

古风向重建指征研究进展

刘立安¹, 姜在兴²

(1. 东北大学秦皇岛分校环境科学与工程系, 秦皇岛 066004; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘 要:古风向的重建是古大气环流研究的重要内容,具有重要的古气候意义。目前对古风向的恢复所使用的地质指征包括风成地貌的形态、风成沉积物空间分布特征、风力作用产生的结果等,通过对这些指征识别和判断来重建古风向。本文对现有的古风向研究中的指征进行了总结归纳,可以将其分为直接指征、间接指征和其他类型指征。从时间尺度上看,第四纪以来的指征较多,方法多样,第四纪以前的地质指征数量相对较少,但研究应用仍很广泛;从空间尺度上看,干旱气候区的指征较易于获得,而湿润气候区指征匮乏,且适用较为严格。探寻新的古风向重建指征是古风向研究亟待解决的中心问题。

关 键 词:古风向;古气候;重建指征

1 引言

全球气候变化是当今科学研究的热点。恢复古气候和古环境变化资料,是研究未来气候和环境演变的基础,也能够根据在该种气候条件下可能形成的矿产,指导矿产资源的寻找和勘探^[1]。在以往的古气候重建过程中,常用的大部分指征主要反映气温和降水的状况,而对于与气温和降水同样重要的古大气流场则研究较少^[2],究其原因,主要是研究手段匮乏,难于挖掘保存有古大气流场信息的地质资料,所以长期以来古大气流场的研究,在古气候研究中一直都处于次要地位。但由于大气环流是控制气候的重要因素之一,不仅是气候的影响因子,而且其本身就是气候特征的一个重要方面,古大气环流样式的恢复对了解古气候特征及演化有着至关重要的作用,这也是研究全球变化无法回避的问题。古风向是古大气环流的重要内容,是古大气环流的直接记录,它的重建能够清晰明了地刻画古大气环流样式。20世纪70年代以来,古风向重建越来越得到科学家的重视,并由此出版了一系列专著^[3-7],而重建古风向的关键问题就是指征的识别和获取。

2 古风向重建的直接指征

2.1 利用风成地貌特征重建古风向

风力作用对地表的影响,最直观的就是各种风力作用下的形成的风成地貌特征,包括风蚀地貌和风积地貌。风蚀地貌形态主要受风力作用控制^[4,8],其形态调整也是风力作用的结果^[9]。例如风蚀脊、风蚀沟谷和风蚀线的走向和风向一般保持一致^[5],这些都是非常直接的古风向重建指征,但是风蚀地貌易被破坏,难以长期保存,一般只能反映全新世以来的风向。Brookes^[10]在重建埃及西部沙漠风向时将用于古风向恢复的风蚀地貌主要分为两类:

(1) 风力侵蚀线性地貌

风力侵蚀线性地貌主要指平行的,非流线型的沟脊组合和流线型的雅丹地貌,他们在地貌上表现出的侵蚀方向和风力方向是一致的。

(2) 风力摩擦带

风力摩擦带是表层沉积物或基岩被风力刻划的地带,长可达数百公里,宽也可达5 km,在悬崖后的强风区尤为明显,在这个地带,漆面和氧化膜被磨蚀而且本身就难以形成,和相邻地区相比在颜色上较浅,而且有着明显的边界,方向主要平行于风

收稿日期:2011-03; 修订日期:2011-06.

基金项目:国家科技重大专项项目(2009ZX05009-002);教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目(IRT0864)。

作者简介:刘立安(1980-),男,讲师,主要从事沉积学、古气候学研究。E-mail: liuli-an@qq.com

通讯作者:姜在兴,男,博士,教授。E-mail: JiangZX@cugb.edu.cn

向,这个地带易受风力影响而发生变化,一般只能指示1万年以来的风向^[11]。

风积地貌中最易识别并可用来重建风向的就是横向和纵向沙丘。吴正曾经做过沙丘特征与风向之间关系的详细论述^[12]:

(1) 横向沙丘

横向沙丘最常见的是由单一风向或两个相反风向下形成的新月形沙丘和沙丘链。新月形沙丘两侧有顺风向前延伸的两个尖角,高度一般在数米至十余米。迎风坡为凸坡,较平缓,坡度约 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$;背风坡为凹坡,较陡,坡度约 $28^{\circ} \sim 34^{\circ}$ 。

