



青藏高原现代食草动物牙齿珐琅质稳定同位素特征及古高度重建意义

许强, 丁林*, 张利云, 杨迪, 蔡福龙, 来庆洲, 刘静, 史仁灯

中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100085;

中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人: E-mail: dinglin@itpcas.ac.cn

2009-06-19 收稿, 2009-07-21 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-Q09-03)、国家杰出青年科学基金(批准号: 40625008)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB421000)资助项目

摘要 食草动物牙齿珐琅质具有非常强的抗成岩改造特征, 被认为是研究生态环境变化和重建古高度的理想载体之一. 对青藏高原腹地现代食草动物(牦牛、藏野驴、藏羚羊)牙齿珐琅质的稳定同位素进行了分析, 拉萨地块和羌塘南部地区食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)平均值为 $-11.3\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$, 羌塘北部和可可西里地区为 $-10.2\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$, 与高原以 C3 植物为主的植被景观是一致的; $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)值也同样表现出从南向北逐渐升高的趋势, 喜马拉雅山地区吉隆盆地平均值最低, 为 $-11.8\text{‰} \pm 3.4\text{‰}$, 拉萨地块和羌塘南部地区平均值为 $-11.1\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$, 羌塘北部和可可西里地区最高, 为 $-9.0\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$. 食草动物牙齿珐琅质氧同位素是河水(或降水)与食物(植物)氧同位素的混合, 不适合直接用来进行高度预测. 建立了高原现代食草动物牙齿珐琅质氧同位素对降水、植被及高度的响应关系, 为利用食草动物牙齿化石氧同位素重建青藏高原古高度提供了依据.

关键词

食草动物

牙齿珐琅质

稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$)

古高度

青藏高原

青藏高原古高度的变化对深入研究高原隆升的动力学机制, 亚洲季风的形成和演化历史等具有重要意义^[1~12]. 但高度变化不能像剥蚀速率一样可以直接测定, 只能通过记录古高度信息的各种替代指标间接估算. 近年来, 广泛利用古土壤、化石氧同位素^[4,9,13~24]、古植物^[25]、古气压^[26]、宇宙成因核素^[27]等方法来重建山带的高度变化历史. 其中, 以氧同位素高度计的应用最为成熟和广泛.

氧同位素研究结果揭示, 可可西里地区及昆仑山口地区于中新世中期(约 14~11 Ma)之前海拔高度达到了 3500~4000 m^[28]; 同处于班公-怒江缝合带, 相距仅 100 km 的尼玛盆地、伦坡拉盆地分别于 26 Ma^[29]、甚至 35 Ma^[18]就已和现代高度无差别; 拉

地块南木林盆地最晚于 15 Ma 左右达到目前的高度^[20,25]; 喜马拉雅山地区的塔口拉盆地、扎达盆地分别在 15 或 9.2 Ma 以前也已达到最大高度^[13,14,21]. 上述结果指示, 从喜马拉雅山到可可西里至少在 10 Ma 之前已与现代高度无差别. 但是, 昆仑山口地区食草动物化石氧同位素研究结果指出 2.5~2 Ma 以来快速隆升, 高度上升了 2600 m 左右^[23], 即当时的高度在 2000 m 左右; 同处喜马拉雅山的吉隆盆地及西夏邦马峰地区的食草动物牙齿碳同位素, 三趾马动物群、高山栎植物化石的研究揭示该地区在 7 Ma, 甚至 2 Ma 以后才快速隆升^[22,30,31], 隆升前的高度约 1000 m 左右. 上述结果的巨大差异提出动植物化石、食草动物牙齿珐琅质及相应盆地沉积的碳、氧同位素能否一

引用格式: 许强, 丁林, 张利云, 等. 青藏高原现代食草动物牙齿珐琅质稳定同位素特征及古高度重建意义. 科学通报, 2009, 54: 2160~2168

Xu Q, Ding L, Zhang L Y, et al. Stable isotopes of modern herbivore tooth enamel in the Tibetan Plateau: Implications for paleoelevation reconstructions. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0543-2

致反映生物与环境(高度)的协同演化关系。

本文通过对青藏高原现代食草动物(牦牛、藏野驴、藏羚羊)牙齿珐琅质稳定同位素, 河水氧同位素^[32]的分析, 结合植被^[33~36]及土壤有机碳同位素^[37]特征, 建立了青藏高原食草动物牙齿珐琅质稳定同位素对现代气候(降水)、植被和高度的响应关系, 为利用牙齿化石碳氧同位素重建青藏高原古环境和古高度提供了依据。

1 材料和分析方法

2005~2007 年 5 次青藏高原野外考察中共采集了 46 个现代大型食草动物牙齿样品(图 1, 表 1), 其中包括 15 个牦牛牙齿, 12 个藏野驴牙齿和 19 个藏羚羊牙齿。除 YHA01 外, 其余样品都为无人工喂养的本地个体。样品处理和测量在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室完成。将不含杂质的牙齿珐琅质剥下, 经过醋酸处理干燥后研磨成粉末, 用磷酸法提取牙齿珐琅质中碳酸盐的 CO₂ 气体^[33], 然后用 MAT 253 质谱仪进行测量。碳、氧同位素计算公式分别为: $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{样品}}/({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{标样}} - 1] \times$

1000 和 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = [({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{样品}}/({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{标样}} - 1] \times 1000$, 标样为国际标样白垩系海相化石 Pee Dee 箭石(PDB), 分析误差 $\leq 0.2\text{‰}$, 测试结果见表 1。

2 结果

2.1 食草动物牙齿珐琅质碳同位素

46 个食草动物牙齿珐琅质样品 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值的变化范围为 $-8.3\text{‰} \sim -13.8\text{‰}$, 平均值 $-10.8\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$ 。藏南牦牛牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-9.8\text{‰} \sim -13.3\text{‰}$, 平均值 $-11.2\text{‰} \pm 1.3\text{‰}$, 藏北变化范围为 $-8.3\text{‰} \sim -11.9\text{‰}$, 平均值 $-10.0\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$ (图 2(a))。藏南藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-9.6\text{‰} \sim -13.8\text{‰}$, 平均值 $-11.6\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$; 藏北变化范围为 $-8.7\text{‰} \sim -13.1\text{‰}$, 平均值 $-11.4\text{‰} \pm 1.9\text{‰}$ (图 2(b))。藏南藏羚羊牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-10.7\text{‰} \sim -12.3\text{‰}$, 平均值 $-11.2\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$; 藏北变化范围为 $-8.5\text{‰} \sim -11.2\text{‰}$, 平均值 $-10.0\text{‰} \pm 0.9\text{‰}$ (图 2(c))。藏南地区不同物种牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值 $(-11.3\text{‰} \pm 1.1\text{‰})$ 比藏北地区对应物种 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值 $(-10.2\text{‰} \pm 1.4\text{‰})$ 低 1.1‰, 但同一地区不同物种牙

