

# 75 ka 以来黄土高原蜗牛生长季节长度的变化

黄林培<sup>①②</sup>, 吴乃琴<sup>①</sup>, 顾兆炎<sup>①</sup>, 陈晓云<sup>①</sup><sup>①</sup> 中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;<sup>②</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: lphuang@mail.iggcas.ac.cn

2011-09-20 收稿, 2011-11-25 接受

国家重点基础研究发展计划(2010CB950204)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05120203)和国家自然科学基金(40972119, 40730104)资助

**摘要** 第四纪冰期-间冰期气候变化在年际尺度上是通过季节变化或季节长度的调整来实现的, 如何揭示冰期-间冰期期间季节长度的变化, 是深入探索气候变化过程和机制的新课题. 蜗牛生长季节的壳体同位素具有记录季节性气候特征的潜力. 通过对黄土高原不同气候区 18 个地点现生蜗牛组合中喜冷干种 *Pupilla aeoli* (杂色虹蛹螺)和喜暖湿种 *Punctum orphana* (显口多点螺)蜗牛壳体碳酸盐碳、氧同位素分析, 揭示出 *P. aeoli* 蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  值相对于 *P. orphana* 壳体偏负  $1.3 \pm 1.0\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值偏正  $3.3 \pm 1.1\text{‰}$ ; 而且从黄土高原东部山西娘子关到西部青海官亭, 随着生长季节长度(日均温  $\geq 10^\circ\text{C}$ )由  $202 \pm 6$  d 缩短为  $162 \pm 7$  d, 冷、暖 2 种蜗牛壳体的  $\delta^{13}\text{C}$  差值和  $\delta^{18}\text{O}$  差值都逐渐减小, 其中  $\delta^{13}\text{C}$  差值从东部的  $2.8\text{‰}$ 减小到西部的  $0.2 \pm 1.1\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  差值从  $4.7\text{‰}$ 减小到  $2.9 \pm 1.3\text{‰}$ . 且 2 种蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  差值每相差  $1\text{‰}$ , 蜗牛生长季节相差约 15 d 左右;  $\delta^{18}\text{O}$  差值每相差  $1\text{‰}$ , 蜗牛生长季节相差约 19 d 左右. 进一步对西峰剖面 75 ka 以来蜗牛壳体同位素分析显示, 全新世中期(8~3 ka), 蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的差值最大, 分别为  $2.6 \pm 0.7\text{‰}$ 和  $2.1 \pm 1.4\text{‰}$ ; 间冰段 MIS 3 次之, 为  $2.5 \pm 0.4\text{‰}$ 和  $1.6 \pm 0.8\text{‰}$ ; 末次盛冰期最小, 为  $0.2\text{‰}$ 和  $0.4\text{‰}$ . 推测全新世中期蜗牛生长季节长度约为  $200 \pm 10$  d, 间冰段 MIS 3 为  $190 \pm 6$  d 左右, 冰期时蜗牛生长季节长度约  $160 \pm 3$  d 左右.

## 关键词

陆生蜗牛  
稳定碳、氧同位素  
末次冰期  
季节长度  
西峰黄土剖面

米兰科维奇理论指出, 地球轨道变化通过改变季节之间的热平衡进而主导了第四纪冰期、间冰期气候变化<sup>[1]</sup>, 或者说长期的气候变化是通过年际季节变化或季节长度的调整来实现的<sup>[2]</sup>. 然而, 第四纪冰期、间冰期气候变化过程中季节长度是如何变化的, 一直缺少相关的研究材料和手段, 以及更直接的证据, 影响了对气候变化过程和规律的进一步认识.

位于中纬度地区的我国黄土高原区域, 不仅是冬、夏季风变化显著地区, 也是气候季节变化最敏感的地区. 在我国通常是以候温法来划分四季的: 候均温高于  $22^\circ\text{C}$  时为夏季, 低于  $10^\circ\text{C}$  时为冬季, 介于二

者之间为春季或秋季<sup>[3]</sup>. 一般认为在季风控制区, 冬、夏季风的强度变化是控制该区季节长短和生物生长时间的主要因素<sup>[2]</sup>. 过去中国黄土古气候的研究, 主要通过物理、化学指标, 如磁化率<sup>[4~7]</sup>、粒度<sup>[8,9]</sup>以及 FeD/FeT 比值<sup>[10]</sup>等来分析冬、夏季风变化的过程、规律, 但由于受指标敏感性的限制, 很少深入分析气候变化的季节性特征. 寻找和研究对季节性敏感的环境指标是古气候学研究中需要探索的关键问题.

陆生蜗牛是中国北方黄土地层中最丰富的生物化石之一<sup>[4]</sup>, 也是目前该区不同生态环境中广泛分布的陆生软体动物, 长期的蜗牛生物与环境的协同演

英文版见: Huang L P, Wu N Q, Gu Z Y, et al. Variability of snail growing season at the Chinese Loess Plateau during the last 75 ka. Chin Sci Bull, 2012, 57: 1036–1045, doi: 10.1007/s11434-011-4931-z

化, 不仅形成了在不同的季节气候条件下分布着特征的蜗牛种类和蜗牛组合<sup>[11,12]</sup>, 而且蜗牛生长发育季节的食物(低等和高等植物)和季节降水的同位素特征被适时地记录在蜗牛壳体的同位素中, 由于其壳体同位素的变化与蜗牛生长季节的关系密切, 蜗牛壳体碳酸盐稳定碳、氧同位素研究已经被广泛用于揭示季节性气候环境变化信息, 并取得了许多重要进展<sup>[13-18]</sup>.

刘宗秀等人<sup>[15]</sup>通过黄土高原不同地区陆生蜗牛调查表明, 蜗牛壳体碳酸盐碳同位素组成与蜗牛活动季节摄入的 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 植物以及蜗牛对食物的选择性有关. 顾兆炎等人<sup>[16]</sup>研究认为主要活动于春季的蜗牛, 食物中 C<sub>3</sub> 植物比例增加, 壳体碳同位素偏负; 主要活动于夏季的蜗牛, 摄入 C<sub>4</sub> 比例增加, 壳体碳同位素组成偏正. 另外, Leng 等人<sup>[13]</sup>和孙小虹等人<sup>[17]</sup>研究发现, 蜗牛壳体氧同位素与壳体生长当月的大气降水 δ<sup>18</sup>O 值显著相关.

在黄土高原地区, 不同蜗牛种类喜欢生长于春、夏、秋的不同季节, 自东南向西北, 不同季节的时间长度发生明显变化<sup>[19]</sup>, 适宜蜗牛生长的季节时间长度亦发生变化, 蜗牛赖以生存的 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物生长季

节的长度和比例也同样会发生变化<sup>[19-21]</sup>. 因此通过黄土高原不同地区现代蜗牛壳体稳定同位素组成分析, 研究季节长度的变化, 不仅是一项有重要意义的基础性研究工作, 而且有望为解释蜗牛化石壳体同位素古气候意义提供依据.

本文通过对黄土高原不同地区现代典型蜗牛(喜冷干种 *Pupilla aeoli* (杂色虹蛹螺)和喜暖湿种 *Punctum orphana* (显口多点螺))壳体同位素分析, 研究蜗牛壳体稳定同位素组成特征与季节变化的关系, 在此基础上, 分析西峰黄土剖面最近 75 ka 以来蜗牛壳体同位素组成, 探讨冰期、间冰期典型时间段蜗牛生长季节的长度变化以及气候变化过程.

