



近 50 年来我国不同地质载体的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化

摘要

基于我国青藏高原 2 个冰芯、中东部 3 个洞穴石笋、1 个南海珊瑚的稳定氧同位素 1950 年来的年际分辨率时间序列,通过与其周边气象站点器测数据对比分析表明:冰芯、珊瑚载体中氧同位素与温度相关性较好,可以指示过去温度变化的信息;洞穴石笋载体中氧同位素与温度、降水量的相关性因洞穴地点不同而存在差异.近 50 年来冰芯氧同位素记录了青藏高原 20 世纪 50—70 年代中期夏季温度降低以及随后温度增加的 2 个时段;珊瑚氧同位素记录了我国南海热带海区温度及海水表面温度一直处于变暖的环境中;而石笋氧同位素皆偏正变化的趋势与亚洲季风区其他石笋氧同位素、现代大气降水氧同位素的记录一致,并和现代气象资料计算的亚洲夏季风指数变化相符,即石笋氧同位素也反映出亚洲季风在逐渐减弱,显示独特的区域一致性.

关键词

冰芯;石笋;珊瑚;氧同位素;温度;气候变化

中图分类号 P596;P597. 2;P467

文献标志码 A

收稿日期 2014-10-14

资助项目 国家自然科学基金青年基金(40701013);公益性行业科研专项(201206024)

作者简介

王涛,男,博士,主要从事气候系统与全球变化的研究.4341250@qq.com

1 安徽省公共气象服务中心,合肥,230031

2 广西壮族自治区气象局 防雷中心,南宁,530000

0 引言

气候变化是长时期大气状态变化的一种反映,主要表征大气各种时间的冷暖或干湿变化.整个气候系统的组成部分包括了大气圈、水圈、岩石圈、生物圈和冰雪圈,所以气候变化会在不同尺度地域空间内表现不同,这些表现会在各个圈层中留下变化的信息,储存于不同的载体之中.在对过去气候的研究中,历史器测资料仅延续了两三百年,科学家们迫切需要从各种地质载体中找寻长时间的古气候记录,树木年轮、湖泊沉积物、冰芯、黄土、古土壤、古植被、孢粉、珊瑚礁、生物遗存、海洋以及洞穴沉积物等都是记录气候变化的良好载体.现代检测技术已能较好地从中提取气候变化的信息,这些信息能够反映过去几百年、上千年甚至万年的气候变化,给出气候变化的总趋势.要正确全面认识和评价现在气候并预测未来气候,必须先了解气候的过去.

研究表明稳定氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)作为地质载体中反演过去气候变化的一个常用代用指标发挥着越来越重要的作用,尤其是在冰芯、洞穴石笋、珊瑚等研究中, $\delta^{18}\text{O}$ 记载了气候变化信息,是了解现代气候变迁和进行古气候重建的一个重要工具.

我国地处欧亚大陆东部,西南倚“世界屋脊”青藏高原,东临浩瀚太平洋,西北深入亚洲大陆内部,特殊的地理位置和地形影响,使我国具有雨热同期、气温差异大、气候类型多样的特点,在全球变化的研究中处于重要地位;并且我国幅员辽阔,蕴藏了大量可提供气候变化研究的地质载体.现代定年及分析技术已经可以从地质载体中提取到年际或者更高分辨率的环境记录,这为地质载体记录与本区现代器测记录的相关分析奠定了基础,对认识这些地质载体中代用指标的指代意义有较大的帮助.本文选取我国热带南海珊瑚、亚热带温带石笋、青藏高寒地区冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 年际分辨率的变化记录,在其与气象要素分析的基础上,结合大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 记录、季风指数进行综合分析,加深对我国不同地区不同载体中的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势的理解和认识.

1 研究数据

本文所用地质载体 $\delta^{18}\text{O}$ 数据信息如表 1 所示,其来源为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的国家气候数据中心(NCDC).气象数据在中国气象局国家级气象资料存储检索系统中获取.

表1 地质载体 $\delta^{18}\text{O}$ 信息Table 1 $\delta^{18}\text{O}$ and basic data of reef coral, stalagmites and ice cores

地质载体	时长	平均值/ ‰	最大值/ ‰	最小值/ ‰	分辨率/a
达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$	1950—1996年	-17.90	-14.28	-21.28	1
崇测冰芯 $\delta^{18}\text{O}$	1950—1992年	-10.80	-8.39	-13.65	1
和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$	1950—2002年	-8.04	-7.37	-8.52	1
万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$	1950—2003年	-8.22	-7.92	-8.58	1
玉华洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$	1952—2005年	-5.38	-4.48	-6.29	1
南沙珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$	1957—1998年	-5.29	-5.79	-5.52	1

注: $\delta^{18}\text{O}$ 值是指样品中稳定同位素的比值相当于标准样品同位素比值的千分差值。

崇测冰川和达索普冰川分别位于西藏西昆仑山中段南坡和喜马拉雅山北坡地区,长度都约为10 km,冰川雪线在6 000 m左右^[1-2]。甘肃万象洞发育于志留纪灰岩中,洞穴外部黄土母质覆盖,洞内现代次生化学沉积物发育众多^[3];湖北和尚洞位于新华夏第三隆起带内,岩溶地貌发育,地下溶洞较多,规模巨大^[4-5];福建玉华洞发育于石炭纪船山组灰岩中,洞穴上部植被覆盖,土壤发育较好^[6]。南海是我国唯一的热带海区,为半封闭边缘海,珊瑚礁区众多,礁区基座可能为古生代至元古代变质岩和中生代岩浆岩及渐新世晚期后区域下降形成的礁灰岩^[7]。以上冰芯、洞穴石笋及珊瑚在我国分布位置如图1所示。

