

柴达木盆地风成地貌类型与晚全新世古风况恢复

吴桐雯 李江海[†] 杨梦莲

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: jhli@pku.edu.cn

摘要 利用遥感图像的风成地貌形态和高分辨率古季风指标, 恢复柴达木盆地晚全新世以来的古风况, 揭示青藏高原抬升时期东亚季风变迁的历史。结果表明, 柴达木盆地晚全新世以来盛行西北风, 同时有少量西风和北风, 主要由亚洲冬季风控制, 夏季风和西风环流的影响甚微。盆地东部沙丘和雅丹地貌记录了末次盛冰期西风环流的风向, 中西部地区的风成地貌指示晚全新世以来盆地发育西北向的亚洲冬季风。青藏高原的抬升阻挡西风环流进入柴达木盆地, 并加强亚洲冬季风, 造成盆地内古风向的改变, 大气环流模式的转变发生在 4000 aBP 左右, 此时是柴达木盆地气候从暖湿转向冷干的重要节点。

关键词 柴达木盆地; 晚全新世; 风成地貌; 古风况; 东亚季风

中图分类号 P942

The Aeolian Bedforms and the Reconstruction of Late Holocene Wind Direction in Qaidam Basin

WU Tongwen, LI Jianghai[†], YANG Menglian

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: jhli@pku.edu.cn

Abstract Using remote sensing image for the aeolian morphology and high resolution ancient monsoon indicators, the authors restore how the wind blows in Qaidam Basin since late Holocene. The results show that the prevailing winds of the basin were northwest winds, at the same time there were a small amount of westerly and north wind, with the summer monsoon and westerly circulation having little effect on the wind models. The eastern dune and Yardang landforms of the basin recorded the westerly winds of the last glacial, but the landforms in the midwest indicated that the Asian winter monsoon developed from the northwest during late Holocene. The changes in the atmospheric circulation model took place around 4000 aBP years ago, which was an important node, basin climate shifting from warm and humid to cold and dry.

Key words Qaidam Basin; late Holocene; aeolian bedform; paleowind direction; East Asian onsoon

柴达木盆地位于青海省海西蒙古族藏族自治州境内, 是我国典型的内陆干旱区山间断陷盆地, 呈北西-东南向展布的不规则三角形, 北界是祁连山, 南依昆仑山, 西北方向是阿尔金山脉, 是一个近似封闭的构造盆地。盆地面积约为 25 万 km², 海拔在 2675~3350 m 之间, 平均 2800 m。作为青藏高原北部独特的地理单元, 封闭地形对盆地自然环境的演化起决定性作用。柴达木盆地处在青藏高原构造演

化前缘地区, 是中国海拔最高的内陆盆地和沙漠分布区。柴达木盆地的气候特点与青藏高原抬升造成大气环流模式改变息息相关, 极干旱的气候和较强的风力条件塑造了类型多样的沙漠地貌。

全新世雅丹和沙丘的排列方向、古沙丘前积层、风成砂-黄土沉积序列等古风向气候指标记录了丰富的东亚季风演变信息^[1-2]。在古气候研究中, 相对于气温和降水, 对古风向的研究很少, 关键问

题是古风向重建指标不够丰富。本文依据雅丹、线形沙丘、新月形沙丘及其与线性沙丘组合的排列方向,恢复柴达木盆地的古风向,结合古沙丘前积层、风成砂-黄土沉积序列、石笋和深海有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 等古气候指标^[2],重建柴达木盆地东亚季风变迁的历史,研究结果将有助于揭示盆地干旱化的气候驱动机制。

1 柴达木盆地风成地貌类型

晚全新世以来,多种外力作用(湖泊和河流的侵蚀作用、风化以及风力作用)持续地改造柴达木盆地内部地貌。风成地貌包括雅丹、风蚀劣地、固定沙丘、流动沙丘、半固定沙丘、盐碱地和砾石戈壁等^[3],面积约占盆地总面积的 1/3。在多种风成地貌中,以风蚀作用形成的雅丹和风积作用形成的沙丘为代表,二者连续分布,呈现有规律的分布格局。随着盆地西部背斜的形成,沉积中心持续向东迁移,导致大湖变成小湖、咸水湖、盐湖和干盐湖,形成盆内有山、山间有盆、盆地有湖的地貌格局。本文参考 Xiao 等^[4]对柴达木盆地地貌的分类,通过解译高清遥感图像,描绘不同地貌的准确边界,展示盆地内雅丹、沙丘、湖泊、盐沼与山脉的分布范围(图 1)。

