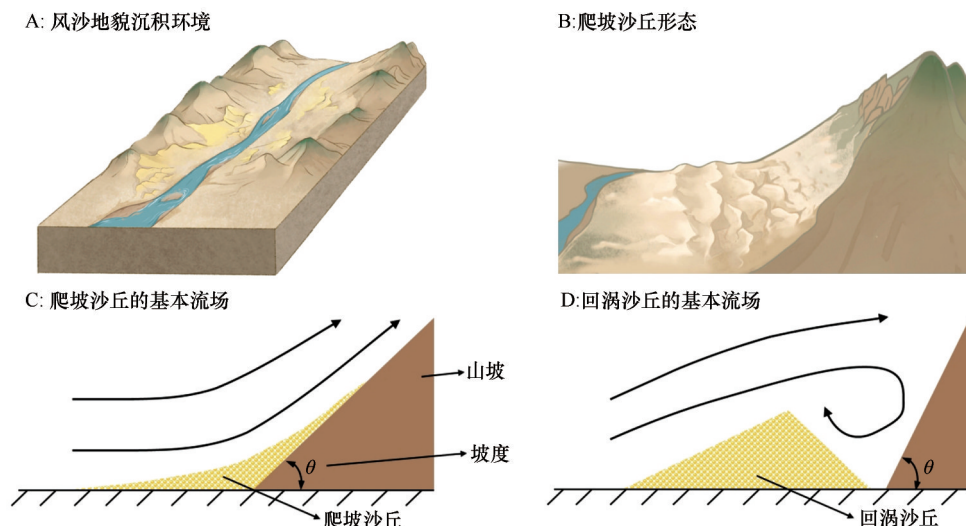


图2 雅鲁藏布江河谷爬坡沙丘形态及形成机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of the morphology and formation mechanism of climbing dunes in Yarlung Zangbo River Valley

雅江河谷中下游风成沉积物的运移方向多变且复杂,与盛行风场的方向差异较大^[79]。这里以米林段典型沙丘为例分析近地表流场特征(图3)。

卧龙爬坡沙丘位于米林段河谷南岸的山体上($29^{\circ}08'29''\text{N}$, $93^{\circ}40'39''\text{E}$),山体坡度约 37° ,海拔 $2\,950\sim 3\,250\text{ m}$,面积约 $3\times 10^5\text{ m}^2$ ^[80]。卧龙沙丘发源于河漫滩,沿NNE-SSW方向堆积在山坡凹陷处,陡峭的山体对河谷风有阻滞和抬升作用,风沙流先在坡前做减速运动,迎风阻滞沉积的风沙作为后续风沙流向上搬运、沉积的“阶梯”,最终在接近休止角的山体上形成长约 $1\,000\text{ m}$ 的爬坡沙丘。卧龙沙丘发育在河流弯道凹岸处,属于弯道绕流的沉积过程,二次流由凹岸向凹形坡扩散并形成了气旋性绕流,气流沿坡面上升并逐渐转变方向,至坡顶时与主流趋于一致,其表面叠加的平行沙垄证明沙丘经历了东北风的上升绕流。

里龙沙丘位于里龙镇西侧的河漫滩和阶地上($29^{\circ}08'01''\text{N}$, $93^{\circ}46'23''\text{E}$),主要发育新月形和复合新月形沙丘,沙丘自东向西延伸并逐渐变高。根据现场观察,雅江南岸的公路位于里龙沙丘和山体之间的低洼处,河谷中垂直于山体的气流速度逐渐变缓并在山体前形成反方向流动的涡旋,最终与河谷中的东南风辐合,形成了高于公路面约 8 m 的回

涡沙丘。

4 年代

研究沙漠和沙地的形成演化首先需要通过适当的测年方法建立年代序列,并与全球气候变化等影响因素相关联,进而探讨沙漠、沙地的形成过程和演化机制。因此,可靠的年代学是研究沙漠、沙地形成演化的基础支撑^[81]。对雅江河谷风沙地貌的测年研究可以追溯到20世纪90年代,古地磁、黄土地层对比、热释光(TL)、光释光(OSL)、常规 ^{14}C 和加速器质谱碳十四(AMS ^{14}C)测年等诸多方法都有应用^[82-83]。中外学者围绕风成沉积物的形成年代取得了较多成果^[84-86],但专门针对爬坡沙丘的年代学研究较少,目前还难以构建完整的年代框架。

雅江河谷风沙地貌自谷底向谷坡演进,且形态愈加复杂,年代逐渐变老。李森等^[4,23]和靳鹤龄等^[37]认为,江心洲和河漫滩上的新月形沙丘、灌丛沙丘形成年龄小于 1 ka ,米林新月形沙丘的 ^{14}C 测年结果为 $0.33\pm 0.1\text{ ka}$;河流阶地上的新月形沙丘链、纵向沙丘、横向沙丘等形成年龄在 10 ka 内;贡嘎曲江大桥西侧流动沙丘冲淤层的测年结果为 $7.83\pm 0.13\text{ ka}$;而谷坡上爬坡沙丘形态复杂,形成年龄较老,其中米林卧龙镇垂直爬升约 200 m 处的爬坡沙丘TL



注：橙色箭头为河谷内风成物质运移方向，蓝色箭头代表近地表气流

图3 雅鲁藏布江河谷米林段的典型沙丘

Fig.3 Typical aeolian dunes in the Mainling valley of Yarlung Zangbo River

年龄为 29 ± 3 ka, 贡嘎多基扎垂直爬升高度约 400 m 处的爬坡沙丘 TL 年龄为 48.7 ± 2.4 ka。雅江河谷地区的风成沙可以提供末次冰期以来的连续古环境信息, Lehmkuhl 等^[87]对波密北部雅江支流河谷的研究表明, 40 cm 厚的风积物与源于念青唐古拉山的冰碛物被一层富含碳酸盐的沉积物隔开, 风积物底部的 TL 年龄为 25.5 ± 4.0 ka。Kaiser 等^[3]对拉萨河谷南部爬坡沙丘的测年结果表明, 末次盛冰期 (Last Glacial Maximum, LGM) 约 10 m 厚的风成沙的沉积速率约为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 其底部的测年结果为 21.3 ± 1.8 ka。Ling 等^[88]指出雅江中上游风沙沉积多集中在晚冰期 (约 14 ka) 以来, 米林段 MLP 剖面 10 m 处的年龄为 6.2 ± 0.5 ka。Pan 等^[89]对定结地区 XL 和 JJ 两个典型风沙沉积剖面进行测年分析, 获得了 12.8 ka 以来该区域风沙活动和气候变化的信息, 并指出在 11.6~9.3 ka 和 2.0 ka 以来风沙活动强烈, 流动沙丘发育。

