

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析

张百娟^{1,2}, 李宗省^{2*}, 王昱¹, 李永格², 吕越敏², 袁瑞丰², 桂娟²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院(筹), 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃省水文水资源工程技术中心, 兰州 730000)

摘要: 依据祁连山北坡中段8个站点的降水样品, 结合同期气象数据, 从降水同位素特征、影响因素以及水汽来源等方面进行分析, 结果表明: ① 研究区降水稳定同位素季节变化明显, 表现为夏半年富集, 冬半年贫化的特征; 在空间尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ 值随海拔的升高而减小, 年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的海拔效应为 $-0.19\text{‰}/100\text{ m}$; ② 各站点的局地大气降水线的斜率和截距表现为随海拔的增加而增加的趋势, 表明2000 m以上的高海拔山区受到更强烈的局地再循环水汽的影响; ③ 研究区降水中稳定同位素温度效应显著, $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应为 0.64‰ , 且仅在夏季存在微弱的降水量效应; ④ 研究区云下蒸发作用显著. 在5、6、7和8月, 研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均雨滴蒸发率分别为23%、11%、12%和16%, 云下蒸发富集率46%、27%、38%和32%; ⑤ 在夏季连续降雨条件下, 研究区降水的水汽来源主要为西风水汽, 同时受到局地蒸发水汽的影响. 本研究结果有助于进一步了解内陆河水文循环过程, 为进一步开展干旱区同位素水文研究奠定基础.

关键词: 祁连山北坡; 大气降水; 稳定同位素; 水汽来源; 影响因素

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5272-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905218

Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains

ZHANG Bai-juan^{1,2}, LI Zong-xing^{2*}, WANG Yu¹, LI Yong-ge², LÜ Yue-min², YUAN Rui-feng², GUI Juan²

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of In-land River Basin/Gansu Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This study is based on precipitation samples from eight sites at the northern slope of the Qilian Mountains, combined with meteorological factors over the same period. Precipitation isotope characteristics, influence factors and the vapor sources of precipitation were analyzed, and the results show that: ① The stable isotopes of precipitation in the study area show obvious seasonal changes, which are characterized by enrichment in the summer half-year and depletion in the winter half-year. The spatial precipitation $\delta^{18}\text{O}$ value shows a significant downward trend with increasing altitude, and the altitude effect of the annual precipitation $\delta^{18}\text{O}$ is $-0.19\text{‰}/100\text{ m}$, respectively; ② At all stations, the slope and intercept of local meteoric water lines show an increasing trend from low altitude to high altitude. The high-altitude mountains above 2000 m are affected by local water vapor recirculation; ③ The temperature effect is more significant and the temperature effect of $\delta^{18}\text{O}$ is 0.64‰ , and there is only a weak precipitation effect in summer; ④ The results indicate that sub-cloud evaporation has a great influence on the $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation; the average raindrop evaporation rate of $\delta^{18}\text{O}$ is 23%, 11%, 12%, and 16%, and the $\delta^{18}\text{O}$ composition has been enriched by 46%, 27%, 38%, and 32% in May, June, July, and August from cloud base to ground, respectively. ⑤ Under the condition of continuous rainfall in summer, the vapor sources of precipitation mainly come from the west and are affected by local evaporation of water vapor. The study enhances knowledge of isotopic evolution of precipitation and provides a basis for further study of isotopic hydrology in arid regions.

Key words: Northern slope of Qilian Mountains; precipitation; stable isotopes; vapour sources of precipitation; influence factors

降水是大气圈和水圈物质与能量交换过程中最积极的因子, 降水稳定同位素由氢氧同位素组成, 区别于其他溶于水的同位素, 它们本身就是水分子的组成部分, 是描述水循环过程的天然示踪剂, 因而在水循环和水文过程研究中具有重要的意义^[1~4].

目前, 国内外学者对全球各地区降水同位素做了大量研究. Craig^[3]指出降水中氢氧稳定同位素中存在显著的线性关系($\delta D = \delta^{18}\text{O} + 10$); Dansgaard^[2]分析了降水稳定同位素的时空分布特征, 并提出同位素效应和过量氘等基本概念. Giustini等^[5]的研究表明, 海拔和纬度是影响意大利降水同位素特征

的主要因素; Li等^[6]初步建立全球山地高海拔区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的垂直变化梯度为 $-0.40\text{‰}/100\text{ m}$ (5000 m以上). 国内学者对降水同位素的研究主要集中在降水稳定同位素特征、地区水汽来源分析等方面^[7~11]. Li等^[12]综述了我国降水中稳定同位

收稿日期: 2019-05-28; 修订日期: 2019-07-08

基金项目: 国家“万人计划”青年拔尖人才项目; 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(2013274); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404304); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金项目; 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1814)

作者简介: 张百娟(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为寒区同位素水文, E-mail: 18394487949@163.com

* 通信作者, E-mail: lizxhhs@163.com

素的组成和分布,阐明影响同位素比值的因素;刘忠方等^[13]利用 BW 模型建立我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与纬度和海拔定量关系的模型;Yao 等^[14,15]的研究结果表明西宁和德令哈降水 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出温度效应;Tian 等^[16,17]在青藏高原的聂拉木和拉萨地区研究降水 $\delta^{18}\text{O}$ 仅在夏季季风活动时期偏负;同时已有研究表明在玉树、那曲、沱沱河、改则和狮泉河地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征极其相似^[17~20];汪少勇等^[21]研究了长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源;Yang 等^[22]分析了祁连山马粪沟流域降水和各水体稳定同位素组成的月尺度变化;Feng 等^[23]的研究表明温度是控制祁连山排露沟流域降水事件同位素变化的主要因素;袁瑞丰等^[24]讨论祁连山石羊河流域降水同位素季节变化特征以及同位素效应;有学者系统地分析了祁连山中段黑河中上游地区降水氢氧同位素的变化特征以及与温度的相关关系、确定黑河流域大气降水水汽来源^[25~29]。

尽管前人对祁连山降水稳定同位素已经做了大量研究,但研究区主要集中在中低海拔地区。由于高海拔地区观测数据及采样难度大,使得其研究相对缺乏,因此本文根据祁连山中段 8 个站点降水样品,结合同期气象因子,从降水同位素特征、局地大气降水线和云下蒸发等方面进行分析,对祁连山高海拔地区降水同位素进一步研究,深入了解干旱区降水同位素演化过程,以期为进一步开展干旱区同位素水文研究奠定基础。

1 研究区概况

研究区位于祁连山北坡中段(图 1),祁连山(93.5°~103.4°E, 35.5°~40°N, 海拔 4 000~5 000 m)位于亚欧大陆中部,总面积 181 689.1 km²,是青藏高原东北部最大的边缘山系,其地形地貌较为复杂。南北以柴达木、茶卡盆地及河西走廊为界,东西以秦岭、六盘山及阿尔金山为界^[30,31]。祁连山区远离海洋,长期受西风气流控制,具有典型的大陆性气候和高原气候的特征,年均降水量 300~

700 mm 左右,是一座天然“高山水塔”,同时也是我国河西内陆水系、青海内陆水系以及黄河上游水系的发源地^[32,33]。祁连山北坡中段属于黑河流域发源地,年均气温 0.34℃,年降水量约 446 mm,夏季降水量约占全年的 86%,同时降水量从东向西呈减少趋势,并随海拔升高而增加^[34~36]。祁连山中段具有明显的垂直地带性,土地利用类型主要有冰雪、草甸、草原和少量灌耕地等^[37]。

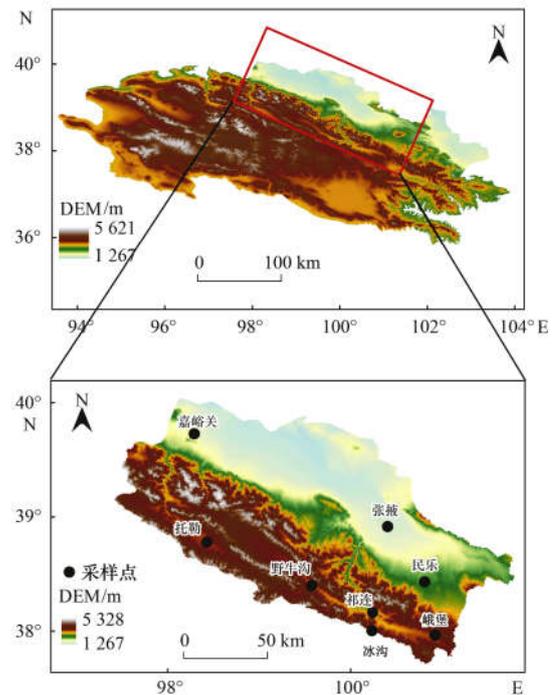


图 1 研究区位置及降水采样点分布示意

Fig. 1 Geographical position of study area and sampling in precipitation

2 材料与方法

2.1 样品采集

选取祁连山北坡中段 8 个站点为降水样品采集点(图 1),采样点位置与降水样品明细见表 1。降水样品都是以次降水为单位进行采集,为减小建筑物其他可能污染源对样品的影响,须将样品收集器远离地面。每次采样结束,立即将样品装在提前净化

表 1 研究区采样点状况

Table 1 Sampling stations in study region

采样点	海拔/m	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	降水样品/个	研究时段(年-月)	数据来源
冰沟	4 147	100.24	38.02	145	2014-01~2015-01	本研究
祁连	2 787	100.25	38.18	74	2013-05~2014-05	本研究
民乐	2 282	100.83	38.44	58	2013-05~2014-05	本研究
张掖	1 483	100.43	38.93	21	2013-05~2014-05	本研究
峨堡	3 460	100.93	37.97	91	2013-05~2014-05	[38]
野牛沟	3 180	99.58	38.42	78	2013-05~2014-05	[38]
托勒	3 367	98.42	38.80	53	2013-11~2014-12	[39]
嘉峪关	1 658	98.27	39.75	25	2013-11~2014-12	[39]

好的聚乙烯瓶中并用封口膜封住,同时贴好标签存放至冰箱冷藏,以防止蒸发,并且由气象观测人员记录同期气象数据.

