



i
c water

国际水文科学协会中国委员会同位素分委员会第一次会议
暨第一届中国同位素水文学论坛



新疆降水与水汽氢氧稳定同位素监测研究

王圣杰, 张明军

西北师范大学 地理与环境科学学院

2020年11月4日·北京

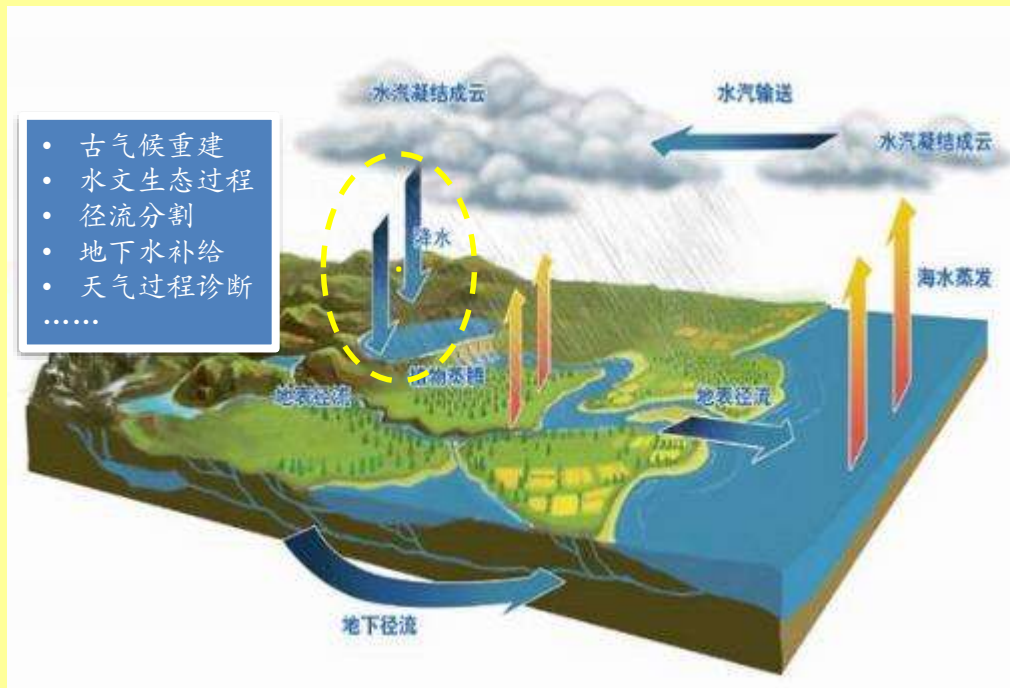


报告提纲

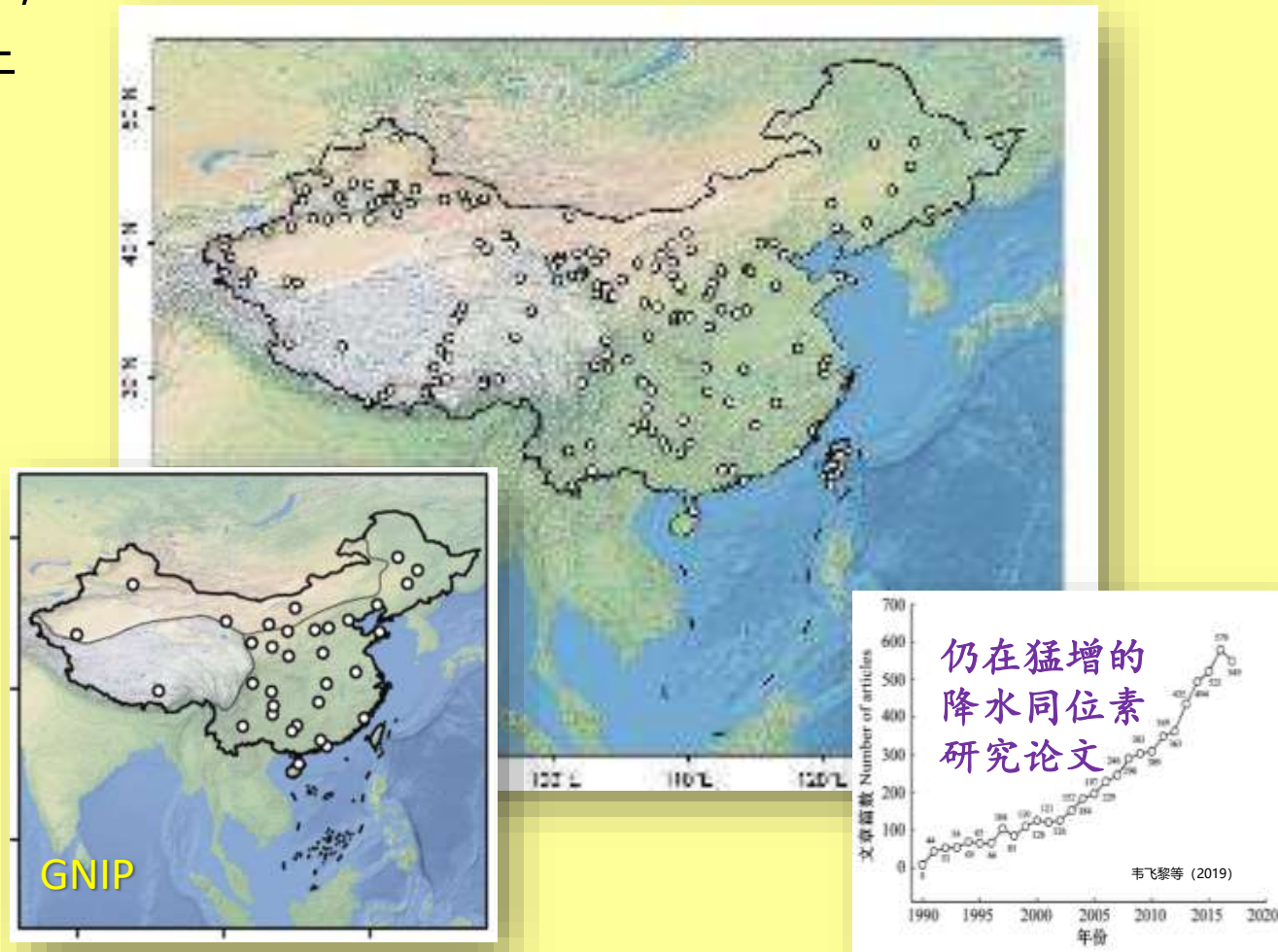
1. 研究背景
2. 新疆降水同位素的影响机制
3. 新疆水汽同位素与降水同位素的联系
4. 展望

1 研究背景

- 作为西风主导下的亚洲中部干旱区核心地带，新疆现代大气降水同位素监测有助于认识干旱区的水文循环过程和古气候记录。



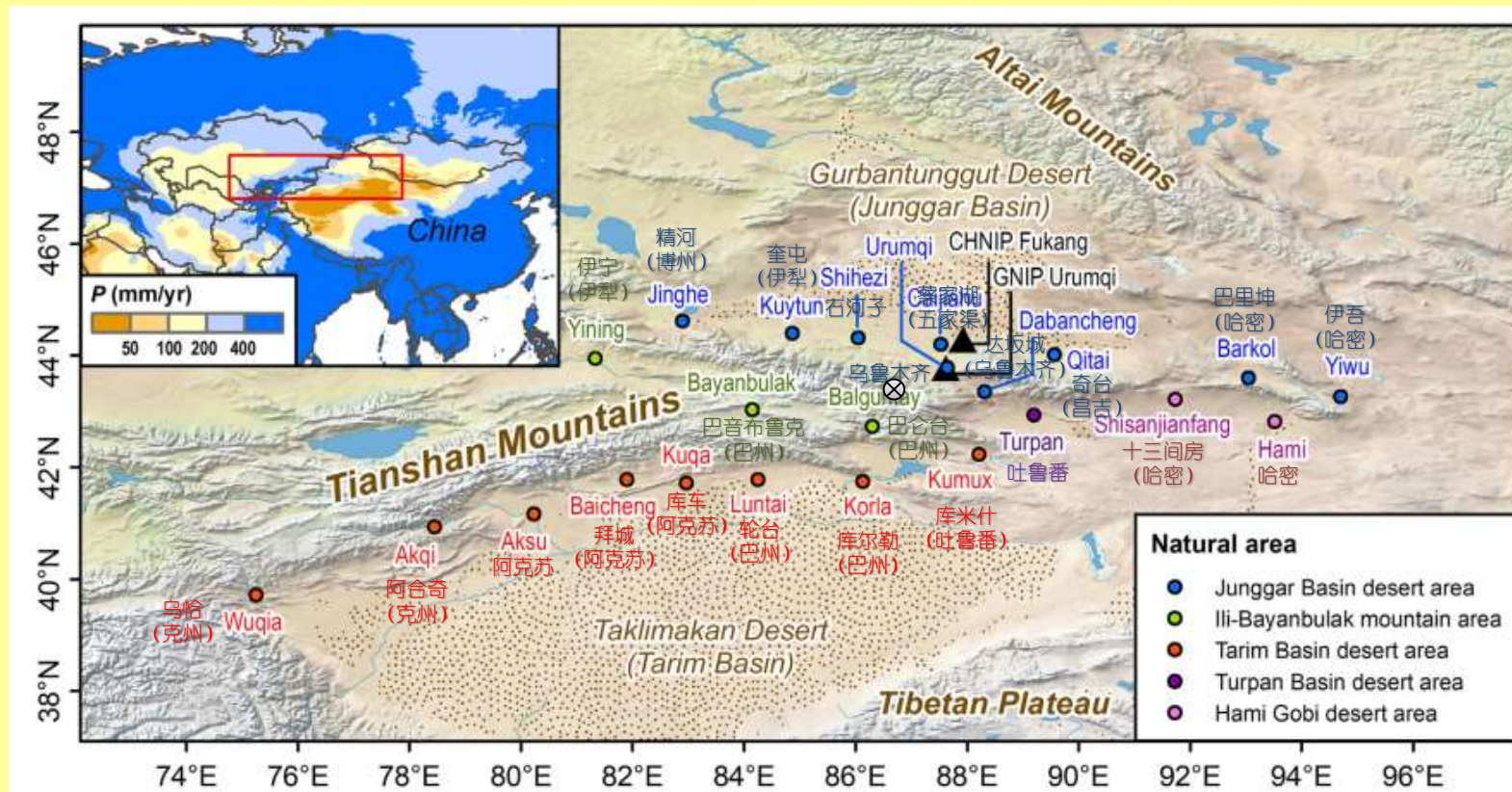
降水氢氧稳定同位素是同位素水文应用的重要基础



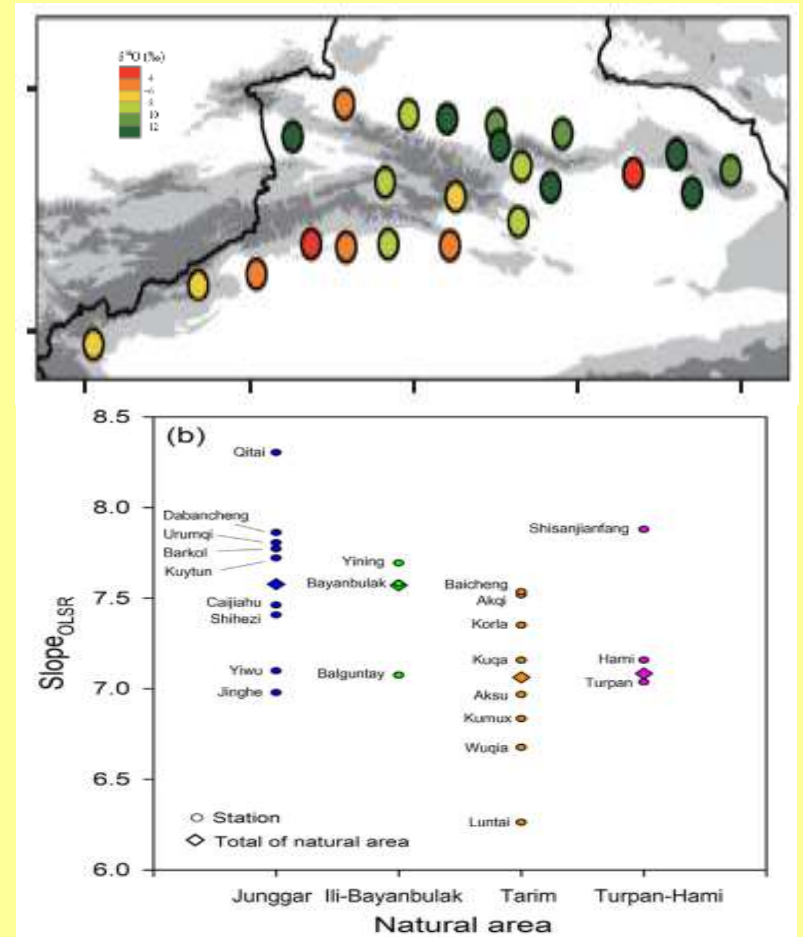
如火如荼的中国降水同位素监测

- 除了温度效应，西风区的现代降水同位素还有哪些值得挖掘的环境信息？
- 水汽来源因素——同位素可以提供西风水汽来源和传输路径的更多细节吗？
- 水汽再循环因素——如何通过同位素认识复杂下垫面的蒸散发巨大差异？
- 云下二次蒸发因素——强烈的云下蒸发在多大程度上改造了同位素信号？
- 干旱半干旱气候下，降水同位素与水汽同位素存在怎样的定量联系？