根据收集的 61 个已发表的风成沙年代数据 (表 1 和图 4), 大多数年代集中在 13 ka 之后 (47 个), 30~13 ka 的年代数据较少 (11 个), 30 ka 之前的年代只有 3 个^[3-4, 23, 37, 83, 88-98]。

现有的年代数据表明, 雅江河谷内的风沙活动至少在晚更新世就存在, 晚冰期以来的风沙活动记录更为广泛, 目前所见的风成沙大多是 13 ka 以来形

成的。雅江中上游地区风沙堆积的时空分布呈现出一定的区域分异特征, 较老的风成沙沉积很少, 大多处于支流阶地等不易侵蚀的地貌部位, 在拉萨河谷、贡嘎多基扎和米林河谷等地区均有所分布。从沙丘保存的角度来看, 最终留存下来的风沙沉积物更可能是堆积于大规模风沙活动的晚期或沙丘开始趋于固定的时期, 而非风沙活动最活跃的时期^[99], Sarnthein^[100]曾提出 LGM 寒冷干旱的气候导致了全球沙漠的扩张, 沙丘在冰期活动而在间冰期相对稳定。但目前雅江流域风成沙的年代数据主要集中在 13 ka 之后, LGM 时期的风沙记录较少, 这可能是因为在 LGM 时期河谷内的风沙沉积流动性较强, 不断历经埋藏和晒退, 也可能是早期的风沙沉积被冰消期增加的地表径流所破坏。

雅江伴随着青藏高原的隆升发生下切, 呈现复杂的河谷地形, 河谷内的风成沉积是地貌发育过程的信息载体。研究表明, 在 80 ka BP 前后, 雅江河谷区域的大气环流格局基本形成, 现代气候特征开始显现^[37]。这一时期, 区域沙地面积显著扩大, 在宽谷段的阶地及山麓地带发育了稳定的黄土堆积和风沙沉积, 这些沉积物为后续沙丘的形成提供了物质来源。雅江宽谷自更新世中期以来有保存完好的冰川堰塞湖沉积记录, 日喀则和贡嘎地区在 32.3~13.2 ka 出现的堰塞湖可能制约了河谷内风成沙丘

表 1 已发表的雅鲁藏布江流域风成沙年代数据
Table 1 Published ages for aeolian sands in the Yarlung Zangbo River Valley

编号	剖面/样品	地理坐标	海拔/m	地貌部位	深度/cm	年代/ka BP	测年方法	参考文献
1	SRP	29°15′N,91°59′E	3 553	河谷山麓	70	0.4±0.1	OSL	[88]
2					140	0.8±0.1		
3					210	1.0±0.1		
4					280	1.1±0.1		
5					350	1.0±0.1		
6					420	1.2±0.1		
7					490	4.1±0.4		
8	MLP	29°07′N,93°46′E	3 004	河谷山麓	650	4.5±0.3	OSL	[89]
9					1 000	6.2±0.5		
10	JJ	28°32′N,87°49′E	4 063	山前坡地	26	0.2±0.11		
11					170	3.7±0.51		
12	XL	28°21′N,87°41′E	4 060	河流阶地	22	0.4±0.05		
13					164	2.4±0.2		
14					248	7.5±0.28		
15	江塘剖面	29°18′N,90°41'E	3 600	河流阶地	125	5.57±0.13	¹⁴ C	[37]
16					209	7.83±0.13		
17	泽当剖面	29°14′N,91°42′E	3 561	河流阶地	630	8.5±0.6	OSL	[90]
18	Cha'er	29°23′N,89°17′E	3 856	河流阶地	65	2.23±0.1	¹⁴ C	[91]
19					363	8.56±0.7	TL	
20					30	1.22±0.08		
21	ZD20	29°14′N,91°42′E	3 559	河谷山麓	80	2.21±0.19	OSL	[92]
22					400	7.67±0.40		
23					450	7.95±0.63		
24					500	8.44±0.51		
25					550	8.60±0.47		
26					600	9.04±0.65		
27					680	9.24±0.47		
28					730	9.85±0.62		
29					780	10.35±0.94		
30					830	10.62±0.70		
31					880	11.35±0.79		
32	Pala	28°18′N,87°25′E	4 325	下沉高地	80	8.6±0.9	OSL	[93]
33					170	11.0±1.2		
34					260	11.0±1.5		
35	ZZ	29°52′N,83°47′E	4 720	河谷山麓	70	0.21±0.08	OSL	[94]
36					240	4.6±0.89		
37					300	23.9±5.4		