2.2 分析方法

降水样品在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所内陆河流域生态水文重点实验室完成测试,采用稳定同位素红外光谱技术的液态水稳定同位素分析仪 (Model DLT-100, Los Gatos Research, Inc, Mountain View, CA) 测定降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H 的测试精度分别为 0.2‰ 和 0.5‰. 同位素测试的标准样选择为 5 个,分别为: LGR1A ($\delta^{18}\text{O} = -19.5\text{‰}$, $\delta\text{D} = -154.5\text{‰}$)、LGR2A ($\delta^{18}\text{O} = -15.5\text{‰}$, $\delta\text{D} = -116.5\text{‰}$)、LGR3A ($\delta^{18}\text{O} = -13.1\text{‰}$, $\delta\text{D} = -96.4\text{‰}$)、LGR4A ($\delta^{18}\text{O} = -7.7\text{‰}$, $\delta\text{D} = -51.1\text{‰}$) 和 LGR5A ($\delta^{18}\text{O} = -2.8\text{‰}$, $\delta\text{D} = -9.5\text{‰}$), 测定数据的有效位数符合张自超等^[40]对稳定同位素分析结果的有效位数规则,即所有数据均保留一位有效数字. 测定结果通过校准,结果以 Vienna“标准平均海水”(V-SMOW)的千分差来表示:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{或}\delta\text{D}) = \left[\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{V-SMOW}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表降水样与国际通用标准样中的氧或氢稳定同位素比率; R 为同位素的比值 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 D/H). 为了量化不同地区的大气降水线与全球大气降水线在斜率和截距上的偏移及比较这种差异, Dansgaard^[2]在前人基础上首次定义了过量氘: $d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$, 可用于判断降水来源地气候特征.

3 结果与分析

3.1 降水稳定同位素的时间变化

如图 2 所示, 研究区 8 个站点降水稳定同位素的季节变化明显, 均表现为夏半年富集, 冬半年贫化的特征, 与我国西南地区以及太湖流域氢氧同位素组成所表现的季节效应相反^[41,42], 与干旱区大多数站点季节变化过程相似^[17].

采样期间, 研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ (δD) 值的变化范围为从 $-29.7\text{‰} \sim 8.3\text{‰}$ ($-219.2\text{‰} \sim 60.9\text{‰}$), 年降雨量加权值为 -6.1‰ (-31.7‰), $d\text{-excess}$ 的年降雨量加权值为 17.1‰ , 变化范围为 $-23.5\text{‰} \sim 40.4\text{‰}$. 降水稳定同位素值年际变化较大, $\delta^{18}\text{O}$ 值冬、夏相差高达 30‰ 之多, $d\text{-excess}$ 值相差超过 50‰. 原因是冬、春季降水水汽主要由西风输送, 而且长的传输路径使水汽重同位素不断贫化, 而夏季、秋季稳定同位素主要受强烈蒸发影响, 对降水

量较小的降水事件影响更为显著, 已有研究证实在黑河流域存在降水量小, 但是降水中重同位素含量高的现象^[43,44]. 如峨堡站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 6.8‰ (降水量为 0.8 mm, 2013-09-16), 祁连站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 8.3‰ (降水量为 1.3 mm, 2013-07-04). 进一步研究发现, 研究区祁连站和野牛沟站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 值在时间尺度上变化趋势一致, 其余 6 个站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 值则表现出反向变化趋势, 其原因主要是 $d\text{-excess}$ 受水汽源地水体蒸发时周围空气相对湿度的影响^[45], 陆地蒸发性水汽补充到原始水汽中使得降水中 $d\text{-excess}$ 增加, 此类现象也发生在托来河流域及古浪河流域^[40,46].

3.2 降水稳定同位素的空间变化

如图 3(a) 所示, 在区域尺度上降水中 $\delta^{18}\text{O}$ (δD) 值随海拔的升高而呈明显的下降趋势, 相对较高值主要分布在走廊平原, 特别是在张掖地区, 而低值主要分布在祁连山区, 从海拔最低的张掖站到海拔最高的冰沟站, $\delta^{18}\text{O}$ (δD) 年降雨量加权值变化范围为 -2.3‰ (-4.4‰) $\sim -7.9\text{‰}$ (-42.7‰). 而 $d\text{-excess}$ 值在区域尺度上与 $\delta^{18}\text{O}$ 值相反, 较高值分布在祁连山区, 各站点的年均值随海拔的升高呈增加趋势 [图 3(b)]. $d\text{-excess}$ 年降雨量加权值的变化范围为 $14.1\text{‰} \sim 20.5\text{‰}$, 造成这种趋势的原因可由以下两点解释: ① 张掖地区所在的走廊平原地区受到强烈的云下二次蒸发作用; ② 在祁连山区局地水汽再循环作用更为强烈, 反映出在空间上降水稳定同位素随海拔和局地气候状况的变化. 进一步计算结果表明, 研究区年 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 $d\text{-excess}$ 的海拔效应分别为 $-0.19\text{‰}/100\text{ m}$ 、 $-0.72\text{‰}/100\text{ m}$ 和 $0.77\text{‰}/100\text{ m}$, Poage 等^[47]的研究表明除同位素递减率较高的极端纬度地区外, 全球降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 垂直变化梯度的平均值为 $-0.28\text{‰}/100\text{ m}$ (海拔 5 000 m 以下地区); 吴锦奎等^[43]研究黑河流域 $\delta^{18}\text{O}$ 的海拔梯度为 $-0.47\text{‰}/100\text{ m}$, 而在乌鲁木齐河流域存在降水同位素正高程梯度 $0.12\text{‰}/100\text{ m}$, 此现象是由水汽再循环和云下蒸发过程影响所致^[48].

3.3 局地大气降水线 (LMWL)

如图 4(a) 所示为研究区局地大气降水线 ($\delta\text{D} = 7.82\delta^{18}\text{O} + 13.77$), 降水线斜率小于全球降水线的斜率, 但截距高于 10‰, 表明研究区在云下蒸发作用的同时受到强烈局地蒸发影响, 导致降水线斜率偏小, Friedman 等^[49]首先提出雨滴受到蒸发作用使得大气降水线斜率小于 8. 进一步分析得到研究区固态降水及液态降水局地大气降水线存在明显的差异, 固态降水大气水线为 $\delta\text{D} = 8.29\delta^{18}\text{O} + 25.70$, 液态降水大气水线为 $\delta\text{D} = 7.84\delta^{18}\text{O} + 12.78$, 两者