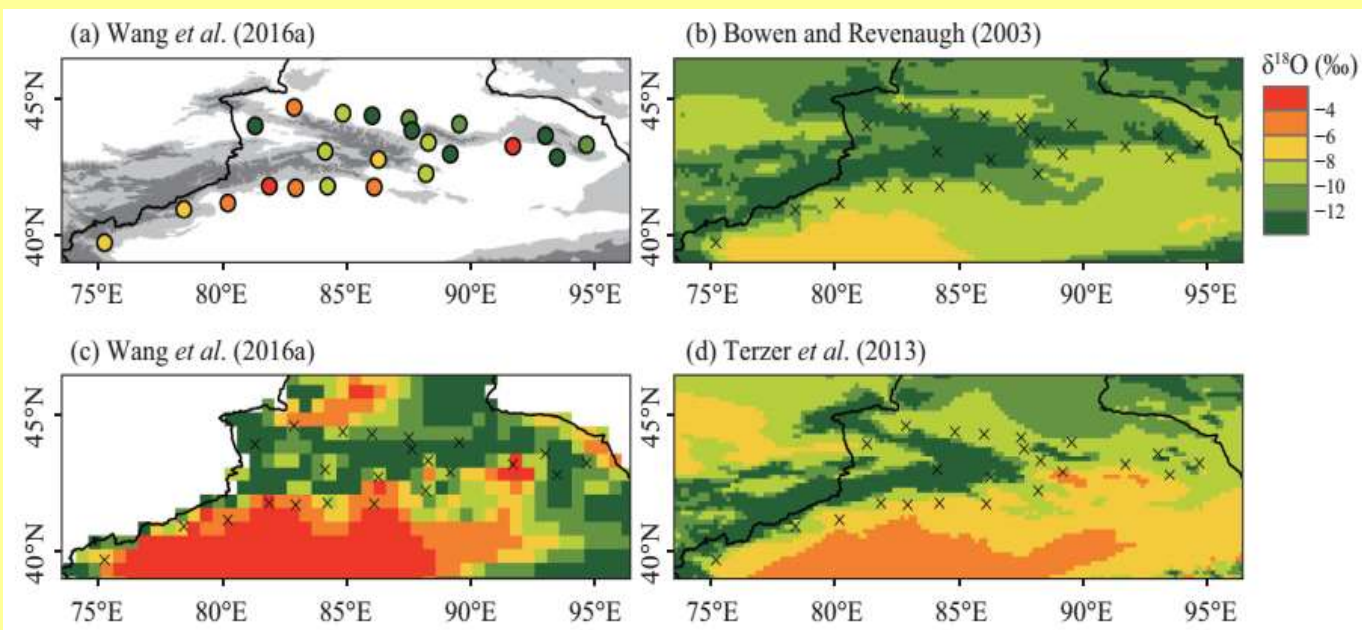
2 新疆降水同位素的影响机制：空间格局



天山南北的降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及降水线存在明显差异，南疆降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 出现正值的几率更大。

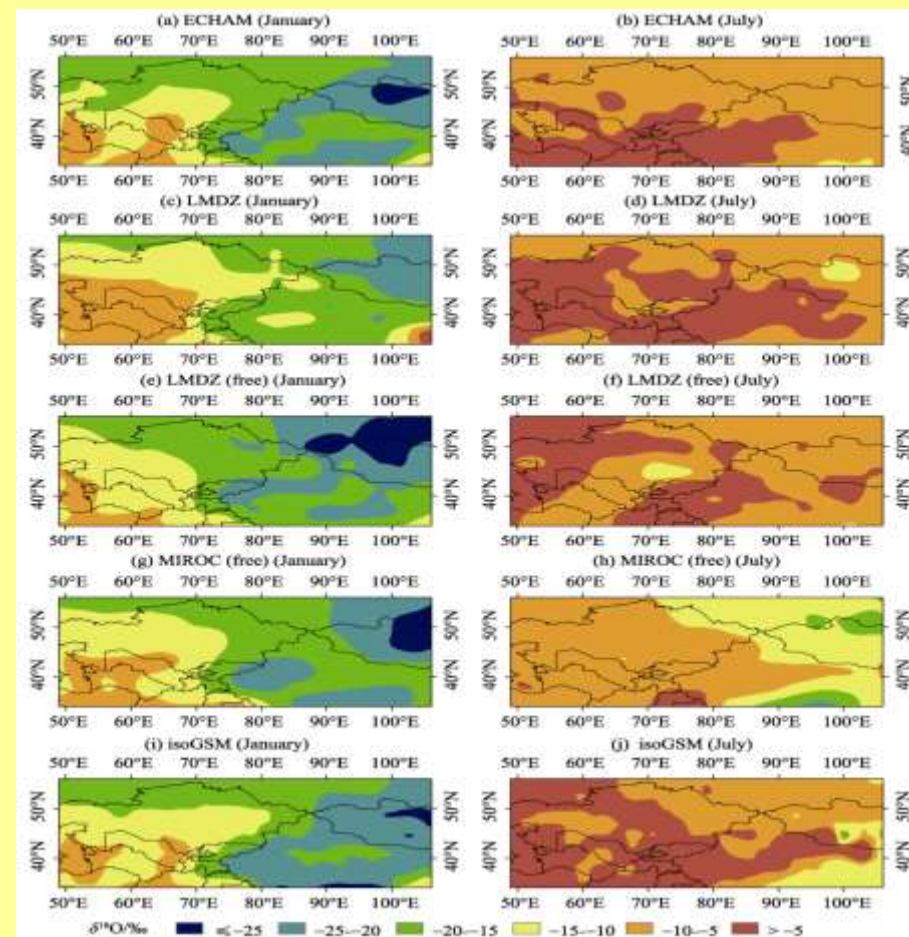


2 新疆降水同位素的影响机制：空间格局



降水 $\delta^{18}\text{O}$ 实测值与国际上广泛使用的同位素景观产品 (RCWIP和OIPC) 的对比

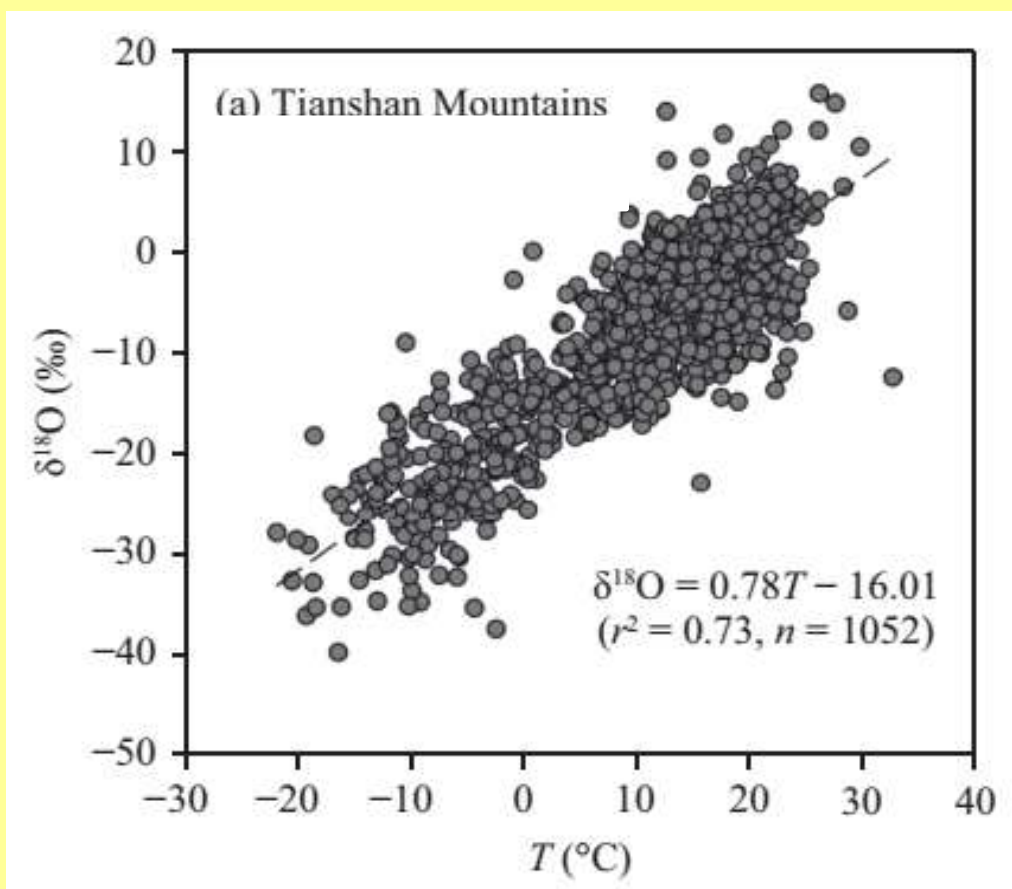
区域	模型	R ²		RMSE (‰)	
		$\delta^{18}\text{O}$	d-excess	$\delta^{18}\text{O}$	d-excess
准噶尔盆地荒漠自然区	RCWIP	0.83	0.23	4.44	23.51
	OIPC	0.81	0.20	4.50	23.53
伊犁-巴音布鲁克中天山自然区	RCWIP	0.67	0.43	3.93	23.16
	OIPC	0.64	0.41	4.03	23.24
塔里木盆地极端干旱荒漠自然区	RCWIP	0.83	0.16	4.89	17.10
	OIPC	0.82	0.14	5.48	19.47
吐鲁番—哈密荒漠自然区	RCWIP	0.83	0.14	5.09	16.47
	OIPC	0.84	0.18	5.73	16.55
全域	RCWIP	0.81	0.22	4.62	20.31
	OIPC	0.79	0.21	4.94	21.17



降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的isoGCM模拟结果 (ECHAM、LMDZ、MIROC和isoGSM)