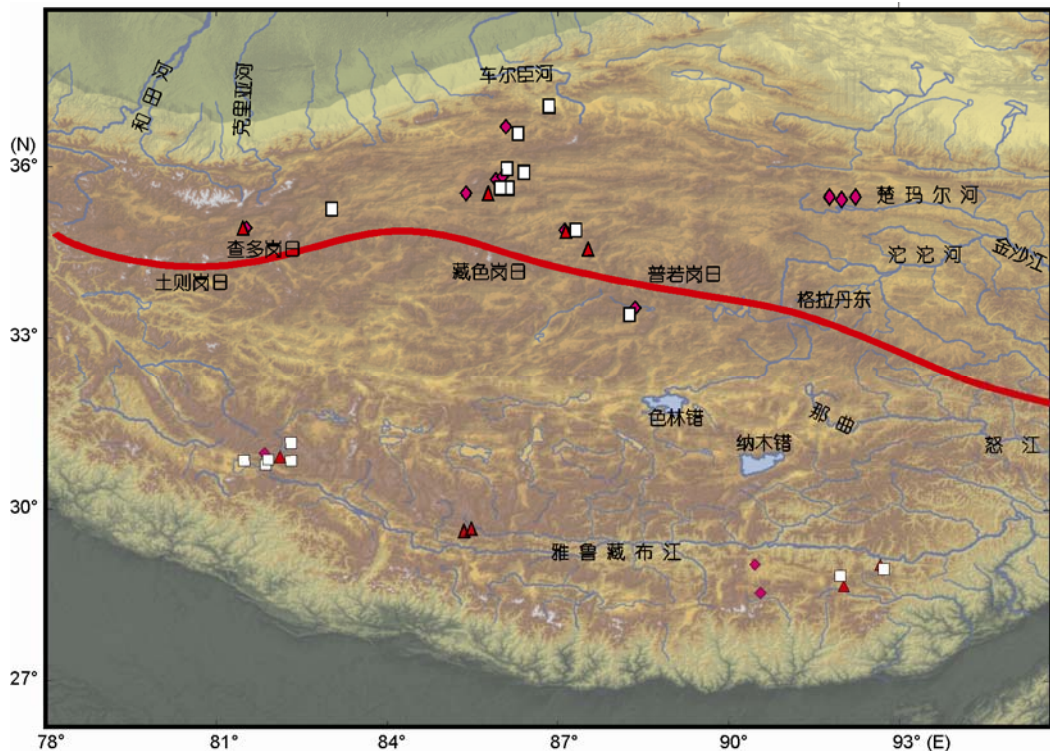


图 1 牦牛、藏野驴、藏羚羊牙齿采样位置

红色实线为青藏高原中央分水岭山脉位置, 把青藏高原分为藏北和藏南两部分。菱形、三角形、方框分别代表牦牛, 藏野驴, 藏羚羊牙齿的采样位置

表 1 青藏高原食草哺乳动物牙齿珐琅质碳、氧同位素分析结果

样品编号	珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ (‰, PDB)	珐琅质 $\delta^{18}\text{O}$ (‰, PDB)	动物饮水 $\delta^{18}\text{O}_\text{a}$ (‰, SMOW)	河水 $\delta^{18}\text{O}$ (‰, SMOW)	降水 $\delta^{18}\text{O}_\text{n}$ ^{b)} (‰, SMOW)	预测高度 ^{c)} /m	采样高度 /m	纬度 (N)	经度 (E)
藏北地区(羌塘北部, 可可西里和昆仑)									
牦牛									
2007T92	-9.2	-9.8	-12.0	-11.6	-13.7	4924	4988	34.81083°	87.12137°
2007Kt74	-8.4	-8.5	-10.4	-8.4	-10.5	4163	5157	34.85283°	81.5285°
2007Kt63	-11.4	-9.2	-11.2	-7.6	-9.7	4571	5003	35.48202°	85.3777°
2007Kt51a	-8.3	-10.2	-12.5	-7.9	-10.0	5161	5161	35.72295°	85.91843°
2007Kt59	-8.5	-9.9	-12.1	-11.6	-13.7	4983	5105	35.77537°	86.03022°
Zuonai1	-11.9	-9.1	-11.1	-8.8	-10.9	4512	4900	35.3879°	92.0237°
Zuonai2	-11.9	-9.2	-11.2	-8.8	-10.9	4571	4900	35.3879°	92.0237°
Zuonai3	-10.5	-9.4	-11.5	-8.8	-10.9	4688	4900	35.3879°	92.0237°
2007Kt46	-9.6	-9.7	-11.9	-8.8	-10.9	4865	4836	36.7187°	86.08665°
藏野驴									
2007T33	-8.7	-10.3	-12.6	-12.2	-14.3	5221	5010	34.45628°	87.52872°
2007T58	-12.4	-9.1	-11.1	-8.3	-10.4	4512	4963	34.77378°	87.14447°
2007Kt75	-13.1	-9.1	-11.1	-8.3	-10.4	4512	4938	34.84583°	81.4735°
2007Kt52	-11.3	-11.2	-13.7	-11.7	-13.8	5761	5094	35.48072°	85.76912°
藏羚羊									
2007Kt37	-10.7	-8.2	-10.0	-9.3	-11.4	3989	4219	37.07552°	86.85067°
2007Kt68	-10.7	-7.9	-9.6	-7.1	-9.2	3816	4912	35.20717°	83.0345°
2007K767	-10.0	-9.5	-11.6	-8.2	-10.3	4747	4914	35.20748°	83.03447°
2007Kt58	-9.3	-7.6	-9.3	-7.2	-9.3	3644	5036	35.65897°	86.11528°
2007Kt50	-9.9	-7.3	-8.9	-8.1	-10.2	3473	4998	35.93931°	86.10842°
2007Kt47	-8.8	-6.2	-7.5	-6.3	-8.4	2852	4873	36.57517°	86.28967°
2007Kt57	-8.5	-9.4	-11.5	-9.1	-11.2	4688	5038	35.65357°	86.08972°
2007T98	-11.2	-9.1	-11.1	-8.3	-10.4	4512	5061	34.81308°	87.14485°
2007T60	-10.3	-8.5	-10.4	-8.1	-10.2	4163	5105	35.77537°	86.03022°
藏南地区(羌塘南部, 拉萨和喜马拉雅北坡)									
牦牛									
PCA01	-10.9	-11.6	-15.7	-14.2	-14.2	4447	5013	28.5055°	90.54483°
PCA02	-11.5	-12.3	-16.5	-17.2	-17.2	4729	5013	28.5055°	90.54483°
ZDA1a	-11.5	-12.3	-16.5	-16.2	-16.2	4729	3563	29.01305°	92.69142°
YHA01	-9.9	-9.8	-13.8	-9.8	-9.8	3742	4448	29.13305°	90.449°
Z25	-13.3	-12.1	-16.2	-16.9	-16.9	4648	4800	30.73307°	81.84607°
2007T24	-9.8	-11.0	-15.1	-14.0	-14.0	4209	5048	33.66982°	88.50867°
藏野驴									
ZDA9	-13.8	-12.3	-16.5	-17.6	-17.0	4729	4279	28.88918°	91.95378°
ZDA2	-11.9	-12.6	-16.8	-17.0	-14.8	4851	3215	29.04398°	92.713°
ZDA5	-9.6	-11.5	-15.6	-16.8	-14.9	4407	3326	29.149°	92.6552°
ZDA6	-12.8	-11.6	-15.7	-16.6	-16.6	4447	4551	28.66088°	91.99842°
ZDA7	-11.7	-10.7	-14.7	-16.6	-16.6	4091	4551	28.66088°	91.99842°
Z42	-12.9	-12.1	-16.2	-17.6	-17.6	4648	4799	29.47665°	85.30818°
Z43	-10.8	-11.3	-15.4	-14.8	-17.6	4328	4849	29.5066°	85.33327°
Z18	-9.6	-11.1	-15.2	-14.9	-16.8	4248	4820	30.67592°	82.11668°
藏羚羊									
ZDA8	-12.3	-11.4	-15.5	-14.3	-14.3	4367	4279	28.88918°	91.95378°
ZDA10	-11.5	-10.7	-14.7	-14.3	-14.3	4091	4279	28.88918°	91.95378°
ZDA11	-11.5	-10.8	-14.9	-14.3	-14.3	4130	4279	28.88918°	91.95378°
ZAD3	-10.7	-11.5	-15.6	-14.8	-14.8	4407	3360	29.02705°	92.70773°