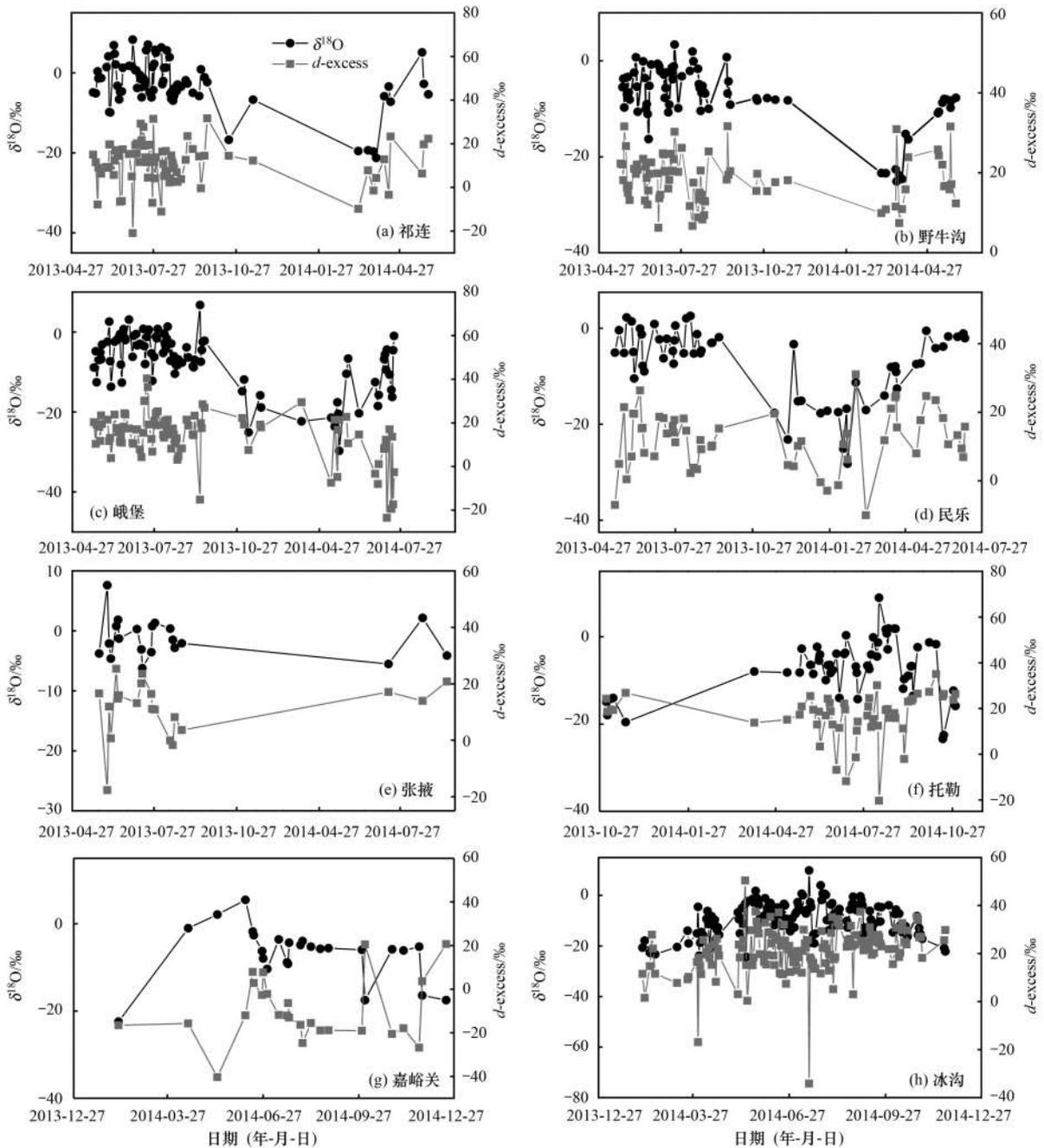
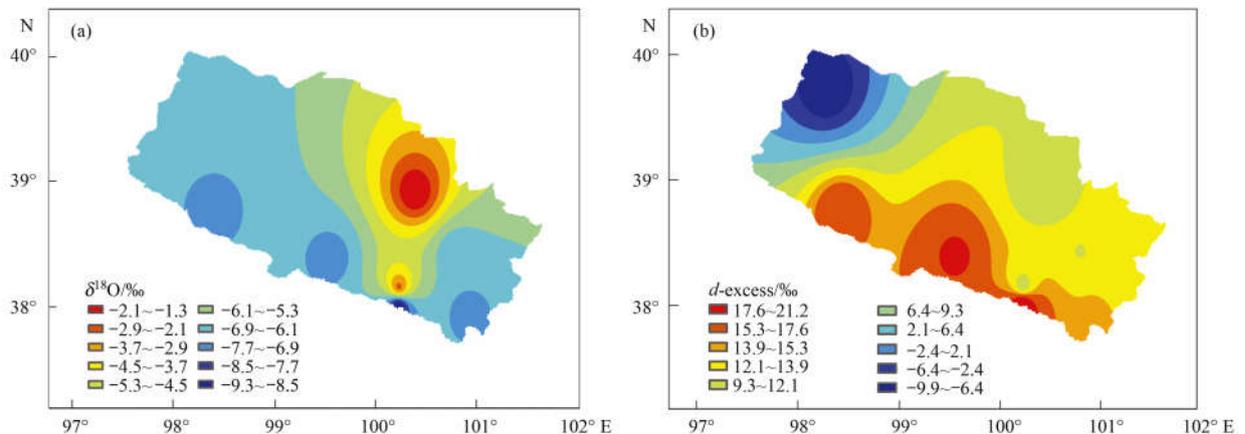


图2 研究区各站点降水同位素的时间变化

Fig. 2 Temporal variation of precipitation isotopes in the study area

斜率和截距都相差较大,造成如此大差异的原因是固态降水大多发生在冬、春季,温度较低,而液态降水发生在夏、秋季,气温高且蒸发强烈,固态降水除了受到干燥的环境和云下蒸发作用之外,更多地受到局地再循环水汽的影响。研究区各站点的局地大气降水线:冰沟($\delta D = 8.13 \delta^{18}O + 22.49$)、祁连($\delta D = 7.83 \delta^{18}O + 10.33$)、民乐($\delta D = 8.18 \delta^{18}O + 13.29$)、张掖($\delta D = 6.43 \delta^{18}O + 8.25$)、峨堡($\delta D = 8.16 \delta^{18}O + 15.48$)、野牛沟($\delta D = 8.12 \delta^{18}O + 19.21$)、托勒站($\delta D = 7.69 \delta^{18}O + 15.53$)和嘉峪关站($\delta D = 6.86 \delta^{18}O - 17.7$)。同一区域8个站点局地降水线斜率以及截距差异如此之大的原因是二次蒸

发的强弱程度和局地水汽再循环作用不同。在祁连山高海拔区(冰沟、峨堡、祁连、野牛沟和托勒站)主要受到强烈的水汽再循环作用,使得斜率和截距升高,而在走廊平原区(包括民乐、张掖和嘉峪关站)较低的斜率主要是较为干燥的大气环境和较强的蒸发过程所导致。同时,将研究区分为2000 m以上高海拔山区(冰沟、祁连、民乐、峨堡、野牛沟、托勒)以及2000 m以下走廊平原区(嘉峪关站和张掖站),分析发现2000 m以上的高海拔山区各站点降水线方程截距和斜率都相对较高,表明高海拔山区除了受到云下蒸发作用之外,还受到局地再循环水汽以及水汽源地的影响;而2000 m以下走廊平原

图3 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 的空间变化Fig. 3 Spatial change of $\delta^{18}\text{O}$ and $d\text{-excess}$

区(嘉峪关站和张掖站)降水线斜率和截距都相对较低,可能受到云下二次蒸发的影响。

如图4(b)所示,研究区各站点大气降水线的斜率和截距随着海拔的增加而增加,反映出高海拔地区局地再循环水汽对降水稳定同位素浓度的影响较大,而低海拔地区主要受云下蒸发过程的影响,此现象在托来河流域^[40]、古浪河流域^[46]和乌鲁木齐河

流域^[50]也得到证实。进一步分析发现研究区降水线截距整体上呈现增加的趋势,而在2 000 m以下1 500 m左右截距相差较大,主要体现在张掖站以及嘉峪关站,相较于张掖站,嘉峪关站受到强烈云下蒸发过程的影响,导致降水线截距较小,而2 250 m左右及以上,各站点大气降水线斜率变化不大且都接近于8,其原因主要是受到平衡分馏作用的影响。

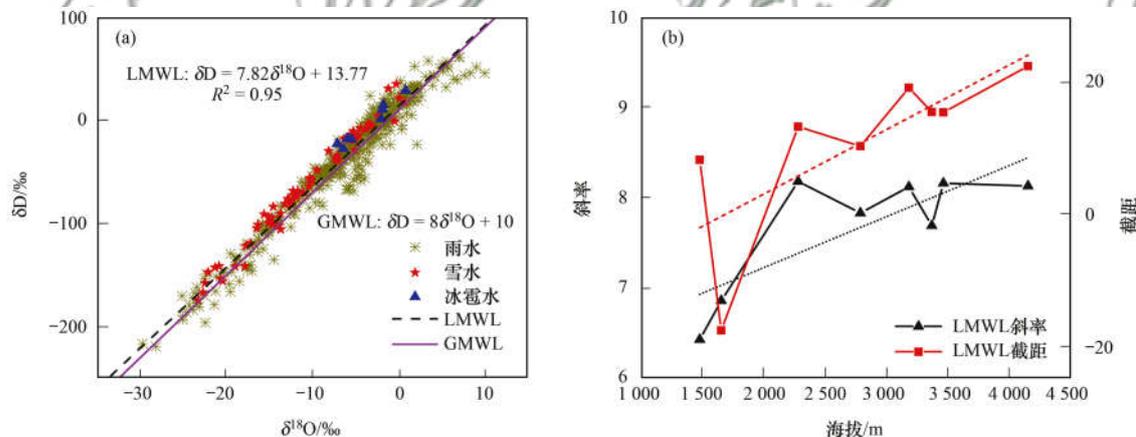


图4 研究区局地大气降水线和各站点大气降水线斜率、截距与海拔的关系

Fig. 4 Local meteoric water line for study area and the relationship between the slope, intercept, and altitude of the local precipitation line

3.4 降水稳定同位素与局地气象因子的相关关系

降水同位素值变化是一个蒸发和凝结的物理过程,影响其分布的因素主要有区域环境背景和区域地理特征(温度、降水量、相对湿度等)^[12]。如图5所示,降水同位素与相对湿度、降水量没有明显的相关关系,而表现出显著的温度效应,因此本文着重分析了降水的温度效应以及降水量效应。

