

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019110701

周鑫, 陈粉丽, 刘雪媛, 等. 基于大气环流模式(GCM)的黄土高原区降水稳定同位素模拟分析比较[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1179-1186.
ZHOU Xin, CHEN Fenli, LIU Xueyuan, et al. Analysis and comparison of simulated stable isotopes of precipitation in the Loess Plateau based on GCMs[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4): 1179-1186.

基于大气环流模式(GCM)的黄土高原区降水稳定同位素模拟分析比较*

周鑫 陈粉丽** 刘雪媛 钱瑞 王生晖 武茜茜

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州, 730070)

摘要 降水中的稳定同位素作为研究水循环中的重要组成部分,可综合反映出自然地理环境及气候变化. 本文依据1980—2007年第二次稳定水同位素比较小组SWING2中的5种大气环流模式(GCM)与全球降水同位素观测信息网(GNIP)实测数据,分析比较了黄土高原区降水稳定同位素的季节性时空特征变化. 研究结果表明,由LMDZ(free)模拟的当地大气水线 $\delta D = 7.448 \times \delta^{18}O + 3.608$ 更接近于实测结果,而MIROC模拟的LMWL相关系数 R^2 高达0.999;5种GCM模拟中的 $\delta^{18}O$ 与 δD 均表现出明显的季节变化,即夏季大于冬季. d 值结果再次验证了该区域夏季具有高湿度、蒸发慢、低 d 值,而冬季具有湿度低、蒸发快、高 d 值的特点.在纬度效应分析中,高纬度较低纬度中的 $\delta^{18}O$ 值明显偏低.

关键词 水汽输送, 稳定同位素, GCM, 纬度效应.

Analysis and comparison of simulated stable isotopes of precipitation in the Loess Plateau based on GCMs

ZHOU Xin CHEN Fenli** LIU Xueyuan QIAN Rui WANG Shenghui WU Xixi

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: As an important part in the study of water cycle, stable isotopes in precipitation can comprehensively reflect the natural geographical environment and climate change. Based on the simulations of five isotope-equipped GCMs released by Stable Water Isotope Intercomparison Group (SWING2) and measured data of GNIP from 1980—2007, the spatial distribution and seasonal variation of stable isotopes in precipitation are analyzed and compared in Loess Plateau. Research indicated that local meteoric water line (LMWL) ($\delta D = 7.448 \times \delta^{18}O + 3.608$) simulated by LMDZ (free) is closer to that of measured data, that correlation coefficient (R^2) between LMWL simulated by MIROC and measured data of GNIP is 0.999, and that the values of $\delta^{18}O$ and δD in precipitation for the five models in summer are higher than those in winter. Compared to winter, humidity and d -excess are high while evaporation is slow in summer. What's more, the value of $\delta^{18}O$ is much lower in high latitudes.

Keywords: water vapor transport, stable isotope, GCM, latitude effect.

降水稳定同位素作为水体中天然示踪剂,虽其成分所占比例极小,但对于空间环境变化具有十分敏感的“反馈”,因此可作为反映区域气候特征及不同水汽来源所占比重,进而深入了解区域水循环过程^[1-2].近

2019年11月7日收稿(Received: November 7, 2019).

* 甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-02)资助.

Supported by Collaborative Innovation Team Project in Colleges and Universities of Gansu(2018C-02).

** 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 13609397249, E-mail: chenfenli1102@163.com

年来成为学者们在探讨气候变化及古地理环境等水文学科的重要对象^[3-5].在同位素水文学中, $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的线性关系称之为大气水线(Meteoric water line),其实质由区域水汽来源、云下二次蒸发以及降水的季节变化所控制,大气水线斜率与截距的变化对于水循环方式具有重要指示意义^[6];此外,大尺度范围内降水中的稳定同位素组成随纬度升高而降低有助于解释分析温度效应以及水气团运移变化^[7].

早期国内外学者多以全球降水同位素观测网(Global network of isotopes in precipitation,简称 GNIP)开展相应研究,但由于 GNIP 数据空间不连续等客观条件的限制,进一步制约了对相关地区降水稳定同位素的分析^[8].1983 年,Joussaume 等^[9]首次用大气环流模式(General circulation model,简称 GCM)模拟全球水稳定同位素的分布.Yao 等^[10]利用 GCM 的 3 种模式(LMDZ,ECHAM5 和 REMO)对青藏高原地区实测数据对比分析得出降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化,但模拟数据中的 $\delta^{18}\text{O}$ 较实测数据中的值仍存在量的差异.Wang 等^[11]结合新疆乌鲁木齐与和田的同位素数据,系统地分析了 GCM 模拟结果在亚洲中部干旱区的适用性.但目前的研究,在空间上多涉及全球等大尺度范围,较小尺度探讨环境效应主要以选取少数 GCM 模型且以年际变化为主.

