

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



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源

赵明华¹, 陆彦玮¹, Rachana Heng¹, 司炳成^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 萨斯喀彻温大学土壤学系, 加拿大萨斯卡通市 S7N5A8)

摘要: 为探究关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源, 本研究选取关中腹地的杨凌站点次降水为研究对象, 利用当地 2015~2018 年间的 98 场次降水样品及同期气象资料, 分析该地区降水氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$) 组成特征及其影响因素, 建立当地大气降水线和三氧同位素大气降水线方程, 并利用 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O}\text{-excess}$ 指标尝试探讨当地可能存在的降水水汽来源, 定量描述海洋和内陆源水汽对区域降水的贡献。结果表明, 杨凌地区降水氢氧稳定同位素存在明显的季节性变化, 同位素组成雨季(5~10 月)贫化, 旱季(11 月~次年 4 月)富集; 当地大气降水线的斜率和截距分别为 7.7 和 9.1, 说明研究区降水受到一定程度的蒸发分馏影响; 三氧同位素大气降水线斜率为 0.528, 介于海水平衡分馏斜率(0.529)与水汽扩散斜率(0.518)之间, 表明研究区处于海洋气团向内陆干旱区迁移的路径上。综合分析 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O}\text{-excess}$, 发现研究区降水受到来自东南季风的暖湿气团和来自西风的干冷气团的共同贡献, 其中约有 55%~79% 的降水水汽来源于海洋, 主要集中于 6~8 月; 21%~45% 的水汽来源于内陆和局地蒸发, 主要集中于 10 月~次年 4 月。5 月和 9 月降水水汽来源复杂, 可能受海洋水汽和内陆水汽的共同补给。

关键词: 关中平原; 杨凌地区; 氢氧稳定同位素; 水汽来源; $d\text{-excess}$; $^{17}\text{O}\text{-excess}$

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3148-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911063

Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain

ZHAO Ming-hua¹, LU Yan-wei¹, Rachana Heng¹, SI Bing-cheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon S7N5A8, Canada)

Abstract: To improve the understanding of hydrogen and oxygen stable isotope characteristics and vapor sources in the Guanzhong Plain, we collected 98 precipitation samples and corresponding meteorological data between 2015 and 2018 in Yangling, Shanxi Province, which is located in the central area of the Guanzhong Plain. The composition characteristics of the local hydrogen and oxygen stable isotopes of precipitation ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$) and their environmental controls were analyzed, and the local meteoric water line (LMWL) and the meteoric water line of the triple oxygen isotopes were established. Three indicators ($\delta^{18}\text{O}$, $d\text{-excess}$, and $^{17}\text{O}\text{-excess}$) were used to explore the possible vapor sources of local precipitation and to quantify the contributions of ocean-source and inland-source water vapor to the precipitation. The results showed that there were obvious seasonal changes in the hydrogen and oxygen stable isotopes of precipitation in the Yangling area; water isotopes were depleted in the wet season (May to October) and enriched in the dry season (November to April of the next year). Both the slope (7.7) and intercept (9.1) of the LMWL were lower than those of the global meteoric water line (GMWL), indicating that the annual precipitation in the research area experienced variable degrees of secondary evaporation under cloud cover. The slope of the meteoric water line of the triple oxygen isotopes is 0.528, which is between that of seawater equilibrium fractionation (0.529) and water vapor diffusion into dry air (0.518), consistent with the fact that the Guanzhong area is located on the migration path of marine air mass to inland arid regions. Comprehensive analysis of $\delta^{18}\text{O}$, $d\text{-excess}$, and $^{17}\text{O}\text{-excess}$ confirmed that the precipitation in the study area is jointly contributed to by the warm and humid air mass from the southeast monsoon and the dry and cold air mass from the westerly wind. Of these, approximately 55%-79% of the precipitation water vapor comes from the ocean, mainly in June to August, and about 21%-45% of the water vapor comes from inland and local evaporation, mainly from October to April. The water vapor sources of precipitation in May and September are complex and may intermittently originate from ocean and inland water vapor.

Key words: Guanzhong Plain; Yangling area; hydrogen and oxygen stable isotope; water vapor source; $d\text{-excess}$; $^{17}\text{O}\text{-excess}$

大气降水作为陆地水资源的重要输入,其天然示踪信息——氢氧稳定同位素特征被广泛应用于区域水汽来源^[1~3]、植物水源划分^[4]和地下水补给机制^[5~8]等水文过程研究中。然而,降水氢氧稳定同位素特征往往是复杂多变的,水汽来源、降雨量、温度和海陆距离等因素都可能会影响其组成特征^[9]。调查和揭示区域降水氢氧稳定同位素组成及其变化特

征,不仅可以加深人们对降水过程的认识,还可以为相关水循环研究提供重要的背景信息^[10]。

1961 年, Craig^[11] 通过分析全球 400 个降水样

收稿日期: 2019-11-07; 修订日期: 2020-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630860, 41877017)

作者简介: 赵明华(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为同位素水文学, E-mail: minghuazhao2017@163.com