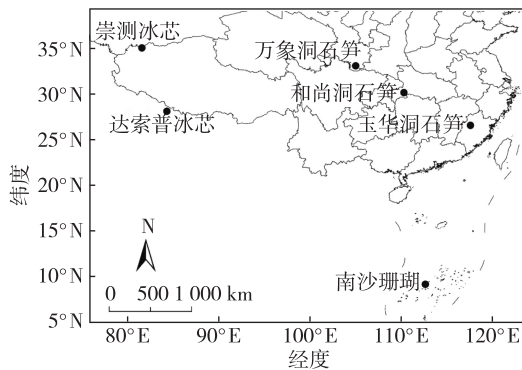


图1 各地质载体分布

Fig. 1 Distribution of reef coral, stalagmites and ice cores

为探讨各地质载体 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与当地气候变化的关系,选用各地质载体周边的气象站点(图2)的气象资料数据作比较.气象数据取周边站点的平均值再进行3 a滑动平均计算。

2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与气象器测数据的关系

2.1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象数据的对比

影响洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的因素很多,石笋 $\delta^{18}\text{O}$

记录能否作为知识气候环境信息的载体,需要从以下2个主要方面来检验:1)现代洞穴滴水 and 大气降水氧同位素的一致性以及石笋样品没有明显的后生变化;2)石笋形成在碳酸盐-水同位素平衡分馏条件之下。

自从 Hendy 发现,洞穴碳酸盐与其母液在一定条件下,存在同位素平衡后,洞穴碳酸盐的氧同位素记录便被用作一种“地质温度计”^[8],特别是在欧洲的阿尔卑斯山和高纬度地区,温度起到主控作用^[9-10]。在亚洲季风区,石笋氧同位素解释较为复杂,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化在冰期—间冰期、千年和百年等大时间尺度上,主要是直接记录季风降水量(强度水平)^[11-15],在短时间尺度上石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响则复杂多变,解译需要更加谨慎。

由近50年万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化曲线(图3a)可见:20世纪50年代的变化分为两个阶段,中前期石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值开始偏正(增加)变化,后期 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负(减小)变化,60年代至70年代初期,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正,70年代初至80年代中后期偏负,之后偏正变化,2000年前后又偏负变化;其整体呈现线性偏正趋势。万象洞周边气象站点的器测记录显示,近50多年来,夏半年和全年降水量呈线性减少趋势(图3b、3c),温度呈线性增加趋势(图3d)。相关性计算结果显示:石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与夏半年(4—9月)、全年降水量呈负相关,相关系数分别为-0.429和-0.471,显著性水平0.01;与年平均温度呈正相关,相关系数为0.301,显著性水平0.05,显示降水量与温度变化都对万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化产生影响。

全球降水稳定同位素调查表明,季风区以及中低纬度地区,大气降水中稳定同位素具有显著的降水量效应,即降水中稳定同位素比率与降水量存在显著负相关关系^[16-19]。Johnson等^[20]的研究认为现代中国降水同位素体系中,降水量对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响由季风区向非季风区逐渐减小,温度作用逐渐加强。靠近现代夏季风北部界限的万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量、温度的相关性正好与之相符。但温度对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响比较复杂,一方面温度对大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值会产生正影响,另一方面温度又对水-方解石同位素分馏体系产生负影响。刘敬华等^[21]指出,万象洞地区温度对这两方面的影响系数分别为0.24和-0.23 $\text{‰}/\text{°C}$,影响程度相近抵消,洞内石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化主要继承了当地大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征。所以,近50年万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的正负变化主要受到夏半

