

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0075

SHI Yudong, WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, et al. Applicability on the OIPC and RCWIP stable hydrogen and oxygen isotope data in precipitation across the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):974-985. [石玉东, 王圣杰, 张明军, 等. OIPC和RCWIP降水氢氧稳定同位素数据在新疆天山地区的适用性[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):974-985.]

OIPC和RCWIP降水氢氧稳定同位素数据 在新疆天山地区的适用性

石玉东, 王圣杰, 张明军, 李昱锋, 宋洋

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州730070)

摘要: 降水中氢氧稳定同位素的空间分布是同位素水文学和同位素生态学研究的基础资料, 近年来高空间分辨率的氢氧稳定同位素分布数据产品获得了越来越多的重视。利用新疆天山地区实测降水同位素数据, 评估两套常用的全球降水同位素分布模拟数据(OIPC和RCWIP)的适用性。结果表明: 从时间尺度来看, 两套产品在夏半年(4-10月)的模拟效果明显优于冬半年(11月-次年3月); 在各自然区中, 准噶尔盆地荒漠自然区的模拟效果相对较好, 而吐鲁番盆地-哈密(戈壁)荒漠自然区模拟效果相对较差。通过均方根误差、线性判定系数、平均偏差误差、平均绝对误差等指标的比较, 在本研究区内RCWIP数据产品对降水同位素值的模拟效果比OIPC的效果好。结合乌鲁木齐多年降水氢氧稳定同位素数据, 发现降水同位素年际变化差异并未明显影响到代表性, 在缺乏长期监测的情况下这两套数据仍有重要的使用价值。

关键词: 降水; 氢氧稳定同位素; 天山; $\delta^{18}\text{O}$; 氘盈余

中图分类号: P426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0974-12

0 引言

降水是水循环过程中极其重要的一环, 是水汽输送和相变的最终结果, 对降水中的氢氧稳定同位素进行监测研究, 可以为确定全球和区域的水汽来源提供手段^[1-3], 也可以为冰芯等地质载体中同位素信息的解释提供依据^[4]。自Bowen等^[5]提出isoscares(同位素景观图谱)这一概念用于描述同位素的空间分布情况后, 降水中氢氧稳定同位素在不同时间尺度下的空间分布问题越来越受到重视, 涉及水文气象诊断^[6]、城市水资源变化^[7-9]以及产品溯源^[10]等诸多方面。降水同位素分布模拟也越来越精细, 使用的方法从早期的简单经验插值^[11], 再到结合空间和气象参数等辅助变量的空间插值^[5], 乃至同位素大气环流模式^[12], 对降水同位素空间分布

的规律认识越来越深刻^[2]。

对于相当多的研究需求来说, 能够准确反映全球或区域降水氢氧稳定同位素多年平均水平的数据产品是十分必要的, 具有重要的基准价值。从全球范围来看, 目前可以公开在线获取的高空间分辨率降水氢氧稳定同位素数据产品主要有美国犹他大学(the University of Utah)的Gabriel J. Bowen教授团队开发的在线降水同位素计算器(the Online Isotopes in Precipitation Calculator, 简称OIPC; 有时也根据文献作者的缩写称为BW模型)^[5,13-14]以及国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, 简称IAEA)研发的区域聚类水同位素预测模型(the Regionalized Cluster-based Water Isotope Prediction, 简称RCWIP)^[15]。上述两款模型以全球降水同位素网络(Global Network of Isotopes in Precip-

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701028; 41971034); 甘肃省高等学校科研项目(2018C-02)资助

作者简介: 石玉东(1995-), 男, 羌族, 四川绵阳人, 2018年在西华师范大学获学士学位, 现为西北师范大学在读硕士研究生, 从事生态水文过程研究. E-mail: syd_1995@126.com

通信作者: 王圣杰, 副教授, 从事寒旱区生态水文过程研究. E-mail: geowang@126.com.

itation, 简称 GNIP) 为主要数据源, 辅以少量其他文献公开发表的数据, 基于辅助变量插值了逐月全球陆地范围的降水同位素空间分布图。

近年来 OIPC 和 RCWIP 数据产品在国内外应用十分广泛, 在一些中小尺度的同位素研究中, 特别是实测资料的时空覆盖度不能满足需求的区域, 直接应用其中的一种或两种产品代替真实的降水同位素, 并进行进一步的研究。例如, Wang 等^[9]利用中国 60 个站点(其中 31 个源于 GNIP)的多年平均降水同位素数据, 对 OIPC 和 RCWIP 数据在中国的适用性进行了评估并进而用于降水与自来水中同位素联系的研究。Lisowska 等^[16]利用 OIPC 数据中 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 为波兰出土的骨骼提供氧同位素研究背景的需要。田茜等^[17]在研究青藏高原干旱区湖泊正构烷烃氢同位素能否记录降水同位素信息时, 使用 OIPC 对每个研究站点的降水同位素进行提取, 作为该采样点降水中同位素值。然而, GNIP 站点难以做到绝对均匀分布, 在很多高山、沙漠等低人口密度区域长期缺乏实测资料, 加之基于辅助变量的插值方法较少地涉及同位素的内在机制, 这使得基于其研发的降水同位素产品难免存在着或多或少的不确定性。显然, 未经验证直接将这些全球降水同位素分布模拟数据应用于具体的一个小区域, 可能会产生不准确的推论。

在亚洲中部干旱区, 雨滴在云下降落过程中经历着强烈的云下二次蒸发^[18], 一些小雨滴甚至完全蒸发殆尽, 这会强烈改变降水同位素比率^[19]; 加之绿洲区地表水体和土壤的蒸发以及植被蒸腾, 也会对局地降水水汽同位素产生深远的影响。然而, 这一区域却是 GNIP 监测的薄弱区域, 仅有乌鲁木齐、和田等少数站点。包括 OIPC 和 RCWIP 在内的全球降水同位素数据产品能否较好地刻画亚洲中部干旱区需要经过深入的评估。天山山脉是亚洲中部干旱区典型的湿岛^[20], 南北坡气候和水文条件差异明显^[21], 在区域水循环中饰演着重要的角色, 具有很好的区域气候代表性, 也是降水同位素监测研究的热点区域^[2]。本文以 2012–2013 年在天山南北 23 个站点的实测降水同位素资料为基础^[22], 从月尺度上评估 OIPC 和 RCWIP 两套产品在亚洲中部干旱区的适用性, 以期降水同位素分布模拟数据的建立和改进提供依据, 并为深入认识干旱气候条件下的降水同位素影响机制和区域水文循环过程研究提供参考。

1 研究区概况

天山位于亚洲中部干旱区核心地带, 是中亚地区最大的山系^[20](图 1)。相对充沛的降水在区域水循环过程与陆-气相互作用中具有重要地位。天山地区年平均降水量约 450 mm^[23], 新疆境内部分的降水量约占新疆总量的 40.4%^[24]。由于天山地区常年受盛行西风控制, 且呈东西走向的山脉对南下的冷空气和西风气流具有屏障和阻挡作用, 导致其西部和北部降水更多^[20,23,25]。本研究所涉及到的实测站点分布在天山各区域, 为了便于分析描述, 参照陈曦等^[23]对中国干旱区自然地理的分区, 结合本文具体实测站点的分布, 将新疆天山地区分为以下四个区域, 分别为: (I) 准噶尔盆地荒漠自然区、(II) 伊犁-巴音布鲁克中天山自然区、(III) 塔里木盆地极端干旱荒漠自然区、(IV) 吐鲁番盆地-哈密(戈壁)荒漠自然区。