1.1 风积地貌:沙丘

柴达木盆地的沙丘分布在盆地边缘地带,集中在 3 个地区:1)柴达木盆地西南部的祁曼塔格山以及沙松乌拉山北部地区,沙丘呈连续的条带状,北西-南东向延展;2)达布逊湖周围的新月形沙丘与线性沙丘组合;3)盆地东南部都兰地区连续分布的大面积沙丘。盆地中部广布盐碱地,表面被坚硬的盐壳覆盖,沙丘在盆地边缘呈零散状分布,在东昆仑山的山前洪积扇前与戈壁交错出现^[5]。沙丘以新月形沙丘、线形沙丘、沙丘链和沙垄为主,较大的复合型沙丘链分布面积很小,柴达木盆地内呈现沙丘与盐湖、冲积扇与雅丹交错分布的景观。

1.2 风蚀地貌:雅丹

柴达木盆地发育多种风蚀地貌类型,包括雅丹、方山和风蚀谷地等,其中雅丹是最主要的风蚀地貌。柴达木盆地是全球海拔最高的、中国分布面积最大的雅丹地貌区^[6]。雅丹地貌的形成受风蚀、流水侵蚀、沟蚀和重力崩塌等多种因素的影响,其中风蚀是主要因素。柴达木盆地的风蚀地貌主要表现为总面积近两万平方公里的雅丹地貌群,占风成

地貌的 67%,主要分布在盆地西北部,尤其是海西州大柴旦与冷湖之间的南八仙、一里坪以及牛鼻子梁一带,在西北部和东部的雅丹群中间存在有大面积的戈壁和盐碱地。

携带丰富碎屑物的强风剥蚀软硬相间的岩层,使雅丹地貌的迎风端呈平滑的流线型鲸背状,背风端逐渐变得窄而尖锐^[7]。经长期风蚀,雅丹地貌不断扩展,常成群或呈带状分布,丘顶呈方山状、尖峰状、犬牙状、锥状、鲸背状和垄状等。有时,多个雅丹地貌体相互连接成一体,呈长垄状^[8]。雅丹的高度为 4~30 m,长、宽约为 100 m。背斜构造影响雅丹的发育,风蚀地貌区第三系泥岩、粉砂岩和砂岩构成的北西-南东走向短轴背斜的岩层疏松,软硬相间,是雅丹的主体。雅丹也是沙丘的物质来源,沙丘与雅丹总是相伴而生。西北风携带丰富的碎屑物,在背风处发育沙丘和小型条带状沙波纹。盆地东部雅丹分布面积比西部小,但东部雅丹个体的规模更大。在盆地东南缘,由于受到西北方向雅丹体的阻挡,风力作用逐渐变弱,因此雅丹的形状更接近圆形。

