

文章编号: 1000-0240(2003)04-0428-05

不同时间尺度下的稳定同位素变化

章新平^{1, 2}, 姚檀栋², 刘晶淼³, 田立德²

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冰芯与
寒区环境重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 根据北半球 IAEA/WMO 监测网 12 个具有长序列站点的资料, 分析了在不同时间尺度下降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空变化特征. 被选出的 12 个取样站都存在显著的降水量效应, $\delta^{18}\text{O}$ /降水量变化率的大小与降水量存在一定程度的反比关系. 降水量效应不仅与产生降水的强对流现象相联系, 而且与降水量的季节分布有关. 在年尺度下, 12 个站中的 11 个站具有一定程度的温度效应, 相对而言, 位于中低纬度取样站的平均 $\delta^{18}\text{O}$ /平均温度变化率大于中高纬度. 与单站相比, 合计的 $\delta^{18}\text{O}$ 和温度之间的正相关关系要显著得多, 说明 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化主要受大尺度气象条件的制约且反映大尺度空间的环境和气候变化. 分析表明, 12 个站合计的年加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和合计的年平均温度的逐年变化具有较好的一致性.

关键词: 降水; 稳定同位素; 温度效应; 降水量效应; 季节变化; 年际变化

中图分类号: P426.61⁺2 文献标识码: A

根据对国际原子能机构(IAEA)和世界气象组织(WMO)在全球建立的总数超过 550 的同位素监测站资料的分析, 在中高纬度地区, 月降水中的稳定同位素比率与月平均温度之间存在显著的正相关关系, 即温度效应. 这是中高纬度降水中稳定同位素比率在某种程度上指示温度的一个重要基础^[1~6]. 然而, 在中低纬度以及受季风影响的地区, 月降水中的稳定同位素比率与月降水量之间存在显著的负相关关系, 即降水量效应. 在中低纬度季风区, 降水中稳定同位素比率的大小常被视作季风强度的指标^[7].

大多数有关降水中稳定同位素的研究主要是根据对月降水资料的分析来判断温度效应或降水量效应的存在与否. 尽管也有一些研究涉及到年际尺度下降水中稳定同位素比率的变化特征^[1, 8], 但受监测站资料长度和范围的限制, 人们还无法解决由下列问题所带来的困扰: 1)不同时间尺度降水中稳定同位素的代表性; 2)季节尺度下具有降水量效应的站点在年尺度下是否具有温度效应; 3)降水中稳定

同位素比率空间变化和时间变化的关系. 对于以气候尺度为研究基础的中低纬度冰芯中稳定同位素比率的合理解释, 有赖于对上述问题的研究. 本文根据北半球 IAEA/WMO 监测网的资料, 分析具有不同时间尺度的降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间和时间的变化, 揭示不同时间尺度降水量效应和温度效应之间的关系.

1 资料处理

根据目前已公布的 IAEA/WMO 监测站资

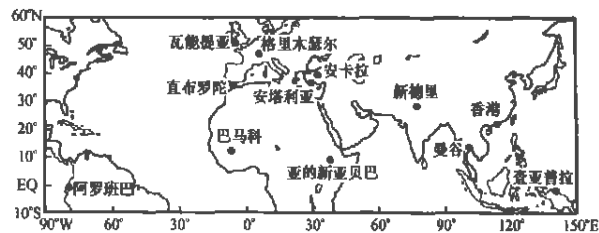


图 1 被选出的 12 个 IAEA/WMO 降水取样站的地理分布
Fig. 1 Map showing the geographic distribution of the elected IAEA/WMO sampling stations

收稿日期: 2002-10-16; 修订日期: 2003-01-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(40271025); 国家 863 研究项目(2002AA135360)资助
作者简介: 章新平(1956—), 男, 湖南长沙人, 教授, 1993 年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获博士学位, 现从事全球变化的研究. E-mail: zxp@mail.hunnu.edu.cn

表 1 被选出的 12 个 IAEA/ WMO 降水取样站基本统计数据一览表
Table 1 Summary of the basic statistical data for the elected IAEA/ WMO sampling stations