2 数据与方法

2.1 降水同位素监测数据

本研究采用的天山地区降水氢氧稳定同位素实测值来自 Wang 等^[22]于 2012 年 8 月至 2013 年 9 月在 23 个站点采集的 1 052 个降水样本, 由于采样时段超过 12 个月, 统一选取 2012 年 9 月–2013 年 8 月的 978 个样品^[26]。降水样品在每次降水结束后立即收集, 根据降水量将事件尺度的同位素数据加权为逐月数据并分为夏半年(4–10 月)和冬半年(11–3 月)进行统计(表 1)。样品中氢氧稳定同位素在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室采用 LGR(Los Gatos Research)公司研发的 DLT-100 型液态水同位素分析仪分析, 结果表示为相对于 V-SMOW(维也纳平均标准海洋水)的 δ 值, 其中 $\delta^2\text{H}$ 值的测量精度为 $\pm 0.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值的测量精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。采样和实验分析的具体步骤在早期文献^[22]有详细介绍。

此外, 本文还用到了 GNIP 数据库^[27]乌鲁木齐站点(87.62 °E, 43.78 °N, 海拔 918 m)在 1986–1992 年、1995–1998 年、2001–2003 年数据, 共 131 个月值数据被使用。用于判断模拟产品受年际变化差异产生的可能影响。

2.2 全球降水同位素分布模拟数据产品

OIPC 数据产品^[14], 由美国犹他大学制作发布(<http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/>), 本文用到的版本是 v3.2, 包括逐月和全年 $\delta^2\text{H}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值

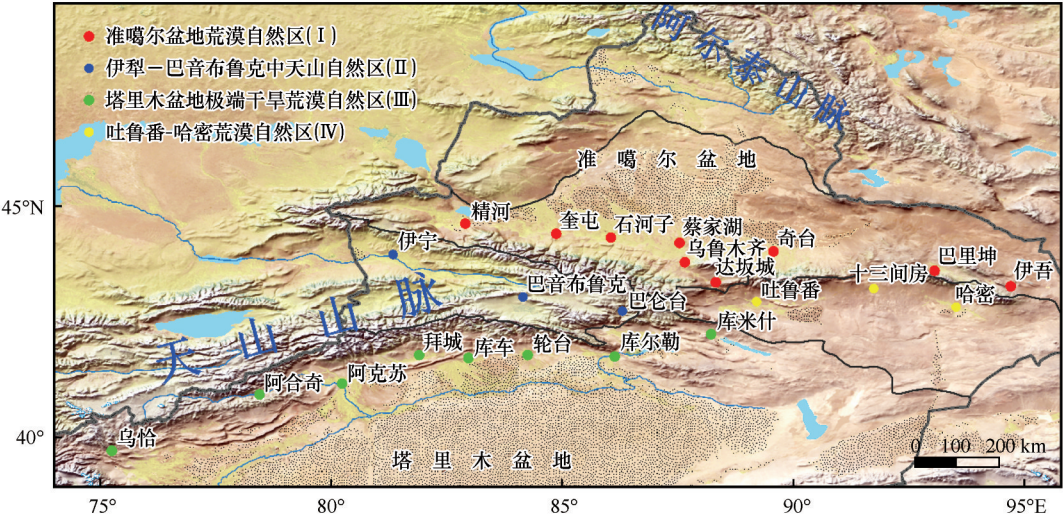


图1 研究区及采样点分布图(自然区参考陈曦等^[23])
Fig. 1 The map of study area and sampling sites (The natural areas are based on Chen et al^[23])

表1 采样站点信息
Table 1 Sampling site information

| 自然区 ^[23] | 站点 | 纬度 N/(°) | 经度 E/(°) | 海拔/m | 多年平均降 水量/mm | 观测年降 水量/mm | 样本数 ^[26] | 样品 月份 |
|----------------------|-------|----------|----------|----------|----------------|---------------|---------------------|----------|
| 准噶尔盆地荒漠自然区(Ⅰ) | 精河 | 44. 62 | 82. 90 | 320. 1 | 112. 1 | 136. 1 | 37 | 8 |
| | 奎屯 | 44. 40 | 84. 87 | 562. 0 | 183. 5 | 192. 7 | 42 | 11 |
| | 石河子 | 44. 32 | 86. 05 | 442. 9 | 226. 9 | 231. 9 | 70 | 12 |
| | 蔡家湖 | 44. 20 | 87. 53 | 440. 5 | 153. 8 | 189. 9 | 53 | 12 |
| | 乌鲁木齐 | 43. 78 | 87. 65 | 935. 0 | 298. 6 | 351. 4 | 74 | 12 |
| | 达坂城 | 43. 35 | 88. 32 | 1 103. 5 | 76. 7 | 92. 7 | 10 | 7 |
| | 奇台 | 44. 02 | 89. 57 | 793. 5 | 200. 9 | 256. 1 | 39 | 12 |
| | 巴里坤 | 43. 60 | 93. 05 | 1 677. 2 | 230. 5 | 245. 6 | 51 | 11 |
| | 伊吾 | 43. 27 | 94. 70 | 1 728. 6 | 104. 4 | 107. 6 | 19 | 8 |
| 伊犁-巴音布鲁克中天山自然区(Ⅱ) | 伊宁 | 43. 95 | 81. 33 | 662. 5 | 298. 9 | 316. 5 | 85 | 12 |
| | 巴音布鲁克 | 43. 03 | 84. 15 | 2 458. 0 | 280. 5 | 293. 0 | 93 | 11 |
| | 巴仑台 | 42. 73 | 86. 30 | 1 739. 0 | 220. 4 | 240. 6 | 56 | 7 |
| 塔里木盆地极端干旱荒漠自然区(Ⅲ) | 乌恰 | 39. 72 | 75. 25 | 2 175. 7 | 188. 7 | 228. 0 | 60 | 8 |
| | 阿合奇 | 40. 93 | 78. 45 | 1 984. 9 | 237. 7 | 343. 3 | 52 | 9 |
| | 阿克苏 | 41. 17 | 80. 23 | 1 103. 8 | 80. 4 | 147. 7 | 33 | 8 |
| | 拜城 | 41. 78 | 81. 90 | 1 229. 2 | 136. 6 | 119. 7 | 49 | 9 |
| | 库车 | 41. 72 | 82. 97 | 1 081. 9 | 76. 7 | 86. 4 | 37 | 8 |
| | 轮台 | 41. 78 | 84. 25 | 976. 1 | 78. 6 | 107. 1 | 24 | 7 |
| | 库尔勒 | 41. 75 | 86. 13 | 931. 5 | 59. 2 | 68. 6 | 22 | 6 |
| | 库米什 | 42. 23 | 88. 22 | 922. 4 | 59. 9 | 77. 2 | 28 | 9 |
| 吐鲁番盆地-哈密(戈壁)荒漠自然区(Ⅳ) | 吐鲁番 | 42. 93 | 89. 20 | 34. 5 | 15. 4 | 22. 2 | 20 | 8 |
| | 十三间房 | 43. 22 | 91. 73 | 721. 4 | 22. 6 | 6. 9 | 6 | 3 |
| | 哈密 | 42. 82 | 93. 52 | 737. 2 | 43. 7 | 33. 0 | 18 | 9 |

