

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.016

中亚高山区云下与地表降水氢氧稳定同位素时空分布特征及其水汽来源分析

孙从建¹, 周思捷¹, 陈亚宁², 陈伟¹, 乔鹏¹

(1. 山西师范大学地理科学学院, 山西 太原 030031; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:基于中亚高山区7个站点的降水稳定同位素观测数据,利用Stewart雨滴蒸发模型及HYSPLIT模型,分析了云下与地表降水稳定同位素的时空分布特征及其与气象因子、地理环境和水汽来源之间的关系。结果表明:研究区地表与云下降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均表现出明显的季节波动,春夏富集,秋冬贫化;氘盈余则呈现相反的季节变化趋势;云下大气降水线斜率和截距均大于地表大气降水线,说明地表大气降水线受蒸发影响更显著;云下与地表降水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和高程呈显著的负相关关系,而地表氘盈余呈现反高程效应;云下与地表降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系,氘盈余与温度呈负相关关系,而降水量效应在云下与地表降水中均不显著;水汽输送轨迹显示,夏半年水汽主要源自西伯利亚大陆气团及局地再蒸发水汽,冬半年水汽主要源自西风带输送的北大西洋水汽,且在西风控制下的氘盈余值显著偏高。

关键词:氢氧稳定同位素;降水线;水汽来源;雨滴蒸发模型;后向轨迹追踪模型;中亚高山区

中图分类号:P426 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0111-11

Spatiotemporal distribution and water vapor sources of stable isotopes of hydrogen and oxygen in below-cloud and surface precipitation in alpine region in Central Asia//SUN Congjian¹, ZHOU Sijie¹, CHEN Yaning², CHEN Wei¹, QIAO Peng¹ (1. School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the observation data of stable isotopes in precipitation at seven stations in the alpine region in Central Asia, this paper uses the Stewart raindrop evaporation model and the hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of stable isotopes in below-cloud and surface precipitation, and their relationships with meteorological factors, the geographical environment, and water vapor sources. The results show that $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in below-cloud and surface precipitation in the study area show significant seasonal fluctuations: enrich in spring and summer, and deficient in autumn and winter. The deuterium excess (d-excess) shows an opposite seasonal variation trend. The slope and intercept of the below-cloud atmospheric precipitation line are larger than those of the surface precipitation line, indicating that the surface precipitation line is more significantly affected by evaporation. There is a significant negative correlation of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the below-cloud and surface precipitation with elevation, while surface d-excess shows an inverse elevation effect. $\delta^{18}\text{O}$ in the below-cloud and surface precipitation are positively correlated with temperature, and d-excess is negatively correlated with temperature, while the precipitation effect is not significant in below-cloud and surface precipitation. The water vapor transport trajectory shows that the water vapor in the summer half year mainly comes from the Siberian continental air mass and local re-evaporation water vapor, and the water vapor in the winter half year mainly comes from the North Atlantic water vapor transported by the westerly belt, and the d-excess value is significantly higher under the control of the westerlies.

Key words: stable isotopes of hydrogen and oxygen; precipitation line; water vapor source; raindrop evaporation model; backward trajectory tracking model; alpine region in Central Asia

基金项目:国家自然科学基金(41901022);新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划)(2019E01005);新疆维吾尔自治区创新环境建设专项-天山青年计划(2019Q038)

作者简介:孙从建(1986—),男,教授,博士,主要从事同位素水文学研究。E-mail:suncongjian@sina.com

大气降水作为区域水资源的原始补给,是区域水循环过程的重要输入因子和关键环节,降水中氢氧稳定同位素是大气降水的重要组成部分,能敏感地响应环境变化^[1-2],是定量研究水循环过程的重要示踪剂^[3-5]。

中亚地区水资源匮乏,大气降水的变化直接决定了区域水资源的时空分布特征,合理认识降水稳定同位素对研究水资源的时空分布、优化配置水资源、保护生态都具有十分重要的意义。大气降水由于在形成、凝结和降落过程中会受到不同程度的分馏过程影响,使得降水稳定同位素组成表现出时空差异性^[6],而云下与地表降水稳定同位素由于区域气候环境的影响也具有显著差异,挖掘降水中蕴含的氢氧稳定同位素信息,探讨云下与地表降水中的氢氧稳定同位素的差异,可以更好地揭示在不同水汽来源地与输送路径影响下的中亚高山区氢氧稳定同位素的时空变化特征。

降水稳定同位素由于温度效应、降水量效应、高程效应、水汽来源及降水二次蒸发等因素的影响,往往表现出显著的时空差异,因此被广泛用于水汽来源的示踪与古环境的反演^[7]。相较于地表降水,云下降水更能反映降水水汽来源的信息。近年来,地理工作者对降水稳定同位素的研究多基于不同区域地表降水的长期观测,而云下降水的研究相对较少,地表和云下降水的对比研究也相对匮乏。车存伟等^[8]探讨了黄河流域的云下二次蒸发与各气象要素间的关系。在地表观测方面,靳晓刚等^[9]通过计算发现黄河流域全年都存在二次蒸发现象,在夏季风盛行期间最为明显,其中温度对二次蒸发影响最大,海拔对其影响最小;曾帝等^[10]在分析西北干旱区降水稳定同位素时发现,温度是其主要控制因素,部分区域夏季存在降水量效应,水汽来源主要是西风输送,但也会受到季风和极地气团的影响;李广等^[11]在云南腾冲地区研究发现,在季风环流影响下,腾冲地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化不一定遵循降水量效应。而在高空水汽研究方面,任行阔等^[12]通过对青藏高原西北部慕士塔格地区大气水汽稳定同位素的研究发现,湿度和温度对大气水汽中的 $\delta^{18}\text{O}$ 影响显著,且湿度的影响更显著。上述的研究丰富了区域降水稳定同位素的认知,但针对气候环境恶劣、人烟稀少的亚洲高山地区的相关研究较为匮乏。中亚高山区深居内陆,气候干旱,降水自云下降落到地表的过程中受局地环境(气象因素、地理位置、二次蒸发、水汽来源)影响显著,降水中的过量氙很大程度上受到云下不饱和空气蒸发的影响,且地表

降水稳定同位素并不能完全反映该区域降水的原始水汽来源信息^[13],需分析云下降水稳定同位素的时空分布特征,才能更好地认识区域水循环过程。而中亚高山区由于野外采集条件恶劣,区域降水稳定同位素的观测以及相关研究较为匮乏,该区域作为“亚洲水塔”^[14],是周边地区重要的原始水源补给,研究其降水来源对认识我国的水循环过程和科学合理利用水资源具有重要意义^[15]。

本文在变化环境下基于中亚高山地区4个区域(中天山、西天山、喀喇昆仑山、西喜马拉雅山)7个降水站点(Kargil站、西合休站、沙曼站、江卡站、沙里桂兰克站、巴音布鲁克站、黄水沟站)的降水稳定同位素观测数据,利用Stewart雨滴蒸发模型计算云下降水氢氧稳定同位素,借助HYSPLIT(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory)模型分析区域的水汽来源,揭示中亚高山地区的云下及地表降水稳定同位素时空分布特征及其与环境要素和水汽来源的关系。

1 研究区概况与研究数据

中亚高山区位于亚欧大陆中南部,地处 $26^{\circ}40'\text{N} \sim 45^{\circ}20'\text{N}$ 、 $67^{\circ}20'\text{E} \sim 88^{\circ}20'\text{E}$ 之间,北有天山,南有喀喇昆仑山和喜马拉雅山,是亚洲中部山系最发育地区之一,地势东高西低,地形以山地与高原为主,山脉与盆地相间分布^[16]。研究区太阳辐射强,温度高,蒸发旺盛,降水稀少,极其干燥,全年冬冷夏热,气温年较差与日较差大,属温带大陆性气候,区域内的河流多为内陆河,东南缘青藏高原阻隔印度洋、太平洋的暖湿气流,海洋气流势力大大削弱,雨水稀少。

