

# 渤海湾太平洋牡蛎壳体记录的 冬季停止分泌/春季恢复生长的最低水温

范昌福<sup>1,2)</sup>, 王宏<sup>3)</sup>, 裴艳东<sup>3)</sup>, 王海峰<sup>3)</sup>

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2)国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3)中国地质调查局天津地调中心, 天津 300170

**摘要:** 河口海岸地区广泛生长的牡蛎壳体, 作为气候环境变化的一种载体, 是研究河口浅海环境演化和海陆相互作用的理想对象。本文以渤海湾地区广泛发育的太平洋牡蛎壳体为研究对象, 根据现生活牡蛎壳体记录的氧同位素变化幅度和生长水体的温度、盐度, 定量地计算了该地区 *Crassostrea gigas* 在冬季停止分泌/春季恢复生长的最低水温为 5.5℃, 生长季节为 3 月至 12 月。

**关键词:** 生物壳体; 停止分泌; 氧同位素; 水温; 渤海湾

中图分类号: Q915.817; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.06.15

## The Lowest Sea Surface Temperatures for Stopping Secretion in Winter and Resuming Growth in Spring Recorded by the Living Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) Shell in the Bohai Bay

FAN Chang-fu<sup>1,2)</sup>, WANG Hong<sup>3)</sup>, PEI Yan-dong<sup>3)</sup>, WANG Hai-feng<sup>3)</sup>

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170

**Abstract:** Oyster reefs are widely distributed along coastal and estuary areas. The in situ living oyster shell is a good object for studying and reconstructing the climate and environment change. With a living Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) shell collected from the northwest coast of Bohai Bay as the study object and according to the analytical results of stable isotope of O in the continuous growth micro-layers of the shell as well as monthly average sea surface salinity (SSS) and sea surface temperature (SST), the authors obtained the lowest sea surface temperature recorded by the *C. gigas* shell in winter. In Bohai Bay area, the cease of shell growth of *C. gigas* lasts for up to 3 months per year from December to March, when the water temperature decreases to 5.5°C.

**Key words:** Mollusca shell; stopping secretion; oxygen isotope; SST; Bohai Bay

高分辨率气候和环境变化研究对了解过去环境变化中突发事件和未来环境变化的预测具有重要意义。可信的气候预测模型的建立, 需要来自不同地区环境类型下的高精度、长周期气候记录的互相校验(Schöne et al., 2005), 包括陆地、海洋和陆海交互

地带的海岸河口地区的各种气候记录。

近几十年以来, 我国全新世高分辨率古气候环境重建研究取得了大量的重要成果, 但绝大部分成果集注于内陆和深海地区, 因而不能代表同时期陆海交互地带的气候信息(Schöne et al., 2004, 2005)。

作为连接内陆与海洋的海岸带地区,由于复杂的相互作用和频繁的地质环境变化,难以保存连续的长时间序列地质环境记录,因此很难获得可与内陆及深海地区进行对比的气候环境记录。

牡蛎是河口及浅海区一种常见的半咸水双壳类软体生物,属广温、广盐性,从低纬度至中高纬度的河口浅海环境都适合其生长;牡蛎从白垩纪一直繁衍存活至今,其壳体几乎全部由方解石组成。牡蛎个体的寿命较长,很多牡蛎个体的生长年龄超过15 a 或更多(张玺等, 1956)。由于牡蛎的时空分布范围广、生长寿命长、生长环境独特等特性决定了其壳体是一种良好的环境记录载体,是研究气候环境变化,特别是河口浅海环境演化和海陆相互作用理想对象(王强等, 1991; 耿秀山等, 1991; Wang et al., 1995; Kirby et al., 1998; 薛春汀, 2003; 张忍顺, 2004; Surge et al., 2001; Carbotte et al., 2004; 王宏, 1996; 王宏等, 2006; Zhang et al., 2007; Brigaud et al., 2008; Wisshak et al., 2009; Ullmann et al., 2010; 李冬玲等, 2009; 商志文等, 2010; 范昌福等, 2005a, b, 2006, 2007, 2008, 2010a, b, c, d; Fan et al., 2011; 王海峰等, 2011; 方晶等, 2011)。

太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*; Thunberg, 1793), 生长于水深 5 ~ 40 m 的浅水区, 滤食水中浮游生物, 壳体之间互相胶结生长而成礁体。喜好生长于硬质基底, 如岩石、残骸碎屑和生物壳体等, 但随着生物的进化, 它们也能够生长于硬的泥质或泥沙质基底之上。其广温、广盐性使其能够在全世界范围内广泛繁殖(Cognie, 2006; Diederich, 2005)。它们可生长的盐度范围为  $10 \times 10^{-12} \sim 42 \times 10^{-12}$ 、温度范围为 4 ~ 35 , 短时间内甚至能够忍受 -5 的水温(Nehring, 2006)。然而, 过低的水体盐度将影响牡蛎个体的配子发育(gametogenesis)。

渤海湾西岸地区自早全新世最大海侵以来(林防等, 2004), 发育了由 *C. gigas* 及它的簇生群体构成的规模巨大、数量众多的埋藏牡蛎礁体(图 1), 是该地区一个显著特征和重要地质现象。牡蛎礁与渤海湾西岸贝壳堤平原的贝壳堤(王宏等, 2000), 是华北平原东部沿海低平原自中全新世逐渐成陆过程中的两类重要产物。它们的形成、规模、时间跨度及所蕴含的丰富地质环境变化信息, 具有重要的研究价值(王宏等, 2006)。