2 柴达木盆地风成地貌与风向的关系

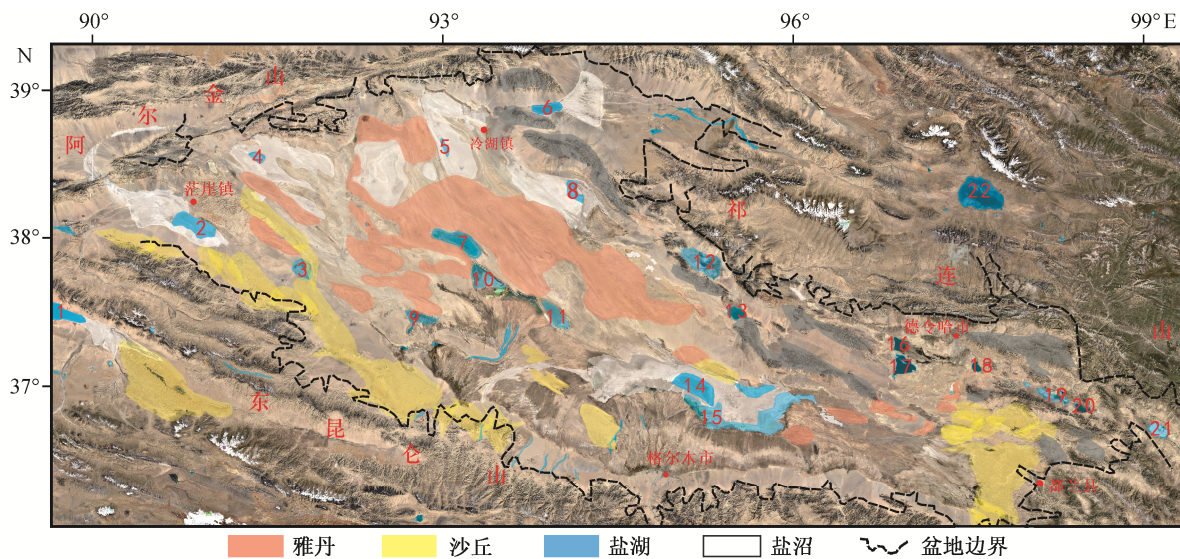
2.1 沙丘与风向的关系

沙丘的形状与分布特征与当地风况特征有密切的关系^[9],多个风向塑造出丰富的沙丘形态。根据风向与沙丘形态的关系^[10],柴达木盆地沙丘可归纳为 3 种基本类型:1)单向风模式下常常发育新月形沙丘和纵向沙丘;2)双向风模式下易发育新月形沙丘链;3)多向风模式下常见格状沙丘、蜂窝状沙地等不规则沙丘。

典型的新月形沙丘迎风面凸出、坡度平缓,背风面凹陷、坡度陡^[11],由单向风或数个相似方向的风合力形成,走向与风向的夹角大于 60° 。此外,沙丘两侧发育向迎风方向延伸的两个翼角。新月形沙丘链则是在两个不同方向风的作用下形成的,沙丘的翼角彼此相连,组成沙丘链,随着风向的变化,沙丘链前后来回移动。察尔汗盐湖北部的大规模线形沙丘分布区呈北西-南东向展布,盆地东部都兰县线性与新月形沙丘的组合体却呈东西向展布,这与盆地东部雅丹地貌指示的风向一致,说明柴达木盆地存在大致呈 45° 夹角的两个风向(图 2)。

2.2 雅丹地貌与风向的关系

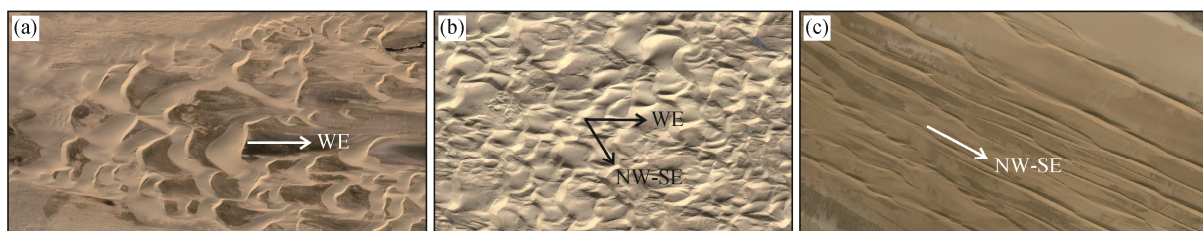
晚全新世以来,柴达木盆地的主要风向为西北



1 阿牙克库木湖, 2 尕斯库勒干盐湖, 3 芒崖湖, 4 大浪滩干盐湖, 5 昆特依干盐湖, 6 苏干湖, 7 一里坪干盐湖, 8 德宗马海湖, 9 甘森泉湖, 10 西台吉乃尔湖, 11 东台吉乃尔湖, 12 大柴旦湖, 13 小柴旦湖, 14 达布逊湖, 15 察尔汗干盐湖, 16 可鲁克湖, 17 托素湖, 18 尕斯海, 19 柯柯盐湖, 20 希里沟湖, 21 茶卡盐湖, 22 哈拉湖。地形遥感数据来自 Google Earth

图 1 柴达木盆地地貌类型遥感解译图

Fig. 1 Remote sensing interpretation of landform types in Qaidam Basin



(a) 盆地东部新月形沙丘; (b) 盆地东部格状沙丘; (c) 察尔汗盐湖北部纵向沙丘。遥感图像来自 Google Earth

图 2 柴达木盆地典型沙丘形态指示两个不同风向

Fig. 2 Typical dune patterns indicate two different wind directions in Qaidam Basin



(a) 南八仙雅丹地貌; (b) 俄博梁雅丹地貌; (c) 盆地东部雅丹地貌。遥感图像来自 Google Earth

图 3 柴达木盆地雅丹地貌排列方向指示 3 个不同风向

Fig. 3 Direction of Yardang landforms indicate three different wind directions in Qaidam Basin