### 1 材料与方法

现生蜗牛组合样品: 我们于 2005 年 5 月对东起山西省娘子关, 西至青海省民和县官亭, 大致沿 35°N 方向, 共计采集了 18 个现生蜗牛组合样品(图 1). 采样点选择林地、山坡、开阔的草地等环境下, 并用 GPS 定位, 尽可能地避免有人类活动的干扰. 采用 1 m × 1 m 的样方采集, 去除掉表层的枯枝落叶, 采集表层 2~5 cm 厚的所有土样, 每个样品约 10~20 kg

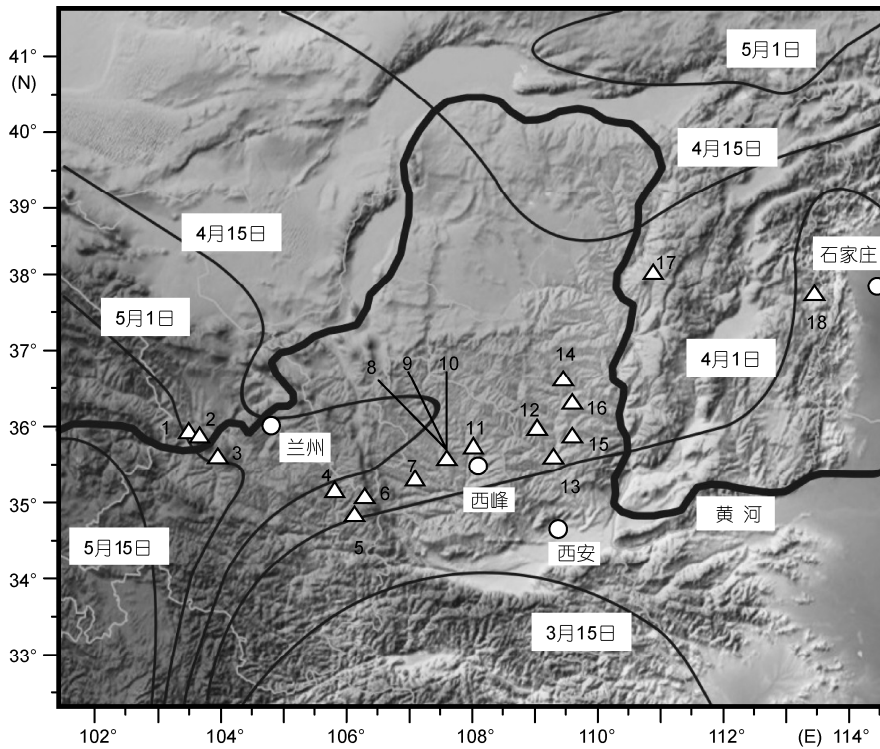


图 1 现生蜗牛采样点(△)和西峰黄土剖面地理位置图及黄土高原不同地区春季来临时间<sup>[19]</sup>

左右,在野外用 0.5 mm 的筛网用水筛洗,带回实验室再进一步清洗,烘干,在显微镜下挑选出所有的蜗牛个体。

本次采集范围东西跨越约 1000 km,覆盖了黄土高原东西向约 11 个经度。在这样大的区域范围内,不同地区春季到来的时间存在显著差异<sup>[19]</sup>。东部山西娘子关在3月底进入春季,而西部青海省民和县官亭的春季在4月底才开始,比东部娘子关晚约1个月(图1)。根据近50 a 气象数据(数据来自中国气象科学数据共享服务网 <http://cdc.cma.gov.cn/>,下同),东部娘子关镇和西部官亭镇日均温大于 10℃的持续时间分别为 202 ± 6 和 162 ± 7 d,夏季(≥22℃)持续时间在东部娘子关镇约为 71 ± 13 d,西部官亭镇小于 30 d<sup>[20]</sup>(表1,图2)。

研究区受季风控制明显,具有显著雨热同期,大气降水氧同位素呈现春季富<sup>18</sup>O、夏季贫<sup>18</sup>O的特征。夏季降水量自东往西逐渐减少,降水氧同位素组成逐渐变正(图2)。C<sub>4</sub>植物的分布数量也由东部半湿润区的150种减少到西部半干旱区的115种<sup>[21]</sup>。

随着自东向西水热条件和生态环境梯度变化,蜗牛种类和组合也发生明显的变化,东部以喜暖湿种占优势,西部以喜冷干种为主<sup>[11,12]</sup>。本文选择2种不同生态类型的蜗牛种类进行壳体稳定同位素分析,其中*P. aeoli*为典型的喜冷干种蜗牛,*P. orphana*为典型的喜暖湿种蜗牛<sup>[4,11,12,24,25]</sup>。*P. aeoli*喜好生活于相对干冷的气候条件,现今主要分布在西北内陆半干旱气候带<sup>[11]</sup>,这些地区日均温度≥10℃的持续天数大约在140~180 d,夏季持续时间短,一般小于45 d<sup>[20]</sup>。*P. orphana*喜好暖湿的气候条件,现今主要分布在黄河流域以南地区<sup>[11]</sup>,这些地区日均温度≥10℃的持续天数在200 d以上,夏季暖湿,持续时间大于60 d<sup>[20]</sup>。在18个采集的现生蜗牛组合中均有丰富的*P. aeoli*和*P. orphana*蜗牛,共分析、鉴定、挑选出36组(2×18)现生蜗牛样品,每组15~30个成年蜗牛壳体,用于稳定同位素分析<sup>[15]</sup>。

地层剖面样品:西峰黄土剖面(35°46'N,107°41'E)位于黄土高原中部,海拔1340 m(图1),该剖面是黄土高原最经典的地层剖面之一,前人做过大量的研究工作<sup>[5,6,10,26~33]</sup>,末次冰期以来该剖面的蜗牛化石组合已有很好的研究<sup>[32,33]</sup>。该区现处于温带半干旱季风气候区,夏季受东亚夏季风影响,温暖湿润;冬春季节受来自西伯利亚的冬季风控制,寒冷

干燥。西峰地区四季分明,夏季长40~50 d,冬季长约为180 d<sup>[20]</sup>。现代年均温为~9.3℃,年均降水量~560 mm,降水主要集中在6~9月,占全年降水量的66%,春季降水占20%,大气降水氧同位素呈现春季富<sup>18</sup>O夏季贫<sup>18</sup>O的特征(图2)。

西峰剖面末次冰期以来L<sub>1</sub>~S<sub>0</sub>地层厚12.2 m,顶部40 cm为耕作层,耕作层底界对应的年代约为3 ka<sup>[4]</sup>。图3显示西峰剖面地层、磁化率<sup>[6]</sup>、与海洋氧同位素曲线<sup>[34]</sup>的对应关系。通过室内测得的磁化率值与Kukla等人<sup>[5,6]</sup>发表的同一剖面年代磁化率曲线进行对比,获得该剖面研究时段的地层年代为0~75.5 ka。

地层蜗牛组合样品按10 cm间距进行采集,每个样品重约15 kg,共计122个样品。在野外用0.5 mm的筛网用水筛洗,带回实验室再进一步清洗,烘干,在显微镜下挑选出所有的蜗牛个体。从122个地层样中,获得*P. aeoli*化石115组,*P. orphana*化石37组,每组挑出15~30个成年的蜗牛壳体作同位素测试<sup>[15]</sup>。需要指出的是,地层中*P. orphana*在L<sub>1.1</sub>和L<sub>1.5</sub>地层中数量很少。一些样品的蜗牛化石数量达不到稳定同位素测试所需的量时,我们采取将其邻近的一个或多个蜗牛化石样品合并再进行测试。