(2) 纵向沙丘

纵向沙丘在单一风向作用下形成的沙垄和复合型沙垄,沙丘形态的走向与起沙风的方向基本一致,长条状展布,最长达数十千米,高约数十米,宽数百米。在第四纪研究中,可通过直接观察或者遥感影像统计某一地区的沙丘走向,重建风向^[13-16]。

在第四纪以前的研究中,由于横向沙丘的分布比纵向沙丘广泛,而且纵向沙丘难以准确界定,所以一般使用横向沙丘,但由于埋藏时代较远,不能通过简单的观察沙丘的总体形态来判断沙丘走向,Holz等在利用横向沙丘重建巴西南马托格罗索早白垩时期的古风向时,是将沙丘的顶部层理倾向进行统计得出古风向,这种可用来恢复的地质历史时期的完整沙丘并不常见,需要一定的保存条件^[11]。沙丘下风向发育羽状沙沉积,其整体形态伸展方向和建造风向一致,是重建风向的地貌指征之一^[17]。风积地貌除了沙丘以外,流沙地貌也可用来重建古风向,流沙地貌同样也是受风力作用控制,其长轴指向的平均值和风向基本一致,在遥感影像上这种地貌特征尤易识别,通过数理统计的方法就可以重建风向,但这种指示方法一般也只能应用于全新世以来的古风向重建^[10]。

2.2 利用风成沉积物恢复古风向

风成沉积物是在风力搬运作用下形成的。风成沉积物本身的组分特征、沉积构造和沉积序列,包含了大量的古气候信息。目前用来重建古风向的风成沉积物主要有:风成沙(砂岩)、黄土沉积、红粘土,火山灰等。

在野外和钻井岩心中观察到的风成沙丘内部的交错层理,可用来指示沙丘的形态和移动方向,从而成为一种良好的古风向指征被广泛运用^[18],横

向沙丘^[19]的交错层理多为板状,前积纹层长而平整,倾向大多指向下风向;通过对风成沙沉积特征的研究,判断古沙丘是否为横向沙丘,并运用前积层倾向来重建古风向已经成为一种非常常用的方法。随着这一方法的应用和发展,具有高角度交错层理的风成砂岩也被作为一种古风向重建指征,并得到了广泛认可。这类风成砂岩在地质历史时期能够长期保存,且在干旱-半干旱地区以及海(湖、河)岸物源供给充分地区分布较为广泛。对这一指征的运用,有两点必须特别注意:①风成砂岩的正确识别,②层理倾角的科学测量。

风成沙或砂岩的识别,目前研究者一般有以下5种判定方法:①砂岩具有大规模的交错层理,这可以单独作为风成砂岩辨别的证据,但要区别于水下砂体;②颗粒有很高的磨圆度,③很好的分选性,④具有风成特征的石英微颗粒形态,⑤矿物组成上往往缺少易风化成份如云母等^[20],一般而言,判别风成砂岩最好是在这几个方面都能有相应的证据,综合识别才不至于误判。

Scherer等通过实践总结了风成砂岩倾向测量的方法:在露头上随机选取间隔测量;按地理单元和地层单元将测量值归类分组,每组测量值不少于16个;将结果绘制玫瑰花图,并给出稠度因子^[21]。目前,利用风成砂岩的倾向重建古风向已经成为运用最广泛的方法之一,尤其是重建第四纪以前时期的古风向^[22-25]。Arbogast在对美国堪萨斯中部中全新世以来的沙漠研究发现,风成沙中的碳酸盐成份在风力搬运过程中被磨损和以及破碎使其含量从风沙来源区向下风向逐步递减,用Ca和Sr化合物含量作为标志,通过测定就可以确定古风向^[26]。Langford和Wang等在研究中都认为灌丛沙堆中的粗颗粒组分的区域平面分布和风向有着密切的关系^[27-28],Seifert对美国中南部灌丛沙堆实际测量值表明粗颗粒组分含量具有向下风向递减的规律,这一方法用来重建古风向也是可行的^[29]。

黄土、极地冰芯、深海沉积物被认为是人类了解地球自然历史的三把金钥匙。以风成作用为主形成的黄土沉积中保存着的黄土-古土壤系列,它们的时间和空间分布规律有明显的区域性特征,揭示着古气候信息,是古大气环流研究的重要对象。Buggle等在对东南、东欧黄土与多瑙河、第聂伯河等黄土可能来源区的矿物和元素成分进行分析对比,获得了比较吻合的结果,因此认为通过源区对