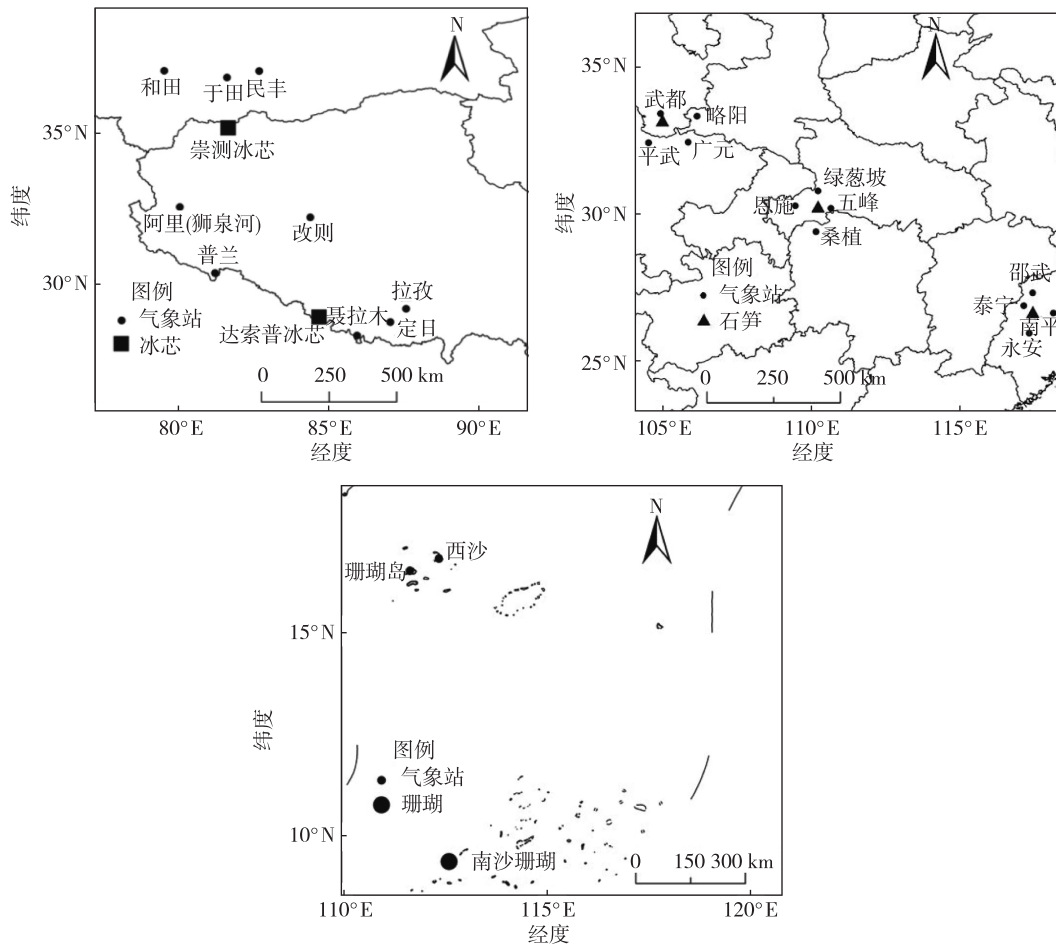


图 2 载体周边气象站点分布

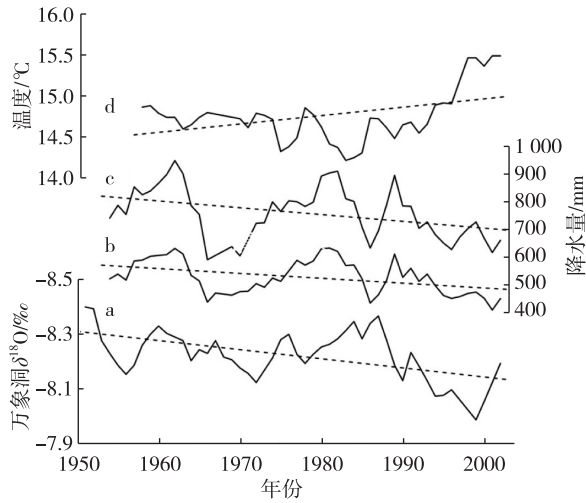
Fig. 2 Distribution of local meteorological stations

年、全年降水量的影响,记载降水变化的信息。

近 50 年玉华洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化如图 4a 所示,整体也呈线性偏正变化。20 世纪 50 年代初至 70 年代中期,波动偏负变化,70 年代中期至 80 年代中后期开始偏正变化且幅度较大,随后逐渐偏负,大约 2000 年后,又开始偏正变化。通过与玉华洞周边气象站点的气象记录变化趋势可见(图 4b—4d),石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与夏半年、年降水量变化趋势较为对应,相关系数的计算结果分别 -0.499 和 -0.279,其中与夏半年降水量的显著性水平达到 0.01;而石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与当地温度变化趋势较为不同,二者之间相关系数仅为 0.082。温度对石笋氧同位素的影响,尤其是中低纬度的季风盛行地区表现是不显著的,会被氧同位素与夏季风降水量强烈的负相关关系所掩盖。此外,玉华洞周边地区夏半年降水量占全年降水量的 70% 左右,表明其决定着全年降水量的多少,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与夏半年降水量良好的相关性,说明近 50 年玉华洞石

笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化代表了夏季风带来的降水量和全年降水量的变化信息。

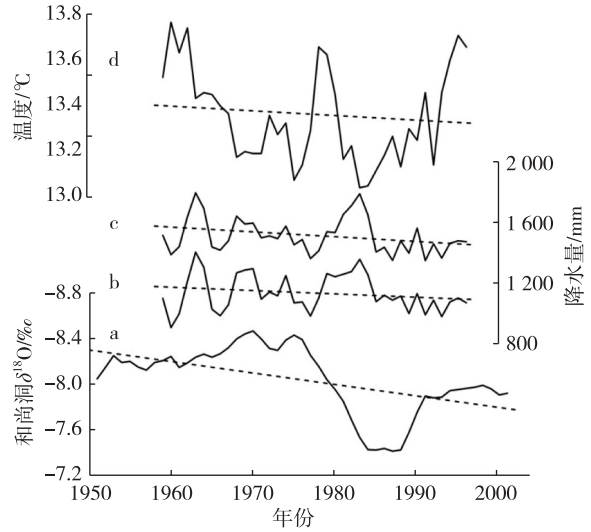
近 50 年和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值同样呈现线性偏正变化(图 5a),20 世纪 50 年代至 70 年代中期处于偏负阶段,并且变化幅度较小,70 年代中期至 80 年代中后期开始偏正变化且幅度较大,之后至 90 年代初逐渐偏负,随后至 2000 年后一直维持较为平稳的趋势。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值与和尚洞周边气象站点的气象记录变化趋势对比显示(图 5b—5d),其与夏半年降水量、全年降水量及年平均温度变化趋势对应关系较差,相关系数的结果分别为 -0.015、-0.069 和 -0.279,皆未通过显著性检验,之间不存在相关性,说明和尚洞温度效应和当地降水量效应都不是影响其石笋氧同位素组成的主要因素。和尚洞石笋氧同位素与降水相关性不显著的结论与万象洞、玉华洞都存在明显的差异,通过和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 直接推测当地过去降水量或温度变化的信息是存在困难的。



a. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$; b. 夏半年(4—9月)降水量; c. 年降水量; d. 年均温度

图3 万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与周边气象记录变化

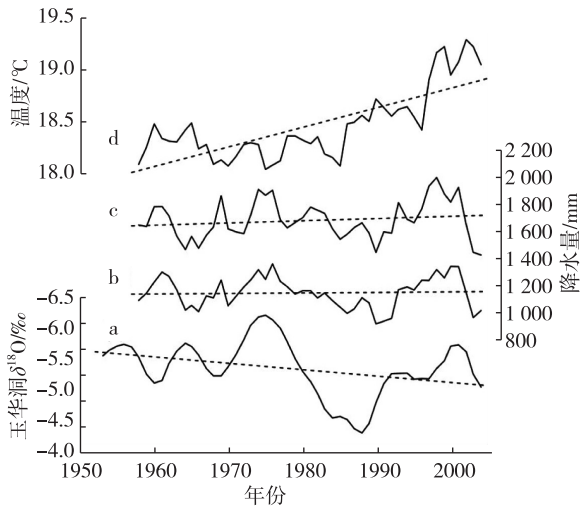
Fig. 3 Comparison between stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ of Wanxiang Cave and summer half year precipitation, annual precipitation, and annual temperature



a. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$; b. 夏半年(4—9月)降水量; c. 年降水量; d. 年均温度