* 通信作者, E-mail: bing.si@usask.ca

品,得出全球降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 存在较好的线性关系: $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ (global meteoric water line, GMWL). 而受水汽源地、运移路径、降水成因和云下二次蒸发等因素的影响,各地区的大气降水线(local meteoric water line, LMWL)往往会不同程度地偏离 GMWL^[12, 13]. ^{17}O 作为氧元素除 ^{18}O 外的另一种同位素形式,随着仪器精度的提高和非质量氧同位素分馏效应^[14]的提出,其特征也逐渐成为探究降水分馏特征及水汽来源的热点^[15, 16]. Luz 等^[17]通过 $\delta'^{17}\text{O}$ 和 $\delta'^{18}\text{O}$ 推导出三氧同位素全球大气降水线为: $\delta'^{17}\text{O} = 0.528 \delta'^{18}\text{O} + 0.000\,033$, 并发现当海水平衡分馏时,其降水线的斜率为 0.529 ± 0.001 , 而水汽扩散到干空气后,斜率则降低至 $0.518\,5 \pm 0.000\,3$ ^[18]. 随着水同位素研究的深入,同位素的二阶变量也被相应提出,如氘盈余(d -excess)和 ^{17}O 盈余(^{17}O -excess), 这些指标可进一步为水同位素分馏及水汽源地判别提供约束信息,其定义分别为: ① $d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$, 是同位素 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的二阶变量^[9]. 与单同位素($\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$)相比, $d\text{-excess}$ 消除了平衡分馏中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的共同变化,对动力分馏十分敏感^[19], 常用来反映降水蒸发冷凝过程中的不平衡分馏程度; ② $^{17}\text{O}\text{-excess} = \delta'^{17}\text{O} - 0.528 \delta'^{18}\text{O}$, 是同位素 $\delta'^{17}\text{O}$ 和 $\delta'^{18}\text{O}$ 的二阶变量^[20]. Luz 等^[20]的研究发现海面蒸发时空气中相对湿度越低,水汽中 $^{17}\text{O}\text{-excess}$ 值就越高. 由于 $\delta'^{17}\text{O}$ 和 $\delta'^{18}\text{O}$ 受动力分馏所引起的温度效应相似^[11, 21], 所以 $^{17}\text{O}\text{-excess}$ 对动力学分馏并不敏感,可用于提供水汽源地相对湿度等信息.

关中平原地处我国陕西省中部,是我国重要的棉粮产区和国家重点建设的“一线两带”地区^[22]. 其雨季湿热,旱季干冷,多年平均降水量为 584.8 mm, 属于典型的温带大陆性季风气候^[23]. 近年来,随着

经济的快速发展和人类活动的加剧,关中平原地下水位下降,生态用水短缺等一系列问题日益凸显^[24]. 大气降水作为该地区水资源的主要来源^[25], 揭示其同位素组成和变化特征,对于理解内陆季风区水文循环过程,指导当地水资源可持续开发和利用具有重要的科学和现实意义. 然而,目前仅有王永森等^[26]和王兴等^[27]利用全球降水同位素监测网络(GNIP)西安站的月降水数据建立了当地大气降水线,并进行了 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征的初步探究. 对于降水同位素 $\delta'^{17}\text{O}$ 及二阶变量 $^{17}\text{O}\text{-excess}$ 的变化特征并未涉及,当地降水的水汽来源及其比例也尚不明确.

因此,本研究以位于关中平原腹地的杨凌地区为研究站点,通过收集 2015 ~ 2018 年间的 98 场次降水样本和气象数据,对当地降水氢氧稳定同位素的变化特征、 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O}\text{-excess}$ 等方面进行了深入分析,尝试揭示关中平原腹地可能存在的降水水汽来源,并量化不同水汽源降水所占比例,通过提高关中平原降水氢氧稳定同位素特征的认识,以期对相关水文研究提供重要的基础信息.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杨凌区($107^\circ 59' \sim 108^\circ 08' \text{ E}$, $34^\circ 14' \sim 34^\circ 20' \text{ N}$)隶属陕西省咸阳市,地处关中平原腹地(图 1). 其多年平均气温为 14.1°C , 年均降水量为 573.8 mm (1981 ~ 2010 年). 该地区雨热同期,属于典型的温带大陆性季风气候,雨季(5 ~ 10 月)平均气温为 21.3°C , 降雨量为 466.4 mm, 约占年均降水的 85%; 旱季(11 月 ~ 次年 4 月)平均气温为 5.6°C , 降雨频率低且雨量少(图 2).

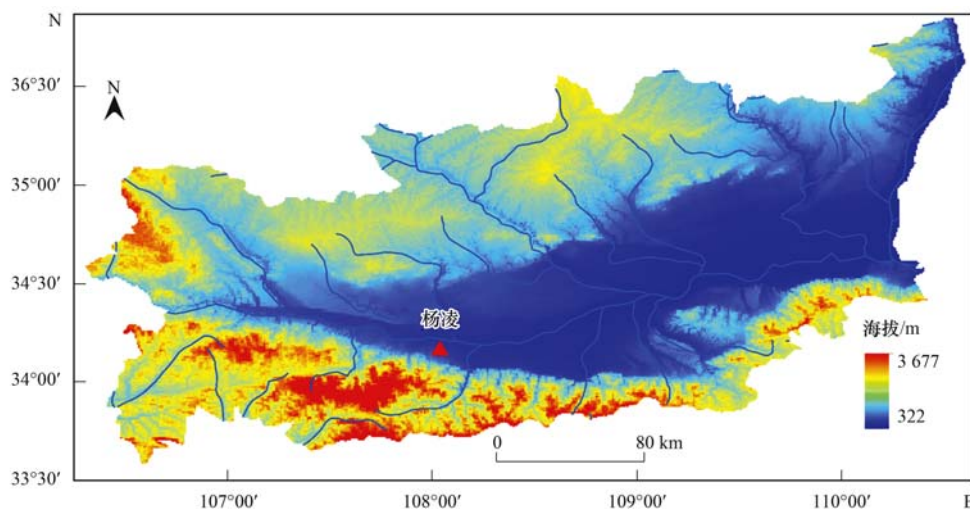


图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Map of the geographical location of the study area

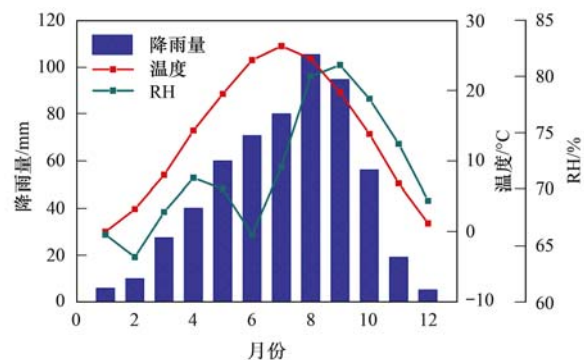


图2 杨凌地区多年平均气象参数(降雨量、温度和相对湿度)
Fig. 2 Multi-year average meteorological parameters
(precipitation amount, temperature, and relative humidity)
in the Yangling area