向。柴达木盆地的雅丹由至少 3 个方向的风吹蚀而成, 北西-南东风向与盆地内多数雅丹走向一致, 是控制盆地大部分雅丹地貌形态的最重要因素。其次, 北东-南西向的风蚀作用导致少数地区的雅丹

呈北东-南西向或东西向排列, 指示当地盛行风向与整个盆地盛行风向以约 60°的夹角相交(图 3), 东部雅丹区小尺度的沙波纹证明盆地东部存在东西向的盛行风。盆地内雅丹地貌不是由单一方向的盛行

风侵蚀而成, 3 个方向的风蚀作用形成与盛行风向平行的雅丹阵列。

综上所述, 通过观察沙丘和雅丹遥感图像, 可以确定柴达木盆地晚全新世以来存在北西-南东、北东-南西和东西 3 个主要风向。

3 柴达木盆地风成地貌发育史

柴达木盆地风成沙丘的形成时间与历史时期气候以及季风系统的古风况有直接关系。在气候干冷的末次盛冰期, 盆地内的沙丘开始形成, 此时沙丘的形态主要受盛行西风影响。曾永年等^[5]利用热释光测年, 确定柴达木盆地东部风成砂形成于末次盛冰期。Owen 等^[12]确定北部冷湖地区一个沙楔中风成砂的光释光年代为 14.9 ka, 代表当地风沙活动开始的时间。全新世早期的气候转暖导致盆地沙丘面积逐渐缩小^[5], 在随后的全新世大暖期, 风沙活动停止^[13], 6~9 kaBP 是柴达木盆地东部地区在全新世相对最湿的阶段^[3], 这种暖湿的气候延续到大约 4000 aBP。在 4000 aBP 之后, 晚全新世以来, 盆地气候再次向干冷转变。刘星星等^[14]的研究表明, 下西台剖面 b 的 4000 aBP 地层中风成砂记录了流沙的再次出现或增多, 标志着风沙活动增强, 使湖泊进一步退缩, 沙丘规模再次扩大。由于 4000 aBP 之后, 柴达木盆地气候持续寒冷干旱, 且气候条件波动稳定, 沙丘可以很好地记录盆地的风向, 因此本文将沙丘运移方向反映的古风向年代定在 4000 aBP 以来的晚全新世。柴达木盆地的气候在晚全新世逐渐干旱化^[15], 中部和西南部开始发育沙丘, 沙丘的形态主要受控于西北向的东亚冬季风, 夏季风在末次盛冰期以来对盆地风成地貌的影响甚微。与盆地西南部和中部沙丘不同, 东部沙丘形成于末次盛冰期, 受控于早全新世的盛行西风, 水平运移方向为东西向。此外, 由于盆地内诸多洪积扇、河流和湖泊在晚全新世的退缩和消亡, 使得植被减少, 更多的沙地裸露, 增加了沉积物来源, 使沙丘范围不断扩大, 最终使盆地沙丘固定^[15-16]。

柴达木盆地雅丹地貌形成于全新世, 经历史时期至今, 长轴方向为西北向, 被切割的时间应该在晚更新世, 开始于古湖泊沉积层隆起形成背斜以后^[17]。由于末次盛冰期之前盆地主要受盛行西风影响, 因此雅丹地貌是在后期全新世强劲的西北风吹蚀作用下形成的^[17]。西北风吹散第四纪早期沉积物, 使晚第三纪的湖泊沉积物出露, 在全新世来