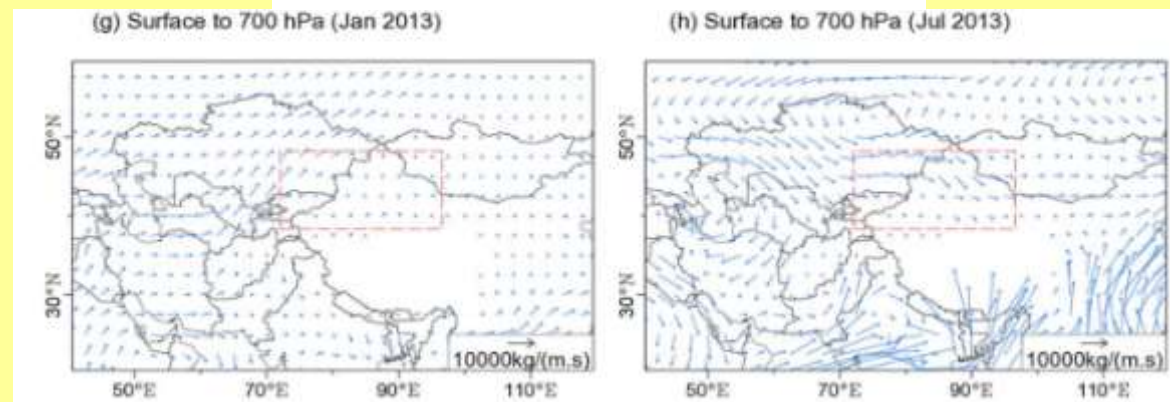
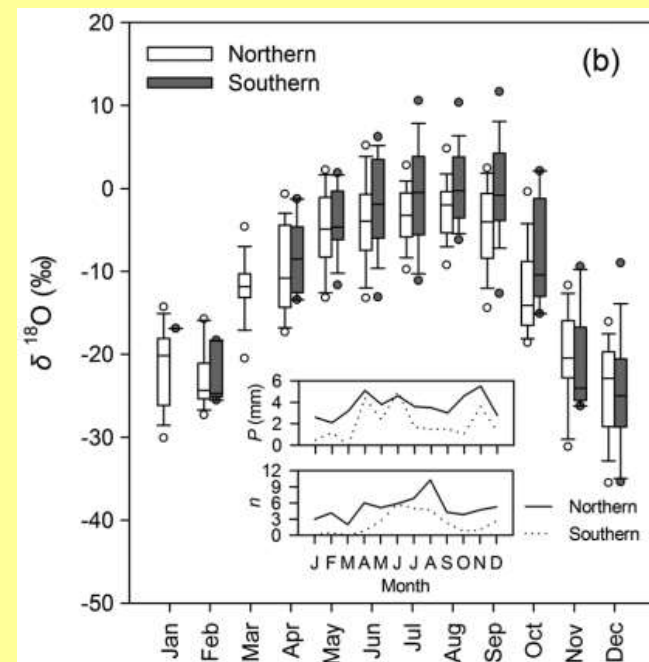
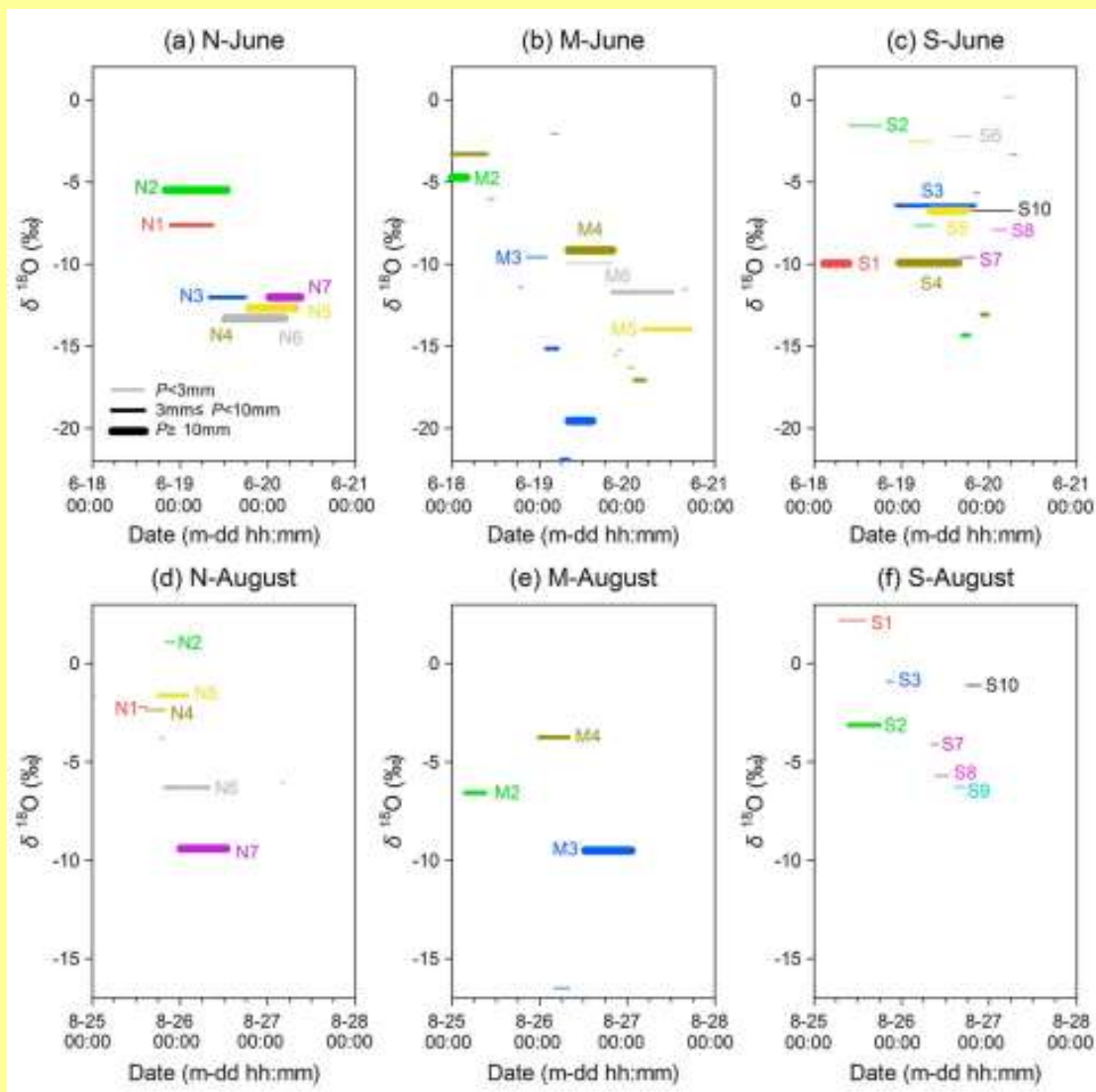
2 新疆降水同位素的影响机制：温度效应

降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应



Station	$\delta^{18}\text{O}-T$		$\delta^{18}\text{O}-P$	
	S (‰/°C)	r	S (‰/mm)	r
Yining (N1)	0.78 ± 0.04	0.90	-0.96 ± 0.20	-0.45
Jinghe (N2)	0.64 ± 0.08	0.78	-0.22 ± 0.18	-0.19
Kuytun (N3)	0.66 ± 0.06	0.84	-0.17 ± 0.42	-0.06
Shihezi (N4)	0.76 ± 0.04	0.89	-0.48 ± 0.28	-0.20
Caijiahu (N5)	0.73 ± 0.04	0.93	0.08 ± 0.40	0.03
Urumqi (N6)	0.74 ± 0.04	0.90	0.03 ± 0.20	0.02
Qitai (N7)	0.73 ± 0.05	0.90	0.27 ± 0.25	0.16
Wuqia (M1)	0.73 ± 0.10	0.69	-0.14 ± 0.15	-0.12
Akqi (M2)	0.78 ± 0.09	0.75	-0.15 ± 0.08	-0.22
Bayanbulak (M3)	0.99 ± 0.07	0.84	-0.22 ± 0.21	-0.11
Balguntay (M4)	0.81 ± 0.14	0.59	-0.23 ± 0.17	-0.17
Barkol (M5)	0.78 ± 0.07	0.85	0.39 ± 0.29	0.19
Yiwu (M6)	0.74 ± 0.13	0.77	-0.02 ± 0.32	-0.01
Aksu (S1)	0.54 ± 0.10	0.67	-0.25 ± 0.15	-0.26
Baicheng (S2)	0.80 ± 0.07	0.86	0.31 ± 0.45	0.10
Kuqa (S3)	0.91 ± 0.07	0.91	-0.38 ± 0.47	-0.13
Luntai (S4)	0.68 ± 0.25	0.50	-0.32 ± 0.23	-0.28
Korla (S5)	0.93 ± 0.07	0.95	0.71 ± 1.04	0.15
Kumux (S6)	0.84 ± 0.10	0.86	-1.25 ± 0.58	-0.39
Dabancheng (S7)	0.86 ± 0.12	0.91	0.43 ± 0.93	0.14
Turpan (S8)	0.98 ± 0.12	0.89	-8.03 ± 2.14	-0.65
Shisanjianfang (S9)	0.55 ± 0.07	0.97	5.75 ± 3.54	0.63
Hami (S10)	1.14 ± 0.09	0.95	-3.12 ± 2.05	-0.36

2 新疆降水同位素的影响机制: a.西风水汽的细节信息

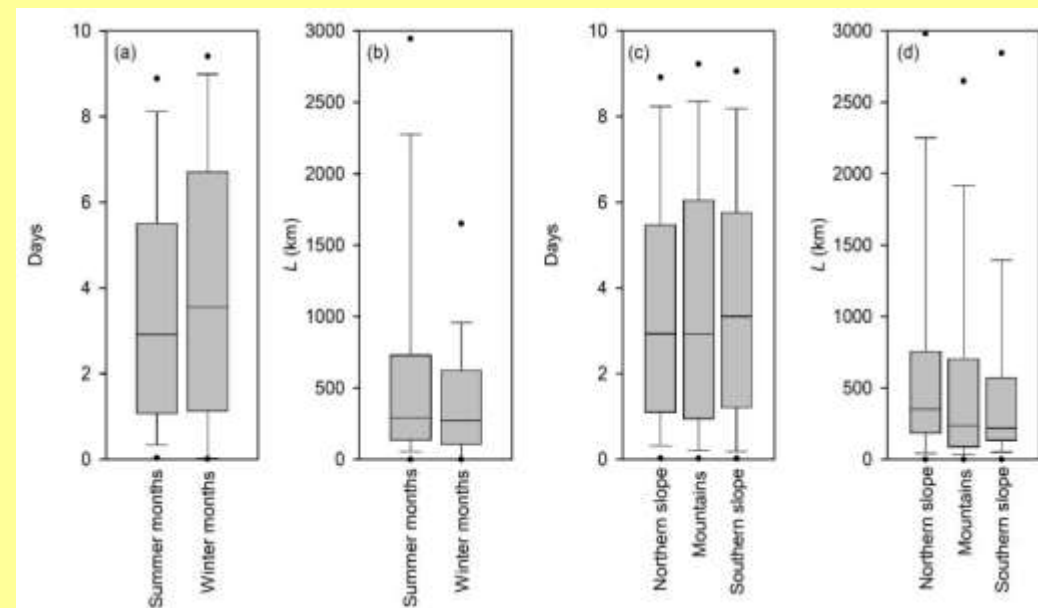
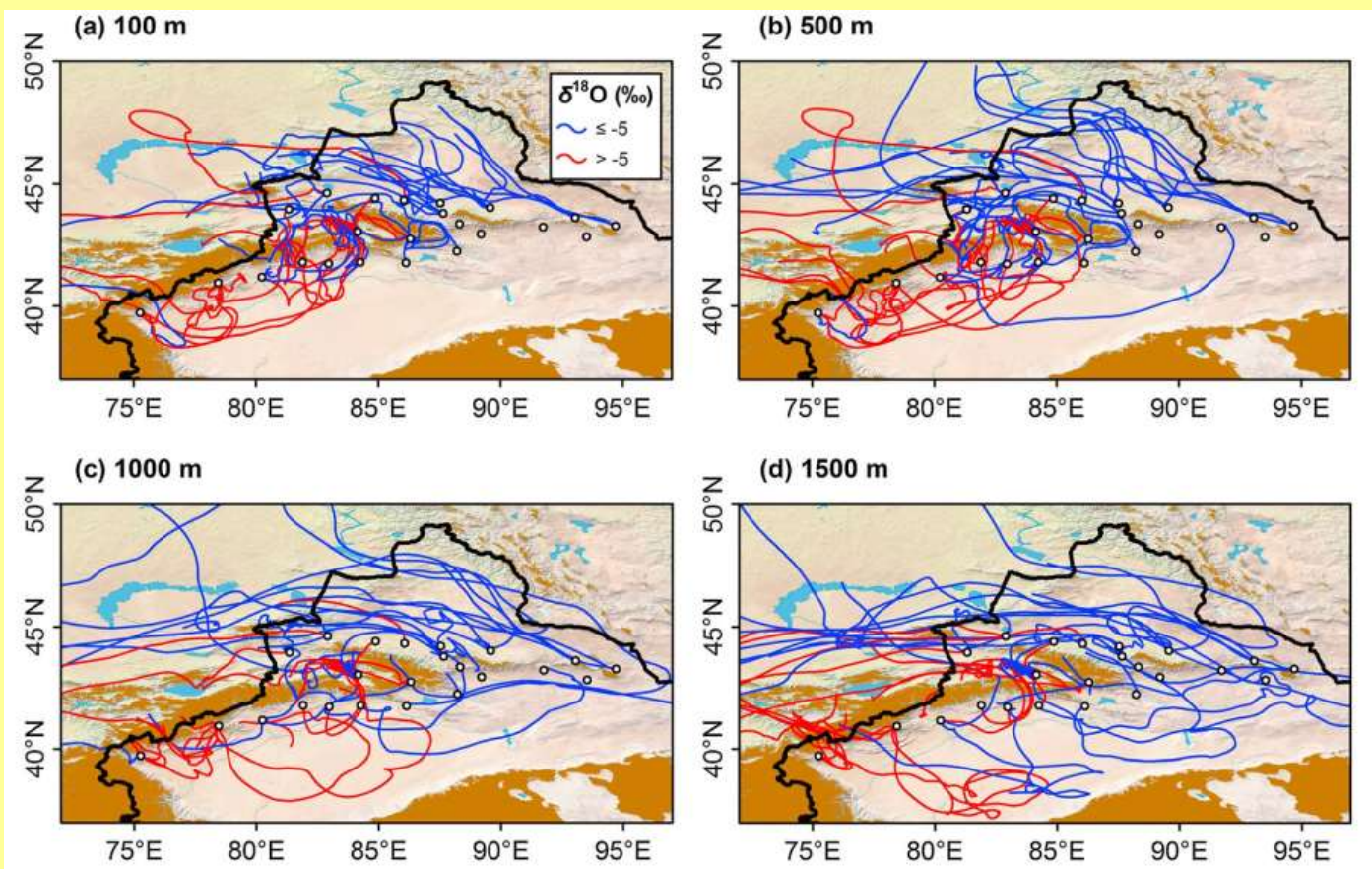


系统性降水往往伴随着降水同位素自西向东逐渐贫化

- 全年受到西风水汽作用，但是夏半年水汽输送更强烈；大气层下部而言，天山北坡西风水汽通道明显更为通畅
- 天山南北坡水汽输送特点的差异也对应着同位素南北差异

2 新疆降水同位素的影响机制：a.西风水汽的细节信息

为了分析水汽路径与降水同位素的联系，我们选用了一种**大气比湿订正的拉格朗日模型**。
经过比湿判断后，**气团回溯路径普遍变短**；可以发现南坡和北坡的水汽路径存在差异。