1.2 样品采集与测定

本研究降水采样点位于杨凌区中国旱区节水农业研究院(34°17'47"N, 108°04'06"E),采用自制的防蒸发降水收集装置^[28]对次降水进行收集.降水样品同位素采用激光液态水同位素分析仪(Liquid isotopic water analyzer-45EP, Los Gatos Research Inc., USA)进行测定,测定结果以维也纳标准平均海水 V-SMOW(vienna standard mean ocean water)标准表示:

$$\delta^2\text{H}(\delta^{18}\text{O}/\delta^{17}\text{O}) = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{V-SMOW}}}{R_{\text{V-SMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别表示降水样品和标准样品中稳定性氢同位素 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或稳定性氧同位素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率. $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的测量精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$ 、 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$,根据张自超等^[29]的数值修约规则,文中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的 δ 值均保留1位小数.研究所用气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/user/toLogin.html>).

1.3 d-excess 与 ^{17}O -excess 的计算

d-excess 是 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的二阶变量,常用来量化降水形成过程中水汽来源和运移过程中受汽、液相稳定同位素非平衡分馏程度^[9],其表达式为:

$$d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O} \quad (2)$$

区域气象因子及最初蒸发时的海表温度变化都会引起 d-excess 值变化. d-excess 的全球平均值通常为 10‰ .

^{17}O -excess 是 $\delta^{17}\text{O}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的二阶变量,其值的大小可用来反映水汽源地的相对湿度^[20],表达式为:

$$^{17}\text{O}\text{-excess} = \delta^{17}\text{O} - 0.528 \delta^{18}\text{O} \quad (3)$$

由于 ^{17}O -excess 比 $\delta^{17}\text{O}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$ 小两个量级,其单位通常为 10^{-3}‰ ,故 $\delta^{17}\text{O}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$ 的细微变化可能导致 ^{17}O -excess 的误差较大^[30].为保证 ^{17}O -excess 的准确性,在处理精度要求高的同位素比率时,常采用修正后的 δ' 表示^[17]:

$$\delta' = 1000 \ln\left(\frac{\delta}{1000} + 1\right) \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 降水氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$)的时间变化特征及其影响因素

2.1.1 氢氧稳定同位素的时间变化特征

研究区次降水中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的变化范围分别介于 $-99.4\text{‰} \sim 22.2\text{‰}$ 、 $-14.1\text{‰} \sim 1.6\text{‰}$ 和 $-7.4\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$ (图3).同位素雨量加权后,月均值变化范围略有减小,分别为 $-96.6\text{‰} \sim 0.8\text{‰}$ 、 $-13.7\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$ 和 $-7.2\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$ (图3).在时间尺度上,降水氢氧稳定同位素组成存在明显的年内变化:雨季同位素值(5~10月)较为贫化($\delta^2\text{H}$: -48.3‰ 、 $\delta^{18}\text{O}$: -7.4‰ 和 $\delta^{17}\text{O}$: -3.9‰),旱季(11月~次年4月)则相对富集($\delta^2\text{H}$: -40.5‰ 、 $\delta^{18}\text{O}$: -7.1‰ 和 $\delta^{17}\text{O}$: -3.7‰),呈现出明显的“夏低冬高”的季节性特征.此外,该地区降水同位素还存在着一定的年际差异:相比于2016年和2017年,2015年的降水稳定同位素年内变化并不明显(表1和图3),且2015年雨季降水同位素组成比旱季更为富集,这可能是受到厄尔尼诺事件的影响.2014年9月起,太平洋中、东部海温异常偏高(发生厄尔尼诺),导致2015年夏季太平洋水汽输送份额明显增大^[31],进而影响内陆季风区降水的氢氧稳定同位素组成,造成雨季降水同位素相对富集,从而导致降水同位素年内变化不大^[32,33].

2.1.2 影响降水氢氧稳定同位素的区域气象因素

研究区降水同位素组成与当地同期气象因子(降雨量、温度和相对湿度)的回归分析显示,其全年降水同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$)与雨量显著负相

表1 研究区各年份降水氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{17}\text{O}$)及标准差(SD)/‰
Table 1 Values and standard deviations (SD) of hydrogen and oxygen stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$) of precipitation in each year/‰

年份	$\delta^2\text{H}$		$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^{17}\text{O}$	
	平均值	SD	平均值	SD	平均值	SD
2015	-35.2	25.51	-6.0	3.18	-3.1	1.77
2016	-38.1	26.02	-5.9	3.36	-3.1	1.80
2017	-42.4	28.23	-6.8	3.68	-3.6	1.95
总和	-38.4	26.74	-6.2	3.42	-3.3	1.84