以及数据所对应的95%置信区间数据,空间分辨率为5'×5'。其计算思路主要利用纬度和海拔两个因子作为辅助变量,通过逐步回归得出回归方程:

$$\delta^{18}\text{O} = a|\text{LAT}|^2 + b|\text{LAT}| + c\text{ALT} + d \tag{1}$$

$$\delta^2\text{H} = e|\text{LAT}|^2 + f|\text{LAT}| + g\text{ALT} + h \tag{2}$$

式中: a、b、c、d、e、f、g、h均为拟合参数;LAT为纬度;ALT为海拔。在得到回归方程后根据辅助变量进行插值预测,再借助各实测站点的拟合残差,

最终得到全球降水同位素分布模拟结果。

RCWIP 数据^[15]是在上述方法的基础上改进而来的,由 IAEA 制作发布(http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_rcwip.html),本文采用的版本为 v1.0 数据集,其分辨率为 $10' \times 10'$,同样包括逐月和全年的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值和所对应的 95% 置信区间。与 OIPC 相比,其最大的差异在于不采用统一的全局模型,而是通过模糊聚类方法得到各气候区的不同模型,减少了全局预测模型的不确定性,模糊聚类的采用也使得分区边界可以平滑过渡。

本文使用 ArcGIS10.2,从两套数据集中提取出天山地区 23 个实测站点位置的模拟 $\delta^2\text{H}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值,并计算出 $d\text{-excess}$ 值($d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$)。由于 $\delta^2\text{H}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值线性相关,因此本文主要分析 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $d\text{-excess}$ 值两个参数,对两套数据在天山地区的适用性进行评估。

2.3 评价指标

选取均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、线性判定系数(Determination Coefficient, R^2)、平均偏置误差(Mean Bias Error, MBE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)对实测与模拟数据进行比较。其中, R^2 值越高,表明模拟值与实测值离散程度越小,线性关系越好,估计值在趋势上更接近于实测值;RMSE、MBE 和 MAE 偏大,表明模拟效果偏离真实值。计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i^M - \bar{\delta}^O)^2}{\sum_{i=1}^n (\delta_i^O - \bar{\delta}^O)^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i^O - \delta_i^M)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i^M - \delta_i^O) \quad (5)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_i^M - \delta_i^O| \quad (6)$$

式中: δ_i^O 表示实测值; δ_i^M 表示模拟值; $\bar{\delta}^O$ 表示实测平均值。

3 结果与讨论

3.1 各站点季节变化模拟结果评估

从空间分布上看,两套数据产品在天山地区对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟整体比较相似,但在区域细节上依旧存在一些差异(图 2)。在冬半年 RCWIP 模拟值比 OIPC 模拟值更小,在夏半年 RCWIP 模拟值比 OIPC 模拟值偏大。也就是说,在全年不同的季节,

RCWIP 模拟值的波动范围更大。另一方面,从图 2 中也可以看出,两套数据产品对于天山山区降水同位素贫化、盆地同位素富集的特点都有体现,空间上的基本规律是一致的,并且天山南侧的塔里木盆地相较于北侧的准噶尔盆地表现出了更高的同位素值。

3.1.1 两种模型在 $\delta^{18}\text{O}$ 值模拟中的适用性评估

将模拟值与实测值分站点绘制月均 $\delta^{18}\text{O}$ 值(图 3),为了更好地观察夏半年与冬半年模拟效果,使用虚线框将夏半年标识。总体而言,两种模型中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟效果比较好,其中夏半年比冬半年模拟得好。

在夏半年,从 OIPC 模拟的 $\delta^{18}\text{O}$ 值来看,有 10 个站点 R^2 值达到了 0.6 以上,其中有一半站点位于 I 区。RMSE 值和 MAE 值也表现出 I 区相较于其他几个自然区拟合程度更高。OIPC 在夏半年所计算出的 RMSE 值范围为 1.83‰ ~ 7.67‰,按降序排列前 10 的站点除了伊宁和哈密,其余全部位于 I 区;计算的 MAE 值全域范围为 1.53‰ ~ 6.40‰,而 I 区范围为 1.53‰ ~ 2.88‰,明显低于其他区域。整体来看,OIPC 在夏半年对天山地区模拟效果最佳的区域为 I 区。而 MBE 值显示 I 区绝大多数站点模拟值高于实测值。从区域角度来看,各评估参数均表现出 I 区的模拟效果更优,但是各评估参数所显示的最优站点却存在一些差异。 R^2 值显示阿克苏和精河两个站点的模拟效果最佳,均达到 0.9 以上,然而 RMSE 值和 MAE 值则表明奎屯和伊宁两个站点的模拟效果最好。

从 RCWIP 对 $\delta^{18}\text{O}$ 值在夏半年的模拟结果来看,有 15 个站点 R^2 值达到 0.6 以上,模拟效果最好的两个站点分别为达坂城和石河子, R^2 值为 0.90 和 0.83。对比 OIPC 模拟效果来看,RCWIP 模拟的最优值不如 OIPC,但 RCWIP 对整个区域的平均模拟效果更好。与 OIPC 模拟结果类似,RCWIP 对 I 区各站点模拟效果较其他区域更好,在 R^2 值大于 0.6 的 15 个站点中,有 8 个站点位于该区域。RMSE 值和 MAE 值也表现出同样的结果,该区域的平均值明显大于其他区域,表明 RCWIP 对 $\delta^{18}\text{O}$ 值在夏半年的模拟在 I 区表现最优。同时,MBE 值表示 RCWIP 模拟值在该区域大部分站点同样高于实测值。

也就是说,两套模拟产品对新疆天山地区夏半年 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟,在 I 区表现的最好。而两套产品对 $\delta^{18}\text{O}$ 值模拟较差的站点均为吐鲁番。RCWIP 模