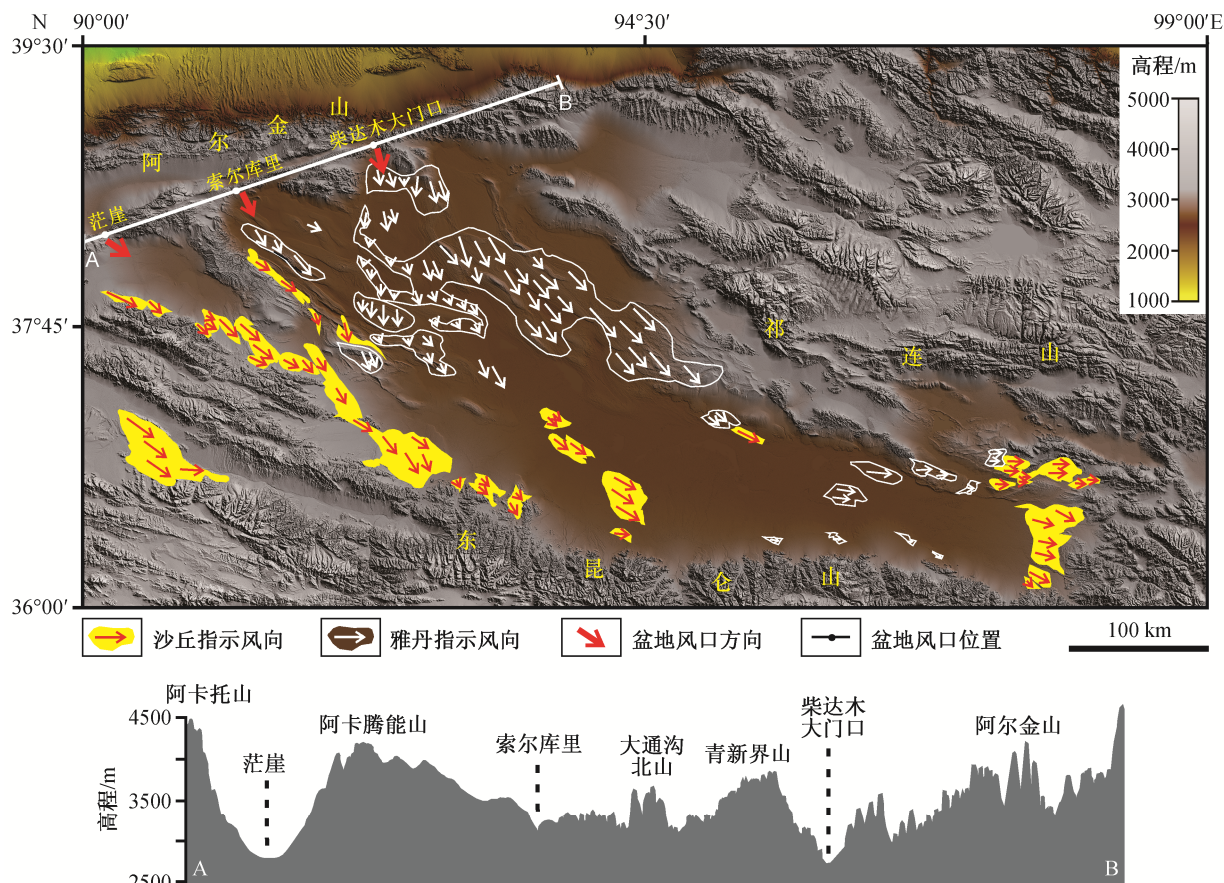
自西伯利亚强冬季风的长期作用下, 雕刻成整齐的西北向雅丹阵列。

4 盆地古风况恢复

柴达木盆地沙丘运移的方向和雅丹长轴的走向与风向基本上一致, 是记录晚全新世以来古风向信息的良好载体^[16,18-19], 因此, 可以利用高清遥感影像中两者的形态特征来恢复古风向。我们将沙丘和雅丹反映的古风向年代定在 4000 aBP 的晚全新世, 通过识别现代沙丘和雅丹的走向来推测晚全新世以来的古风向, 进而重建柴达木盆地东亚季风变迁的历史。

由于第四纪的风成地貌不易保存, 遥感解译方法重建古风向尤其适用于传统调查方法难以覆盖的全新世风沙地貌区。图 4 中晚全新世柴达木盆地古风向的重建基于遥感影像中风成地貌排列方向的解译(图 2 和 3)。图 4 显示, 柴达木盆地晚全新世至少存在北西-南东、北东-南西和东西 3 个风向, 北西-南东向盛行风是控制风成地貌形态的主要地质营力。虽然古风向受到地形作用会发生一定程度的偏转, 但重建结果仍能表明盆地受东亚季风环流控制^[18]。结合盆地内气候变化历史, 我们认为柴达木盆地在末次冰期以前受盛行西风控制, 之后转变为东亚冬季风控制, 以西北风为主, 西风次之, 同时有少量北风。盆地东部的沙丘和雅丹记录了末次盛冰期西风环流的盛行风向, 中西部地区的沙丘和雅丹指示晚全新世之后西北向的亚洲冬季风。图 4 中阿尔金山剖面显示, 柴达木盆地主要有 3 个地势较低的风口, 分别位于阿尔金山的茫崖地区、索尔库里地区和柴达木大门口地区, 它们是冬季风和盛行西风的主要通道^[4]。