但是在利用牡蛎壳体进行古气候环境恢复重建之前, 需要对其自身进行深入细致的了解, 以掌握其记录环境信息的方式、可靠性和连续性等。我们曾对渤海湾西北岸地区的太平洋牡蛎壳体的韧带部

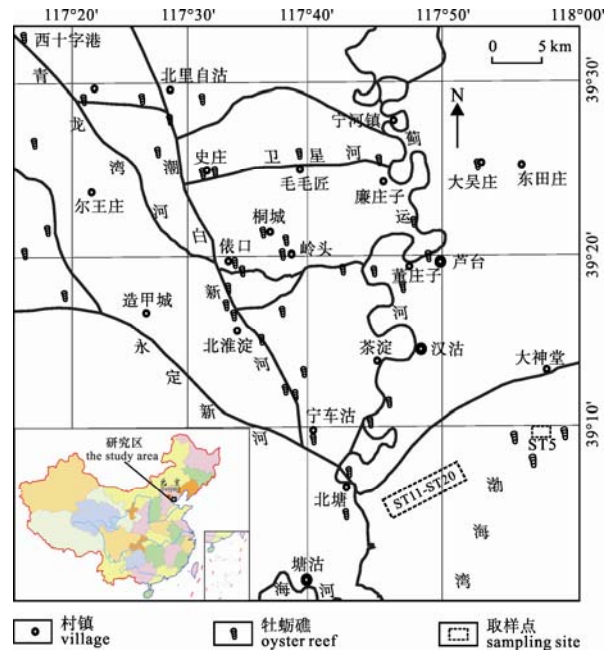


图 1 渤海湾全新世埋藏牡蛎礁体及大神堂海区活牡蛎礁体分布位置图(据王宏等, 2006; 范昌福等, 2010d)  
Fig. 1 Map showing the distribution of buried and living oyster reefs on the northwest coast of Bohai Bay and the sampling site for this study (after WANG et al., 2006; FAN et al., 2010d)

位特征生长层进行了详细的研究, 共在壳体韧带槽部位发现了两类具有季节指示意义的特征生长层(范昌福等, 2010a; Fan et al., 2011), 其中对应于壳体韧带槽表面凹沟的壳体剖面内灰色半透明生长层, 具有一个年生长周期内最重的氧同位素比值, 是晚秋至早春季节水温较低时期形成的缓慢致密生长层(范昌福等, 2010a; Fan et al., 2011)。然而, 这一特征生长层是否指示了其在冬季低温时期的生长间断? 如果 *C. gigas* 在冬季低温季节停止分泌壳体, 则其停止分泌壳体的最低水温是多少? 这将为使用牡蛎壳体进行古气候环境高分辨率重建研究提供必要的基础信息。

## 1 材料与方 法

本次选择的是 2005 年 5 月 26 日于天津北部海区活牡蛎礁体中(大神堂, 图 1)采集的一个活 *C. gigas* 壳体(ST5), 去除壳体内的有机质后, 选择壳体相对较大、更适宜于进行贝壳年轮研究的左壳壳体(Surge et al., 2001), 沿壳体最大生长线切割, 对切割后的壳体剖面进行打磨和抛光, 最终使壳体切割纵剖面内的生长层清晰可辨(范昌福等, 2010a)。

通过对牡蛎壳体韧带槽表面记录的因冬季低温和春季产卵而形成的内凹层和外凸层中部的小凹痕, 以及壳体切割剖面内对应的灰色半透明生长层的仔

细辨认和计数, 获得牡蛎壳体的生长年轮信息(范昌福等, 2010a; Fan et al., 2011)。

在获取壳体生长年轮信息的基础上, 根据壳体剖面内特征生长层的位置, 使用 0.5 mm 直径钻头的微型钻机, 沿壳体生长方向垂直于壳体剖面钻取样品, 获取约 1 mg 碳酸钙粉末, 充分混合均匀后分成三份并分别进行测定, 结果取三次测量的平均值。

样品测试在德国汉诺威莱布尼兹应用地质科学研究所(GGA)同位素与年代实验室采用连续流方法测定, 运用连接 Delta XP 质谱仪的 GasBench II 装置自动进样, 在 75℃ 下加入 5 滴无水磷酸, 充分反应后测定样品的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  比值, 样品重复测量误差一般小于 0.1‰。仪器的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  测试精度分别为 0.13‰ 和 0.06‰。

另于 2007 年秋季对活牡蛎礁体生长区不同盐度值的水体进行取样, 使用 YSI85 型多参数水质监测仪现场测定水样的盐度值, 用 10 mL 棕色玻璃瓶现场直接装满后即刻密封, 置于阴凉处保存、待测。水样  $\delta^{18}\text{O}$  的测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用水平衡法完成, 分析仪器为 Deltaplus XP。取 0.3 mL 水样直接在惰性气体环境下与 0.2% 的二氧化碳气体进行平衡 18 h, 测试精度小于 0.1‰。