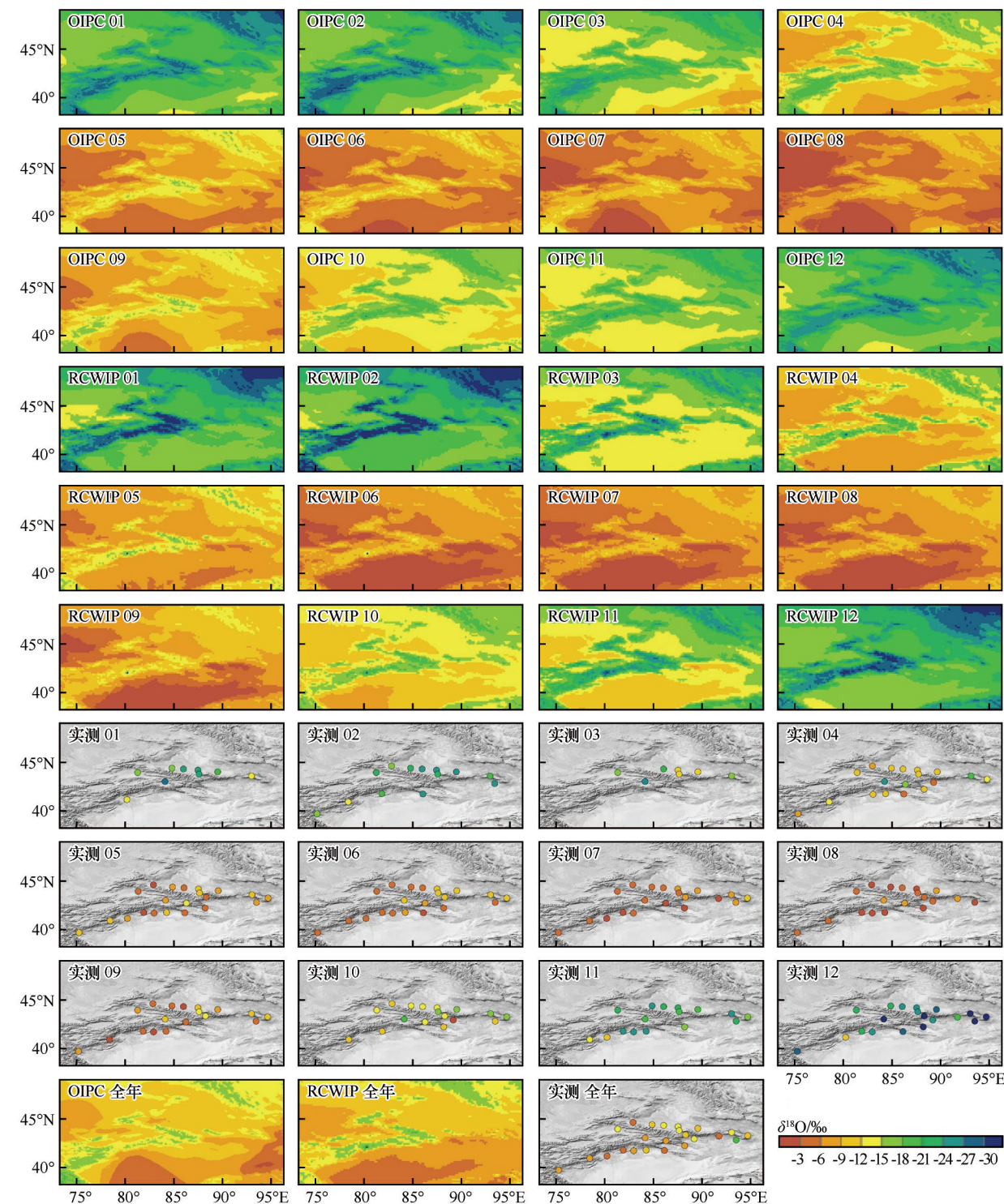
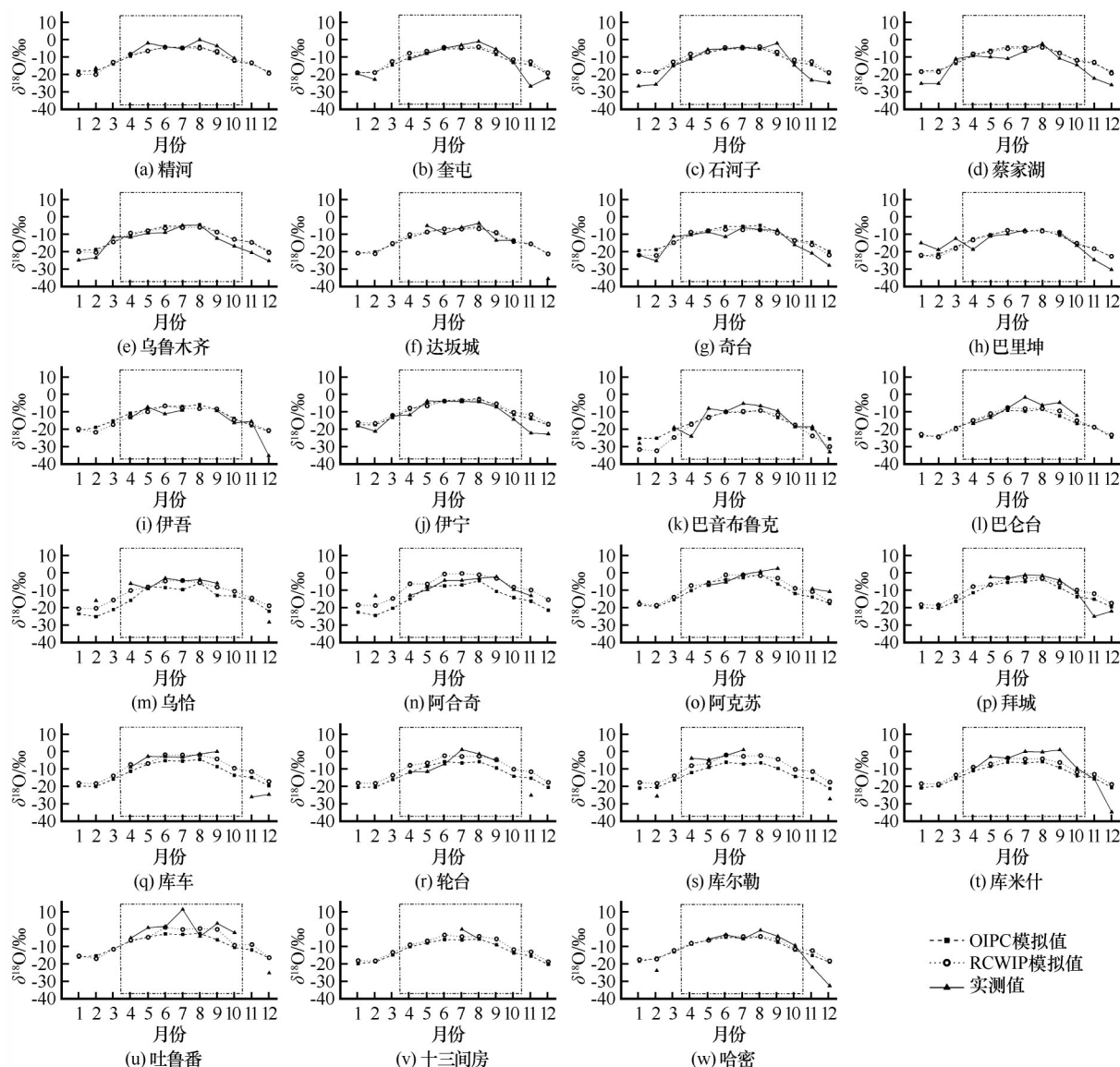


图2 天山地区OIPC、RCWIP与实测的逐月和全年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比图

Fig. 2 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ value in precipitation on a monthly and annual basis based on OIPC, RCWIP and observations across the Tianshan Mountains

型在吐鲁番 R^2 值低至0.2, RMSE值为3.9‰, MAE值为4.9‰; OIPC模型在吐鲁番的 R^2 值、RMSE值和MAE值分别为0.1、7.7‰和6.4‰。且两套产品在吐鲁番的MBE值均为负值且数值较大,表明两套产品在吐鲁番模拟值均比实测值偏低。

在冬半年,降水形式多为降雪且降水匮乏,部分站点整月都没有降水发生(图3)。因此主要依据RMSE值和MAE值对两套产品在天山地区 $\delta^{18}\text{O}$ 模拟值进行评估。对于RCWIP而言,对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟效果最好的三个站点是阿克苏、精河、奇台,前

图3 天山地区各站点OIPC、RCWIP和实测月均降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化Fig. 3 Monthly variation of $\delta^{18}\text{O}$ value in precipitation based on OIPC, RCWIP and observations for each site across the Tianshan Mountains

