

# 敦化盆地晚全新世泥炭沉积中植硅体 古气候记录的时频分析

张新荣<sup>1,2</sup>, 方石<sup>1,2</sup>, 胡克<sup>3</sup>, 王东坡<sup>1</sup>

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083)

**摘要:** 沉积地层中古气候参数的多层次性以及解释过程中的人为性使古气候重建结果带有一定的误差。采用 Morlet 一维连续小波变换对敦化盆地吉祥和榆树剖面中植硅体记录的古气候参数进行时频分析, 探讨植硅体反演的古气候变化过程。结果表明, 吉祥剖面在频率域尺度  $a \geq 30$  时的小波变换系数波谱及能量变化与榆树剖面在  $a \geq 20$  时存在相似性, 且均具有 6 个不同能量聚集区域, 因此把敦化盆地晚全新世以来的古气候变迁分为 6 个阶段: 公元前 730 年以前为温暖降温期; 公元前 730—公元前 205 年为温和湿润并逐渐变凉时期; 公元前 205—公元 255 年为温暖时期; 公元 255—525 年为降温变冷时期; 公元 525—1220 年为温暖湿润时期; 公元 1220 年以来进入气候波动比较频繁时期。Morlet 一维连续小波变换可以有效处理古气候信息的叠加, 减小人为性分析带来的误差, 在古气候分析中具有很大应用潜力。

**关键词:** 植硅体; 泥炭沉积; Morlet; 小波变换; 古气候; 全新世; 敦化盆地

**中图分类号:** P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0420-10

## Time-frequency Analysis on Palaeoclimate Recorded by Phytolith at the Late Holocene Peat Deposits in Dunhua Basin

ZHANG Xin-rong<sup>1,2</sup>, FANG Shi<sup>1,2</sup>, HU Ke<sup>3</sup>, WANG Dong-po<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 2. Key Laboratory for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** Diversity of palaeoclimate parameters in sedimentary stratigraphy and its artificiality in interpretation process bring some inevitable errors. Based on Morlet one-dimensional continue wavelet transform, palaeoclimate parameters recorded by phytolith at Jixiang and Yushu profiles in Dunhua Basin were analyzed by time-frequency, change of palaeo-climate was discussed. The results showed that the wavelet spectrum and energy change at Jixiang profile with no less than 30 frequency scales were similar with that at Yushu profile with no less than 20 frequency scales and both profiles had six different energy aggregation regions. Changes of palaeoclimate since the Late Holocene in Dunhua Basin was divided into six stages: before BC 730, warm and cooling period; BC 730-BC 205, mild, humid, and gradually cooling period; BC 205-AD 255, warm period; AD 255-525, cooling period; AD 525-1220, warm and humid period; after AD 1220, a stage with more frequent fluctuations. Morlet one-dimensional continue wavelet transform could deal with the superposition of palaeoclimate records effectively and reduce the artificial error, enjoy huge potential for application in palaeoclimate research.

**Key words:** phytolith; peat deposit; Morlet; wavelet transform; palaeoclimate; Holocene; Dunhua Basin

## 0 引言

地层沉积序列的多时间多尺度性、气候参数的

多层次性以及参数曲线解释过程中的人为性, 使沉积地层中古气候反演不可避免地存在不同程度误差。如何客观提取特定时间尺度内的古气候信息,

收稿日期: 2010-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40702027; 40830107; 40902057)

作者简介: 张新荣 (1975-), 女, 河北景县人, 副教授, 理学博士, 从事沉积学及第四纪地质学研究。E-mail: zhangxr@jlu.edu.cn

最大限度地减小误差, 是古气候研究者普遍关心的问题。小波变换可以将各种交织在一起的不同频率组成的混合信号分解成不同频率的块信号<sup>[1-2]</sup>, 同时从时间和频率的角度进行描述<sup>[3]</sup>, 具有多尺度、多层次和多分辨率分析的特点<sup>[4]</sup>, 在古气候重建中发挥着越来越重要的作用<sup>[5-10]</sup>。

泥炭沉积含多种古气候信息代用指标<sup>[11]</sup>。孢粉<sup>[12]</sup>、大化石<sup>[13]</sup>、亚化石<sup>[14]</sup>、腐殖化度<sup>[15]</sup>、分解度<sup>[16]</sup>、地球化学(碳氧同位素<sup>[17-19]</sup>、氢同位素<sup>[20]</sup>、有机大分子化石<sup>[21]</sup>)、微结构特征、色度分析<sup>[16, 22]</sup>等多种方法和指标促使泥炭在古气候研究中发挥着积极的作用。植硅体代表高度地方性原地植物的腐烂残余物, 在恢复局部地区古气候方面, 比孢粉和植物残体分析有更高的灵敏性<sup>[23-25]</sup>。泥炭沉积中植硅体分析在中国刚起步<sup>[26-29]</sup>, 在泥炭古气候研究中的作用正逐步被引向深入。

Morlet 一维连续小波变换可以将复小波变换系数的实部、模和位相分离开来, 分析参数变化的多时间尺度结构、诊断变化的周期性振荡以及频率突变点的具体位置等<sup>[30]</sup>。信号经过变换后, 其中的能量聚集与频率全部展露, 可探测到突变点或突变区域, 反映在沉积序列上就是沉积环境的突变。将这一突变与剖面中古气候参数变化联系起来, 可以作为分析古气候波动的依据。笔者采用 Morlet 一维连续小波变换对泥炭沉积中植硅体古气候参数进行时频分析, 尽量客观地分析植硅体反演的古气候变化过程, 以便为确定植硅体在泥炭古气候重建中的作用提供客观依据。

# 1 分析原理

自然界的沉积及气候变化等过程明显的波动性是由于某些控制因素具有周期性。沉积剖面中采集的样品具有时间先后顺序的特点。从中得到的各种信息与信号可以组成相应的时间序列或函数。对某时间序列  $f(t)$ , 可定义该时间序列的连续小波变换为

$$C_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中:  $\psi()$  为一维连续小波;  $a$  为频率域尺度;  $b$  为时间域尺度;  $t$  为时间间隔<sup>[30-31]</sup>。通过改变  $a$  和  $b$  的值, 可以将研究目标聚焦在时间域的某一点( $b$ )上对频率域的频率变化进行放大( $1/a$ )处理, 因此, 小波变换具有“显微镜”的聚焦放大作用。从能量角度看,  $C_f(a, b)$  表示该时间序列在时频面上以( $a, b$ )为中心的局部情况, 或者解释为该函数在很小时频窗