## 2 结果

### 2.1 研究区牡蛎生长环境

研究区位于渤海湾西北部, 海水温度、盐度的变化除了取决于气象因素外, 大陆径流、陆地热效应以及海湾内海水流动也是重要的影响因素。春季受太阳辐射逐渐加强, 水温和气温处于增温阶段, 由于近岸海水受陆地热辐射的影响, 致使其增温速度较外海快。另外, 春季为江河枯水期, 入海径流小, 加之空气干燥及风的作用, 使海水蒸发量增大, 盐度增高, 春季近岸的温度、盐度较外海高。夏季温度普遍比春季升高 12~13℃, 而盐度升高不大。秋季和前两个季节相反, 秋季为降温期, 太阳辐射逐渐减弱, 气温下降, 海水向大气的回辐射加强, 海水处于降温过程。特别是近岸浅水区, 由于陆地降温迅速, 海水向陆地的热量输送加强, 使近岸海水

降温较快。冬季海水温度处于最低值, 近岸受陆地迅速降温影响, 1 月份近岸海水温度达 -5℃, 海水盐度较高, 沿岸海水盐度值大于  $33 \times 10^{-12}$  (天津市海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室, 1987)。

根据塘沽验潮站 2005—2009 年实测数据计算的月平均结果(表 1), 研究区水温(SST)呈规律性变化, 1 月份水温最低, 8 月份水温最高; 水体盐度(SSS)变化与降雨量(P)有关, 夏季降雨量显著增强, 水体盐度值明显降低(图 2)。

### 2.2 研究区水体 $\delta^{18}\text{O}$ 与盐度的关系

根据研究区现生活牡蛎礁体生长水体不同盐度值的水样氧同位素比值测定结果(表 2), 对其进行线性拟合后(Kirby et al., 1998; Surge et al., 2001; Simstich et al., 2005)(图 3), 获得渤海湾地区现生水体盐度-氧同位素组成定量关系式:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{water, V-SMOW}}/\text{‰} = 0.13 \times S - 4.86 \quad (R = 0.99321, N = 10)$$

式中  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water, V-SMOW}}$  为水体氧同位素组成, S 为水体盐度; 下标 V-SMOW 表示体积分数以 SMOW(标准平均海水)为标准, 单位为 ‰。

由于水样的氧同位素测定结果是以 SMOW 为标准, 而壳体碳酸钙粉末样品的氧同位素结果则是以 PDB 为标准的, 二者之间存在定量的转换关系(Rye et al., 1980)。本文采用以下的定量转换关系

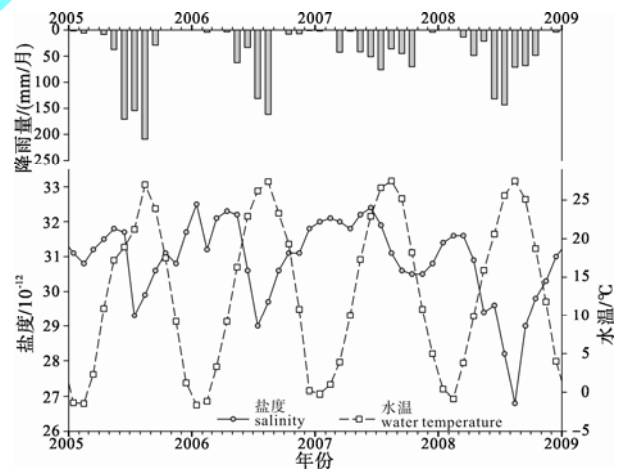


图 2 渤海湾西北岸地区 2005—2009 年的月均水温、盐度和降雨量(据 Fan et al., 2011)

Fig. 2 Average monthly sea surface temperature, sea surface salinity and precipitation during 2005 to 2009 on the northwest coast of Bohai Bay(after Fan et al., 2011)

表 1 渤海湾西北岸地区 2005—2009 年月均水温与盐度值  
Table 1 Average monthly sea surface temperature and sea surface salinity during 2005 to 2009 on the northwest coast of Bohai Bay

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水体盐度(SSS)/ $10^{-12}$	31.6	31.5	31.7	31.5	31.4	31.3	29.8	29.5	30.2	30.6	30.6	31.2
水温(SST)/℃	-0.7	-0.5	3.4	10.3	16.9	21.9	25.4	27.1	24.0	18.3	10.4	3.0

表 2 渤海湾现代生活牡蛎礁体生长区不同盐度的水体  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$

Table 2 Brackish waters and their corresponding  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  values in the living oyster reef area of Bohai Bay

编号	盐度值/ $10^{-12}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	编号	盐度值/ $10^{-12}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
ST11	34.5	-0.89	ST16	10.5	-3.65
ST12	30.5	-0.89	ST17	7.0	-3.92
ST13	26.0	-1.45	ST18	4.5	-4.38
ST14	20.5	-2.04	ST19	0.5	-4.77
ST15	16.0	-2.60	ST20	2.5	-4.57

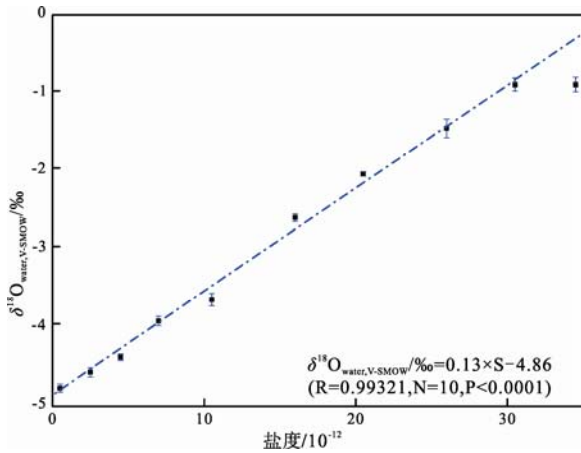


图 3 渤海湾现代生活牡蛎礁体生长区  
水体氧同位素组成与盐度关系图

Fig. 3 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  and salinity of the brackish water in the living oyster reef area of Bohai Bay