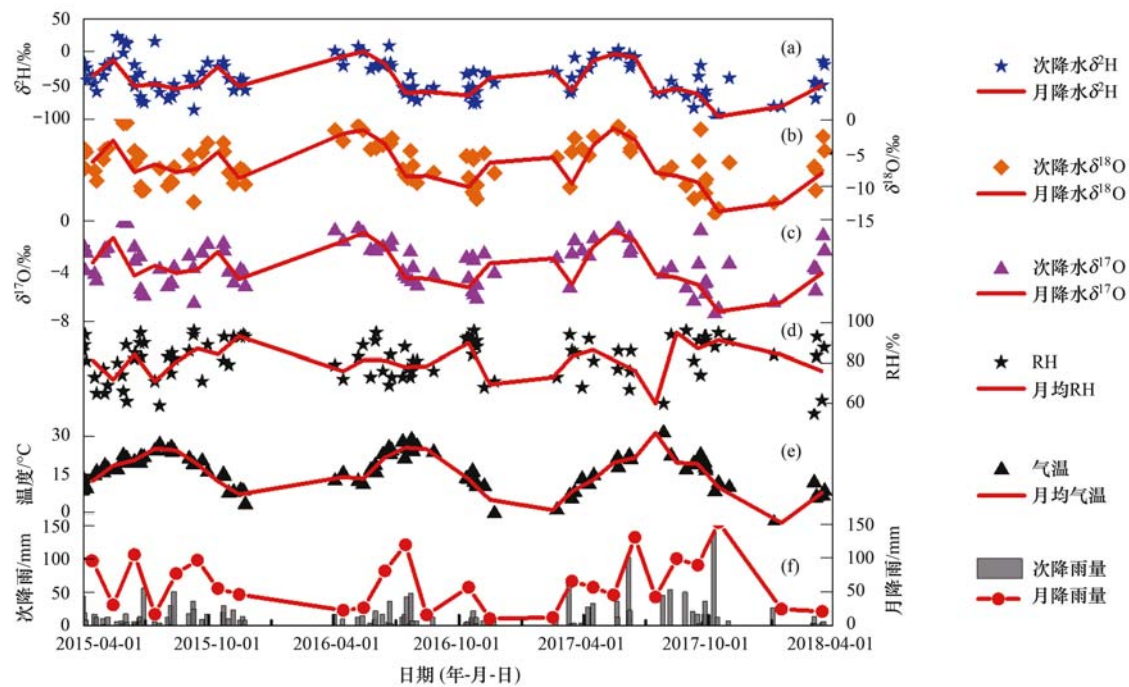


图3 次和月降水同位素和气象数据的变化趋势

Fig. 3 Variation of precipitation isotopes and meteorological data in event-based and monthly weighted data

关,而与温度相关性并不显著(表2).这与西北内陆干旱区以温度效应为主的降水同位素特征有所不同^[34,35],与东南湿润区的降水同位素特征颇为相似^[36,37].这可能是由于杨凌地区旱季降水低频、量少,使得旱季以温度效应为主的降水同位素特征在年尺度上被雨季显著的雨量效应所掩盖(表2).此外,全年和雨季的降水同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$)与相对湿度均也表现出显著的负相关关系(表2),这

可能是因为关中地区地处西北内陆,气候干燥,其空气相对湿度多与降水相关($r=0.68$, $P<0.01$),且相对湿度的高低会一定程度上控制着雨滴的云下二次蒸发,进而影响降水同位素的组成.综上所述,地处湿润到干旱气候过渡带的关中平原降水同位素同时兼顾雨量和温度效应,但受控于东南夏季风影响,其全年降水同位素特征主要以雨量效应为主,主要影响因素为雨量和相对湿度.

表2 雨季、旱季和整个研究期次降水氢氧稳定同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{17}\text{O}$)、 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O}\text{-excess}$ 与降水量(Q), 温度(T)和相对湿度(RH)之间的相关关系(r)¹⁾

Table 2 Correlation (r) between hydrogen and oxygen stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$), $d\text{-excess}$, and $^{17}\text{O}\text{-excess}$ vs. precipitation amount (Q), temperature (T), and relative humidity (RH) in the rainy season, dry season, and over the whole study period

阶段	气象因子	r				
		$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{17}\text{O}$	$d\text{-excess}$	$^{17}\text{O}\text{-excess}$
全年($n=98$)	Q	-0.25 **	-0.27 **	-0.28 **	0.18	-0.14
	T	0.05	0.17	0.15	-0.55 **	-0.17
	RH	-0.30 **	-0.39 **	-0.39 **	0.41 **	-0.19
雨季($n=71$)	Q	-0.25 *	-0.28 *	-0.28 *	0.13	-0.16
	T	0.03	0.15	0.13	-0.60 **	-0.20
	RH	-0.35 **	-0.43 **	-0.44 **	0.40 **	-0.22
旱季($n=27$)	Q	-0.18	-0.27	-0.27	0.43 *	0.01
	T	0.41 *	0.43 *	0.43 *	-0.23	-0.12
	RH	-0.18	-0.30	-0.30	0.58 **	-0.41 *

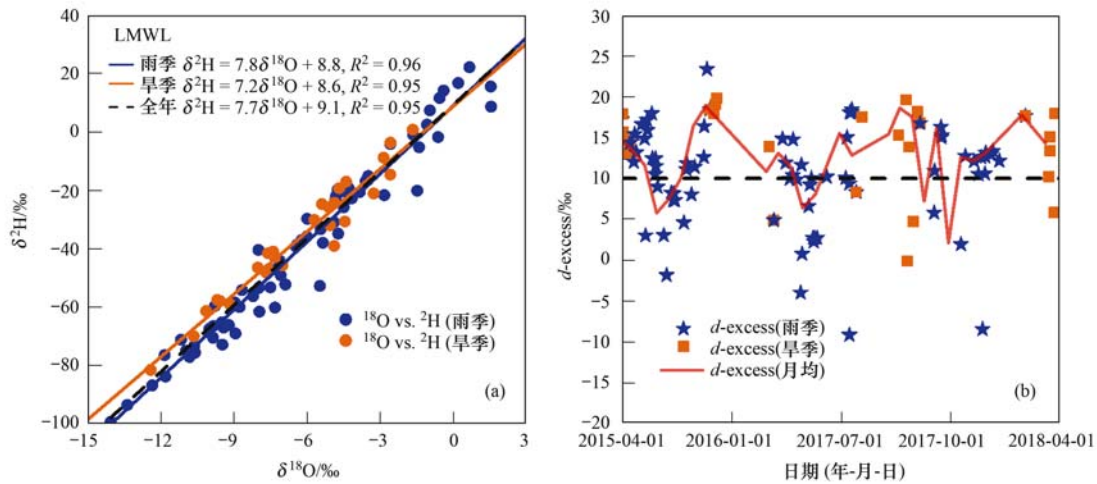
1) **表示 $P<0.01$ 极显著; *表示 $P<0.05$ 显著

2.2 大气降水线方程和 $d\text{-excess}$ 的特征

研究区次降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 建立的 LMWL 方程为: $\delta^2\text{H}=7.8\delta^{18}\text{O}+9.1$ ($R^2=0.95$), 见图 4(a), 其斜率低于 GMWL^[11] ($\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$). 这可能是因 为关中平原地处西北内陆,其雨滴在非饱和大气中

降落时会受到云下二次蒸发的影响^[38],降水同位素 易发生非平衡分馏,从而导致重同位素富集,降水线 斜率降低.