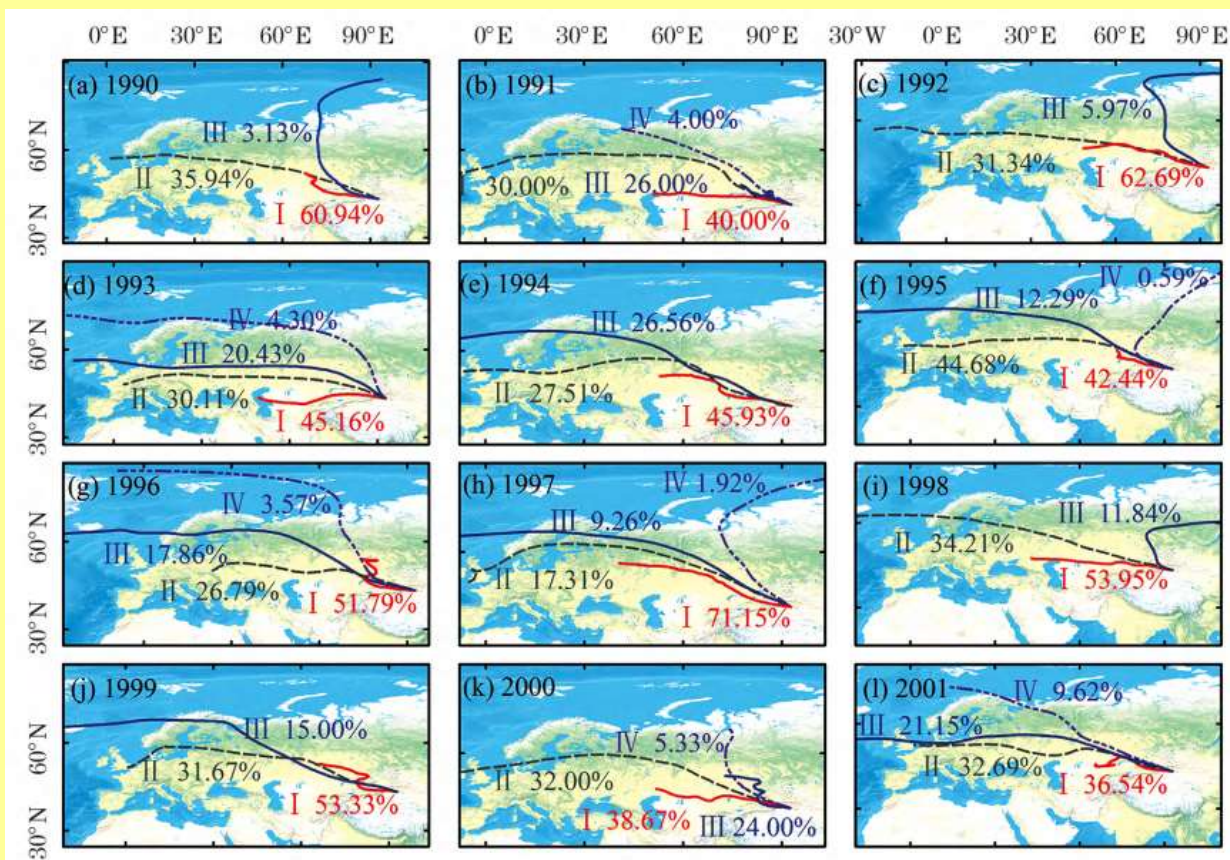
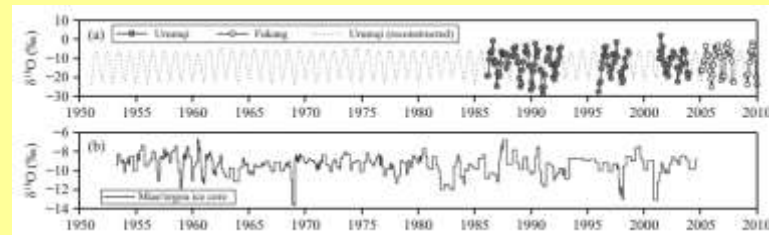


订正后的回溯日数与回溯距离季节与区域差异

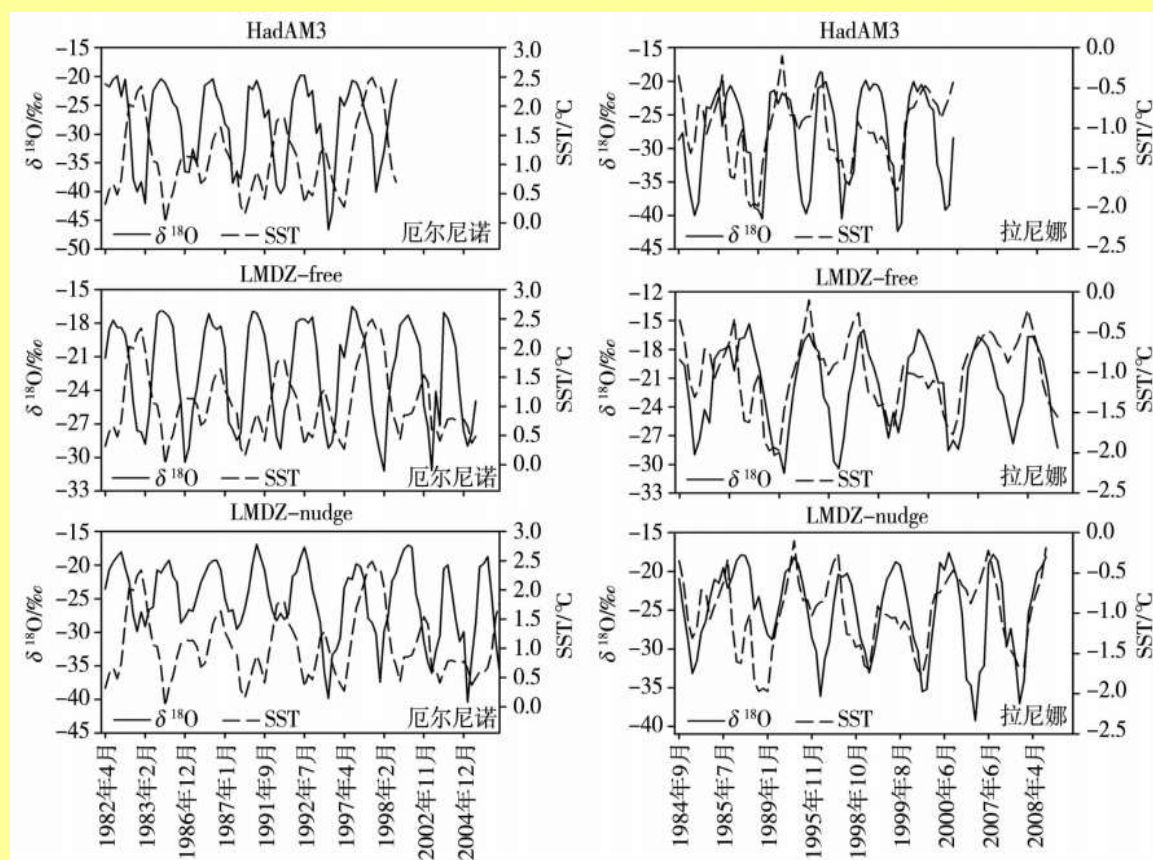
比湿订正的拉格朗日诊断的应用——同位素与路径的联系

2 新疆降水同位素的影响机制：a.西风水汽的细节信息

- 通过冰芯、isoGCM模拟结果以及多年降水同位素记录，降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负的年份偏北水汽增多，水汽来源的方向和比例影响着降水同位素值偏正/偏负的程度