站 点	位 置	取样时间	平均 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	平均 $T/^\circ\text{C}$	平均 P/mm	季节尺度				年尺度	
						$\text{d } \delta^{18}\text{O}/\text{d } T$	相关系数	$\text{d } \delta^{18}\text{O}/\text{d } P$	相关系数	$\text{d } \delta^{18}\text{O}/\text{d } T$	相关系数
1 瓦能提亚	51. 93°N, 10. 25°W 9 m	1960—1967 1973—1997	— 5. 51	10. 58	1 432	0. 23	0. 46	— 0. 0101	— 0. 41	— 0. 19	— 0. 16
2 格里姆瑟尔	46. 57°N, 8. 33°E 1 950 m	1970—1992	— 14. 36	1. 46	2 093	0. 46	0. 78	— 0. 0077	— 0. 24	0. 51	0. 55
3 安卡拉	39. 95°N, 32. 88°E 902 m	1963—1974 1977—1997	— 8. 34	11. 59	415	0. 35	0. 80	— 0. 0432	— 0. 32	0. 12	0. 11
4 安塔利亚	36. 88°N, 30. 70°E 49 m	1963—1974 1977—1997	— 5. 65	18. 21	1 077	0. 17	0. 41	— 0. 0056	— 0. 29	0. 18	0. 18
5 直布罗陀	36. 15°N, 5. 35°W 5 m	1961—1968 1972—1997	— 4. 80	18. 28	782	0. 19	0. 35	— 0. 006	— 0. 36	0. 26	0. 15
6 巴马科	12. 32°N, 7. 57°W 381 m	1962—1979 1991—1997	— 4. 49	27. 63	974	1. 19	0. 58	— 0. 0244	— 0. 66	1. 13	0. 22
7 亚的斯亚贝巴	9. 00°N, 38. 73°E 2 360 m	1961—1965 1969—1997	— 1. 18	16. 55	1 151	0. 84	0. 41	— 0. 0101	— 0. 40	0. 22	0. 17
8 新德里	28. 58°N, 77. 20°E 212 m	1961—1996	— 5. 86	25. 00	806			— 0. 0183	— 0. 47	1. 21	0. 26
9 香港	22. 32°N, 114. 17°E 65 m	1961—1965 1973—1997	— 6. 52	22. 91	2 220			— 0. 0089	— 0. 64	0. 44	0. 14
10 曼谷	13. 73°N, 100. 50°E 2 m	1968—1997	— 6. 59	28. 22	1 495			— 0. 0145	— 0. 65	0. 75	0. 36
11 查亚普拉	2. 53°S, 140. 72°E 3 m	1961—1966 1968—1991	— 5. 82	27. 32	2 349			— 0. 0051	— 0. 25	0. 92	0. 45
12 阿罗班巴	0. 37°S, 78. 55°W 3 058 m	1973—1984 1990—1997	— 11. 26	11. 67	1 414			— 0. 0129	— 0. 27	0. 35	0. 16

料^[9], 北半球 12 个站被遴选作为本研究的基础站。选择的取样站具有下列条件: 1) 季节尺度下存在降水量效应; 2) 至少具有 20 a 以上的监测时间; 3) 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 、同步的月平均温度和月降水量连续被监测。被选出的站中, 阿罗班巴和查亚普拉在地理位置上属南半球, 但考虑到它们靠近赤道且满足上述条件的取样站不多, 固将其纳入北半球(图 1)。

选出的 12 个站的地理分布不均匀, 其中位置在高于 30°N 的站有 5 个, 低于 30°N 的站有 7 个。海拔分布从 2 m 到 3 058 m; 多年加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 从 -14.36‰ 到 -1.18‰; 多年平均温度和多年平均降水量分布从 1.46℃ 和 415 mm 到 28.22℃ 和 2349 mm。所有 12 个站的基本统计数据见表 1。

2 不同时间尺度的 $\delta^{18}\text{O}$

2.1 季节尺度 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的关系

被选出的 12 个站都存在显著的降水量效应,

它们的相关信度均达到或超过 0.01。 $\delta^{18}\text{O}$ /降水量变化率的最大值 -0.0432‰·mm⁻¹ 出现在具有最小降水量的安卡拉, 而最小值 -0.0051‰·mm⁻¹ 则出现在降水量最大的查亚普拉。二者相差约 8 倍。可见具有降水量效应取样站的 $\delta^{18}\text{O}$ /降水量变化率的大小与降水量存在一定程度的反比关系。由于统计样本为月值, 因此, 统计相关的尺度为季节尺度。