式(Gonfiantini et al., 1995):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} - 30.91) / 1.0309$$

将 SMOW 标准转换为 PDB 标准之后, 渤海湾地区的水体盐度与水体  $\delta^{18}\text{O}$  的变化关系可表达为:  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water, V-PDB}}/\text{‰} = 0.12 \times S - 26.7$ 。即水体盐度值每增加  $1 \times 10^{-12}$ , 水体氧同位素比值(PDB 标准)增加 0.12‰。

### 2.3 活牡蛎壳体记录的年际 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度

在 ST5 壳体剖面内, 共有 4 个对应于壳体韧带

槽表面凹槽的灰色半透明生长层(图 4 中箭头所示), 它们具有一个年生长周期内最重的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 形成于冬季低温季节(范昌福等, 2010a; Fan et al., 2011)。在

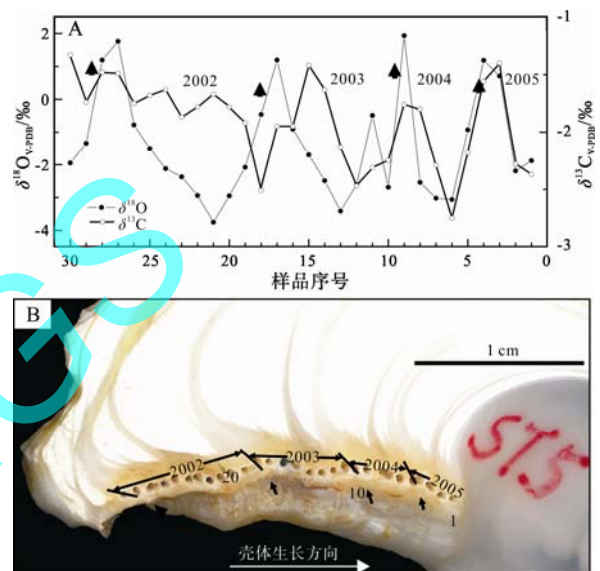


图 4 ST5 牡蛎壳体同位素剖面与壳体剖面内连续微层  
样品取样位置

Fig. 4 Micro-sampling positions and isotope values of the left valve of the modern living shell ST5

箭头指示冬季低温季节停止分泌的位置(据 Fan et al., 2011)  
arrows show the locations of growth layers formed during low temperature in winter(after Fan et al., 2011)

表 3 ST5 牡蛎壳体连续微生长层记录的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$

Table 3 Oxygen isotope values of the left valve of modern living shell ST5

序号	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	序号	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	序号	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$
1	-1.88	11	-0.49	21	-3.75
2	-2.19	12	-2.61	22	-2.94
3	0.71	13	-3.41	23	-2.37
4	1.18	14	-2.49	24	-2.12
5	-0.93	15	-1.70	25	-1.5
6	-3.06	16	-0.91	26	-0.78
7	-3.02	17	1.19	27	1.76
8	-2.54	18	-0.46	28	1.19
9	1.93	19	-2.08	29	-1.34
10	-2.69	20	-2.95	30	-1.95

每两个冬季低温季节生长层之间、具有最轻  $\delta^{18}\text{O}$  值的生长层, 形成于夏季最高水温季节。

ST5 牡蛎壳体记录的 2002—2004 年 3 年的冬季低温季节平均最重  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  为 1.63‰, 夏季高温季节平均最轻  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  为 -3.41‰, 从冬季低温季节到夏季高温季节的平均变化幅度为 5.04‰(表 3)。

### 3 讨论

Kirby 等人(1998)对河口环境下自然生长的现生活牡蛎(*C. virginica*)壳体与生长环境之间的同位素平衡状况进行了分析研究。通过对活牡蛎生长的水体温度与盐度的长期监测和一个航次内采集的 8 个水样的氧同位素比值测定, 根据实测  $\delta^{18}\text{O}$  值与对应的水体盐度值, 拟合获得了水体  $\delta^{18}\text{O}$ -盐度线性关系式, 然后根据壳体的氧同位素分馏方程(Epstein et al., 1953)和实测水温、水体氧同位素组成(由水体盐度计算而来), 计算出在该水体中生长的牡蛎分泌的壳体  $\delta^{18}\text{O}$  理论值, 对比分析结果显示活牡蛎壳体与生长水体之间的氧同位素完全达到平衡, 壳体在其生长时刻真实地记录了周围水体的环境信息(Kirby et al., 1998)。

Epstein 等人通过实验室可控温度、盐度水箱培养的软体生物壳体的稳定同位素比值分析, 发现壳体与存活水体之间的同位素达到平衡, 并且获得了壳体氧同位素组成与水体氧同位素组成及水温之间的定量关系式(Epstein et al., 1953)。