图5 和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与周边气象记录变化

Fig. 5 Comparison between stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ of Heshang Cave and summer half year precipitation, annual precipitation, and annual temperature



a. 石笋 $\delta^{18}\text{O}$; b. 夏半年(4—9月)降水量; c. 年降水量; d. 年均温度

图4 玉华洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与周边气象记录变化

Fig. 4 Comparison between stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ of Yuhua Cave and summer half year precipitation, annual precipitation, and annual temperature

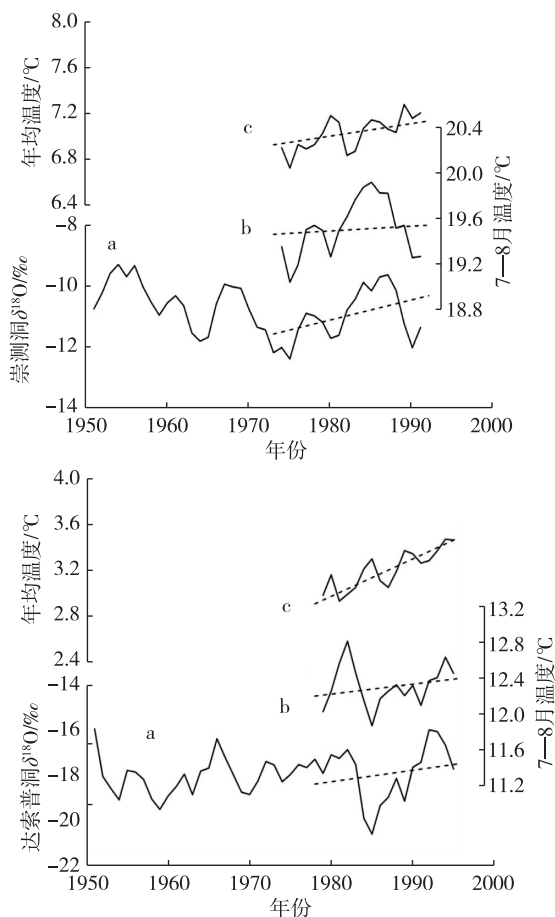
何璐瑶等^[22]通过和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与西太平洋副热带强弱指数以及太平洋年代际振荡指数 100 多年的对比发现,石笋氧同位素组成在年-年代际尺度上不但指示了以西太平洋副热带高压为代表的东亚大气环流格局的变迁,还灵敏地响应了热带太平洋的热力状况.石笋氧同位素响应大气环流变化的结论在万象洞研究中也出现^[21].

2.2 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象数据的对比

冰川是研究古气候和古环境变化可靠的天然档案馆,从冰川的适当部位钻取冰芯加以分析是目前重建高分辨率古气候和古环境的重要手段之一^[23].极地地区是冰芯研究最早的地区,在气候变化研究中起到引领作用^[24-25].但是,仅仅依靠极地地区冰芯来解释全球气候环境变化是远远不够的,必须加以中纬度地区的冰芯研究作为纽带,才能更全面地掌握全球气候变化的机制问题^[26].作为“世界第三极”之称的青藏高原,其冰川规模远小于极地地区,但地理位置特殊(中纬度)以及高海拔的特点,所以对全球气候变化的反映更加敏感、直接,对区域气候环境变化有着重要意义,成为两极地区之外人们最感兴趣的冰芯研究热点地区.

崇测、达索普冰芯周边气象站点的记录时间有限,与冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录只有 20 多年的重叠时期.这段时期内崇测、达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度变化(图 6)所示:冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与周边站点 7、8 月均温呈现很好的对应关系,而与全年平均温度对应关系较差.计算崇测、达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与周边气象站 7、8 月平均温度的相关系数分别为 0.892 和 0.665,显著性水平皆在 0.01;而与全年年均温度的相关系数仅分别为 0.165 和 -0.121,之间不存在相关性.

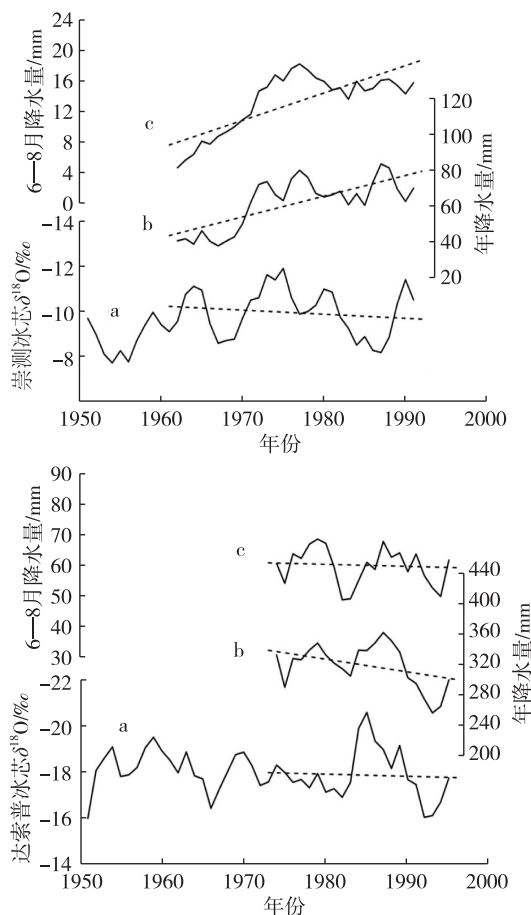
崇测、达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量变化(图 7)所



a.冰芯 $\delta^{18}\text{O}$; b.7—8月均温度; c.年均温度

图6 崇测、达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与周边温度记录的变化

Fig. 6 Comparison between ice core $\delta^{18}\text{O}$ of Chongce (left) or Dasuopu (right), July-August temperature, and annual temperature



a.冰芯 $\delta^{18}\text{O}$; b.年降水量; c.6—8月降水量

图7 崇测、达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与周边降水记录的变化

Fig. 7 Comparison between ice core $\delta^{18}\text{O}$ of Chongce (left) or Dasuopu (right), June-August precipitation, and annual precipitation