内的能谱, 因此, 反映的是时频域内( $a, b$ )点处的该时间序列或函数的局部能量<sup>[32]</sup>。

由于信号精度会受样品采样间隔的影响, 所以信号采集的原则是根据 Shannon 采样定理来确定的, 也就是采样频率必须高于信号本身所包含的最高频率的 2 倍。小波函数频率域尺度所能达到的最小尺度可以通过原始信号的频率以及采样间隔来确定, 而最大尺度则可以通过确定小波函数的扩展宽度得到。连续小波变换实际上是以离散的形式来完成的, 但尺度间隔必须取到资料本身分辨率许可的大小。当尺度间隔取值很小时, 尺度变化可以看作是连续的。笔者选取 2 的整次幂作为小波变换的频率域尺度进行分析, 所用的 Morlet 一维连续小波是一个经过 Gaussian 函数平滑得到的周期函数, 其频率域尺度与傅立叶分析的周期有对应关系<sup>[33]</sup>; 在同一尺度中, 可以包含一定范围的周期成分, 而同一周期也可以出现在多个尺度的变化中<sup>[34-35]</sup>。本研究在对东北地区泥炭表土中植硅体的形态特征及分布分析<sup>[26, 27]</sup>的基础上, 通过植硅体-气候因子转换模型<sup>[28]</sup>计算吉祥和榆树剖面的古年均气温值和古年均降水量, 采用 Matlab 7.8 软件对 Morlet 一维连续小波变换的信号提取和分析。

# 2 研究剖面概述

研究对象位于敦化盆地, 该盆地地处吉林省东部敦密断裂带内, 盆地内泥炭发育广泛, 且多属晚全新世沉积(图 1)。取样点均属沟谷类泥炭, 主要沼泽植物有莎草科(*Cyperaceae*)、蓼科(*Polygonaceae*)、禾本科(*Gramineae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、柳叶藓科(*Amblystegiaceae*)、景天科(*Crassulaceae*)、菊科(*Compositae*)、车前科(*Plantaginaceae*)等。

吉祥剖面(E128°18'、N43°15')位于盆地南部, 海拔 532 m, 剖面深 350 cm, 主要为棕褐色纤维状苔

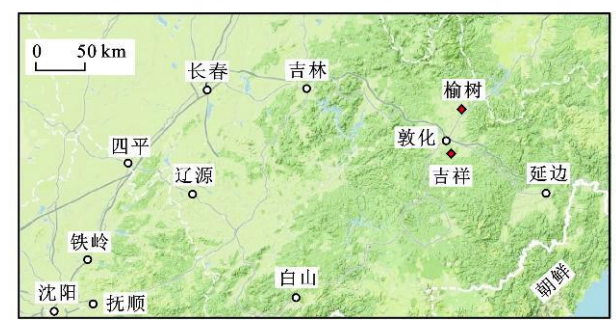


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the Studied Area

草等草本植物残体。由底至顶为: 320 ~ 350 cm 灰黑色粉砂质黏土; 95 ~ 320 cm 褐色泥炭; 10 ~ 95 cm 棕色泥炭; 顶部 10 cm 为活草根层。6 个样品在日本名古屋大学运用 Tandem Pelletron 5UD (NEC, USA) 进行高精度<sup>14</sup>C 测年, 以 1950 年做计时 0 年; 半衰期取 5 730 a, 2 个样品未见光束。测试结果(未校正)如图 2。

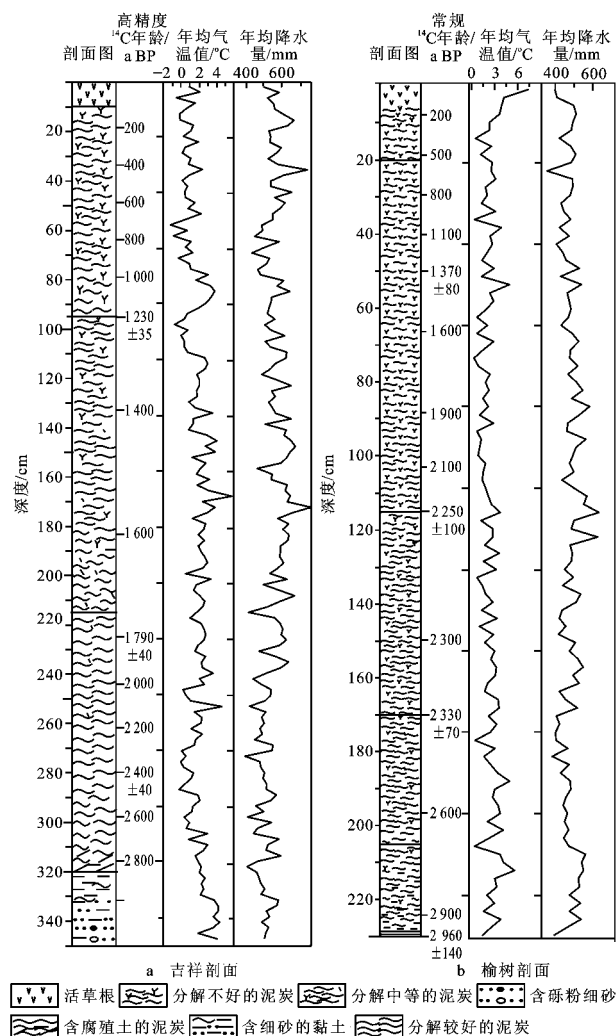


图 2 吉祥和榆树剖面植硅体古气候参数分布

Fig. 2 Distribution of Paleoclimate Parameters Recorded by Phytoliths at Jixiang and Yushu Profiles

榆树剖面 (E128°28'、N43°31') 位于盆地东北部, 海拔 451 m, 剖面深 232 cm。分解度比吉祥剖面好, 由底至顶为 229 ~ 232 cm 黑色泥质黏土夹少量草炭; 170 ~ 229 cm 褐色泥炭; 10 ~ 170 cm 棕色泥炭; 顶部 10 cm 为活草根层。4 个样品在中国地质调查局青岛海洋地质检测中心进行常规<sup>14</sup>C 测年, 检测仪器为低本底液闪谱仪, 采用常规法, 检测温度为 15 ~ 17 °C, 检测湿度为 26% ~ 40%, 以 1950 年做计时 0 年, 半衰期取 5 730 a。测试结果(未校正)如图 2。

根据东北地区泥炭表土中植硅体的形态特征及分布<sup>[27-28]</sup>, 在植硅体-气候因子转换模型<sup>[29]</sup>基础上计算得到吉祥和榆树剖面的古年均气温值、古年均降水量(图 2)。