根据区域环境特征将研究区分为中天山、西天山、喀喇昆仑山和西喜马拉雅山4大区域(图1),并选取西喜马拉雅山的Kargil站,喀喇昆仑山的西合休站、沙曼站、江卡站,西天山的沙里桂兰克站以及中天山的巴音布鲁克站与黄水沟站7个站为代表性样点^[17]。其中西合休站、沙曼站、江卡站、沙里桂兰克站、巴音布鲁克站及黄水沟站分别在当地水文站开展地表降水的观测,具体信息见表1。

地表降水的样品以次降水事件为单位开展,以不锈钢分体式雨量计收集,待降雨结束,将雨量筒中的雨水存入10 mL的冻存管中,备份一个,并编号记录降雨的起止时间、实时降水量、温度、相对湿度等气象要素^[18-20],野外由于条件限制可将采集的样品放入便携冰箱中,避免水样产生分馏,带回实验室迅速使用Parafilm封口膜密封并低温冷藏保存。实测样品的室内分析主要在中国科学院荒漠与绿洲生态

表 1 主要站点的相关信息

Table 1 Information of main sampling sites

区域	站点	位置	高程/m	样本数/个	温度/℃	降水量/mm	相对湿度/%	研究时段
西喜马拉雅山	Kargil	(76. 13°E, 34. 55°N)	3 000	36	0. 1	112. 9	41. 2	2015 年
	西合休	(76. 68°E, 36. 98°N)	2 960	27	9. 0	73. 5	49. 2	2013—2014 年
喀喇昆仑山	沙曼	(75. 70°E, 38. 94°N)	2 004	19	4. 6	65. 9	40. 5	2013 年
	江卡	(77. 25°E, 37. 73°N)	1 503	43	10. 7	42. 0	47. 1	2013—2014 年
西天山	沙里桂兰克	(78. 54°E, 40. 94°N)	1 960	59	7. 12	310. 6	51. 4	2013—2014 年
中天山	巴音布鲁克	(86. 13°E, 43. 01°N)	2 500	26	-4. 2	285. 9	45. 8	2013—2014 年
	黄水沟	(86. 34°E, 42. 45°N)	1 480	27	1. 8	280. 7	37. 2	2013—2014 年

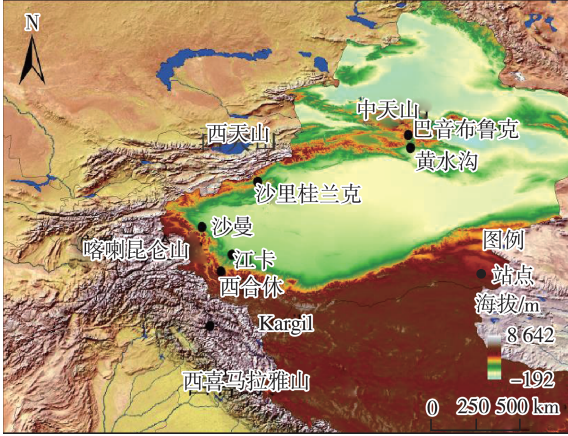


图 1 研究区与采样点分布

Fig. 1 Study area and sampling stations

国家重点实验室进行,利用 Los Gatos Research 公司生产的 LWIA-V2 (DLT-100) 液态氢氧同位素分析仪对样品进行测定, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量误差均不超过 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ ^[19],测量所得结果采用维也纳平均海洋水 (V-SMOW) 的千分差表示:

$$\delta_{\text{sample}} = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中 R_{sample} 、 R_{standard} 分别为降水样品和 V-SMOW 中重同位素与轻同位素绝对丰度之比,即同位素比率。

2 研究方法

2.1 云下降水的估算

云下降水的氢氧稳定同位素 $\delta^2\text{H}_c$ ($\delta^{18}\text{O}_c$) 可由地表的降水稳定同位素 $\delta^2\text{H}_g$ ($\delta^{18}\text{O}_g$) 减去地表与云下降水稳定同位素差值 $\Delta\delta^2\text{H}$ ($\Delta\delta^{18}\text{O}$) 得到,其中地表与云下降水的稳定同位素差值用 Stewart 雨滴蒸发模型估算, $\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ ^[21-25] 的计算公式如下:

$$\Delta\delta^2\text{H} = \left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) (f^{2\beta} - 1) \quad (2)$$

$$\Delta\delta^{18}\text{O} = \left(1 - \frac{18}{\alpha}\right) (f^{18\beta} - 1) \quad (3)$$

式中: $^2\alpha$ 、 $^{18}\alpha$ 分别为氢和氧同位素的平衡分馏参数^[25-26]; f 为雨滴剩余比,即雨滴降落过程中经历云下二次蒸发后,剩余的质量占雨滴降落时质量的百分比^[13]。参数 $^2\gamma$ 、 $^{18}\gamma$ 、 $^2\beta$ 和 $^{18}\beta$ 的计算公式^[21]如下:

$$^2\gamma = \frac{^2\alpha H_R}{1 - ^2\alpha (^2D/^2D')^n (1 - H_R)} \quad (4)$$

$$^{18}\gamma = \frac{^{18}\alpha H_R}{1 - ^{18}\alpha (^{18}D/^18D')^n (1 - H_R)} \quad (5)$$

$$^2\beta = \frac{1 - ^2\alpha (^2D/^2D')^n (1 - H_R)}{^2\alpha (^2D/^2D')^n (1 - H_R)} \quad (6)$$

$$^{18}\beta = \frac{1 - ^{18}\alpha (^{18}D/^18D')^n (1 - H_R)}{^{18}\alpha (^{18}D/^18D')^n (1 - H_R)} \quad (7)$$

式中: H_R 为相对湿度; D 、 D' 分别为 $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ 和 $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ 在空气中的扩散常数,根据 Stewart^[21] 的研究可知, $^2D/^2D'$ 和 $^{18}D/^18D'$ 分别为 1.024 和 1.0289; n 为 0.58^[25]。在本研究中,参数 f 可以通过下式计算得到:

$$f = \frac{P_g}{P_g + P_e} \quad (8)$$

式中: P_g 为地面降水量, mm; P_e 为蒸发掉的降水量, mm,其公式为

$$P_e = et \quad (9)$$

式中: e 为雨滴蒸发速率 (单位时间蒸发的水的质量); t 为云底下降到地面的时间,可用下式计算:

$$t = \frac{H_{c-g}}{V_{\text{drop}}} \quad (10)$$

式中: H_{c-g} 为云底到地面的高度, m; V_{drop} 为降水雨滴的降落速度, m/s,根据孔彦龙^[22] 的研究,干旱高山区降水的 V_{drop} 可由下式计算^[22,26]:

$$V_{\text{drop}} = 9.58e^{0.0354H_{c-g}} [1 - 1.147e^{-(R/1.77)}] \quad (11)$$

式中 R 为雨滴直径, mm。

式(9)中蒸发速率 e 由两部分组成,即 $e = A_1(T, R)A_2(T, H_R)$, 其中 A_1 是环境温度 T 和雨滴直径 R 的函数, cm; A_2 是环境温度 T 和相对湿度 H_R 的