同位素测试方法:将挑选出的现代或化石蜗牛壳体置于超声波中清洗去除黏附在壳体表面的沉积物和有机物,待烘干后轻轻捣碎蜗牛壳体,用10%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>充分浸泡24 h去除内壁黏附的有机质,清洗、烘干并研磨至100 μm以下粒级。稳定同位素测量在中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室进行。在真空条件下将壳体粉末样品与100% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>在25℃下恒温反应一昼夜,收集纯化反应产生的CO<sub>2</sub>气体供质谱仪测量同位素组成。蜗牛壳体碳酸盐<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C和<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O比值分别用相对于VPDB标准的千分差δ<sup>13</sup>C和δ<sup>18</sup>O表示:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ 或 } \delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000,$$

其中, $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  或  ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 测量标准偏差(1σ)为0.1‰,δ<sup>18</sup>O小于0.2‰。

## 2 结果

### 2.1 现生蜗牛壳体稳定碳、氧同位素组成

稳定碳同位素:黄土高原现生蜗牛组合中,*P. aeoli*壳体δ<sup>13</sup>C值平均-7.6 ± 1.3‰(分布范围-9.1‰~

表 1 黄土高原 18 个现生蜗牛采样点的季节长度及 *P. aeoli* 和 *P. orphana* 壳体稳定同位素组成

编号	采样点	纬度 (N)	经度 (E)	持续时间(d)		$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$		$\delta^{13}\text{C}$ 差值	平均值 <sup>a)</sup> (绝对值)	SD	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$		$\delta^{18}\text{O}$ 差值	平均值 <sup>a)</sup> (绝对值)	SD
				$\geq 10^\circ\text{C}$	夏季	<i>P. aeoli</i>	<i>P. orphana</i>				<i>P. aeoli</i>	<i>P. orphana</i>			
1	官亭	35°52.2'	102°47.2'	162 ± 7	<30	-7.9	-8.5	0.6	0.3	-2.9	0.3	3.2	3.2	2.9	0.6
2	积石山	35°45.2'	102°48.5'	162 ± 7	<30	-8.8	-9.1	0.3	-1.8	-3.3	-1.8	1.5	1.5	2.9	0.6
3	三十里铺	35°26.9'	103°17.2'	162 ± 7	<30	-9.1	-7.7	-1.4	0.2	-5.2	1.1	4	4	2.9	1.3
4	秦安	35°2.0'	105°27'	191 ± 6	47 ± 16	-6.8	-4.6	-2.2		-5.9		2.7	2.7		
5	天水	34°36.7'	105°54.5'	191 ± 6	47 ± 16	-8.9	-8	-0.9		-7		3.9	3.9		
6	永寿	34°55.4'	106°3.5'	191 ± 6	47 ± 16	-8.9	-7.8	-1.1	1.4	-6	0.7	3.3	3.3	3.3	0.6
7	平凉	35°24.2'	107°5.1'	183 ± 6	41 ± 14	-9.1	-7.5	-1.6		-7		1.9	1.9		
8	西峰	35°45.8'	107°41.1'	183 ± 6	41 ± 14	-7.3	-4.9	-2.4		-6.6		4.6	4.6		
9	西峰	35°45.9'	107°41.1'	183 ± 6	41 ± 14	-5.2	-3.1	-2.1		-6.3		3.6	3.6		
10	西峰	35°45.6'	107°41.2'	183 ± 6	41 ± 14	-8.1	-7.3	-0.8	1.7	-5.7	0.7	2.3	2.3	3.1	1.2
11	庆阳	36°1.9'	108°10.0'	186 ± 6	45 ± 14	-6.9	-2.8	-4.1		-8.9		5.2	5.2		
12	张家湾	36°1.4'	108°53.9'	186 ± 6	45 ± 15	-7.8	-8	0.2		-5.7		2.3	2.3		
13	宜君	35°25.5'	109°5.8'	196 ± 7	57 ± 18	-8.2	-7.9	-0.3		-5.5		4.1	4.1		
14	安塞	36°50.3'	109°19.6'	188 ± 6	42 ± 15	-6.1	-4.8	-1.3		-7		3.4	3.4		
15	洛川	35°52.7'	109°24.8'	196 ± 7	57 ± 18	-7	-5.4	-1.6		-7.3		4.4	4.4		
16	延安	36°34.6'	109°24.9'	188 ± 6	42 ± 15	-7.7	-7.5	-0.2	1.2	-6	1.6	2.3	2.3	3.6	1.2
17	保德	38°1.2'	111°9.9'	184 ± 6	51 ± 15	-7.9	-6.2	-1.7	1.7	-6.7	-	3.1	3.1	3.1	-
18	娘子关	37°55.5'	113°55.1'	202 ± 6	71 ± 13	-4.7	-1.9	-2.8	2.8	-7.8	-	4.7	4.7	4.7	-

a) 每 2 个经度内, *P. aeoli* 和 *P. orphana* 壳体稳定碳、氧同位素差值的平均值

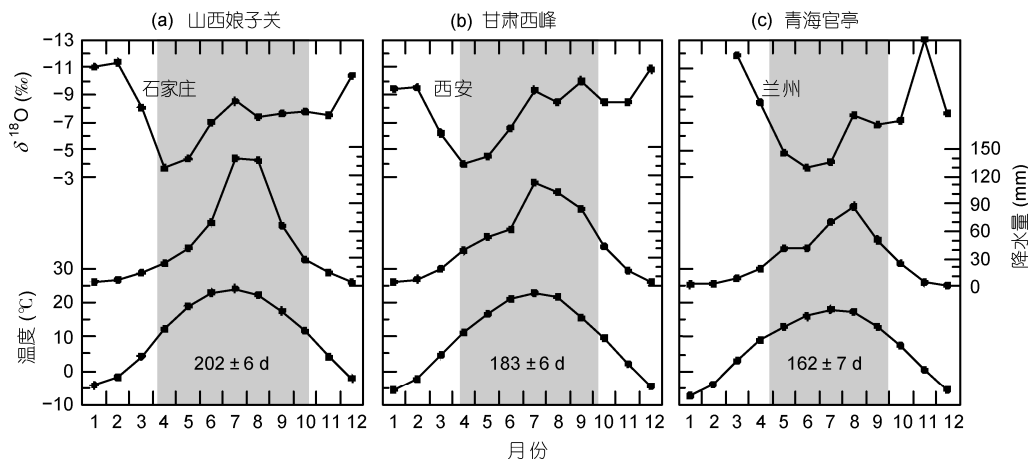


图2 黄土高原东部娘子关(a)、中部西峰(b)和西部官亭(c)月均温度、月均降水量以及最近站点(石家庄、西安、兰州)大气降水  $\delta^{18}\text{O}$ (‰, VSMOW)的月变化

大气降水氧同位素数据均来自全球降雨同位素组分网络数据库(GNIP), [http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), 下同。阴影区域为适宜蜗牛活动的温度范围(即  $\geq 10^\circ\text{C}$ )<sup>[22,23]</sup>和持续的天数<sup>[20]</sup>