在壳体与生长水体的氧同位素达到平衡的条件下, 若不考虑壳体生长区水体盐度变化对水体  $\delta^{18}\text{O}$  的贡献, 则壳体记录的季节性  $\delta^{18}\text{O}$  变化则完全由水温变化所致(程红光等, 2009)。当水温升高 1°C, 贝壳的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  则减小 0.24‰~0.25‰(Epstein et al., 1953), 因此, ST5 记录的 5.04‰季节性  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  变化幅度对应的水温变化幅度为 21~20.2°C。而 ST5 壳体生长区的实测水温变化范围为 -0.7~27.1°C(表 1), 变化幅度达 27.8°C。研究区的夏季最高水温低于 *Crassostrea* 属牡蛎的热休克温度(28°C; Kennedy et al., 1996; Surge et al., 2001)。并且研究区的牡蛎壳体贝轮中也未见任何夏季高温热休克记录(范昌福等, 2010a; Fan et al., 2011)。因而, 壳体并未记录水温低于 6.5 (6.1~6.9) 的生长环境信息, 即当水温低于 6.5 时, 牡蛎停止分泌壳体。然而, 研究区的水体盐度是变化的。当考虑水体盐度变化对水体  $\delta^{18}\text{O}$  的贡献时, 牡蛎停止分泌壳体的水温将更低。

从冬季到夏季, 壳体生长区的水体盐度变化范

围为  $31.6 \times 10^{-12} \sim 29.5 \times 10^{-12}$ (表 1), 变化幅度为  $2.1 \times 10^{-12}$ 。根据研究区水体盐度与水体  $\delta^{18}\text{O}$  的变化关系  $\delta^{18}\text{O}_{\text{water, V-PDB}}/\text{‰} = 0.12 \times S - 26.7$ , 从冬季到夏季, 壳体生长区水体盐度  $2.1 \times 10^{-12}$  的变化对水体  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  变化的贡献为 0.25‰。在考虑水体盐度变化对水体  $\delta^{18}\text{O}$  的贡献的情况下, ST5 壳体记录的水体温度变化幅度为 22~21.2, 则牡蛎冬季停止分泌壳体的水温约为 5.5 (5.1~5.9)。

根据渤海湾地区现生活牡蛎壳体的  $\delta^{18}\text{O}$  记录和活牡蛎生长水体的水温与盐度实测结果计算的牡蛎停止分泌壳体的最低平均水温为 5.5, 这一水温低于此前对同一地区的埋藏牡蛎壳体记录的  $\delta^{18}\text{O}$  和文献资料获得的水文数据而计算出的 11.5 的壳体停止分泌的最低水温(Wang et al., 1995)。Ullmann 等人(2010)对北海地区生长的一个活牡蛎(*C. gigas*)壳体记录的月分辨率  $\delta^{18}\text{O}$  和活牡蛎生长水体的水温与盐度的监测结果计算表明, *C. gigas* 壳体停止分泌的水温为 6。另有文献报道, *C. gigas* 可在水温 4~35 的范围内生长, 它们甚至可以在 -5 的水温环境下存活下来(Nehring, 2006)。

本文中的活牡蛎个体于 2005 年 5 月 26 日被采集时, 已完成产卵并恢复快速生长(图 4; Fan et al., 2011)。若 *C. gigas* 冬季停止分泌(春季恢复生长)的最低水温为 11.5, 根据渤海湾地区的月均水温资料, 牡蛎应在 4 月份恢复生长(表 1), 至该个体被采集时, 相隔仅 1 到 2 个月的时间, 而此时该个体不仅恢复了快速生长, 并且经历了春季产卵的缓慢生长(范昌福等, 2010a; Fan et al., 2011)。据此实际情况, *C. gigas* 恢复生长的水温应更低, 渤海湾地区的现生 ST5 活牡蛎在平均水温达 5°C 左右的 3 月份便恢复生长。因此, 在进一步获得更准确的数据结果之前, 采用 5.5 作为渤海湾地区 *C. gigas* 冬季停止分泌的最低水温。

研究区的冬季最低水温已低于 0, 远低于牡蛎分泌壳体的下限水温, 因此, 一年之中低于下限水温的季节(的信息)未被牡蛎壳体记录。渤海湾地区牡蛎壳体的一个年生长周期中最重的  $\delta^{18}\text{O}$  值分别纪录了 12 月壳体停止分泌时刻和来年 3 月壳体恢复生长时刻的生长环境信息, 二者之间存在一个水温低于 5.5°C 时出现的壳体分泌间断期。

### 4 结论

渤海湾地区现生活牡蛎(*C. gigas*)冬季停止分泌/春季恢复生长的最低水温为 5.5, 该地区牡蛎生

长的季节为3月至12月。牡蛎壳体的一个年生长周期中最重的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别纪录了12月壳体停止分泌时刻和次年3月壳体恢复生长时刻的生长环境信息。当水温低于5.5℃(12月至次年3月之间),牡蛎停止分泌壳体,其生长环境信息未能被记录。

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所李延河研究员给予了指导;德国汉诺威莱布尼兹应用地质科学研究所 Manfred Frechen 教授、Paul Königer 博士和 Astrid Jaeckel 女士帮助测定了本文中的壳体同位素样品;南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室杨涛博士帮助测定了水样氧、碳同位素;中国地质调查局天津地质调查中心李建芬博士、王福博士、田立柱博士、商志文博士和耿岩硕士参加了野外样品的采集和贝壳年轮研究样品的前处理工作,在此一并致谢!

## 参考文献:

程红光,李心清,袁洪林,王克卓. 2009. 泥盆纪海水的碳、氧同位素变化——来自腕足化石的同位素记录[J]. 地球学报, 30(1): 79-87.

范昌福,高抒,王宏. 2006. 渤海湾西北岸全新世埋藏牡蛎礁建造记录中的间断及其解释[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(6): 27-35.