函数, $g/(cm \cdot s)$ 。根据周苏娥等^[24-25]的研究, A_1 和 A_2 的值因具体情况而异。本文采用双线性插值方法获取每个采样事件在特定气象条件下的 A_1 和 A_2 , 计算公式为

$$A_1 = (-0.2445T + 131.28)(0.2r) \times 1.6139 \quad (12)$$

$$A_2 = (-0.73H_R + 0.7264)e^{(-0.002H_R + 0.0371)T} \quad (13)$$

计算结果中雨滴蒸发速率的最终单位为 g/s , 根据孔彦龙^[22]研究的经验公式(干旱区 1 mm 降水质量约为 1000 g)换算成单位 mm/s 代入式(8)中求解雨滴剩余比 f 。

2.2 HYSPLIT 模型

HYSPLIT 模型是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于分析大气污染物输送及扩散轨迹的模型。该模型可以实现对到达研究终点之前的轨迹路径的模拟^[27-29], 近年来被广泛应用于降水水汽来源及水汽输送路径的研究。结合美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)提供的全球再分析资料对研究时段内发生的降水的气团后向轨迹进行模拟和聚类分析, 其中 HYSPLIT 模型的空间精度为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 模型运行的时间步长为 6 h , 由于亚洲高山海拔都在 2000 m 以上, 运行高度选择 3000 m (700 hPa), 追踪时长为 120 h , 模型输出的结果为降水前 5 d 内水汽的输送路径以及沿途的空气比湿变化^[30]。

3 结果与分析

3.1 地表降水的稳定同位素时空变化特征

研究区地表降水稳定同位素季节变化明显, 呈现夏半年富集、冬半年贫化的特点(图 2 和图 3)。7 个站点中除 Kargil 站外, 其余站点地表降水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势较为相似, 大致呈现 1—7 月波动上升、8—12 月波动下降的趋势。研究区地表降水 $\delta^2\text{H}$ 值介于 -182.66‰ ~ -10.60‰ 之间, 均值为 -88.47‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -25.93‰ ~ 6.25‰ 之间, 均值为 -11.91‰ ; 可以发现研究区 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均值(分别为 -50‰ 和 -8‰)相差较大, 远远低于全国平均值。中亚高山地区主要受控于西风水汽的输送^[32], 西风带输送的水汽经过长距离的输送导致水汽中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 等重同位素沿途不断地随降水消耗, 到达研究区的地表降水 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值更加偏负, 这可能是该区域降水稳定同位素低于全国的主要原因。

对比 4 个区域, 西天山的地表降水稳定同位素变化范围较大, 1—8 月呈上升趋势, 9—11 月呈下降趋势, 最大值和最小值分别出现在 8 月和 11 月。在中天山地区, 黄水沟站的地表降水稳定同位素变化范围较小, 4—6 月呈上升趋势, 7—12 月呈下降趋势, 最大值和最小值分别出现在 7 月和 12 月。Kargil 站的地表降水的稳定同位素与其余站点不同, 在 8 月呈现最小值, 这可能与水汽来源有关, 该站点处于西喜马拉雅山山谷, 水汽受印度洋影响较严重。

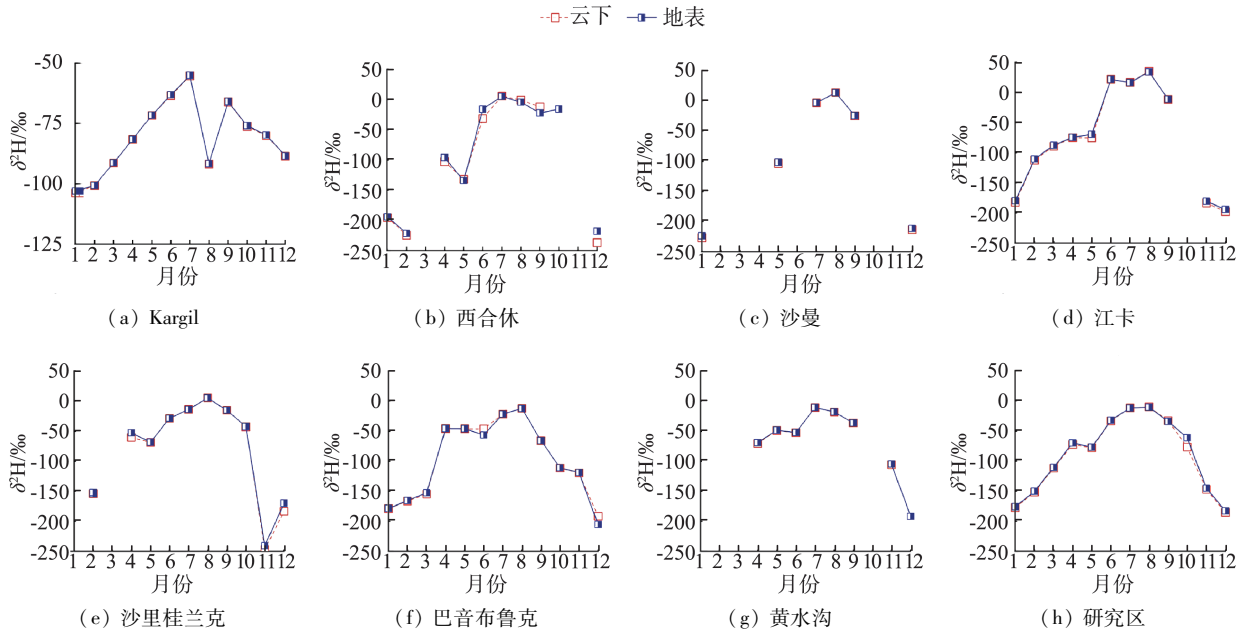


图 2 云下和地表降水 $\delta^2\text{H}$ 随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of $\delta^2\text{H}$ in below-cloud and surface precipitation

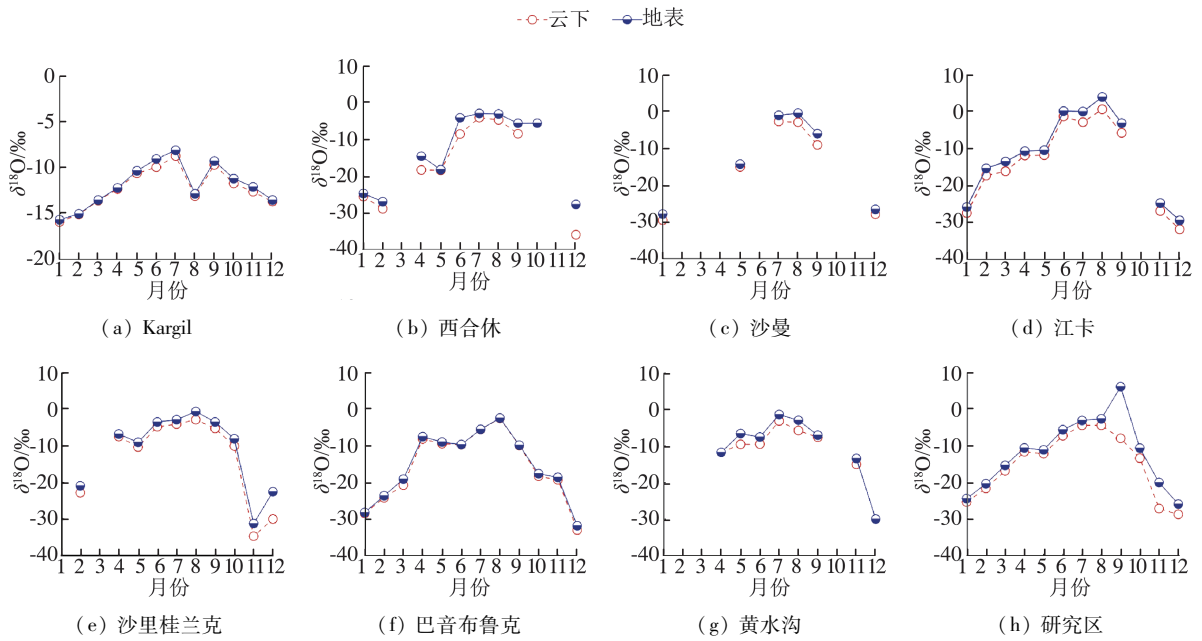


图3 云下和地表降水 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化

Fig.3 Temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in below-cloud and surface precipitation