续表 1

编号	剖面/样品	地理坐标	海拔/m	地貌部位	深度/cm	年代/ka BP	测年方法	参考文献
38	Section59	30°08′N,95°30′E	3 070	低山山麓	29	25.5±4.0	TL	[87]
39					50	2.9±0.2		
40	STA-1	29°38′N,91°06′E	3 658	河谷山麓	180	4.1±0.4		
41					280	6.7±0.5		
42	QUX1	29°21′N,90°43′E	3 603	河谷山麓	280	8.5±0.7		
43	QUX2	29°21′N,90°45′E	3 536	河流阶地	130	17.2±1.4		
44					70	14.4±1.1		
45	CHI1	29°22′N,90°54′E	3 820	山前坡地	300	19.8±1.9		
46					650	23.9±2.1	OSL	[3,95–97]
47					1000	21.3±1.8		
48					130	7.7±0.8		
49	JIN2	29°26′N,90°54′E	3 597	河谷山麓	250	14.3±1.6		
50					340	18.8±2.0		
51	DRE18	29°40′N,91°03′E	3 707	河谷山麓	330	32.3±3.2		
52	MOG4	29°47′N,91°49′E	3 894	河谷山麓	130	28.2±3.1		
53					350	81±7		
54	米林卧龙	29°08′N,93°40′E	—	山前坡地	—	29±3	TL	[4,23]
55	贡嘎多基扎	29°21′N,91°05′E	—	山前坡地	—	48.7±2.4		
56					340	7.93±0.39		
57	SY	29°16′N,91°28′E	3 568	—	410	10.23±0.64	OSL	[83]
58					480	11.17±0.67		
59					530	10.63±0.68		
60	HZ	29°17′N,91°03′E	3 580	河流阶地	300	9.64±0.50	OSL	[98]
61					325	9.69±0.57		

注：—代表原参考文献中未展示具体数据。

的早期发育与扩张^[101–103]，而进入全新世后，部分因局地环境变化而趋于固定的沙丘，在新的环境驱动下重新活化，形成固定的爬坡沙丘或爬坡沙片。全新世晚期高原南部风成沙活动增强阶段与高原东

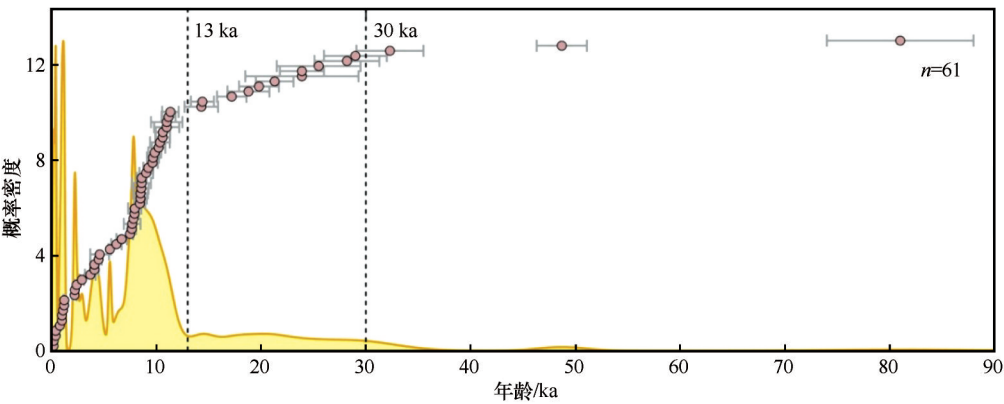


图 4 雅鲁藏布江流域风成沙年代概率密度曲线(数据来自于表 1 中的参考文献)

Fig.4 Probability density of ages from aeolian sands of Yarlung Zangbo River Valley

北部的风成沙活动阶段并不一致,河谷内植被覆盖度变高可能导致这种差异^[61]。约8 ka BP后雅江河谷地区风沙沉积广泛发育也与暖湿的气候背景相悖,这说明其沉积发育过程较平原地区更为复杂,不能直接简单对应干旱气候。目前藏南(含雅江)地区的年代数据不足,区域内沙丘剖面的采样不够系统,需要开展更多工作,增加研究样本,并设置合理的年代样品采样密度,尽可能消除采样策略等人为因素对风沙沉积年龄分布模式的影响^[104]。

5 形成与演化

爬坡沙丘的形成与演化是沙丘形态和近地表气流相互作用的结果^[10,15]。爬坡沙丘的形态特征和发育程度与下垫面坡度、坡形以及风向与坡面的夹角密切相关。当坡度为 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,沙粒在气流作用下沿迎风坡持续堆积,形成典型的“阶梯”;而当坡度超过 60° ,坡前会产生明显的气流回流,形成回涡沙丘,且坡度越陡反向涡旋水平延伸的范围越大^[11]。风向与坡面的夹角显著影响风沙流的爬升能力,夹角增大时携沙能力降低,形成爬坡沙丘的最大临界坡度变小^[105]。从发育过程来看,爬坡沙丘一般先在坡面凹处开始堆积,随着凹地逐渐被填充,沿坡向上的沉积速率会明显减缓,在植被覆盖度较低的区域,发育成熟的爬坡沙丘可以翻越山脊。根据已有的风洞模拟实验结果,当风速为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 25° 和 35° 的迎风坡有利于爬坡沙丘的形成, 8° 和 15° 次之^[106-107]。

在构造和气候尺度上,高原隆升的构造运动导致了雅江独特的高山峡谷景观,约80 ka BP前后大气环流的基本格局奠定,在干冷气候下河谷内出现了较为稳定的黄土堆积和风沙沉积,这些沉积物为爬坡沙丘的发育提供了物质来源^[108]。构造运动使得雅江河谷呈现宽窄交替的地貌格局^[40-42],河谷内复杂的地形和下垫面状况影响了河谷内风成物质的堆积过程。从动力上看,爬坡沙丘位于谷坡风水两相作用带,副热带西风急流与山谷风环流的叠加风系是雅江河谷风沙地貌形成的主要驱动力,爬坡沙丘在风动力作用下形成发育,在水动力作用下被改造^[23]。从区域环境尺度来说,爬坡沙丘的发育是局部地形、风况和植被覆盖等共同作用的结果,河谷内的爬坡沙丘可能对应着河谷弯曲、山谷焚风、冰川风等自然因素^[85]。通常风成沉积指示着气候的干旱性,但米林卧龙地区年降水量超过600 mm,