3.4.1 降水稳定同位素与温度的关系

如表2为研究区降水稳定同位素数据与温度的关系,以气温0℃和10℃为界,据此可将所有数据划分为3类(其中张掖站在观测期所采数据都在10℃以上,冰沟站都在10℃以下):气温0℃以下为第一组,该组数据中所有站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与日均温度呈

明显的正相关, $d\text{-excess}$ 和日均温度展现出显著的负相关,其原因是当气温在0℃以下时,降水过程中主要受平衡分馏影响^[51, 52],而且 $\delta^{18}\text{O}$ 和气温的相关系数随台站海拔的升高而增大,反映了水汽随海拔抬升而发生的绝热冷却过程。当气温在0~10℃之间时,除峨堡站、祁连、野牛沟站外, $\delta^{18}\text{O}$ 值随气温变化无明显变化趋势,展现出稳定状态,而 $d\text{-excess}$ 值除峨堡站外都展现出稳定状态,反映出气温上升引起的 $\delta^{18}\text{O}$ 富集效应以及降水稳定同位素受到的云下蒸发作用被局地水汽再循环过程的影响所抵消。第三组数据 $\delta^{18}\text{O}$ 随气温的升高而升高,呈现出不明显的温度效应,而 $d\text{-excess}$ 则随着气温的上升显著降低,这些降水事件主要发生在夏季,受到了强烈的

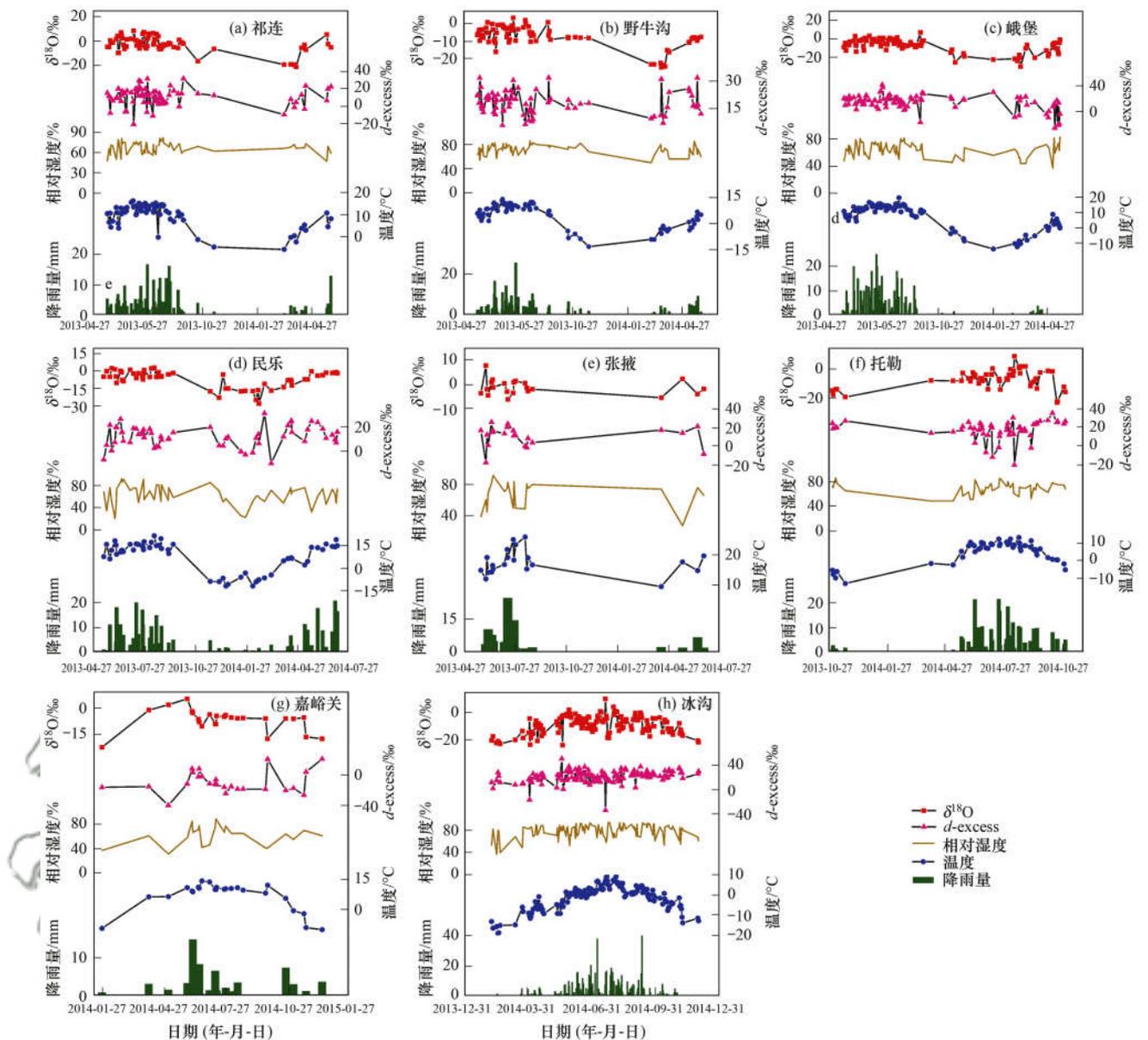


图5 研究区各站点降水同位素与气象因子的相关关系

Fig. 5 Relationship between precipitation isotope and meteorological factors in the study area

云下蒸发影响. 此前, Pang 等^[52] 在新疆的乌鲁木齐河流域也发现了类似的现象, 已有研究也认为这是强烈云下蒸发影响的明显表征^[53].

研究区降水中稳定同位素温度效应显著, $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应为 0.64‰ , 即温度每升高 1℃ , $\delta^{18}\text{O}$ 增加 0.64‰ . 峨堡站、野牛沟站、祁连站、民乐站、张掖站、托勒站、嘉峪关站和冰沟站所有次降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出的温度效应依次为 0.67‰ 、 0.28‰ 、 0.78‰ 、 0.65‰ 、 0.18‰ 、 0.60‰ 、 0.37‰ 和 0.62‰ , 除张掖站外降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与日平均气温都具有明显的正相关关系, 同时随着海拔的降低, 降水稳定同位素表现的温度效应也减小. 而在观测期内 $d\text{-excess}$ 除了峨堡站表现出显著的温度效应 (0.30‰) 外, 其他各站点与日均温度相关关系不明显. 这些研

究结果表明, 降水稳定同位素演化主要受云下蒸发过程的影响, 而且局地水汽再循环过程引起的稳定同位素贫化效应被强烈的云下蒸发影响所主导, 同时反映出内陆干旱区不同海拔降水稳定同位素温度效应的差异性及其降水同位素演化过程的复杂性.

3.4.2 降水稳定同位素与降水量的关系

研究区降水量主要集中在夏季, 约占全年降水量的 71% , 整个采样期间降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 不存在降水量效应, 因此本文重点分析研究区夏季降水稳定同位素的特征. 如表 3 所示, 各站点降水稳定同位素在夏季都表现出一定的降水量效应, 其中在峨堡站和托勒站 8 月、祁连站和民乐站 7 月的降水量效应较为显著, 而张掖站 8 月以及托勒站、嘉峪关站和冰沟站 7 月与降水量呈正相关关系, 不存在温度效应.

造成此现象可能有以下两种原因:①降水水汽来源 烈的蒸发作用导致同位素分馏,使得降水量大但稳定的不同;②在夏季较高的气温下,张掖站受到更为强 定同位素值仍较高。

表 2 研究区各站点不同温度范围内的温度效应

Table 2 Temperature effects in different temperature range of each site in the research area

站点	$\delta^{18}\text{O}$ 温度效应/ $\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1}$ (R^2)			所有降水事件
	0°C以下	0~10°C	10°C以上	
峨堡	0.94(0.25)	0.77(0.27)	0.02(0.00)	0.67(0.60)
野牛沟	0.12(0.00)	0.30(0.04)	0.42(0.01)	0.28(0.36)
祁连	0.99(0.05)	1.54(0.53)	0.20(0.01)	0.78(0.41)
民乐	0.32(0.02)	0.39(0.06)	0.50(0.17)	0.65(0.73)
张掖	—	—	0.18(0.05)	0.18(0.05)
托勒	0.83(0.67)	0.01(0.00)	2.68(0.55)	0.60(0.36)
嘉峪关	0.04(0.00)	-0.44(1.00)	-0.63(0.15)	0.37(0.31)
冰沟	0.89(0.48)	0.66(0.09)	—	0.62(0.20)

站点	d -excess 温度效应($\text{‰}\cdot\text{°C}^{-1}$) (R^2)			所有降水事件
	0°C以下	0~10°C	10°C以上	
峨堡	-0.93(0.11)	2.88(0.38)	0.30(0.01)	0.30(0.05)
野牛沟	0.10(0.00)	0.17(0.01)	-2.43(0.10)	0.01(0.00)
祁连	-1.2(0.20)	-0.36(0.01)	-0.12(0.00)	0.15(0.01)
民乐	-1.15(0.08)	0.12(0.001)	-1.02(0.17)	0.14(0.03)
张掖	—	—	-0.47(0.03)	-0.47(0.03)
托勒	-0.55(0.21)	-1.07(0.23)	-2.86(0.10)	-0.50(0.12)
嘉峪关	-15.66(0.36)	4.48(1.00)	2.08(0.2)	-0.13(0.01)
冰沟	0.56(0.08)	-1.0(0.06)	—	0.15(0.01)