氘盈余(d-excess)是普遍被用来示踪水汽来源的重要综合环境因素指标^[33-35]。研究区地表降水d-excess值(图4)整体上呈现夏低冬高的趋势,变化范围为9.63‰~24.75‰,均值为14.84‰,最大值和最小值分别出现在12月和8月。该区域地表降水中年均d-excess值高于10‰,表明该地区降水受到较为强烈的蒸发影响,云下二次蒸发会导致d-excess值发生显著变化。

空间分布上,中亚高山区地表降水中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 整体上呈现自南向北的减少趋势,以年均值为

例,巴音布鲁克站 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低,分别为-98.26‰和-15.19‰;黄水沟站 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高,分别为-66.38‰和-10.09‰,年均值的变化趋势表明该区域高山地表降水稳定同位素具有较为明显的纬度效应。对比不同季节发现,夏季该区域空间差异较为显著,其中江卡站降水稳定同位素呈现显著的富集效应,而地处河谷区的Kargil站最低。这表明,特殊的地形环境以及局地气候对于中亚高山区地表降水的稳定同位素影响极其显著。

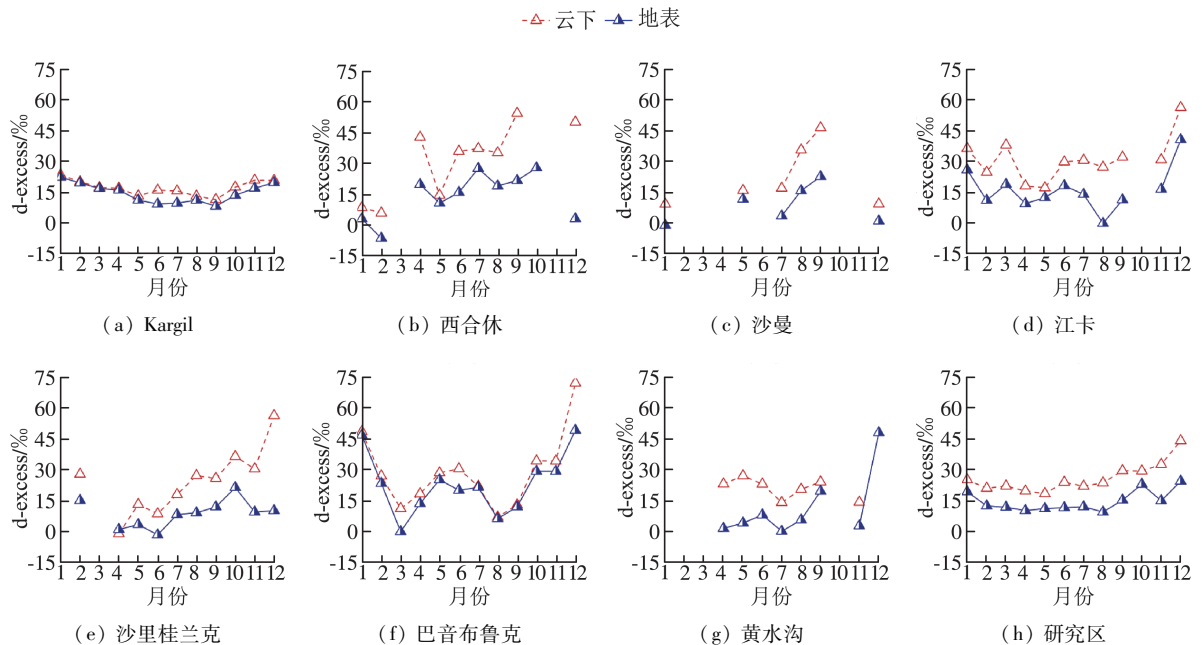


图4 云下和地表降水 d-excess 随时间的变化

Fig.4 Temporal variation of d-excess values of below-cloud and surface precipitation

3.2 云下降水的稳定同位素时空变化特征

降水是水循环过程的一个重要环节,雨滴从云下降落到地面的过程中,受到不饱和大气压的影响发生非平衡分馏,进而影响同位素的比率,因此明确云下降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征对本区域水循环具有重要意义^[36]。

研究区云下降水稳定同位素季节变化趋势与地表降水稳定同位素较为相似,即1—8月上升,9—12月下降,呈现夏半年富集、冬半年贫化的特点。全区云下降水中 $\delta^2\text{H}$ 值介于 -185.20‰ ~ -9.97‰ 之间,均值为 -90.80‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -28.72‰ ~ -4.36‰ 之间,均值为 -15.03‰ ,与地表降水稳定同位素相比, $\delta^2\text{H}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均减小,说明雨滴自云下降落到地表的过程中,区域云下二次蒸发作用导致地表降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 富集。研究区内除Kargil站以外的6个站点的云下降水稳定同位素变化趋势相似,处于西喜马拉雅山的Kargil站在8月云下 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 发生骤降, $\delta^2\text{H}$ 降为 -91.81‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 降为 -13.12‰ ,与地表 $\delta^2\text{H}$ (-91.66‰)和 $\delta^{18}\text{O}$ (-12.85‰)相比,差距较小,表明该站点8月集中降水时受到了不同水汽来源的影响。

对比云下与地表降水中d-excess值(图4)发现,研究区云下降水中d-excess值在12月达到最高值为 44.54‰ ,5月达到最低值为 18.67‰ ,全年d-excess均值为 25.71‰ ;云下降水d-excess值年内整体为冬季高而夏季低,这可能与水汽来源输送具有一定关系,冬夏间d-excess值的显著变化表明该区域年内水汽来源较为复杂。与地表d-excess年均值(14.84‰)相比,云下降水中d-excess值偏高,很有可

能是因为云下水汽团相对湿度较大且雨滴自云下降落到地面的过程中发生了强烈的二次蒸发,致使到达地表的d-excess值大幅降低。

3.3 云下与地表大气降水线

大气降水线可揭示大气降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的线性关系,由于不同地区降水的气象条件、地形因素、季节变化和水汽来源的不同,大气降水中的同位素分馏会存在差异,因此各地的大气降水线都具有不同的斜率和截距,大气降水线的斜率代表 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分馏速率对比关系,截距代表氘对平衡状态的偏离程度^[35]。对中亚高山区及其7个站点的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行一元线性回归分析,拟合得到局地大气降水线(图5)。

根据地表降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数据,用最小二乘法得到中亚高山区的地表降水线方程为 $\delta^2\text{H} = 7.46\delta^{18}\text{O} + 7.45$ 。该方程与Craig^[36]提出的全球大气降水线方程(以下简称GMWL) $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 及中国大气降水线方程 $\delta^2\text{H} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$ ^[31]相比,其斜率和截距都偏低,造成这种差异的原因可能是该地区深居内陆,远离海洋,气候干燥,降水过程受到蒸发作用,引起同位素不平衡分馏^[37]。研究区云下降水线方程为 $\delta^2\text{H} = 7.56\delta^{18}\text{O} + 25.01$,与地表降水线相比斜率和截距都偏高,反映出雨滴降落过程中云下氢氧稳定同位素的不平衡分馏效应较弱且大气湿度高于地表氢氧稳定同位素。

对比发现各区域大气降水线呈现显著空间差异(图5)。西喜马拉雅山的Kargil站以及中天山的巴音布鲁克站、黄水沟站的云下和地表大气降水线截距都显著低于8,表明这些区域的云下和地表的降水