### 3 植硅体古气候参数的时频分析

#### 3.1 吉祥剖面

对吉祥剖面的植硅体古气候参数进行 Morlet 一维连续小波变换分析, 得到图 3 古年均气温值、图 4 古年均降水量的小波变换系数波谱。

根据二者的小波频谱, 可知不同频率域尺度和时间域尺度气候变化的特点。在  $a$  取 70、50、30 和 20 时, 古年均气温值、古年均降水量小波变换系数波谱变化频率表现出较强的相似性, 表明二者在相应尺度上变化周期有很强的一致性。对比而言, 古降水周期性表现略强于古气温值。由于  $a$  越小, 相应的古气候分辨率越高, 降水曲线较强的周期性说明在小尺度下古年均降水量波动较大。古年均气温值除在  $a$  为 70 和 30 时变化的周期性与古年均降水量类似外, 在  $a$  为 20 时, 小于 160 cm 深度内变化周期不明显; 在  $a$  为 10 时, 小于 160 cm 深度内周期较明显。

当  $a < 30$  时, 二者变化各有特点。古年均温值在 160 ~ 260 cm 深度表现为较大尺度上 ( $a \geq 20$ ) 的周期波动, 即气温值变化平缓, 频率较低; 在其他深度年均气温值表现为较小尺度上 ( $a = 10$ ) 的周期波动, 即气温值变化比较剧烈, 频率较高。古年均降水量在 260 ~ 350 cm 表现为小尺度 ( $a = 10$ ) 的周期波动, 在其他深度则为较大尺度 ( $a \geq 20$ ) 的周期。所以, 整个剖面上气候因子表现为  $a \geq 30$  的周期。

根据  $a$  为 30 的古气候时频变化及小波变化的自相似性, 可以将古年均气温值变化分为 318 ~ 350、265 ~ 318、145 ~ 265、100 ~ 145、35 ~ 100、0 ~ 35 cm 等 6 个阶段。同理, 古年均降水量可以划分为 318 ~ 350、262 ~ 318、147 ~ 262、92 ~ 147、37 ~ 92、0 ~ 37 cm 等 6 个阶段。剖面上古气候变迁过程则包含了 318 ~ 350、265 ~ 320、145 ~ 265、100 ~ 145、35 ~ 100、0 ~ 35 cm 等 6 个阶段。

#### 3.2 榆树剖面

对榆树剖面植硅体古气候参数的小波变换分析得到图 5 古年均气温值、图 6 古年均降水量小波变换系数波谱。

在  $a \geq 60$  时, 古气候参数的小波变换系数波谱特征明显一致, 也就是说, 在  $(2,960 \pm 140)$  a BP 以

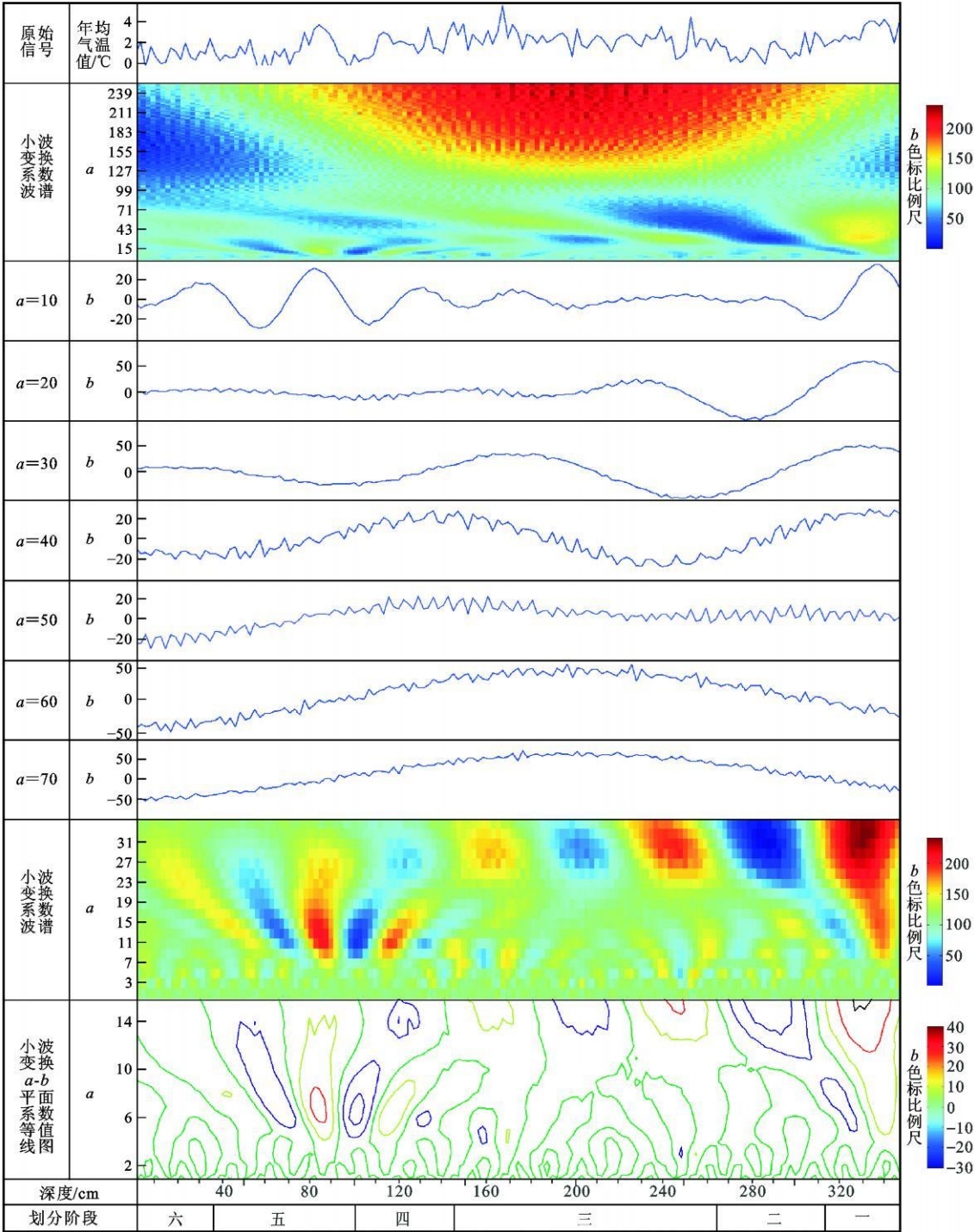


图 3 吉祥剖面植硅体古年均气温值小波变换系数波谱

**Fig. 3 Wavelet Transform Coefficient Spectrum of Palaeo Annual Mean Temperature Recorded by Phytolith at Jixiang Profile**