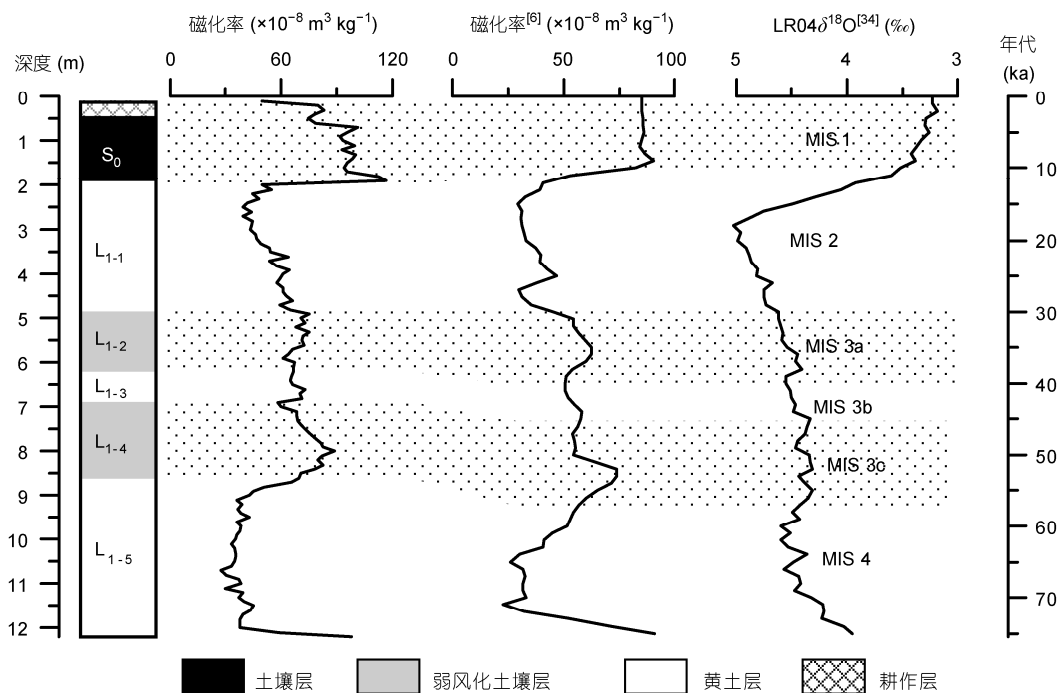


图3 西峰剖面地层、磁化率<sup>[6]</sup>与 LR04 氧同位素曲线<sup>[34]</sup>的对应关系

-4.7‰), *P. orphana* 壳体  $\delta^{13}\text{C}$  值平均  $-6.3 \pm 2.2\text{‰}$  (分布范围为  $-9.1\text{‰}$ ~ $-1.9\text{‰}$ ) (表 1, 图 4(a)). *P. aeoli* 蜗牛壳体普遍比 *P. orphana* 蜗牛壳体亏损  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  值平均偏负  $1.3 \pm 1.0\text{‰}$ , 并且由黄土高原西部至东部, 这种亏损程度逐渐增加, 表现在 2 种蜗牛壳体碳同位素差值逐渐增大. 在蜗牛生长期较长的东部, 冷、暖 2 种蜗牛壳体碳同位素差值越大.

由于在某些经度范围内有多个现生蜗牛样品, 个别采样点南北相距 100~200 km (图 1), 并且采自同一地区不同微环境(塬上、沟谷)的蜗牛壳体碳同位素组成之间也存在明显差异(图 4(a)), 结果显示在经度上蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围较大. 为了揭示蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  值沿东-西向环境梯度变化的总体趋势, 我们以每 2 个经度内的所有现生样品为 1 个单元, 取 2 种

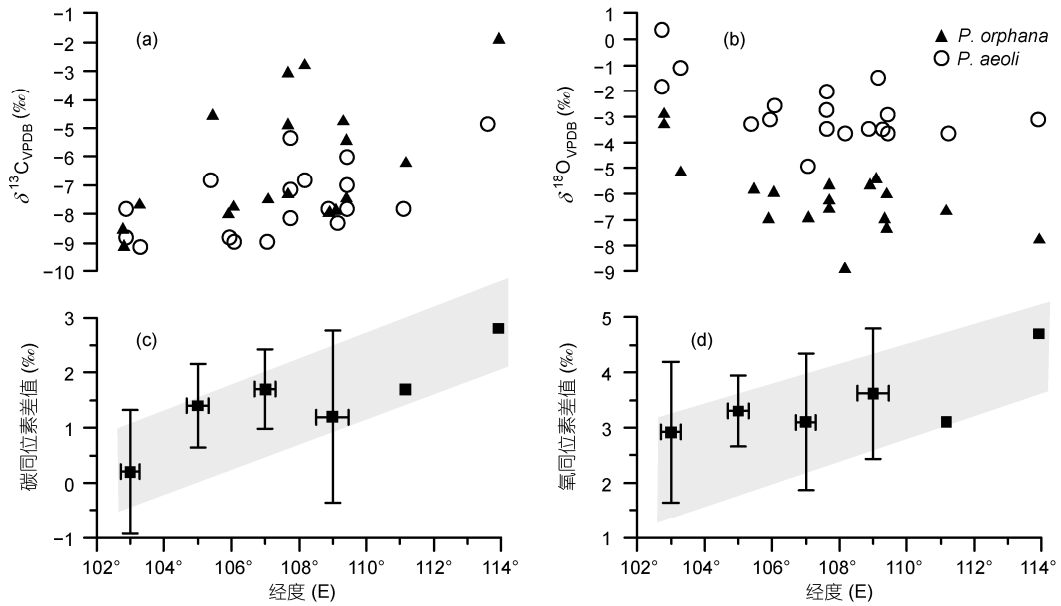


图 4 黄土高原现生蜗牛壳体碳(a)、氧(b)同位素组成特征及 2 种蜗牛壳体碳(c)、氧(d)同位素差值变化趋势

蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  差值的平均值作图(图 4(c)). 最西部生长季节短的地区 2 种蜗牛壳体碳同位素差值最小, 为  $0.2 \pm 1.1\text{‰}$ , 最东部生长季节长的地区, 其差值最大, 达到  $2.8\text{‰}$ .

稳定氧同位素: *P. aeoli* 蜗牛壳体  $\delta^{18}\text{O}$  值分布在平均  $-2.8 \pm 1.2\text{‰}$ (分布范围  $-5.0\text{‰}$ ~ $0.3\text{‰}$ ), *P. orphana* 壳体  $\delta^{18}\text{O}$  值相对偏负, 平均  $-6.2 \pm 1.4\text{‰}$ (分布范围  $-8.9\text{‰}$ ~ $-2.9\text{‰}$ )(表 1, 图 4(b)). 现生 *P. aeoli* 蜗牛壳体比 *P. orphana* 壳体富集  $^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值平均偏正  $3.3 \pm 1.1\text{‰}$ , 由西往东, 其富集程度逐渐增加, 与碳同位素结果相似, 在蜗牛生长期越长的东部, 冷、暖 2 种蜗牛壳体氧同位素差值越大.

以每 2 个经度内的所有现生样品为 1 个单元, 取 2 种蜗牛壳体  $\delta^{18}\text{O}$  差值的平均值作图(图 4(d)), 西部地区 2 种蜗牛壳体氧同位素差值最小, 为  $2.9 \pm 1.3\text{‰}$ , 东部差值最大, 为  $4.7\text{‰}$ .