者位于Ⅲ区,后两者位于Ⅰ区。从区域角度来看,位于这两个区域的各站点模拟效果参差不齐,但整体看来Ⅰ区的模拟效果略好于Ⅲ区。另外,位于Ⅱ区的伊宁、巴音布鲁克均表现出较高的拟合性,巴仑台冬半年无足够样本暂不考虑。位于Ⅳ区的站点拟合性相对较差。OIPC在冬半年对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟则表示,模拟效果最好的三个站点分别是:精河、巴音布鲁克和伊宁,前者位于Ⅰ区,后两个站点则属于Ⅱ区。从区域上来看,其与RCWIP表现出相似的结果,即模拟效果在各区域之间表现为:Ⅱ区>Ⅰ区>Ⅲ区>Ⅳ区。而MBE值则表示,两套产品在冬半年对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟值与实测值之间的差

异,从区域角度来看没有像夏半年一样表现出明显规律。但是在冬半年,就整个天山地区而言,两套产品模拟值在大多数站点高于实测值,图3也显示着这一信息。

从全年来看,两套模拟产品对天山地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值的拟合度较好。对OIPC而言, R^2 值在0.50~0.94范围内,中位数为0.83,平均值为0.79;RMSE值的范围为2.68‰~7.79‰,中位数与平均值分别为4.65‰和4.93‰。从各区域来看,OIPC模拟得更好的区域为Ⅰ区,共9个站点中有8个站点 R^2 值达到了0.6以上。精河、达坂城和蔡家湖三个站点的 R^2 值均在0.9以上,且精河站的RMSE值也为最小

值,这说明 OIPC 在精河站的模拟效果是最优的。对 RCWIP 而言, R^2 值在 0.54 ~ 0.94 范围内,中位数为 0.84,平均值为 0.81;RMSE 值的范围为 2.68‰ ~ 6.34‰,中位数与平均值分别为 4.75‰ 和 4.62‰。从区域来看,模拟的最好的区域也为 I 区;从 R^2 值、RMSE 值等评估参数可以看出,模拟效果最好的站点为精河,这和 OIPC 的结果也是相同的。无论是站点还是区域,两套产品表现最优的地区是相同的,但模拟精度存在差异。综合各项评估参数结果来看,在对天山地区 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟中,RCWIP 表现优于 OIPC。

3.1.2 两种模型在 $d\text{-excess}$ 值模拟中的适用性评估

绘制天山地区各站点 OIPC、RCWIP 和实测月均降水 $d\text{-excess}$ 值(图 4),其中虚线框标识部分为夏半年。与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟效果相比较, $d\text{-excess}$ 值的模拟效果较差。整个天山地区不同区域间 $d\text{-excess}$ 模拟值与实测值都存在较大差异。两套产品模拟值在各月之间的变化相对平稳,但实测值存在较大幅度的波动,说明实际各月之间 $d\text{-excess}$ 值的变化幅度往往不能进行有效模拟。

在夏半年,RCWIP 对天山地区 23 个站点的模拟,仅有乌鲁木齐和阿克苏两个站点 R^2 值高于 0.6,分别为 0.89 和 0.84,其余各站 R^2 值均小于 0.5,甚至在部分站点低于 0.1。RMSE 值和 MAE 值也表示,RCWIP 在夏半年对 $d\text{-excess}$ 值的模拟很不理想。RMSE 最大值高达 28.3‰,最小值也有 5.2‰,而 MAE 值范围则为 4.5‰ ~ 26.7‰,均表现出模拟效果不佳结果。OIPC 对天山地区 $d\text{-excess}$ 值的模拟效果同样不理想;仅有乌鲁木齐和阿克苏两个站点 R^2 值高于 0.6,分别为 0.86 和 0.68,同时 RMSE 值和 MAE 值也比较大。两套产品所计算出的 MBE 值,除了吐鲁番为正值外,其余均为负值且数值较大。从区域来看,位于 III 区的各站点拟合程度较优于其他区域站点。

在冬半年,由于降水偏少,导致仅有 11 个站点能够计算 R^2 值,且只有蔡家湖和阿合奇两个站点的 R^2 值大于 0.6。RCWIP 在这两个站点的 R^2 值分别为 0.71 和 0.66, OIPC 则分别为 0.70 和 0.64。其余各站点于两套产品模拟值所计算出的 R^2 值均很低。并且 RMSE 值和 MAE 值在两套产品均偏高,表明其在冬半年对 $d\text{-excess}$ 模拟值与天山地区 23 个站点实测值差距较大。

从全年来看,两套模拟产品对天山地区 $d\text{-excess}$ 值的拟合度是不太理想的。参考各项评估参数可以看出, OIPC 在整个新疆天山地区对 $d\text{-excess}$ 值的模拟,仅有巴音布鲁克和轮台两个站点 R^2 值大于 0.6,分别为 0.85 和 0.61,其余站点所计算出的 R^2 值均小于 0.5,并且有部分站点低于 0.1。对于所有站点, RMSE 值均大于 10‰,最高值在伊吾,达到了 32‰。也就是说,相较于对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟, OIPC 对 $d\text{-excess}$ 值的模拟结果很不理想。对于 RCWIP 而言,其对天山地区 $d\text{-excess}$ 值模拟最好的站点也是巴音布鲁克, R^2 值达到了 0.77,并且模拟效果整体上也与 OIPC 类似,即模拟效果不理想,存在多个站点 R^2 值小于 0.1。整体来看, RCWIP 与 OIPC 全球降水同位素分布模拟数据产品对 $d\text{-excess}$ 值在天山地区的模拟效果均不理想,适用性较差。无论是冬半年还是夏半年, $d\text{-excess}$ 模拟值与实测值计算出的 R^2 值均较小、RMSE 值均很大, MAE 值也表现出各站点之间存在巨大的差异。

3.2 OIPC 及 RCWIP 模拟效果对比

通过两种模拟值与实测值计算出天山地区各区域的 R^2 值、RMSE 值、MAE 值以及 MBE 值(表 2),比较其在天山地区适用性。对于整个天山地区而言, RCWIP 模拟数据在三个参数对比中均表现出其具有更高的拟合度,且 $\delta^{18}\text{O}$ 值的拟合度显著高于 $d\text{-excess}$ 值的拟合度。

从表 2 可以看出,无论是 RCWIP 还是 OIPC, $\delta^{18}\text{O}$ 值在各区域之间模拟效果最佳的均是 I 区,其次是 II 区和 III 区, IV 区的模拟效果最差。从两套产品模拟过程来看,其考虑了降水事件发生时的大气温度、水汽起源以及传输模式,并通过纬度和海拔两个参数建立模型。因此从理论上来说,研究区内由局地效应对降水产生的影响越少,其模拟精度越高。以往的降水同位素研究认为^[28-29],天山地区的水汽主要受西风带影响,降水中氢氧稳定同位素值呈现出夏高冬低的特征。这使得 I 区和 II 区相较于位于背风坡的 III 区和 IV 区,更容易稳定接收由盛行西风带来的水汽。位于背风坡的两个自然区降水更为匮乏,气温较高,相对湿度较低。在西北干旱区,相对湿度、降水量和气温都与云下二次蒸发程度有关^[18-19],位于天山南坡的 III 区和 IV 区云下二次蒸发效应强于位于天山北侧的 I 区和 II 区,局地效应的增强导致模型模拟效应减弱,这也是为何两套产品模拟效果最差的区域均是 IV 区的原因。冬