黄土高原位于中国东部季风区向西北干旱区的过渡带,生态脆弱,水资源较为匮乏^[12],对于该区域的降水稳定同位素的研究显得极为重要.贺强等^[13]和陈曦等^[14]分别从 GNIP 数据与实测数据对黄土高原区的降水同位素变化特征与水汽来源进行综合分析.刘杨民等^[15]虽利用 GCM 数据对西北干旱区的年际变化研究,并未从季节性角度分析.因此本文从黄土高原 GNIP 站点出发,利用 5 种 GCM 模式对黄土高原区多年季节性降水稳定同位素值对比分析,旨在揭示所选 GCM 模拟数据在较小区域的适用性,季节性的降水稳定同位素时空变化特征所指示的环境意义,以期为以后开展相应研究提供科学依据和理论参考.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 数据来源

本研究选取了第二次稳定水同位素比较小组 SWING2(Stable Water Isotope Intercomparison Group, Phase 2)中的 5 种 GCM,包括 LMDZ(free)、LMDZ(ECMWF)、GISS-E(NCEP)、isoGSM(NCEP)及 MIROC(free)数据(<http://www.giss.nasa.gov/swing2>),其空间分辨率及相关信息参考表 1 所示.

表 1 同位素 GCM 模型的基本信息

Table 1 Basic information of stable isotope-equipped of GCMs used in the study

GCM	来源 Source	空间分辨率 (经度×纬度) Horizontal resolution (latitude×longitude)	模拟方法 Simulation method	代表性文献 Key reference
LMDZ(free)	法国气象动力实验室	3.75°×2.5352°	AMIP 标准	Risi et al ^[16]
LMDZ(ECMWF)	法国气象动力实验室	3.75°×2.5352°	ECMWF 张弛逼近	Risi et al ^[16]
GISS-E(NCEP)	美国国家航空航天局	2.5°×2°	NCEP 张弛逼近	Schmidt et al ^[17]
isoGSM(NCEP)	美国斯克里普斯海洋研究所	1.875°×1.904°	NCEP 张弛逼近	Yoshimura et al ^[18]
MIROC(free)	日本东京气候系统研究中心	2.8125°×2.7905°	AMIP 标准	Kurita et al ^[19]

气象数据来源于国家气象中心气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的黄土高原区 1981—2010 年 7 个气象站点的月值降水量及气温等信息.作为对比分析的长期观测站点降水稳定同位素数据来自全球降水同位素观测信息网 GNIP(<http://www.iaea.org>),选取位于研究区(图 1)的 7 个同位素观测站点的地理坐标信息如下:其中兰州(36.05°N,103.88°E)、银川(38.48°N,106.21°E)、太原(37.78°N,112.55°E)、平凉(35.53°N,106.7°E)、西安(34.3°N,108.93°E)、靖边(37.60°N,108.80°E)和包头(40.67°N,109.85°E).

1.2 研究方法

因各稳定同位素大气环流模式均采用格点存储数据,故利用美国航空航天局(NASA)开发的 Panoply 地理网格绘制软件导出为矢量文件,在 ARCGIS 软件中选择每个模式位于黄土高原区的格点数据进行分析,分别导出对应数据中的¹⁸O、¹⁶O、H 值,剔除异常值.在降水中稳定氢氧同位素比率用

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H 的大小相对于维也纳标准平均海洋水 V-SMOW 的千分差表示,即:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2\text{O}}{R} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta\text{D} = \left(\frac{\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}}{R} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中, R 为降水中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H 的比率,对于 MIROC 与 isoGSM 模式取值为 1, GISS-E 与 LMDZ 模式中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H 分别取 0.0020052 和 0.00015576.

降水中稳定同位素数据的加权平均值为:

$$\delta_{(w)} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (3)$$

式中, $\delta_{(w)}$ 为加权平均值; P_i 为降水量值, δ_i 为降水中对应的稳定同位素值.

