

鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠旋回、风向和水循环变化*

——白垩纪气候非均一性的证据

江新胜** 潘忠习 谢 渊 李明辉

(成都理工大学沉积地质研究所, 成都 610059; 成都地质矿产研究所沉积与能源地质研究室, 成都 610082)

摘要 温室效应下的气候状态是当前的研究热点. 地史中的温室气候尤其是白垩纪气候究竟是均一还是非均一的问题曾引起了广泛的讨论. 通过对中国鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠的旋回性、古风向转换和水循环变化的分析, 认为白垩纪气候具有极强的周期性, 不仅具有中长周期的变化, 而且还有极强的季节变化, 甚至还有瞬间的变化. 研究表明, 白垩纪气候并非均一.

关键词 鄂尔多斯盆地 白垩纪沙漠旋回 风向变化 水循环变化 气候非均一性

长期以来, 地史时期的温室气候, 尤其是白垩纪气候的均一与否引起了激烈的争论. 早期研究^[1~8]表明, 当时的亚热带已扩展到南北纬 65°左右, 而南北纬 65°~90°地区却被温带气候占据, 两极无冰, 赤-极地温梯度明显减低, 气候变化幅度减小, 季节性不明显, 因而认为当时的气候是温暖均一的. 然而, 气候模拟结果^[9~15]却和前述的认识大相径庭, 尽管两极气温控制在 0 以上, 但海-陆地温梯度仍然极大, 大陆内部冬季仍可达到 0 以下, 大陆边缘气候变化显著, 表明不是“温暖均一”的气候状态. 随着研究的不断深入, 人们已经找到了一些“非均一”的地质证据^[16~24], 认为白垩纪气候并非温暖均一, 不仅具有冷、暖交替的周期变化, 而且还具极强的季节性, 甚至还具冰室

期. 不足的是, 前人的结论多来自中、高纬度的同位素地球化学和生物学的间接证据(其准确性和多解性还有待探讨), 缺少来自中、低纬度大气环流的直接证据. 沙漠是大气环流直接作用的产物, 所记录的沉积旋回、水循环和风向变化是气候变化的直接证据. 据研究^[25,26], 中国白垩纪存在一个横贯东西的北半球中、低纬度沙漠带, 是考察白垩纪气候非均一性的宝贵资源. 因此, 本文试图通过该沙漠带中的鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠沉积的旋回、风向和水循环变化来进一步探讨白垩纪气候的非均一性. 研究结果表明, 白垩纪气候具有极强的周期性, 不仅具有中、长周期的变化, 而且还有极强的季节变化, 甚至还有瞬间的变化. 因此, 本文从大气环流直接记录的角度进一步肯

2003-09-22 收稿, 2004-03-04 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49572113, 40372064)和中国地质调查局“十五”重大地质勘查项目“鄂尔多斯盆地地下水勘查”资助

** E-mail: cdjxinsheng@cgs.gov.cn

定了白垩纪“非均一气候”的存在。

1 沙漠沉积旋回性与气候的非均一性

1.1 水循环对沙漠沉积旋回的控制作用

气候的潮湿与否和地球水循环系统密切相关。对于中、低纬度大陆而言,水循环状态对环境变迁起着至关重要的控制作用。降水量与蒸发量的相互消长直接控制了干旱程度的轻重,即在空间上控制了沙漠的进退,在时间上控制了沙漠沉积的旋回性。水循环对沙漠沉积旋回的控制作用主要是通过潜水面来实现的。降水丰富,潜水面升高;降水减少,潜水面下降。而潜水面的高低直接控制了沙漠尤其是沙丘的活动性。潜水面较低时,地面十分干燥,植被稀少,土壤不发育,物理风化加剧,侵蚀基准面下降,在风的作用下,沙漠不断发育壮大。当潜水面上升,地面干燥程度降低,植被和土壤发育,物理风化减弱,侵蚀基准面上升,沙漠开始退缩。若潜水面继续升高,可形成巨型湿丘间,甚至形成湖泊,导致沙漠消亡。因此,沙漠的发生、发展到消亡的旋回直接反映了当时水循环状态的变化。

中纬度降水主要是靠冷暖气流的相互作用造成的。降水类型主要有两种:一种是西风降水,西风在北上过程中冷却,并遇到南下寒冷的东风形成锋面而降水;另一种是海-陆季风降水,在夏季,陆地温度比海洋高,形成低压区,气流上升,海洋的气流沿地表向内陆流动进行补充,并带来降水。这两种降水形式都有年变化(季节性),前者在冬季较强(即行星季风),而后者在夏季较强(即海-陆季风),分别产生冬湿夏干和冬干夏湿的气候。同时也有中长期的周期性,即冬季风盛行期和夏季风盛行期,造成冬湿夏干或冬干夏湿的气候旋回。这在东亚第四纪气候中的表现是十分显著的。研究区白垩纪古地理格局与现在相似,应该存在行星季风和海-陆季风,也应具有与第四纪相同的干湿气候旋回的气候变化^[27]。