来, 整个剖面中古年均气温值、古年均降水量变化一致。 $a$  为 50 时, 古年均气温值在深部表现出较大的变换系数峰值。在  $a$  为 40 时, 古年均气温值小波变换系数峰值小于古年均降水量, 说明古年均气温值的变化幅度小于古年均降水量。当  $a$  为 30 和 20 时, 古气候参数的小波变换系数波谱变化一致, 即榆树剖面在  $a$  为 30 和 20 时, 古年均气温值、古年均降水量变化频率一致。 $a$  为 10 时, 古年均气温值的小波变换系数波谱有比较明显的变化, 在 80 ~ 150 cm 深度范围内表现出比古年均降水量更明显的频率变化。也就是说古年均气温值和古年均降水量的变化频率不高。所以, 榆树剖面植硅体古气候参数的小波变换系数波谱表现出  $a \geq 20$  的周期。因此, 根据  $a$  为 20 的综合古年均气温值和古年均降水量的时频特点和小



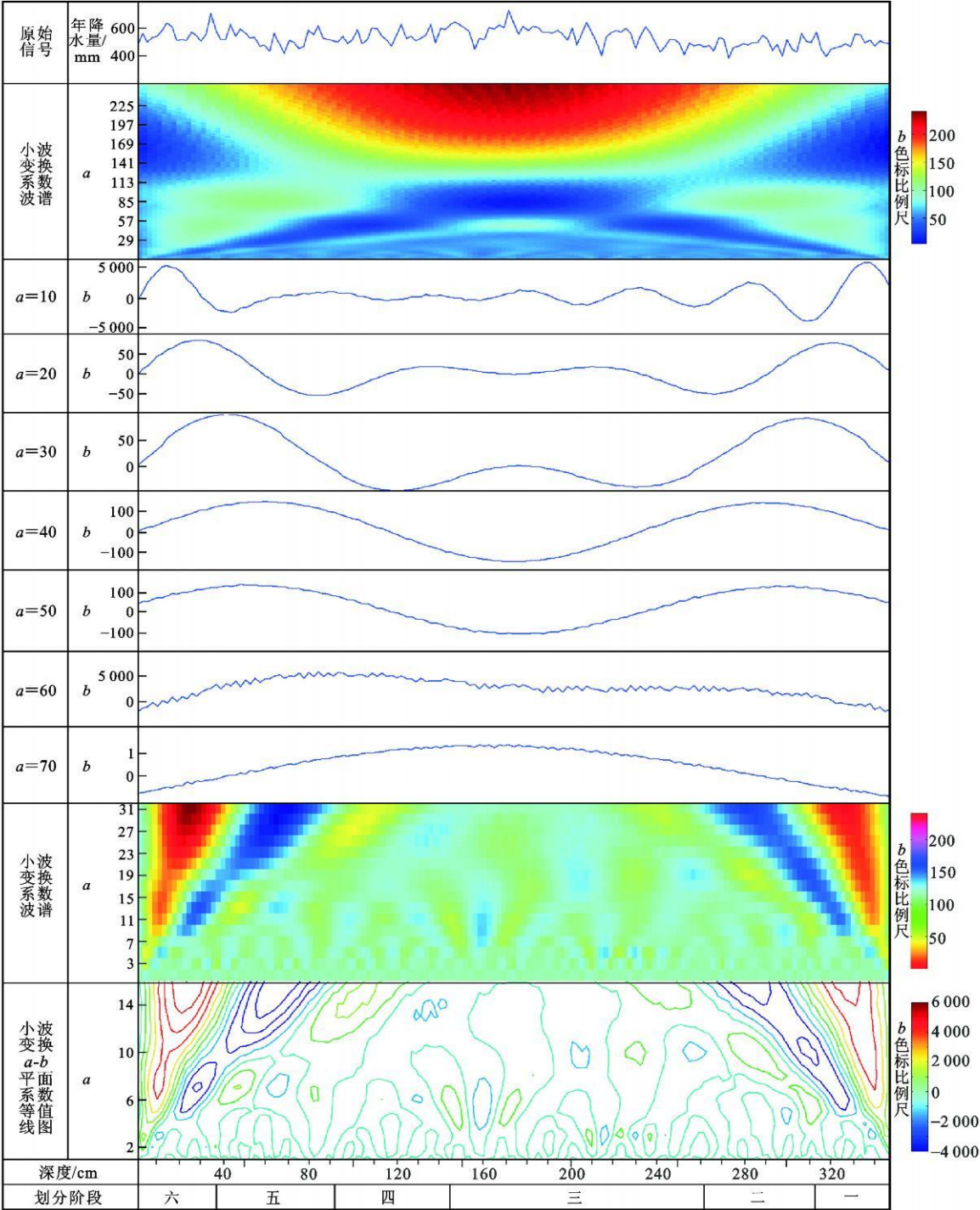


图 4 吉祥剖面植硅体古年均降水量小波变换系数波谱

**Fig. 4 Wavelet Transform Coefficient Spectrum of Palaeo Annual Mean Precipitation Recorded by Phytolith at Jixiang Profile**  
波系数变化的自相似性, 该剖面植硅体古气候变化过程可分为: 206 ~ 230、174 ~ 206、108 ~ 174、65 ~ 108、28 ~ 65、0 ~ 28 cm 等 6 个阶段。

3.3 两个剖面比较

从理论上讲, 同一盆地 2 个剖面上同一古气候参数在某种尺度上具有共同的特征。由剖面的植硅体古年均气温值和古年均降水量的时频对比图

(图 7、8)可知, 吉祥剖面上古气候参数在  $a \geq 30$  时的波动情况, 与榆树剖面上古气候参数在  $a \geq 20$  时的波动情况极为相似。

吉祥剖面泥炭深度为 320 cm, 最大年龄约 3 000 a BP; 榆树剖面泥炭深度为 230 cm, 最大年龄为  $(2\,960 \pm 140)$  a BP。2 个剖面的平均沉积速率  $V_J$  和  $V_Y$  的比值  $V_J/V_Y \approx 3/2$  (其中  $V_J$  代表吉祥剖面