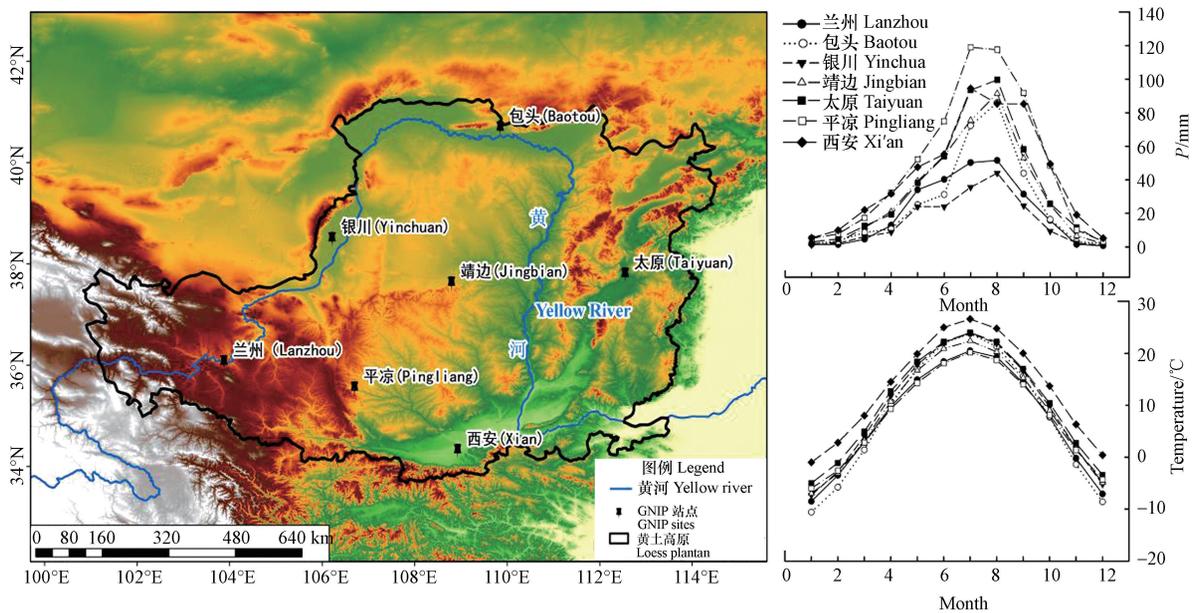


图1 黄土高原区地理位置及 GNIP 站点降水量与温度的季节性变化

Fig.1 Geographical location of the Loess Plateau and seasonal variation of Precipitation and Temperature at GNIP sites

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 黄土高原区大气降水线方程

通过对实测数据与 GCM 模拟数据研究对比,5 种 GCM 模型均在一定程度上再现了黄土高原区当地大气水线方程(图 2).比较而言,由 LMDZ (free) 模拟的 LMWL 更接近于实测结果,由 GISS-E 与 isoGSM 模拟的 LMWL 的斜率和截距基本都大于实测结果.其中,由 LMDZ (ECMWF) 模拟的 LMWL 的斜率与截距均高达 8.087 与 16.605,远大于 7.196 与 2.638 的实测结果.由 MIROC 模拟的 LMWL 相关系数 R^2 虽高达 0.999,但斜率相对其它模型拟合结果欠佳.GCM 数据模拟的水线方程结果基本均比 1961 年 Craig 等^[20]提出的全球大气水线方程 GMWL ($\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$) 的斜率与截距较小,同 1983 年郑淑蕙等^[21]提出的中国大气水线方程 ($\delta\text{D} = 7.9 \times \delta^{18}\text{O} + 8.2$) 接近,表明由于黄土高原区强烈的二次蒸发结果所致.

$$\delta\text{D} = 7.196 \times \delta^{18}\text{O} + 2.638 \text{ (GNIP)} \quad \delta\text{D} = 7.448 \times \delta^{18}\text{O} + 3.608 \text{ (LMDZ (free))}$$

$$\delta\text{D} = 8.087 \times \delta^{18}\text{O} + 16.605 \text{ (LMDZ)} \quad \delta\text{D} = 7.722 \times \delta^{18}\text{O} + 9.585 \text{ (GISS_E)}$$

$$\delta\text{D} = 7.655 \times \delta^{18}\text{O} + 9.430 \text{ (isoGSM)} \quad \delta\text{D} = 7.857 \times \delta^{18}\text{O} + 8.869 \text{ (MIROC)}$$