1.2 研究区沙漠沉积的旋回性与气候的非均一性

考虑到降水量随着与海洋的距离增大而递减的特点,也考虑到近海地区气候变化的复杂性,从了解较大规模气候变化的目的出发,选择距海洋较远的

内陆盆地最为理想,即距海洋较远的盆地是考察外循环最理想的地点。根据古地理分析,鄂尔多斯盆地处于东亚腹地,是典型内陆盆地,其主要降水肯定来自海洋的气流。同时,它既位于当时中、低纬度沙漠带的北缘,也位于副热高压带中的东北信风与西风交互作用带之中,又是热带亚热带与温带交接处^[27],降水变化明显,代表性极强。因此,本文将其选作考察白垩纪沙漠沉积旋回性和降水周期性变化的盆地。就目前所掌握的资料看,尚难以区分以西风降水还是以季风降水为主,但从沙漠沉积的旋回性中至少可以分辨出降水的周期性变化,足以反映当时气候的非均一性。

研究盆地为华北陆块西部的一个典型内陆盆地,构造极为稳定,长期处于干旱的环境之中,其白垩纪地层(仅保存Berriasian-Barremian地层,其上被后期抬升剥蚀)分布广泛,以沙漠沉积为主,并夹有多层河湖相沉积,记录了该盆地白垩纪沙漠的多期进退,反映了当时气候的多次变动^[27~33]。研究发现,研究盆地白垩纪沙漠沉积存在着发生、发展、消亡的周期性,在沉积记录上体现为风成沉积与水成沉积交互,沙漠沉积旋回性极其明显。按照沉积环境和床沙形态级别、作用时间长短和旋回的包含性可划分出4个级别的基本旋回:沙漠-湖泊(级旋回)、巨型沙丘-巨型湿丘间(级旋回)、沙丘-湿丘间(级旋回)、沙丘-旱谷(包括短命水坑)(级旋回),分别反映了水循环的长期(百万年以上)、中期(千年~10万年)、短期(季节~1百年)和瞬间(数小时~数天)的变化(图1)。

(1) 沙漠-湖泊旋回与水循环的长期变化 据研究,研究盆地白垩纪沙漠体系发育过程中存在两个风成发育期(宜君组-洛河组和罗汉洞组)和两个水成发育期(环河-华池组和径川组),构成了两个可在全盆地范围内追索的由沙漠到湖泊的级沉积旋回^[31~33](图1(a),图2)。由上述分析可知,该盆地水循环在早白垩世经历了两次从少雨期到相对多雨期的变化,反映了两个由干旱到相对潮湿的气候旋回。地层学研究^[34,35]表明,级旋回1的周期长达6~8 Ma,级旋回2的周期长达17~19 Ma。这两个旋回变化实际上反映了当时的温度的变化。对于西风降水来说,必须在西风增强的情况下才能增加降水,而西风增强

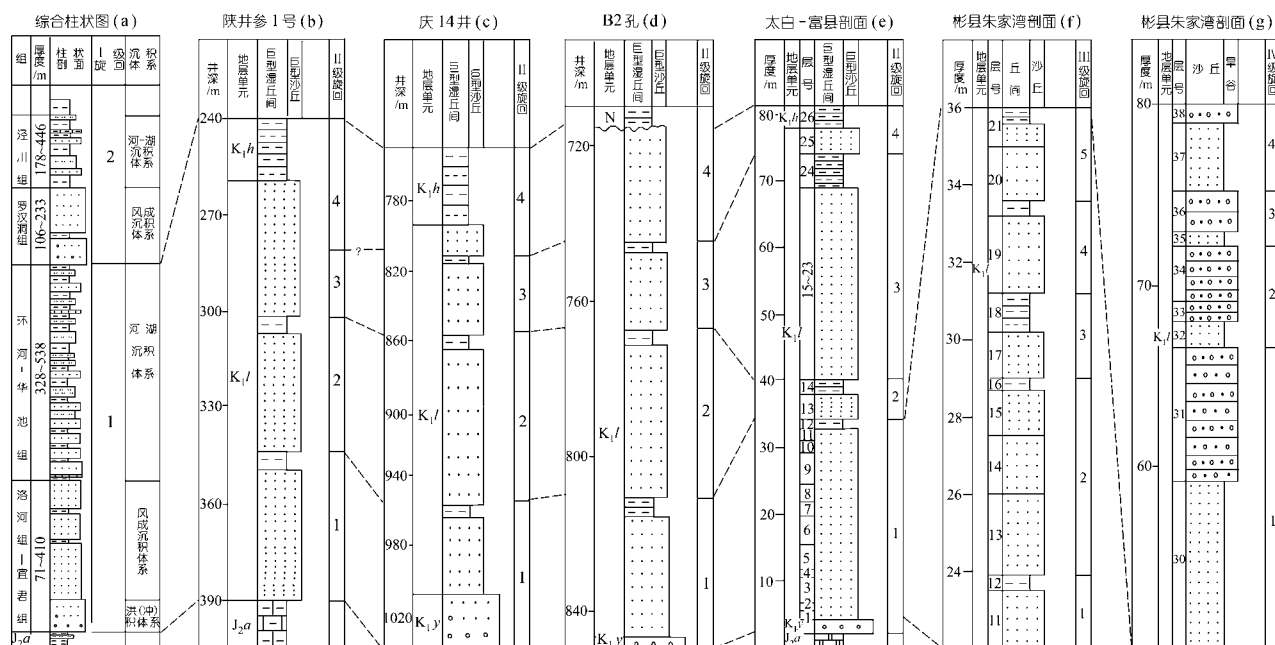


图1 鄂尔多斯盆地早白垩世沙漠沉积体系与旋回划分图

(a) 全盆地综合柱状图, 可见2个由沙漠到湖泊的级旋回; (b)~(d) 级旋回1中的级旋回在井下的情况; (e) 级旋回1中的级旋回在地表的情况; (f) 级旋回1洛河组的一段地层, 显示5个由沙丘到丘间的级旋回; (g) 洛河组上部由旱谷到沙丘的级旋回。J_{2a}, 侏罗纪安定组; K_{1y}, 早白垩世宜君组; K_{1l}, 早白垩世洛河组; K_{1h}, 早白垩世环-华池组; N, 第三系