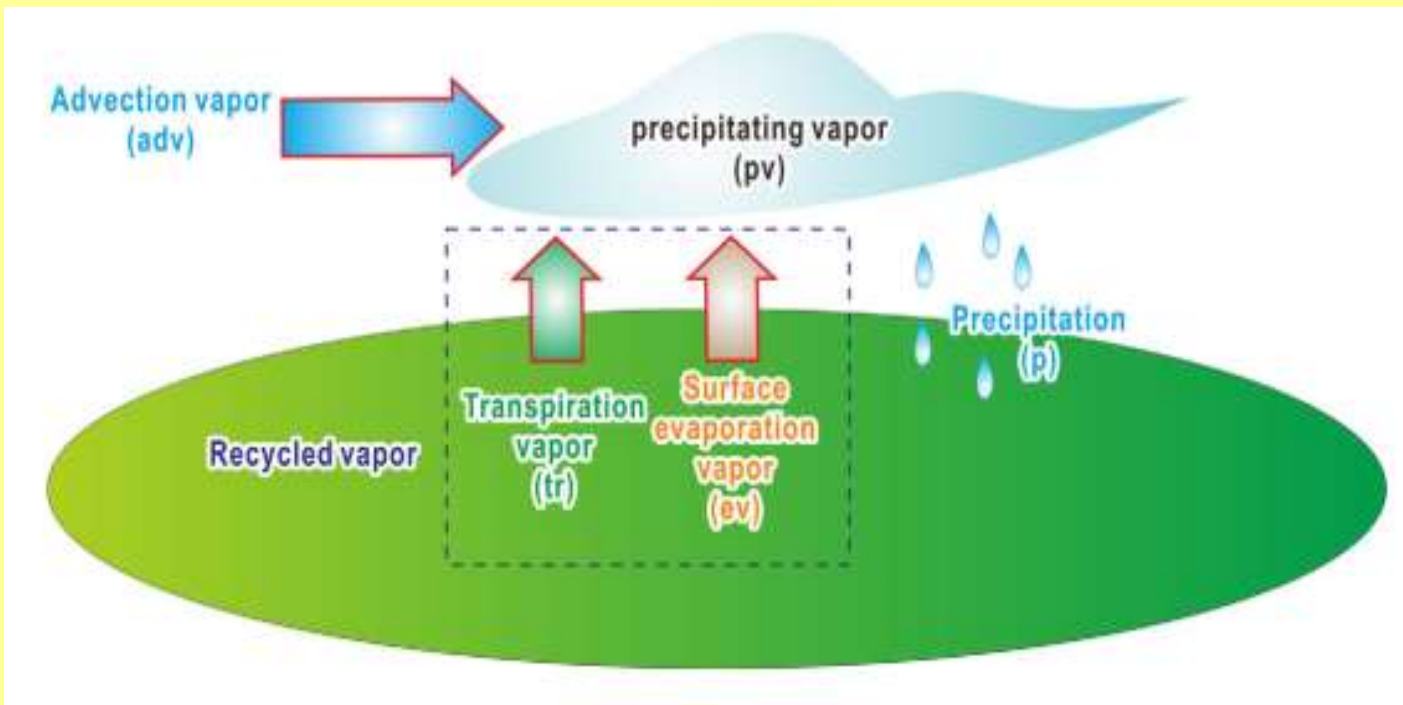
典型年份降水日后向轨迹聚类结果



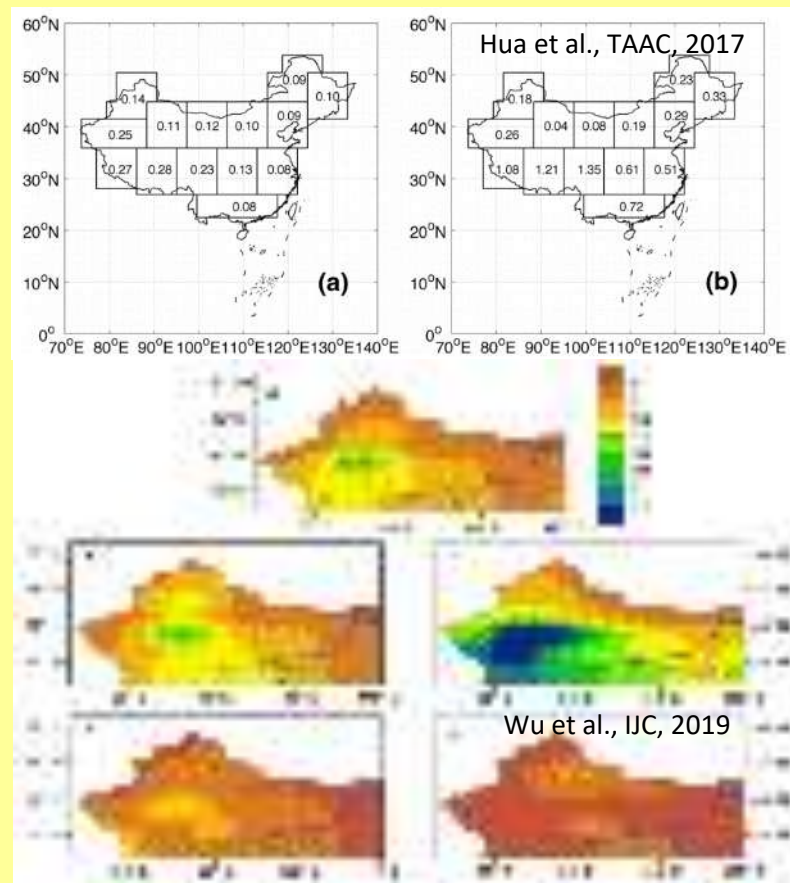
同位素与ENSO的联系

2 新疆降水同位素的影响机制：b.荒漠与绿洲的水汽再循环

测量或估算外来水汽、本地蒸发水汽、蒸腾水汽中的同位素，利用三元混合模型可以得到当地降水的水汽再循环比例。



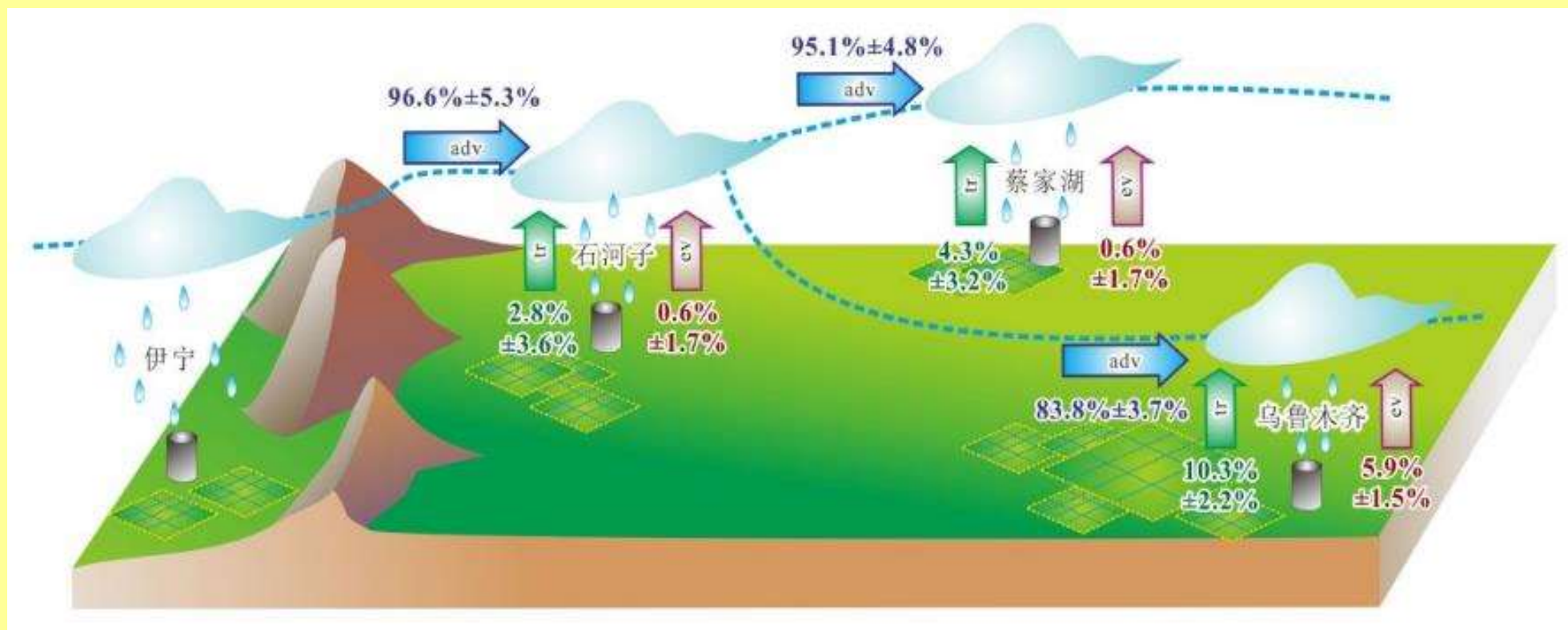
概念模型



基于再分析资料的水汽再循环比例

2 新疆降水同位素的影响机制：b.荒漠与绿洲的水汽再循环

以伊宁—石河子—蔡家湖/乌鲁木齐一线为例，通过同位素三元混合模型得到，在**乌鲁木齐**再循环水汽对降水的贡献率达到**16.2%**，其中**蒸发和蒸腾分别为 $5.9\% \pm 1.5\%$ 和 $10.3\% \pm 2.2\%$** ，而石河子和蔡家湖的贡献率小于5%，但绿洲区蒸腾水汽对降水的贡献率均大于蒸发水汽的贡献率。由此可见，绿洲的气候效应十分显著。

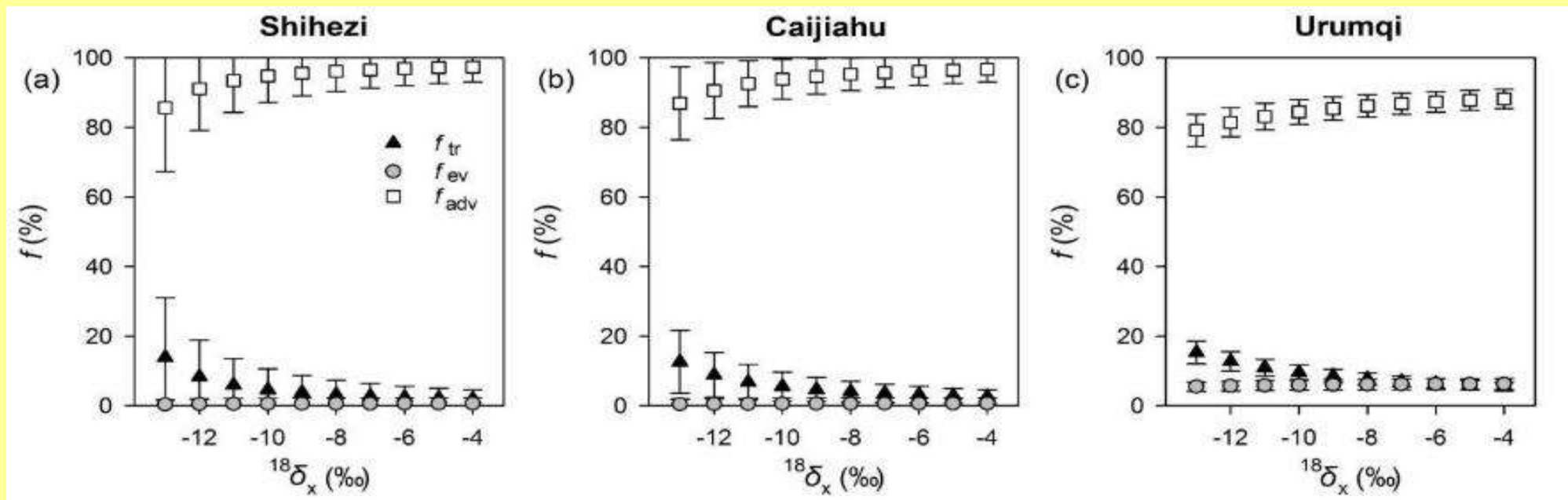
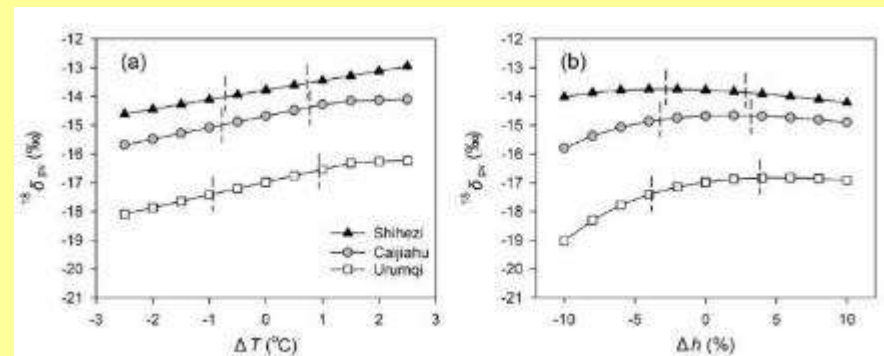


天山北坡降水再循环过程示意图

2 新疆降水同位素的影响机制：b.荒漠与绿洲的水汽再循环

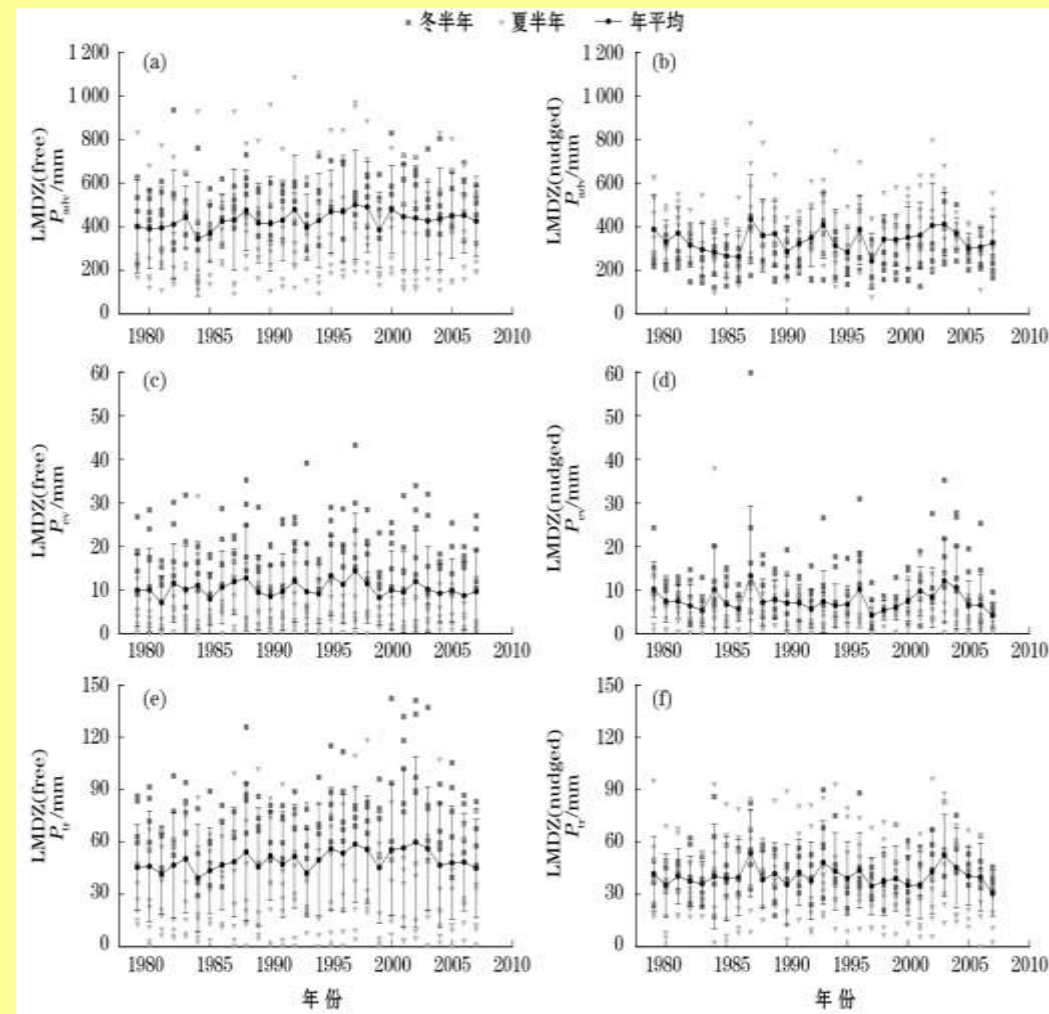
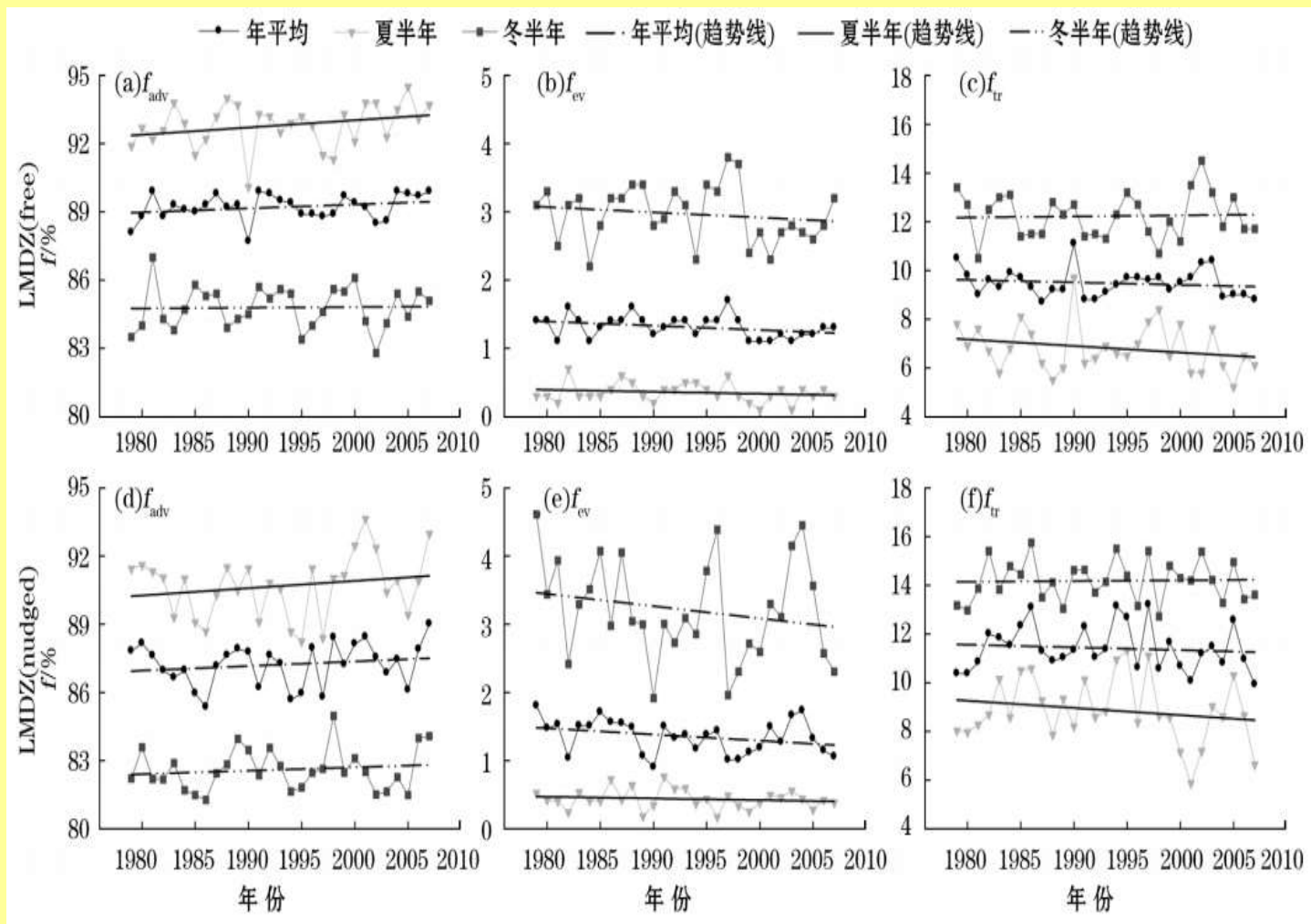
植物水同位素在某些范围内波动时，外来水汽、蒸发水汽和蒸腾水汽的贡献率变化可能并不明显。