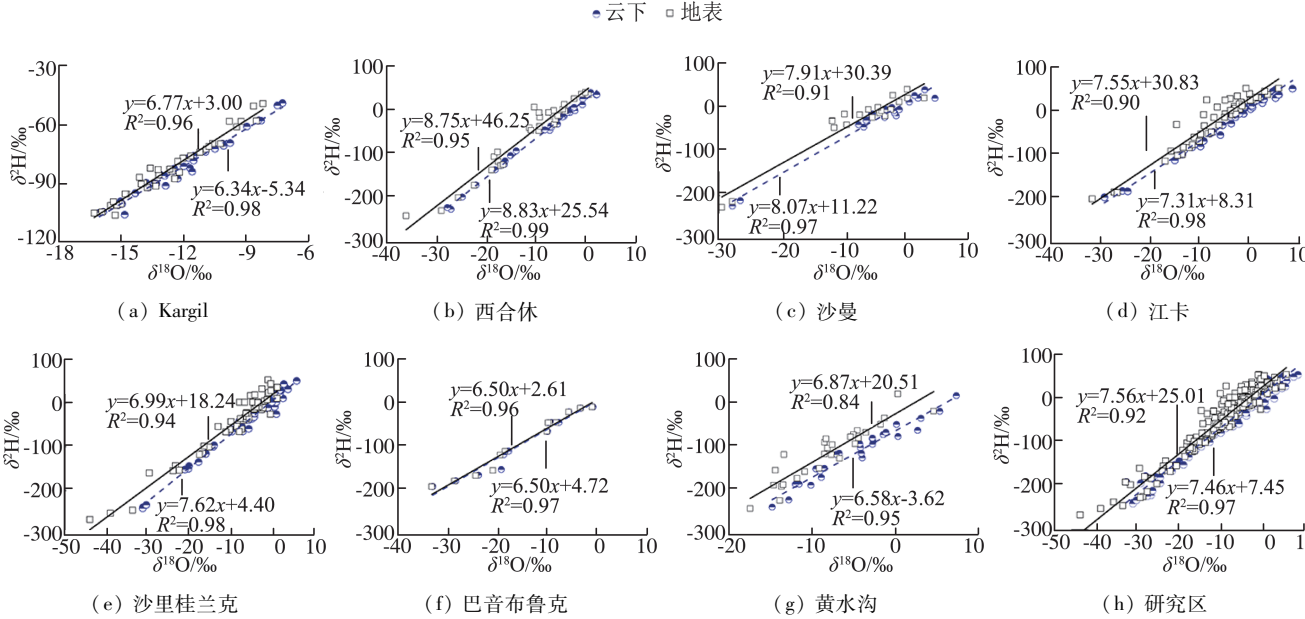


图5 地表与云下降水的大气降水线

Fig. 5 Local meteoric water lines of below-cloud and surface precipitation

稳定同位素普遍受到蒸发的影响,降水线体现显著的干旱影响特征,而西天山的沙里桂兰克站云下和地表大气降水线斜率差异显著,表明这一区域云下降水降落过程中蒸发对雨滴影响显著。位于喀喇昆仑山的西合休站和沙曼站的地表降水线的斜率和截距均高于 GMWL,这两个站点位于海拔较高的山谷,局地蒸发的水汽(稳定同位素较贫化)对区域降水影响较大,使得该区域的大气降水线方程的斜率和截距都偏高。喀喇昆仑山 3 个站点的云下降水线的截距均大幅高于 GMWL,该区域降水时云下氢氧稳定同位素分馏偏离平衡,d-excess 值显著增加,导致云下降水线截距较高。

4 讨论

4.1 气象因素与氢氧稳定同位素的相互关系

气象因素、地理位置、水汽来源被证明对区域降水稳定同位素具有显著的影响,其中气象因素由于直接影响稳定同位素的分馏过程,是降水稳定同位素变化最重要的影响因子。众多研究者基于气象因素与区域降水稳定同位素变化间的关系开展了相关研究,如:张百娟等^[32]研究祁连山降水稳定同位素时发现其温度效应显著,即温度每升高 1℃,δ¹⁸O 增加 0.64‰;周海等^[38]基于河西走廊降水稳定同位素的研究发现该区域降水 δ¹⁸O 变化具有显著的季节变化特征,与温度呈正相关关系。本文基于中亚高山区地表降水稳定同位素的观测资料发现,该区大气降水中的氢氧稳定同位素与温度亦存在较为明显的正相关关系,即气温越低,降水氢氧稳定同位素的分馏越大,大气降水的 δ¹⁸O 值越低。如表 2 所示,中亚高山区中除沙曼站和黄水沟站外,气温均与 δ¹⁸O 呈正相关,且 R² > 0.5,说明具有显著的温度效应,其中喀喇昆仑山区的西合休站斜率最大,西喜马拉雅山的 Kargil 站斜率最小,说明西合休站降水 δ¹⁸O 与温度波动的关系最为显著,而 Kargil 站的温度效应不明显,表明这一地区受大陆气团的控制

较弱。降水量的变化对区域大气降水稳定同位素的变化具有一定影响^[39],通过对比 7 个站点降水 δ¹⁸O 与降水量的关系发现研究区所有站点降水 δ¹⁸O 与降水量的关系并不明显,Kargil 站、西合休站、沙曼站、江卡站、黄水沟站的降水 δ¹⁸O 与降水量呈现低的负相关关系,沙里桂兰克站、巴音布鲁克站的降水 δ¹⁸O 与降水量呈现低的正相关关系,这主要是因为中亚高山区深居内陆,距海遥远,海拔较高,大陆性气候显著,气候干旱,受季风影响较小,降水量效应表现不明显。

4.2 位置因素与氢氧稳定同位素的相互关系

如图 6 所示,中亚高山区地表降水 δ²H 和 δ¹⁸O 与高程呈现出较显著的线性关系,δ²H 和 δ¹⁸O 随海拔的增加逐渐降低,且 R² > 0.5,地表 δ²H 与高程 E

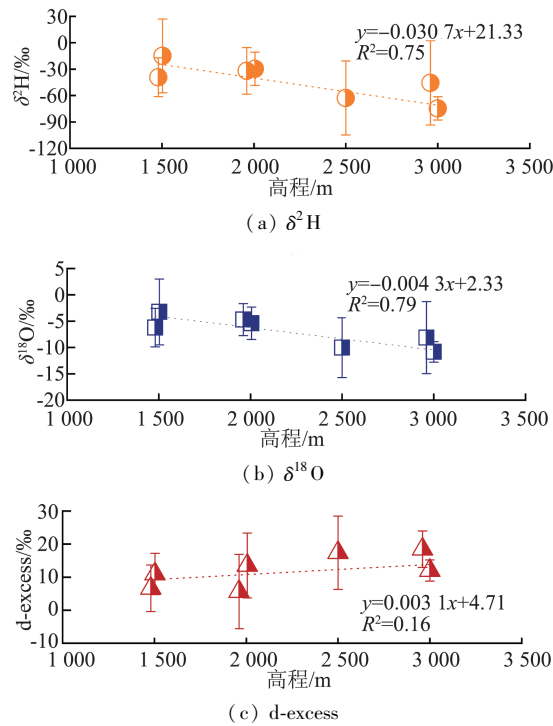


图 6 地表和云下 δ²H、δ¹⁸O 和 d-excess 的高程效应
Fig. 6 Relationship of altitude with δ²H, δ¹⁸O, and d-excess of surface and below-cloud precipitation

表 2 地表降水 δ¹⁸O、d-excess 值与气象控制因子的关系

Table 2 Relationships of δ¹⁸O and d-excess values of surface precipitation with meteorological controlling factors