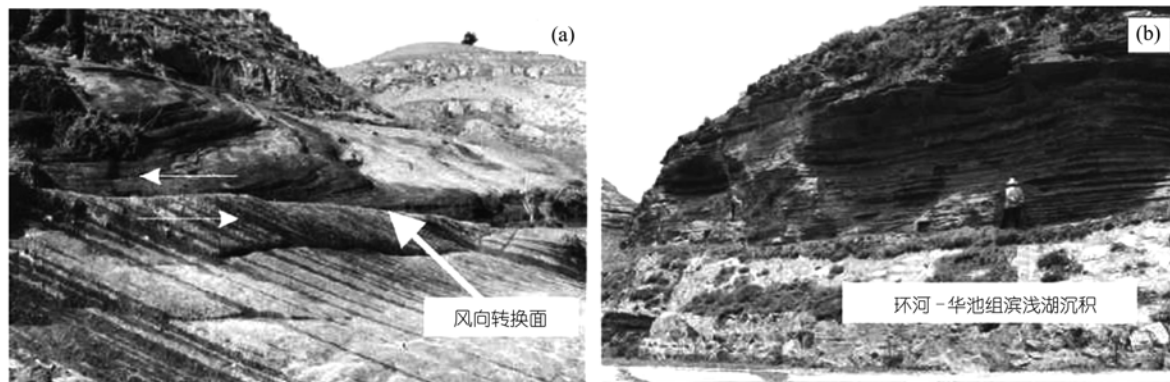


图2 研究区级旋回的沙漠与湖泊沉积露头

(a) 级旋回中的沙漠沉积, 图中所示为洛河组的巨型沙丘沉积; (b) 级旋回中的湖泊沉积, 图中所示为环河-华池组的湖相沉积

一般发生在降温时期, 即相当于东亚季风的冬季风期。这和西风强度的季节变化一样, 冬季最强, 夏季最弱^[36]。对于海陆季风降水来说, 必须在夏季风增强的情况下, 才能增加降水, 而夏季风增强一般发生在高温期, 即相当于东亚季风的夏季风期。虽然目前尚无法区分何种降水造成上述旋回, 但至少可以表明当时的温度存在着长周期的起伏变化。

(2) 巨型沙丘-巨型湿丘间旋回与水循环的中期

变化 在风成盛行期水循环也非一成不变, 可具有中期变化。这种变化的地质记录就是巨型沙丘与巨型湿丘间交互而成的级旋回。这种旋回是研究区中常见的基本层序, 是前述沙漠-湖泊旋回中的次级旋回(图3)。巨型沙丘沉积的特点是, 大型交错层厚度巨大(数米到数十米), 顶、底界面平坦且近于平行, 侧向延伸数千米以上, 交错层系倾向稳定且展开角小, 研究区的展开角小于 10° ^[29]。夹于巨型沙丘沉