比可以重建古风向^[30]。

黄土粒径和风力作用也是相关的,黄土高原不同剖面的研究显示黄土粒径含量的变化,北部砂质、中部粉砂质和南部的粘土质含量相对其他地区略高^[31-33],因此黄土高原的源区极可能是位于北部的蒙古或甘肃沙漠地区^[34-35],也就推测出了古风向。黄土的平均粒径和粗组分粒径平均值同样也反映了这种变化特点^[36-37]。利用同期沉积的黄土粒径平面分布来重建古风向已经成为研究古大气环流的一个重要方法^[38]。

沉积于黄土层之下的红粘土,同样吸引着科学家的目光,许多学者认为红粘土也是类似于黄土的风成沉积物^[39-40],黄土研究中重建古风向的方法也适用于红粘土,根据对其组分和粒度的分析,也能够获得古风场的相关信息^[41]。Miao等^[42]在黄土高原550 km的距离上采集了6个不同地区的红粘土样品,对样品的主体粒度和单石英矿物粒度进行了研究,发现颗粒粒径有自北向南减小的特点,说明当时搬运红粘土的风向很可能是北风(或含有向南矢量的风)。

火山喷发时将火山灰中的细粒喷入高空,这些细粒在风力作用下,降落到地表形成长可达1000 km,宽可达250 km的细长羽状分布,这种风成的火山灰同样可以指示古风向,羽状层的厚度和粒径平均值从源区沿轴线向下风向逐渐减小^[443],Jurado-Chichay等在对新西兰Okataina火山地区研究后认为火山灰厚度的分布和盛行风向有着密切的关系,从喷发区向下风向厚度逐渐递减^[44]。Bryan等的研究认为火山灰中同粒径颗粒中,浮石由于密度较小,能够在风力作用下漂浮更远,通过含量比例的分析,也可以用来重建古风向^[45],同时火山灰组分中晶质-岩屑-非晶质比率也会随搬运距离而发生系统性改变^[18]。

Graham在1954年就提出磁组构分析方法^[46],但早期的研究主要集中在估测岩浆流向^[47]和构造应力方向上^[48]。Heller等最早将磁组构研究方法应用于黄土沉积,并用来评估了洛川黄土沉积时间上的均一性^[49]。之后磁组构分析被运用于重建古风向^[50-52]。吴海斌等的风洞模拟实验进一步证明了风成沉积物磁化率长轴方向和风向有较好的对应关系,其偏差不超过20°^[53]。Zhu等和Pan等的研究发现末次间冰期沉积物的天然剩磁方向有着高度的统一性,说明沉积物天然剩磁方向和沉积过程的关

系更加紧密,沉积后作用对其影响较小^[54-55]。吴汉宁等在对黄土样品的磁化率各向异性研究后也认为,风成黄土磁组构机制主导因素是沉积时空气介质的流动,其磁化率各向异性最大磁化率方位与气流方位平行^[56],可以用来重建古风向^[57]。但是沉积物中磁组构依然要受到多种因素的影响,很可能会影响重建古风向的结果^[58-59],所以重建古风向的样品最好是干旱-半干旱地区的很少受到扰动的风成沉积物^[60]。湿润地区,生物扰动强烈或成土化明显的样品很难得到满意的结果^[61-62]。目前这种方法应用愈加广泛,已成为利用风成沉积物重建古风向常用的方法之一^[63-65]。

Marx等^[66]在研究新西兰南阿尔卑斯山冰川上的粉尘时,对沉积物中39种痕迹元素和可能的澳大利亚源区进行高精度成分数据的对比分析,建立了一种比较可靠的通过痕迹元素来判断风尘沉积物源区的方法。McGowan等认为这种通过粉尘中的痕迹元素来判断沉积物的来源从而恢复古风向的方法,和常规方法(如粒径大小、矿物学特征等)相比,更具优势^[67]。Kawahata等对比了中北纬太平洋的H3571号取芯样品中沉积物和亚洲黄土的痕迹元素,认为这是重建20万年以来亚洲古风向的一个很好方法^[68]。

2.3 风成岩石指示古风向

在风力强劲的干旱-半干旱地区,风力带动颗粒在近表层做跳跃运动,非常容易磨损岩石的表面,在经过足够长的时间后,这些岩石表面会出现麻点、凹槽和沟纹,这些风力作用形成的微结构也成为重建风向的良好指征^[69],岩石表面的这种划痕方向是和风向一致的,通过观察这些特征就可以知道现在和过去这一地区风向的变化情况^[70]。Christiansen等对丹麦31个原地以及20个经过定向的风蚀巨石的磨蚀痕迹进行了细致研究,利用风蚀槽线和风蚀面重建了距今17ka~22ka时期的古风向^[71]。