Z23	-10.8	-9.9	-13.9	-13.1	-13.1	3780	5131	30.57918°	81.78803°
Z15	-11.5	-10.8	-14.9	-13.7	-13.7	4130	5180	30.57918°	81.81837°
Z22	-10.9	-10.0	-14.0	-14.2	-14.2	3819	4950	30.61277°	81.77493°
Z39	-11.0	-12.0	-16.1	-15.6	-15.6	4607	4990	30.63367°	82.3036°
Z40	-11.0	-9.7	-13.7	-15.6	-15.6	3704	4990	30.63367°	82.3036°
2007T25	-10.7	-7.7	-11.5	-7.4	-7.4	2954	5048	33.66982°	88.50867°

a) 由公式(1)和(2)校正后的牙齿珐琅质氧同位素值对应动物饮水的氧同位素; b) 蒸发校正后代表降水的氧同位素值, 根据丁林等人^[32]; c) 由藏南, 藏北氧同位素-高度经验公式计算的高度值^[32]

齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值的变化范围和均值几乎一样, 表明 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 只与共同生活的生态系统有关。

2.2 食草动物牙齿珐琅质氧同位素

46 个食草动物牙齿珐琅质样品 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值的变化范围为 $-6.2\text{‰} \sim -12.6\text{‰}$, 平均值为 $-10.1\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$ 。藏南牦牛牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-9.8\text{‰} \sim -12.3\text{‰}$, 平均值为 $-11.5\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$; 藏北变化范围为 $-8.5\text{‰} \sim -10.2\text{‰}$, 平均值为 $-9.4\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ (图 2(a))。藏南藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-10.7\text{‰} \sim -12.6\text{‰}$, 平均值为 $-11.6\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$; 藏北变化范围为 $-9.1\text{‰} \sim -11.2\text{‰}$, 平均值为 $-9.9\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$ (图 2(b)); 藏南藏羚羊牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-7.7\text{‰} \sim -12.0\text{‰}$, 平均值为 $-10.5\text{‰} \pm 1.2\text{‰}$; 藏北变化范围为 $-6.2\text{‰} \sim -9.5\text{‰}$, 平均值为 $-8.2\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$ (图 2(c))。藏南地区不同物种牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 的平均值 ($-11.1\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$) 比藏北对应 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($-9.0\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$) 低 2.1‰ 。与 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值不同, 虽然藏北地区牦牛、藏野驴 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 平均值在误差范围内差别不大 ($-9.4\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$, $-9.9\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$), 但是藏羚羊 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 平均值明显偏高 ($-8.2\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$), 表明藏北地区藏羚羊的生活方式对珐琅质氧同位素

值产生了显著的影响。

2.3 青藏高原河水氧同位素

本文对食草动物牙齿采样点所在流域的 93 个河水样品的氧同位素进行了分析, 它们代表了食草动物生活环境饮水的氧同位素特征。利用上述 93 个数据, 分别计算了每个牙齿采样点对应流域河水的 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值 (表 1)。河水样品 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值变化范围为 $-6.3\text{‰} \sim -17.6\text{‰}$, 其中藏南地区河水变化范围为 $-7.4\text{‰} \sim -17.6\text{‰}$, 平均值为 -15.3‰ ; 藏北地区河水变化范围为 $-6.3\text{‰} \sim -12.2\text{‰}$, 平均值为 -8.9‰ 。上述结果与高原南北河水氧同位素总体特征是一致的^[32]。

3 讨论

青藏高原以中央分水岭山脉为界, 从地质和地理上划分为藏南和藏北两个地区^[32] (图 1), 食草动物珐琅质稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值从南向北逐渐升高, 表现出明显的南北空间分异特征。

3.1 牙齿珐琅质碳同位素的区域变化特征

C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 为 $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$, 平均值为 -27‰ , 包括树、大多数灌木和寒冷环境下生长的草^[39~41]; C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 为 $-8\text{‰} \sim -15\text{‰}$, 平均