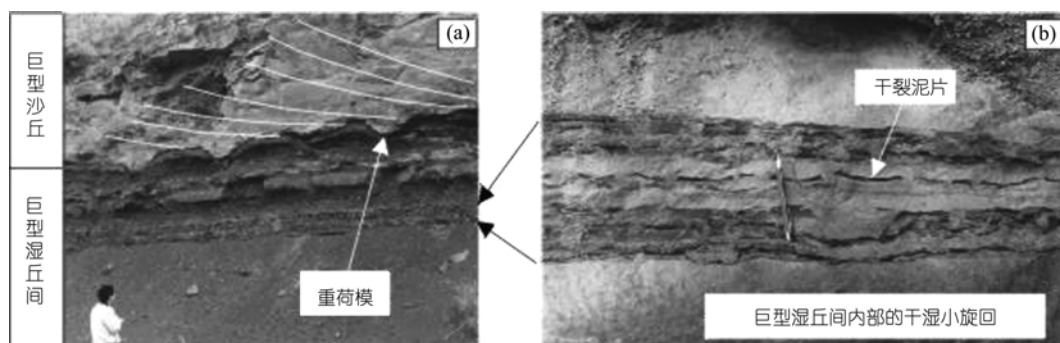


图 3 级旋回中的巨型沙丘-巨型湿丘间露头
(a) 巨型沙丘(上部)和巨型湿丘间(下部)露头; (b) 巨型湿丘间的干-湿小旋回

积的巨型湿丘间沉积厚度较大, 侧向延伸较远, 由于积水时间较长, 生物扰动和蒸发盐沉积发育. 本文仅以级旋回 1 为例, 展示级旋回在地表和井下的基本情况(图 1(b)~(e), 图 3). 从图 1 中可见, 多数剖面具 4 个明显的级旋回, 可能由于测井的分辨率不够, 剖面 b 仅显示了 3 个级旋回, 说明级旋回的可分辨性和可追索性次于级旋回, 但仍然很高. 据 Ahlbrandt 等^[37]研究, 巨型湿丘间是由于潜水面持续升高而形成的具有常年积水的间隙性小湖泊或水塘, 且规模是区域性的, 代表一个沙海的萎缩或分割的超级界面. 在研究区内, 巨型湿丘间的发育往往和沙漠边缘的冲积体系发育期相伴随^[33], 即冲积扇、旱谷等向盆地进积, 而沙丘退积. 说明当时大气降水较为丰富和集中. 考虑到巨型沙丘的迁移速度和寿命^[29,38], 这种旋回应为 1~100 ka 周期, 因而可代表水循环的中期变化. 应该说明的是, 这种时间尺度是正常的构造变化所造成的旋回所不能反映的, 因而是纯气候变化造成的旋回. 同理, 这种变化也反映了当时温度的起伏变化.

(3) 沙丘-湿丘间旋回与水循环的季节变化 同样, 巨型沙丘-巨型湿丘间旋回之中可包含规模更小的级旋回, 即丘间-湿丘间旋回(图 1(f), 图 4). 沙丘实际上是叠加在巨型沙丘之上的次级床沙形态, 与巨型沙丘相比, 沙丘沉积的厚度和侧向延伸较小. 由于积水时间短暂, 蒸发盐沉积不发育, 这种旋回除受到潜水面的控制外, 多数与季节性河流(旱谷)注入有关, 有些是由旱谷直接相变而成, 反映了水循环的季节性变化. 这种变化在巨型湿丘间的间歇性干裂中

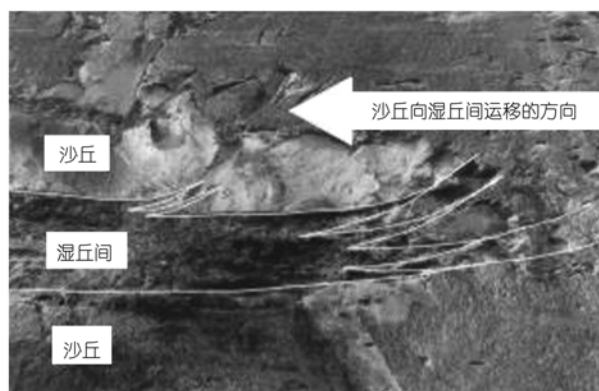


图 4 级旋回中的沙丘-湿丘间露头
图中可见罗汉洞组中的沙丘与湿丘间相互消长的现象, 反映了季节性的干湿气候变化

也得到了充分的体现(图 3(b)). 沙丘的迁移速度每年仅数米, 寿命为 10~100 a^[29,38], 所反映的应为气候的短期或季节性变化. 也就是说, 上述次级旋回不仅记录了水循环的短期变化, 同时也记录了水循环的季节变化. 应该说明的是, 这种旋回中的湿丘间沉积多为露头级别, 最多可追索数十米, 且保留概率较小, 主要取决于上覆沙丘对它的侵蚀程度, 往往仅保存一个丘间界面. 根据气候学原理, 气候的短期或季节性干湿变化也是由温度变化引起的.

(4) 沙丘-旱谷旋回与水循环的瞬间变化 沙漠主要发育于南北纬的副热带高压带和信风带上. 那里的高压系统相对稳定, 但也存在低压降水系统的转换. 以北半球中、低纬度沙漠带为例, 在沙漠带的西缘和北缘, 时有低压降水系统从洋面东侵到大陆内部而产生降水, 且一般发生在冬季. 而在沙漠带的东缘和南缘, 时有低压降水系统北侵至大陆内部而产

生降水,且多发生在夏季.而在干旱带的内部,即使大气环流样式受到了大陆效应的增强,也通常具有小型对流天气的出现,造成迅猛的降水.沙漠降水的频率、强度和时空分布变化极大,具有如下几个特点:第一,降水的空间分布变化极大,因而在沙漠体系中很难有稳定的水系,取而代之的是洪水及早谷的发育,且在何处发生洪水也很难预料.第二,与年均降水量比较,每次暴雨降水量可以非常大.有时一次降水可能大大超过年平均降水量.在 Sahara 沙漠极度干旱区,24 小时的降水可超过 20~30 a 期间的年平均降水量的 3~4 倍.因而其降水和径流与其他环境相比可以高度集中.集中降水之后,伴随有极长的干旱期.第三,在暴雨中降水强度非常大且飘忽不定.如一天中的区域降水量并不大,但在某一地点某一时刻可以非常大.第四,沙漠降水时间分布的强烈变化也是其重要的特点.在干旱地区的地质记录中,确实可以识别出降水的变化,但时间规律并不强.总之,沙漠降水具有突发性、随机性和瞬时性的特点,带有极强的事件色彩.因而,虽然在长期、中期和短期的气候变化中大体可分辨出降水量的变化周期,但具体的降水过程却难以捉摸,常引发特大洪水.这些过程在鄂尔多斯白垩纪沙漠中得到了充分地保存,是沙漠瞬间降水的良好证据.

鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠瞬间降水的主要记录就是旱谷沉积,由泥石流、水道和漫滩三种沉积组成(图 1(g);图 5(a), (b)). 泥石流沉积一般为厚层块状砂砾或泥质砂砾岩,为干旱气候中的暴雨产物.水道沉积的基本层序是:被侵蚀的沙丘沉积→高低不平的冲刷面→大小混杂的滞留砾岩→后正常流水的含砾

砂岩或砾石透镜体→具干裂的粉砂质粘土(泥皮)→底部具重荷变型的沙丘沉积,构成了一个向上变干的层序(图 5(a), (b)). 冲刷面极不平整,侧向起伏极大,代表洪水暴发甚至决口的事件记录.其下的风成沙丘大型交错层理保持完整,有时还可见到一些沙丘的残体.滞留砾石大小不一,最大直径可达 0.5 m 以上,可见当时洪水能量之巨大(图 5(a)). 泥皮为薄层粉砂质粘土,常呈透镜状,具有大量泥裂、雨痕,泥裂常被风成沙充填.上覆沙丘沙大型交错层理发育,与泥皮接触的沙丘沙具众多的重荷变形(图 5(b)),说明当时洪水水位下降迅速,洪水在减弱过程中大量悬移质得以沉淀,而且河床在极短的时间内干枯,产生大量的泥裂,泥质沉积当时处于塑性状态,被沙丘覆盖后,产生重荷变形.漫滩沉积的基本层序自下而上由沙丘沉积、风蚀面或冲刷面、泥皮、沙丘沉积构成(图 5(b), 图 6). 其成因是,在洪水高峰期,在被淹没的丘间中沉积了大量悬移质,洪水下降后由于渗透作用或蒸发作用而快速干枯,形成了大量的泥皮透镜体,其特征与旱谷水道沉积中的泥皮沉积相同.另外,薄层泥皮也可在暴雨形成的积水坑中捕获风成悬移质而成(图 6). 在丘间的泥皮表面甚至还可见到雨痕.因而,每个泥皮的形成均代表一次瞬间降水的天气.应当说明的是,上述沉积与湿丘间沉积有明显区别,由于积水时间极为短暂,不具化学沉淀物,生物也不发育.还应说明的是,这些沉积完全是由地表径流和大气降水造成,与潜水面完全无关.应该说,这些记录是沙漠降水天气的证据,充分反映了沙漠的气候特征.

从上述沙漠的旋回性分析,当时的水循环不仅

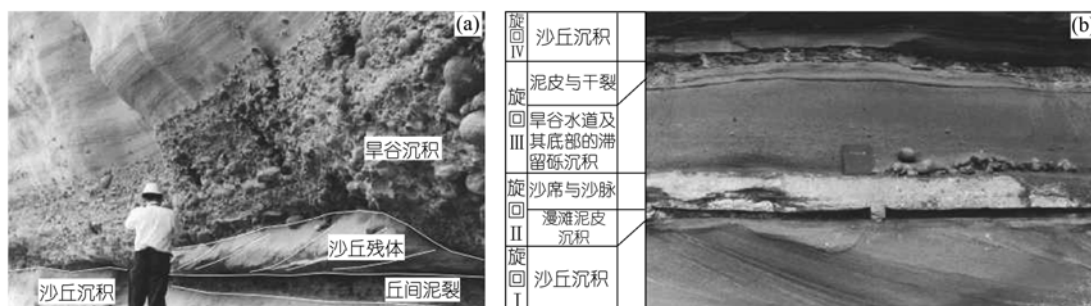


图5 旱谷水道沉积的基本层序

(a) 洛河组中一个由洪水造成的旱谷沉积层序, (b) 洛河组中 4 个向上变干的由风-水反复作用造成的 级旋回



图 6 丘间的间歇性积水坑的泥皮沉积

图中可见两期干裂,表明该水坑经历了两次快速积水和干枯的过程,反映了两次瞬间降水的天气

具有中长期的变化,而且还具有短期甚至季节变化,同时还可见及强降水天气的证据.这说明当时气候变化明显,与现代并无明显区别,气候并非均一.

2 风向变化与白垩纪气候的非均一性

气候变化的直接表现就是大气环流变化.因而,考察气候的非均一性也可以从考察大气环流的变化入手.而大气环流变化的地质记录则体现在风向变化上,因而风向变化与气候非均一性有直接的关系.

根据研究^[29],中国白垩纪沙漠所记录的风向标志有三个级别:巨型沙丘,沙丘和沙波.巨型沙丘反映的古风向代表一个较长时期的累计结果,它仅表示造成巨型沙丘运移的主风向(图 2(a)),其中包括了许多风向变化,地质记录仅保存着其最终状态.沙丘所反映的风向变化较大,主要受地形和局部气流变化的影响.沙波所反映的是气流的瞬时变化,完全受局部地形的控制.因而,巨型沙丘所记录的古风向变化最能代表大区域范围的气候变化^[29].所幸的是,研究盆地所保存的多是巨型沙丘.