有些散布在荒漠或戈壁滩上的岩石,经风沙长期磨蚀,会一个或几个平坦光滑的平面,有非常尖锐的棱线将其分隔,称之为磨蚀面^[72],磨蚀面的形成和岩石原来的形态无关,主要是被和它垂直方向吹来的风磨蚀而成^[73],通过观察磨蚀面就可以知道该地区的主导风向,但具有多个磨蚀面的岩石并不一定说明这里是多风向区,也有可能是较小的风棱石发生漂移或翻转,只有那些大的不易移动的风棱石才是风向的良好指征^[74]。

3 古风向重建的间接指征

风力除了直接作用于沉积物,还可以驱动其他介质运动并在沉积物中留下可以重建古风向的痕迹,面积广阔的地表水体就是一种常见的联系风力和沉积物的介质。各种地表水体中,海洋受潮汐、洋流等因素影响,海水运动复杂,很难区分出单纯的风力驱动作用,河流水体运动更是难以区分,只有湖泊水体运动相对简单,在特定条件下通过细致分析可以提取出重建古风向的指征。

3.1 湖泊沉积中的波痕

波痕是指非粘性的物质在波浪、水流或风的作用下,在其表面形成的波状起伏的痕迹。Pochat 等重建法国洛代夫盆地二叠纪时期的古风向,就从波痕和风向之间的内在联系入手,湖泊波痕一般是3种波浪作用的产物,即风浪、回流和沿岸流,作者首先研究了波痕的沉积特征、古地貌以及古水深,再分析了他们之间的相互关系,提取出单纯由风浪作用形成的波痕,最终根据这类波痕的波脊走向垂直于风向的特点重建了古风向^[75]。

3.2 沙嘴

沙嘴都发育在湖海的凸岸,其延伸方向一般和泥沙纵向运动方向保持一致,受古水流控制。在开阔湖泊风驱水流的作用下,沙嘴的延伸方向反映了其形成时的古风向。Krist 等^[76]利用阿尔冈昆湖的沙嘴沉积重建了11000年前的古风向。由于湖水运动的复杂性,正确识别风驱水流控制的沙嘴是采用这种方法的前提。

3.3 后滨带叠瓦状排列的砾石

Tanner 在对加拿大爱德华王子岛周边的后滨带开展研究时发现,在部分开阔的海滩处,成叠瓦状排列的砾石倾向和碎屑后的风影沙波方向一致,这种叠置形态是由碎屑颗粒在风力作用下选择性移动造成的,这种结构提供了一种新的重建古风向的方法^[77]。

4 其他古风向重建指征

森林中的树木在强风吹袭时,有的枝条被吹断,有的则是被风吹倒,树木枯死后,往往也是在风力作用下发生倾倒,这些树木的倒向一般和当地的主导风向是一致的,在沉积地层中发现这些指征的时候,就可利用树木倾倒的方向来重建古风向^[78]。

尽管当时的地形坡度、阵风以及无风条件下树的自然死亡都会对这个指征的运用产生干扰,但经过统计学分析和地形校正还是可以得到令人满意的结果^[79]。Wnuk 等^[80]运用宾夕法尼亚系煤层中的植物化石重建了古风向,Allen 用此方法对英国中全新世的风向做了详尽研究^[18, 78-79, 81]。

沉积层面构造也会保存风力作用信息,Robb 研究认为雨痕微形态特征受降雨时风向引起的水滴撞击方向影响,这种形态特征正是反映了降雨时的风向^[82]。

5 结论与展望

一个地区的气候不仅包括温度和湿度,还包含该地区的风场特征^[83]。古风向是一个区域的古大气环流状态的直接反映,通过对其研究能使我们对于古气候有更加全面的了解。但在古气候研究中,相对于气温和降水,古风向还显得很不足,关键是重建指征不够丰富。现有的古风向重建指征主要分布在干旱-半干旱地区,时间跨度上以第四纪和新近纪为主,这就制约了古风向研究在古气候研究中的作用,例如东亚季风何时起源的证据还主要依赖于区域间干湿情况变化的研究^[84],到目前为止还没有古风向资料来直接展示这种由行星风系到季风的转变。使古风场在古气候研究中发挥更为重要的作用只有进一步丰富古风向的重建指征。Allen 指出一种古风向指征真正成为有效的古气候工具,需要满足以下4个条件:①普遍合理性;②具有很高的地质保存潜力;③易识别和测量;④唯一指示性或者至少能满足统计学解释^[18]。