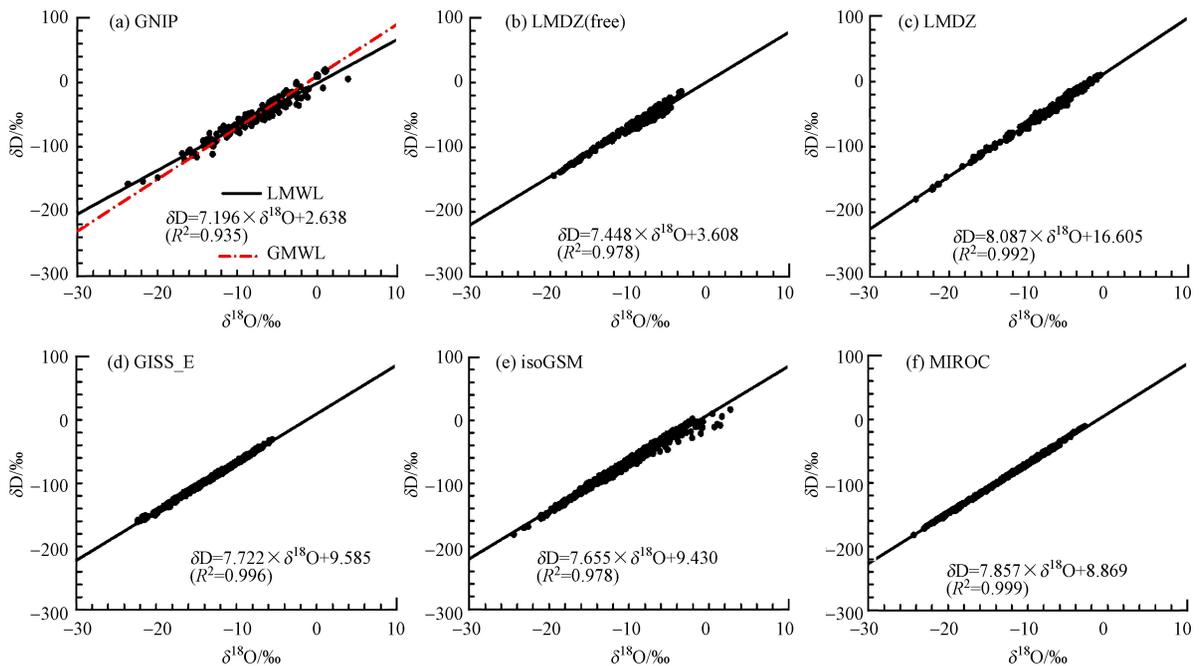


图 2 基于 GCM 的黄土高原区降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 之间的关系

Fig.2 Relationship between $\delta^{18}O$ and δD in precipitation based on GCMs of the Loess Plateau

2.2 黄土高原区 $\delta^{18}O$ 与 δD 的季节变化

在大尺度水汽同位素的研究中, GCM 模拟数据具有重要的作用. 图 3 与图 4 显示了 LMDZ(free)、LMDZ(ECMWF)、GISS-E(NCEP)、isoGSM(NCEP) 及 MIROC(free) 模式模拟得到的降水中 $\delta^{18}O$ 与 δD 的月均变化. 通过对黄土高原区稳定同位素值的进一步分析发现, 在暖半年(4—9 月) 温度较高的月份, GCM 模拟的 $\delta^{18}O$ 与 δD 的值均高于冷半年(10—3 月) 温度较低月份的模拟值.

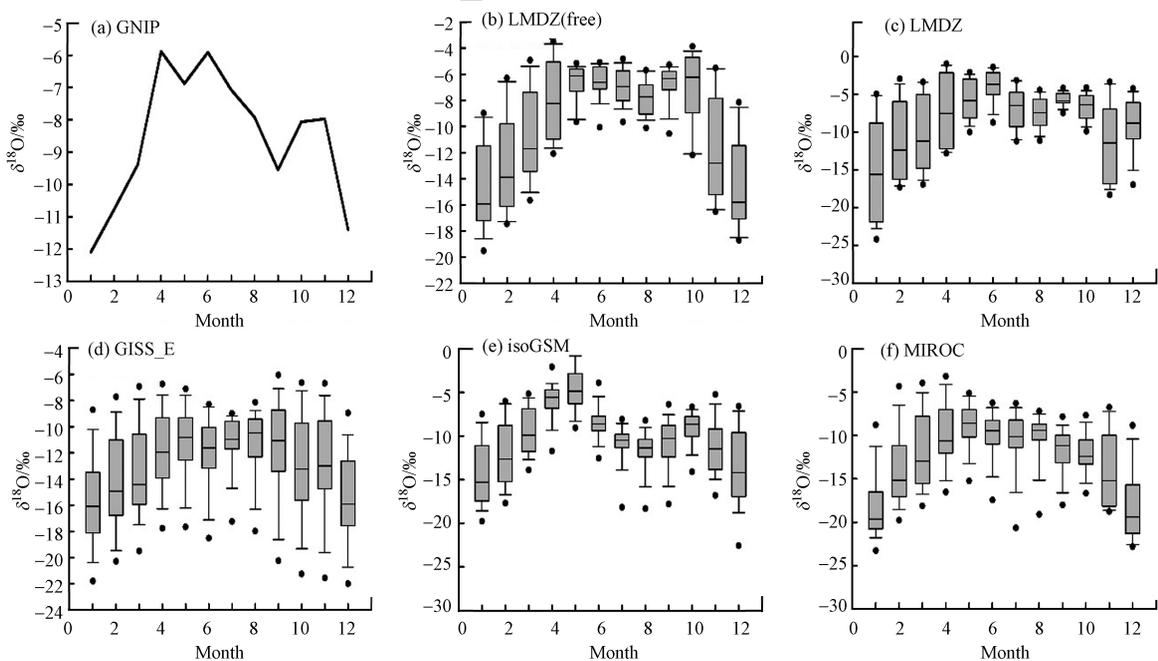
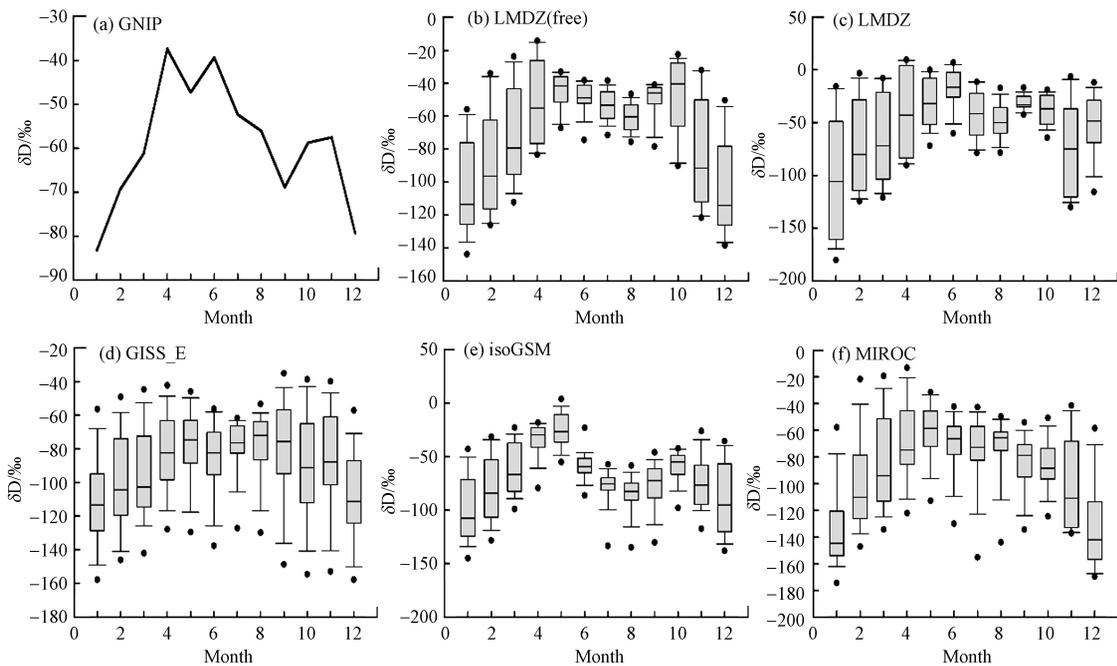