将 12 个站所有月 $\delta^{18}\text{O}$ 和相应月降水量均点绘于图 2, 得到合计的季节尺度的 $\delta^{18}\text{O}$ /降水量的相关关系。对应的 $\delta^{18}\text{O}$ /降水量梯度代表所有取样站 $\delta^{18}\text{O}$ 随降水量在空间和时间尺度上的综合变化率。

以往的研究强调降水量效应与降水产生的强对流现象相联系, 主要发生地在热带和中纬度沿海^[1, 4, 10, 11]。在这些地区, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化与降水量的变化相反: 雨季(或暖季)中的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低, 旱季(或冷季)中的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 偏高。表 1

中从巴马科到曼谷的 5 个低纬度站平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和平均降水量的季节变化代表了这一类型(图 3a), 可以看出, 整个旱季的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 均较高. 随着降水量的增加, 平均 $\delta^{18}\text{O}$ 持续减小, 于 10 月达最低.

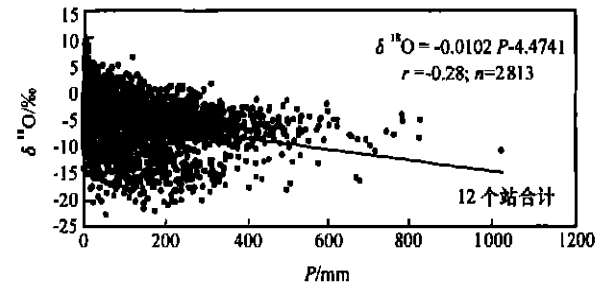


图 2 具有降水量效应取样站的月 $\delta^{18}\text{O}$ 依月降水量的相关散布

Fig. 2 Scatter of the monthly $\delta^{18}\text{O}$ versus the monthly precipitation for the stations with amount effect

另一类降水量效应与降水量的季节分布有关. 表 1 中从瓦能提亚到直布罗陀 5 个欧洲站的平均季节变化代表了这种类型(图 3b), 这 5 个具有降水量效应的取样站同时具有温度效应. 它们的平均降水量的季节分布与该地区温度的季节分布恰好相反: 暖季的降水量少, 冷季的降水量多. 这个结果与降水量效应产生的动力机制无关.

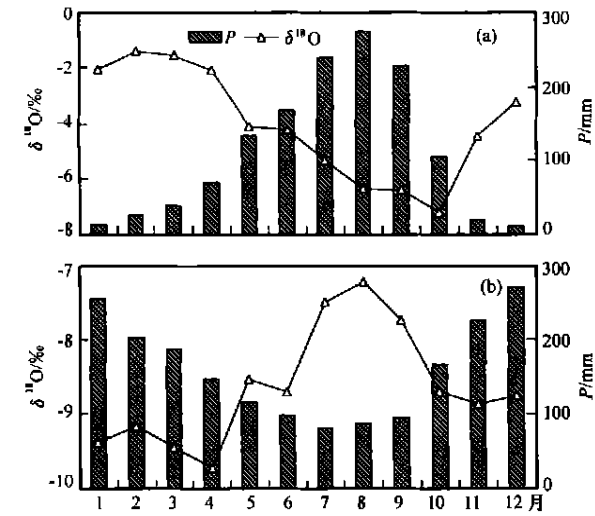


图 3 两类具有降水量效应取样站加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of the weighted mean $\delta^{18}\text{O}$ for the two kinds of sampling stations with amount effect

位于赤道地区的阿罗班巴和查亚普拉年内具有两个旱季和湿季(图略), 它们的平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化存在两个极大值和两个极小值, 每个极大值(或极小值)对应 $\delta^{18}\text{O}$ 的低值(或高值). 严格说来, 这两个站降水量效应的形成机制与第一类相同.