晚全新世以来, 柴达木盆地古风况发生改变是青藏高原抬升, 阻挡西风环流并强化亚洲冬季风的结果^[16], 大气环流模式的转变大概发生在 4000 aBP^[1,20], 此时也是柴达木盆地气候从温暖湿润转向寒冷干旱的重要时间节点。全新世的古季风资料是最丰富的^[1], 石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、黄土沉积物和深海浮游有孔虫等高分辨率气候记录显示, 8000 aBP 以来北半球夏季风有逐渐减弱的趋势^[1], 北西-南东风向的盛行与晚全新世以来东亚夏季风萎缩、冬季风随之增强有紧密联系^[21]。牛光明^[22]对下西台剖面的研究显示, 柴达木盆地的冬季风演化可以分为 4 个阶段: 1) 5300~4300 aBP, 弱冬季风阶段; 2) 2900~



地形和剖面数据来自中国科学院地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>) SRTM DEM 90 m 分辨率原始高程数据, 风向信息来自遥感影像解译

图 4 晚全新世柴达木盆地古风向恢复

Fig. 4 Restoration of paleowind directions of late Holocene in Qaidam Basin

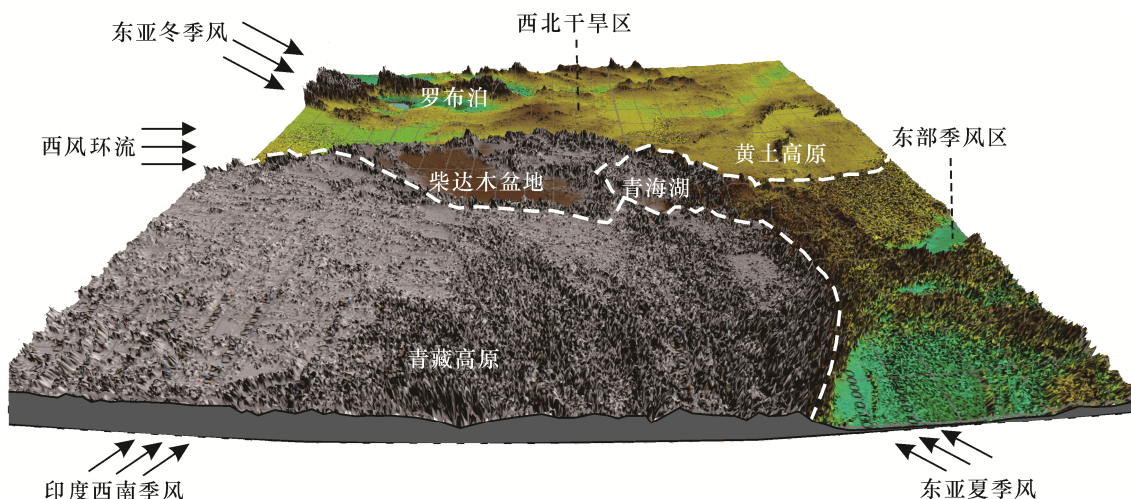
930 aBP, 弱冬季风阶段; 3) 4300~2900 aBP, 强冬季风阶段; 4) 934 aBP 至今, 强冬季风阶段。

古风向的变化导致晚全新世以来柴达木盆地的干旱化, 青藏高原的隆升阻挡印度洋的水气进入盆地, 改变了柴达木盆地大气环流的模式, 导致亚洲季风系统加强。盆地内青海湖和尕斯库勒湖沉积物记录的 4000 aBP 左右晚全新世冷干事件提供了全新世大暖期向晚全新世冷干气候的转变的证据, 划分出全新世古气候演化阶段: 10100~8000 aBP, 步入较温暖的冰后期, 同时表现出冷暖交替的旋回性波动特征; 8000~4500 aBP, 湿润气候; 4500~3800 aBP, 气候趋于干冷, 盆地逐渐干燥、变冷^[22]。陈忠等^[23]重建了尕斯库勒湖地区晚冰期以来的气候环境演变, 将尕斯库勒湖地区全新世的气候演化分为早全新世(11150~8240 aBP)不稳定期、中全新世(8240~3200 aBP)较暖湿期以及晚全新世(3200 aBP 以来)干冷期 3 个阶段。