示:崇测冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与其周边气象站的6—8月降水量及全年降水量变化对应关系较差,相关系数分别为-0.031和0.053,未通过显著性检验;而达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与其周边气象站的6—8月降水量及全年降水量变化对应关系较好,相关系数分别为-0.456和-0.579,分别通过0.05和0.01显著性水平检验。

过往青藏高原地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 研究表明,在高原北部地区,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和温度表现出明显的正相关关系^[27-28],而在南部地区表现出明显的降水量效应^[29-31]。相关分析的结果显示,近50年北部地区崇测冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量变化关系较差,南部达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量变化关系较好,而两个冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 都与夏季温度变化之间存在较好关系。拉萨夏季降水氧同位素的变化中也出现了6—8月温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化一致的现象^[31],这说明青藏高原南部冰芯或降水中影响 $\delta^{18}\text{O}$ 组成的过程是复杂的。Thompson等^[32]的

研究认为,在夏季强烈的大气对流导致平均凝结高度产生季节性提升,使凝结温度比冬季降低,因而夏季对流降雨/雪中 $\delta^{18}\text{O}$ 强烈贫化,恰好被误认为降水量效应。青藏高原地区的其他冰芯记录^[33-37]、天山东部的冰芯^[38]、祁连山冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ ^[39]也都显示 $\delta^{18}\text{O}$ 与夏季温度的正相关关系;Yang等^[40]的研究也支持了在10 a以上尺度温度是影响达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 组成变化的主要因素。近50年崇测、达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了周边地区夏季7—8月平均温度的变化,达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 可能也反映降水的变化。

2.3 珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 与气象数据的对比

分布在热带海洋地区的珊瑚以其对环境变化极其敏感且能很好地记录周围的环境信息,年生长量大(1 cm左右)、连续生长历史长(有的可达800 a),分辨率可以达到年和季节,有的甚至可以到月,骨骼成分为文石适于定年等特点^[41],成为研究热带海洋

地区高分辨率环境气候变化的极好载体.在众多用珊瑚开展环境变化的研究方法中,氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究最受关注.自从 Weber 等^[42]首先发现珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 与表层海水温度(SST)之间存在线性关系后,大多数研究都指出,珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 与表层海水温度之间在各种时间分辨率(年、季、月和周)上都有很好的相关性,珊瑚骨骼 $\delta^{18}\text{O}$ 响应了表层海水温度的变化,在过去环境的重建以及对厄尔尼诺事件等研究方面取得了很大进展^[43-46].

本文珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 地处我国南海南沙群岛地区,无气象站点记录资料,因此选用英国 CRU 格点海温资料以及同处南海热带地区的西沙和珊瑚岛气象站的温度资料作对比(图 8).结果显示:珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与南海热带地区海温以及年均温度有着很好的对应,相关系数分别达到 -0.447 、 -0.422 和 -0.531 ,通过显著性水平 0.01 检验.这说明近 50 年南海珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了过去我国南海热带地区的海水表层温度以及年均气温变化的气候信息.

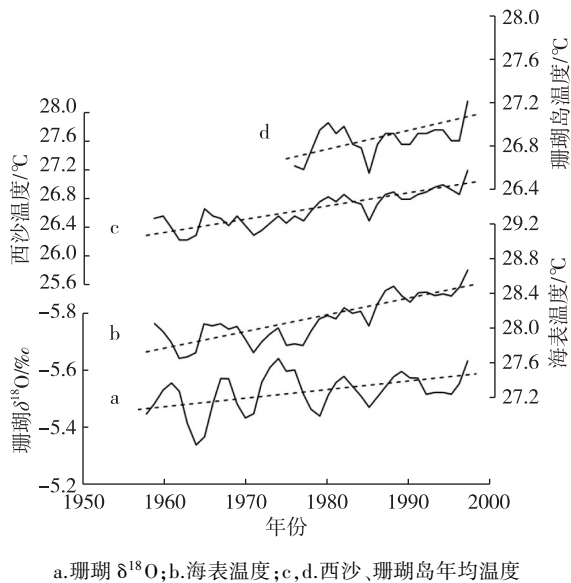


图 8 南海珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度变化

Fig. 8 Comparison between reef coral $\delta^{18}\text{O}$ and sea surface temperature, annual sea temperature in Xisha or coral island

3 地质载体 $\delta^{18}\text{O}$ 的趋势分析

近 50 年来,冰芯、石笋、珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势各有异同(图 9).珊瑚、冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现偏负变化,而石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 则呈现偏正变化.冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 负向变化趋势且与温度负相关似乎说明近半世纪青藏地区变冷,但冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录反映出两段不同的趋势,尤其是青

藏高原北部的崇测冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 变化,20 世纪 50 年代至 70 年代中期 $\delta^{18}\text{O}$ 数值减小,随后 70 年代末开始增大,指示青藏地区 20 世纪后半叶的前半段是处于一个冷期,而后则开始不断变暖,相同的变化趋势也出现在唐国利等^[47-49]的中国年平均温度序列中.