2.2 年尺度下 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系

对 12 个取样站具有连续月降水资料的年进行以月降水量为权重的加权平均计算, 得到各站年加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 序列, 然后分析各取样站年加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与年平均温度之间的相关关系. 表 1 中的第 11 和第 12 栏分别给出了各站在年尺度下平均 $\delta^{18}\text{O}$ 随平均温度的变化率以及二者之间的相关系数, 可以看出, 12 个站中的 11 个站在年尺度下具有一定程度的温度效应. 唯一例外的瓦能提亚位于爱尔兰, 濒邻北大西洋, 不同的天气系统和水汽来源导致降水中稳定同位素比率变化的复杂性. 相对而言, 位于中低纬度站的平均 $\delta^{18}\text{O}$ /平均温度变化率大于中高纬度, 说明在年尺度下中低纬度降水中稳定同位素比率对温度的变化更敏感. 由前面的分析可知, 某些中高纬度取样站季节尺度下的降水量效应与降水量的月分布有关, 且都伴随着显著的温度效应. 因此, 这些站年尺度下的温度效应实际上是季节尺度温度效应的延续.

根据稳定同位素动力分馏模式, 中低纬度季节尺度下降水量效应的产生与强烈的对流现象相联系^[11~13]. 在强烈的对流云中, 每一个微观的相变过程中稳定同位素的分馏均与产生相变的温度相联系, 云中累积凝结水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 是凝结过程的各阶段凝结水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均^[12, 13]. 因此, 从因果关系看, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与云中的水汽条件和云中凝结过程的加权平均温度存在对应关系. 地面降水量某种程度上反映了云中的水汽状况, 由此导致了中低纬度降水量效应的出现. 由于无法得到云中凝结过程的加权平均温度, 因此也就很难了解降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与云中温度的实际关系. 季节尺度下温度效应的缺失从另一个侧面说明, 中低纬度地区对流云中平均温度与地面平均气温之间存在差异. 但在年尺度下, 二者的变化趋于一致, 从而产生了年尺度下的温度效应. 对这样一个可能性的验证有待于高空探测技术的改善.

将 12 个取样站的逐年加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和相应的年平均温度以及各站多年加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 和多年平均温度(表 1 中第 4、第 5 栏)均点绘于图 4, 得到 12 个站合计的年尺度 $\delta^{18}\text{O}$ /温度的空间散布. 与单站相比, 合计的 $\delta^{18}\text{O}$ /温度正相关关系要显著得多, 二者之间的相关系数达到 0.56, 超过 0.001 的信度. 说明 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化主要受大尺度气象条件的制约且反映大尺度空间的环境和气候变化, 而非局地因素. 对应的 $\delta^{18}\text{O}$ /温度变化率为 $0.22\text{‰}\cdot\text{℃}^{-1}$.

与各单站的变化率以及它们的算术平均存在显著差异。可以看出, 在年平均温度大于 20°C 范围, 受降雨期高温高湿的作用, 云下雨滴降落过程中因蒸发而产生的稳定同位素的富集作用较轻^[14 15], 因此, 对应的年加权平均 $\delta^8\text{O}$ 相对较低。这或许是具有降水量效应取样站年加权平均 $\delta^8\text{O}$ 随年平均温度空间分布的变化率相对较小的原因之一。

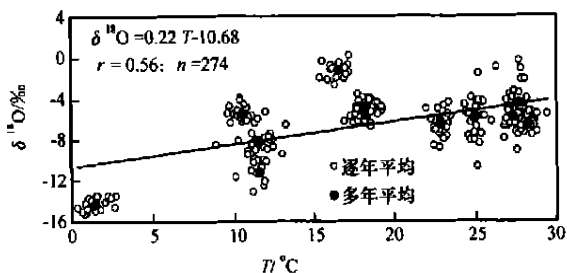


图4 具有降水量效应取样站的年加权平均 $\delta^8\text{O}$ 依年平均温度的散布

Fig. 4 Scatter of the annual weighted mean $\delta^8\text{O}$ versus the mean annual temperature for the stations with amount effect

上述分析结果表明, 季节尺度下降水量效应显著的地区在年尺度下具有温度效应的趋势。考虑到中低纬度影响因子的复杂性, 降水中 $\delta^8\text{O}$ 并不简单地反映局地的温度和降水量的变化, 在全球尺度下, 局地降水中 $\delta^8\text{O}$ 的变化是全球变化的一个组成部分。因此, 对局地降水中平均稳定氧同位素比率的解释不仅要考虑它所代表的区域, 更要将它与全球的变化相联系。