范昌福,李建芬,王宏,阎玉忠,王福,裴艳东,商志文. 2005a. 渤海湾西北岸大吴庄牡蛎礁测年与古环境变化[J]. 地质调查与研究, 28(2): 124-129.

范昌福,王宏,李建芬,裴艳东,王福,商志文. 2005b. 渤海湾西北岸牡蛎礁体对区域性构造活动与水动型海面变化的响应[J]. 第四纪研究, 25(2): 235-244.

范昌福,裴艳东,王宏,刘志广,王福,商志文,车继英,田立柱. 2007. 渤海湾西北岸埋藏牡蛎礁体中的壳体形态与沉积环境[J]. 第四纪研究, 27(5): 806-813.

范昌福,王宏,裴艳东, KÖNIGER P, 李延河. 2010a. 牡蛎壳体的同位素贝壳年轮研究[J]. 地球科学进展, 25(2): 163-173.

范昌福,王宏,裴艳东,李延河. 2010b. 渤海湾西岸牡蛎壳体形态、生长速率与生长环境的关系[J]. 海洋通报, 29(5): 526-533.

范昌福,王宏,裴艳东,李延河. 2010c. 稳定同位素贝壳年轮指示的牡蛎礁体水平夹层成因[J]. 第四纪研究, 30(5): 994-1002.

范昌福,裴艳东,田立柱,王福,刘志广,王宏. 2010d. 渤海湾西部浅海区活牡蛎礁调查结果及资源保护建议[J]. 地质通报, 29(5): 660-667.

范昌福,王宏,裴艳东,刘志广,王福,田立柱,商志文. 2008. 渤海湾西北岸滨海湖埋藏牡蛎礁古生态环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 28(1): 33-41.

方晶,范昌福,王海峰,白铁磊,商志文. 2011. 粘土混浊水电

导率对牡蛎礁水平夹层成因的解释——以渤海湾西北岸大吴庄牡蛎礁为例[J]. 第四纪研究, 31(4): 746-748.

耿秀山,傅命左,徐孝诗,李培英. 1991. 现代牡蛎礁发育与生态特征及古环境意义[J]. 中国科学(B辑), (8): 867-875.

李冬玲,范昌福,黄玥,蒋辉,王宏,商志文. 2009. 渤海湾西北岸中全新世埋藏牡蛎礁的硅藻记录及古环境意义[J]. 海洋通报, 28(3): 22-28.

林防,李凤林,李建芬,张玉发. 2004. 渤海湾西北岸全新世介形类组合特征及海进海退旋回[J]. 地球学报, 25(1): 53-58.

商志文,范昌福,李冬玲,田立柱,裴艳东,王福,王宏. 2010. 硅藻组合指示的两个牡蛎礁体生长环境的差异[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(5): 33-39.

天津市海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 1987. 天津市海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社.

王海峰,裴艳东,刘会敏,范昌福,王宏. 2011. 渤海湾全新世牡蛎礁: 时空分布和海面变化标志点[J]. 地质通报, 30(9): 1396-1404.

王宏,范昌福,李建芬,李凤林,阎玉忠,王云生,张金起,张玉发. 2006. 渤海湾西北岸全新世牡蛎礁研究概述[J]. 地质通报, 25(3): 1-17.

王宏,张玉发,张金起,李建芬,李凤林, VAN STRYDONCK M, HENDRIX V. 2000. 渤海湾西岸第二道贝壳堤的细分及其年龄序列[J]. 地球学报, 21(3): 320-327.

王宏. 1996. 渤海湾全新世贝壳堤和牡蛎礁的古环境[J]. 第四纪研究, (1): 71-79.

王强,李秀文,张志良,李凤林,邵军,白德中,尚学熙,唐若鲁. 1991. 天津地区全新世牡蛎滩的古海洋学意义[J]. 海洋学报, 13(3): 371-380.

薛春汀. 2003. 天津宁河县俵口牡蛎礁剖面与海面变化关系的讨论[J]. 地理科学, 23(1): 49-51.

张忍顺. 2004. 江苏小庙洪牡蛎礁的地貌-沉积特征. 海洋与湖泊, 35(1): 1-7.

张玺,楼子庚. 1956. 中国牡蛎的研究[J]. 动物学报, 8(1): 65-93.

## References:

BRIGAUD B, PUCÉAT E, PELLENARD P, VINCENT B, JOACHIMSKI M M. 2008. Climatic fluctuations and seasonality during the Late Jurassic (Oxfordian-Early Kimmeridgian) inferred from  $\delta^{18}\text{O}$  of Paris Basin oyster shells[J]. Earth and Planetary Science Letters, 273(1-2): 58-67.

CARBOTTE S M, BELL R E, RYAN W B F, MCHUGH C, SLAGLE A, NITSCHKE F, RUBENSTONE J. 2004. Environmental change and oyster colonization within the Hudson River estuary linked to Holocene climate[J]. Geo-marine Letters, 24(4): 212-224.