区域次降水 $d\text{-excess}$ 介于 $-9.2\text{‰}\sim 23.4\text{‰}$ [图 4(b)],全年 $d\text{-excess}$ 与温度负相关($r=-0.55$),

图 4 当地大气降水线及次和月降水 d -excess 的时间变化Fig. 4 LMWLs and variations of event-based and monthly precipitation d -excess values

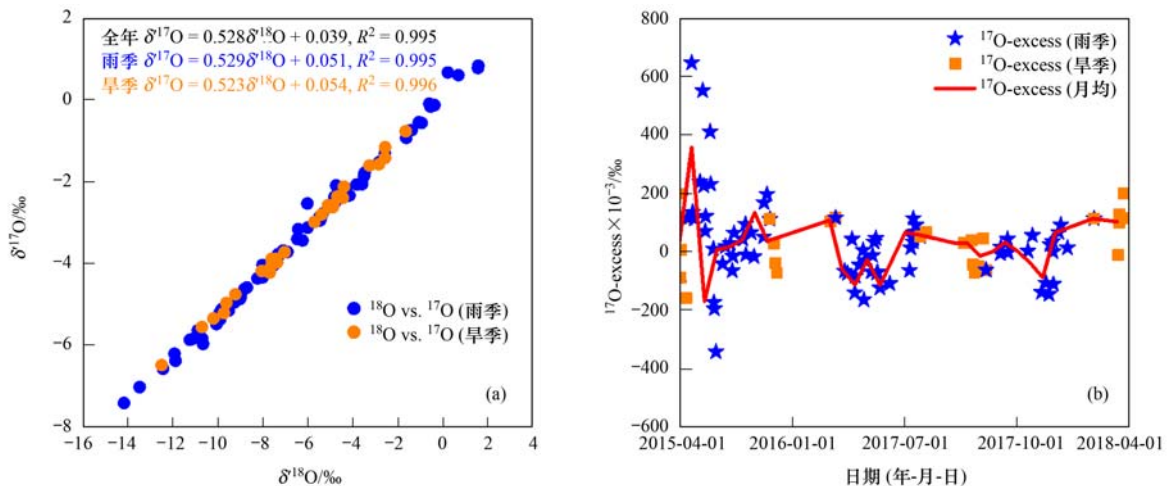
与相对湿度正相关($r = 0.41$, 表 2), 表明研究区全年降水均受到非平衡分馏的影响, 该结果与黄土高原全年都存在云下二次蒸发效应的研究结果一致^[38]. 雨季 d -excess 的变化范围($-9.2\text{‰} \sim 23.4\text{‰}$)大于旱季 $[-0.1\text{‰} \sim 19.8\text{‰}]$, 可能是由于当地雨热同期, 雨季降水多发且气温普遍偏高, 雨量差异较大的次降雨事件在雨滴降落过程中更易受到不同程度的非平衡分馏, 从而导致雨季 d -excess 的变异较大. 另外, 由于 d -excess 是表征非平衡分馏的指标, 雨季 d -excess 与温度负相关($r = -0.60$)与相对湿度正相关($r = 0.40$), 表明雨季降水受动力分馏和扩散分馏的共同影响; 而旱季 d -excess 与降雨量($r = 0.43$)和相对湿度($r = 0.58$)显著正相关(表 2), 表明旱季气温低时, 大气降水同位素的非平衡分馏变化主要以扩散分馏的方式进行.

2.3 三氧同位素大气降水线方程和 ^{17}O -excess 的特征

研究区全年降水三氧同位素大气降水线方程

为: $\delta^{17}\text{O} = 0.528\delta^{18}\text{O} + 0.039$ [$R^2 = 0.995$, 图 5 (a)], 其斜率介于海水平衡分馏时的斜率(0.529)与水汽扩散至干空气中的斜率(0.518)之间^[18], 表明该区域处于海洋气团向内陆干旱区迁移的路径上. 此外, 雨季降水线的斜率为 0.529, 其值与海水平衡分馏时的斜率相当, 表明当地雨季降水水汽多来源于海洋性气团, 且受扩散分馏影响较小, 更多地表现出平衡分馏的特征; 而旱季大气降水线的斜率为 0.523, 更接近于水汽扩散到干空气中的斜率(0.518), 表明旱季环境相对湿度较低, 降水受扩散分馏的影响较大.

当地降水 ^{17}O -excess 介于 $-341.10 \times 10^{-3}\text{‰} \sim 647.51 \times 10^{-3}\text{‰}$, 平均值为 $31.51 \times 10^{-3}\text{‰}$ [图 5 (b)], 其远大于海水的 ^{17}O -excess 值 $[(-5 \pm 1) \times 10^{-3}\text{‰}]$ ^[20], 表明水汽从水源地输送至杨凌的过程中受到了强烈的扩散分馏的影响. 而 2015 年降水 ^{17}O -excess 的变幅($-341.10 \times 10^{-3}\text{‰} \sim 647.51 \times 10^{-3}\text{‰}$)远大于其余年份[2016 年: $-162.83 \times$

图 5 三氧同位素大气降水线及次和月降水 ^{17}O -excess 的时间变化Fig. 5 Meteoric water lines of triple oxygen isotopes and variations of event-based and monthly precipitation ^{17}O -excess values

$10^{-3}\text{‰} \sim 117.02 \times 10^{-3}\text{‰}$; 2017 年: $-114.40 \times 10^{-3}\text{‰} \sim 200.78 \times 10^{-3}\text{‰}$, 图 5(b)], 这可能是由于 2015 年受到厄尔尼诺极端气候事件的影响, 研究区域内的极端气候事件(异常干旱/湿润)增多, 从而导致当地降水 ^{17}O -excess 的变幅增大. 2015 年 ^{17}O -excess 的负值占比(21%) 低于 2016 年(47%) 和 2017 年(46%), 表明杨凌地区厄尔尼诺年降水受扩散分馏影响更大. Luz 等^[20] 和 Schoenemann 等^[39] 的研究表明, ^{17}O -excess 主要受水汽源地的相对湿度控制, 而对温度、风速等气象因素并不敏感. 研究区雨季 ^{17}O -excess ($-3.20 \times 10^{-3}\text{‰}$) 较旱季 ($41.16 \times 10^{-3}\text{‰}$) 低[图 5(b) 和图 6(c)], 可能是由于雨季水汽源地的相对湿度较旱季高^[40]. 此外, 旱季 ^{17}O -excess 与当地相对湿度显著负相关($r = -0.41$, 表 2), 表明该地区旱季降水可能受到当地水汽的补给.