5 柴达木盆地现代风况

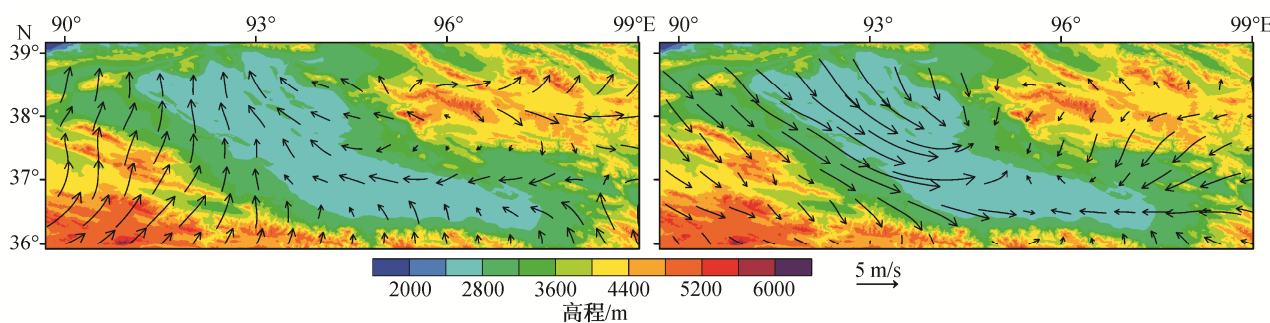
柴达木盆地位于中国西部干旱区、青藏高原与东部季风区的交汇地带(图 5), 对气候和环境的变化非常敏感^[15,22], 其现代风况是在东亚冬季风、印度夏季风和西风环流综合作用下形成的^[15]。

柴达木盆地现代盛行北西-南东风向, 风能资源十分丰富。春季(3—5月)受亚洲夏季风影响, 大风少, 风速小; 秋季(9—11月)受亚洲冬季风影响, 大风多, 风速大(图 6)。盆地风速季节变化明显, 且在空间上表现为自西北向东南递增的趋势, 主风向和次风向在空间分布上明显不同^[9]。利用 NCL 软件处理 NOAA NCEP 的风场数据, 计算得到柴达木盆地 2015 年全年最大风速为 8.0 m/s, 最小风速为 0.7 m/s, 平均风速为 3.7 m/s, 风向较单一, 主要为北西-南东方向。从图 6 可以看出, 盆地内风况与



地形数据来自经 Global Mapper 软件处理的中国科学院地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>) SRTM DEM 90 m 分辨率原始高程数据

图 5 柴达木盆地现代季风模式
Fig. 5 Model of modern monsoon in Qaidam Basin



(a) 春季(3—5月); (b) 秋季(9—11月)。来自 2015 年 NOAA NCEP 风场数据, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 距地面高度为 10 m, 经 NCL 软件处理

图 6 柴达木盆地现代风况
Fig. 6 Modern wind map of Qaidam Basin

地形有很大关系^[24], 在昆仑山脉与祁连山脉之间的峡谷地带, 由于狭管效应, 极易造成大风天气, 如西北部的茫崖和东部的茶卡大风天气频繁。柴达木盆地现代风况显示出与晚全新世古风况相似的特征, 二者具有可比性, 盛行风向都为北西-南东向, 指示 4000 aBP 以来盆地主要受亚洲冬季风影响。

6 结论

本文利用网上公开的遥感、地形与风场数据, 以 Arcgis, Global Map 和 NCL 软件为成图平台, 得到柴达木盆地风成地貌的特征。在此基础上, 结合前人研究得到的盆地古气候演变信息, 恢复了柴达木盆地晚全新世以来的古风况。主要结论如下。

1) 柴达木盆地晚全新世气候逐渐干旱化, 发育

类型丰富的风成地貌, 包括雅丹、固定沙丘、流动沙丘、半固定沙丘、盐碱地、风蚀劣地和砾石戈壁等。柴达木盆地沙丘运移方向和雅丹长轴走向与风向基本上一致。

2) 可以利用高清遥感影像中沙丘和雅丹的形态特征来恢复古风向。现代遥感影像显示, 柴达木盆地晚全新世以来的北西-南东盛行风是控制风成地貌形态的主要地质营力。柴达木盆地在末次冰期以前受盛行西风控制, 之后改为主要由西北向的东亚冬季风控制。盆地东部的沙丘和雅丹记录了末次盛冰期西风环流的风向, 中西部地区的沙丘和雅丹记录了晚全新世以来西北向亚洲冬季风的风向。