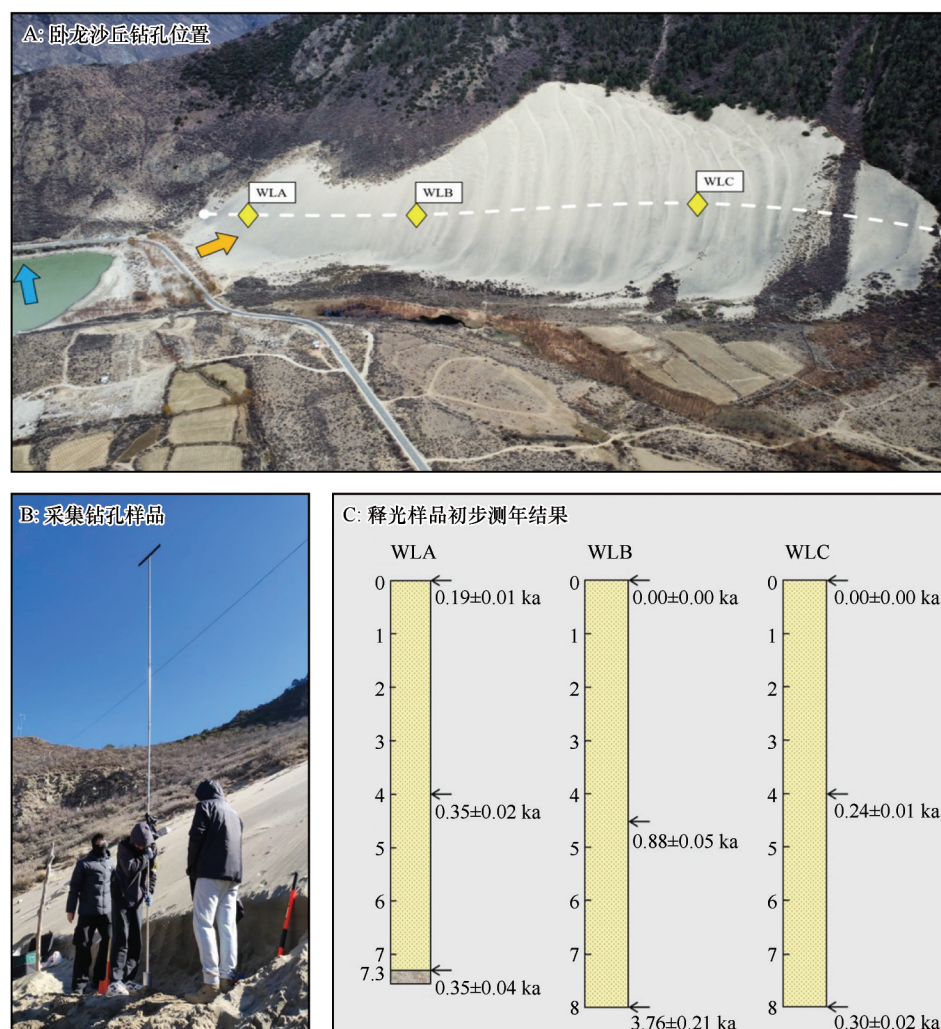
在非干旱气候下形成了大规模的爬坡沙丘,这表明雅江河谷风沙沉积的形成并不能与大尺度的气候背景简单对应,其记录的环境信息更为复杂。

风沙沉积是响应环境变化的动态地貌档案,其中释光年龄可以指示沙丘活动或停止的时间^[109],这取决于基于整个地层的沉积模式的解释。目前雅江河谷风沙活动过程的年代学工作依然薄弱^[33],缺少系统的剖面调查和测年工作。这需要在后续的研究中继续完善爬坡沙丘的年代框架,合理解释古气候代用指标在沙丘沉积中的特殊环境意义^[110],进而阐明爬坡沙丘形成的气候环境驱动机制。

6 总结与展望

综上所述,爬坡沙丘作为高原河谷风沙地貌中年龄较老、形态最为复杂的一个类型,其记录的丰富信息对理解高原河谷地区环境演化具有重要意义。目前对雅江河谷爬坡沙丘的研究已取得一定的进展,但仍存在许多问题需要进一步探索。

系统年代框架。雅江河谷爬坡沙丘的完整年代框架尚未建立,其蕴含的河谷环境演化历史有待进一步发掘。该区域风沙活动起始时间明显晚于北方沙漠地区,但LGM时期干冷气候条件下的风沙记录存在缺失,约8 ka BP后雅江河谷地区风沙沉积的强烈发育与暖湿的气候背景相悖,一些地区在非干旱气候下形成了大规模的爬坡沙丘。已有的数据指示风沙沉积物并不是高山河谷中气候变化的单一产物,且全新世晚期高原南部风沙活动增强阶段与高原东北部的风沙活动阶段并不一致^[61]。爬坡沙丘是响应于环境变化的动态地貌档案,风成沉积物是最适合释光测年的沉积物类型,为建立完整的雅江河谷爬坡沙丘年代框架,深入发掘爬坡沙丘记录的区域环境演化信息,应系统开展区域风沙沉积的年代学工作。2024年12月本课题组通过钻孔(图5),沿着卧龙爬坡沙丘的延伸方向采集了高分辨率的释光测年样品和沉积物样品,希望能够获得可靠的释光年代数据和沉积物指标数据。其中WLA钻孔在7.3 m处到达基岩,而WLB和WLC钻孔的深度均为8 m但未穿透沙丘(受钻孔设备的限制)。初步测试结果显示,卧龙爬坡沙丘至少在3 ka之前便已开始发育;其中WLA钻孔表层样品的年龄约为200 a,底部年龄约350 a,这意味着靠近沙源位置,风沙沉积较薄,且近期处于侵蚀状态;而WLB和WLC钻孔表层为现代样品,说明钻孔处位于堆