从所获的测量数据还可以看出,鄂尔多斯盆地在白垩纪沙漠发育期经历了两个阶段:早期为东北信风与西风交替期,晚期是西风控制期^[27,29].这说明早期东北信风与西风风向切变带在作南北振荡,致使东北信风与西风交替,前述干湿交替就是这样造成的.晚期,切变带南移,使盆地完全被西风控制.这种风向切变带的移动是受赤-极温度梯度控制的,

最小的级别为季节温度变化所造成,因而被称为行星季风.超季节周期的温度变化也可导致切变带的移动.其变化趋势与年季节变化相同.其结果是,温度下降,气候带向低纬度移动;温度上升,气候带向高纬度移动.具体地说,温度下降,干旱带向低纬度收缩;温度上升,干旱带向高纬度扩展^[29,39].研究区白垩纪古风向有两个级别的变化,即中、短期和长期的变化^[27,29].巨型沙丘的寿命和运移速度所反映的应是超季节的中、短期的温度升降变化,风向切变带长周期的迁移所反映的应是长期的温度升降变化.通过所测的古风向趋势分析,当时还存在有海陆季风^[27,29,40].这证明当时存在着海陆温差的季节变化.总之,上述风向变化也表明,当时气候并非均一温暖的,存在温度的升降和相对冷热的变化.

3 讨论与结论

长期以来,人们一直认为地史中温暖无冰期的气候,尤其是白垩纪气候,不仅在时间上稳定不变,而且在空间上也是均一的.之所以将白垩纪气候描述为“均一的”,是因为人们根据同位素地球化学^[4,21]、沉积学^[9]、生物学^[3~7]等研究发现,当时的热带气候已扩张到南北纬 65°左右(已到了极圈附近),而 65°~90°地区却被温带气候占据,两极无冰盖出现,赤-极地温梯度明显减小,气候变化幅度减弱,季节性不明显.Sloan等^[10]认为,用于古气候重建的术语“equable”有两层含意:其一,年温度升降幅度明显降低,季节性不明显;其二,没有极端气候,尤其是没有零下温度,即使在两极也没有零下温度.

然而,气候模拟结果^[9~15]却表明,尽管两极温度在 0 以上,但海-陆温度梯度仍然极大,大陆内部冬季仍可达到 0 以下,且在大陆边缘仍有降水量的明显变化.也就是说,尽管当时海洋的温度可能是均一的,两极海洋可能是温暖的,但大陆内部也不会保持持续温暖的无冰状态,而且在海陆交互地区气候是多变的.所以,温暖的两极海洋和降低了的赤-极地温梯度并不产生全球性温暖均一的气候.事实上,季节性的年变化幅度主要取决于海陆分布、陆地规模和太阳入射能的季节变化.因此,不能认为当时的气候是“均一的”.但模拟者也承认,虽然上述种种模拟均

否定了地史中均一气候的存在, 动摇了“均一论”的基础, 但模拟不可能包括所有物理过程, 尚需地质证据加以证实。

“非均一论”产生之后, 引起了人们的极大关注。许多过去被忽略的现象被重新审定, 发现原来被用来证明“均一性”的数据实际上是存在变化的。同时也由于研究手段的改进和精度的提高, “非均一论”的新证据不时涌现。Frakes^[8]早期也持“均一论”观点, 上述对“均一论”的质疑引起了他的注意, 在后来的研究^[16,17]中发现, 白垩纪气候也具明显的季节性。在重新审定了过去的的数据之后, 他和合作者Francis认为具气候意义的岩石类型的分布, 动、植物群的特征及氧同位素的测量可以证明, 白垩纪包含了地史中最温暖的阶段, 但其气候并非均一温暖的, 而是具有冷暖变化的。在早白垩世高纬度盆地(澳大利亚、极区加拿大、西伯利亚、阿拉斯加)冰筏沉积的发现^[19]进一步说明当时具有季节性寒冷气候。并且, 上述冰筏沉积产有硅化木和冷水钙芒硝状方解石结核。硅化木为针叶林, 其年轮显示了非常明显的季节性, 其晚木和冻伤细胞反映了冬季低温霜冻的气候条件。而钙芒硝状方解石也是低温的证据, 被认为是在 0 水温下结晶出来的^[18]。Crowley等^[19]也认为, 虽然确切的冰川沉积物尚有待发现, 但散见于两半球的早白垩世冰筏沉积至少可以说明当时具有季节性寒冷的气候。早白垩世高纬度超微化石的分异度和丰度分析结果也表明^[20,21], 白垩纪虽然存在全球性温暖气候, 但在Valanginian期仍然存在冰室期。Kemper^[18]认为Valanginian和Aptian/Albian具有冰期, Frakes, 等^[17,22]和Ditchfield^[23]认为白垩纪至少具季节性海洋低温和少量的冰盖, 尤其在Berriasian-Valanginian存在冰室条件或较冷气候, 均和上述观点一致, 不存在温暖均一的气候。Wilson等^[24]通过有孔虫同位素测量, 认为温室效应虽然会使全球温度升高, 但气候是不稳定的。他所展示的同位素曲线具有万年尺度的温度波动, 正好反映了低纬度气候的非均一性。

综上所述, 可以肯定白垩纪气候并非温暖的均一的, 而是具有极强的非均一性, 不仅具有冷暖交替的周期性变化, 而且还具有极强的季节性, 甚至还具有冰室期。然而, 前人的结论多数来自中、高纬度,

且同位素测量尚有许多不定因素, “非均一论”尚需来自中、低纬度大陆内部的大气环流直接证据来验证。运用白垩纪中、低纬度沙漠带的大气环流直接记录, 本研究进一步证明了白垩纪气候的非均一性, 并可得出如下结论:

(1) 鄂尔多斯白垩纪盆地是北半球中、低纬度沙漠带中的一个内陆沙漠盆地, 存在着 4 个级别基本旋回, 自高到低依次为沙漠-湖泊(级旋回)、巨型沙丘-巨型湿丘间(级旋回)、沙丘-湿丘间(级旋回)和沙丘-旱谷(包括短命水坑)(级旋回)。