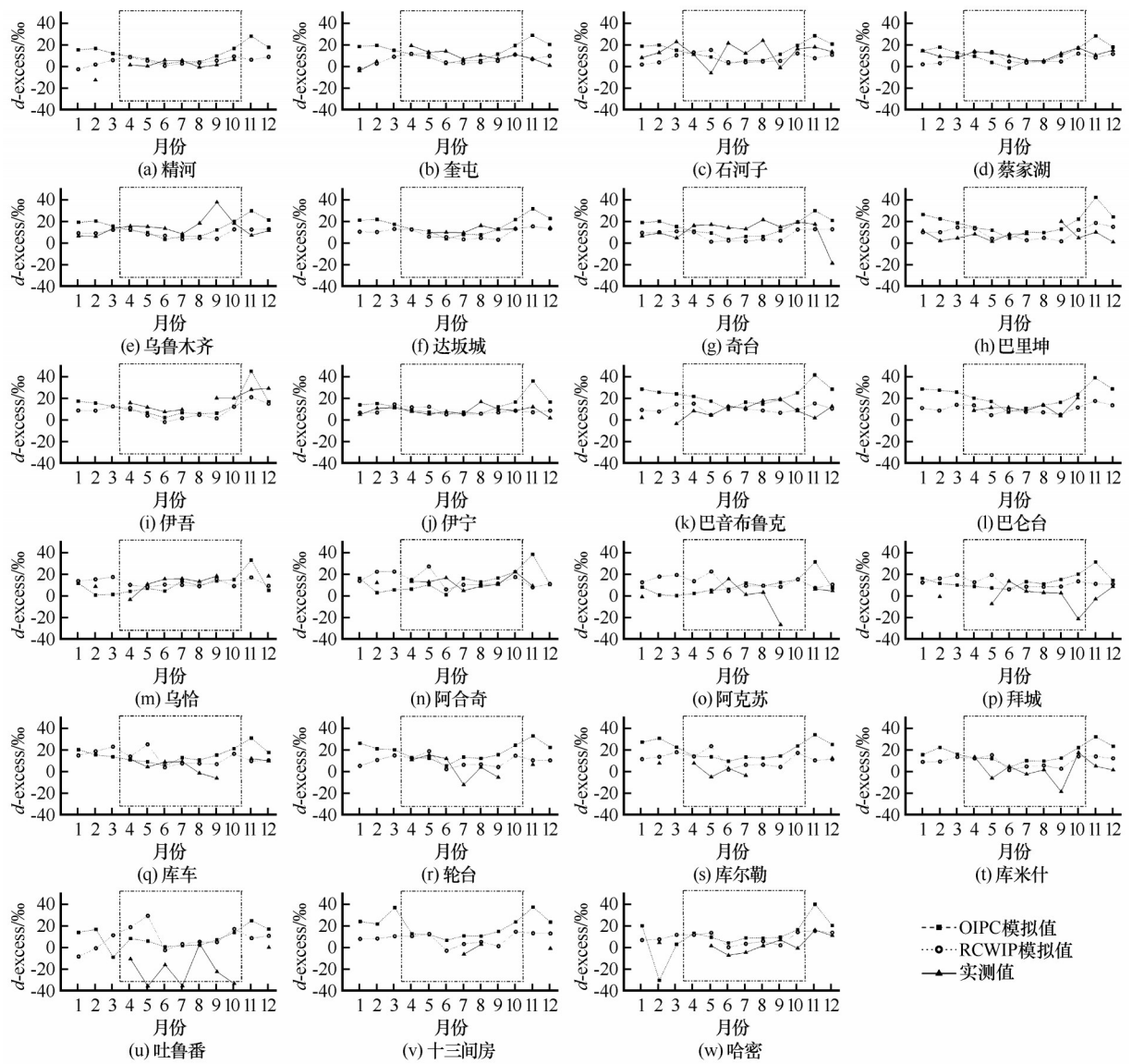


图4 天山地区各站点 OIPC、RCWIP 和实测月均降水 d -excess 值

Fig. 4 Monthly variation of d -excess value in precipitation based on OIPC , RCWIP and observations for each site across the Tianshan Mountains

表2 两种模型在天山各区域精度对比

| 区域 | 站点数 | 模型 | R^2 | | RMSE/‰ | | MAE/‰ | | MBE/‰ | |
|-------------------|-----|-------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| | | | $\delta^{18}\text{O}$ | d -excess | $\delta^{18}\text{O}$ | d -excess | $\delta^{18}\text{O}$ | d -excess | $\delta^{18}\text{O}$ | d -excess |
| 准噶尔盆地荒漠自然区(Ⅰ) | 9 | RCWIP | 0.83 | 0.23 | 4.44 | 23.51 | 3.37 | 22.41 | 1.63 | -22.41 |
| | | OIPC | 0.81 | 0.20 | 4.50 | 23.53 | 3.43 | 22.35 | 1.96 | -22.35 |
| 伊犁-巴音布鲁克中天山自然区(Ⅱ) | 3 | RCWIP | 0.67 | 0.43 | 3.93 | 23.16 | 3.21 | 22.32 | -0.25 | -22.32 |
| | | OIPC | 0.64 | 0.41 | 4.03 | 23.24 | 3.21 | 22.42 | -0.34 | -22.42 |
| 塔里木盆地极端干旱荒漠自然区(Ⅲ) | 8 | RCWIP | 0.83 | 0.16 | 4.89 | 17.10 | 4.06 | 15.06 | 0.51 | -13.08 |
| | | OIPC | 0.82 | 0.14 | 5.48 | 19.47 | 5.08 | 17.63 | -2.54 | -16.11 |
| 吐鲁番-哈密荒漠自然区(Ⅳ) | 3 | RCWIP | 0.83 | 0.14 | 5.09 | 16.47 | 4.01 | 13.74 | 0.12 | -2.30 |
| | | OIPC | 0.84 | 0.18 | 5.73 | 16.55 | 4.40 | 13.54 | -1.34 | -3.76 |
| 全域 | 23 | RCWIP | 0.81 | 0.22 | 4.62 | 20.31 | 3.68 | 18.71 | 0.79 | -16.53 |
| | | OIPC | 0.79 | 0.21 | 4.94 | 21.17 | 4.10 | 19.57 | -0.44 | -17.76 |

半年两套产品模拟最好的区域是Ⅱ区,该区域西部为迎风坡,中东部海拔较高,空气湿度较大,降水量比其它区域充沛。

无论是RCWIP还是OIPC,对 d -excess值的模拟均不理想。从两套模型的建立过程中来看,仍难以充分考虑局部气候环境对降水同位素产生的影响,特别是在实测资料匮乏导致残差订正本不够准确的区域。据Wang等^[30]的研究,在天山地区,特别是绿洲区,水汽再循环对降水贡献率较大;且孟鸿飞等^[31]研究表明,在中国西部(包括天山地区),较大地形(高山高原等)对水汽抬升冷凝形成的降水也会影响水汽中 d -excess值的大小。二次蒸发效应在小雨事件中表现得尤其明显^[18,32],而新疆降水多以小雨量为主^[33],这都是两套模型模拟效果不佳的因素。从表2来看,两套产品对 d -excess值的拟合程度很低,在使用时需要慎重考虑。

对于两套产品在天山地区的适用性,通过前

文的比较可知RCWIP更好。相较于OIPC模型,RCWIP模型除了使用纬度和海拔两个参数进行数据拟合,还将源数据站点进行了分组,将全球划分为若干个区域,每个区域考虑其气候类别采用不同的模型,并且在区域边界做了模糊聚类的过渡处理。此外,有研究^[34]在对BW方法的订正中提出,在 $\delta^{18}\text{O}$ 的模拟上协同克里格插值相比于反距离加权插值表现更优,这也是值得注意并进一步研究的。

