

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.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析

胡月, 刘国东*, 孟玉川, 张文江, 夏成城

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 基于对成都地区 2016 年 9 月至 2017 年 10 月采集的 113 场次降水样品氢氧同位素的分析, 发现大气次降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 ^{17}O 、 d -excess 和 ^{17}O -excess 有显著的季节性变化, 旱季高雨季低, 反映了该地区旱、雨两季水汽来源不同; 地区大气降水线斜率和截距都偏小, 表明成都降水来源于具有不同稳定同位素比率的源地, 且雨滴在降落过程中发生了二次蒸发; 三氧同位素大气降水线($\delta^{17}O = 0.5289 \delta^{18}O + 0.0075$)斜率介于海洋气团(0.529)与干空气(0.518)之间, 表明成都地区处于海洋气团向内陆迁移的路径上; d 值接近全球平均值, 而 ^{17}O -excess 值远较海水大, 表明成都的水汽来源由海洋气团主导, 且到达该地区的过程中同位素经历了严重的富集; d -excess 在旱季出现的极低值可能是受到了人工降雨的影响, ^{17}O -excess 除了与水汽源地的相对湿度有关外, 还会受到上游气团对流作用的影响, 此外, 成都当地的气象因素对不同季节次降水的 ^{17}O -excess 值有不同程度的影响。

关键词: 次降水; 氢氧同位素; 水汽来源; d -excess; ^{17}O -excess

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1179-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807192

Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu

HU Yue, LIU Guo-dong*, MENG Yu-chuan, ZHANG Wen-jiang, XIA Cheng-cheng

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on analysis of hydrogen and oxygen isotopes in 113 rainfall samples collected from September 2016 to October 2017 in Chengdu, which is a typical representative of humid areas affected by multiple moisture sources, the compositional characteristics of hydrogen and oxygen isotopes (2H , ^{18}O , and ^{17}O) and the water vapor sources of precipitation were analyzed. It was found that δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{17}O$, d -excess, and ^{17}O -excess in atmospheric event-based precipitation have significant seasonal variation. In the dry season they are high and in the wet season are low, reflecting the different moisture sources during two seasons (dry and wet). The slope and intercept of the Local Meteoric Water Line were small, indicating that the precipitation originated from sources with various stable isotope ratios and that raindrops were subject to secondary evaporation during their landing process. The Local Meteoric Water Line slope for the triple oxygen isotopes ($\delta^{17}O = 0.5289 \delta^{18}O + 0.0075$) ranged between the slopes for seawater vapor and dry air, and the value of ^{17}O -excess was far larger than that of seawater. This indicates that the Chengdu area lies in the path of marine air masses moving toward inland regions. The atmospheric precipitation mainly came from these marine air masses and the isotope had undergone serious enrichment in the process of reaching the area. The d values were close to the global average, and the extremely low value of d -excess in the dry season may be affected by artificial rainfall operations. In addition to the relative humidity of the water vapor source, ^{17}O -excess is also affected by the upstream air mass convection; moreover, the ^{17}O -excess of the precipitation was not affected by the meteorological factors over the whole study period, so the ^{17}O -excess could be considered tracers of evaporative conditions at the vapor source in Chengdu. The precipitation ^{17}O -excess in different seasons provides additional information to better understand the precipitation formation processes in Chengdu.

Key words: event-based precipitation; hydrogen and oxygen isotopes; water vapor sources; d -excess; ^{17}O -excess

天然水体中稳定同位素(δD 、 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{17}O$)广泛应用于研究全球水文循环和气候变化^[1~6]。大气降水是自然水循环中的一个重要环节, 其氢、氧稳定同位素关系在水文系统的同位素关系中具有主导地位, 既有全球特征也发生地方的、区域的演化分异, 因此利用降水同位素的空间依赖性和时间变化性可以更好地理解水文、气象和生态过程^[7,8]。

全球大气降水线揭示在全球平均状况下, 水汽在其源地非平衡蒸发及在凝结过程中平衡分馏条件下降水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的关系。Craig^[9]首次提出全球大气降水线(GMWL): $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ 。事实上, 大气降水稳定同位素的组成随时间和空间的变化很

大, 不同地区的地区大气降水线(LMWL)往往会不同程度地偏离 GMWL^[10]。我国的 LMWL 由郑淑惠等^[11]在分析了北京、南京等 8 个地区 1980 年采集的 101 个降水样品后首次得到: $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$ 。也有很多小区域的大气降水研究, 例如: 黑河半干旱区^[12]、我国西北内陆^[13]等。为量化 LMWL 相对于 GMWL 的在斜率和截距上的偏移程度, Dansgaard^[7]提出了氘盈余(d)的概念, 定义为: $d =$

收稿日期: 2018-07-23; 修订日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471084)

作者简介: 胡月(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为同位素水文、生态水文, E-mail: huyue_scu@163.com

* 通信作者, E-mail: liugd988@163.com

$\delta D - 8 \delta^{18}O$. 这一参数受水汽源地的温度、相对湿度、风速等气象条件以及水汽路径中大陆蒸发水汽的影响^[10], 分析次降水的 d 值, 可以更直观反映地区降水蒸发凝结过程的不平衡程度.