蒸腾水汽中重同位素越贫化，蒸腾水汽贡献率越大，外来水汽贡献率越小，并且二者贡献率的误差范围都明显更大。



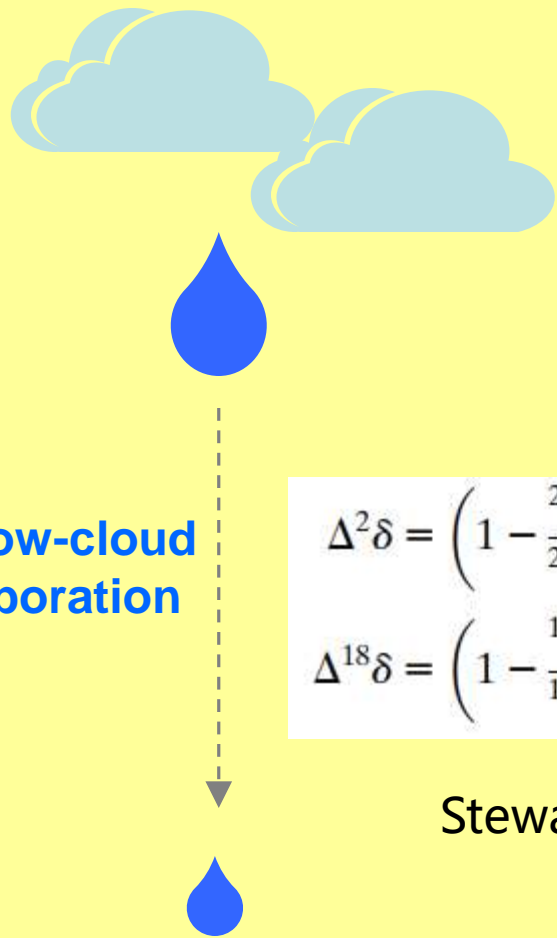
模型的不确定性

2 新疆降水同位素的影响机制：b.荒漠与绿洲的水汽再循环



基于isoGCM的水汽再循环比例长期趋势

2 新疆降水同位素的影响机制：c.强烈的云下二次蒸发

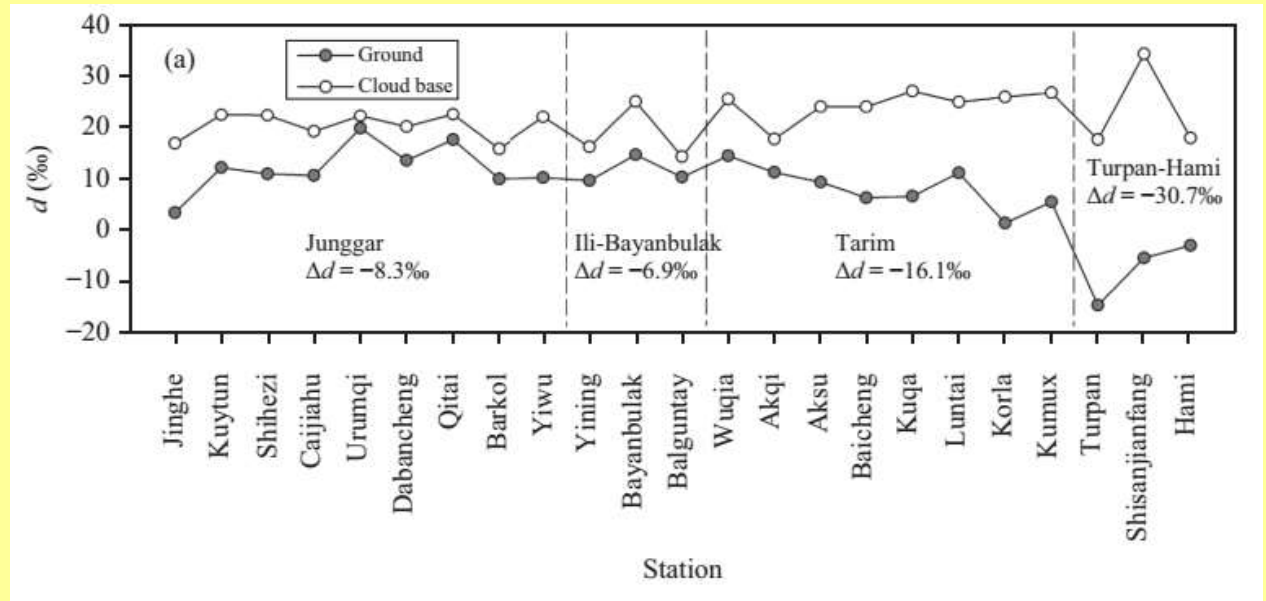


Below-cloud evaporation

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

$$\Delta^{18}\delta = \left(1 - \frac{18\gamma}{18\alpha}\right) (f^{18\beta} - 1)$$

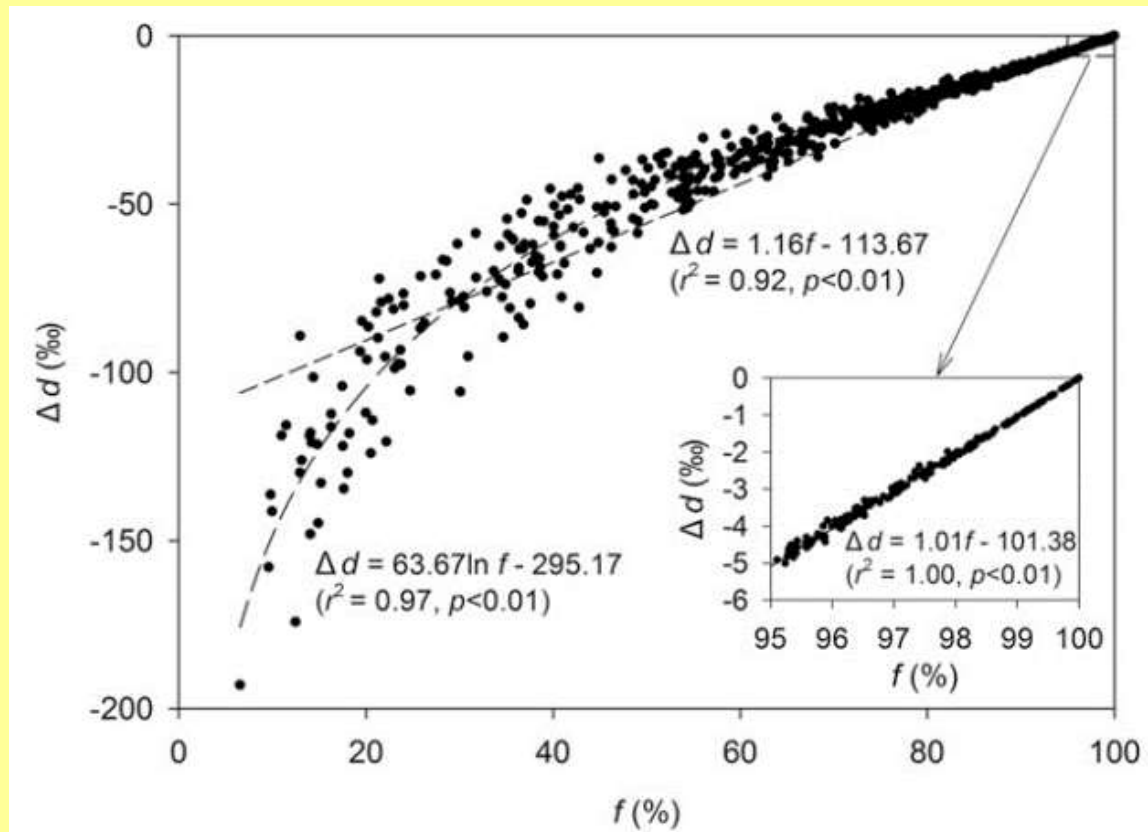
Stewart模型



基于改进的Stewart模型的云下与近地面降水同位素过量氘差异

- 从云底降落到地面各站点降水同位素发生了不同程度的变化，南坡的影响比北坡的要大，夏半年的影响要比冬半年的大
- 订正后的一些采样点呈现出更为明显的区域一致性，这说明部分区域受云下蒸发的影响较大，使得同位素的区域性特征被掩盖了

2 新疆降水同位素的影响机制：c.强烈的云下二次蒸发



过量氘变化量与雨滴蒸发程度的关系

- 对各采样点的气温全部升高或降低某一数值，南疆比北疆更加敏感，相对湿度也有类似的特点。

- 在**低气温、高相对湿度、高降水强度、大雨滴直径**的条件下，雨滴蒸发程度与过量氘变化量存在**较好的线性关系**，且斜率相对较小
- 各站点降水蒸发程度差异较大