## 2.2 L<sub>1</sub>~S<sub>0</sub> 地层中蜗牛化石壳体碳、氧同位素组成

分析获得西峰黄土剖面 L<sub>1</sub>~S<sub>0</sub> 地层中喜冷干种蜗牛 *P. aeoli* 的 115 个样品同位素数据, 连续记录了 75 ka 以来的同位素变化过程; 而暖湿类的 *P. orphana* 种只在 37 个样品获得了足够进行同位素分析的量, 主要分布在 S<sub>0</sub> 地层和 L<sub>1-1</sub> 上部, 少量出现在 L<sub>1-3</sub>, L<sub>1-4</sub>, L<sub>1-5</sub> 地层中(图 5).

总体上喜冷干的 *P. aeoli* 较喜暖湿的 *P. orphana* 蜗牛壳体具有偏负的碳同位素组成以及偏正的氧同位素组成. *P. aeoli* 壳体  $\delta^{13}\text{C}$  值分布在  $-6.4\text{‰}$ ~ $-8.3\text{‰}$  之间, *P. orphana* 壳体的  $\delta^{13}\text{C}$  值分布在  $-3.2\text{‰}$ ~ $-6.8\text{‰}$  之间(图 5). *P. aeoli* 壳体  $\delta^{18}\text{O}$  值变化幅度大, 最大值为  $-3.1\text{‰}$ , 最小值为  $-8.9\text{‰}$ , 变幅近  $6\text{‰}$ . *P. orphana* 壳体  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-6.0\text{‰}$ ~ $-8.1\text{‰}$ (图 5). 但 2 种蜗牛的同位素差值在 4 个不同的阶段(MIS 4, MIS 3c-3b, MIS 2, MIS 1)有明显差别.

MIS 4(L<sub>1-5</sub>): 2 种蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  的平均差值  $0.9 \pm 0.2\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  的平均差值  $0.5 \pm 0.5\text{‰}$ .

MIS 3c-3b(L<sub>1-4</sub>~L<sub>1-3</sub>): 2 种蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  的平均差值  $2.5 \pm 0.4\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  的平均差值  $1.6 \pm 0.8\text{‰}$ .

MIS 2(L<sub>1-1</sub>): 2 种蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  的平均差值  $0.2\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  的平均差值  $0.4\text{‰}$ .

MIS 1(S<sub>0</sub>): 全新世早期(11~8 ka): 蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  的平均差值  $1.3 \pm 0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  的平均差值  $2.2 \pm 0.6\text{‰}$ . 全新世中期(8~3 ka): 蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  的平均差值  $2.6 \pm 0.7\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  的平均差值  $2.1 \pm 1.4\text{‰}$ . 全新世晚期(<3 ka): S<sub>0</sub> 顶部为耕作层蜗牛壳体同位素差值缺少环境意义.

蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的差值, 在全新世(MIS 1)中期最大, 在间冰段 MIS 3 次之, 在冰期(MIS 4, MIS 2)最小.

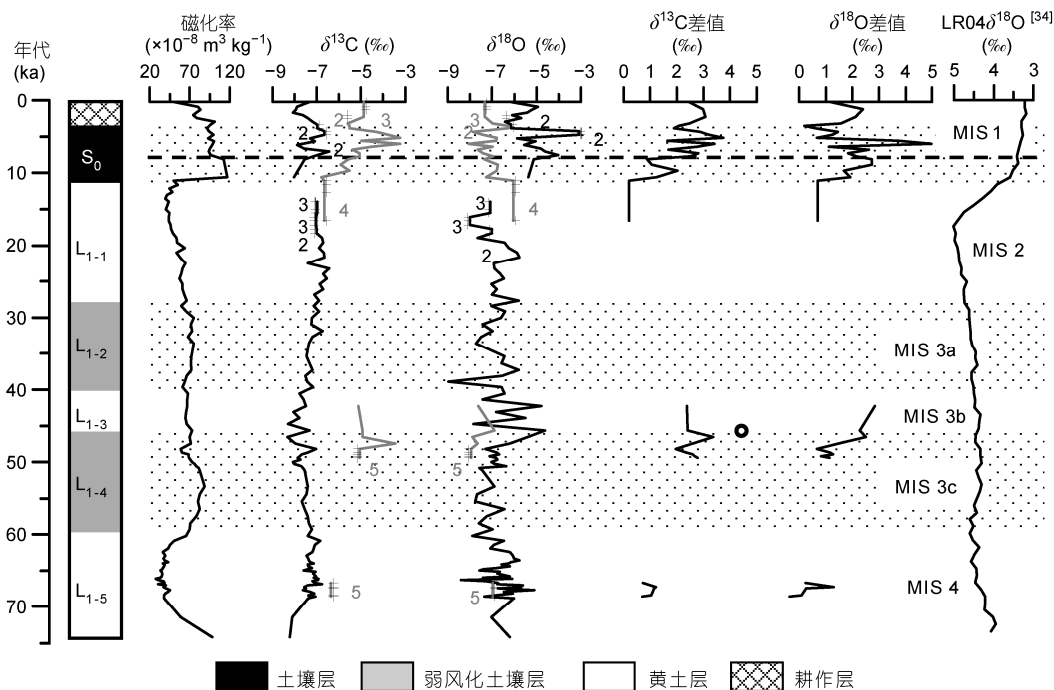


图5 西峰黄土剖面 L<sub>1</sub>~S<sub>0</sub> 地层 *P. aeoli* (黑线)和 *P. orphana* (灰线)蜗牛化石壳体碳、氧同位素组成和碳、氧同位素差值  
“+”对应的点为混合样品，边上数字为混和的样品数，碳同位素差值中的圆为异常数值

### 3 讨论

#### 3.1 现生蜗牛壳体稳定碳、氧同位素组成的意义

(i) 蜗牛壳体碳同位素组成与植物生长季节的关系. 陆生蜗牛饲养实验证明, 蜗牛软体躯干有机碳同位素 <sup>13</sup>C 相对于食物几乎没有差别, 壳体文石相对食物 <sup>13</sup>C 富集 14.2‰<sup>[35]</sup>, 而陆生蜗牛主要以植物的幼芽和嫩叶为食, 其壳体碳同位素组成与壳体生长季节的 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 植被组成密切相关<sup>[14-16,36-38]</sup>. C<sub>3</sub> 比 C<sub>4</sub> 植物需要更多的水分, C<sub>4</sub> 比 C<sub>3</sub> 植物需要更高的温度<sup>[39]</sup>, 因此对于四季分明的地区, C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物生长具有显著的季节性, 由于温度的限制, 春季主要是 C<sub>3</sub> 植物繁盛的季节, 夏季则是 C<sub>4</sub> 植物的主要生长季节<sup>[39]</sup>. 此外, C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物具有不同的碳同位素组成, 平均值分别为 -27‰ 和 -13‰<sup>[40]</sup>.