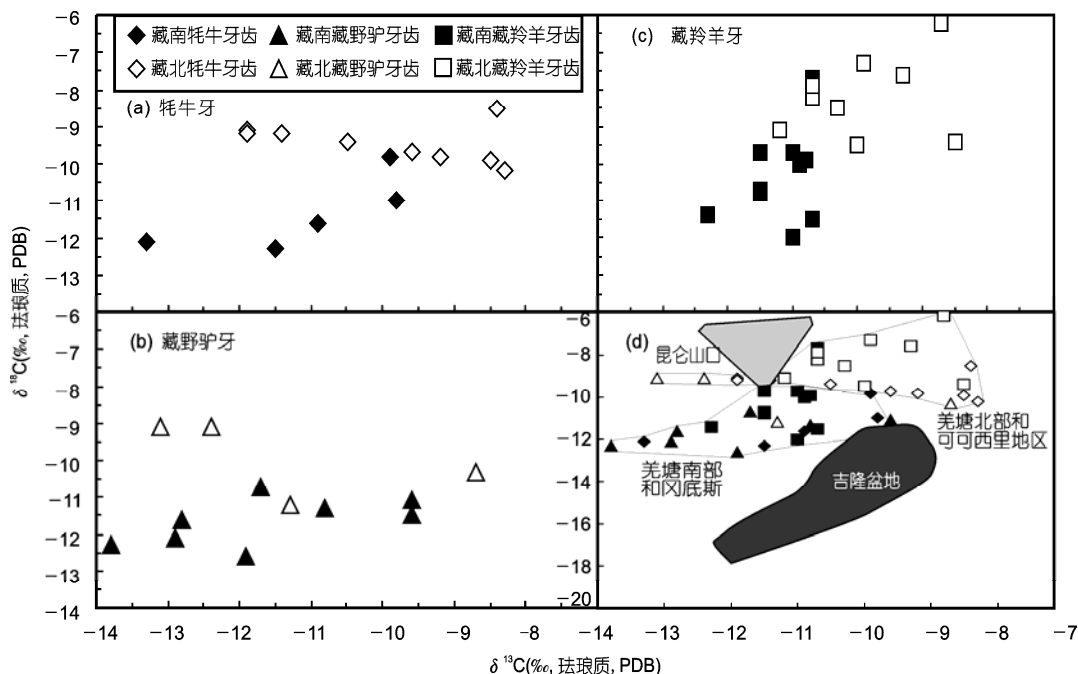


图 2 青藏高原现代食草哺乳动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相关关系

(a) 牦牛牙齿珐琅质碳氧同位素关系; (b) 藏野驴牙齿珐琅质碳氧同位素关系; (c) 藏羚羊牙齿珐琅质碳氧同位素关系; (d) $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值反映高原南北以 C_3 植物为主的生态景观特征; $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值从南向北逐渐升高表明珐琅质对不同气候特征的敏感响应。吉隆盆地和昆仑山口碳氧同位素数据来源于文献^[38]

值为 -13‰ ，主要为温带和热带草原，干旱半干旱荒漠植被^[40,41]，在低 CO_2 ^[35,40~42]分压或高光照环境中^[33]也有 C_4 植物分布。

青藏高原海拔 4000 m 以上地区以 C_3 植物为主， $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值变化范围为 $-22\text{‰} \sim -28\text{‰}$ ，平均值为 $-25.5\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$ ^[33,34,36] (图 3(a))，高于全球 C_3 植物平均值(-27‰)^[40]，缺乏特别负 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 的 C_3 植物，指示青藏高原普遍为干旱环境^[33]。藏南地区以高山灌丛草地和高山荒漠为主，峡谷地带分布有少量的高山森林植被，土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值在 $-23.6\text{‰} \pm 0.7\text{‰} \sim -21.3\text{‰} \pm 1.6\text{‰}$ 之间；藏北地区以荒漠和高山灌丛草地生态类型为主，土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值在 $-21.3\text{‰} \pm 1.6\text{‰} \sim -18.9\text{‰} \pm 2.5\text{‰}$ 之间^[37]。显然青藏高原高海拔地区以 C_3 植物为主，但存在极少量的 C_4 植物^[33~35,37] (图 3(a))。

一般地，珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 比食物(主要是草)富

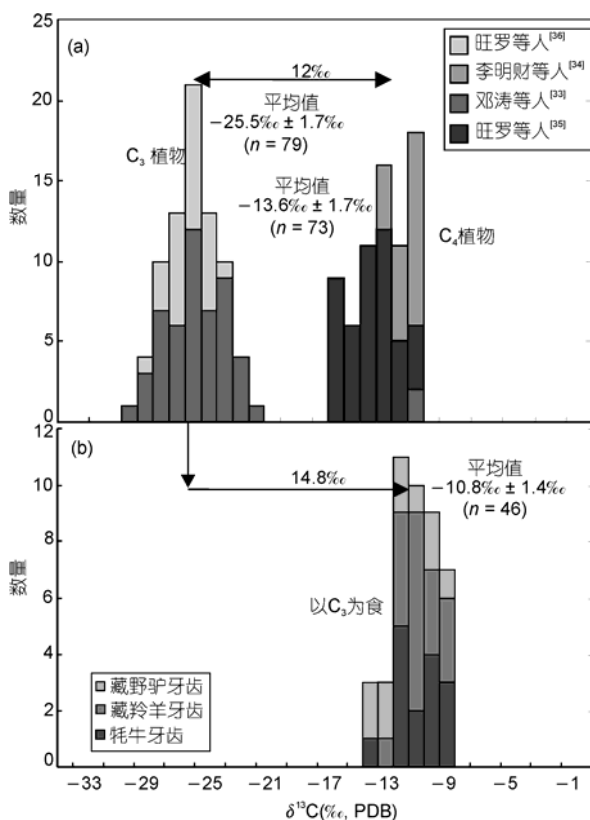


图3 青藏高原现代植物、现代食草哺乳动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值统计直方图

(a) 现代 C_3 植物($\delta^{13}\text{C}$, $-25.5\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$, $n = 79$)和现代 C_4 植物($\delta^{13}\text{C}$, $-13.6\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$, $n = 73$)^[33~36]; (b) 现代食草哺乳动物牙齿珐琅质碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$, $-10.8\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$, $n = 46$)比现代 C_3 植物富集 14.8‰