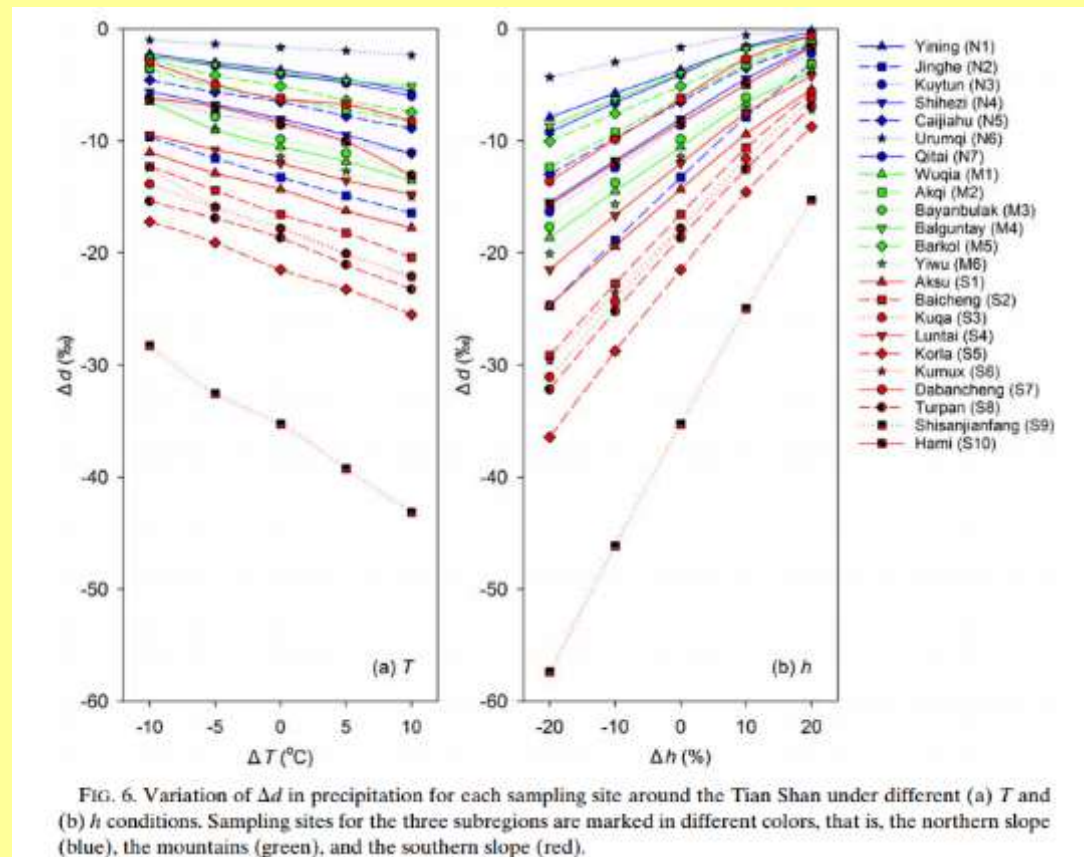
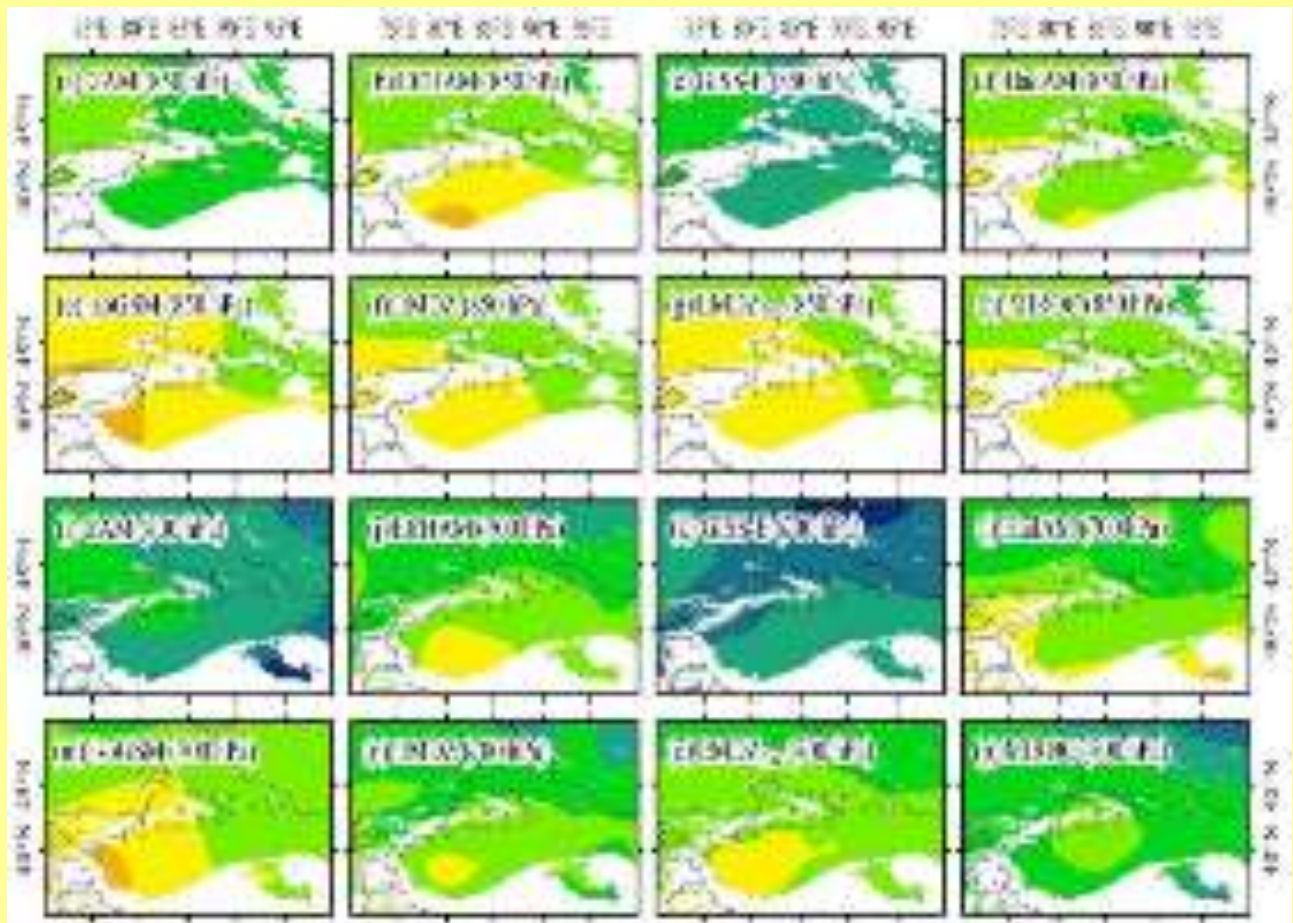
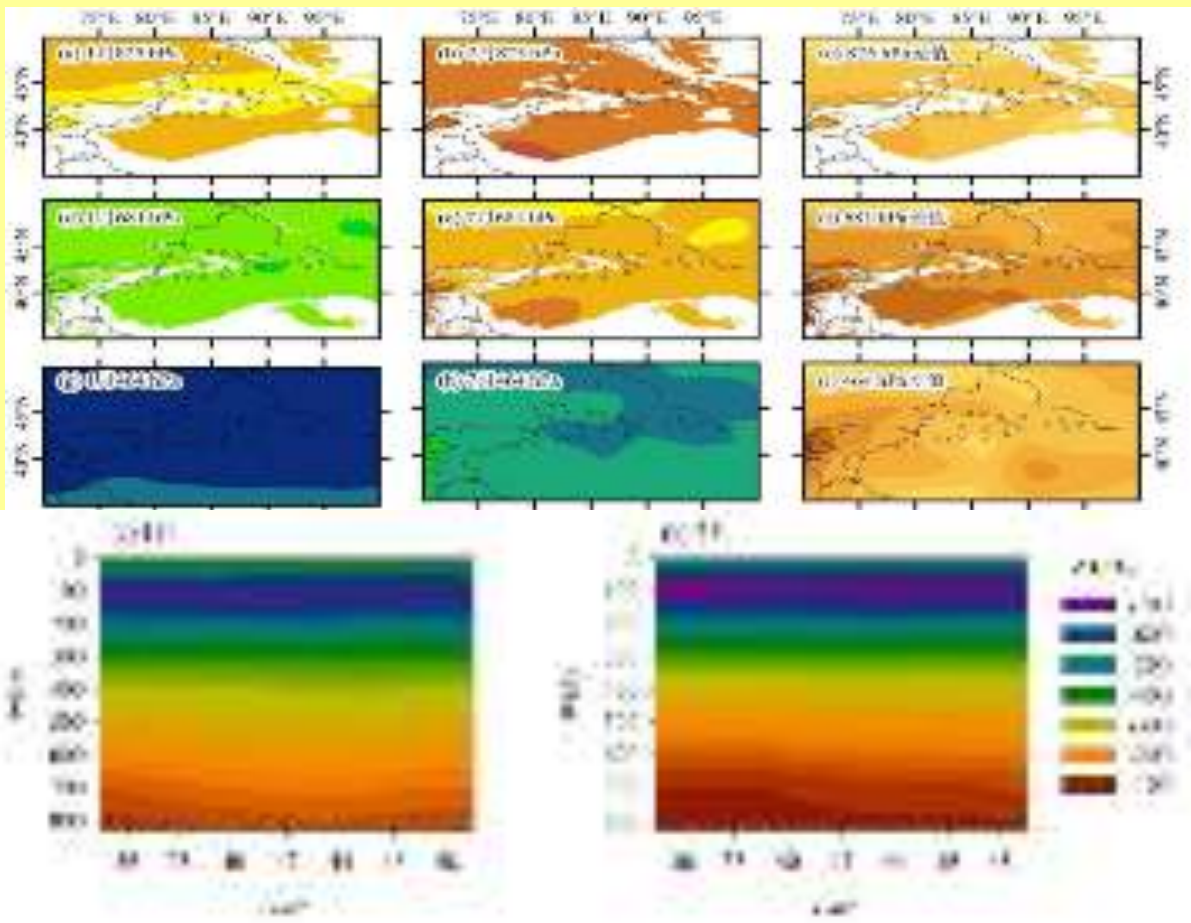


FIG. 6. Variation of Δd in precipitation for each sampling site around the Tian Shan under different (a) T and (b) h conditions. Sampling sites for the three subregions are marked in different colors, that is, the northern slope (blue), the mountains (green), and the southern slope (red).