3.3 乌鲁木齐站年际变化模拟结果评估

由于Wang等^[22]建立的天山同位素监测网络实测数据时间尺度最长仅为14个月且本文只选择其中12个月数据,不能准确评估年际变化差异的可能影响。因此选择GNIP数据库^[27]乌鲁木齐站多年数据对其年际变化差异可能产生的影响进行分析(图5)。虽然存在部分年份缺测,但不影响观察该站点 $\delta^{18}\text{O}$ 值多年变化。

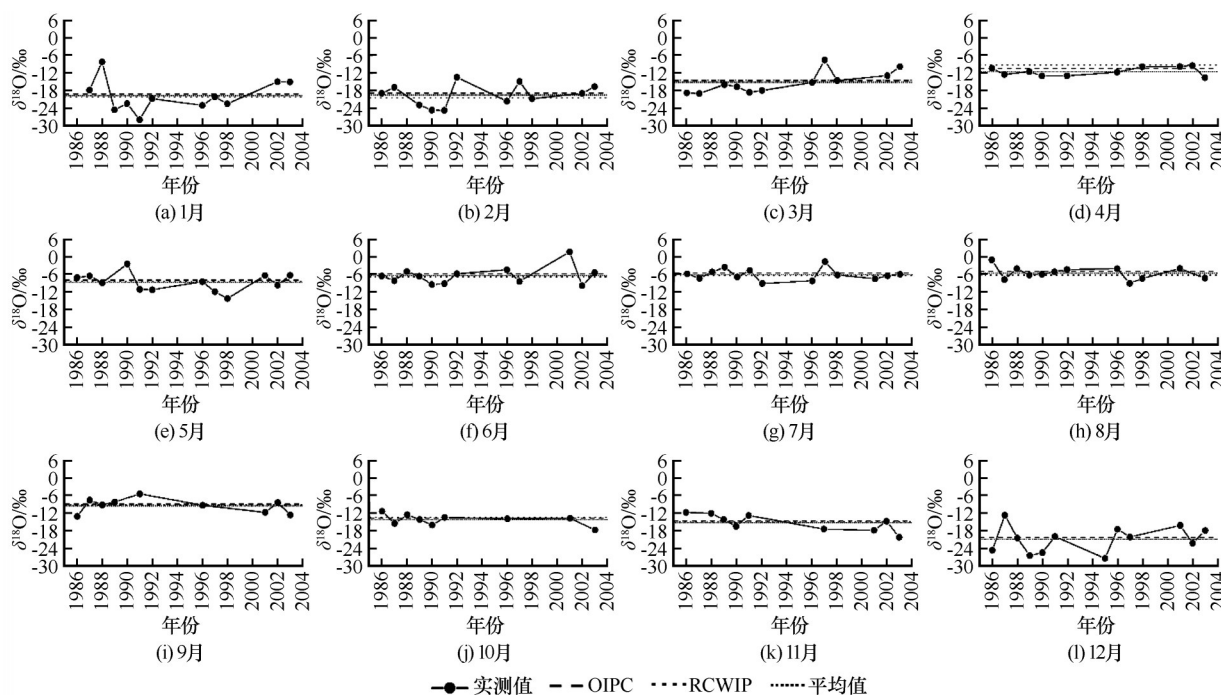


图5 1986—2003年乌鲁木齐站各月 $\delta^{18}\text{O}$ 实测值年际变化对比图

Fig. 5 Comparison of interannual variation of monthly observed $\delta^{18}\text{O}$ value in Urumqi from 1986 to 2003

图5绘制了乌鲁木齐站 $\delta^{18}\text{O}$ 值在逐年月值。从实测值来看,各月份虽然存在年际变化,但并没有显著的递增或者递减,而是在一定范围内波动。其中1月、2月、3月以及12月波动幅度较大,这些月份均属于冬半年,而夏半年各月份 $\delta^{18}\text{O}$ 值在年尺度上波动幅度更小。也就是说,乌鲁木齐站各月 $\delta^{18}\text{O}$ 值在年际尺度上仅出现小幅度波动且夏半年波动

幅度小于冬半年,并未形成规律性增加或者减少。也正因为 $\delta^{18}\text{O}$ 实测值在冬半年波动幅度大而夏半年波动幅度小,导致评估结果显示夏半年模拟效果更好。

同时,从图5中可以看出,对于两套产品对每月的模拟值均位于该月多年平均值附近,表示两套产品对乌鲁木齐站 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟存在合理性。其中

OIPC 的模拟结果普遍比实测平均值偏大而 RCWIP 的模拟结果普遍比实测平均值的偏小。并且在 3、5、9、10、11 等月份, 两套产品模拟值非常接近且均与实测平均值相似。也就是说, 虽然 RCWIP 和 OIPC 两套产品所使用的降水同位素值与本文所使用的实测数据存在年际差异, 但由于各月年际间并没有发生大幅度递变, 因此不影响两套产品对多年平均值的代表性。在缺乏长期监测的情况下这两套数据仍有重要的使用价值。

4 结论

使用天山地区实测降水稳定同位素数据对 OIPC 和 RCWIP 全球降水同位素分布模拟数据产品进行评估, 结果表明: R^2 , RMSE, MAE 和 MBE 等评估参数显示出, 总体上 RCWIP 对天山地区降水稳定同位素数据的模拟情况优于 OIPC 数据。

(1) 对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的模拟效果: OIPC 在夏半年模拟情况相对较好, 其中 I 区模拟效果较其他区域更好, 而 IV 区模拟效果相对较差。RCWIP 的模拟效果在区域上与 OIPC 相同, 但各项评估参数显示其整体模拟精度高于 OIPC。两套产品在冬半年的模拟情况均不如夏半年。从区域上看, II 区在两套产品中均表现相对较好。且就整个天山地区而言, 两套产品在冬半年的模拟值在大多数站点均高于实测值。

(2) 对 $d\text{-excess}$ 值的模拟效果: 总体看来, 两套数据对于 $d\text{-excess}$ 值的模拟效果均不如对于 $\delta^{18}\text{O}$ 值的拟合效果, 对其使用应持慎重的态度。在夏半年, 两套产品均只有乌鲁木齐和阿克苏两个站点 R^2 值大于 0.6; 冬半年则仅有蔡家湖和阿合奇两个站点 R^2 值大于 0.6; 从全年来看两套产品表现最好的站点是巴音布鲁克。

(3) 通过对乌鲁木齐站多年数据分析可知, 由于该站点各月逐年 $\delta^{18}\text{O}$ 值并未呈现出上升或下降趋势, 而是在一定范围内波动, 表示年际变化差异对模拟情况产生的影响比较小, 不影响两套产品对于多年平均值的模拟, 在缺乏长期监测的情况下这两套数据仍有重要的使用价值。

参考文献(References):