(2) 这些旋回分别反映了当时水循环的长期(百万年以上)、中期(1~100 ka)、短期(季节到 100 a)和瞬间(数小时~数天)的变化。这些变化在研究盆地白垩纪沙漠沉积体系中得到了良好的保存, 充分体现了内陆沙漠的气候和天气特点, 与现代沙漠的气候特征完全可以对比。

(3) 水循环的周期变化实际上反映了大气环流的周期变化, 即行星季风和海陆季风的强、弱和风带迁移的结果。风向变化测量结果表明, 研究盆地为西风和东北信风控制, 为典型的中、低纬度行星风系。西风和东北信风的交替表明当时存在行星风系周期性的南北迁移, 构成了行星季风体系。

(4) 所有的上述变化均反映了当时温度曾发生了不同周期的升降, 说明当时的气候具有极强的周期性和季节性, 并非温暖均一的。

这种周期性和季节性变化同时也得到了许多其他证据的支持。最有说服力的证据来自于相邻的温带气候带。按照赵锡文^[41]的划分, 古阴山-古燕山以北地区即为温带潮湿区, 松辽盆地就是该带的典型盆地, 含有大量的古气候信息。黄清华等^[42]通过松辽盆地白垩纪植物化石组合分析, 其古气候演变也具旋回性。古气候在逐渐演变中发生了几次突变, 从中可以划分出 4 次古气候的变化: 即Barremian的高温事件、Aptian-Albian的半干旱事件、Cenomanian晚期-Coniacian的高温事件和Maastrichtian早期的干热事件。这些事件均与升温有关, 而事件之间均为相对低温潮湿期。王东波等^[43]在松辽盆地白垩纪红层季节冰筏沉积的发现也说明当时白垩纪在总体温暖的气候状态下也具有季节性寒冷气候, 甚至降到零度以

下. 另外, 程守田等^[44]在鄂尔多斯盆地东北缘发现了早白垩世冰川泥石流沉积, 为季节性寒冷气候的存在提供了进一步的佐证. 刘本培等^[45]也注意到了白垩纪气候的变化, 虽未直接讨论“非均一性”问题, 但也间接地肯定了白垩纪气候的非均一性. 他们认为, 白垩纪气候具有极强的节律性, 在总体温暖气候下出现多次降温、升温 and 干湿气候带空间变迁事件.

实际上, 通过笔者研究, 所有中国白垩纪中、低纬度沙漠盆地均显示了上述变化. 因此, 笔者认为, 尽管在温室效应下全球平均温度有所上升, 赤-极地表面温度梯度有所降低, 但不可能产生温暖均一的气候状态. 从中、低纬度白垩纪沙漠的旋回性、风向转换和水循环变化现象看, 白垩纪气候不仅具有中长期的变化, 而且还有短期的季节变化, 甚至还有瞬间的变化, 根本不存在温暖均一的气候状态.