注：图A中蓝色和橙色箭头分别指向河流流向和近地表风向；图C中黄色代表风成沙，深灰色代表基岩

图5 雅鲁藏布江河谷米林段卧龙爬坡沙丘钻孔采样及初步测年结果

Fig.5 Borehole sampling in Wolong climbing dune and preliminary dating results

积区；另外，当前的研究工作尚不足以深入讨论卧龙沙丘的完整形成演化过程，能否在多个地点、多个沙丘上采用更先进的钻孔技术获取系列钻孔样品是该工作能否取得突破的关键。

动力机制。目前对爬坡沙丘形成的动力机制的研究不够深入，对近地表流场的模拟实验较少。雅江河谷东西跨度逾1 500 km，气候差异明显，东部河谷的爬坡沙丘是河谷内多因素叠加后的结果，河谷内的爬坡沙丘可能对应着河谷弯曲、山谷焚风等自然因素，不能直接使用附近观测站的风向数据。目前对河谷内不同气候带爬坡沙丘近地表流场的观测数据较少，应布设风速廓线仪监测沙丘表面气流流场特征和加速过程，结合集沙仪观测风沙流垂向分布，分析所收集沙粒的粒径组成。通过实地观测数据确定爬坡沙丘跃移沙粒的粒径特征及其与

气流条件的响应关系，开展风洞实验模拟爬坡沙丘的形成过程，并结合数值模拟的方法可以进一步描述爬坡沙丘的近地表流场特征及其形成演化的动力机制^[111]。

沙源分析。雅江河谷地区风成沉积物的物源尚未得到定量估算，目前多数学者支持地表沉积物在风成假说背景下的近源成因^[59,112]，认为爬坡沙丘属于近源沙丘^[56]，这一科学问题对理解青藏高原南部的古环境演变和现代地表过程具有重要意义。现有研究多采用粒度分析或地球化学元素分析的方法，取得了一定的成果，但还不足以全面揭示爬坡沙丘的物质来源及其与水沙等其他物源的迁移转化过程。未来可以尝试引入更多新的物源判定方法，例如沉积物释光特征在示踪物源和地表过程研究方面具有一定潜力^[113]，基于释光特征的沉积物

指纹技术可以用来追踪雅江河谷的沉积物物源^[114]; 释光灵敏度可能在搬运和沉积循环中发生变化, 石英的释光灵敏度随着传输距离的增加而增加^[115-116], 可以利用释光灵敏度重建沉积物物源和搬运距离等信息^[117-118]; 根据释光信号被重置的程度可以揭示传输方式的相关信息(如陆上或水下)。

综上所述, 青藏高原上的风沙地貌对气候变化响应敏感, 沙丘蕴含着其形成发育环境、过程和演化历史的丰富信息^[1]。相信随着爬坡沙丘沉积记录年代数据的积累和完整年代框架的建立, 结合物源和动力学研究, 未来我们将对此区域的风沙活动有一个更加深入全面的认识。这不但可以丰富风沙地貌的相关理论, 还可以为高原风沙灾害减缓和防治提供理论依据。

参考文献:

- [1] 董治宝, 等. 青藏高原风沙地貌图集[M]. 西安: 西安地图出版社, 2017.
- [2] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 864–901.
- [3] Kaiser K, Lai Z P, Schneider B, et al. Stratigraphy and palaeoenvironmental implications of Pleistocene and Holocene aeolian sediments in the Lhasa area, southern Tibet (China) [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2009, 271(3/4): 329–342.
- [4] 李森, 王跃, 哈斯, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 10–18.
- [5] Zhang C L, Li Q, Shen Y P, et al. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 1648–1659.
- [6] Dong M, Yan P, Liu B L, et al. Distribution patterns and morphological classification of climbing dunes in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Aeolian Research*, 2018, 35: 58–68.
- [7] 董苗, 严平, 王晓旭, 等. 共和盆地多石在沟爬坡沙丘沉积物特征及环境意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(5): 79–86.
- [8] Hack J T. Dunes of the Western Navajo Country [J]. *Geographical Review*, 1941, 31(2): 240–263.
- [9] Pye K, Tsoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes* [M]. London, UK: Unwin Hyman, 1990: 89–93.
- [10] Tsoar H. Wind tunnel modeling of echo and climbing dunes [J]. *Developments in Sedimentology*, 1983, 38: 247–259.
- [11] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 不同坡度障碍物前气流场特征及其对回涡沙丘形成的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(1): 34–41.
- [12] Dluzewski M, Rotnicka J, Hesp P A, et al. Airflow dynamics and aeolian sand transport across a beach-climbing dune-cliff-top dune system [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2023, 128(11): JF007316.
- [13] Jackson D W T, Cooper J G, Green A N. A preliminary classification of coastal sand dunes of KwaZulu-Natal [J]. *Journal of Coastal Research*, 2014: 718–722.
- [14] Blight G B, Blight J, Blight G F. South Africa's mountain-climbing sand dunes mechanism of formation and present status [J]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2013(8): 11–19.
- [15] Li S, Liu X W, Li H C, et al. A wind tunnel simulation of the dynamic processes involved in sand dune formation on the western coast of Hainan Island [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(4): 453–468.
- [16] Ferraz M, Cowell P, Rebêlo L. Coastal-change estimates inferred from remnant cliff-top dunes [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 64(SI): 661–665.
- [17] Arce-Chamorro C, Vidal-Romani J R, Sanjurjo-Sánchez J. Chronology of four climbing dune outcrops on the Atlantic Coast of Galicia (NW Spain) Linked to the sea level fall during the MIS6 and MIS4 isotopic stages [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(3): 312.
- [18] Howard A. Interaction of sand transport with topography with local winds in the northern Peruvian coastal desert [C]//Barn-dorff-Nielsen O E. *International Workshop on the Physics of Blown Sand*. Commonwealth of Virginia, USA: University of Virginia, 1985(8): 511–544.
- [19] Evans J R. Falling and climbing sand dunes in the Cronese (“Cat”) Mountain Area, San Bernardino County, California [J]. *Journal of Geology*, 1962, 70(1): 107–113.
- [20] Lancaster N, Tchakerian V P. Geomorphology and sediments of sand ramps in the Mojave Desert [J]. *Geomorphology*, 1996, 17(1): 151–165.
- [21] Bateman M D, Bryant R G, Foster I D L, et al. On the formation of sand ramps: a case study from the Mojave Desert [J]. *Geomorphology*, 2012, 161: 93–109.
- [22] White B R, Tsoar H. Slope effect on saltation over a climbing sand dune [J]. *Geomorphology*, 1998, 22(2): 159–180.
- [23] 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: 地球科学)*, 1999(1): 88–96.
- [24] Dong M, Yan P, Wang X X, et al. Morphological characteristics and dynamic changes of typical climbing dunes on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geomorphology*, 2023, 440: 108869.
- [25] Chojnacki M, Moersch J E, Burr D M. Climbing and falling dunes in Valles Marineris, Mars [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L08201.
- [26] Wang B N, Gong J F, Zuza A V, et al. Aeolian sand dunes alongside the Yarlung River in southern Tibet: a provenance perspective [J]. *Geological Journal*, 2021, 56(5): 2625–2536.
- [27] 杨逸畴. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌的初步观察[J]. *中国沙漠*,