站点	δ ¹⁸ O-T		δ ¹⁸ O-P		δ ¹⁸ O-H _R		d-T	
	S/(‰·℃ ⁻¹)	R ²	S/(‰·mm ⁻¹)	R ²	S/(‰·% ⁻¹)	R ²	S/(‰·℃ ⁻¹)	R ²
Kargil	0.18	0.62 *	-0.04	0.11	0.01	0.01	-0.39	0.83 **
西合休	1.23	0.70 **	-1.81	0.10	-0.11	0.12	0.75	0.29
沙曼	0.37	0.26	-0.35	0.02	0.14	0.40	-1.17	0.23
江卡	0.78	0.56 *	-0.56	0.29	-0.11	0.12	-0.61	0.11
沙里桂兰克	0.64	0.63 *	0.48	0.05	-0.18	0.02	-0.42	0.20
巴音布鲁克	0.64	0.92 **	0.22	0.36	0.81	0.56 *	-0.84	0.41 *
黄水沟	0.73	0.44 *	-0.09	0.01	0.11	0.01	-0.72	0.10

注:S为斜率;d为 d-excess 值;**表示通过 1% 的显著性水平检验;*表示通过 5% 的显著性水平检验。

的关系式为: $\delta^2\text{H} = -0.0307E + 21.33$,海拔每上升100 m,地表同位素 $\delta^2\text{H}$ 值减小3.07‰。在水汽输送过程中,随着海拔的增加,降水中的重稳定同位素逐渐发生贫化,降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值减少。地表的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 具有显著的高程效应,其中海拔每升高100 m,地表降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值减少0.31‰,高于刘忠方等^[40]计算的全国降水高程效应斜率(-0.16‰),表明中亚高山区地表降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值受高程影响更大,高程效应更显著。中亚高山区地表大气降水同位素d-excess值与高程间的相互关系并不显著,d-excess值的变化可能与当地水汽来源间的关系更为显著。

4.3 水汽来源与氢氧稳定同位素的相互关系

水汽是降水的重要物质组成,对区域降水稳定同位素的影响十分显著,分析研究水汽分布及其输

送有利于进一步认识中亚高山区降水稳定同位素的时空分布特征。基于 HYSPLIT 模型对研究区上空3 000 m的水汽输送路径进行为期12月的模拟追踪(图7),模拟的结果是降水发生前120 h的水汽输送路径及水汽输送比例,括号外和括号内的数值分别代表水汽轨迹聚类后的路径数和路径占比。将中亚高山区分为中天山地区(以巴音布鲁克站为代表)、西天山地区(以沙里桂兰克站为代表)、喀喇昆仑山地区(以西合休站为代表)以及西喜马拉雅山地区(以Kargil站为代表)4个地区从夏半年(4—10月)和冬半年(11月—次年3月)分别展开讨论。结果表明,夏半年西天山、中天山、喀喇昆仑山及西喜马拉雅山的水汽降水主要源自西风控制下中高纬度西伯利亚大陆气团,8—9月存在少有的西南方向的印

—中天山—西天山—喀喇昆仑山—西喜马拉雅山

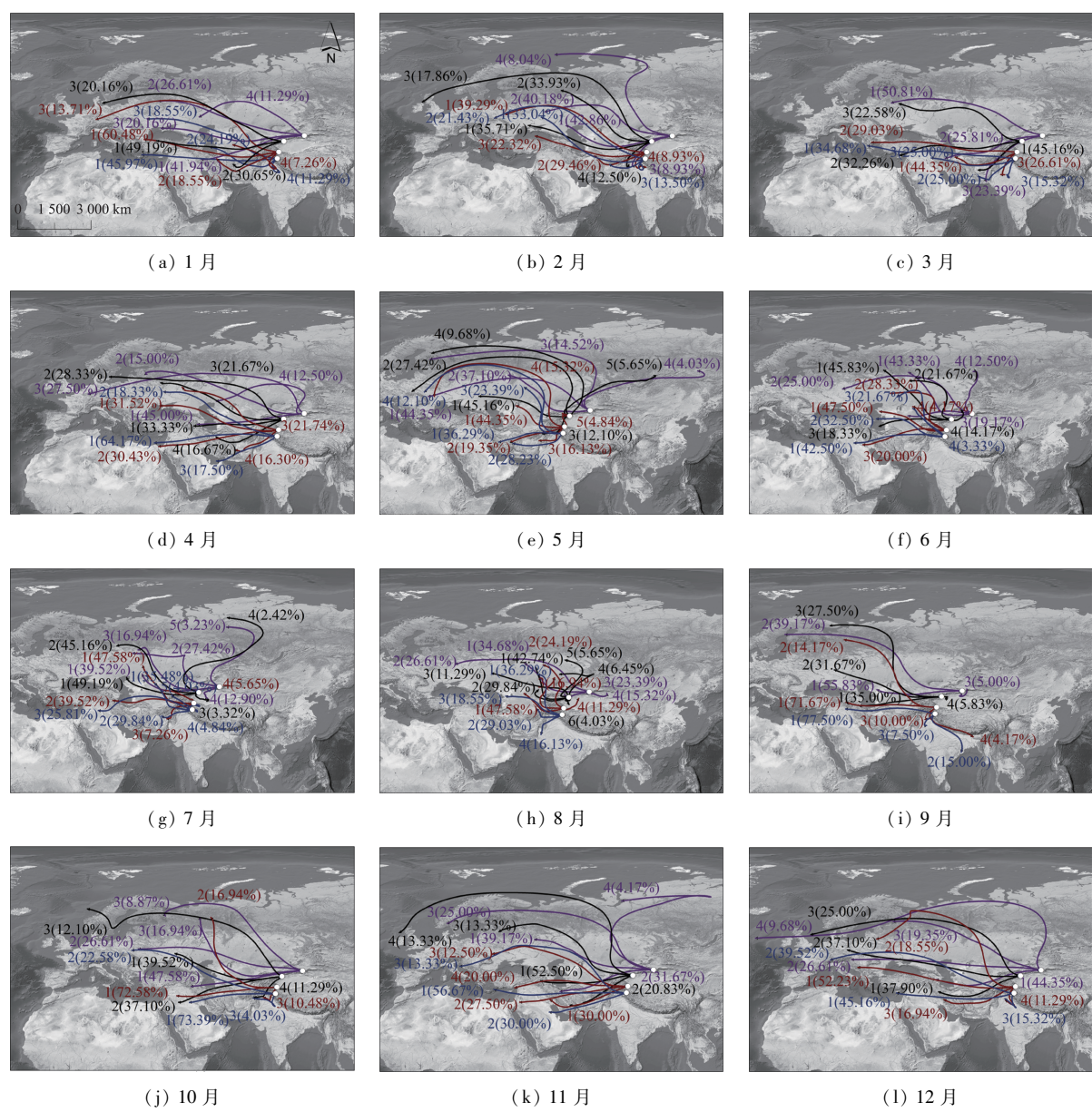


图7 气团后向轨迹聚类

Fig.7 Backward trajectory clustering of air mass

度洋水汽。而冬半年西天山、中天山、喀喇昆仑山及西喜马拉雅山的水汽来源相似,水汽主要源自西风带输送下的北大西洋水汽以及局地再循环水汽,同时,在西喜马拉雅山发现有源自西南方向的印度洋水汽输送。