黄土高原现生 *P. aeoli* 壳体 <sup>13</sup>C 值显著偏负于 *P. orphana* 壳体 <sup>13</sup>C 值, 最高偏负 2.8‰, 说明 *P. aeoli* 摄入的 C<sub>3</sub> 植物更多, 是相对喜欢活动于气候干冷或冷湿环境条件下、且适合于 C<sub>3</sub> 植物生长的春秋季节, 这与我们对现生蜗牛的观察结果一致, 我们 2005 年 5 月中旬和 2006 年的 9 月中旬分别在黄土高

原的东南部和六盘山观察到雨后此种蜗牛的活动. 而 *P. orphana* 壳体 <sup>13</sup>C 值相对偏正, 指示在黄土高原 *P. orphana* 蜗牛的活动季节主要集中于暖湿的夏季, 摄入的 C<sub>4</sub> 植物更多, 与此种蜗牛喜暖湿环境的生活习性相吻合. 此外, 植物的 <sup>13</sup>C 组成同时又受气候环境因子的影响<sup>[41,42]</sup>. 温度、降水、光照条件等都是影响植物尤其是 C<sub>3</sub> 植物的 <sup>13</sup>C 组成的气候环境因子, 夏季暖湿的气候会导致植物碳同位素组成较生长于干冷春季的植物偏负<sup>[43]</sup>. 然而 *P. aeoli* 壳体相对偏负的 <sup>13</sup>C 值并不是比 *P. orphana* 更频繁活动于夏季的结果, 这与 2 种蜗牛生活习性矛盾<sup>[11,12]</sup>, 而主要是受 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 食物组成差异控制, 气候环境因子也存在一定的影响. 因此, 蜗牛壳体碳同位素组成能够反映蜗牛食物中 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 植物组成特征, 进而指示蜗牛壳体的主要生长季节.

(ii) 蜗牛壳体氧同位素组成与季节性大气降水的关系. 陆生蜗牛壳体氧同位素组成主要取决于壳体沉淀时溶液的氧同位素组成, 而蜗牛体液水是直接或间接地来自于大气降水, 因此不同研究认为蜗牛壳体碳酸盐能够可靠地记录降水氧同位素组成的相对变化, 与大气降水 <sup>18</sup>O 丰度呈正相关关系<sup>[13,17,44-47]</sup>.

蜗牛壳体氧同位素组成也受壳体形成时的温湿度影响,与之呈负相关关系<sup>[23,48]</sup>。黄土高原地区夏季降水氧同位素组成较春季偏负(图 2),且气候具有湿热同步特征,夏季温度比春季的更高,湿度更大。因此,生长于春季的蜗牛比夏季生长的蜗牛壳体碳酸盐具有更正的 $\delta^{18}\text{O}$ 值<sup>[16]</sup>。黄土高原现生 *P. aeoli* 壳体氧同位素组成均显著偏正于 *P. orphana* 说明 *P. aeoli* 主要生长季节倾向于春季,而 *P. orphana* 更适宜夏季生长,与碳同位素组成反映的 2 种蜗牛主要生长季节差异相吻合。

(iii) 蜗牛壳体碳、氧同位素组成与生长季节长度关系。蜗牛生物类群的生长和活动与环境条件密切相关,对温度、湿度的要求比较高,当气候干旱或者温度低于 10℃或高于 27℃时将停止活动,进入休眠状态<sup>[22,23,49]</sup>;而且,一些典型的蜗牛种类只生存或活动在一定的温湿度条件内,在受不同地区气候季节性差异影响的环境下,发育了不同蜗牛种类占优势的组别<sup>[11,12]</sup>。从空间上看,黄土高原从西到东 2 种蜗牛壳体碳、氧同位素差值逐渐增大(图 4)。分析认为产生这种状况的原因在于:现今黄土高原东部山西娘子关和西部青海官亭适合蜗牛生长活动的季节长度分别为  $202 \pm 7$  和  $162 \pm 6 \text{ d}$ <sup>[20]</sup>(表 1,图 2),西部的蜗牛活动季节长度比东部的缩短了约 40 d,这种季节长度的缩短使得生长于黄土高原西部的喜冷干种蜗牛相应地推迟活动时间,甚至会更多地选择在凉爽的初夏季节活动,与暖湿种的活动时间接近。相应的蜗牛食性( $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$ )从东部有较大差异到西部比较接近,这是造成在蜗牛生长季节短的地区 2 种蜗牛碳同位素差值变小的主要原因。

从目前现代不同地区蜗牛壳体碳同位素差值变化梯度与蜗牛生长季节时间长度关系分析(表 1,图 6(a), (c)), 2 种蜗牛壳体碳同位素差值每相差 1‰, 蜗牛生长季节以及夏季长度相差约 15 d 左右。

黄土高原东部受夏季风影响强烈,夏季降水量比西部更加丰富,降水氧同位素组成更加亏损 $^{18}\text{O}$ (图 2)。降水同位素数据表明,娘子关夏季(6~8 月份) $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-7.6 \pm 0.7\text{‰}$ , 春季(4 和 5 月份) $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-3.9 \pm 0.5\text{‰}$ , 季节间的差异约为 3.7‰。西部官亭夏季(7 和 8 月份) $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-5.4 \pm 1.9\text{‰}$ , 春季(5 和 6 月份)为  $-4.9 \pm 0.7\text{‰}$ , 季节间差异仅为 0.5‰左右。东、西部季节间降水氧同位素的差异,可能是不同地区 2 种蜗牛同位素差值的原因之一。

此外,黄土高原东、西部季节间的温度和湿度差异也存在不同。在生长季节里,东部春、夏季温差可高达 11℃,夏季月均降水量比春季多 82 mm(图 2);西部春、夏季温差变化小,约为 5℃,季节间月均降水量差异也不及东部,仅为 37 mm(图 2)。东部春季和夏季降水氧同位素组成、温度、湿度的反差明显大于西部。东部季节长度越长,季节反差越大,导致 2 种蜗牛壳体氧同位素组成的差值越显著。从目前现代不同地区蜗牛壳体氧同位素差值变化梯度与蜗牛生长季节时间长度关系分析(表 1,图 6(b), (d)), 2 种蜗牛氧同位素差值每相差 1‰, 蜗牛生长季节以及夏季长度相差约 19 d 左右。因此,蜗牛壳体稳定碳、氧同位素的差值变化某种程度上具有指示蜗牛生长季节时间长度的潜力,并且碳同位素差值与蜗牛生长季节关系更为密切,比氧同位素差值更具优势(图 6)。需要指出,我们目前现有的现生蜗牛样品点数量还不足,样品点的空间分布范围也有限,需要做更进一步广泛的系统调查和分析工作,但目前 2 种蜗牛同位素差值反映的趋势是客观存在的,可以初步应用到地层蜗牛同位素记录的定量-半定量的解释中。

### 3.2 75 ka 以来不同冷、暖阶段的季节性气候特征

西峰剖面 75 ka 以来,喜冷干种 *P. aeoli* 蜗牛化石壳体碳同位素组成整体变化幅度不大,但氧同位素变化较复杂,波动频率高。相对于冷期(MIS 4 和 MIS 2), *P. aeoli* 蜗牛化石壳体碳同位素在全新世和 MIS 3 中期略微偏负,氧同位素偏正,这可能与冰期气候寒冷,喜冷干种蜗牛在凉爽夏季活动频率增加,摄入更多 $\text{C}_4$ 植物以及贫 $^{18}\text{O}$ 的夏季降水有关。先前研究认为,冰期冷干气候条件会造成 $\text{C}_3$ 植物碳同位素组成相对于暖期偏正<sup>[43]</sup>,这可能也是影响蜗牛碳同位素组成变化的因素之一。喜暖湿种 *P. orphana* 蜗牛化石壳体碳同位素在暖期比冷期偏正,氧同位素偏负,可能与暖期 $\text{C}_4$ 植被丰度高<sup>[50]</sup>以及夏季风增强导致的夏季降水氧同位素偏负<sup>[51]</sup>有关。