参 考 文 献

- Bowen R. Faunal realms in Jurassic and Cretaceous Belemnites. *Geol Mag*, 1964, 101: 374~376
- Savin S. The history of the earth's surface temperature during the past 100 million years. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1977, (5): 319~355
- Hughes N. Cretaceous floras and the assessment of past climates. In: Nairn A, ed. *Problems in Palaeoclimatology*. New York: Interscience Publishers, 1964. 44~45
- Barnard P. Mesozoic floras. In: Hughes N, ed. *Organisms and Continents Through Time. Spec Pap Paleontol*, 1973, 12: 175~199
- Vakhrameev V. Main features of phytogeography of the globe in Jurassic and Early Cretaceous time. *Paleontol J*, 1975, 2: 123~133
- Colbert E. Climatic zonation and terrestrial faunas. In: Nairn A, ed. *Problems in Palaeoclimatology*. New York: Interscience Publishers, 1964. 617~638
- Newell R E, Kidson J W, Vincent D G, et al. The General Circulation of the Tropical Atmosphere and Interactions with Extratropical Latitudes. Vol. 1. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1972. 1~258
- Frakes L A. *Climates Throughout Geological Time*. Amsterdam: Elsevier, 1979. 1~310
- Barron E J, Washington W M. Cretaceous climate: comparison of atmospheric simulations with geologic record. *Palaeogeog, Palaeoclim, Palaeoecol*, 1982, 40: 103~133[DOI]
- Sloan L C, Barron E J. "Equable" climates during earth history? *Geology*, 1990, 18: 489~492[DOI]
- Barron E J, Washington W M. Atmospheric circulation during warm geologic periods: Is the equator-to-pole surface-temperature gradient the controlling factor? *Geology*, 1982, 10: 633~636
- Barron E J. A warm, equable Cretaceous: the nature of the problem. *Earth Science Rev*, 1983, 19: 305~338[DOI]
- Crowley T J, Short D A, Mengel J G, et al. Role of seasonality in the evolution of climate during last 100 million years. *Science*, 1986, 231: 579~584
- Crowley T J, Mengel J G, Short D A. Gondwanaland's seasonal cycle. *Nature*, 1987, 329 (29): 803~807[DOI]
- Kutzbach J K, Gallimore R G. Pangaeon climates: Megamonsoons of the megacontinent. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 3341~3357
- Francis J E, Frakes L A. Cretaceous climate. In: Wright V P, ed. *Sedimentology Review*. Oxford: Blackwell, 1993. 17~30
- Frakes L A, Francis J E. A guide to Phanerozoic cold polar climates from high-latitude ice-rafting in the Cretaceous. *Nature*, 1988, 333: 547~549[DOI]
- Kemper E. Das Klima der Kreide-Zeit. *Geol Jahrb*, 1987, A96: 5~185
- Crowley T J, North G R. *Palaeoclimatology*. New York: Oxford University Press, 1991. 1~339
- Mutterlose J, Ruffell A. Milankovitch-scale palaeoclimate changes in pale-dark bedding rhythms from the early Cretaceous (Hauterivian and Barremian) of eastern England and northern Germany. *Palaeogeog, Palaeoclim, Palaeoecol*, 1999, 154: 133~160[DOI]
- Mutterlose J, Kessels K. Early Cretaceous calcareous nannofossils from high latitudes: implications for palaeobiogeography and palaeoclimate. *Palaeogeog, Palaeoclim, Palaeoecol*, 2000, 160: 347~372[DOI]
- Frakes L A, Francis J E, Syktus J I. *Climate modes of the phanerozoic*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 1~274
- Ditchfield P W. High northern palaeolatitude Jurassic-Cretaceous palaeotemperature variation: New data from Kong Karls Land, Svalbard. *Palaeogeog, Palaeoclim, Palaeoecol*, 1997, 130: 163~175[DOI]
- Wilson P A, Norris R D. Warm tropical ocean surface and global anoxia during the mid-Cretaceous period. *Nature*, 2001, 412: 425~429[DOI]
- Jiang Xisheng, Li Yuwen. Spato-temporal distribution of the Cretaceous desert in central and eastern China and its climatic significance. In: *Proceedings of 30th IGC. Vol 8*, Zeist: International Science Publishers, 1997. 66~72
- 董光荣, 王贵勇, 陈惠忠, 等. 中国沙漠形成、演化与青藏高原隆升的关系. 见: *中国青藏高原研讨会论文集*. 北京: 气象出版社, 1995. 13~29
- 江新胜, 潘忠习, 付清平. 白垩纪时期东亚大气环流格局初探. *中国科学, D 辑*, 2003, 30(5): 526~532
- 程守田, 李思田, 黄焱球, 等. 鄂尔多斯盆地地下白垩统风成沉积与内陆古沙漠环境. 见: 李思田, 主编. *含能源盆地沉积体系——中国内陆和近海主要沉积体系类型的典型分析*. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 138~147
- 江新胜, 潘忠习, 付清平. 鄂尔多斯盆地早白垩世沙漠古风向变化规律及其气候意义. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(2):

- 195~201[PDF]
- 30 齐 骅, 李国栋. 鄂尔多斯盆地志丹群沉积时期的古沙漠盆地体系. 西北地质科学, 1996, 17 (1): 63~89
- 31 程守田, 刘 星. 风成古沙漠沉积体系. 地质前缘, 1999, 6 (增刊): 80
- 32 程守田, 刘 星, 郭秀蓉, 等. 古沙漠沉积及其层序单元——以鄂尔多斯盆地白垩系为例. 地球科学, 2000, 25 (6): 587~591
- 33 刘 星, 程守田, 郭秀蓉. 陆相干旱盆地充填的沙漠层序——以鄂尔多斯盆地白垩系为例. 西北地质, 2000, 33 (1): 50~55
- 34 郝诒纯, 苏德英, 余静贤, 等. 中国的白垩系. 北京: 地质出版社, 1986. 1~310
- 35 郝诒纯, 苏德英, 余静贤, 等. 中国地层典——白垩系. 北京: 地质出版社, 2000. 1~124
- 36 高国栋, 陆渝蓉. 气候学. 北京: 气象出版社, 1988. 1~468
- 37 Ahlbrandt T S, Fryberger S G. Sedimentary features and significance of interdune deposits. In: Ethridge F G, Flores R M, eds. Recent and Ancient Nonmarine Depositional Environments: Models for Exploration. Special Publication 31. Tulsa, Oklahoma, USA, 1981. 293~314
- 38 Lancaster N. The development of large eolian bedforms. Sedimentary Geology, 1988, 55: 69~89[DOI]
- 39 殷鸿福, 等. 中国古生物地理学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 1~329
- 40 江新胜, 陈乐尧, 李玉文. 西南区白垩纪-第三纪沙漠及沉积学问题. 岩相古地理, 1992 (5): 1~66
- 41 赵锡文. 古气候学概论. 北京: 地质出版社, 1992. 1~176
- 42 黄清华, 郑玉龙, 杨明杰, 等. 松辽盆地白垩纪古气候研究. 微生物古生物学报, 1999, 16 (1): 95~103
- 43 王东坡, 刘 立, Frakes L A. 白垩纪红尘冰筏沉积的古气候及古地理意义. 岩相古地理, 1996 (4): 6~11
- 44 程守田, 李志德, 黄焱球, 等. 鄂尔多斯东北缘早白垩世冰川泥石流沉积的发现及其成因证据. 地质科技情报, 2002, 21 (2): 40~63
- 45 刘本培, 张世红. 侏罗-白垩纪地球圈层演化节律及相互关系. 地质前缘, 1997, 4 (3-4): 65~74