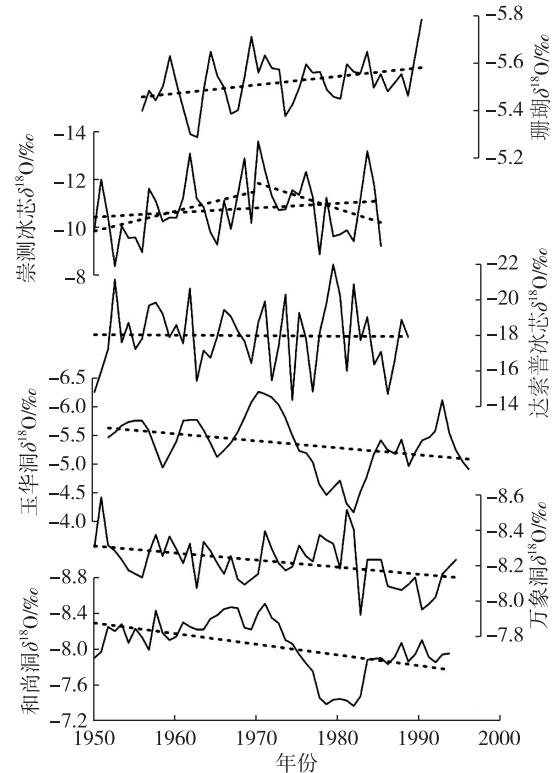


图 9 近 50 年冰芯、石笋、珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比

Fig. 9 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ between reef coral, ice cores and stalagmites during the past 50 years

南海珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 负向变化趋势且与温度负相关指示了我国南海热带地区这段时期内一直处于温度变暖中.此外,余克服等^[50]分析我国热带海区 1953—1997 年珊瑚冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与东亚冬季风指数(WMI)的关系,发现二者存在显著的同期正相关,即冬季珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 低,海水表面温度高,表征东亚冬季风弱;反之,冬季珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 高,海水表面温度低,表征东亚冬季风强.这说明季节分辨率的珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 不仅可以指示温度变化,还能反映冬季风的强弱.

石笋洞穴分布位置不同,但石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 都呈现偏正变化趋势,同样的趋势也出现在北京石花洞、贵州董歌洞、四川黄龙洞、阿曼 Kahf Defore 洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中,表明近 50 年来东、西亚地区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 都受到相同因素的影响,并且具有亚洲区域一致性.李建平等^[51]计算的南亚、南海及东亚夏季风标准化

指数得到亚洲季风区有着长期减弱的趋势,可与整个东、西亚地区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化进行对比,即近 50 年来亚洲地区洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正,亚洲夏季风同时减弱.国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)香港站有着比较详实且连续性较强(1973—2007 年)的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 资料,在近 30 年来,香港站记录的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 也呈现出偏正的变化趋势(图 10).

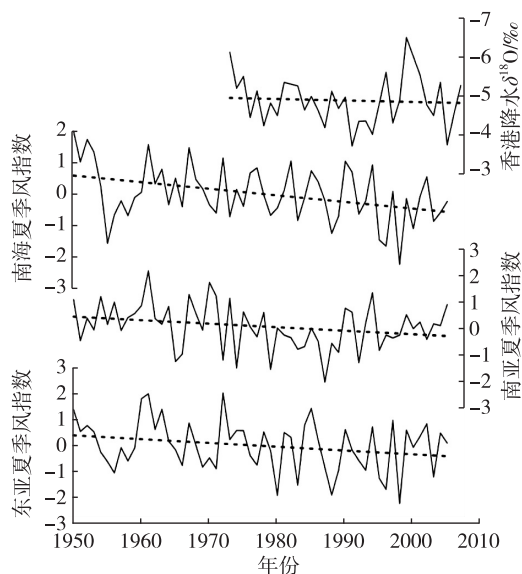


图 10 香港降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风指数变化趋势

Fig. 10 Variation curves of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Hong Kong station and monsoon index

我国的天气、气候异常与亚洲季风异常有着密切的关系.洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指标可用来判明亚洲夏季风不同时间尺度上的气候波动,冰芯、珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 反映了温度的变化,季节分辨率的珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可反映亚洲冬季风的强弱程度.通过分析不同载体 $\delta^{18}\text{O}$ 变化可以加深对亚洲夏、冬整个季风系统的认识,再综合我国其他地质载体的代用指标记录,可以重建我国更细致的环境气候变迁情况.

4 结论

我国不同地质载体中 $\delta^{18}\text{O}$ 的指代意义,记录过去气候变化的信息各不相同.

1)通过对青藏高原冰芯、中东部石笋、南海珊瑚近 50 年平均分辨率达到年际的 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列与器测气象数据对比分析得出:冰芯和珊瑚中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度相关性良好,分别记录着过去青藏地区夏季(7—8 月)和南海热带地区年平均温度及海水表面温度的

变化;石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量的相关性因地区不同而发生改变,重建过去较短时间尺度的气候信息时需仔细研讨.

2)近半个世纪以来冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示了青藏高原 20 世纪 50 年代至 70 年代的冷期以及随后的暖期,珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 显示了南海地区一直处于变暖过程中,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指代意义虽有差异,但都呈现偏正变化,与亚洲季风区内其他石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 不尽相同,指示了亚洲季风在逐渐减弱,与现代大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 观测数据及重建的亚洲季风指数变化趋势相一致.

利用稳定同位素地球化学方法开展全球气候变化研究早已受到国内外学者的关注.高分辨率、多环境指标综合研究的不断发展使得稳定同位素成为全球气候变化研究的有力工具,也是一个独特而重要的领域.气候类型多样、幅员辽阔使得我国可以采集丰富的稳定同位素地质载体,所以更应进一步深入基础性研究工作,从各种载体中提取环境信息,并加强它们之间的比较分析,进行多学科的交叉综合研究,取长补短,才能加深对不同环境指标及其组合的理解和认识,拓展新思路为全球气候变化研究服务.