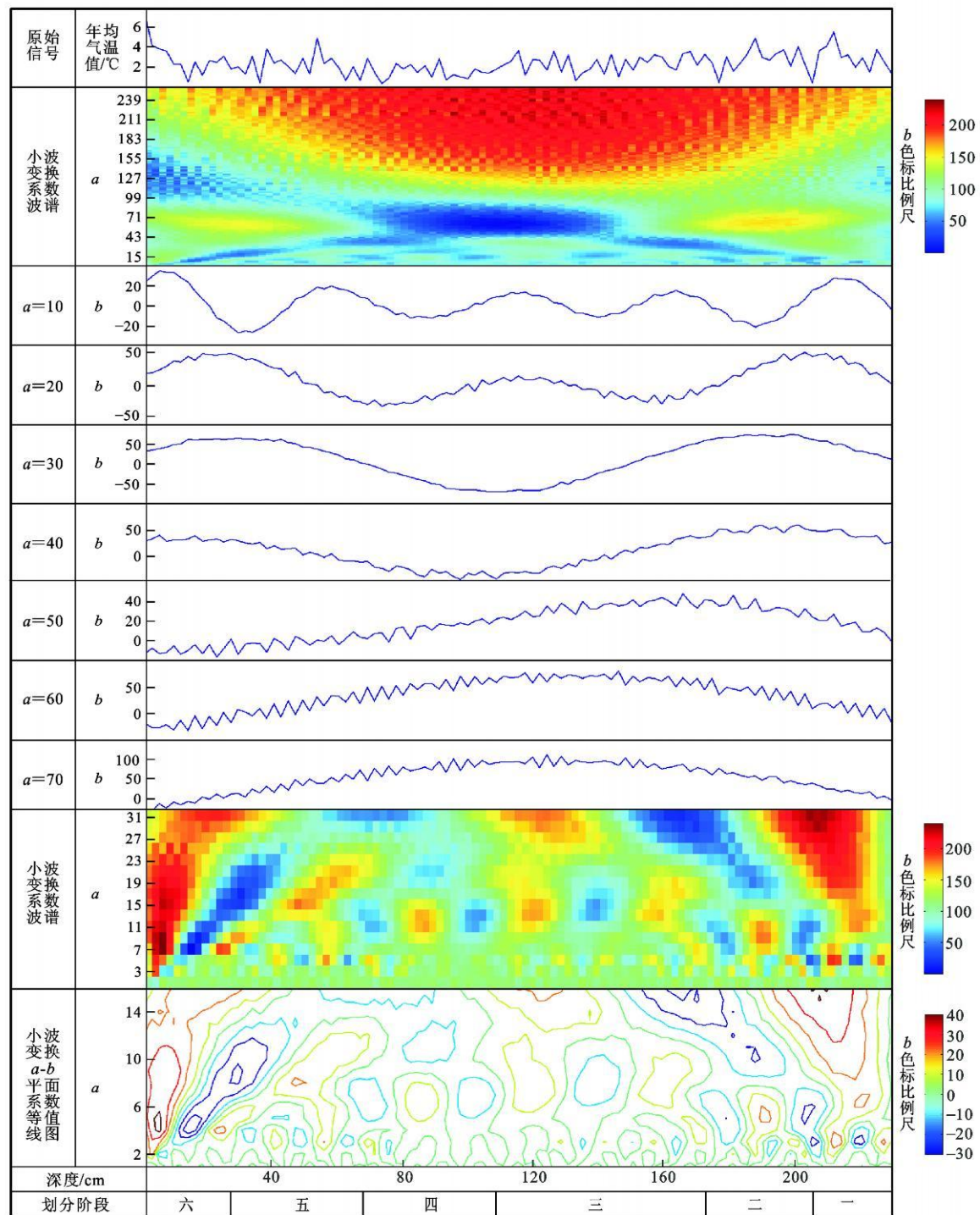


图5 榆树剖面植硅体古年均气温值小波变换系数波谱

**Fig. 5 Wavelet Transform Coefficient Spectrum of Palaeo Annual Mean Temperature Recorded by Phytolith at Yushu Profile**

平均沉积速率;  $V_s$  代表榆树剖面平均沉积速率)。根据 Shannon 采样定理可知, 2 个剖面同一频率  $f(n)$  下, 小波变换的最小尺度  $a_{\min J} \geq 2f(n) \Delta t$ ,  $a_{\min Y} \geq 2f(n) \Delta t$  ( $a_{\min J}$  和  $a_{\min Y}$  分别代表吉祥剖面、榆树剖面小波变换的最小频率域尺度;  $\Delta t$  为采样间隔); 进一步计算可知  $a_J/a_Y = 3/2$  ( $a_J$  和  $a_Y$  分别代表吉祥剖面、榆树剖面小波变换的频率域尺度)。意

即吉祥剖面在  $a$  为  $3a_0$  时小波变换系数波谱能量变换趋势或频率与榆树剖面在  $a$  为  $2a_0$  时的小波变换系数波谱能量变换趋势或频率相似 ( $a_0$  指某一单位尺度); 也就是说, 吉祥剖面分辨率高于榆树剖面, 且分辨率比为 3 : 2。