3 新疆水汽同位素与降水同位素的联系

水汽同位素相比降水同位素更为连续，不受天气现象的影响，在降水日数偏少的干旱区具有重要价值。



基于TES遥感数据和几种isoGCM数据的不同层位水汽同位素变化

3 新疆水汽同位素与降水同位素的联系

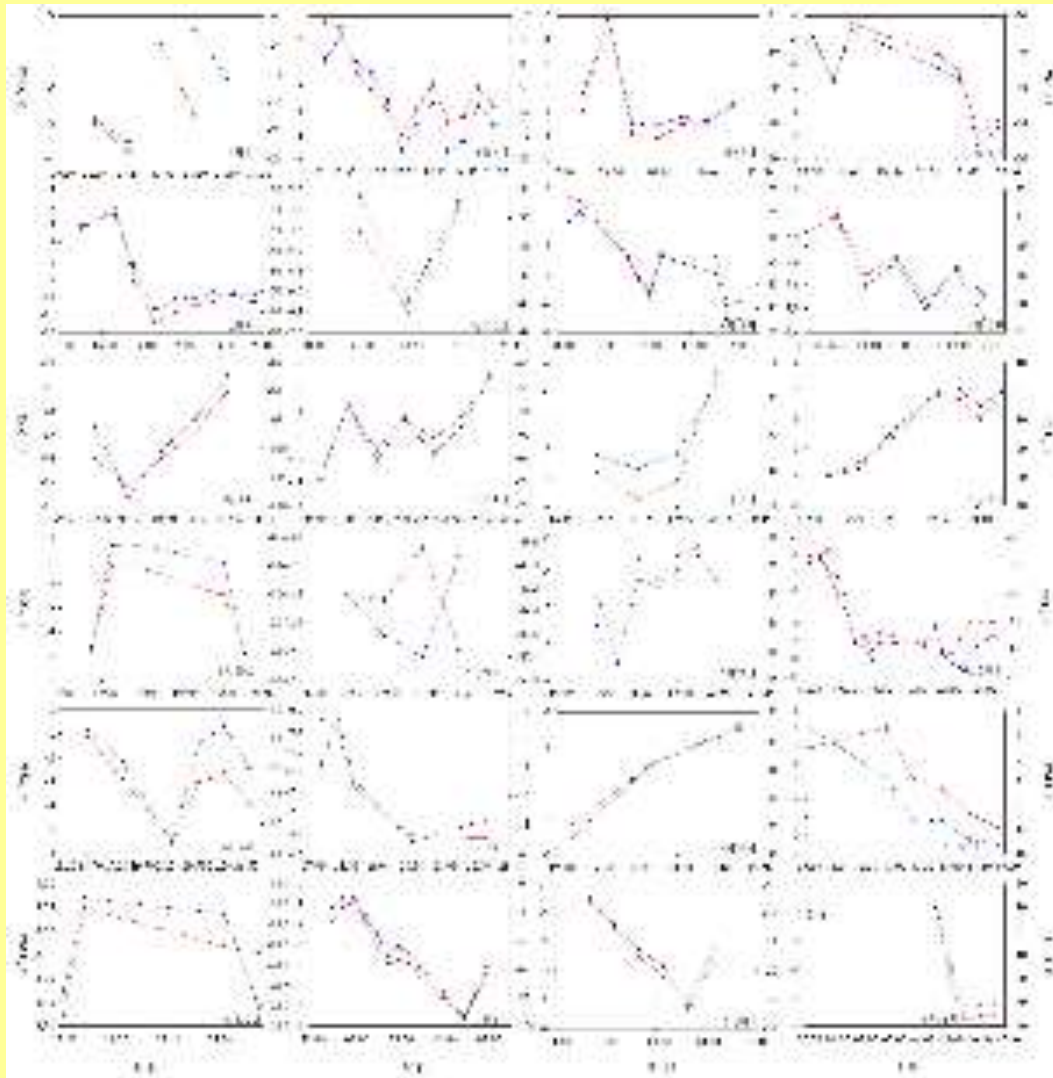


适用于高时间分辨率的自动降水采集器

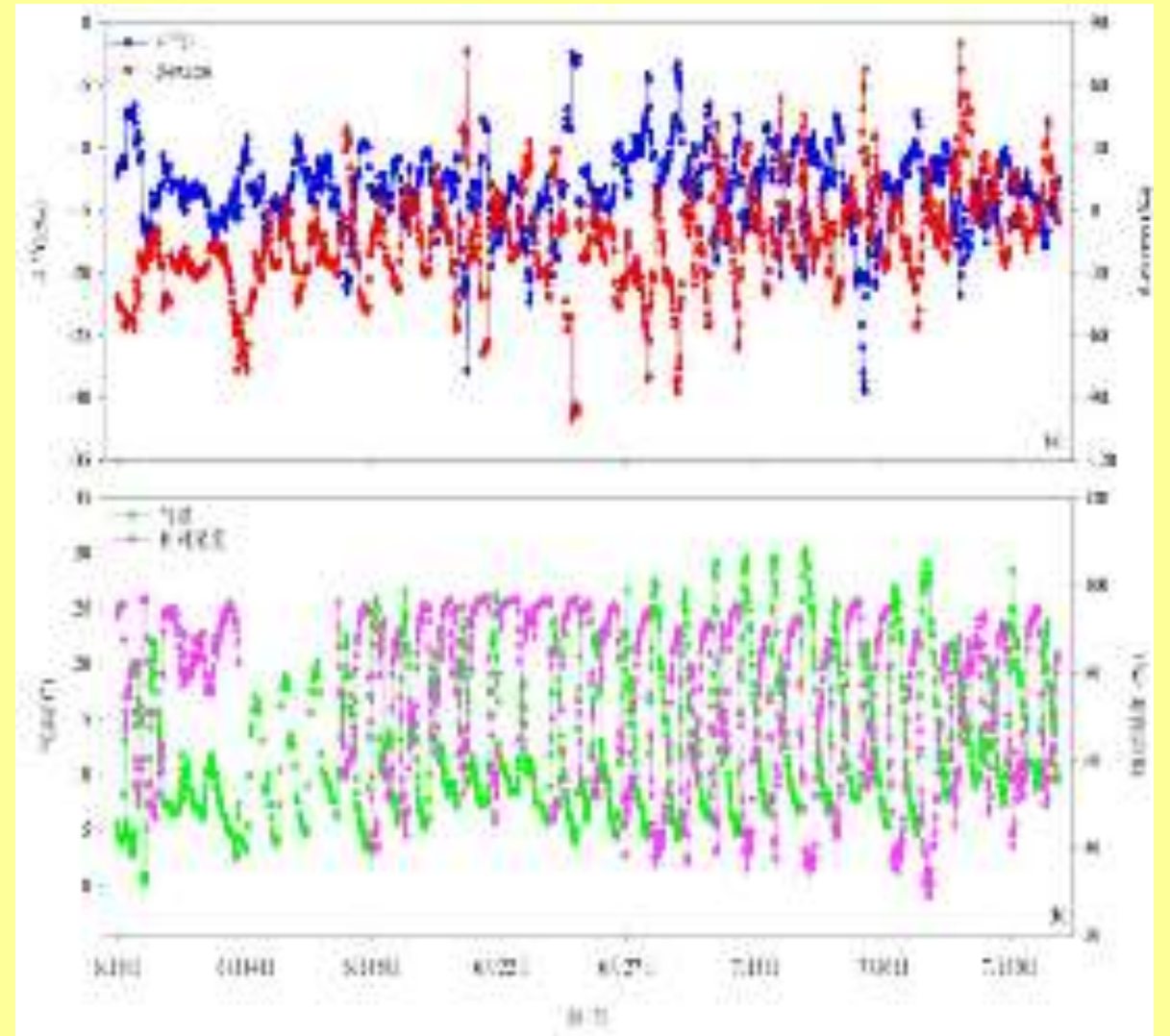


水汽同位素分析仪

3 新疆水汽同位素与降水同位素的联系

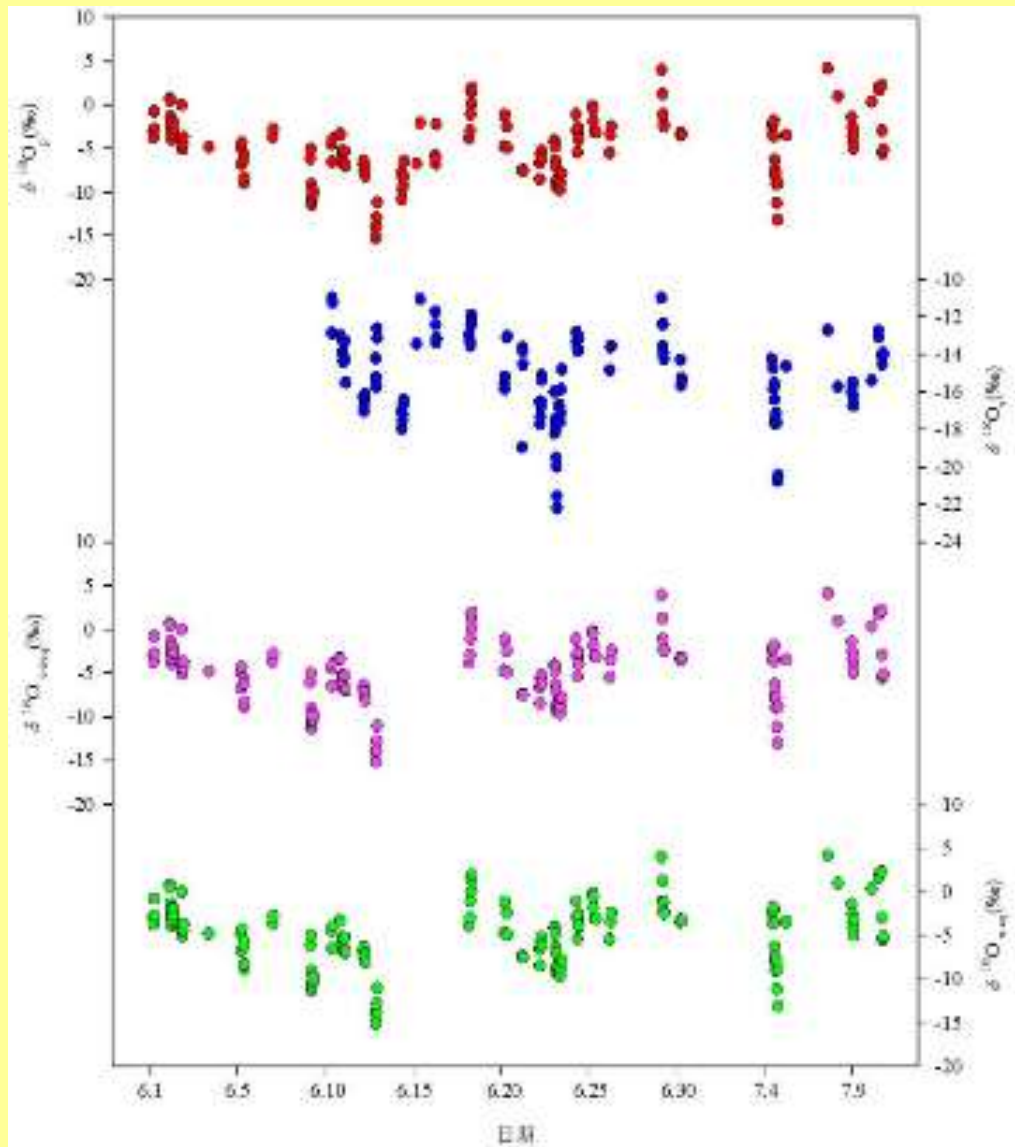


降水过程中的同位素变化

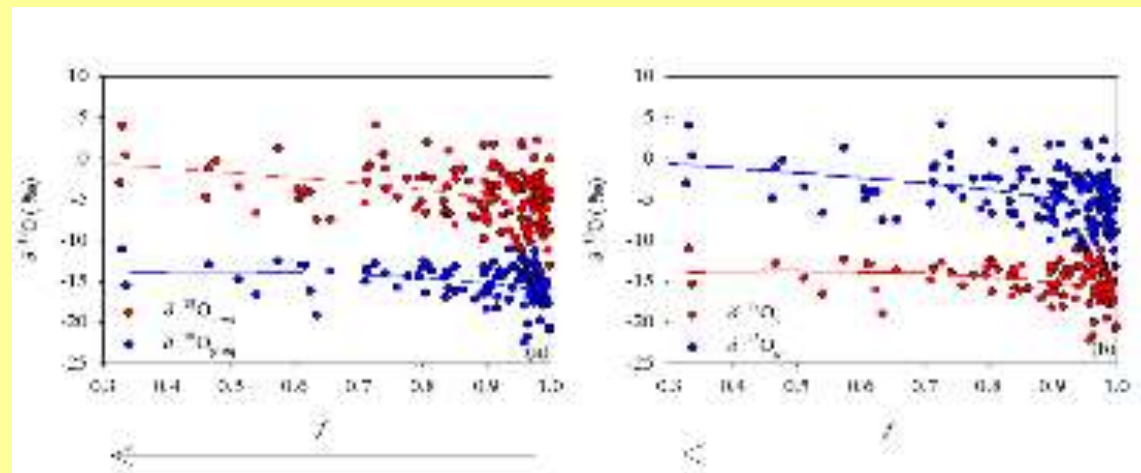


水汽同位素变化

3 新疆水汽同位素与降水同位素的联系




平衡分馏假设不适用于研究区的水汽同位素模拟，应注意采用非平衡分馏的计算方法。



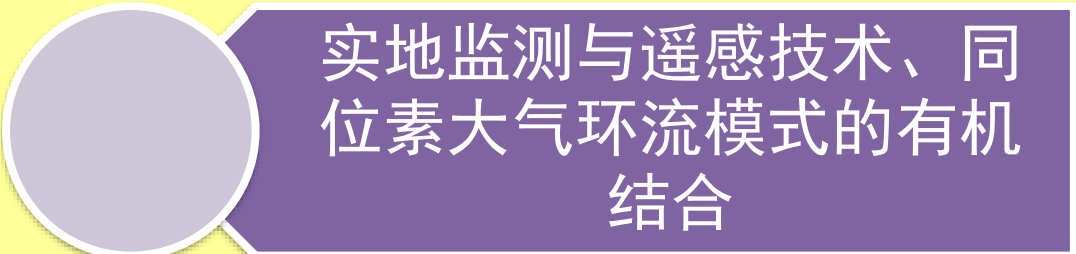
平衡分馏假设与非平衡分馏假设下基于降水同位素的水汽同位素模拟



不同时间尺度同位素的综合研究



降水同位素与水汽同位素的定量联系研究



实地监测与遥感技术、同位素大气环流模式的有机结合

A nighttime photograph of a river scene. In the foreground, the water is dark with reflections of lights. A large, illuminated steel truss bridge spans across the river. In the background, a hillside is covered in trees and buildings, all of which are illuminated with vibrant blue and green lights. The sky is dark blue.

THANKS!

王圣杰

西北师范大学

E-mail: geowang@126.com

发表的部分新疆同位素相关论文:

1. Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Jagoda Crawford, Catherine E. Hughes, Mingxia Du, Xuemei Liu. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(5): 2667–2682. DOI: 10.1002/2015JD024626
2. Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Yanjun Che, Fenli Chen, Fang Qiang. Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: a stable isotope approach. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 3246–3257. DOI: 10.1002/2015WR018135
3. Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Catherine E. Hughes, Jagoda Crawford, Gaofei Wang, Fenli Chen, Mingxia Du, Xue Qiu, Su'e Zhou. Meteoric water lines in arid Central Asia using event-based and monthly data. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 435–445. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.034
4. Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Yanjun Che, Xiaofan Zhu, Xuemei Liu. Influence of below-cloud evaporation on deuterium excess in precipitation of arid central Asia and its meteorological controls. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(7): 1973–1984. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0203.1
5. Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Catherine E. Hughes, Xiaofan Zhu, Lei Dong, Zhengguo Ren, Fenli Chen. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia. *Tellus B*, 2016, 68: 26206. DOI: 10.3402/tellusb.v68.26206
6. Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Fenli Chen, Yanjun Che, Mingxia Du, Yangmin Liu. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7): 771–783. DOI: 10.1007/s11442-015-1201-z
7. Mingjun Zhang, Shengjie Wang. A review of precipitation isotope studies in China: basic pattern and hydrological process. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 921–938. DOI: 10.1007/s11442-016-1307-y
8. Mingjun Zhang, Shengjie Wang. Precipitation isotopes in the Tianshan Mountains as a key to water cycle in arid central Asia. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2018, 10(1): 27–37. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2018.00027
9. Shengjie Wang, Mingxia Du, Mingjun Zhang, Mengyu Shi, Rong Jiao, Liwei Wang. Precipitation isotopes associated with the duration and distance of moisture trajectory in a westerly-dominant setting. *Water*, 2019, 11(12): 2434. doi: 10.3390/w11122434
10. Liwei Wang, Mingjun Zhang, Shengjie Wang, Athanassios A. Argiriou, Gaofei Wang, Vasileios Salamalikis, Mengyu Shi, Rong Jiao. Stable isotope signatures and moisture transport of a typical heavy precipitation case in the Southern Tianshan Mountains. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 180–188. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1091-6>
11. Sen Yang, Mingjun Zhang, Shengjie Wang, Yangmin Liu, Fang Qiang, Deye Qu. Interannual trends in stable oxygen isotope composition in precipitation of China during 1979–2007: Spatial incoherence. *Quaternary International*, 2017, 454: 25–37. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.07.029
12. 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. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 1119–1130. DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2017.05.19
13. 石梦雨, 王圣杰, 姚俊强, 王高飞, 张明军. 基于GCM的乌鲁木齐水汽稳定同位素变化特征及其与ENSO的关系. *干旱气象*, 2018, 36(6): 895–904. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0895
14. 石玉东, 王圣杰, 张明军, 李昱锋, 宋洋. 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. *冰川冻土*, 2020, 42(3). <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0075>
15. 杨森, 张明军, 王圣杰. 基于GCM和冰芯的天山地区降水同位素的水汽来源影响机制. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 425–435. DOI: 10.13866/j.azr.2018.02.22
16. 周苏娥, 张明军, 王圣杰, 孟鸿飞, 张亚宁, 余秀秀. 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. *冰川冻土*, 2019, 41(2): 304–315. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0107
17. 余秀秀, 张明军, 王圣杰, 邱雪, 杜铭霞, 周苏娥, 孟鸿飞. 基于LMDZ模型的西北干旱区水汽再循环率分析. *干旱区研究*, 2019, 36(1): 29–43. DOI: 10.13866/j.azr.2019.01.04
18. 张亚宁, 张明军, 王圣杰, 杜铭霞, 马荣, 周苏娥, 孟鸿飞, 余秀秀. 基于比湿订正拉格朗日模型的新疆短时强降水的水汽来源. *干旱区研究*. 2019, 36(3): 698–711. DOI: 10.13866/j.azr.2019.03.22
19. 潘素敏, 张明军, 王圣杰. 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. *干旱区地理*, 2018, 41(3): 488–498. DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.03.007