- 1984, 4(3): 16–19.
- [28] Zhang J Q, Zhang C L, Li Q, et al. Grain-size distribution of surface sediments of climbing and falling dunes in the Zedang valley of the Yarlung Zangbo River, southern Tibetan Plateau[J]. *Journal Of Earth System Science*, 2019, 128(1): 11.
- [29] Na Z, Qing L, Zhang C L, et al. Grain size characteristics of aeolian sands and their implications for the aeolian dynamics of dune fields within a river valley on the southern Tibet Plateau: a case study from the Yarlung Zangbo River Valley[J]. *Catena*, 2021, 196: 104794.
- [30] 周娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究[J]. *地理研究*, 2012, 31(1): 82–94.
- [31] Liang W D, Hu X M, Garzanti E, et al. Fluvial-aeolian interaction and compositional variability in the river-fed Yarlung Tsangpo dune system (southern Tibet)[J]. *Journal Of Geophysical Research-Earth Surface*, 2023, 128(5): JF006920.
- [32] Ling Z Y, Li J S, Jin J H, et al. Geochemical characteristics and provenance of aeolian sediments in the Yarlung Tsangpo Valley, southern Tibetan Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(18): 623.
- [33] 杨军怀, 夏敦胜, 高福元, 等. 雅鲁藏布江流域风成沉积研究进展[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 863–877.
- [34] 马晓莉, 李顺, 岳雅慧. 基于碎屑锆石特征的雅鲁藏布江山南宽谷风成沙丘物源示踪[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(5): 1157–1171.
- [35] 张正偲, 张焱, 马鹏飞, 等. 雅鲁藏布江中游风沙区典型下垫面空气动力学参数研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 997–1005.
- [36] 刘婷, 贾晓鹏, 陈定梅, 等. 雅鲁藏布江中游平坦流沙地空气动力学特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(5): 194–203.
- [37] 靳鹤龄, 董光荣, 刘玉璋, 等. 0.8 Ma B.P. 以来西藏雅鲁藏布江中游地区沙地演化和气候变化[J]. *中国沙漠*, 1998, 18(2): 2–9.
- [38] 聂宁, 张万昌, 邓财. 雅鲁藏布江流域 1978–2009 年气候时空变化及未来趋势研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 64–71.
- [39] Yao T D, Li Z G, Yang W, et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2072–2078.
- [40] Hou J Z, D'andrea W J, Wang M D, et al. Influence of the Indian monsoon and the subtropical jet on climate change on the Tibetan Plateau since the late Pleistocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 163: 84–94.
- [41] 杨逸畴, 李炳元, 尹泽生, 等. 西藏高原地貌的形成和演化[J]. *地理学报*, 1982(1): 76–87.
- [42] Zhu S, Wu Z H, Zhao X T, et al. Ages and genesis of terrace flights in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, Tibetan Plateau, China[J]. *Boreas*, 2014, 43(2): 485–504.
- [43] 詹琪琪, 赵伟, 杨梦娇, 等. 雅鲁藏布江中部流域土地沙化遥感识别[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(2): 391–404.
- [44] 李永霞, 方江平. 西藏雅鲁藏布江中游地区土地沙化面积变化分析[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39(12): 71–74.
- [45] 孙明, 沈渭寿, 李海东, 等. 雅鲁藏布江源区风沙化土地演变趋势[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1163–1171.
- [46] Liu Y, Wang Y S, Shen T. Spatial distribution and formation mechanism of aeolian sand in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(9): 1987–2000.
- [47] Rowell A, Thomas D, Bailey R, et al. Controls on sand ramp formation in southern Namibia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(1): 150–171.
- [48] 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.
- [49] Chojnacki M, Burr D M, Moersch J E. Valles Marineris dune fields as compared with other martian populations: diversity of dune compositions, morphologies, and thermophysical properties[J]. *Icarus*, 2014, 230: 96–142.
- [50] Tirsch D, Craddock R A, Platz T, et al. Spectral and petrologic analyses of basaltic sands in Ka'u Desert (Hawaii): implications for the dark dunes on Mars[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(4): 434–448.
- [51] Zhang Z C, Dong Z B. Grain size characteristics in the Hexi Corridor desert[J]. *Aeolian Research*, 2015, 18: 55–67.
- [52] 张正偲, 董治宝. 风沙地貌形态动力学研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 734–747.
- [53] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 横向沙丘背风侧气流重附风洞模拟[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 16–20.
- [54] 董苗, 严平, 王晓旭, 等. 雅鲁藏布江山南宽谷段爬坡沙丘表层沉积物特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 153–163.
- [55] 潘美慧, 杨安娜, 伍永秋, 等. 雅江河谷佛掌沙丘表层沉积物粒度特征[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 3076–3088.
- [56] 董苗, 严平, 王晓旭, 等. 青藏高原不同气候带爬坡沙丘沉积物特征及其环境指示[J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1825–1846.
- [57] 李小妹, 严平, 吴伟, 等. 克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1269–1276.
- [58] 田伟东, 杨军怀, 王树源, 等. 雅鲁藏布江河谷沙丘沉积物粒度特征及其环境指示[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1): 128–134.
- [59] Péwé T L, Liu T S, Slatt R M, et al. Origin and character of loess like silt in the southern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China[J]. *USGS Professional Paper*, 1995, 1549: 1–55.
- [60] Ling Z Y, Yang X Y, Wang Y X, et al. OSL chronology of the Liena archeological site in the Yarlung Tsangpo Valley throws new light on human occupation of the Tibetan Plateau[J]. *Holocene*, 2020, 30(7): 1043–1052.
- [61] Klinge M, Lehmkuhl F. Holocene aeolian mantles and inter-bedded paleosols on the southern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2015, 372: 33–44.
- [62] 杨小平, 梁鹏, 方伊曼, 等. 中国沙漠与环境演变[M]. 北京: 科学出版社, 2024.