1—4月研究区从西南部的西喜马拉雅山到中天山主要受单一气团西风带的控制,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值自西喜马拉雅山向中天山逐渐降低,降水中d-excess值逐渐上升,1—4月平均值分别为25.41‰、21.29‰、22.34‰和19.90‰,d-excess值显著偏高。这一时期,该区主要受大陆气团控制,西风带输送的水汽经过远距离的输送,沿途蒸发作用不断消耗水汽,再加上气团本身内部水汽相对湿度较低,使得降水较少,降水中的d-excess值显著偏高。5月研究区除受西风影响外,中天山和西天山地区降水水汽源地还包括西伯利亚地区,水汽比例分别占当地的4.03%和5.65%;这一时期中天山地区云下降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-9.36‰、d-excess值为28.80‰,西天山降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-10.29‰、d-excess值为13.37‰。6—8月,西天山、中天山、喀喇昆仑山及西喜马拉雅山的水汽来源相似,降水的水汽输送来源主要有3条,分别是西方路径、西南路径和北方路径。西方路径中来自纬向西风输送的水汽对夏季降水贡献最大,主要经过东欧平原,翻越乌拉尔山脉,穿过哈萨克丘陵到达研究区,西方路径的水汽贡献占比最大;西南路径的水汽输送通道主要源自伊朗高原西北部的幼发拉底河和底格里斯河,经过里海、图兰低地到达研究区,西南路径的水汽贡献较大;来自北方路径的水汽输送通道自西西伯利亚平原东部的叶尼塞河且一路向南翻越哈萨克丘陵,经过巴尔喀什湖到达研究区,北方路径的水汽贡献占比最小。其中喀喇昆仑山除了西风带输送的水汽之外,局地再循环水汽的影响使其在8月降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值全年最高,达到0.93‰,说明近距离的局地再循环水汽由于水汽输送距离较短,水汽中重同位素的冲刷作用较小,导致降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高。8月中天山的水汽源地较为复杂,但其降水水汽性质大都属于近距离的局地再循环水汽,较高的温度和较低的湿度使d-excess值显著降低,且低于全国均值10‰,仅有7.14‰。9月西喜马拉雅山约77.50%的水汽输送来自西南方向,22.50%的水汽输送源自印度洋,云下降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-9.70‰,d-excess值为11.51‰,可以发现受区域强烈二次蒸发的影响降水呈现 $\delta^{18}\text{O}$ 富集、d-excess值降低的特征^[41]。10—12月研究区4个区域主要受西风控制,其中12月西天山d-excess值最低,为9.30‰,中天山d-excess值最高,达72.73‰,

d-excess值较高说明其水汽主要源自湿润的海洋气团,温度较低,大气相对湿度高,沿途饱和大气压致使其蒸发作用较弱。

5 结 论

a. 中亚高山区7个站点的地表和云下降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化明显,主要表现为夏半年富集、冬半年贫化,冬半年d-excess值普遍大于夏半年,Kargil站云下与地表降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 差异最小,黄水沟站差异最大。

b. 中亚高山区云下与地表大气降水线斜率均小于8,表明研究区气候较为干旱,其中地表大气降水线的斜率最小,其次为云下大气降水线和GMWL的斜率;地表大气降水线的截距最小,其次为GMWL和云下大气降水线的截距。

c. 中亚高山区地表和云下降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的温度效应,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量关系不明显,地表降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程具有明显的负相关关系。

d. 中亚高山区全年降水主要受西风带输送的北大西洋水汽及局地再循环水汽补充,印度洋水汽对西喜马拉雅山区降水具有一定的影响。

参考文献:

- [1] 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. (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. (in Chinese))
- [2] 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. (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 Applied Ecology, 2018, 29(5): 1479-1488. (in Chinese))
- [3] 马兴刚,贾文雄,丁丹,等. 祁连山东部大气降水 $\delta^{17}\text{O}$ 变化特征及水汽输送[J]. 干旱区地理,2019,42(3): 517-525. (MA Xinggang, JIA Wenxiong, DING Dan, et al. Variation characteristics of $\delta^{17}\text{O}$ in precipitation and moisture transports in eastern Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 517-525. (in Chinese))
- [4] 汪集旻,陈建生,陆宝宏,等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5): 406-413. (WANG Jiyang, CHEN Jiansheng, LU Baohong, et al. Review and prospect of isotope hydrology

- [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(5):406-413. (in Chinese))
- [5] 陆宝宏,孙婷婷,许宝华,等. 长江干流径流同位素同步监测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(4):378-381 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(4):378-381. (in Chinese))
- [6] 杜康,张北赢. 珠江流域降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 水文,2020,40(6):75-82. (DU Kang, ZHANG Beiyong. Stable isotope characteristics and water vapor sources of precipitation in the Pearl River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6):75-82. (in Chinese))
- [7] TIAN Lide, YAO Tangdong, MACCLUNE K, et al. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D10):D10112-1-D10112-10.
- [8] 车存伟,张明军,王圣杰,等. 黄河流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 干旱区地理,2019,42(4):790-798. (CHE Cunwei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Influence of sub-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in the Yellow River Basin [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4):790-798. (in Chinese))
- [9] 靳晓刚,张明军,王圣杰,等. 基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应[J]. 环境科学,2015,36(4):1241-1248. (JIN Xiaogang, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Effect of below-cloud secondary evaporation in precipitations over the Loess Plateau based on the stable isotopes of hydrogen and oxygen [J]. Environmental Science, 2015, 36(4):1241-1248. (in Chinese))
- [10] 曾帝,吴锦奎,李洪源,等. 西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J]. 干旱区研究,2020,37(4):857-869. (ZENG Di, WU Jinkui, LI Hongyuan, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of Northwest China: a review [J]. Arid Zone Research, 2020,37(4):857-869. (in Chinese))
- [11] 李广,章新平,张新主,等. 云南腾冲地区大气降水中氢氧稳定同位素特征[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(11):1458-1465. (LI Gang, ZHANG Xinping, ZHANG Xinzhu, et al. Stable hydrogen and oxygen isotopes characteristics of atmospheric precipitation from Tengchong, Yunnan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11):1458-1465. (in Chinese))
- [12] 任行阔,高晶,杨育龙,等. 慕士塔格地区大气水汽氢氧稳定同位素季节内变化特征及影响因素分析[J]. 冰川冻土,2021,43(2):331-341. (REN Xingkuo, GAO Jing, YANG Yulong, et al. Intra-seasonal characteristics of atmospheric water vapor stable isotopes at Muztagata and its climate controls [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):331-341. (in Chinese))
- [13] WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, CHE Yanjun, 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.
- [14] 孙从建,张子宇,陈伟,等. 亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. 干旱区研究,2019,36(1):19-28. (SUN Congjian, ZHANG Ziyu, CHEN Wei, et al. Spatial distribution of precipitation stable isotopes in the alpine zones in Central Asia [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1):19-28. (in Chinese))
- [15] 陈亚宁. 干旱区内陆河流域绿洲水资源高效利用与农业-生态用水协调管理研究与示范 [R]. 乌鲁木齐:中国科学院新疆生态与地理研究所,2019.
- [16] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展 [J]. 地理学报,2014,69(9):1295-1304. (CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9):1295-1304. (in Chinese))
- [17] SUN Congjian, CHEN Yaning, LI Jie, et al. Stable isotope variations in precipitation in the northwestern most Tibetan Plateau related to various meteorological controlling factors [J]. Atmospheric Research, 2019, 227:66-78.
- [18] 赵诗坤,庞朔光,文蓉,等. 海河流域降水稳定同位素的云底二次蒸发效应[J]. 地理科学进展,2015,34(8):1031-1038. (ZHAO Shikun, PANG Shuoguang, WEN Rong, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in the Haihe River Basin, China [J]. Progress in Geography, 2015, 34(8):1031-1038. (in Chinese))
- [19] 徐秀婷,贾文雄,朱国锋,等. 乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比[J]. 环境科学,2020,41(1):155-165. (XU Xiuting, JIA Wenxiong, ZHU Guofeng, et al. Stable isotope characteristics and vapor source of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling mountain [J]. Environmental Science, 2020, 41(1):155-165. (in Chinese))
- [20] 王轶凡,瞿思敏,李代华,等. 小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):365-371. (WANG Yifan, QU Simin, LI Daihua, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4):365-371. (in Chinese))