2.4 区域水汽来源

前人研究表明, 受季风影响较大的东南地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较为富集, 如杭州、鹰潭和宜昌的 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -6.2‰ 、 -6.5‰ 和 -7.0‰ ^[37,41,42], 而受西风影响较大的西北内陆地区, 如榆中和乌鲁木齐, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 则较为贫化, 分别为 -8.0‰ 和 -13.6‰ ^[43,44]. 研究区地处东南沿海向西北内陆延伸的气候带上, 多年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -7.4‰ , 该值介于东南地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和西北内陆地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间, 表明当地

全年降水可能受到来自东南季风的暖湿气团和西风的干冷空气共同贡献. 除 2015 年受厄尔尼诺影响外, 研究区其余年份的降水同位素变化特征都表现出雨季贫化旱季富集的变化特征, 表明该地区雨、旱两季降水水汽来源可能不同.

由于研究区年内降水水汽来源较为复杂, 因此, 本研究尝试利用降水同位素二阶变量 d -excess 和 ^{17}O -excess 来细化研究区域内可能的水汽来源及其变化. 从图 6 可以看出, 研究区雨、旱两季 d -excess 和 ^{17}O -excess 特征变化基本相似. 其雨、旱两季降水 d -excess 值分别为 $[(10.3 \pm 3.9)\text{‰}]$ 和 $[(15.6 \pm 2.6)\text{‰}]$, 雨季 d -excess 显著低于旱季, 且接近于全球平均水平 10‰ [图 6(a)], 尤其是 7~9 月的 d -excess $[(7.9 \pm 3.9)\text{‰}]$ 与低纬度地区海洋性气团的 d -excess 值(d -excess 低于 10‰) 相似^[36,37], 表明研究区雨季降水主要受海洋气团主导. 而旱季 d -excess 值均高于 10‰ [图 6(a)], 可能有局地蒸发水汽参与水循环, 或者降水过程中受到强烈的云下二次蒸发影响^[45], 从而导致 d -excess 偏大. Luz 等^[20] 的研究发现, 海水平衡分馏时水汽的 ^{17}O -excess 值介于 $[(-5 \pm 1) \times 10^{-3}\text{‰}]$; 而由内陆水汽源主导的降水 ^{17}O -excess 为正值, 主要集中于 $[(37 \pm 4) \times 10^{-3}\text{‰}]$. 研究区雨季降水 ^{17}O -excess 为 $[(-3.20 \pm 11) \times 10^{-3}\text{‰}]$, 图 6(c)], 其值与海水平衡分馏时的 ^{17}O -excess 值接近, 表明雨季降水水汽主要来源于

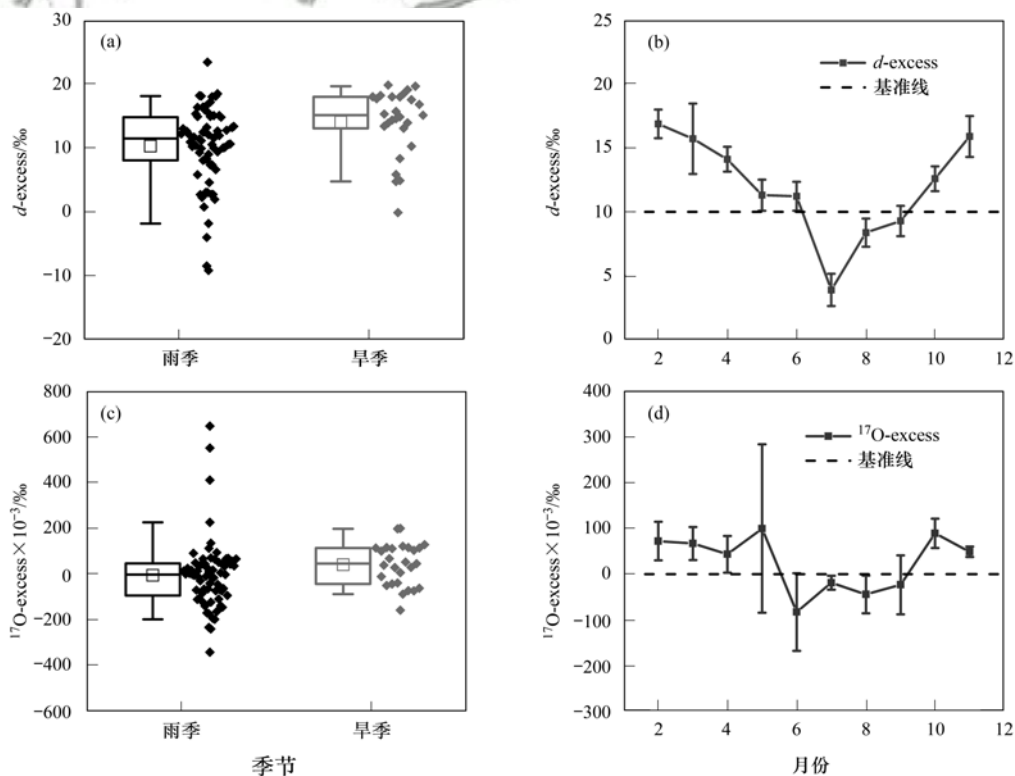


图 6 雨、旱两季及逐月降水 d -excess 和 ^{17}O -excess 的分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of d -excess and ^{17}O -excess values in wet and dry seasons and monthly precipitation