地表植被和水体都会减弱风力对沉积物的直接作用,在流水作用强烈的地区,风力作用痕迹往往被破坏而难以保存下来,这使得古风向重建的直接指征更易在风力作用强烈又少有其他地表作用破坏的干旱-半干旱地区被发现。在气候潮湿地区只有少数物源充足,条件适宜的海岸^[85]、湖岸^[86]和河岸^[87]发育沙丘这类直接指征,在大多数地区都缺乏或难以保存古风向直接指征。在缺少直接指征的地区重建古风向是古风场研究必须解决的难题,地球水体面积占表面积的70%以上,风生水流,水作为风力作用和沉积物之间的桥梁日益受到重视。一方面水成沉积物易于保存,另一方面,许多水体分布区正是风力直接指征缺乏的气候潮湿地区。

从现有的研究成果来看,目前还无法区别出多动力条件下的风力作用痕迹,古风向重建只能在受径流影响较小的湖泊里展开,而且所使用的沉积物类型有限。进一步发掘风力作用与沉积物沉积特征的联系,在水成沉积物中获得更多的风力作用信息,在复杂条件下准确提取出风力作用因子,获得重建古风向指征,这将是未来研究的一个重要方向。同时也不能忽视其他类型的重建指征寻找,文中提到的风吹倒的树就大大扩展了重建古风向的研究区域,而雨痕形态则给我提供了一种研究不同时间尺度风场的新思路,各种类型的指征都具有相当重要的意义。在当前古风向重建的研究中,增加指征数量是中心内容,稳固风成沉积物,发掘水成沉积物,探索其他类型沉积物,使古风向研究能够整合各个时期,各类地域,还原全球大气环流演化过程,使其在古气候研究中起到应有的作用。

参考文献

- [1] 赵锡文. 古气候学概论. 北京: 地质出版社, 1992.
- [2] 王勇, 潘保田, 高红山. 祁连山东北缘黄土磁组构记录的古风向重建. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1161-1166.
- [3] Cooke R U, Warren A. *Geomorphology in Desert*. Los Angeles, California: California University Press, 1973.
- [4] Allen J R L. *Sedimentary Structure: Their Character and Physical Basis*. Amsterdam: Elsevier, 1982.
- [5] Greeley R, Iversen J D. *Wind as a Geological Process*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [6] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. London: Academic Press, 1987.
- [7] Pye K, Tsoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. London: Unwin Hyman, 1990.
- [8] Laity J E. Landforms of aeolian erosion//Abrahams A D, Parsons A J. *Geomorphology of Desert Environments*. London: Chapman & Hall, 1994: 506-535.
- [9] Tewes D W, Loope D B. Palaeo-yardangs: wind-scoured desert landforms at the Permo-Triassic unconformity. *Sedimentology*, 1992, 39(2): 251-261.
- [10] Brookes I A. Geomorphic indicators of Holocene winds in Egypt's Western Desert. *Geomorphology*, 2003, 56(1-2): 155-166.
- [11] Holz M, Soares A P, Soares P C. Preservation of aeolian dunes by pahoehoe lava: An example from the Botucatu Formation (Early Cretaceous) in Mato Grosso do Sul state (Brazil), western margin of the Paraná Basin in South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, 25(3): 398-404.
- [12] 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987.
- [13] Clarke M L, Rendell H M. Late Holocene dune accretion and episodes of persistent drought in the Great Plains of Northeastern Colorado. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(10-13): 1051-1058.
- [14] Segalen L, Rognon P, Pickford M, et al. Reconstitution of dune morphologies and palaeowind regimes in the Proto-Namib since the Miocene. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 2004, 175(6): 537-546.
- [15] Bristow C S, Hill N. Dune morphology and palaeowinds from aeolian sandstones in the Miocene Shuwaihat Formation, Abu Dhabi, United Arab Emirates: Proceedings of, Al Ain, U Arab Emirates, 1995.
- [16] Markewich H W, Litwin R J, Pavich M J, et al. Late Pleistocene eolian features in southeastern Maryland and Chesapeake Bay region indicate strong WNW-NW winds accompanied growth of the Laurentide Ice Sheet. *Quaternary Research*, 2009, 71(3): 409-425.
- [17] Roberts D L, Bateman M D, Murray-Wallace C V, et al. West coast dune plumes: Climate driven contrasts in dunefield morphogenesis along the western and southern South African coasts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 271(1-2): 24-38.
- [18] Allen J R L. Palaeowind: geological criteria for direction and strength. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1993, Series B(341): 235-242.
- [19] 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*, 1966, 7: 3-69.
- [20] Svendsen J, Stollhofen H, Krapf C B E, et al. Mass and hyperconcentrated flow deposits record dune damming and catastrophic breakthrough of ephemeral rivers, Skeleton Coast Erg, Namibia. *Sedimentary Geology*, 2003, 160(1-3): 7-31.
- [21] Scherer C M S, Goldberg K. Palaeowind patterns during the latest Jurassic – earliest Cretaceous in Gondwana: Evidence from aeolian cross-strata of the Botucatu Formation, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 250(1-4): 89-100.
- [22] Poole F G. Wind directions in Late Palaeozoic to middle Mesozoic time on the Colorado Plateau. US Geol Surv Prof Pap, 1962, 450-D: 147-151.
- [23] Bigarella J J, Eeden O R V. Mesozoic paleowind patterns and the problem of continental drift. *Bol Parana Geociencia*, 1972, 28-29: 115-143.