参考文献

References

- [1] 施雅风.中国冰川与环境[M].北京:科学出版社,2000
SHI Yafeng. Glaciers and related environments in China [M]. Beijing: Science Press, 2000
- [2] 姚檀栋,段克勤,田立德,等.达索普冰芯积累量记录和过去 400 a 来印度夏季风降水变化[J].中国科学: D 辑,2000,30(6):619-627
YAO Tandong, DUAN Keqin, TIAN Lide, et al. Record of accumulation recovered from Dasuopu ice core and variation of Indian Monsoon rainfall in the past 400 years[J]. Science in China: Series D, 2000, 30(6): 619-627
- [3] 张平中,陈一萌,Johnson K P,等.甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义[J].科学通报,2004,49(15):1529-1531
ZHANG Pingzhong, CHEN Yimeng, Johnson K P, et al. Modern systematic and environmental significance of stable isotopic variations in Wanxiang Cave, Wudu, Gansu, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(15): 1529-1531
- [4] 胡超涌,谢树成.湖北清江和尚洞石笋古环境研究的回顾和展望[J].地质科技情报,2012,31(5):57-64
HU Chaoyong, XIE Shucheng. Paleo-environment reconstruction based on speleothems from Heshang Cave, Qingjiang valley, Hubei province: An overview [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 57-64
- [5] 万军伟,沈继方,晁念英.清江半峡地区岩溶洞穴发育特征及其旅游资源[J].中国岩溶,1997,16(3):

- 268-274
WAN Junwei, SHEN Jifang, CHAO Nianying. The characteristics of Karst Cave development and tourism resources in Banxia area of the Qingjiang river [J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(3): 268-274
- [6] 姜修洋,李志忠,李金全,等.最近50年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义[J]. *地理科学*, 2012, 32(2): 207-212
JIANG Xiuyang, LI Zhizhong, LI Jinqian, et al. Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Yuhua Cave the past 500 years and its regional climate significance [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(2): 207-212
- [7] 聂宝符,陈特固,梁美桃.南沙群岛及其邻近礁区造礁珊瑚与环境变化的关系[M].北京:科学出版社, 1997: 1-101
NIE Baofu, CHEN Tegū, LIANG Meitao. Relationship between reef coral and environmental changes of Nansha Islands and adjacent regions [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-101
- [8] Hendy C H. The isotopic geochemistry of speleothems-I. The calculation of the effects of the different modes of formation on the isotopic composition of speleothem and their applicability as paleoclimatic indicators [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1971, 35: 801-824
- [9] Boch R, Spotl C, Krames J. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(23/24): 2527-2538
- [10] Spotl C, Mangini A. Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard-Oeschger events during isotope stage 3: Implications for the absolute chronology of Greenland ice cores [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(1): 507-518
- [11] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348
- [12] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224 000 years [J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093
- [13] Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon [J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578
- [14] Cheng H, Edwards R L, Wang Y J, et al. A penultimate glacial monsoon record from the Hulu Cave and two-phase glacial terminations [J]. *Geology*, 2006, 34(3): 217-220
- [15] 谭明. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义——古气候记录与现代气候变化研究的一次对话 [J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 851-862
TAN Ming. Circulation effect: Climatic significance of the short term variability of the oxygen isotopes in stalagmites from monsoonal China: Dialogue between paleoclimate records and modern climate research [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 851-862
- [16] Vuille M, Werner C M, Bradley R S, et al. Stable isotopes in precipitation in the Asian monsoon region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D23): D23108, doi: 10.1029/2005JD006022
- [17] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468
- [18] Jouzel J, Froehlich K, Schotterer U. Deuterium and Oxygen-18 in present-day precipitation: Data and modeling [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1997, 42(5): 747-763
- [19] Araguas-Araguas L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28721-28742
- [20] Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: Implications for paleoclimate reconstructions [J]. *Earth and Planet Science Letters*, 2004, 220(3/4): 365-377
- [21] 刘敬华,张平中,程海,等.黄土高原西缘在AD1875—2003期间石笋氧同位素记录的季风降水变化与海气系统的联系 [J]. *科学通报*, 2008, 53(22): 2801-2808
LIU Jinghua, ZHANG Pingzhong, CHENG Hai, et al. Asian summer monsoon precipitation recorded by stalagmite oxygen isotopic composition in the western Loess Plateau during AD 1875—2003 and its linkage with ocean-atmosphere system [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(22): 2801-2808
- [22] 何璐瑶,胡超涌,黄俊华,等.石笋氧同位素指示东亚季风大尺度环流特征 [J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 950-956
HE Luyao, HU Chaoyong, HUANG Junhua, et al. Characteristics of large-scale circulation of east Asian monsoon indicated by oxygen isotope of stalagmites [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 950-956
- [23] 秦大河,康世昌.现代冰川过程与全球环境气候演变 [J]. *地学前缘*, 1997, 4(1/2): 85-94
QIN Dahe, KANG Shichang. Present process of glacier and global climatic and environmental change [J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1/2): 85-94
- [24] Jouzel J, Lorius C, Petit J R, et al. Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160 000 years) [J]. *Nature*, 1987, 329(6140): 403-408
- [25] Dowdeswell J A, White J W C. Greenland ice core records and rapid climate change [J]. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 1995, 352(1699): 359-371
- [26] 杨保,施雅风.青藏高原冰芯研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 183-188
YANG Bao, SHI Yafeng. Research advances of ice core records in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2): 183-188
- [27] 章新平,施雅风,姚檀栋.青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征 [J]. *中国科学: B辑*, 1995, 25(5): 540-547
ZHANG Xinping, SHI Yafeng, YAO Tandong. Variational features of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China: Series B*, 1995, 25(5): 540-547
- [28] 姚檀栋,秦大河,田立德,等.青藏高原两千年来温度