CHENG Hong-guang, LI Xin-qing, YUAN Hong-lin, WANG Ke-zhuo. 2009. Carbon and Oxygen Isotope Variations of

- Devonian Seawater: Isotopic Records from Brachiopod Shell[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 79-87(in Chinese with English abstract).
- COGNIE B, HAURE J, BARLLÉ L. 2006. Spatial distribution in a temperate coastal ecosystem of the wild stock of the farmed oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg)[J]. *Aquaculture*, 259(1-4): 249-259.
- DIEDERICH S. 2005. Differential recruitment of introduced Pacific oysters and native mussels at the North Sea coast: Coexistence possible?[J]. *Journal of Sea Research*, 53(4): 269-281.
- EPSTEIN S, BUCHSBAUM R, LOWENSTAM H A, CUREY H C. 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 64(11): 1315-1326.
- FAN C, KOENIGER P, WANG H, FRECHEN M. 2011. Ligamental increments of the mid-Holocene Pacific oyster *Crassostrea gigas* are reliable independent proxies for seasonality in the western Bohai Sea, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(3-4): 437-448.
- FAN Chang-fu, GAO Shu, WANG Hong. 2006. Interpreting the hiatus in Holocene oyster reefs on the Northwest Coast of Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(6): 27-35(in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, LI Jian-fen, WANG Hong, YAN Yu-zhong, WANG Fu, PEI Yan-dong, SHANG Zhi-wen. 2005a. Age and Palaeoenvironmental Change of Dawuzhuang Oyster Reef on the Northwest Coast of Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 28(2): 124-129 (in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, WANG Hong, LI Jian-fen, PEI Yan-dong, WANG Fu, SHANG Zhi-wen. 2005b. Oyster reefs response to the regional neotectonics and eustatic sea-level, Northwest Coast of Bohai Bay[J]. *Quaternary Sciences*, 25(2): 235-244 (in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, PEI Yan-dong, WANG Hong, LIU Zhi-guang, WANG Fu, SHANG Zhi-wen, CHE Ji-ying, TIAN Li-zhu. 2007. Correlation of oyster shell form and sediment environment from two buried oyster reefs on the Northwest Coast of Bohai Bay[J]. *Quaternary Sciences*, 27(5): 806-813 (in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, WANG Hong, PEI Yan-dong, KÖNIGER P, LI Yan-he. 2010a. Stable isotope sclerochronology study of oyster shells[J]. *Advances in Earth Science*, 25(2): 163-173 (in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, WANG Hong, PEI Yan-dong, LI Yan-he. 2010b. Relationship among the form, growth rate and living environment of oyster shells in west coast of Bohai Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 29(5): 526-533(in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, WANG Hong, PEI Yan-dong, LI Yan-he. 2010c. Origins of horizontal oyster interlayers in buried reefs revealed by stable isotope sclerochronology[J]. *Quaternary Sciences*, 30(5): 994-1002(in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, PEI Yan-dong, TIAN Li-zhu, WANG Fu, LIU Zhi-guang, WANG Hong. 2010d. Living oyster reefs and its resource conservation in western Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 660-667(in Chinese with English abstract).
- FAN Chang-fu, WANG Hong, PEI Yan-dong, LIU Zhi-guang, WANG Fu, TIAN Li-zhu, SHANG Zhi-wen. 2008. Palaeoecological environment revealed by the buried binhaihu oyster reef on the northwest coast of Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(1): 33-41(in Chinese with English abstract).
- FANG Jing, FANG Chang-fu, WANG Hai-feng, BAI Tie-lei, SHANG Zhi-wen. 2011. A causal explanation for the intercalated horizontal layers of Dawuzhuang oyster reef by the clay-water electric conductivity[J]. *Quaternary Sciences*, 31(4): 746-748(in Chinese with English abstract).
- GENG Xiu-shan, FU Ming-zuo, XU Xiao-shi, LI Pei-ying. 1991. Living oyster reef development and ecological characteristics, and its palaeoenvironmental significance[J]. *Science in China (Series B)*, (8): 867-875(in Chinese).
- GONFIANTINI R, STICHLER W, ROZANSKI K. 1995. Standards and Intercomparison Materials Distributed by the International Atomic Energy Agency for Stable Isotope Measurements[C]//Reference and Intercomparison Materials for Stable Isotopes of Light elements, edited by the Isotope Hydrology Section of the International Atomic Energy Agency. IAEA, Vienna, Austria, 13-29.
- KENNEDY V S, NEWELL R I E, EBLE A F. 1996. The Eastern oyster: *Crassostrea virginica*[M]. College Park, Maryland: Maryland Sea Grant Press.
- KIRBY M X, SONIAT T M, SPERO H J. 1998. Stable isotope sclerochronology of Pleistocene and recent oyster shells (*Crassostrea virginica*)[J]. *PALAIOS*, 13(6): 560-569.
- Leading Group Office of the Tianjin Comprehensive Survey of Coastal Zones and Shoals Resources. 1987. Report of Tianjin coastal zones and shoals resources survey[M]. Beijing: Ocean Press(in Chinese).
- LI Dong-ling, FAN Chang-fu, HUANG Yue, JIANG Hui, WANG Hong, SHANG Zhi-wen. 2009. Paleo-environmental Reconstruction with Diatom Assemblages in the Buried Oyster Reef on the Northwest Coast of the Bohai Bay During the Middle Holocene[J]. *Marine Science Bulletin*, 28(3): 22-28(in Chinese with English abstract).
- LIN Fang, LI Feng-lin, LI Jian-fen, ZHANG Yu-fa. 2004. Holocene Ostracoda Assemblages and Marine Transgression-Regression