MIS 4(L<sub>1.5</sub>)和 MIS 2(L<sub>1.1</sub>)时期是末次冰期旋回中的 2 个寒冷阶段,这 2 个时期 2 种蜗牛壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均差值分别为  $0.9 \pm 0.2\text{‰}$ 和  $0.2\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 的平均差值分别为  $0.5 \pm 0.5\text{‰}$ 和  $0.4\text{‰}$ 。根据黄土高原现生蜗牛壳体稳定碳、氧同位素差值与蜗牛生长季节的关系以及获得的经验公式(图 6(c), (d)),可以估算出该时期蜗



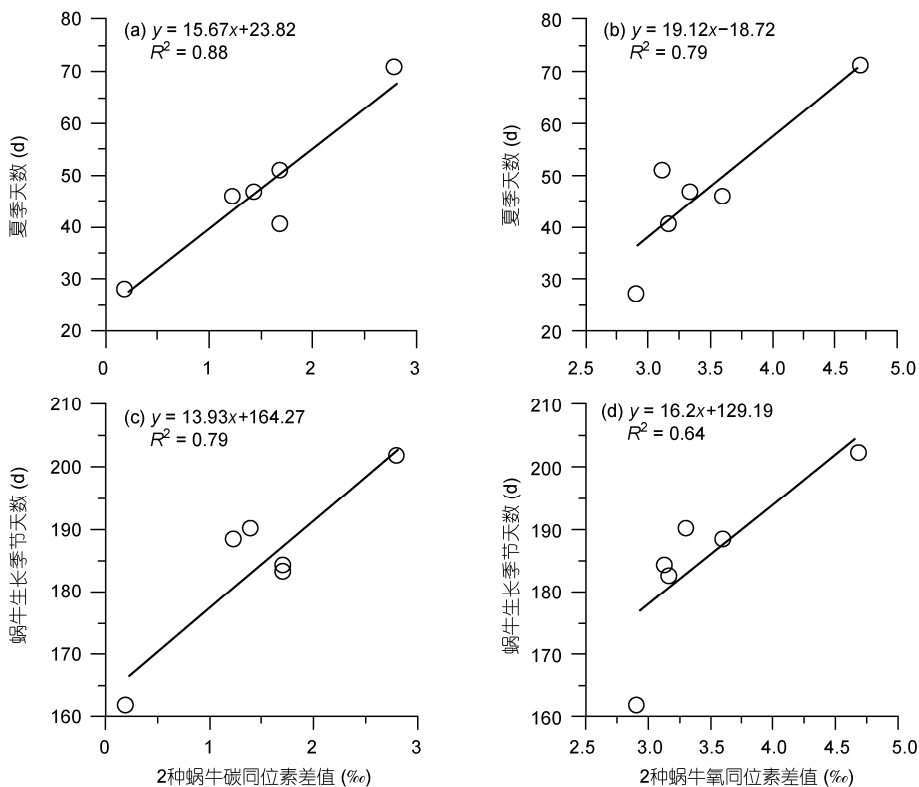


图6 2种蜗牛壳体碳、氧同位素平均差值与蜗牛生长季节和夏季长度关系  
每2个经度内所有样品作为1个单元

牛生长季节长度。然而影响蜗牛壳体氧同位素变化的因素较多<sup>[13,17,23,44-48]</sup>，用2种蜗牛壳体氧同位素差值定量恢复蜗牛生长季节长度可能存在很多不确定性，且不及碳同位素差值的结果显著(图6)。因此本文主要以碳同位素差值估算出蜗牛生长季节长度，估算结果只精确到十位，并由碳同位素平均差值的误差计算出相应的误差天数(下同)。如图5所示，2种蜗牛壳体稳定碳同位素组成差异明显减小，特别是MIS 2时期差值接近于0，这种状况类似于今天黄土高原西部现生蜗牛种类的情况，推测MIS 4和2时期西峰地区蜗牛生长季节长度大概约为 $160 \pm 3$  d，比现今该地区的生长季节长度要短20 d左右，且MIS 2时期的季节长度比MIS 4仍要更短些。

MIS 3c-3b (L<sub>1.4</sub>~L<sub>1.3</sub>)时期是末次冰期中的间冰段，气候相对比较温和<sup>[32]</sup>，这阶段2种蜗牛壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均差值 $2.5 \pm 0.4\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 的平均差值 $1.6 \pm 0.8\text{‰}$ 。如图5所示，蜗牛壳体的碳同位素差值较大，高于现今的西峰地区，而接近于东部娘子关的差值，推测MIS 3时期西峰地区蜗牛生长季节长度大概在 $190 \pm$

6 d左右。

全新世(S<sub>0</sub>)(MIS 1)时期，早期(11~8 ka)蜗牛壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均差值 $1.3 \pm 0.5\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 的平均差值 $2.2 \pm 0.6\text{‰}$ ，中期(8~3 ka)  $\delta^{13}\text{C}$ 的平均差值为 $2.6 \pm 0.7\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$ 的平均差值为 $2.1 \pm 1.4\text{‰}$ ，估算西峰地区全新世早期蜗牛生长季节长度约为170~180 d左右，略短于现今的季节长度；全新世中期的生长季节长度约为 $200 \pm 10$  d左右，比现今该区长了20 d左右，可能与娘子关的季节长度相近，比冰期的MIS 4和MIS 2阶段长了约40 d左右。

2种蜗牛壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 差值变化揭示出75 ka以来不同冷、暖时期蜗牛生长季节长度发生了明显的变化，全新世(MIS 1)中期生长季节最长，间冰段(MIS 3)次之，盛冰期(MIS 2)最短，MIS 4期次短。生物生长季节长度的变化某种程度上反映了该区夏季风影响该区的时间长度变化，这是进行古气候变化过程研究的重要内容之一，需要开展更进一步的深入工作。

由于末次冰期地层中保存的喜暖湿种 *P. or-*

*phana* 含量太低, 不能获取连续的壳体同位素数据, 因此未能对末次冰期寒冷阶段的季节性气候变化进行更加详尽的探讨. 此外, 2 种蜗牛同位素差值与生长季节长度的关系是建立在有限数量和范围的现代样品的基础上, 准确定量-半定量估计蜗牛生长季节长短的变化, 还有待更多的基础性研究.

#### 4 结论

黄土高原现生喜冷干种 *P. aeoli* 和喜暖湿种 *P. orphana* 蜗牛壳体稳定碳、氧同位素研究表明, 冷暖

种蜗牛壳体稳定同位素差值具有揭示季节长度的潜力. 2 种蜗牛壳体  $\delta^{13}\text{C}$  差值每相差 1‰, 蜗牛生长季节(或夏季长度)相差约 15 d 左右;  $\delta^{18}\text{O}$  差值每相差 1‰, 蜗牛生长季节(或夏季长度)相差约 19 d 左右.

西峰黄土剖面 75 ka 以来, 蜗牛生长季节最长的时期是全新世中期(8~3 ka), 约  $200 \pm 10$  d, 比现今该区的生长季节大概长 20 d 左右; 次之为间冰段(MIS 3)时期, 约为  $190 \pm 6$  d; 冰期阶段(MIS 4 和 MIS 2)蜗牛生长季节最短, 约  $160 \pm 3$  d 左右, 比全新世中期缩短了约 40 d 左右.