图 3 基于 GCM 的黄土高原区 $\delta^{18}O$ 的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of $\delta^{18}O$ based on GCMs in the Loess Plateau

图4 基于GCM的黄土高原区 δD 的季节变化Fig.4 Seasonal variation of δD based on GCMs in the Loess Plateau

在所有的GCM模拟结果中都可以看到明显的季节性变化,模拟的 $\delta^{18}O$ 的最大值 -0.87‰ 出现在isoGSM(NCEP)模型模拟的5月份,模拟的 $\delta^{18}O$ 的最小值 -24‰ 出现在LMDZ(ECMWF)模型模拟的1月份;模拟的 δD 的最大值 4.7‰ 出现在isoGSM(NCEP)模型模拟的5月份,最小值 -179.2‰ 亦出现在LMDZ(ECMWF)模型模拟的1月份。

综上所述,模拟结果均能模拟出黄土高原区 $\delta^{18}O$ 与 δD 的季节性变化特征,即降水中稳定同位素 $\delta^{18}O$ 与 δD 值具有夏高冬低的特点,且两者之间存在的正相关性较高。虽isoGSM(NCEP)模型6—8月模拟值存在减小的趋势,但依然难掩盖显著的季节性变化。

2.3 黄土高原区 d -excess 的季节变化

降水中的 d -excess 值反映局地降水同位素偏离 GMWL 的程度,即 $d = \delta D - 8\delta^{18}O$, d 值受制于相变过程中的 D 和 ^{18}O 分馏速度的相对差异,其主要控制因素是水汽源区的海面温度、风速和相对湿度,是判断水汽来源的一个重要参数^[22]。图5中GCM模拟数据再现了黄土高原区 d 值的季节性变化分布,研究区 d 值的变化范围介于 -11.6‰ — 24.2‰ 之间,平均值为 12.56‰ ,大于全球平均的 10‰ ,对比分析的实测GNIP数据加权平均值范围为 5‰ — 14.5‰ (图5(a))。这一结果与该研究区所处季风区有着密切关联,不同季节性降水水汽来源及蒸发条件的差异所致,局地蒸发水汽参与水循环是 d 值偏大的一个重要因素, d 值大表明湿度小,蒸发快^[23-24]。

通过对模拟过量氘值的分析比较得出,除isoGSM模型在4月与5月份模拟的 d 值变化波动较大,其他4种模型均能很好地展现出冬半年 d 值大于夏半年这一特点。因此也进一步验证了黄土高原区夏半年来自西南季风与东南季风的海洋性气团具有高湿度、蒸发慢、低 d 值的特点,而冬半年来自大陆性气团与局地蒸发水汽的共同作用下具有湿度低、蒸发快、高 d 值的特点。

2.4 纬度效应分析

纬度效应指随着纬度的升高,降水中的重同位素值逐渐贫化的现象,纬度效应主要是温度和蒸汽团运移过程同位素瑞利分馏的综合反映^[25-26]。虽由于地形与复杂的降水过程都会对纬度效应发生变化,但从宏观角度出发,当纬度跨度范围较大时,纬度效应依旧显著^[27]。为了评估5种GCM模拟数据的空间变化,本研究再次以同位素效应中的纬度效应进行综合分析,将研究区域分别划分为两个部分,即 32° — $37^{\circ}N$ 与 37° — $42^{\circ}N$ 。