表 3 研究区夏季降水稳定同位素的特征

Table 3 Characteristics of stable isotopes of summer precipitation in the study area

站点	日期(年-月)	$\delta^{18}\text{O}$ 降水量效应/ $\text{‰}\cdot\text{mm}^{-1}$ (R^2)	δD 降水量效应/ $\text{‰}\cdot\text{mm}^{-1}$ (R^2)	降水事件次数
峨堡	2013-06	-0.29(0.14)	-2.97(0.20)	14
	2013-07	-0.23(0.17)	-1.62(0.10)	18
	2013-08	-0.31(0.29)	-2.85(0.30)	16
野牛沟	2013-06	-0.51(0.20)	-4.35(0.19)	12
	2013-07	-0.22(0.12)	-1.76(0.12)	18
	2013-08	-0.06(0.01)	-0.79(0.01)	13
祁连	2013-06	-1.33(0.27)	-9.33(0.21)	13
	2013-07	-0.55(0.19)	-2.35(0.08)	21
	2013-08	-0.30(0.07)	-2.08(0.06)	16
民乐	2013-06	-0.34(0.21)	-2.13(0.13)	7
	2013-07	-0.33(0.63)	-2.44(0.63)	9
	2013-08	-0.10(0.02)	-0.83(0.03)	7
张掖	2013-06	-0.60(0.24)	-4.62(0.30)	6
	2013-07	-0.18(0.29)	-1.15(0.28)	6
	2013-08	0.79(0.09)	4.1(0.07)	4
托勒	2014-06	-0.36(0.33)	-2.53(0.31)	11
	2014-07	0.12(0.03)	0.57(0.01)	8
	2014-08	-0.41(0.40)	-2.62(0.30)	12
嘉峪关	2014-06	-0.22(0.06)	-1.42(0.05)	5
	2014-07	0.19(0.02)	-2.47(0.08)	5
	2014-08	-0.03(0.003)	-1.26(0.14)	5
冰沟	2014-06	-0.17(0.03)	-1.47(0.02)	25
	2014-07	0.04(0.002)	0.37(0.004)	22
	2014-08	-0.68(0.01)	-0.05(0.002)	21

4 讨论

4.1 云下蒸发对降水同位素的影响

通常,降水受到云下二次蒸发的影响将导致

$\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 富集以及 d -excess 贫化,并且大气降水线的斜率和截距也会发生变化^[54]。在不同气象条件下降水稳定同位素值的变化以及大气降水线斜率和截距的变化可用来反映云下二次蒸发的存在^[55-57]。

如表 4 所示,就降水时气温在 0℃ 以上的降水事件而言,随着气温升高,降水稳定同位素值逐步偏正,而 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系线的斜率和截距展现出明显的降低趋势。 $\delta^{18}O$ 值从 $-8.6‰$ (当 $0 < T \leq 5^\circ C$) 升高到 $-0.7‰$ (当 $T > 20^\circ C$),相应地 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系线的斜率从 8.59 降低到 6.28,其截距从 15.6‰ 降低到 5.7‰。这些事实表明,当降水时的气温在 0℃ 以上时,云下蒸发对降水稳定同位素产生明显的富集作用。更为显著的是,随着气温升高蒸发过程增强,降低的斜率和截距印证了雨滴降落过程中云下蒸发不断加强的事实。需要强调的是,云下蒸发对降雪事件或者 0℃ 以下降水事件无明显影响。随着降水量的增加, $\delta^{18}O$ 值展现出一个降低趋势,而 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系线的斜率和截距呈现出增加趋势(表 4)。就较大降水量事件或连

续降水事件而言,大气饱和水汽压相对较高,因此相对湿度也不断增大,从而引起云下蒸发强度逐步减弱,进而稳定同位素浓度富集程度较低。综上,云下蒸发过程对降水稳定同位素浓度产生了明显影响,特别是对小降水量降水事件的影响更大,而且这一影响随着降水量的增加而逐步减弱。

水汽从源地运移到研究区的过程中,相对湿度对降水稳定同位素的影响最为明显,当相对湿度是 100% 时,稳定同位素平衡分馏发生,其值遵循瑞利分馏规律^[4]。如表 4 所示,随着相对湿度降低, $\delta^{18}O$ 值从 $-5.5‰$ ($70\% < H$) 增加到 $-5.2‰$ ($H \leq 50\%$),而且 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系线中的斜率和截距明显降低:斜率从 8.07 降低到 7.83,截距从 14.1‰ 降低到 11.9‰,再次反映较高的相对湿度下较弱的云下蒸发影响。

表 4 研究时段内不同气温、降水和相对湿度下 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系的斜率、截距和 R^2 变化

Table 4 Values of $\delta^{18}O$ and $\delta D-\delta^{18}O$ correlation for parameters for different air temperatures, precipitation, and relative humidity intervals

气温 (T)/℃	$\delta^{18}O/‰$	$\delta D/‰$	d -excess	$\delta D-\delta^{18}O$		
				斜率	坡度	R^2
$T \leq 0$	-15.58	-120.71	11.96	8.15	14.44	0.97
$0 < T \leq 5$	-8.56	-57.87	10.59	8.59	15.64	0.91
$5 < T \leq 10$	-5.96	-29.66	18.11	7.71	16.33	0.93
$10 < T \leq 15$	-2.59	-6.87	13.82	7.45	12.40	0.92
$15 < T \leq 20$	-1.69	-0.32	13.18	7.37	12.12	0.92
$T > 20$	-0.71	1.16	6.87	6.28	5.65	0.72
降水 (P)/mm	$\delta^{18}O/‰$	$\delta D/‰$	d -excess	$\delta D-\delta^{18}O$		
				斜率	坡度	R^2
$0 < P \leq 1$	-9.1	-61.3	11.2	7.88	10.18	0.97
$1 < P \leq 5$	-5.1	-27.69	13.18	7.89	12.64	0.97
$5 < P \leq 10$	-5.2	-25.15	16.50	8.50	19.13	0.96
$10 < P \leq 15$	-3.91	-17.54	13.88	8.23	14.89	0.94
$P > 15$	-6.2	-30.9	18.7	8.30	20.55	0.94
相对湿度 (H)/%	$\delta^{18}O/‰$	$\delta D/‰$	d -excess	$\delta D-\delta^{18}O$		
				斜率	坡度	R^2
$H \leq 50$	-5.24	-29.17	13.10	7.83	11.89	0.99
$50 < H \leq 60$	-5.50	-30.51	13.51	7.84	12.64	0.96
$60 < H \leq 70$	-6.54	-38.25	14.05	8.05	14.41	0.97
$H > 70$	-5.54	-30.66	13.87	8.07	14.10	0.95

4.1.1 降落雨滴的云下蒸发率(f)

以上分析证实,云下蒸发对降水稳定同位素浓度的影响是显著的。因此,计算了降落雨滴的云下蒸发率(f),即雨滴从云底到地面被蒸发的水量,蒸发掉的部分用百分数来表示。依据之前的研究^[58, 59],祁连山和河西走廊地区雨滴的平均半径为 0.4 mm。计算得研究区 5、6、7 和 8 月的平均雨滴蒸发率分别为 23%、11%、12% 和 16%。就空间分布而言(图 6),除 6 月份外,平均雨滴蒸发率从西北到东南展现出明显的降低趋势,较低值主要分布在高海拔的祁连山区,而高值主要分布在走廊平原,特别是嘉峪关地区。不同地形区的平均雨滴蒸发率值也印证了这一特征,在祁连山高海拔区(冰沟、峨堡、祁连、野牛沟和托勒站)5、

6、7 和 8 月的平均雨滴蒸发率分别为 16%、11%、9% 和 9%,在走廊平原区(包括民乐、张掖和嘉峪关站)相应的值分别为 35%、11%、17% 和 27%。

4.1.2 $\delta^{18}O$ 云下蒸发富集率(E)

Froehlich 等^[53]探讨了云下蒸发过程对降水同位素的影响,发现云下蒸发可以改变降水同位素达 20%,因此进一步评估了云下蒸发对降水稳定同位素浓度的影响,并将其定义为 $\delta^{18}O$ 云下蒸发富集率(E)。计算表明,云底降水的稳定同位素受云下蒸发影响,在 5、6、7 和 8 月分别富集了 46%、27%、38% 和 32%。从空间分布来看(图 7),除 6 月份外, $\delta^{18}O$ 云下蒸发富集率(E)从祁连山到河西走廊方向展现出明显的降低趋势,区域尺度上从西北到东南