集大约 14‰ ^[33,39]。参照青藏高原植物 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值^[33~36] (图 3(a))，以 C_3 植物为食物的食草动物牙齿珐琅质的 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 变化范围应该为 $-8\text{‰} \sim -14\text{‰}$ ，平均值为 -11.5‰ 。本文结果显示，青藏高原现代食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 的变化范围为 $-8.3\text{‰} \sim -13.8\text{‰}$ ，平均值为 $-10.8\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$ (图 3(b))，与上述预测结果高度吻合。同一地区不同物种具有相似的平均值和变化幅度($4\text{‰} \sim 5\text{‰}$)，表明食草动物珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 与物种的取食对象直接相关而与物种的系统分类无关^[33] (图 2(d))。虽然在高海拔地区(> 4000 m)存在少量的 C_4 植物^[35]，但是单个牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值表现出较小的变化范围^[38]，表明无论藏南还是藏北食草动物很少或者几乎没有将 C_4 植物作为取食对象。高原南北不同地区，3种动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值表现出系统的差别，南部牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均值($-11.3\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$)普遍低于北部 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均值($-10.2\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$)约 1.1‰ ，指示高原北部比南部更加干旱，季风影响显著减弱。

3.2 牙齿珐琅质氧同位素的区域变化特征

动物牙齿氧同位素主要由动物的温度和体液决定^[43]，由于哺乳动物体温恒定(37°C)，牙齿的氧同位素直接由体液决定。但是动物体液受食物、饮水、新陈代谢等多种因素的影响^[44]。对于体型大于 1 kg 的食草哺乳动物来说，体液中的水主要来自饮水^[23,43,45,46]。因此食草哺乳动物牙齿和骨骼中的氧同位素能系统反映当地河水或降水的氧同位素变化^[23,43,45,46]。

以青藏高原中央分水岭山脉为界，高原南部降水相对丰富为印度洋暖湿气团控制下的季风环境^[47~50]，河水氧同位素值较低，平均值为 -15.6‰ ^[32]；北部为大陆性气团控制下的内陆干旱环境^[47~50]，河水 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 较高，平均值为 -8.6‰ ^[32]。从喜马拉雅，到冈底斯和羌塘南部、再到羌塘北部和可可西里地区，食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 平均值分别为 $-11.8\text{‰} \pm 3.4\text{‰}$ ^[38]， $-11.1\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$ ， $-9.0\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$ (图 2(d))。与河水 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值变化趋势一致，食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值随纬度升高而升高，但藏南地区对水依赖性强的牦牛和藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值($-11.6\text{‰} \pm 1.1\text{‰}$)大大高于河水 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值(-15.3‰)，平均相差 3.7‰ 左右；而藏北地区对水依赖性强的牦牛和藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值($-9.6\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$)低于河水 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值(-8.6‰)，两者相差 1‰ 左右 (图 4)。但藏羚羊不同，在

藏北地区其珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 平均值 $-8.2\text{‰}\pm 1.1\text{‰}$ 比河水要高 0.4‰ 。

青藏高原相对低 CO_2 分压和夏季相对高温的环境,迫使植物进行景天酸代谢(CAM),叶片水分中的 H_2^{16}O 优先蒸发,导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值比土壤水分升高 10‰ ,甚至更多^[44],致使食草动物牙齿珐琅质的 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值比地表水(河水) $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值升高。上述结果说明,植物水分对动物体液有重要的贡献。但藏北地区,牦牛和藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值比河水 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值系统偏低 1‰ 左右,这可能是由于强烈的蒸发作用使得河水氧同位素升高所致。无论藏南和藏北,食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值都偏离了降水(或河水) $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值(图4)。

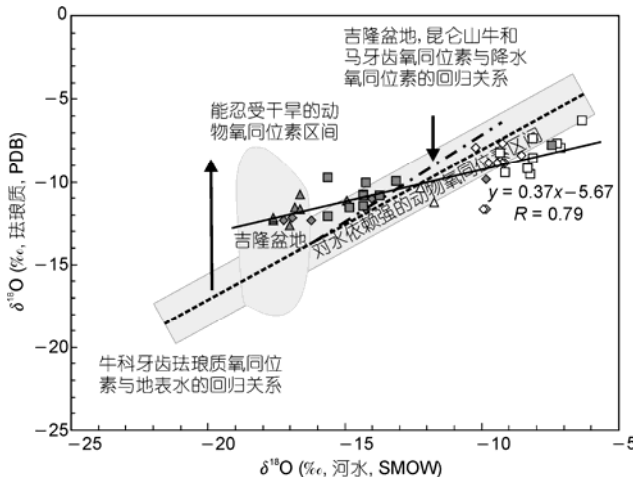


图4 珐琅质氧同位素(PDB)与河水氧同位素(SMOW)的关系

吉隆盆地,昆仑山数据和牛、马牙齿氧同位素与降水氧同位素回归关系(点划线)来源于文献[38]。对水强依赖性动物氧同位素,能忍受干旱动物的氧同位素数据和牛科牙齿氧同位素与降水氧同位素回归关系(虚线)来源于文献[43]。图例同图2

3.3 牙齿珐琅质氧同位素高度变化特征

与牙齿珐琅质碳同位素全部来自食物不同,其氧同位素是饮水和植物结合水氧同位素的混合。除喜马拉雅南坡(吉隆盆地南部)外^[38],高原食草动物珐琅质氧同位素值与河水氧同位素值大大偏离 $1:1$ 的线性关系(图4),因而,利用牙齿珐琅质氧同位素预测当地降水氧同位素时需要剔除植物的影响,同时还要进行必要的蒸发改修正。

首先对藏北地区的河水进行蒸发修正,以沱沱河地区降水氧同位素的平均值代表未受蒸发影响的

藏北降水氧同位素值,以沱沱河河水的平均值代表受蒸发影响的地表水(或河水)的氧同位素值,二者之差为 -2.1‰ ^[32]。把藏北河水样品 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 普遍减去 2.1‰ ,修正为未受蒸发影响降水的 $\delta^{18}\text{O}_n(\text{SMOW})$ 值^[32](表1)。高原南部降水来源于孟加拉湾较湿润条件下蒸发的水汽^[48],河水氧同位素值(-15.6‰)^[32]能很好地代表降水氧同位素值(拉萨, -15.88‰)^[49],因而不作修正。然后建立高原地区食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 与对应流域降水 $\delta^{18}\text{O}_n(\text{SMOW})$ 之间的回归关系(图5),剔除4个明显异常的样品(2007Kt47, 2007Kt51a, YHA01, 2007T25),其关系如下列公式(1)和(2)所示。

$$\delta^{18}\text{O}_n(\text{SMOW}) = 1.24\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) + 0.17 \quad (R^2 = 0.5612)(\text{藏北}), \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O}_n(\text{SMOW}) = 1.07\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) - 3.30 \quad (R^2 = 0.4006)(\text{藏南}), \quad (2)$$