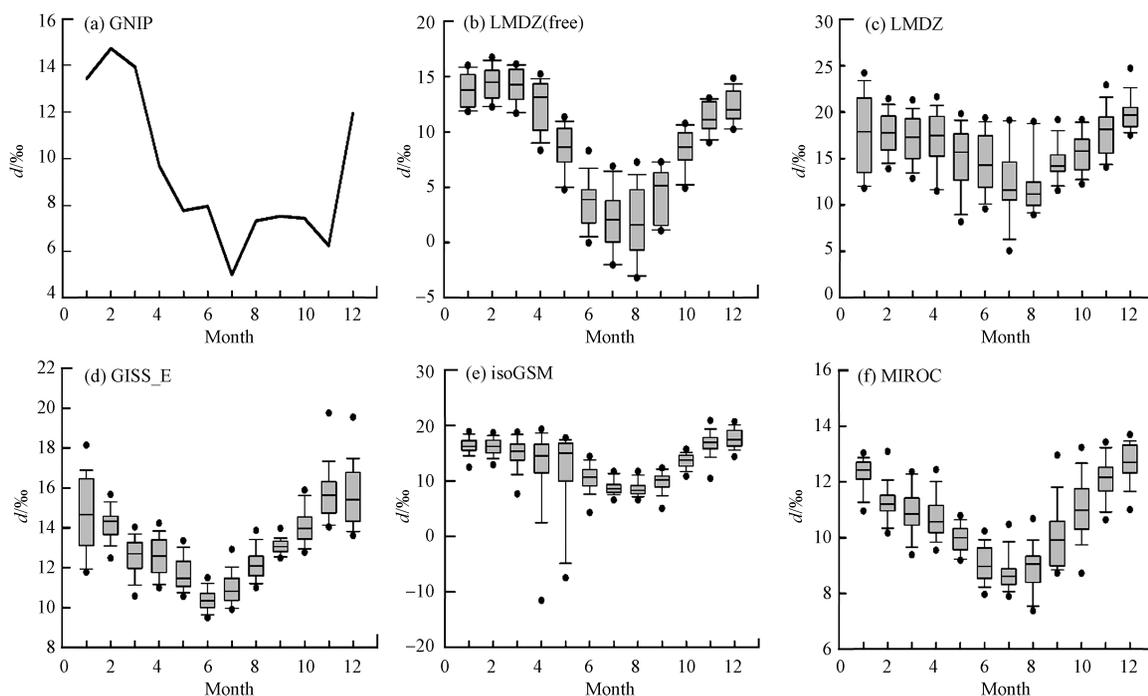


图5 基于 GCM 的黄土高原区 d 的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of d based on GCMs in the Loess Plateau

研究发现(图6), LMDZ(free)、GISS_E、MIROC 等3个大气环流模型均能显示出较高纬度(37° — 42°N)降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 相对较低纬度(32° — 37°N)降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏低,且冬季 $\delta^{18}\text{O}$ 值较夏季差异较大,最大差值 -6.15‰ 出现在MIROC模型中的12月份;而LMDZ(ECMWF)与isoGSM模型虽在夏季未表现出纬度效应,但冬季依旧清晰可见。