- [1] Bowen G J, Cai Z, Fiorella R P, et al. Isotopes in the water cycle: regional- to global-scale patterns and applications[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2019, 47(1): 453 – 479.
- [2] Zhang M J, Wang S J. A review of precipitation isotope studies in China: basic pattern and hydrological process[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 921 – 938.
- [3] Tan Zhongcheng, Lu Baohong, Wang Jiyang, et al. Isotope hydrology: progress and prospects[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(1): 16 – 22. [谭忠成, 陆宝宏, 汪集阳, 等. 同位素水文学研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 16 – 22.]
- [4] Thomas E R, Bracegirdle T J. Precipitation pathways for five new ice core sites in Ellsworth Land, West Antarctica[J]. Climate Dynamics, 2015, 44(7/8): 2067 – 2078.
- [5] Bowen G J, Revenaugh J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation[J]. Water Resources Research, 2003, 39(10): 1 – 13.
- [6] Wang Shengjie, Zhang Mingjun. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan Mountains[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5): 1119 – 1130. [王圣杰, 张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5): 1119 – 1130.]
- [7] Bowen G J, Ehleringer J R, Chesson L A, et al. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States[J]. Water Resources Research, 2015, 43(3): 399 – 407.
- [8] Zhao S H, Hu H C, Tian F Q, et al. Divergence of stable isotopes in tap water across China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43653.
- [9] Wang S J, Zhang M J, Bowen G J, et al. Water source signatures in the spatial and seasonal isotope variation of Chinese tap waters[J]. Water Resources Research, 2018, 54(11): 9131 – 9143.
- [10] Chesson L A, Barnette J E, Bowen G J, et al. Applying the principles of isotope analysis in plant and animal ecology to forensic science in the Americas[J]. Oecologia, 2018, 187(4): 1077 – 1094.
- [11] Birks S J, Gourcy L, Aggarwal P K, et al. Maps and animations offer new opportunities for studying the global water cycle[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2002, 83(37): 406 – 406.
- [12] Joussaume S, Jouzel J, Sadourny R. Erratum: A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere[J]. Nature, 1984, 311(5987): 680 – 680.
- [13] Bowen G J, Wilkinson B. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation[J]. Geology, 2002, 30(4): 315 – 318.
- [14] Bowen G J, Wassenaar L I, Hobson K A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics[J]. Oecologia, 2005, 143(3): 337 – 348.
- [15] Terzer S, Wassenaar L I, Araguás-Araguás L J, et al. Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(11): 4713 – 4728.
- [16] Lisowska-Gaczorek A, Cienkosz-Stepańczak B, Szostek K. Oxygen stable isotopes variation in water precipitation in Poland: anthropological applications[J]. Anthropological Review, 2017, 80(1): 57 – 70.
- [17] Tian Qian, Fang Xiaomin, Wang Mingda. Sedimentary n -alkanes record of precipitation D/H ratios in arid regions of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin 2017, 62: 700 – 710. [田茜, 方小敏, 王明达. 青藏高原干旱区湖泊正构烷烃氢同位素记录降水同位素[J]. 科学通报, 2017, 62: 700 – 710.]
- [18] Liu Jieyao, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in Northwest China[J]. Chinese Journal of Ap-

- plied Ecology, 2018, 29(5): 1479 – 1488. [刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 西北地区降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1479 – 1488.]
- [19] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, et al. Influence of below-cloud evaporation on deuterium excess in precipitation of arid central Asia and its meteorological controls[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(7): 1973 – 1984.
- [20] Hu Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 443. [胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 443.]
- [21] Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 748 – 759. [刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 52 – 63.]
- [22] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, et al. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia[J]. Tellus Series B: Chemical & Physical Meteorology, 2016, 68(1): 26206.
- [23] Chen Xi. Physical geography of arid land in China[M]. Beijing: Science Press, 2015: 493 – 494. [陈曦. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 493 – 494.]
- [24] Shi Yuguang, Sun Zhaobo, Yang Qing. Characteristics of area precipitation in Xinjiang region with its variations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(3): 326 – 332. [史玉光, 孙照渤, 杨青. 新疆区域雨量分布特征及其变化规律[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 326 – 332.]
- [25] Liu Yuzhi, Wu Chuqiao, Jia Rui, et al. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of central and east Asia[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(9): 1141 – 1152. [刘玉芝, 吴楚樵, 贾瑞, 等. 大气环流对中亚干旱半干旱区气候影响研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(9): 1141 – 1152.]
- [26] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, et al. Meteoric water lines in arid central Asia using event-based and monthly data[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 435 – 445.
- [27] IAEA/WMO. Global network of isotopes in precipitation[N]. <http://www.iaea.org/water>, 2018-02-12.
- [28] Li Xiaofei, Zhang Mingjun, Li Yaju, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and moisture transports over the arid region in Northwest China[J]. Environmental Science, 2012, 33(3): 711 – 719. [李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 711 – 719.]
- [29] Wang S J, Zhang M J, Crawford J, et al. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 2667 – 2682.
- [30] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, et al. Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: a stable isotope approach[J]. Water Resources Research, 2016, 52(4): 3246 – 3257.
- [31] Meng Hongfei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Application of CWT method in identifying water vapor sources of summer precipitation in China[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 872 – 881. [孟鸿飞, 张明军, 王圣杰, 等. CWT方法在中国夏季降水水汽来源识别中的应用[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 872 – 881.]
- [32] Pan Sumin, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Quantitative study of sub-cloud secondary evaporation effect on stable isotopes in raindrops during summer in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(3): 56 – 66. [潘素敏, 张明军, 王圣杰, 等. 新疆夏季云下二次蒸发对雨滴稳定同位素影响的定量研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 56 – 66.]
- [33] Du Yahan, Zhou Shunwu, Heng Bati, et al. Spatial distribution of summer graded precipitation in Xinjiang during 1965 – 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1231 – 1241. [杜雅茜, 周顺武, 亨巴提, 等. 1965 – 2015年新疆夏季不同等级降水的空间分布特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1231 – 1241.]
- [34] Yang Junhua, Qin Xiang, Wu Jinkui, et al. The application of modified BW method in studying spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1430 – 1439. [杨俊华, 秦翔, 吴锦奎, 等. 修正BW方法在中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 空间分布研究中的应用[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1430 – 1439.]

Applicability on the OIPC and RCWIP stable hydrogen and oxygen isotope data in precipitation across the Tianshan Mountains, Xinjiang

SHI Yudong, WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, LI Yufeng, SONG Yang

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

Abstract: The spatial distribution of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation is the basic data in isotope hydrology and isotope ecology. An increasing attention has been paid to the products of stable hydrogen and oxygen isotopes at high spatial resolutions in recent years. In this study, based on the precipitation samples collected at 23 stations across the Tianshan Mountains during 2012 – 2013, applicability of two widely-applied global products is evaluated, including OIPC (the Online Isotopes in Precipitation Calculator) and RCWIP (the Regionalized Cluster-based Water Isotope Prediction). According to the physical geography regionalization of arid land in China, the study area is divided into: (I) the Junggar Basin desert area; (II) the Ili-Bayanbulak mountain area; (III) the Tarim Basin desert area; and (IV) the Turpan Basin-Hami Gobi desert area. In this paper, the values of root-mean-square error (RMSE), determination coefficient (R^2), mean bias error (MBE) and mean absolute error (MAE) were used in comparison between the observed and simulated isotopic composition in precipitation. Results show as follows: (1) On a temporal basis, the simulation of OIPC and RCWIP in the summer half year (from April to October) is obviously better than that in the winter half year (from November to March). Among the natural subregions, the best simulation is seen in the Junggar Basin desert area and the worst is in the Turpan Basin-Hami Gobi desert area. (2) By comparing the evaluation parameters of RMSE, R^2 , MBE and MAE, RCWIP is generally better than OIPC in this study area. (3) By analyzing the multi-year data of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Urumqi, the inter-annual variability of precipitation isotopes does not greatly affect the long-term representativeness, and the products are still useful especially when in-situ observations are unavailable.

Key words: precipitation; hydrogen and oxygen isotopes; Tianshan Mountains; $\delta^{18}\text{O}$; d -excess

(责任编辑: 田立德; 编辑: 周成林)