因此, 根据吉祥剖面  $a \geq 30$  时和榆树剖面  $a \geq 20$  时的小波变换系数波谱以及小波能量的变化情



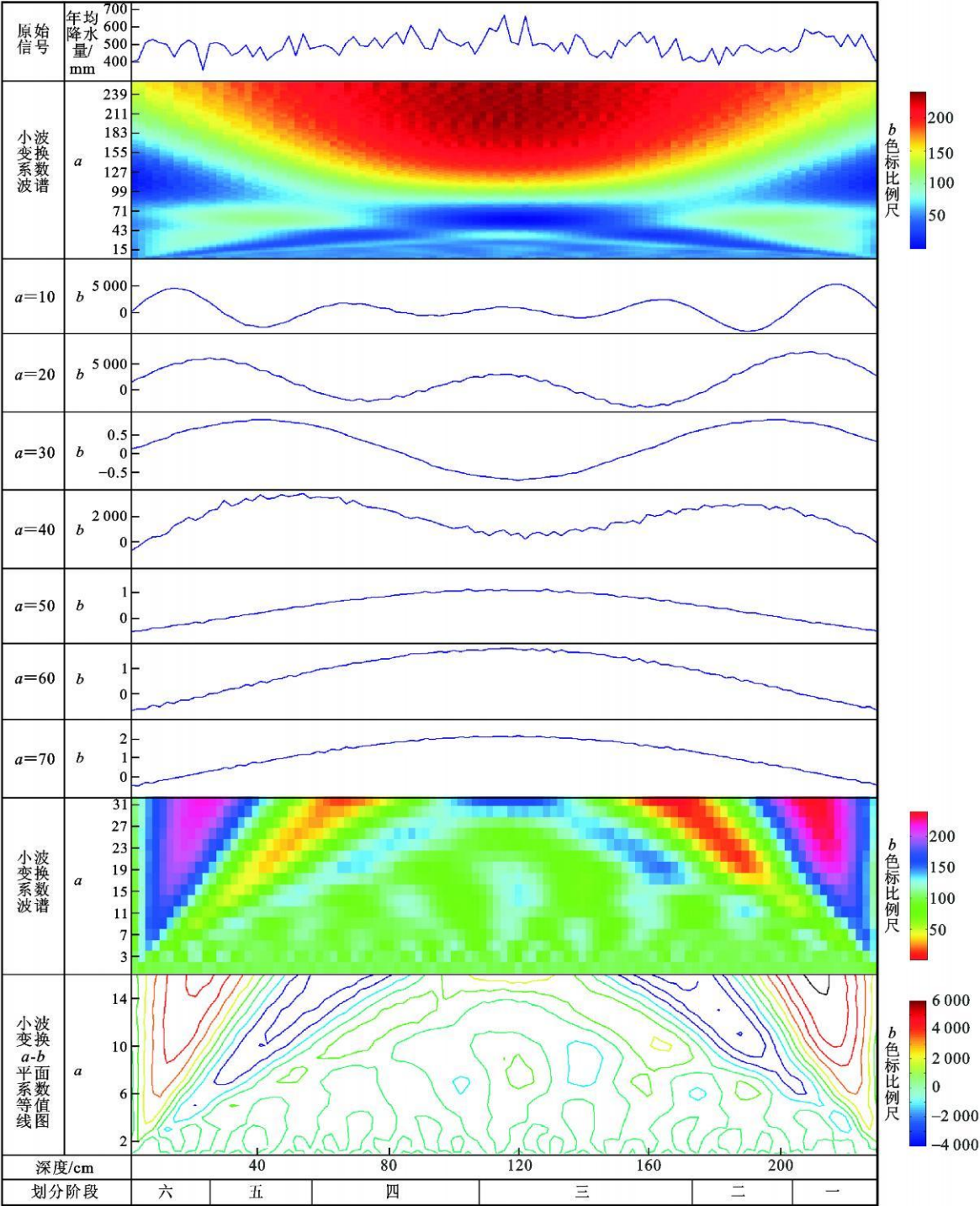


图 6 榆树剖面植硅体古年降水量小波变换系数波谱

Fig. 6 Wavelet Transform Coefficient Spectrum of Palaeo Annual Mean Precipitation Recorded by Phytolith at Yushu Profile

况, 可以把敦化地区晚全新世以来的古气候变迁分为 6 个阶段。

第一阶段: 吉祥剖面 318 ~ 350 cm; 榆树剖面 206 ~ 230 cm; (2 960 ± 140) a BP ~ 2 695 a BP (公元前 1010—公元前 740 年)。该时期气温明显高于其后的大部分时期, 且气温缓慢下降, 古年均降水量比现今小, 较干, 属温暖降温期。

第二阶段: 吉祥剖面 265 ~ 318 cm; 榆树剖面 174 ~ 206 cm; 公元前 740—公元前 420 年。古年均气温先有 2 次较快速的波动, 后变化平缓; 古年均降水量开始有增加的趋势; 显示比较温和湿润的气候。

第三阶段: 吉祥剖面 145 ~ 265 cm; 榆树剖面 108 ~ 174 cm; 公元前 420—公元前 205 年。古年均气温值高于现代, 古年均降水量表现出较大的波动, 干

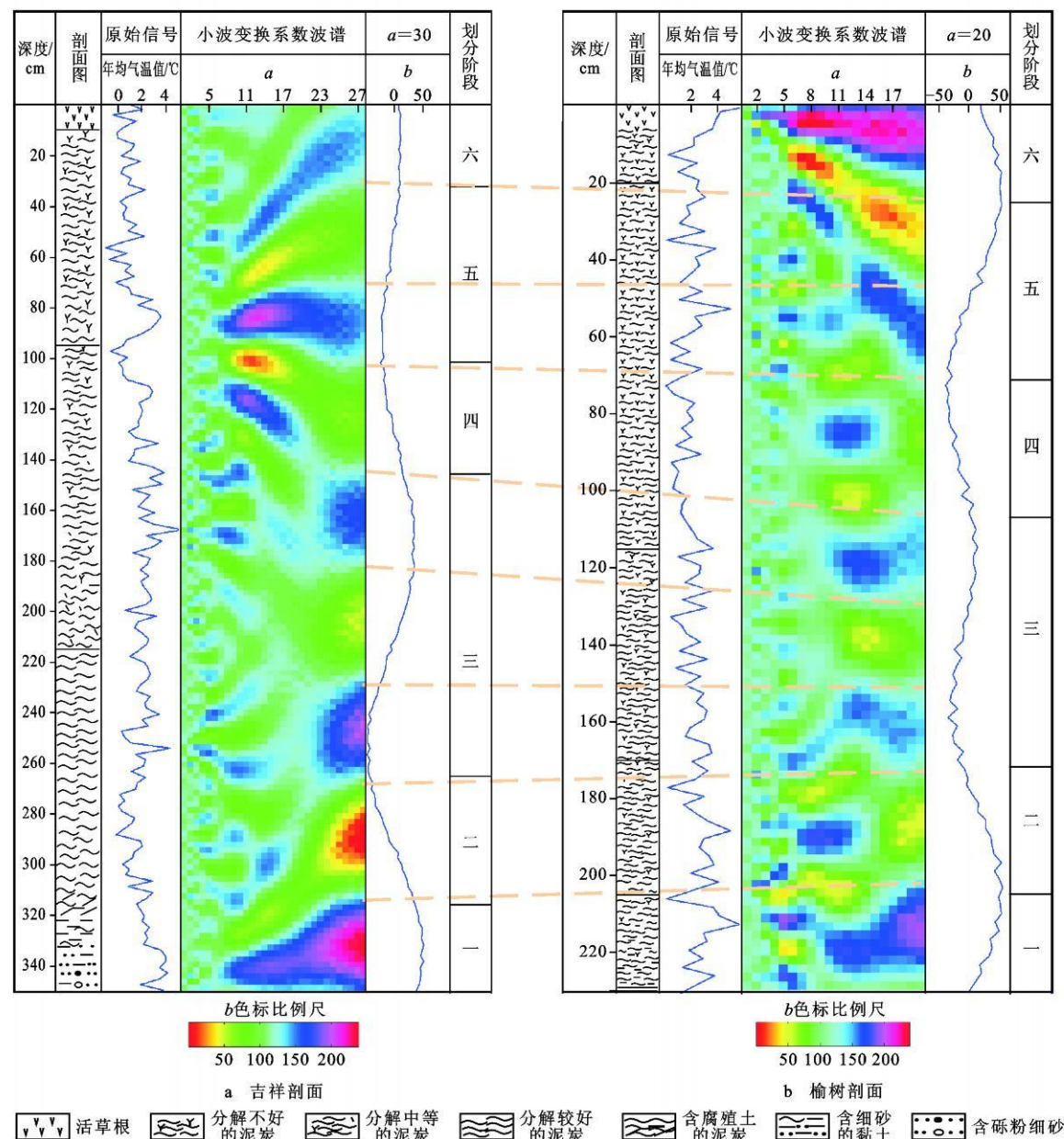


图 7 吉祥和榆树剖面植硅体古年均温小波变换系数波谱对比

Fig. 7 Comparison of Wavelet Transform Coefficient Spectrum of Palaeo Annual Mean Temperature Recorded by Phytolith Between Jixiang and Yushu Profiles