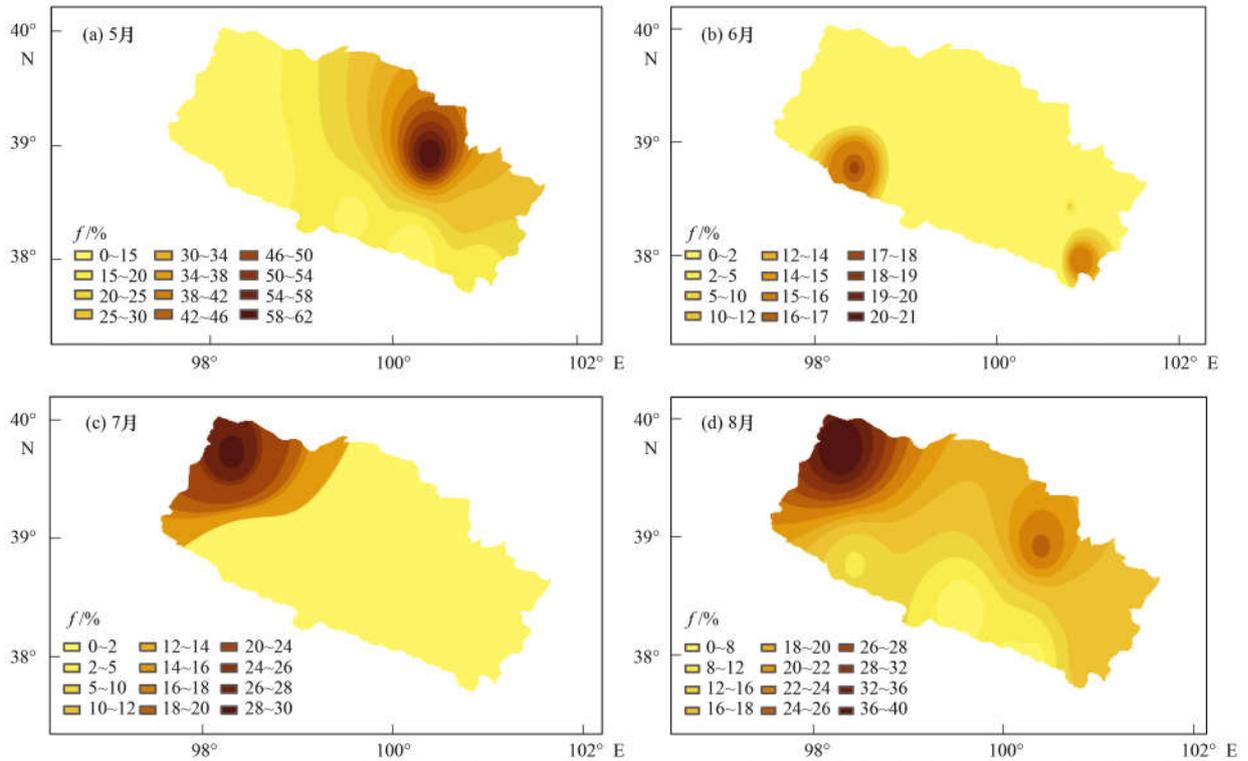


图 6 研究区降落雨滴的云下蒸发率的空间变化

Fig. 6 Spatial pattern on the evaporation rate of falling drops from cloud base to ground

方向逐步降低. 这一特征也可由不同地形区相应的均值反映出来. 在祁连山高海拔区(冰沟、峨堡、祁连、野牛沟和托勒站)5、6、7和8月的 $\delta^{18}\text{O}$ 云下蒸发富集率(E)分别为30%、34%、33%和26%,在走廊平原区(包括民乐、张掖和嘉峪关站)相应的值

分别为72%、15%、46%和41%. 就季节变化而言,研究区内各站点 $\delta^{18}\text{O}$ 云下蒸发富集率(E)在5月均为最高值,6月较低,而后6~8月其值波动增高,而且走廊平原的站点其年内波动幅度显著大于祁连山区(图7).

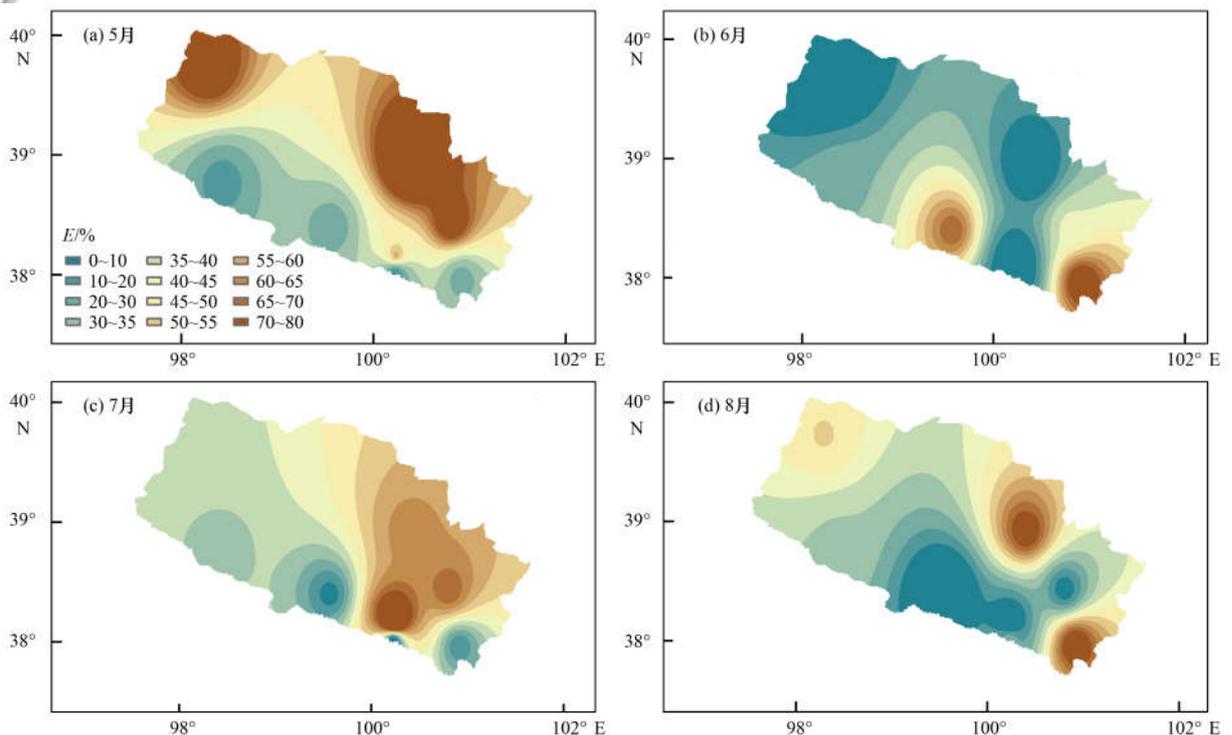


图 7 研究区 $\delta^{18}\text{O}$ 云下蒸发富集率空间变化

Fig. 7 Spatial pattern of the relative influence of sub-cloud evaporation on the $\delta^{18}\text{O}$ composition of precipitation

4.2 水汽来源对降水同位素的影响

本研究表明,大气降水同位素值不仅与局地气象因子存在相关关系,同时也与大气水汽输送过程紧密联系. 降水的水汽气团来源及其性质是决定降水同位素组成的重要因素^[60],有研究表明德令哈地区水汽来源主要为局地蒸发^[61];陕甘宁地区夏半年主要有来自孟加拉湾的水汽、东南季风水汽和西风带水汽,冬半年以西风带水汽为主^[62];滇南蒙自地区干季降水的水汽主要来自于西风带输送及局地再蒸发水汽,而湿季降水的水汽主要来源于远源海洋水汽的输送^[63]. 通过前人大量的研究,对我国西北干旱区外来水汽对降水的影响已有了清晰的认识^[17,64,65],降水的水汽来源主要为北极的极地气团、中亚的大陆气团、西太平洋赤道地区的海洋气团以

及印度洋的海洋气团. 在所有水汽源中,祁连山地区水汽来源以西风水汽为主,在夏季季风最强时,在天气尺度下也可到达研究区,并有部分局地再循环水汽补给作用^[62].