海洋,而旱季 $^{17}\text{O-excess}$ 为 $[(41.16 \pm 8) \times 10^{-3}\text{‰}]$,图6(c)],其值与内陆降水 $^{17}\text{O-excess}$ 相似,表明旱季降水水汽多来源于内陆。

进一步观察 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O-excess}$ 的逐月变化,发现两者表现出基本同步的变化趋势(图6)。研究区10月~次年4月降水 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O-excess}$ 值均在基准线上方[图6(b)和图6(d)],表明降水基本来自于内陆性气团和局地蒸发,且降水过程可能存在一定的动力学分馏,约占年均降水量的21%;6~8月降水 $^{17}\text{O-excess}$ 值为负值[图6(d)],表明降水基本来自海洋性气团,约占年均降水量的55%。其中,由于研究区6月气温回升且空气湿度较低(图2),在降水过程易发生动力学分馏,从而导致降水 $d\text{-excess}$ 略高于10‰;5月和9月降水水汽来源较为复杂,其 $^{17}\text{O-excess}$ 值有正有负,可能受到海洋水汽和内陆水汽共同作用,约占年均降水量的24%。以上信息表明,研究区全年大约有55%~79%的降水水汽来源于海洋,21%~45%的降水水汽来源于内陆和局地蒸发。

此外,雨季降水 $^{17}\text{O-excess}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 显著正相关($r=0.24$,表3),表明降水水汽在水汽源地发生了动力分馏;旱季降水的 $^{17}\text{O-excess}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 存在微弱的正相关关系($r=0.02$,表3),表明除水汽源地的动力分馏效应外,还有其他因素影响降水同位素组成。雨季 $^{17}\text{O-excess}$ 与 $d\text{-excess}$ 也存在显著的正相关关系($r=0.23$),说明了雨季降水水汽在降水过程中会受到动力分馏的影响。

表3 全年、雨季和旱季 $^{17}\text{O-excess}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $d\text{-excess}$ 之间的关系

Table 3 Relationships between $^{17}\text{O-excess}$, $\delta^{18}\text{O}$, and $d\text{-excess}$ during the whole year, wet season and dry season

项目		$\delta^{18}\text{O}$		$d\text{-excess}$	
		r	P	r	P
$^{17}\text{O-excess}$	全年	0.21	0.05	0.2	0.05
	雨季	0.24	0.04	0.23	0.05
	旱季	0.02	0.9	0.03	0.87

3 结论

(1)研究区降水同位素组成存在明显的季节性变化,同位素组成雨季(5~10月)贫化,旱季(11月~次年4月)富集。受全球气候变异(如厄尔尼诺现象)的影响,其降水同位素组成在年际尺度上也会有一定的差异。此外,降水同位素在旱、雨季分别表现出明显的温度效应和雨量效应,但受到东南夏季风的主导,全年降水同位素特征主要表现为雨量效应。

(2)研究区 LMWL 的斜率和截距均低于 GMWL,表明当地降水经历了一定的同位素分馏效

应。其中,雨季降水受到动力分馏和扩散分馏共同影响,而旱季降水主要受扩散分馏的影响。

(3)通过建立当地三氧同位素大气降水线发现,研究区处于海洋气团向内陆干旱区迁移的路径上。其中,雨季降水水汽多来源于海洋性气团,受扩散分馏的影响较小;旱季降水多来源于内陆性气团,受扩散分馏的影响较大。

(4)综合分析 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O-excess}$ 发现,研究区全年降水受到来自东南季风的暖湿气团和来自西风的干冷气团的共同贡献,其中约有55%~79%的降水水汽来源于海洋,主要集中于6~8月;21%~45%的水汽来源于内陆和局地蒸发,主要集中于10月~次年4月。5月和9月的降水水汽来源较为复杂,可能受到海洋和内陆性气团水汽的共同补给。

致谢:感谢西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院靳静静实验员在同位素测定工作中的大力支持与帮助。感谢西北农林科技大学节水灌溉试验站李志军老师提供的国家气象观测杨凌站的气象资料。

参考文献:

- [1] Bonne J L, Masson-Delmotte V, Cattani O, *et al.* The isotopic composition of water vapour and precipitation in Ivittuat, southern Greenland[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (9): 4419-4439.
- [2] Cai Z Y, Tian L D. Processes governing water vapor isotope composition in the Indo-Pacific region: convection and water vapor transport[J]. *Journal of Climate*, 2016, **29** (23): 8535-8546.
- [3] Wei Z W, Kei Y, Atsushi O, *et al.* Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture over a humid subtropical rice paddy in Tsukuba, Japan[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **533**: 91-102.
- [4] Zhang Z Q, Evaristo J, Li Z, *et al.* Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old [J]. *Hydrological Processes*, 2017, **31** (5): 1196-1201.
- [5] Joshi S K, Rai S P, Sinha R, *et al.* Tracing groundwater recharge sources in the northwestern Indian alluvial aquifer using water isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and ^3H) [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **559**: 835-847.
- [6] Xiang W, Si B C, Biswas A, *et al.* Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes[J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 773-781.
- [7] Ma H, Yang Q, Yin L, *et al.* Paleoclimate interpretation in northern Ordos Basin: evidence from isotope records of groundwater[J]. *Quaternary International*, 2018, **467**: 204-209.
- [8] O'brien G R, Kaufman D S, Sharp W D, *et al.* Oxygen isotope composition of annually banded modern and mid-Holocene travertine and evidence of paleomonsoon floods, Grand Canyon, Arizona, USA[J]. *Quaternary Research*, 2006, **65** (3): 366-379.
- [9] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16** (4): 436-468.