- [63] Sun J M, Li S H, Muhs D R, et al. Loess sedimentation in Tibet: provenance, processes, and link with Quaternary glaciations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(17/18): 2265–2280.
- [64] 马鹏飞, 论珠群培, 张焱, 等. 雅鲁藏布江中游江心洲、河漫滩面积及其指示的沙源特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 25–33.
- [65] 张焱, 马鹏飞, 曾林, 等. 基于沉积物理化性质的雅鲁藏布江中游粉尘物源研究[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 92–100.
- [66] 王晓枝, 董治宝, 南维鸽, 等. 拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 22–31.
- [67] Du S S, Wu Y Q, Tan L H, et al. Geochemical characteristics of fine and coarse fractions of sediments in the Yarlung Zangbo River Basin (southern Tibet, China) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(9): 337.
- [68] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1441–1453.
- [69] Yang S L, Ding F, Ding Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(7): 1695–1709.
- [70] 刘连友, 刘志民, 王建华, 等. 雅鲁藏布江江当宽谷地区沙源物质与现代沙漠化过程[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 45–48.
- [71] Yang J H, Xia D S, Wang S Y, et al. Near-surface wind environment in the Yarlung Zangbo River Basin, southern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(6): 917–936.
- [72] 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*, 2011, 31(4): 805–814.
- [73] Shen W, Li H, Sun M, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China from 1975 to 2008[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86/87: 37–44.
- [74] 张令光, 沈才生, 黄艳丽, 等. 雅鲁藏布江流域输沙势空间特征[J]. *中国沙漠*, 2025, 45(1): 304–317.
- [75] Chen F H, Zhang J F, Liu J B, et al. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: a comprehensive review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 243: 106444.
- [76] 高建锋, 朱宝维, 董金湖. 雅鲁藏布江中部流域降雨特征及成因分析[J]. *气象*, 1993(4): 44–49.
- [77] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 栅栏绕流减速效应风洞实验模拟[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(1): 1–7.
- [78] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 62–66.
- [79] 凌智永, 靳建辉, 吴铎, 等. MIS 3 以来雅鲁藏布江流域风成沉积及环境意义[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2385–2400.
- [80] 褚佳琦, 严平, 苏志珠, 等. 雅鲁藏布江米林段爬坡沙丘形态演变及移动规律[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(6): 220–230.
- [81] 杨林海, 赖忠平, 周杰, 等. 光释光测年和孢粉分析揭示的晚冰期以来科尔沁沙地演化过程[J]. *地理科学*, 2011, 31(6): 695–701.
- [82] Stauch G. Geomorphological and palaeoclimate dynamics recorded by the formation of aeolian archives on the Tibetan Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 393–408.
- [83] 夏敦胜, 杨胜利. 雅鲁藏布江中上游地表粉尘空间特征与演化[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [84] 夏敦胜, 杨军怀, 王树源, 等. 雅鲁藏布江流域风成沉积空间格局、沉积模式及其环境效应[J]. *地学前缘*, 2023, 30(4): 229–244.
- [85] Cheng L Q, Long H, Zhang Z, et al. Changes in Late Pleistocene dust activity in the southern Tibetan Plateau in response to orbital precession and mountain glaciers [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2024, 129(6): JF007615.
- [86] Yang J H, Chen S Q, Ling Z Y, et al. Spatiotemporal evolution of aeolian sedimentary landscapes on the southern Tibetan Plateau during the late Quaternary: a review and recent advances [J]. *Earth-Science Reviews*, 2025, 261: 105035.
- [87] Lehmkuhl F, Klinge M, Rees-Jones J, et al. Late Quaternary aeolian sedimentation in central and south-eastern Tibet [J]. *Quaternary International*, 2000, 68: 117–132.
- [88] Ling Z Y, Yang S L, Wang X, et al. Spatial-temporal differentiation of eolian sediments in the Yarlung Tsangpo catchment, Tibetan Plateau, and response to global climate change since the last glaciation [J]. *Geomorphology*, 2020, 357: 107104.
- [89] Pan M H, Wu Y Q, Zheng Y H, et al. Holocene aeolian activity in the Dinggye area (Southern Tibet, China) [J]. *Aeolian Research*, 2014, 12: 19–27.
- [90] 郑影华. 青藏高原典型区全新世风沙活动对气候变化的响应: 以藏南雅鲁藏布江中游宽谷区和青海共和盆地为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2009.
- [91] Zheng Y, Wu Y, Li S, et al. Grain-size characteristics of sediments formed since 8600 yr BP in middle reaches of Yarlung Zangbo River in Tibet and their paleoenvironmental significance [J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(2): 113–119.
- [92] Yang J H, Wang H Y, Gao F Y, et al. Holocene forcing of aeolian dust activity over the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 235: 104400.
- [93] Gao Y, Zhang K Q, Wu Z H, et al. Factors controlling the Early-Mid Holocene aeolian sediment accumulation in the Pum Qu catchment and environmental implications for the southern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2023, 652: 17–32.
- [94] Li T Y, Wu Y Q, Du S S, et al. Geochemical characterization of a Holocene aeolian profile in the Zhongba area (southern Tibet, China) and its paleoclimatic implications [J]. *Aeolian Research*, 2016, 20: 169–175.
- [95] Lai Z P, Kaiser K, Bruckner H. Luminescence-dated aeolian deposits of late Quaternary age in the southern Tibetan Plateau and their implications for landscape history [J]. *Quaternary Research*, 2009, 72(3): 421–430.
- [96] Kaiser K, Lai Z P, Schneider B, et al. Late Pleistocene genesis of the middle Yarlung Zangbo Valley, southern Tibet (China), as deduced by sedimentological and luminescence data [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2/3): 200–204.
- [97] Kaiser K, Ogennoorth L, Schoch W H, et al. Charcoal and fossil