3 年尺度下平均 $\delta^8\text{O}$ 和年平均温度随时间的变化

图5给出了12个站合计的年加权平均 $\delta^8\text{O}$ 和合计的年平均温度的逐年变化, 二者具有较好的一致性: 在20世纪60年代, 平均 $\delta^8\text{O}$ 和平均温度分别为 -5.57% 和 20.59°C ; 进入70年代, 平均 $\delta^8\text{O}$ 和平均温度持续走低, 到80年代初分别探底到 -9.06% 和 13.91°C 。与该时期的最大值(1970年)相比, 分别降低了 3.59% 和 7.22°C 。之后, 平均 $\delta^8\text{O}$ 和平均温度持续攀升, 于1997年和1995年分别达到 -5.23% 和 20.38°C 的新高。比80年代的最低值分别增加了 3.82% 和 6.47°C 。相对而言, $\delta^8\text{O}$ 曲线的波动幅度高于温度曲线。尽管12个站所代表的区域有限, 但是由它们所反映出的变化趋势并未脱离全球变化的大背景。

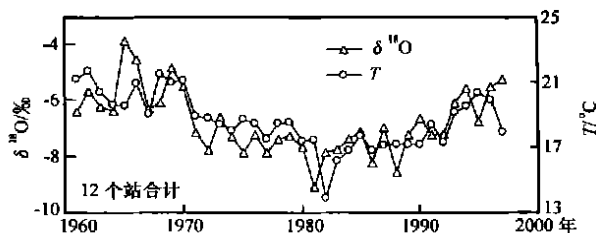


图5 合计的年加权平均 $\delta^8\text{O}$ 与年平均温度随时间的变化
Fig. 5 Interannual variations of the composite annual weighted mean $\delta^8\text{O}$ and the mean annual temperature

4 结论

(1) 在12个具有降水量效应的取样站中, $\delta^8\text{O}$ /降水量变化率的大小与降水量存在一定的反比关系。降水量效应的产生不仅与降水产生的强对流现象相联系, 而且与降水量的季节分布有关。

(2) 在年尺度下, 12个站中的11个站具有一定程度的温度效应。相对而言, 位于中低纬度站的平均 $\delta^8\text{O}$ /平均温度变化率大于中高纬度。与单站相比, 合计的 $\delta^8\text{O}$ /温度正相关关系要显著得多。

(3) 合计的年加权平均 $\delta^8\text{O}$ 和合计的年平均温度的逐年变化具有较好的一致性。

参考文献(References):

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436—468.
- [2] He Yuanqing, Yao Tandong, Yang Meixue, *et al.* Contemporary significance of snow and ice indicated by the record in a shallow ice core from a temperate glacier in southwestern monsoon region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(4): 235—242. [何元庆, 姚檀栋, 杨梅雪, 等. 玉龙山白水1号冰川区大气降水—冰雪—水文系统内 $\delta^8\text{O}$ 研究的新结果 [J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 391—393.]
- [3] Jouzel J, Fröhlich K, Schotterer U. Deuterium and oxygen—18 in present-day precipitation: data and modeling [J]. *Journal of Hydrological Sciences*, 1997, 42(5): 747—763.
- [4] Zhang Xinping, Yao Tandong, Masayoshi Nakawo, *et al.* Meridional variation of stable isotopic compositions in precipitation of the Tibetan Plateau and its adjacent regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 245—253. [章新平, 姚檀栋, 中尾正义, 等. 青藏高原及其毗邻地区降水中的稳定同位素成分的经向变化 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 245—253.]
- [5] Tian L D, Yao T D, Yang Z H, *et al.* A 4-year's study of stable isotope in precipitation on the Tibetan Plateau [J]. *Cryosphere*, 1997, 3: 32—36.
- [6] Yao Tandong, Sun Weizhen, Pu Jianchen, *et al.* Characteristics of stable isotope in precipitation in the inland area—a case study of the relation between $\delta^8\text{O}$ in precipitation and temperature in Ürümqi River, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 15—22. [姚檀栋, 孙维贞, 蒲健辰, 等. 内陆河流域系统降水中的稳定同位素—乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^8\text{O}$