- [24] Peterson F. Pennsylvanian to Jurassic eolian transportation systems in the Western United States. *Sediment Geol*, 1988, 56(1-4): 207-260.
- [25] Uličný D. A drying-upward aeolian system of the Bohdašín Formation (Early Triassic), Sudetes of NE Czech Republic: record of seasonal and long-term palaeoclimatic change. *Sediment Geol*, 2004, 167(1-2): 17-39.
- [26] Arbogast A F, Muhs D R. Geochemical and mineralogical evidence from eolian sediments for northwesterly mid-Holocene paleowinds, central Kansas, USA. *Quaternary International*, 2000, 67(3-4): 311-326.
- [27] Langford R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U.S.A.. *Journal of Arid Environments*, 2000, 46(1): 25-41.
- [28] Wang X, Wang T, Dong Z, et al. Nebkha development and its significance to wind erosion and land degradation in semi-arid northern China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(1): 129-141.
- [29] Seifert C L, Cox R T, Forman S L, et al. Relict nebkhas (pimple mounds) record prolonged late Holocene drought in the forested region of south-central United States. *Quaternary Research*, 2009, 71(3): 329-339.
- [30] Buggle B, Glaser B, Zöller L, et al. Geochemical characterization and origin of Southeastern and Eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine). *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(9-10): 1058-1075.
- [31] Liu T. *Loess and the Environment*. Beijing: China Ocean Press, 1985.
- [32] Nugteren G, Vandenberghe J. Spatial climatic variability on the Central Loess Plateau (China) as recorded by grain size for the last 250 kyr. *Global and Planetary Change*, 2004, 41(3-4): 185-206.
- [33] Yang S L, Ding Z L. Comparison of particle size characteristics of the Tertiary 'red clay' and Pleistocene loess in the Chinese Loess Plateau: implications for origin and sources of the 'red clay'. *Quaternary Research*, 2004, 51(1): 77-93.
- [34] Sun D, Chen F, Bloemendal J, et al. Seasonal variability of modern dust over the Loess Plateau of China. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D21): 4665.
- [35] Ta W, Xiao H, Qu J, et al. Measurements of dust deposition in Gansu Province, China, 1986-2000. *Geomorphology*, 2004, 57(1-2): 41-51.
- [36] Prins M A, Vriend M G A, Nugteren G, et al. Late Quaternary aeolian dust flux variability on the Chinese Loess Plateau: inferences from unmixing of loess grain-size records. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1-2): 242-254.
- [37] Prins M A, Vriend M G A. Glacial and interglacial eolian dust dispersal patterns across the Chinese Loess Plateau inferred from decomposed loess grain-size records. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(7): Q07Q05.
- [38] Muhs D R, Ager T, Ager E, et al. Stratigraphy and palaeoclimatic significance of Late Quaternary loess-palaeosol sequences of the Last Interglacial - Glacial cycle in central Alaska. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(18-19): 1947-1986.
- [39] Sun D H, Liu T S, Chen M Y, et al. Magnetostratigraphy and palaeoclimate of Red Clay sequences from Chinese Loess Plateau. *Science in China: Series D*, 1997, 40(4): 337-343.
- [40] Ding Z L, Sun J M, Liu T S, et al. Wind-blown origin of the Pliocene red clay formation in the central Loess Plateau, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161(1-4): 135-143.
- [41] Han J T, Chen H H, Fyfe W S, et al. Spatial and temporal patterns of grain size and chemical weathering of the Chinese Red Clay Formation and implications for East Asian monsoon evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(16): 3990-4004.
- [42] Miao X, Sun Y, Lu H, et al. Spatial pattern of grain size in the Late Pliocene 'Red Clay' deposits (North China) indicates transport by low-level northerly winds. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 206(1-2): 149-155.
- [43] Fisher R V, Schmincke H U. *Pyroclastic Rocks*. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [44] Jurado-Chichay Z, Walker G P L. The intensity and magnitude of the Mangaone subgroup plinian eruptions from Okataina Volcanic Centre, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 111(1-4): 219-237.
- [45] Bryan S E, Cas R A F, Martí J. The 0.57 Ma plinian eruption of the Granadilla Member, Tenerife (Canary Islands): an example of complexity in eruption dynamics and evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 103(1-4): 209-238.
- [46] Graham J W. Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element. *Geological Society of America Bulletin*, 1954, 65(12, Part 2): 1257-1258.
- [47] Knight M D, Walker G P L. Magma flow directions in dikes of the Koolau Complex, Oahu, determined from magnetic fabric studies. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(B5): 4301-4319.