3) 柴达木盆地沙丘运移方向反映的古风向年代为 4000 aBP 左右的晚全新世, 大气环流模式的转

变发生在 4000 aBP 左右, 此时气候从温暖湿润转向寒冷干燥。携带冷干气流的西北冬季风加强, 全新世晚期柴达木盆地逐渐干旱化, 奠定了现代沙丘地貌的基本格局。

4) 通过计算柴达木盆地一年内的风场数据, 得到柴达木盆地 2015 年全年最大风速为 8.0 m/s, 最小风速为 0.7 m/s, 平均风速为 3.7 m/s, 风向比较单一, 主要为北西-南东向。

参考文献

- [1] 汪品先. 全球季风的地质演变. 科学通报, 2009, 54(5): 535-556
- [2] 李颖. 黄土高原西北部末次晚冰期以来古季风演变过程[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
- [3] 张登山, 高尚玉, 鲁瑞洁, 等. 青海高原沙漠化土地及其变化研究//地貌·环境·发展——2004 丹霞山会议文集. 北京: 中国地理学会, 2004: 203-206
- [4] Xiao L, Wang J, Dang Y, et al. A new terrestrial analogue site for Mars research: the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 2016, 164: 84-101
- [5] 曾永年, 冯兆东, 曹广超. 末次冰期以来柴达木盆地沙漠形成与演化. 地理学报, 2003, 58(3): 452-457
- [6] 李雪峰. 罗布泊红柳沙包有机质 C、N 和 C/N 记录的环境信息研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009
- [7] 牛清河, 屈建军, 李孝泽, 等. 雅丹地貌研究评述与展望. 地球科学进展, 2011, 26(5): 516-527
- [8] 李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌沉积物粒度特征研究. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1187-1192
- [9] 鲍锋, 董治宝, 张正偲. 柴达木盆地风沙地貌区风况特征. 中国沙漠, 2015, 35(3): 549-554
- [10] Mckee E D. Structures of dunes at white sands national monument, new Mexico (and a comparison with structures of dunes from other selected areas). *Sedimentology*, 2010, 7(1): 3-69
- [11] 黄鹏展, 赵建平. 沙丘移动的研究现状与未来研究思路. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(1): 1-5
- [12] Owen L A, Finkel R C, Ma H, et al. Late Quaternary landscape evolution in the Kunlun Mountains and Qaidam Basin, Northern Tibet: a framework for examining the links between glaciation, lake level changes and alluvial fan formation. *Quaternary International*, 2006, 154(5): 73-86
- [13] 陈涛. 末次冰消期以来柴达木盆地东部风成沉积记录的气候变化[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015
- [14] 刘星星, 宋磊, 金彦香, 等. 青藏高原全新世风沙活动历史与环境变化. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 41-47
- [15] 于禄鹏, 赖忠平, 安萍. 柴达木盆地中部与西南部古沙丘的光释光年代学研究. 中国沙漠, 2013, 33(2): 453-462
- [16] 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠更新世古风向变化及环境意义. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 118-122
- [17] 郑本兴, 张林源. 玉门关西雅丹地貌的分布和特征及形成时代问题. 中国沙漠, 2002, 22(1): 40-46
- [18] 刘立安, 姜在兴. 四川盆地古近纪沙漠沉积特征及古风向意义. 地质科技情报, 2011, 30(2): 63-66
- [19] 刘立安, 姜在兴. 古风向重建指征研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1099-1106
- [20] 安芷生, 吴国雄, 李建平, 等. 全球季风动力学与气候变化. 地球环境学报, 2015(6): 341-381
- [21] 郝永萍, 方小敏, 胡双熙, 等. 柴达木盆地东缘晚更新世气候变化的(古)土壤发生记录. 地理科学, 1998, 18(3): 249-254
- [22] 牛光明. 近 5000 a 柴达木盆地东南缘风成沉积记录的冬季风演化[D]. 兰州: 兰州大学, 2010
- [23] 陈忠, 马海州, 曹广超, 等. 尕斯库勒地区晚冰期以来沉积记录的气候环境演变. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 131-138
- [24] 张占峰, 张焕平, 马小萍. 柴达木盆地平均风速与大风日数的变化特征. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 90-94