- wood from palaeosols, sediments and artificial structures indicating late Holocene woodland decline in southern Tibet (China) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28 (15/16): 1539–1554.
- [98] Yang J H, Xia D S, Chen Z X, et al. Differentiating detrital and pedogenic contributions to the magnetic properties of aeolian deposits in the southern Tibetan Plateau: implications for paleo-climatic reconstruction [J]. *Catena*, 2023, 220: 106736.
- [99] 杨小平, 杜金花, 梁鹏, 等. 晚更新世以来塔克拉玛干沙漠中部地区的环境演变 [J]. *科学通报*, 2021, 66(24): 3205–3218.
- [100] Sarnthein M. Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum [J]. *Nature*, 1978, 272: 43–44.
- [101] Hu H P, Feng J L, Chen F. Sedimentary records of a palaeo-lake in the middle Yarlung Tsangpo: implications for terrace genesis and outburst flooding [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 192: 135–148.
- [102] Wang H Y, Wang P, Hu G, et al. Impact of extreme debris flow-induced paleodamming events on the sedimentological evolution of the middle Yarlung Tsangpo River reaches since the late Pleistocene, Tibet [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1017858.
- [103] Wang P, Wang H Y, Hu G, et al. Reconstructing post-mid Pleistocene glacial-dammed paleolakes in the Tsangpo Gorge, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2023, 314: 108228.
- [104] Stone A E C, Thomas D S G. Linear dune accumulation chronologies from the Southwest Kalahari, Namibia: challenges of reconstructing late Quaternary palaeoenvironments from aeolian landforms [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (17/18): 1667–1681.
- [105] Liu X W, Li S, Shen J Y. Wind tunnel simulation experiment of mountain dunes [J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, 42 (1): 49–59.
- [106] 王晓旭, 严平, 王勇, 等. 坡度和坡形对爬坡沙丘形成影响的风洞模拟实验 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 118–126.
- [107] Wang X X, Yan P, Dong M, et al. The effect of gradient and shape on the formation process of climbing dunes in a wind-tunnel experiment [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2022, 127(11): JF006858.
- [108] 靳鹤龄, 董光荣, 高尚玉, 等. 距今30万年来西藏中部地区环境变化与西南季风变迁 [J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 3–6.
- [109] Bailey R M, Thomas D S G. A quantitative approach to understanding dated dune stratigraphies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(5): 614–631.
- [110] Thomas D S, Bailey R M. Is there evidence for global-scale forcing of southern Hemisphere Quaternary desert dune accumulation?: a quantitative method for testing hypotheses of dune system development [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(14): 2280–2294.
- [111] 孟小楠, 严平, 董苗. 爬坡沙丘的研究进展 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 391–396.
- [112] 靳鹤龄, 董光荣, 张春来. 雅鲁藏布江河谷黄土的沉积特征及成因 [J]. *中国沙漠*, 2000, 20(1): 15–20.
- [113] Chang Z H, Zhou L P. Evidence for provenance change in deep sea sediments of the Bengal Fan: a 7 million year record from IODP U1444A [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 186: 104008.
- [114] Zhang A M, Gao Q H, Rahman S M, et al. Luminescence fingerprints fluvial sediment transport from the Tibetan Plateau to the Bangladesh Delta [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 622: 118387.
- [115] Pietsch T J, Olley J M, Nanson G C. Fluvial transport as a natural luminescence sensitizer of quartz [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3(4): 365–376.
- [116] Sawakuchi A O, Blair M W, Dewitt R, et al. Thermal history versus sedimentary history: OSL sensitivity of quartz grains extracted from rocks and sediments [J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(2): 261–272.
- [117] do Nascimento D R, Sawakuchi A O, Guedes C C F, et al. Provenance of sands from the confluence of the Amazon and Madeira rivers based on detrital heavy minerals and luminescence of quartz and feldspar [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 316: 1–12.
- [118] Chamberlain E L, Wallinga J, Reimann T, et al. Luminescence dating of delta sediments: novel approaches explored for the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta [J]. *Quaternary Geochronology*, 2017, 41: 97–111.

Research progress on climbing dunes in the Yarlung Zangbo River Valley, southern Tibetan Plateau

Zhou Chang, Yang Linhai

(School of Geography and Tourism / Key Laboratory of Qian Xuesen Desertericulture of Shaanxi Higher Education Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: As one of the global high-altitude fluvial-aeolian system distribution areas, the Yarlung Zangbo River Valley exhibits widespread and distinctive aeolian landforms, particularly represented by climbing dunes developed on valley slopes. Serving as crucial components of desertification landscapes in the Yarlung Zangbo River Valley, previous studies have primarily focused on the dune distribution and morphology, material composition, dynamics and flow field features. However, works on its material source and its migration and transformation with other sources such as fluvial sediment, as well as the formation and evolution history over a longer time scale, are still relatively inadequate. Systematic chronological investigation is the foundation for studying desert and sandy land evolution, as well as for accurately understanding the climatic context of dune formation and development. Current chronological data of aeolian sands in the Yarlung Zangbo River Valley mainly concentrate after 30 ka BP, with a notable assemblage on the period of after 13 ka BP. Records of aeolian sands older than 30 ka BP are almost absent. The formation and evolution of climbing dunes within the Yarlung Zangbo River Valley as well as its mechanisms constitute a focus for future research. Especially, selecting climbing dunes at multiple sites and employing effective drilling techniques/equipment to obtain high-resolution chronology and proxy data along the extension direction and vertical accumulation direction are crucial for reconstructing their formation and evolutionary history.

Key words: Yarlung Zangbo River Valley; aeolian landforms; climbing dunes; chronology