- Cycle in the Northwestern Coastal Area of the Bohai Gulf[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(1): 53-58(in Chinese with English abstract).
- NEHRING S. 2006. NOBANIS-Invasive Alien Species Fact Sheet-*Crassostrea gigas*. From: Online database of the North European and Baltic Network on Invasive Alien Species-NOBANIS[DB/OL]. [2011-11-14]. [www.nobanis.org/files/factsheets/Crassostrea\\_gigas.pdf](http://www.nobanis.org/files/factsheets/Crassostrea_gigas.pdf).
- RYE D M, SOMMER M A. 1980. Reconstructing paleotemperature and paleosalinity regimes with oxygen isotope[M]//RHODES D C, LUTZ R A. *Skeletal Growth of Aquatic Organisms*. New York: Plenum Press: 169-201.
- SCHÖNE B R, FIEBIG J, PFEIFFER M, GLEB R, HICKSON J, JOHNSON L A A, DREYER W, OSCHMANN W. 2005. Climate records from a bivalved Methuselah (*Arctica islandica*, Mollusca; Iceland)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228(1-2): 130-148.
- SCHÖNE B R, FREYRE CASTRO A D, FIEBIG J, HOUK S D, OSCHMANN W, KRÖNCKE I. 2004. Sea surface water temperatures over the period 1884-1983 reconstructed from oxygen isotope ratios of a bivalve mollusk shell (*Arctica islandica*, southern North Sea)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212: 215-232.
- SHANG Zhi-wen, FAN Chang-fu, LI Dong-lin, TIAN Li-zhu, PEI Yan-dong, WANG Fu, WANG Hong. 2010. Revealing paleo-environment difference of two oyster reefs by diatom assemblages in the northwest coast of Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(5): 33-39(in Chinese with English abstract).
- SIMSTICH J, HARMS I, KARCHER M J, ERLLENKEUSER H, STANOVVOY V, KODINA L, BAUCH D, SPIELHAGEN R F. 2005. Recent freshening in the Kara Sea (Siberia) recorded by stable isotopes in Arctic bivalve shells[J]. *Journal of Geophysical Research*, 110: C08006.
- SURGE D, LOHMANN K C, DETTMAN D L. 2001. Controls on isotopic chemistry of the American oyster, *Crassostrea virginica*: implications for growth patterns[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 172(3-4): 283-296.
- TCHANG Si, LOU Tze-kong. 1956. A study on Chinese oysters[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 8(1): 65-93(in Chinese with English abstract).
- THUNBERG C P. 1793. Tekning och Beskrifning pa en stor Ostrosort ifran Japan[J]. *Kongliga Vetenskaps Academiens Nya Handlingar*, 14(4-6): 140-142
- ULLMANN C V, WIECHERT U, KORTE C. 2010. Oxygen isotope fluctuations in a modern North Sea oyster (*Crassostrea gigas*) compared with annual variations in seawater temperature: Implications for palaeoclimate studies[J]. *Chemical Geology*, 277(1): 160-166.
- WANG H, KEPPENS E, NIELSEN P, VAN RIET A. 1995. Oxygen and carbon isotope study of the Holocene oyster reefs and paleoenvironmental reconstruction on the Northwest Coast of Bohai Bay, China[J]. *Marine Geology*, 124(1-4): 289-302.
- WANG Hai-feng, PEI Yan-dong, LIU Hui-min, FAN Chang-fu, WANG Hong. 2011. Holocene oyster reefs: spatial and temporal distribution and sea level indicators in Bohai Bay[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(9): 1396-1404(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong, FAN Chang-fu, LI Jian-fen, LI Feng-lin, YAN Yu-zhong, WANG Yun-sheng, ZHANG Jin-qi, ZHANG Yu-fa. 2006. Holocene oyster reefs on the northwest coast of the Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 1-17(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong, ZHANG Yu-fa, ZHANG Jin-qi, LI Jian-fen, LI Feng-lin, VAN STRYDONCK M, HENDRIX V. 2000. The Chenier II on the Western Coast of Bohai Bay: Its Subdivision and Amended Time-framework[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 21(3): 320-327(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong. 1996. Palaeoenvironment of the Holocene Cheniers and oyster reefs in the Bohai bay, China[J]. *Quaternary Sciences*, (1): 71-79(in Chinese with English abstract).
- WANG Qiang, LI Xiu-wen, ZHANG Zhi-liang, LI Feng-lin, SHAO Jun, BAI De-zhong, SHANG Xue-xi, TANG Ruo-lu. 1991. Palaeo-oceanological significance in Holocene ostracean banks in Tianjin area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 13(3): 371-380(in Chinese with English abstract).
- WISSHAK M, CORREA M L, GOFAS S, SALAS C, TAVIANI M, JAKOBSEN J, FREIWALD A. 2009. Shell architecture, element composition, and stable isotope signature of the giant deep-sea oyster *Neopycnodonte zibrowii* sp. n. from the NE Atlantic[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(3): 374-407.
- XUE Chun-ting. 2003. Discussion on relationship between Holocene sea level fluctuation and Biaokou Section, Ninghe, Tianjin, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 23(1): 49-51(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jia-fu, FAN Chang-fu, WANG Hong, ZHOU Li-ping. 2007. Chronology of an oyster reef on the coast of Bohai Bay, China: Constraints from optical dating using different luminescence signals from fine quartz and polymineral fine grains of coastal sediments[J]. *Quaternary Geochronology*, 2(1-4): 71-76.
- ZHANG Ren-shun. 2004. The geomorphology-sedimentology character of oyster reef in Xiaomiaohong tidal channel, Jiangu Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 35(1): 1-7(in Chinese with English abstract).