- +18O 与温度关系研究[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 15—22.]
- [7] Araguás—Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 28 721—28 742.
- [8] Rozanski K, Araguas L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen—18 isotope composition of precipitation and climate [J]. *Science*, 1992, 258: 981—985.
- [9] IAEA/WMO. The GNIP Data Release 3, <http://www.iaea.org/programs/ri/gnip/gnipmain.htm>. 2000.
- [10] Jouzel J. Isotopes in cloud: multiphase and multistage condensation process [A]. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (2) [C]. Amsterdam—Oxford—New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1986. 61—112.
- [11] Yapp C J. A model for the relationship between precipitation D/H ratios and precipitation intensity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 9 614—9 620.
- [12] Zhang Xinping, Yao Tandong. Mathematical modeling on fractionation process of oxygen isotope in atmospheric precipitation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(2): 156—165. [章新平, 姚檀栋. 大气降水中的氧同位素分馏过程的数学模拟[J]. 冰川冻土, 1994, 16(2), 156—165.]
- [13] Zhang Xinping, Nakawo M, Fujita K, *et al.* Variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Langtang valley, Himalayas [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(9): 769—778.
- [14] Zhang Xinping, Xie Zichu, Yao Tandong. Mathematical modeling of variations on stable isotopic ratios in falling raindrops [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 12(2): 213—220.
- [15] Stewart M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling water drops: application to atmospheric processes and evaporation of lakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 1 133—1 146.

Isotopic Variations under Different Time Scales

ZHANG Xin-ping^{1, 2}, YAO Tan-dong², LIU Jing-miao^{1, 3}, TIAN Li-de²

(1. *Institute of Resources and Environment, Hunan Normal University, Changsha Hunan 410081, China*; 2. *Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China*; 3. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The temporal and spatial variations of stable isotopic composition in precipitation under different time scales are analyzed using the data of 12 IAEA/WMO sampling stations that have long-term series in the Northern Hemisphere. Under seasonal scale, the elected 12 stations have notable amount effect, and the magnitude of $\delta^{18}\text{O}$ /precipitation gradient is indirectly proportional to precipitation at a certain extent. The analyses show that the amount effect is not only related to strong convection of generating heavy rainfall but also to seasonal distribution of precipitation. For the latter, the seasonal distribution of mean precipitation is just contrary to that of mean temperature. Under annual scale, 11 among the 12 stations have temperature effect of certain degree. The only exception, Valentia, is located in Ireland and borders on the North Atlantic. The different weather systems and vapor origins complicate stable isotopic variations in precipitation. Comparatively, the mean $\delta^{18}\text{O}$ /temperature gradient at mid—low latitudes is greater than that at mid—high latitudes. The composite positive correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and temperature is more marked, compared with that of single station,

showing the interannual variation of $\delta^{18}\text{O}$ is mainly controlled by large-scale weather condition and mirrors the environmental and climatic change on large—scale space, but no local influence. Additionally, the interannual variation of the composite annual weighted mean $\delta^{18}\text{O}$ is in agreement with that of the mean annual temperature: the mean $\delta^{18}\text{O}$ and mean temperature is -5.57‰ and 20.59℃ , respectively, in the 1960s of the 20th Century. The mean $\delta^{18}\text{O}$ and temperature changed at a low level successively after the 1970s and got the minimums -9.06‰ and 13.91℃ , in the early 1980s decreased by 3.59‰ and 7.22℃ , respectively, compared with the maximum values in 1970, in this period. Since then, the mean $\delta^{18}\text{O}$ and mean temperature went up successively, and got the new highs, -5.23‰ and 20.38℃ respectively, increased by 3.82‰ and 6.47℃ compared with the minimums in the 1980s. Comparatively, the fluctuant extent of $\delta^{18}\text{O}$ curve is markedly greater than that of temperature curve, showing that, from another aspect, the $\delta^{18}\text{O}$ under annual scale has globality.

Key words: precipitation; stable isotope; temperature effect; amount effect; seasonal variation; annual variation