- [21] STEWART M K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: applications to atmospheric processes and evaporation of lakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(9):1133-1146.
- [22] 孔彦龙. 基于氡盈余的内陆干旱区水汽再循环研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
- [23] SALAMALIKIS V, ARGIRIOU A A, DOTSIKA E. Isotopic modeling of the sub-cloud evaporation effect in precipitation[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 1059-1072.
- [24] 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 等. 基于 Stewart 模型改进方案的新疆降水同位素的云下蒸发效应比较[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(2): 304-315. (ZHOU Sue, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. A comparison of sub-cloud secondary evaporation effect of precipitation isotope in Xinjiang based on the Stewart model improvement scheme[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(2): 304-315. (in Chinese))
- [25] WANG Shengjie, JIAO Rong, ZHANG Mingjun, et al. Changes in below-cloud evaporation affect precipitation isotopes during five decades of warming across China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(7): e2020JD033075.
- [26] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 738-747. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing, WEN Xiaohu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 738-747. (in Chinese))
- [27] CRISS R E. Principles of stable isotope distribution[M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [28] 王晓艳, 卢爱刚, 蒋缠文, 等. 渭南大气降水中氢氧同位素特征与水汽来源关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(8): 122-128. (WANG Xiaoyan, LU Aigang, JIANG Chanwen, et al. Characteristics of δD and $\delta^{18} O$ in precipitation and the moisture origin in Weinan[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(8): 122-128. (in Chinese))
- [29] 赵伟, 郝成元, 许传阳. 基于 HYSPLIT 的中国夏季风暖湿气流影响区域分界探讨[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(2): 106-111. (ZHAO Wei, HAO Chengyuan, XU Chuanyang. Identification of interaction region influenced by different summer monsoons of China based on HYSPLIT model[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(2): 106-111. (in Chinese))
- [30] TIAN Lide, YAO Tandong, NUMAGUTI A, et al. Relation between stable isotope in monsoon precipitation in southern Tibetan Plateau and moisture transport history[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001(44): 267-274.
- [31] 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(13): 801-806. (ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Hydrogen and oxygen stable isotopes of atmospheric precipitation in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983(13): 801-806. (in Chinese))
- [32] 张百娟, 李宗省, 王昱, 等. 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5272-5285. (ZHANG Baijuan, LI Zongxing, WANG Yu, et al. Characteristics of stable isotopes and analysis of water vapor sources of precipitation at the northern slope of the Qilian Mountains[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5272-5285. (in Chinese))
- [33] DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [34] KONG Yanlong, PANG Zhonghe, FROEHLICH K. Quantifying recycled moisture fraction in precipitation of an arid region using deuterium excess[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, 65(1): 19251.
- [35] 张明军, 马潜, 李亚举, 等. 季风边缘区降水中 $\delta^{18} O$ 变化特征及水汽来源分析: 以兰州市为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(6): 80-86. (ZHANG Mingjun, MA Qian, LI Yaju, et al. Research of isotopic characteristic in precipitation and water vapor origin at the edge of monsoon region: a case study of Lanzhou City[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2011, 47(6): 80-86. (in Chinese))
- [36] CRAIG Harmon. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [37] 陈刚, 王文凤, 马芬艳, 等. 大兴安岭外源水补给的水量平衡与同位素证据[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 75-81. (CHEN Gang, WANG Wenfeng, MA Fenyan, et al. Water balance and isotopic evidence of external water supply in Daxing'an Mountains[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 75-81. (in Chinese))
- [38] 周海, 赵文智. 河西走廊典型荒漠区土壤水分对降水脉动响应的稳定同位素分析[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1637-1645. (ZHOU Hai, ZHAO Wenzhi. Response of soil moisture to precipitation pulse by stable isotope in desert area of the Hexi corridor[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1637-1645. (in Chinese))
- [39] 章新平, 姚檀栋. 我国部分地区降水中氧同位素成分与温度和降水量之间的关系[J]. *冰川冻土*, 1994(1): 31-40. (ZHANG Xinping, YAO Tandong. Relations of oxygen isotopic composition in precipitation with temperature and precipitation amount in some regions of China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994(1): 31-40. (in Chinese))

- [16] 孔波,付少杰,黄强.大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J].水资源保护,2020,36(6):67-72. (KONG Bo, FU Shaojie, HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):67-72. (in Chinese))
- [17] 黄志鸿,董增川,周涛,等.面向生态友好的水库群调度模型[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):202-208. (in Chinese))
- [18] 高玉琴,周桐,马真臻,等.考虑天然水文情势的水库调度图优化[J].水资源保护,2020,36(4):60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):60-67. (in Chinese))
- [19] 董增川,陈牧风,倪效宽,等.考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Optimal operation decision-making method of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):233-240. (in Chinese))
- [20] 高玉琴,刘钺,赵晨程,等.南方季节性缺水河流逐月保证率设定法的改进[J].水资源保护,2021,37(2):95-101. (GAO Yuqin, LIU Yue, ZHAO Chencheng, et al. Improvement on monthly guarantee rate setting method for seasonal water shortage rivers in South China[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 95-101. (in Chinese))
- [21] 黄显峰,吴志远,李昌平,等.基于改进粒子群逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J].水利水电科技进展,2021,41(2):1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2):1-7. (in Chinese))
- [22] 邓铭江,黄强,畅建霞,等.广义生态水利的内涵及其过程与维度[J].水科学进展,2020,31(5):775-792. (DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Connotation, process and dimensionality of generalized ecological water conservancy[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):775-792. (in Chinese))
- [23] 邵芳霞.乌伦古河流域水资源保护和治理措施研究[J].水电与新能源,2019,33(11):48-50. (SHAO Fangxia. On the water resources protection and treatment measures of Ulungur River Basin[J]. Hydropower and New Energy, 2019,33(11):48-50. (in Chinese))
- [24] 努尔兰·哈再孜.乌伦古河流域水文特征[J].干旱区研究,2014,31(5):798-802. (NURERLAN Hazazi. Hydrological characteristics in the Ulungur River Basin[J]. Arid Area Research, 2014, 31 (5): 798-802. (in Chinese))
- [25] 孟古别克·俄布拉依汗,贾尔恒·阿哈提,程艳,等.乌伦古河断流的生态影响及成因分析[J].新疆环境保护,2016,38(2):5-11. (MENG GUBEK Obrahan, JIAERHENG Ahati, CHENG Yan, et al. Influence of the Ulungur River blanking on the ecology and cause analysis[J]. Environmental Protection in Xinjiang,2016,38(2):5-11. (in Chinese))
- [26] 黄强,晏毅,范荣生,等.黄河干流水库联合调度模拟优化模型及人机对话算法[J].水利学报,1997(4):57-62. (HUANG Qiang, YAN Yi, FAN Rongsheng, et al. Simulation optimal model for joint operation of reservoirs on Yellow River main stream and the algorithm of man-machine interaction[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1997(4):57-62. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-13 编辑:俞云利)

(上接第121页)

- [40] 刘忠方,田立德,姚檀栋,等.中国大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布[J].科学通报,2009,54(6):804-811. (LIU Zhongfang, TIAN Lide, YAO Tandong, et al. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54 (6): 804-811. (in Chinese))
- [41] 王帅,饶文波,金可,等.阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):411-419. (WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5):411-419. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-28 编辑:俞云利)