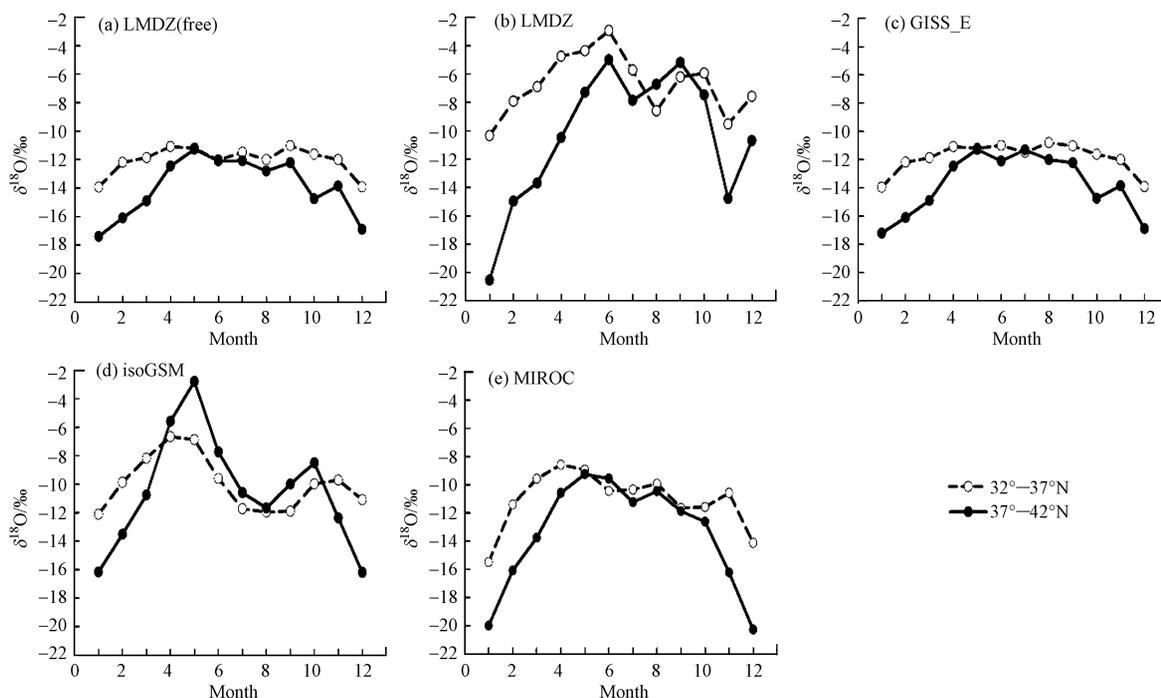


图6 基于 GCM 的黄土高原区 $\delta^{18}\text{O}$ 的纬度效应

Fig.6 Latitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ based on GCMs in the Loess Plateau

因本文研究所选的 5 种大气环流模式,其中 LMDZ(free) 和 MIROC(free) 采用 AMIP 标准进行模拟所得;GISS-E(NCEP) 和 isoGSM(NCEP) 采用 NCEP 张弛逼近;LMDZ(ECMWF) 采用 ECMWF 的风场数据进行了张弛逼近.各模式在大气降水线、同位素的季节变化、纬度效应分析中均与 GNIP 实测数据结果产生一定的差异,原因可能是不同模式边界条件和物理化参数差异所致,区域降水中的同位素变化不仅与气象参数有关,而且受大气环流控制降水气团的演化过程.

经本文分析研究,LMDZ(free) 模式虽空间分辨率较小,但综合研究比较其模式效果最好,符合黄土高原区稳定同位素的时空变化特征;而 isoGSM(NCEP) 模式空间分辨率最高,位于其研究范围的格点数最多,但其数据波动较大,对于环境效应的指示较差.因此对于特定区域的模型选取中应充分综合考虑研究尺度及特征,选取最佳的模式模拟.

3 结论(Conclusion)

本文通过选取了第二次稳定水同位素比较小组 SWING2 中的 5 种 GCM 模拟数据以及 GNIP 实测对比数据分析了 1980—2007 年黄土高原区降水稳定同位素的大气水线方程以及季节性时空特征变化,得出如下结论:

(1) 由 LMDZ(free) 模拟的 LMWL 更接近于实测结果,两者分别为: $\delta D = 7.448 \times \delta^{18}O + 3.608$ 与 $\delta D = 7.196 \times \delta^{18}O + 2.638$;LMDZ(ECMWF) 模拟结果的截距 16.605 最大;在相关性对比中,MIROC 拟合结果 R^2 却高达 0.999.

(2) 五种 GCM 模型模拟的 $\delta^{18}O$ 与 δD 均表现出明显的季节性变化,即暖半年(4—9 月)较冷半年(10—3 月)中的 $\delta^{18}O$ 与 δD 值偏大, $\delta^{18}O$ 与 δD 的最大值与最小值均分别出现在 isoGSM 模型模拟的 5 月份与 LMDZ(ECMWF) 模型模拟的 1 月份. d 值结果再次验证了该区域夏季具有高湿度,蒸发慢,低 d 值,而冬季具有湿度低,蒸发快,高 d 值的特点.

(3) 纬度效应分析发现,5 种 GCM 均能在一定程度上表明 32° — $37^\circ N$ 较 37° — $42^\circ N$ 中的 $\delta^{18}O$ 值偏大.通过选用不同的大气环流模式(GCM)研究发现在中尺度范围内能够清晰再现当地气候特征及自然地理环境,但水循环过程中又涉及到云层强烈的同位素分馏机制与水汽再循环因素,因此这一角度为今后该区域的研究方向.

参考文献(References)

- [1] 胡勇博,肖薇,钱雨妃,等.水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组成的影响[J].环境科学,2019,40(2):573-581.
HU Y B, XIAO W, QIAN Y F, et al. Effects of water vapor source and local evaporation on the stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 573-581 (in Chinese).
- [2] 郭政昇,郑国璋,赵培,等.水汽源区变化对黄河中游降水稳定同位素的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):1979-1991.
GUO Z S, ZHENG G Z, ZHAO P, et al. Effect of variation in water source area on stable isotopes in precipitation in the middle reach of the Yellow River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(11): 1979-1991 (in Chinese).
- [3] DANSGAARD W. The abundance of $\delta^{18}O$ in atmospheric water and water vapor[J]. Tellus, 1953, 5(4): 461-469.
- [4] 章新平,刘晶森,田立德,等.亚洲降水中 $\delta^{18}O$ 沿不同水汽输送路径的变化[J].地理学报,2004,59(5):699-708.
ZHANG X P, LIU J M, TIAN L D, et al. Variations of $\delta^{18}O$ in precipitation along vapor transport paths over Asia [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 59(5): 699-708 (in Chinese).
- [5] 李宗省,冯起,李宗杰,等.祁连山北坡稳定同位素生态水文学研究的初步进展与成果应用[J].冰川冻土,2019,41(5):1044-1052.
LI Z S, FENG Q, LI Z J, et al. Preliminary progress of ecohydrology based on stable isotope tracing in the northern Qilian Mountains and its applications[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1044-1052 (in Chinese).
- [6] 章新平,刘晶森,孙维贞,等.中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J].中国科学(地球科学),2006,36(9):850-859.
ZHANG X P, LIU J M, SUN W Z, et al. Study on relationship between stable oxygen isotope in precipitation and relative meteorological parameters in southwest China [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2006, 36(9): 850-859 (in Chinese).
- [7] THOMPSON L G, YAO T D, THOMPSON E M, et al. A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan Ice Cores[J]. Science, 2000, 289: 1916-1919.
- [8] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [9] JOUSSAUME S, SADOURNY R, JOUZEL J. A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere[J]. Nature, 1984, 311