其中 $\delta^{18}\text{O}_n(\text{SMOW})$ 和 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 分别为降水及牙齿珐琅质氧同位素值。

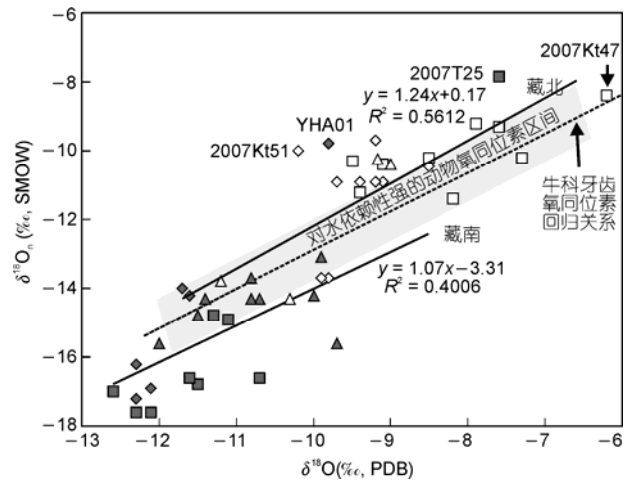


图5 青藏高原北部及南部地区珐琅质氧同位素(PDB)与降水氧同位素(SMOW)线性回归关系

藏北藏羚羊样品 2007Kt51, 2007Kt47(可能为非本地个体), 藏南牦牛样品 YHA01(家养)和藏羚羊样品 2007T25(可能为非本地个体)没有参与回归分析。对水依赖性强动物氧同位素数据和牛科牙齿氧同位素回归关系来源于文献[43]。图例同图2

应用上述关系式,分别计算出高原不同地区每个食草动物牙齿珐琅质的 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值所对应降水的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_n(\text{SMOW})$ 值,即表1中牙齿珐琅质相应食草动物饮水的 $\delta^{18}\text{O}_e(\text{SMOW})$ 值。

利用已有的藏北氧同位素-高度经验模型^[32]对羌塘北部及可可西里地区现代食草动物的生活高度范

围进行了估计. 牦牛和藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 对应饮水 $\delta^{18}\text{O}_\text{e}$ (SMOW)预测高度的范围为 4160 ~ 5700 m, 平均高度为 (4803 ± 414) m(图 6(a)). 实际采样高度的变化范围为 4830 ~ 5160 m, 平均 (5000 ± 100) m, 另外牦牛和藏野驴的生活习性决定了它们生活的海拔高度的变化范围较大, 假设 ± 500 m为其生活高度变化的上下限值, 那么牦牛和藏野驴生活的高度范围 4330 ~ 5660 m, 与计算高度的范围具有很好的一致性. 羌塘北部及可可西里地区藏羚羊牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)对应饮水 $\delta^{18}\text{O}_\text{e}$ (SMOW)的高度变化范围较大(3473~4750 m), 平均高度为 (3987 ± 609) m, 明显低于实际采样高度平均值 $((4906 \pm 269)$ m). 与牦牛和藏野驴不同, 藏北地区的部分母藏羚羊由于产羔而长途迁徙到可可西里等高海拔地区(如样品 2007Kt47, 采样高度为 4873 m, 牙齿珐琅质氧同位素计算高度 2852 m).

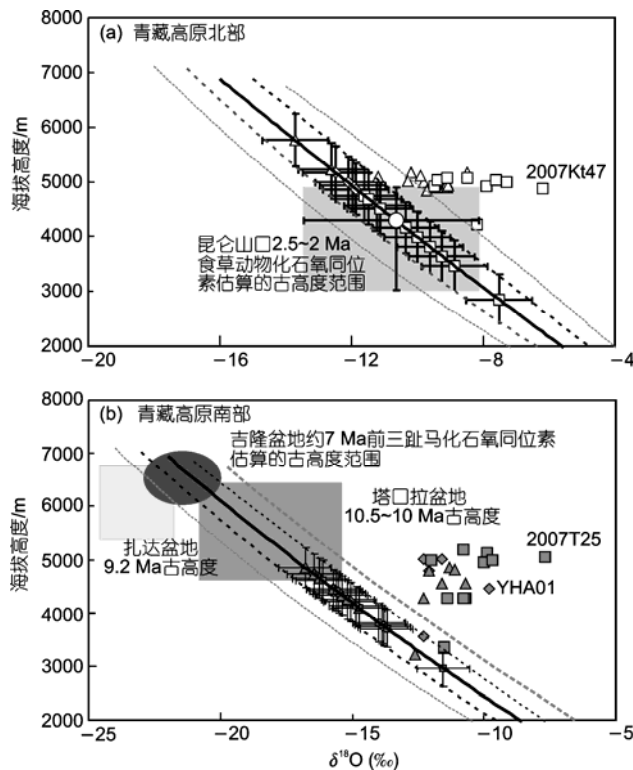


图6 食草动物牙齿珐琅质氧同位素与采样高度的关系以及动物饮水氧同位素高度估计

高度预测模型来源于丁林等人^[32]. 利用食草动物化石氧同位素估算昆仑山口 2.5~2 Ma 古高度为 4331 m 左右, 利用三趾马化石氧同位素估算吉隆盆地 7 Ma 左右的古高度为 6700 m 左右. 昆仑山口, 扎达盆地, 吉隆盆地和塔口拉盆地的数据分别来源于文献^[23], 文献^[21], 文献^[22], 文献^[14]. 图例见图 2

利用上述公式(1), 对昆仑山口地区 89 个上新世食草动物化石氧同位素(平均值为 $-8.8\text{‰} \pm 2.3\text{‰}$)^[23]对应的古降水氧同位素进行了计算, 其平均值为 $-10.7\text{‰} \pm 2.8\text{‰}$, 通过氧同位素-高度经验关系^[32]估算的昆仑山口动物群活动流域的平均古高度为 4331 (+737/-1578) m^[32](图 6(a)), 上述结果与现代昆仑山口盆地的平均高度(4700 m)一致, 也与通过湖相沉积氧同位素估算的中新世中期(14~11 Ma)前就已经到达 3500 m 的认识吻合^[28], 但与 2.5~2 Ma 才快速隆升的研究结果明显不同^[23].