湿交替明显,且持续时间较长;该阶段属温暖时期。

第四阶段: 吉祥剖面 100 ~ 145 cm; 榆树剖面 65 ~ 108 cm; 公元前 205—公元 375, 分辨率略小于吉祥剖面。2 个剖面上古年均气温值、古年均降水量变化趋势和幅度基本相同, 表现为变冷的特点; 波动频率较高, 表明气候系统开始变得不稳定。

第五阶段: 吉祥剖面 35 ~ 100 cm; 榆树剖面 28 ~ 56 cm; 公元 375—1210 年。气候系统相对稳定阶段, 气温波动幅度较小, 降水量较高, 整体为温暖湿润状态。

第六阶段: 吉祥剖面 0 ~ 35 cm; 榆树剖面 0 ~ 28 cm; 公元 1210 年至今。气候波动较强; 早期表现为冷干的特点, 后期则变暖。降水量与之相对应, 波动频率稍低。

### 4 结语

(1) 植硅体古气候信息含有较大程度的叠加现象, Morlet 一维连续小波变换可以有效处理古气候信息的叠加, 使古气候信息表达更接近客观实际, 减小人为分析带来的误差, 显示出在古气候分析中的应用潜力。

(2) 吉祥剖面小波变换系数波谱在频率域尺度



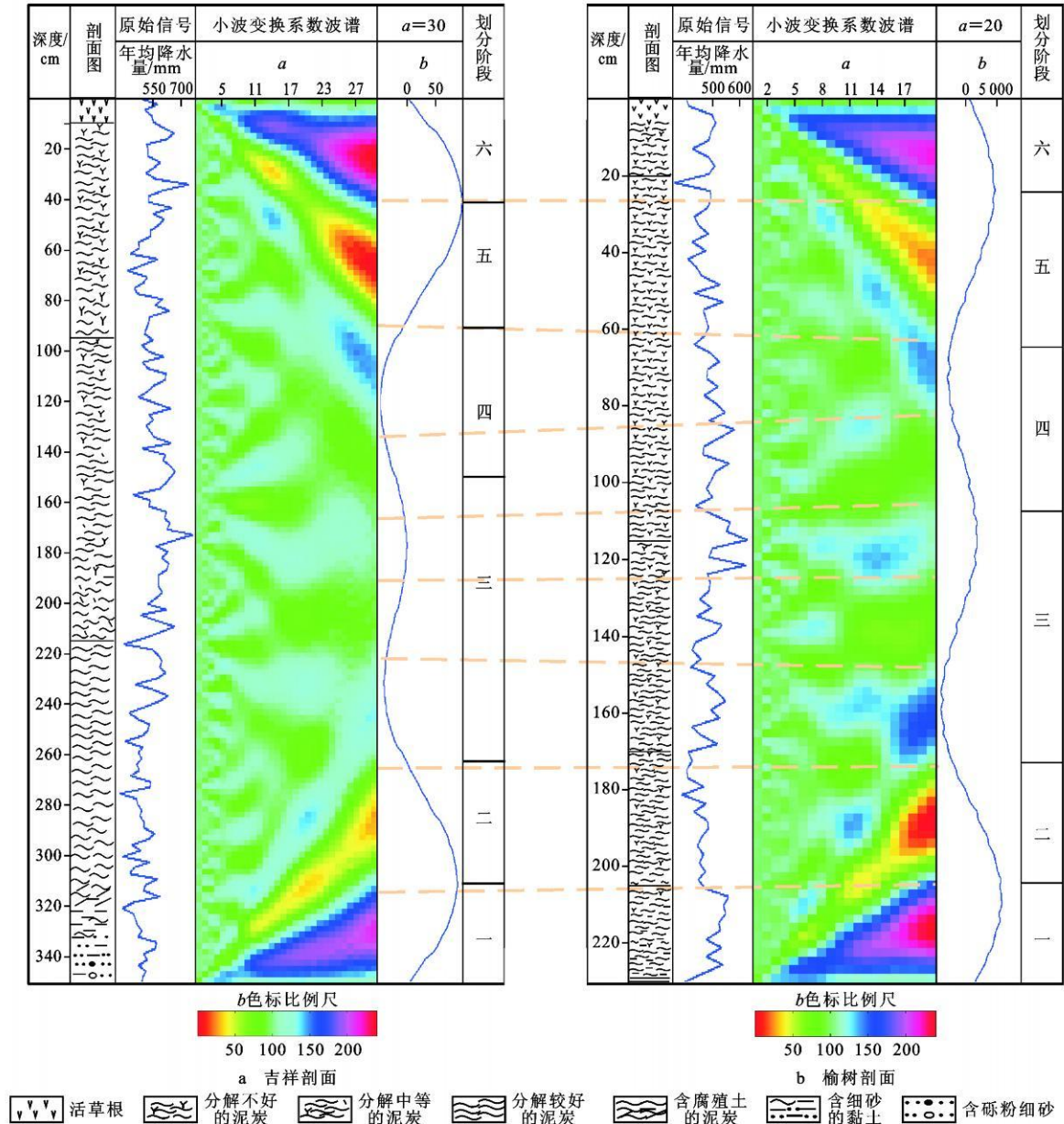


图 8 吉祥和榆树剖面植硅体古年均降水量小波变换系数波谱对比

Fig. 8 Comparison of Wavelet Transform Coefficient Spectrum of Palaeo Annual Mean Precipitation Recorded by Phytolith Between Jixiang and Yushu Profiles

$a \geq 30$  和榆树剖面在  $a \geq 20$  时表现出很好的一致性,说明吉祥剖面分辨率高于榆树剖面,且分辨率之比为 3 : 2。

(3)通过古气候参数曲线形态和时频分析,可以将敦化盆地 3 000 a BP 以来的古气候演化大致分为 6 个阶段:公元前 740 年以前温暖降温期(西周时期);公元前 740—公元前 420 年的温和湿润,逐渐变凉时期(春秋时期);公元前 420—公元前 205 年的温暖时期(战国时期);公元前 205—公元 375 年降温变冷时期(两汉至东晋初期);公元 375—公元 1210 年的温暖湿润时期(东晋至南宋初期);公元 1210 年至今的气

候波动比较频繁的阶段(南宋以来)。

参考文献:

[ 1 ] 赵军龙, 谭成仟, 李 娜, 等. 小波分析在高分辨率层序地层研究中的应用[ J ]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 90-94.  
[ 2 ] 李建平. 小波分析与信号处理——理论、应用及软件的实现[ M ]. 重庆: 重庆出版社, 1997.  
[ 3 ] Debret M, Sebagn D, Crosta X, et al. Evidence from Wavelet Analysis for a Mid-Holocene Transition in Global Climate Forcing[ J ]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(25/26): 2675-2688.  
[ 4 ] 孙然好, 潘保田, 牛最荣, 等. 河西走廊近 50 年来地表水资源

- 时间序列的小波分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 455-459.
- [5] Heslop D, Dekkers M J, Langereis C G. Timing and Structure of the Mid-Pleistocene Transition: Records from the Loess Deposits of Northern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 185(1/2): 133-143.
- [6] Doner L. Late-Holocene Palaeoenvironments of Northwest Iceland from Lake Sediments[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 193(3/4): 535-560.
- [7] Rousse S, Kissel C, Laj C, et al. Holocene Centennial to Millennial-scale Climatic Variability: Evidence from High-resolution Magnetic Analyses of the Last 10 cal kyr off North Iceland (Core MD99-2275)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242(3/4): 390-405.
- [8] Prasad S, Witt A, Kienel U, et al. The 8.2 ka Event: Evidence for Seasonal Differences and the Rate of Climate Change in Western Europe[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(3/4): 218-226.
- [9] Sire M A, Yiou P, Eiriksson J, et al. A 4500-year Reconstruction of Sea Surface Temperature Variability at Decadal Timescales off North Iceland[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(21/22): 2041-2047.
- [10] Patterson R T, Prokoph A, Reinhardt E, et al. Climate Cyclicity in Late Holocene Anoxic Marine Sediments from the Seymour-Belize Inlet Complex, British Columbia[J]. *Marine Geology*, 2007, 242(1/3): 123-140.
- [11] Blackford J. Palaeoclimatic Records from Peat Bogs[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(5): 193-198.
- [12] Bakels C C. Pollen Diagrams and Prehistoric Fields: the Case of Bronze Age Haarlem, the Netherlands[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2000, 109(3/4): 205-218.
- [13] Barber K E, Chambers F M, Maddy D. Holocene Palaeoclimates from Peat Stratigraphy: Macrofossil Proxy Climate Records from Three Oceanic Raised Bogs in England and Ireland[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(5/7): 521-539.
- [14] Blackford J J, Chambers F M. Proxy Climate Record for the Last 1000 Years from Irish Blanket Peat and a Possible Link to Solar Variability[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133(1/2): 145-150.
- [15] Lagueard J G A, Chambers F M, Thomas P A. Recording and Reconstruction of Wood Macrofossils in Three-dimensions[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1995, 22(4): 561-567.
- [16] Blundell A C, Barber K E. A 2800-year Palaeoclimatic Record from Tore Hill Moss, Strathspey, Scotland: the Need for a Multi-proxy Approach to Peat-based Climate Reconstructions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10/11): 1261-1277.
- [17] 洪业汤, 刘东生, 姜洪波, 等. 太阳辐射驱动气候变化的泥炭碳同位素证据[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(6): 527-531.
- [18] 洪业汤, 洪冰, 林庆华, 等. 过去 5000 年西太平洋副热带高压活动的泥炭纤维素碳同位素记录[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 485-492.
- [19] Menot-Combes G, Burns S J, Leuenberger M. Variations of  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  in Plants from Temperate Peat Bogs (Switzerland): Implications for Paleoclimatic Studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202(2): 419-434.
- [20] Xie S, Nott C J, Avsejs L A, et al. Palaeoclimate Records in Compound-specific  $\delta\text{D}$  Values of a Lipid Bio-marker in ombrotrophic Peat[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(10): 1053-1057.
- [21] Ortiz J E, Torres T, Delgado A, et al. The Palaeoenvironmental and Palaeohydrological Evolution of Padul Peat Bog (Granada, Spain) over One Million Years, from Elemental Isotopic and Molecular Organic Geochemical Proxies[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(11/12): 1243-1260.
- [22] 李智佩, 岳乐平, 郭莉, 等. 全新世气候变化与中国北方沙漠化[J]. *西北地质*, 2007, 40(3): 1-29.
- [23] Lu H Y, Wu N Q, Yang X D, et al. Phytoliths as Quantitative Indicators for the Reconstruction of Past Environmental Conditions in China I: Phytolith-based Transfer Functions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(9/10): 945-959.
- [24] 张新荣, 胡克, 介冬梅, 等. 泥炭沉积中植硅体对环境指示的意义——以吉林敦化泥炭剖面为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2005, 35(6): 694-698.
- [25] Iriarte J, Paz E A. Phytolith Analysis of Selected Native Plants and Modern Soils from Southeastern Uruguay and Its Implications for Paleoenvironmental and Archeological Reconstruction[J]. *Quaternary International*, 2009, 193(1/2): 99-123.
- [26] 张新荣, 胡克, 刘莉莉. 吉林敦化地区全新世泥炭沉积中植硅体分析[J]. *微体古生物学报*, 2005, 22(2): 202-207.
- [27] 张新荣, 胡克, 王东坡. 东北地区泥炭表土中植硅体的形态特征[J]. *地理科学*, 2007, 27(6): 831-836.
- [28] 张新荣, 胡克, 方石, 等. 东北地区泥炭表土沉积中植硅体分布特征[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(5): 895-900.
- [29] 张新荣, 胡克, 王东坡. 东北泥炭表土沉积植硅体-气候因子转换函数建立及应用[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 676-682.
- [30] 程炳岩, 王记芳, 孙卫国. 河南省月平均气温变化的时频分析[J]. *气象科技*, 2004, 32(增刊): 1-4.
- [31] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave Propagation and Sampling Theory Part I: Complex Signal and Scattering in Multilayered Media[J]. *Geophysics*, 1982, 47(2): 203-221.
- [32] Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. Wave Propagation and Sampling Theory-part II: Complex Signal and Scattering in Multilayered Media[J]. *Geophysics*, 1982, 47(2): 222-236.
- [33] 纪跃波, 秦树人, 汤宝平. 基于多分辨分析的时频分析[J]. *振动与冲击*, 2002, 21(1): 12-15.
- [34] Meyers S D, Kelly B G, Brien J J O. An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology: with Application to the Dispersion of Yanai Waves[J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(10): 2858-2866.
- [35] 林振山, 卞维林, 金龙, 等. 中国旱涝史料的层次分析[J]. *气象学报*, 1999, 57(1): 112-120.