冰沟站在整个观测期内 *d-excess* 值的年际波动非常大,其值的变化范围为从 -34.16‰ ~ 50.42‰, *d-excess* 的年降雨量加权值为 20.5‰,说明降水水汽来源以大陆性局地水汽气团为主,并且水源区气候干燥,夏季 *d-excess* 的年降雨量加权值是 20.4‰,冬季为 23.7‰. 冬半年多为固态降水,温度较低,云下二次蒸发的影响十分微弱,因此呈现出较高的 *d-excess* 值. 因此本文以冰沟为例,在夏季连续降雨条件下运用 HYSPLIT 模型模拟了 1 500、2 500 和 5 000 m 高度水汽来源轨迹(图 8). 在 2014

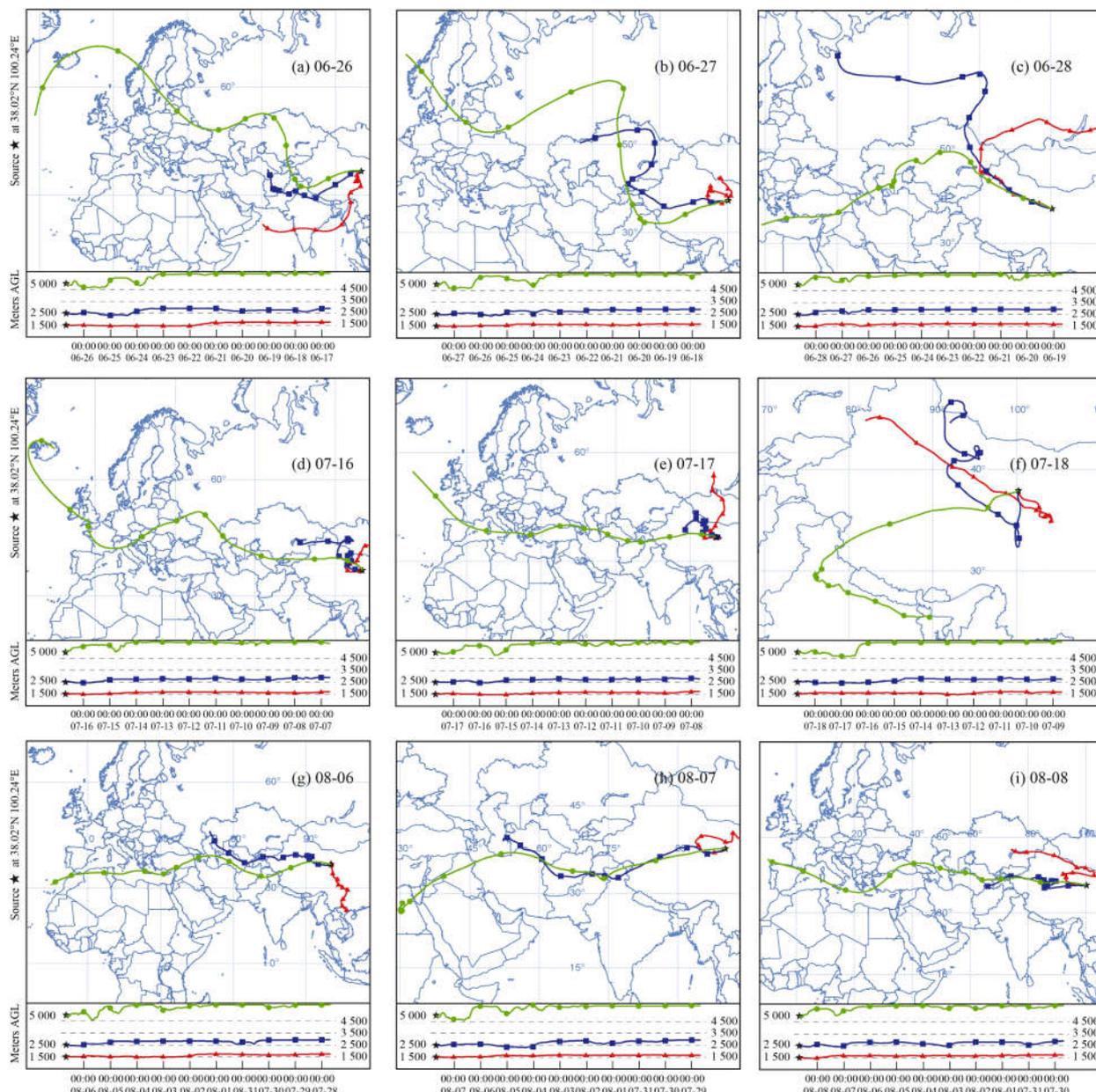


图 8 冰沟站夏季连续降水水汽来源后向轨迹图

Fig. 8 Back trajectories for continuous summer precipitation events at Binggou station

年6、7和8月连续降水条件下,水汽来源主要是西风水汽. 其中在6月26日,1 500、2 500和5 000 m高度下水汽来源分别为西南季风携带的海洋性水汽、西风水汽以及北极的极地气团,并随着降水时间的持续,水汽来源逐渐向北偏移,在6月28日,3个高度的水汽来源在中亚地区重合;在7月16、17和18日,1 500和2 500 m高度下水汽来源都为局地蒸发水汽,而5 000 m高度下7月16和17日水汽来源为西风水汽,7月18日变为西南季风水汽;8月6日,1 500 m高度水汽来源为东南季风水汽,随着降水时间的持续,在8月7日为北方大陆气团,8月8日变为西风水汽;而2 500和5 000 m高度水汽来源在8月的6、7和8日都为西风水汽. 综上,在夏季连续降雨条件下,冰沟站降水的水汽来源主要为西风水汽,同时受到局地蒸发水汽的影响.

5 结论

(1) 研究区降水稳定同位素季节变化明显,表现为夏半年富集,冬半年贫化的特征;在时间尺度上除祁连站和野牛沟站,其余站点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d -excess 值均表现出反向变化趋势. 在空间尺度上 $\delta^{18}\text{O}$ (δD) 值随海拔的升高而减小,年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 d -excess 的海拔效应分别为 $-0.19\text{‰}/100\text{ m}$ 、 $-0.72\text{‰}/100\text{ m}$ 和 $0.77\text{‰}/100\text{ m}$.

(2) 建立研究区局地大气降水线($\delta\text{D} = 7.82\delta^{18}\text{O} + 13.77$)以及各个站点局地大气降水线,其斜率和截距都随海拔的增加而增加,同时2 000 m以上的高海拔山区受到更强烈的局地再循环水汽的影响.

(3) 降水同位素温度效应显著且仅在夏季存在微弱的降水量效应,全年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应为 0.64‰ . 峨堡站、野牛沟站、祁连站、民乐站、张掖站、托勒站、嘉峪关站和冰沟站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出的温度效应依次为 0.67‰ 、 0.28‰ 、 0.78‰ 、 0.65‰ 、 0.18‰ 、 0.60‰ 、 0.37‰ 和 0.62‰ .

(4) 研究区云下蒸发对降水稳定同位素浓度的影响显著. 在5、6、7和8月,研究区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均雨滴蒸发率分别为23%、11%、12%和16%,云下蒸发富集率46%、27%、38%和32%. 在空间尺度上,除6月份外平均雨滴蒸发率以及云下蒸发富集率都展现为从西北到东南明显地降低趋势.

(5) 运用 HYSPLIT 模型模拟发现,在夏季连续降雨条件下,研究区降水的水汽来源主要为西风水汽,同时受到局地蒸发水汽的影响.

参考文献:

[1] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

- Gu W Z. Isotope hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [3] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [4] Craig H, Gordon L I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere[M]. Pisa: Laboratorio di geologianucleare, 1965.
- [5] Giustini F, Brilli M, Patera A. Mapping oxygen stable isotopes of precipitation in Italy[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016, **8**: 162-181.
- [6] Li Z, Yao T D, Tian L D, et al. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation from the Muztagata Glacier, East Pamirs[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, **49**(1): 36-42.
- [7] Wu J K, Ding Y, Ye B, et al. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **61**(6): 1123-1134.
- [8] 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J]. 科学通报, 2011, **56**(1): 58-67.
- Zhao L J, Yin L, Xiao H L, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, **56**(4-5): 406-416.
- [9] 吴军年, 王红. 张掖大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及水汽来源[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(3): 1601-1604.
- Wu J N, Wang H. Characteristics of the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and water vapor source in Zhangye[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(3): 1601-1604.
- [10] 王宁练, 张世彪, 蒲健辰, 等. 黑河上游河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化特征及其影响因素研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(6): 914-920.
- Wang N L, Zhang S B, Pu J C, et al. Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in river water in the upper reaches of Heihe River basin and its influence factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(6): 914-920.
- [11] 王宁练, 张世彪, 贺建桥, 等. 祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究[J]. 科学通报, 2009, **54**(15): 2148-2152.
- Wang N L, Zhang S B, He J Q, et al. Tracing the major source area of the mountainous runoff generation of the Heihe River in northwest China using stable isotope technique[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(16): 2751-2757.
- [12] Li Y J, Zhang M J, Wang S J, et al. Stable isotope in precipitation in China: a review[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2012, **4**(1): 83-90.
- [13] 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 Z F, Tian L D, Yao T D, et al. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(6): 804-811.
- [14] Yao T D, Thompson L G, Jiao K Q, et al. Recent warming as recorded in the Qinghai-Tibetan cryosphere[J]. Annals of Glaciology, 1995, **21**: 196-200.
- [15] Yao T D, Thompson L G, Mosley-Thompson E, et al. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in North Tibetan ice cores[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, **101**(D23): 29531-29537.
- [16] Tian L, Yao T, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations

- in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108** (D9): 4293.
- [17] Tian L D, Yao T D, MacClune K, *et al.* Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D10): D10112.
- [18] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Oxygen-18 isotopes in precipitation on the eastern Tibetan Plateau [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**: 263-268.
- [19] 田立德, 姚檀栋, 沈永平, 等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究[J]. *水科学进展*, 2002, **13** (2): 206-210.
Tian L D, Yao T D, Shen Y P, *et al.* Study on stable isotope in river water and precipitation in Naqu River basin, Tibetan Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2002, **13** (2): 206-210.
- [20] 田立德, 马凌龙, 余武生, 等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38** (8): 986-992.
Tian L D, Ma L L, Yu W S, *et al.* Seasonal variations of stable isotope in precipitation and moisture transport at Yushu, eastern Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, **51** (8): 1121-1128.
- [21] 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 等. 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J]. *环境科学*, 2019, **40** (6): 2615-2623.
Wang S Y, Wang Q L, Wu J K, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and moisture sources in the headwaters of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (6): 2615-2623.
- [22] Yang Y G, Xiao H L, Qin Z D, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic records in monthly scales variations of hydrological characteristics in the different landscape zones of alpine cold regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **499**: 124-131.
- [23] Feng F, Feng Q, Liu X D, *et al.* Stable isotopes in precipitation and atmospheric moisture of pailugou catchment in Northwestern China's Qilian Mountains[J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, **27** (1): 97-109.
- [24] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. *环境科学*, 2019, **40** (5): 2122-2131.
Yuan R F, Li Z X, Cai Y Q, *et al.* Space-time characteristics and environmental significance of stable isotopes in precipitation at an arid inland river Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2122-2131.
- [25] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征[J]. *冰川冻土*, 2007, **29** (3): 440-445.
Zhang Y H, Wu Y Q. Characteristics of the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in the upper and middle reaches of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29** (3): 440-445.
- [26] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水中氢氧同位素与温度关系研究[J]. *干旱区地理*, 2007, **30** (1): 16-21.
Zhang Y H, Wu Y Q. Relation between oxygen and hydrogen isotopes in precipitation and temperature in Heihe River Basin, China[J]. *Arid Land Geography*, 2007, **30** (1): 16-21.
- [27] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域大气降水水汽来源分析[J]. *干旱区地理*, 2008, **31** (3): 403-408.
Zhang Y H, Wu Y Q. Precipitation from different water vapor sources in the Heihe River Basin, China [J]. *Arid Land Geography*, 2008, **31** (3): 403-408.
- [28] Zhang Y H, Song X F, Wu Y Q. Use of oxygen-18 isotope to quantify flows in the upriver and middle reaches of the Heihe River, Northwestern China[J]. *Environmental Geology*, 2009, **58** (3): 645-653.
- [29] 张应华, 仵彦卿. 黑河流域中游盆地地下水补给机理分析[J]. *中国沙漠*, 2009, **29** (2): 370-375.
Zhang Y H, Wu Y Q. Analysis of groundwater replenishment in the middle reaches of Heihe River [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29** (2): 370-375.
- [30] 刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 2008-2014 年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J]. *地理学报*, 2016, **71** (5): 754-767.
Liu X M, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Diurnal variation of summer precipitation and its influencing factors of the Qilian Mountains during 2008-2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71** (5): 754-767.
- [31] 王希强, 陈仁升, 刘俊峰. 气候变化背景下祁连山区负积温时空变化特征分析[J]. *高原气象*, 2017, **36** (5): 1267-1275.
Wang X Q, Chen R S, Liu J F. Spatial and temporal variation characteristics of accumulated negative temperature in Qilian Mountains under climate change [J]. *Plateau Meteorology*, 2017, **36** (5): 1267-1275.
- [32] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 近半个世纪以来祁连山区气温与降水变化的时空特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23** (4): 125-130.
Zhang Y Z, Zhang B, Liu Y Y, *et al.* Variation characteristics of air temperature and precipitation in Mt. Qilian region in recent half century [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23** (4): 125-130.
- [33] 郑勤, 陈仁升, 韩春坛, 等. 祁连山 TRwS204 与中国标准雨量筒降水观测对比研究[J]. *高原气象*, 2018, **37** (3): 747-756.
Zheng Q, Chen R S, Han C T, *et al.* Intercomparison study on precipitation observations of TRwS204 and Chinese standard precipitation gauge in the Qilian Mountains [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, **37** (3): 747-756.
- [34] Chen R S, Song Y X, Kang E S, *et al.* A cryosphere-hydrology observation system in a small alpine watershed in the Qilian Mountains of China and its meteorological gradient[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2014, **46** (2): 505-523.
- [35] Chen R, Liu J, Kang E, *et al.* Precipitation measurement intercomparison in the Qilian Mountains, Northeastern Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2015, **9** (2): 2201-2230.
- [36] 丁永健, 叶佰生, 周文娟. 黑河流域过去 40a 来降水时空分布特征[J]. *冰川冻土*, 1999, **21** (1): 42-48.
Ding Y J, Ye B S, Zhou W J. Temporal and spatial precipitation distribution in the Heihe Catchment, northwest China, during the past 40 a[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, **21** (1): 42-48.
- [37] 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布[J]. *西北林学院学报*, 2001, **16** (S1): 1-3.
Wang J Y, Chang X X, Ge S L, *et al.* Vertical distribution of the vegetation and water and heat conditions of Qilian Mountain (northern slope) [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, **16** (S1): 1-3.
- [38] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, *et al.* The influence from the shrinking cryosphere and strengthening evapotranspiration on hydrologic process in a cold basin, Qilian Mountains[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **144**: 119-128.

- [39] 李永格, 李宗省, 冯起, 等. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2661-2672.
Li Y G, Li Z S, Feng Q, *et al.* Environmental significance of the stable isotopes in precipitation at different altitudes in the Tuolai River Basin[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2661-2672.
- [40] 张自超, 丁梯平. 关于同位素地质测试数据的数据处理及结果表示[J]. 岩矿测试, 2000, **19**(1): 77-79.
Zhang Z C, Ding T P. Data processing and expression for analytical results in isotope geology [J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, **19**(1): 77-79.
- [41] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2015, **37**(4): 1094-1103.
Zhang G L, Jiao Y M, He L P, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in Southwest China: progress and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, **37**(4): 1094-1103.
- [42] 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分的影响[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.
- [43] 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1857-1866.
Wu J K, Yang Q Y, Ding Y J, *et al.* Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River basin[J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 1857-1866.
- [44] Zhou S Q, Nakawo M, Sakai A, *et al.* Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July 1 Glacier, Qilian Mountains in northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, **52**(21): 2963-2972.
- [45] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [46] 桂娟, 李宗省, 冯起, 等. 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 149-156.
Gui J, Li Z X, Feng Q, *et al.* Space-time characteristics and environmental significance of the stable isotopes in precipitation in the Gulang River Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 149-156.
- [47] Poage M A, Chamberlain C P. Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: Considerations for studies of paleoelevation change[J]. American Journal of Science, 2001, **301**(1): 1-15.
- [48] Kong Y L, Pang Z H. A positive altitude gradient of isotopes in the precipitation over the Tianshan Mountains; effects of moisture recycling and sub-cloud evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2016, **542**: 222-230.
- [49] Friedman I, Machta L, Soller R. Water-vapor exchange between a water droplet and its environment[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, **67**(7): 2761-2766.
- [50] 冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源分析[J]. 水科学进展, 2013, **24**(5): 634-641.
Feng F, Li Z Q, Jin S, *et al.* Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, Eastern Tianshan[J]. Advances in Water Science, 2013, **24**(5): 634-641.
- [51] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [52] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, *et al.* Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2011, **63**(3): 352-359.
- [53] Froehlich K, Kralik M, Papesch W, *et al.* Deuterium excess in precipitation of Alpine regions moisture recycling[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2008, **44**(1): 61-70.
- [54] 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.
- [55] 孟玉川, 刘国东. 长江流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 水科学进展, 2010, **21**(3): 327-334.
Meng Y C, Liu G D. Effect of below-cloud secondary evaporation on the stable isotopes in precipitation over the Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2010, **21**(3): 327-334.
- [56] Wu H W, Zhang X P, Li X Y, *et al.* Seasonal variations of deuterium and oxygen-18 isotopes and their response to moisture source for precipitation events in the subtropical monsoon region [J]. Hydrological Processes, 2015, **29**(1): 90-102.
- [57] 赵诗坤, 庞朔光, 文蓉, 等. 海河流域降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 地理科学进展, 2015, **34**(8): 1031-1038.
Zhao S K, Pang S G, Wen R, *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.
- [58] Kong Y L, Pang Z H, 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.
- [59] Li Z X, Feng Q, Yong S, *et al.* Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain, northwestern China [J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 87-101.
- [60] 侯典炯, 秦翔, 吴锦奎, 等. 乌鲁木齐大气降水稳定同位素与水汽来源关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(10): 136-142.
Hou D J, Qin X, Wu J K, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and the water vapor sources in Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, **25**(10): 136-142.
- [61] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2784-2790.
Zhu J J, Chen H, Gong G L, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in Eastern Qaidam Basin[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2784-2790.
- [62] 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.
- [63] 李广, 章新平, 许有鹏, 等. 滇南蒙自地区降水稳定同位素

- 特征及其水汽来源[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1313-1320.
- Li G, Zhang X P, Xu Y P, *et al.* Characteristics of stable isotopes in precipitation and their moisture sources in Mengzi Region, Southern Yunnan[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1313-1320.
- [64] Aizen V, Aizen E, Melack J, *et al.* Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (Southeastern Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, **101**(D4): 9185-9196.
- [65] Li Z X, Gao Y, Wang Y M, *et al.* Can monsoon moisture arrive in the Qilian Mountains in summer? [J]. Quaternary International, 2015, **358**: 113-125.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期); 起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343; E-mail: hjcx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)