羌塘南部及拉萨地区牦牛和藏野驴牙齿珐琅质 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)对应饮水 $\delta^{18}\text{O}_\text{e}$ (SMOW)预测的平均高度为 (4446 ± 305) m, 与采样点平均高度 $((4448 \pm 629)$ m; 图 6(b))一致. 与北部藏羚羊珐琅质高度预测相同, 南部藏羚羊牙齿珐琅质氧同位素预测高度变化范围和平均高度也明显低于实际采样高度, 其预测高度变化范围为 3750 ~ 4650 m, 平均值 (4140 ± 300) m, 而实际采样高度平均值 (4648 ± 583) m, 变化范围为 3360~5180 m. 样品 2007T25 氧同位素计算高度 2954 m 比实际采样高度 5048 m 相差约 2000 m, 指示该藏羚羊珐琅质记录的氧同位素并非当地河水的氧同位素($-10\text{‰} \sim -11\text{‰}$), 而可能是外来个体. 部分藏羚羊牙齿珐琅质氧同位素计算的高度大大低于采样高度, 可能是由于这部分藏羚羊长途迁徙和耐旱特性(不经常饮水)造成的^[51]. 藏羚羊在从低海拔的藏东或其他地区长途迁徙到高海拔的过程中, 其牙齿珐琅质氧同位素在其死去前可能仍保留了其低海拔地区饮水的高 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)印迹. 显然, 另一部分没有经过长距离迁徙的藏羚羊其氧同位素预测高度与实际采样高度大体一致.

喜马拉雅地区吉隆盆地动物牙齿碳同位素研究结果显示 7 Ma 以前海拔高度不超过 2900~3400 m^[22], 7 Ma 以后才开始快速隆升. 与同处于喜马拉雅地区的扎达盆地和塔口拉盆地的研究结果差别巨大, 上述盆地的软体动物壳和土壤碳酸盐氧同位素指示研究区在 10 Ma 左右海拔高度已超过 6000 m 以上^[14,21].

利用上述公式(2)对吉隆盆地三趾马化石氧同位素(平均值 $-17.0\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$)对应的晚中新世当地古降水的氧同位素进行了重新计算, 其平均值为 $-21.5\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$, 与塔口拉盆地利用土壤碳酸盐估算的降水氧同位素($-21.1\text{‰} \sim -21.7\text{‰}$)^[14]一致. 利用藏南氧同位素-高度经验公式^[32]估算吉隆盆地汇水流域的平均高

度在晚中新世已达 6700 m, 与西部扎达盆地和塔口拉盆地同时期的古高度无异(图 6(b)).

4 结论

青藏高原现代食草动物牙齿珐琅质稳定同位素研究结果表明生态环境的变化直接影响着动物牙齿珐琅质稳定同位素的组成, 食草动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB, $-10.8\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$) 揭示现今高原是以 C_3 植被为主的生态环境. 由于青藏高原高海拔地区动物的取食倾向于 C_3 植被, 高原少量存在的 C_4 植物没有被动物牙齿珐琅质稳定同位素记录. 因此利用食草动物化石牙齿 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值反演生态类型时需谨慎.

除喜马拉雅山南坡外, 青藏高原大部分地区食

草动物牙齿珐琅质氧同位素不适合直接进行高度预测, 与碳同位素全部来自食物不同, 食草动物牙齿珐琅质氧同位素是饮水和植物结合水氧同位素的混合, 在利用牙齿珐琅质氧同位素预测高度时首先需要进行食草动物饮水氧同位素校正. 通过食草动物牙齿珐琅质氧同位素对应的降水氧同位素来估算古高度是可行的.

对于牦牛和藏野驴这些不进行长距离迁徙的原地食草动物, 其牙齿珐琅质氧同位素可以较好地用来预测和现今环境相似造山带的古海拔高度, 而部分进行长距离迁徙的藏羚羊其牙齿珐琅质氧同位素过多地保留了其迁徙前生活环境的同位素痕迹, 不适合用于高度预测.

致谢 野外样品采集工作得到张清海博士的帮助, 食草动物牙齿珐琅质碳氧同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室张福松老师的协助下完成, 两位审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并致以真挚的谢意.

参考文献

- Clark M K. The significance of paleotopography. *Rev Mineral Geochem*, 2007, 66: 1—21 [\[DOI\]](#)
- Currie B S, Rowley D B, Tabor N J. Middle Miocene paleoaltimetry of southern Tibet: Implications for the role of mantle thickening and delamination in the Himalayan orogen. *Geology*, 2005, 33: 181—184 [\[DOI\]](#)
- Garzione C N, Molnar P, Libarkin J C, et al. Rapid late Miocene rise of the Bolivian Altiplano: Evidence for removal of mantle lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 241: 543—556 [\[DOI\]](#)
- Dettman D L, Fang X M, Garzione C N, et al. Uplift-driven climate change at 12 Ma: A long $\delta\text{O}-18$ record from the NE margin of the Tibetan plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 214: 267—277 [\[DOI\]](#)
- Dettman D L, Kohn M J, Quade J, et al. Seasonal stable isotope evidence for a strong Asian monsoon throughout the past 10.7 m.y. *Geology*, 2001, 29: 31—34 [\[DOI\]](#)
- Fan M J, Dettman D L, Song C H, et al. Climatic variation in the Linxia basin, NE Tibetan Plateau, from 13.1 to 4.3 Ma: The stable isotope record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol*, 2007, 247: 313—328 [\[DOI\]](#)
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159—163 [\[DOI\]](#)
- Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain-ranges and global climate change-chicken or egg. *Nature*, 1990, 346: 29—34 [\[DOI\]](#)
- Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in Northern Pakistan. *Nature*, 1989, 342: 163—166 [\[DOI\]](#)
- Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 1992, 359: 117—122 [\[DOI\]](#)
- Wang Y, Deng T. A 25 m.y. isotopic record of paleodiet and environmental change from fossil mammals and paleosols from the NE margin of the Tibetan Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 236: 322—338 [\[DOI\]](#)
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalayan Tibetan plateau since late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62—66 [\[DOI\]](#)
- Garzione C N, Dettman D L, Quade J, et al. High times on the Tibetan Plateau: paleoelevation of the Thakkhola graben, Nepal. *Geology*, 2000, 28: 339—342 [\[DOI\]](#)
- Garzione C N, Quade J, DeCelles P G, et al. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from $\delta\text{O}-18$ vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 183: 215—229 [\[DOI\]](#)
- Quade J, Garzione C, Eiler J. Paleoelevation reconstruction using pedogenic carbonates. *Rev Mineral Geochem*, 2007, 66: 53—87 [\[DOI\]](#)
- Rowley D B. Oxygen isotope based paleoaltimetry: Modern data-model comparison and paleo-elevation history of Tibet. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: A541
- Rowley D B. Stable isotope-based paleoaltimetry: Theory and validation. *Rev Mineral Geochem*, 2007, 66: 23—52 [\[DOI\]](#)