- [48] Parés J M, van der Pluijm B A. Evaluating magnetic lineations (AMS) in deformed rocks. *Tectonophysics*, 2002, 350(4): 283-298.
- [49] Heller F, Beat M, Wang J, et al. Magnetization and sedimentary history of loess in the central Loess Plateau of China. Beijing: Science Press, Beijing, 1987.
- [50] Liu X, Xu T, Liu T. The Chinese loess in Xifeng, II. A study of anisotropy of magnetic susceptibility of loess from Xifeng. *Geophysical Journal*, 1988, 92(2): 349-353.
- [51] 孙继敏, 丁仲礼, 刘东生, 等. 黄土与古土壤磁组构测定在重建冬季风风向上的初步应用. *科学通报*, 1995, 40(21): 1976-1978.
- [52] Thistlewood L, Sun J. A paleomagnetic and mineral magnetic study of the loess sequence at Liujiapo, Xian, China. *Journal of Quaternary Science*, 1991, 6(1): 13-26.
- [53] 吴海斌, 陈发虎, 王建民, 等. 现代风成沉积物磁化率各向异性与风向关系的研究. *地球物理学报*, 1998, 41(6): 811-817.
- [54] Zhu R X, Pan Y X, Liu Q S. Geomagnetic excursions recorded in Chinese loess in the last 70000 years. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(4): 505-508.
- [55] Pan Y X, Zhu R X, Shaw J, et al. Can relative paleointensities be determined from the normalized magnetization of the wind-blown loess of China? *Geophysical Research Letters*, 2001, 106(B9): 19221-19232.
- [56] 吴汉宇, 岳乐平. 风成沉积物磁组构与中国黄土区第四纪风向变化. *地球物理学报*, 1997, 40(4): 487-494.
- [57] Hus J J. The magnetic fabric of some loess/palaeosol deposits. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(16-19): 689-699.
- [58] Hrouda F. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys*, 1982, 5(1): 37-82.
- [59] Tarling D H, Hrouda F. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. London: Chapman & Hall, 1993.
- [60] Tang Y, Jia J, Xie X. Records of magnetic properties in Quaternary loess and its paleoclimatic significance: a brief review. *Quaternary International*, 2003, 108(1): 33-50.
- [61] Hrouda F. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Surveys in Geophysics*, 1982, 5(1): 37-82.
- [62] Tarling D H, Hrouda F. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. London: Chapman & Hall, 1993.
- [63] Hus J J. The magnetic fabric of some loess/palaeosol deposits. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(16-19): 689-699.
- [64] Nawrocki J, Polechonska O, Boguckij A, et al. Palaeowind directions recorded in the youngest loess in Poland and western Ukraine as derived from anisotropy of magnetic susceptibility measurements. *Boreas*, 2006, 35(2): 266-271.
- [65] Lagroix F, Banerjee S K. Cryptic post-depositional reworking in aeolian sediments revealed by the anisotropy of magnetic susceptibility. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(3-4): 453-459.
- [66] Marx S K, Kamber B S, McGowan H A. Provenance of long-travelled dust determined with ultra-trace-element composition: A pilot study with samples from New Zealand glaciers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(6): 699-716.
- [67] McGowan H A, Petherick L M, Kamber B S. Aeolian sedimentation and climate variability during the late Quaternary in southeast Queensland, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 265(3-4): 171-181.
- [68] Kawahata H, Okamoto T, Matsumoto E, et al. Fluctuations of eolian flux and ocean productivity in the mid-latitude north Pacific during the last 200 kyr. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(13): 1279-1291.
- [69] Bridges N T, Laity J E, Greeley R, et al. Insights on rock abrasion and ventifact formation from laboratory and field analog studies with applications to Mars. *Planetary and Space Science*, 2004, 52(1-3): 199-213.
- [70] Knight J. The environmental significance of ventifacts: A critical review. *Earth-Science Reviews*, 2008, 86(1-4): 89-105.
- [71] Christiansen H H, Svensson H. Windpolished boulders as indicators of a late Weichselian wind regime in Denmark in relation to neighbouring areas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1998, 9(1): 1-21.
- [72] Laity J E. Topographic effects on ventifact development, Mojave Desert, California. *Physical Geography*, 1987, 8(2): 113-132.
- [73] Laity J E. Ventifact evidence for Holocene wind patterns in the east-central Mojave Desert. *fur Geomorphologie, Supplement Band*, 1992, 84:1-16.
- [74] Laity J E, Bridges N T. Ventifacts on Earth and Mars: Analytical, field, and laboratory studies supporting sand abrasion and windward feature development. *Geomorphology*, 2009, 105(3-4): 202-217.
- [75] Pochat S P, Van Den Driessche J, Mouton V, et al. Identification of Permian palaeowind direction from wave-dominated lacustrine sediments (Lodeve Basin,