- 与降水变化: 古里雅冰芯记录[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 348-353
YAO Tandong, QIN Dahe, TIAN Lide, et al. Variations in temperature and precipitation in the past 2 000 years on the Xizang (Tibet) Plateau: Guliya ice core record [J]. Science in China: Series D, 1996, 26(4): 348-353
- [29] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, 23(1): 33-41
WEI Keqin, LIN Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China [J]. Geochimica, 1994, 23(1): 33-41
- [30] Araguas-Araguas L, Rozanski K, Yurtsever Y et al. Isotopes in water resources management: Vol 1 [M]. Vienna: IAEA Publication, 1995: 355-357
- [31] 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 拉萨夏季降水中氧稳定同位素的变化特征[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 33-40
TIAN Lide, YAO Tandong, PU Jianchen, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in summer precipitation at Lhasa [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 33-40
- [32] Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian monsoon from Himalayan ice cores [J]. Science, 2000, 289(5486): 1916-1920
- [33] 康世昌, 张拥军, 秦大河, 等. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 457-462
KANG Shichang, ZHANG Yongjun, QIN Dahe, et al. Ice core evidence of quick temperature increase in the Yangtze sources region of Qinghai-Xizang Plateau in recent period [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 457-462
- [34] 王宁练, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 青藏高原北部马兰冰芯记录的近千年来气候环境变化[J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36(8): 723-732
WANG Ninglian, YAO Tandong, PU Jianchen, et al. Climatic and environmental changes over the last millennium recorded in the Malan ice core from the northern Tibetan Plateau [J]. Science in China: Series D, 2006, 36(8): 723-732
- [35] Tian L, Yao T, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108 (D9), doi: 10.1029/2002JD002173
- [36] Yao T, Duan K, Xu B, et al. Temperature and methane changes over the past 1 000 years recorded in Dasuopu Glacier (central Himalaya) ice core [J]. Annals of Glaciology, 2001, 35(1): 379-383
- [37] Davis M E, Thompson L G, Yao T, et al. Forcing of the Asian monsoon on the Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution ice core and tropical coral records [J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2005, 110(D4), doi: 10.1029/2004jd004933
- [38] 宋琳琳, 侯书贵, 刘亚平. 天山东部哈尔里克山庙儿沟冰芯 1953 年以来的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 36-41
SONG Linlin, HOU Shugui, LIU Yaping. $\delta^{18}\text{O}$ record of the Miaoergou ice core from the Karlik mountains of east Tianshan since 1953 [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011, 47(5): 36-41
- [39] 崔晓庆, 任贾文, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川冰芯记录的气候环境信息[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1251-1258
CUI Xiaoqin, REN Jiawen, QIN Xiang, et al. Climatic and environmental records within a shallow ice core at Laohugou Glacier NO. 12, Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1251-1258
- [40] Yang B, Bräuning A, Yao T, et al. Correlation between the oxygen isotope record from Dasuopu ice core and the Asian Southwest Monsoon during the last millennium [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(13/14): 1810-1817
- [41] Dunbar R B, Cole J E. Coral records of ocean-atmosphere variability [R]. Special Report No. 10, NOAA climate global change program, 1993: 1-53
- [42] Weber J N, Woodhead P M J. Temperature dependence of Oxygen-18 concentration in reef coral carbonates [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans and Atmospheres, 1972, 77(3): 463-473
- [43] Dunbar R B, Wellington G M. Stable isotopes in a branching coral monitor seasonal temperature variation [J]. Nature, 1981, 293(5832): 453-455
- [44] Klein R, Loya Y, Gvirtzman G, et al. Seasonal rainfall in the Sinai desert during the late Quaternary inferred from fluorescent bands in fossils corals [J]. Nature, 1990, 345(6271): 145-147
- [45] Beck J W, Recy J, Taylor F, et al. Abrupt changes in early Holocene tropical sea surface temperature derived from coral records [J]. Nature, 1997, 385(6618): 705-707
- [46] Urban F E, Cole J E, Overpeck J T. Influence of mean climate change on climate variability from a 155-year tropical Pacific coral record [J]. Nature, 2000, 407(6807): 989-993
- [47] 唐国利, 林学椿. 1921—1990 年我国气温序列及变化趋势[J]. 气象, 1992, 18(7): 3-6
TANG Guoli, LIN Xuechun. Average air temperature series and its variations in China [J]. Meteorological Monthly, 1992, 18(7): 3-6
- [48] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 791-798
TANG Guoli, REN Guoyu. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 791-798
- [49] 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国近百年温度曲线的对比分析[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71-78
TANG Guoli, DING Yihui, WANG Shaowu, et al. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years [J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(2): 71-78
- [50] 余克服, 陈特固, 黄鼎成. 中国南沙群岛滨珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 的高分辨率气候记录[J]. 科学通报, 2001, 46(14): 1199-1204
YU Kefu, CHEN Teguo, HUANG Dingcheng. The high-resolution climate recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of Porites lutea from

the Nansha Islands of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(14): 1199-1204

- [51] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和雨量的关系 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 351-365

LI Jianping, ZENG Qingcun. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(3): 351-365

Variations of $\delta^{18}\text{O}$ from different geological isotopic carriers in the past 50 years in China

WANG Tao¹ GUO Yuan² ZHONG Yiming¹ ZHEN Wenfang¹

¹ Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031

² Guangxi Meteorological Bureau, Nanning 530000

Abstract The time series of $\delta^{18}\text{O}$ variation recorded by one reef coral from the South China Sea, two ice cores from Tibetan Plateau, and three stalagmites from central and eastern China since 1950 are analyzed and compared with meteorological data measured by local meteorological stations. The results show good consistence between $\delta^{18}\text{O}$ records by ice core or coral and local average temperature variation, which means the $\delta^{18}\text{O}$ records can indicate the temperature change in the past 50 years. The variation of $\delta^{18}\text{O}$ records from stalagmites is correlated with temperature and precipitation, yet with different modes in different stalagmites. In the past 50 years, summer temperature in the Tibetan Plateau decreased during 1950s—1970s then increased from 1980s, which is indicated by $\delta^{18}\text{O}$ variation recorded in ice cores. A continuous warming trend existed in annual sea temperature and sea surface temperature of the South China Sea, reflected by $\delta^{18}\text{O}$ in reef coral. The $\delta^{18}\text{O}$ from three stalagmites are all increasing in the past 50 years, the same tendency showed from $\delta^{18}\text{O}$ in other stalagmites in Asia and the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation as well. The $\delta^{18}\text{O}$ variation in stalagmites is also in accordance with the change of summer monsoon index calculated by meteorological data, both of which indicate a weakening trend in the summer monsoon, and the trend is consistent in Asia.

Key words ice core; coral; stalagmite; $\delta^{18}\text{O}$; temperature; climate change