- 18 Rowley D B, Currie B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet. *Nature*, 2006, 439: 677—681 [\[DOI\]](#)
- 19 Rowley D B, Garzione C N. Stable isotope-based paleoaltimetry. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 463—508 [\[DOI\]](#)
- 20 Rowley D B, Pierrehumbert R T, Currie B S. A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: Implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the high Himalaya since the late Miocene. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188: 253—268 [\[DOI\]](#)
- 21 Saylor J E, Quade J, Dettman D L, et al. The late Miocene through present paleoelevation history of southwestern Tibet. *Am J Sci*, 2009, 309: 1—42 [\[DOI\]](#)
- 22 Wang Y, Deng T, Biasatti D. Ancient diets indicate significant uplift of southern Tibet after ca. 7 Ma. *Geology*, 2006, 34: 309—312 [\[DOI\]](#)
- 23 Wang Y, Wang X M, Xu Y F, et al. Stable isotopes in fossil mammals, fish and shells from Kunlun Pass Basin, Tibetan Plateau: Paleo-climatic and paleo-elevation implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 270: 73—85 [\[DOI\]](#)
- 24 Blisniuk P M, Stern L A. Stable isotope paleoaltimetry: A critical review. *Am J Sci* 2005, 305: 1033—1074 [\[DOI\]](#)
- 25 Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, et al. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 2003, 421: 622—624 [\[DOI\]](#)
- 26 Sahagian D, Proussevitch A. Paleoelevation measurement on the basis of vesicular basalts. *Rev Mineral Geochem*, 2007, 66: 195—213 [\[DOI\]](#)
- 27 Riihimäki C A, Libarkin J C. Terrestrial cosmogenic nuclides as paleoaltimetric proxies. *Rev Mineral Geochem*, 2007, 66: 269—278 [\[DOI\]](#)
- 28 吴珍汉, 赵逊, 叶培盛, 等. 根据湖相沉积碳氧同位素估算青藏高原古海拔高度. *地质学报*, 2007, 81: 1277—1288
- 29 DeCelles P G, Quade J, Kapp P, et al. High and dry in central Tibet during the late Oligocene. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 253: 389—401 [\[DOI\]](#)
- 30 徐仁, 陶君容, 孙湘君. 希夏邦马峰高山标化石层的发现及其在植物学和地质学上的意义. *植物学报*, 1973, 15: 102—119
- 31 施雅风, 刘东生. 西夏邦玛峰地区科学考察初步报告. *科学通报*, 1964, 10: 928—938
- 32 丁林, 许强, 张利云, 等. 青藏高原河流氧同位素区域变化特征与高度预测模型建立. *第四纪研究*, 2009, 26: 1—12
- 33 邓涛, 李玉梅. 西藏吉隆盆地的植被生态类型及其在哺乳动物牙齿釉质稳定碳同位素组成上的响应. *科学通报*, 2005, 50: 1105—1113
- 34 李明财, 易现峰, 张晓爱, 等. 青藏高原高寒地区 C₄ 植物名录. *西北植物学报*, 2005, 25: 1046—1050
- 35 旺罗, 吕厚远, 吴乃琴, 等. 青藏高原高海拔地区 C₄ 植物的发现. *科学通报*, 2004, 49: 1290—1293
- 36 旺罗, 吕厚远, 吴乃琴, 等. 青藏高原现生禾本科植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔高度的关系. *第四纪研究*, 2003, 23: 573—580
- 37 Lu H Y, Wu N Q, Gu Z Y, et al. Distribution of carbon isotope composition of modern soils on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 273—297
- 38 Wang Y, Kromhout E, Zhang C F, et al. Stable isotopic variations in modern herbivore tooth enamel, plants and water on the Tibetan Plateau: Implications for paleoclimate and paleoelevation reconstructions. *Palaeoecol Palaeogeogr Palaeoclimatol*, 2008, 260: 359—374 [\[DOI\]](#)
- 39 Cerling T E, Harris J M, Ambrose S H, et al. Dietary and environmental reconstruction with stable isotope analyses of herbivore tooth enamel from the Miocene locality of Fort Ternan, Kenya. *J Hum Evol*, 1997, 33: 635—650 [\[DOI\]](#)
- 40 Cerling T E, Harris J M, MacFadden B J, et al. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, 1997, 389: 153—158 [\[DOI\]](#)
- 41 Cerling T E, Quade J, Wang Y. Expansion and emergence of C₄ plants. *Nature*, 1994, 371: 112
- 42 Tipler B J, Pagani M. The early origins of terrestrial C-4 photosynthesis. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 435—461 [\[DOI\]](#)
- 43 Kohn M J, Cerling T E. Stable isotope compositions of biological apatite. *Rev Mineral Geochem*, 2002, 48: 455—488 [\[DOI\]](#)
- 44 Kohn M J, Schoeninger M J, Valley J W. Herbivore tooth oxygen isotope compositions: Effects of diet and physiology. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3889—3896 [\[DOI\]](#)
- 45 Bryant J D, Luz B, Froelich P N. Oxygen isotopic composition of fossil horse tooth phosphate as a record of continental paleoclimate. *Palaeoecol Palaeogeogr Palaeoclimatol*, 1994, 107: 303—316 [\[DOI\]](#)
- 46 Kohn M J, Dettman D L. Paleoaltimetry from stable isotope compositions of fossils. *Rev Mineral Geochem*, 2007, 66: 119—154 [\[DOI\]](#)
- 47 Tian L, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes. *J Geophys Res-Atmos*, 2001, 106: 28081—28088 [\[DOI\]](#)
- 48 Tian L D, Yao T D, Numaguti A, et al. Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan Plateau. *J Meteorol Soc Jpn*, 2001, 79: 959—966 [\[DOI\]](#)
- 49 Tian L D, Yao T D, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4293(ACH16-1~10) [\[DOI\]](#)
- 50 Yu W S, Yao T D, Tian L, et al. Relationships between delta O-18 in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 2008, 87: 158—169 [\[DOI\]](#)
- 51 Kohn M J. Predicting animal delta O-18: Accounting for diet and physiological adaptation. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 4811—4829 [\[DOI\]](#)