**致谢** 中国科学院地质与地球物理研究所李丰江、李泉、徐德克协助了野外采样工作, 新生代地质与环境重点实验室王旭协助进行了蜗牛同位素分析工作, 吕厚远对本文给予了热情的帮助并提出了宝贵的意见, 在此表示衷心感谢.

#### 参考文献

- Milankovitch M. Kanon der Erdbestrahlung und Seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrade: Royal Serbian Academy Special Publications, 1941. 1-633
- Zhang J C, Lin Z G. Climate of China. New York: John Wiley & Sons, 1992. 1-367
- 张宝堃. 中国四季之分配. 地理学报, 1934, 1: 1-18
- 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 62-190
- Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in Central China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 1989, 72: 203-225
- Kukla G, An Z S, Melice J L, et al. Magnetic susceptibility record of Chinese Loess. Trans Roy Soc Edinburgh: Earth Sci, 1990, 81: 263-288
- An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic-susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130000 years. Quat Res, 1991, 36: 29-36
- Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain-size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the loess plateau of central China during the last 130000-yr. Quat Res, 1995, 43: 22-29
- An Z S, Kukla G L, Porter S C, et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau. Catena, 1991, 18: 125-132
- Guo Z T, Liu T S, Fedoroff N, et al. Climate extremes in Loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic. Glob Planet Change, 1998, 18: 113-128
- 陈德牛, 高家祥. 中国经济动物志——陆生软体动物. 北京: 科学出版社, 1987. 1-186
- 吴乃琴, 李丰江. 陆生蜗牛化石与中国黄土古环境研究. 第四纪研究, 2008, 28: 831-840
- Leng M J, Heaton T H E, Lamb H F, et al. Carbon and oxygen isotope variations within the shell of an African land snail (*Limicolaria kambeul chudeaur Germain*): A high-resolution record of climate seasonality? Holocene, 1998, 8: 407-412
- Balakrishnan M, Yapp C J, Theler J L, et al. Environmental significance of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios of modern land-snail shells from the southern great plains of North America. Quat Res, 2005, 63: 15-30
- 刘宗秀, 顾兆炎, 吴乃琴, 等. 食物控制的陆生蜗牛碳同位素组成. 科学通报, 2006, 51: 2410-2416
- 顾兆炎, 刘宗秀, 许冰, 等. 末次冰期黄土中蜗牛壳体碳酸盐同位素组成与其环境指示意义. 第四纪研究, 2009, 29: 13-22
- 孙小虹, 顾兆炎, 王旭. 细纹灰尖巴蜗牛壳体氧同位素组成的季节性变化. 第四纪研究, 2009, 29: 976-980
- Colanese A C, Zanchetta G, Dotsika E, et al. Early-middle Holocene land snail shell stable isotope record from Grotta di Latronico 3 (southern Italy). J Quat Sci, 2010, 25: 1347-1358
- 林之光. 中国气候. 北京: 气象出版社, 1987. 24-34
- 钱林清. 黄土高原气候. 北京: 气象出版社, 1991. 30-54
- 殷立娟, 李美荣. 中国  $\text{C}_4$  植物的地理分布与生态学研究 I. 中国  $\text{C}_4$  植物及其与气候环境的关系. 生态学报, 1997, 17: 350-363
- Cowie R H. The life-cycle and productivity of the land snail *Theba posana* (Mollusca: Helicidae). J Animal Ecol, 1984, 53: 311-325

- 23 Balakrishnan M, Yapp C J. Flux balance models for the oxygen and carbon isotope compositions of land snail shells. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 2007–2024
- 24 Yen T C. Die Chinesischen Land-und Süßwasser-Gastropoden des Natur-Museums Senckenberg. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 1939, 444: 1–235
- 25 吴乃琴, Rousseau D D, 刘东生. 110 ka 来洛川黄土地层中蜗牛化石记录与环境因子分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26: 405–410
- 26 Liu X M, Rolph T, Bloemendal J, et al. Quantitative estimates of palaeoprecipitation at Xifeng, in the Loess Plateau of China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1995, 113: 243–248
- 27 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原粒度组成的古气候意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 278–283
- 28 Guo Z T, Biscaye P, Wei L Y, et al. Summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the weathering of loess-soil sequences in China. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 1751–1754
- 29 Jahn B, Gallet S, Han J. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: Eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chem Geol*, 2001, 178: 71–94
- 30 Wu N Q, Chen X Y, Rousseau D D, et al. Climatic conditions recorded by terrestrial mollusc assemblages in the Chinese Loess Plateau during marine Oxygen Isotope Stages 12–10. *Quat Sci Rev*, 2007, 26: 1884–1896
- 31 伍斌, 吴乃琴. 黄土高原 S<sub>5</sub> 古土壤形成期的气候环境——陆生蜗牛化石的证据. *第四纪研究*, 2008, 28: 901–908
- 32 陈晓云, 吴乃琴. 黄土高原 MIS 3 时期蜗牛化石记录的温室气候及其成因机制探讨. *第四纪研究*, 2008, 28: 154–161
- 33 陈晓云. 甘肃西峰黄土剖面 500 ka 以来的蜗牛化石记录及其古气候、古环境变化研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008. 24–78
- 34 Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA1003
- 35 DeNiro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, 42: 495–506
- 36 Goodfriend G A, Magaritz M. Carbon and oxygen isotope composition of shell carbonate of desert land snails. *Earth Planet Sci Lett*, 1987, 86: 377–388
- 37 Stott L D. The influence of diet on the  $\delta^{13}\text{C}$  of shell carbon in the pulmonate snail *Helix aspersa*. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 195: 249–259
- 38 Metref S, Rousseau D D, Benteleb I, et al. Study of the diet effect on  $\delta^{13}\text{C}$  of shell carbonate of the land snail *Helix aspersa* in experimental conditions. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 211: 381–393
- 39 Long S P. Environmental responses. In: Sage R F, Monson R K, eds. *C<sub>4</sub> Plant Biology*. San Diego: Academic Press, 1999. 215–249
- 40 Ehleringer J R. Implications of quantum yield differences to the distributions of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grasses. *Oecologia*, 1978, 31: 255–267
- 41 Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotope ratios and climate change. *Nature*, 1987, 328: 58–60
- 42 Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Ann Rev Plant Phys*, 1989, 40: 503–537
- 43 王国安, 韩家懋, 刘东生. 中国北方黄土区 C<sub>3</sub> 草本植物碳同位素组成研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 550–556
- 44 Lécalle P. The oxygen isotope composition of land snail shells as a climatic indicator: Applications to hydrogeology and paleoclimatology. *Chem Geol: Isot Geosci*, 1985, 58: 157–181
- 45 Goodfriend G A, Magaritz M, Gat J R. Stable isotope composition of land snail body water and its relation to environmental water and shell carbonate. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 3215–3221
- 46 Zanchetta G, Leone G, Fallick A E, et al. Oxygen isotope composition of living land snail shells: Data from Italy. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 223: 20–33
- 47 Kehrwald N M, McCoy W D, Thibeault J, et al. Paleoclimatic implications of the spatial patterns of modern and LGM European land-snail shell  $\delta^{18}\text{O}$ . *Quat Res*, 2010, 74: 166–176
- 48 Yapp C J. Oxygen and carbon isotope measurements of land snail shell carbonate. *Geochim Cosmochim Acta*, 1979, 43: 629–633
- 49 陈德牛, 张国庆. 中国动物志. 无脊椎动物(第 37 卷). 软体动物门, 腹足纲, 巴蜗牛科. 北京: 科学出版社, 2004. 20–27
- 50 顾兆炎, 刘强, 许冰, 等. 气候变化对黄土高原末次盛冰期以来的 C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> 植物相对丰度的控制. *科学通报*, 2003, 48: 1458–1464
- 51 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Nature*, 2001, 294: 2345–2348