- [10] Galewsky J, Steen-Larsen H C, Field R D, *et al.* Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle[J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, **54**(4): 809-865.
- [11] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [12] Coplen T. Stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1982, **63**(45): 861-862.
- [13] Rozanski K, Sonntag C, Münnich K O. Factors controlling stable isotope composition of European precipitation[J]. *Tellus*, 1982, **34**(2): 142-150.
- [14] Clayton R N, Grossman L, Mayeda T K. A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites[J]. *Science*, 1973, **182**(4111): 485-488.
- [15] Gehler A, Tütken T, Pack A. Triple oxygen isotope analysis of bioapatite as tracer for diagenetic alteration of bones and teeth[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, **310**(1-2): 84-91.
- [16] Pack A, Herwartz D. The triple oxygen isotope composition of the Earth mantle and understanding variations in terrestrial rocks and minerals[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, **390**: 138-145.
- [17] Luz B, Barkan E. The isotopic ratios $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in molecular oxygen and their significance in biogeochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(5): 1099-1110.
- [18] Barkan E, Luz B. Diffusivity fractionations of $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{17}\text{O}$ and $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$ in air and their implications for isotope hydrology[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2007, **21**(18): 2999-3005.
- [19] Guan H D, Zhang X P, Skrzypek G, *et al.* Deuterium excess variations of rainfall events in a coastal area of South Australia and its relationship with synoptic weather systems and atmospheric moisture sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(2): 1123-1138.
- [20] Luz B, Barkan E. Variations of $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in meteoric waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, **74**(22): 6276-6286.
- [21] Angert A, Cappa C D, Depaolo D J. Kinetic ^{17}O effects in the hydrologic cycle: Indirect evidence and implications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(17): 3487-3495.
- [22] 段汉明, 陈兴旺. “一线两带”建设与关中城镇群的双向促进机制研究[J]. *人文地理*, 2005, **20**(6): 78-82.
- Duan H M, Chen X W. On the dual promotion mechanism of “One-line and two belts” construction and the city groups in centre Shannxi province[J]. *Human Geography*, 2005, **20**(6): 78-82.
- [23] 李俊霖, 延军平, 孙虎, 等. 关中平原东、中、西部气候干旱化程度比较分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, **19**(1): 131-134.
- Li J L, Yan J P, Sun H, *et al.* An analysis on climatic changes in east, middle and west areas of Guanzhong plain[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, **19**(1): 131-134.
- [24] 李琪. 关中平原浅层地下水资源现状及管理保护对策[J]. *地下水*, 2012, **34**(5): 74-75.
- [25] Juan Y, Ma Z Y, Wang Z W, *et al.* Oxygen and hydrogen isotope exchange of geopressed thermal water in the central Guanzhong basin[J]. *Mining Science and Technology*, 2009, **19**(1): 115-119.
- [26] 王永森, 董四方, 陈益钟. 基于温度与湿度的大气降水同位素特征影响因素分析[J]. *中国农村水利水电*, 2013, (6): 12-15.
- Wang Y S, Dong S F, Chen Y Z. Research on the precipitation isotope effect factor based on temperature and humidity[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (6): 12-15.
- [27] 王兴, 李王成. 南京与西安地区降水同位素的氘盈余和水汽压分析[J]. *安徽农学通报*, 2018, **24**(21): 126-129.
- Wang X, Li W C. Analysis of the influence factors of precipitation isotopes in Nanjing and Xi'an based on deuterium surplus and water vapor pressure[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2018, **24**(21): 126-129.
- [28] 陆彦玮, 司炳成, 靳静静, 等. 一种新型降水同位素采样装置[P]. 中国专利: CN 201610224041. 8, 2016-09-14.
- [29] 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.
- [30] Winkler R, Landais A, Sodemann H, *et al.* Deglaciation records of ^{17}O -excess in East Antarctica: reliable reconstruction of oceanic normalized relative humidity from coastal sites[J]. *Climate of the Past*, 2012, **8**(1): 1-16.
- [31] 温艳茹, 王建力. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2462-2469.
- Wen Y R, Wang J L. Variations of stable isotope in precipitation and its atmospheric circulation effect in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2462-2469.
- [32] 董小芳, 杨华玮, 张睿, 等. ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4991-5003.
- Dong X F, Yang H W, Zhang L, *et al.* Influence of ENSO events on the hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) isotopic values of precipitation in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4991-5003.
- [33] Tan M. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China[J]. *Climate Dynamics*, 2014, **42**(3-4): 1067-1077.
- [34] 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.
- [35] 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 X T, Jia W X, Zhu G F, *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.
- [36] Liu J R, Song X F, Yuan G F, *et al.* Stable isotopic compositions of precipitation in China[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2014, **66**(1): 22567.
- [37] Jin Z F, Wang Y, Li F L, *et al.* Stable isotopes and chemical characteristics of precipitation in Hangzhou and Huzhou, East China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(23): 23717-23729.
- [38] 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 X G, Zhang M J, Wang S J, *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.
- [39] Schoenemann S W, Steig E J. Seasonal and spatial variations of $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ and d_{excess} in Antarctic precipitation: insights from an intermediate complexity isotope model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(19): 11215-11247.
- [40] 胡月, 刘国东, 孟玉川, 等. 成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1179-1187.
- Hu Y, Liu G D, Meng Y C, *et al.* Analysis of stable hydrogen and oxygen isotope characteristics and vapor sources of event-based precipitation in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1179-1187.
- [41] 沈业杰, 彭新华. 鹰潭地区大气降水中氢氧稳定同位素特征研究[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(1): 101-105.
- Shen Y J, Peng X H. Stable isotopes of hydrogen and oxygen in the precipitation of Yingtan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 101-105.
- [42] 武亚遵, 万军伟, 林云. 湖北宜昌西陵峡地区大气降雨氢氧同位素特征分析[J]. *地质科技情报*, 2011, **30**(3): 93-97.
- Wu Y Z, Wan J W, Lin Y. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes for precipitation in Xiling Gorge region of Yichang, Hubei province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, **30**(3): 93-97.
- [43] Chen F L, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Environmental controls on stable isotopes of precipitation in Lanzhou, China: an enhanced network at city scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 1013-1022.
- [44] Wang S J, Zhang M J, Hughes C E, *et al.* Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2016, **68**(1): 26206.
- [45] 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 B J, Li Z X, Wang Y, *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.



CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)