- (5981):24-29.
- [10] YAO T D, MASSON-DELMOTTE V, GAO J, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4):525-548.
- [11] WANG S J, ZHANG M J, CHEN F L, et al. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7):771-783.
- [12] 王毅荣, 吕世华. 黄土高原降水对气候暖响应的敏感性研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(1):43-51.
WANG Y R, LV S H. Sensitivity analysis of the response of precipitation to climate change over China Loess Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1):43-51 (in Chinese).
- [13] 贺强, 孙从建, 吴丽娜, 等. 基于 GNIP 的黄土高原区大气降水同位素特征研究[J]. *水文*, 2018, 38(1):58-66.
HE Q, SUN C J, WU L N, et al. Study on isotopic characteristics of atmospheric precipitation in Loess Plateau Based on GNIP [J]. *Journal Of China Hydrology*, 2018, 38(1):58-66 (in Chinese).
- [14] 陈曦, 李志, 程立平, 等. 黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. *生态学报*, 2016, 36(1):98-106.
CHEN X, LI Z, CHENG L P, et al. Analysis of stable isotopic composition and vapor source of precipitation at the Changwu Loess Tableland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1):98-106 (in Chinese).
- [15] 刘杨民, 张明军, 王圣杰, 等. 基于 GCM 的西北干旱区降水稳定氢氧同位素年际变化模拟[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1):260-267.
LIU Y M, ZHANG M J, WANG S J, et al. Interannual variation of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Arid North west China Based on GCMs [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1):260-267 (in Chinese).
- [16] RISI C, LANDAIS A, WINKLER R, et al. Can we determine what controls the spatio-temporal distribution of d-excess and ^{17}O -excess in precipitation using the LMDZ general circulation model [J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(5):2173-3193.
- [17] SCHMIDT G A, LGRANDE A N, Hoffmann G. Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled ocean-atmosphere model [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D10):185-194.
- [18] YOSHIMURA K, SATO K, AOI N, et al. Cell-assisted lipotransfer for cosmetic breast augmentation supportive use of adipose-derived stem/stromal cells [J]. *Aesthetic Plastic Surgery*, 2008, 32(1):48-55.
- [19] KURITAL N, NOONE D, RISI C, et al. Intraseasonal isotopic variation associated with the Madden-Julian Oscillation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(24):148-227.
- [20] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133(3465):1702-1703.
- [21] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, 28(13):801-806.
ZHENG S H, HOU F G, NI B L. The research of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(13):801-806 (in Chinese).
- [22] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 黄河流域大气降水氢、氧稳定同位素时空特征及其环境意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(2):269-277.
LI X F, ZHANG M J, WANG S J, et al. Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the Yellow River Basin and its environmental significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2):269-277 (in Chinese).
- [23] 马潜, 张明军, 王圣杰, 等. 基于氢氧同位素的中国东南部降水局地蒸发水汽贡献率[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(11):1712-1720.
MA Q, ZHANG M J, WANG S J, et al. Contributions of moisture from local evaporation to precipitations in southeast China based on hydrogen and oxygen isotopes [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(11):1712-1720 (in Chinese).
- [24] HUGHES C E, CRAWFORD J. Spatial and temporal variation in precipitation isotopes in the Sydney Basin, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 489:42-55.
- [25] 李学礼, 刘金辉, 史维浚, 等. 新疆准噶尔盆地北部天然水的同位素研究及其应用[J]. *地球学报*, 2000, 21(4):401-406.
LI X L, LIU J H, SHI W J, et al. The isotopic study and application of natural water in northern Zhunggar Basin, Xinjiang [J]. *ACTA GEOSCIENTIA SINICA*, 2000, 21(4):401-406 (in Chinese).
- [26] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7):2191-2200.
LIU J Y, ZHANG F P, FENG Q, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation over Shaanxi-Gansu-Ningxia and its water vapor sources [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7):2191-2200 (in Chinese).
- [27] 胡可, 陈洪, 聂云鹏, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5):53-62.
HU K, CHEN H, NIE Y P, et al. Characteristics of seasonal variation of deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation in karst peak-cluster depression area, northwest Guangxi of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5):53-62 (in Chinese).