- France). *Sedimentology*, 2005, 52(4): 809-825.
- [76] Krist F, Schaetzl R J. Paleowind (11,000 BP) directions derived from lake spits in Northern Michigan. *Geomorphology*, 2001, 38(1-2): 1-18.
- [77] Tanner L H. Gravel imbrication on the deflating backshores of beaches on Prince Edward Island, Canada. *Sedimentary Geology*, 1996, 101(1-2): 145-148.
- [78] Allen J R L. Trees and their response to wind: mid Flandrian strong winds, Severn Estuary and inner Bristol Channel, southwest Britain. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 1992, 338(1286): 335-364.
- [79] Allen J R L. Windblown trees as a palaeoclimate indicator: regional consistency of a mid-Holocene wind field. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 144(1-2): 175-181.
- [80] Wnuk C, Pfefferkorn H W. A Pennsylvanian-age terrestrial storm deposit: Using plant fossils to characterize the history and process of sediment accumulation. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(2): 212-221.
- [81] Allen J R L. Windblown trees as a palaeoclimate indicator: the character and role of gusts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 121(1-2): 1-12.
- [82] Robb A J. Rain-impact microtopography (Rim): An experimental analog for fossil examples from the Maroon Formation, Colorado. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 62(3): 530-535.
- [83] McIlveen R. *Fundamentals of Weather and Climate*. London: Chapman & Hall, 1992.
- [84] Sun X J, Wang P X. How old is the Asian monsoon system? *Palaeobotanical records from China*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222(3-4): 181-222.
- [85] 刘妙容, 王贵勇, 李森, 等. 海南岛海岸沙丘岩的特征、成因及其环境意义. *中国沙漠*, 2009, 29(6): 1081-1085.
- [86] 李孝荣, 包双喜, 长顺, 等. 内蒙古呼伦湖沙丘带形成原因分析. *内蒙古气象*, 2009(3): 30-31.
- [87] 周兴佳. 和田河中下游沙漠地貌. *干旱区研究*, 1987(1): 9-22.

Advances in the Indicator of Palaeowind Direction Reconstruction

LIU Li'an¹, JIANG Zaixing²

(1. Department of Environmental Science and Technology,

Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The reconstruction of palaeowind direction has been a major concern in the study of palaeo-atmospheric circulation. The present geological indicators for the reconstruction of palaeowind direction include aeolian landform, spatial distribution of aeolian sediments and results of wind force. This paper summarizes the present geological indicators in the study of palaeowind direction, including direct indicators, indirect indicators and other indicators. Time perspective shows that for the period after the Quaternary, there have been more indicators and diverse reconstruction methods while for the period before the Quaternary, less indicators have been observed but widely applied. Space perspective indicates that the indicators can be easily obtained in arid climatic zones, while the indicators in humid climatic zones are relatively rare and the scope of application is limited. Searching for more indicators is a burning issue in the study of reconstructing palaeowind direction.

Key words: palaeowind direction; paleoclimate; geological indicator

本文引用格式:

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.