^{17}O 在自然界中的丰度仅为 0.039%, 分馏范围小, 其测定也受到同位素分析技术的制约. 自从发现了氧同位素非质量分馏效应, 随着测试分析技术的精度不断提高, 利用冰芯 ^{17}O 组成研究过去的湿度^[14], 通过叶片、茎秆研究蒸散发^[15], 天然水体中三氧同位素组成特征及其机制逐渐成为研究热点. Barkan 等^[16] 根据不同气候地区大气降水的 $\delta^{17}O$ 和 $\delta^{18}O$ 值定义了 ^{17}O 盈余 (^{17}O -excess): ^{17}O -excess = $\delta^{17}O - 0.528 \delta^{18}O$, 由于 ^{17}O -excess 的量级非常小, 所以最终结果一般乘以 10^6 表示, 单位为 10^{-3}‰ 或 $\times 10^{-6}$. $\delta^{17}O$ 及 ^{17}O 盈余因具有更低的温度敏感性, 在后期水循环特征探索时所传递的信息将优于传统氧同位素.

基于全球降水同位素监测网 (Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP) 在 1986 ~ 1998 年监测的月均值数据, 吴旭东^[17] 得出成都地区的大气降水线: $\delta D = 7.53 \delta^{18}O + 1.42$; 夏季降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值比冬季小. 但是, 月均的监测资料无法精准地反映降水氢氧同位素对天气尺度的响应, 而且水文数据是不断变化的, 过去的监测资料很大程度上限制了对现在天气情况的分析研究.

本文以成都市为研究区, 基于次降雨事件展开, 根据 2016 年 9 月至 2017 年 10 月固定点小尺度次降雨氢氧稳定同位素数据以及相关的气象数据, 分析了成都市大气降水中 δD 、 $\delta^{17}O$ 、 $\delta^{18}O$ 、 d -excess 和特征及其与相关气象要素之间的关系, 探讨我国受季风影响下成都地区的大气次降水同位素变化特征及 ^{17}O -excess 对于小天气尺度降水过程的指示意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

成都市位于四川盆地西部, 四川省中部, 川西川北高原向四川盆地过渡的交接地带, 东经 $103.61^\circ \sim 104.10^\circ$, 北纬 $30.60^\circ \sim 31.00^\circ$ (图 1). 该地区年平均气温约 17.5°C , 年平均降水量为 $1\,124.6\text{ mm}$, 降水的年际变化不大. 本次布置的大气降水采样点位于成都市中心, 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室的试验场内 (104.08°E , 30.63°N), 远离局部污染源, 四周无遮挡雨、雪的高大树木或建筑物.

1.2 样品采集与处理

设置简易的集水装置: 选用直径 50 cm , 高 75

cm 的 PE 深桶, 上覆光洁的制成漏斗状的 PE 膜集水, 膜下 500 mL 的集雨瓶连接直径 15 cm 的漏斗, 漏斗内放置乒乓球防止已收集雨水的蒸发. 深桶内放置压重块, 确保其稳定性. 每次降雨结束后立即收集水样, 如果降雨发生在晚上则第 2 d 早上收集. 将雨水装入 PE 瓶中, 封口膜密封瓶口并放置于冰箱低温保存.

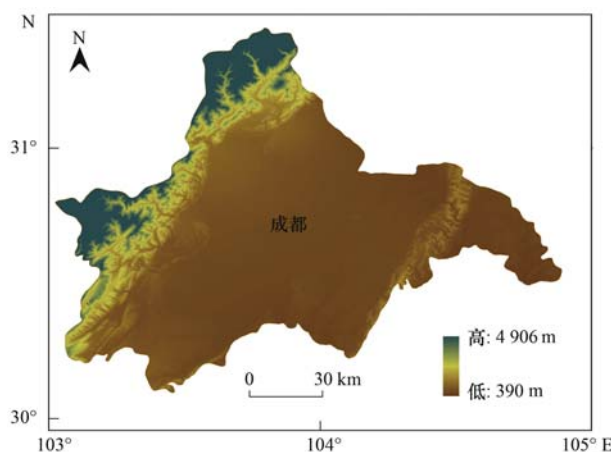


图 1 成都地理位置及地形特征示意

Fig. 1 Location and topographical characteristics of Chengdu

样品在四川大学水利水电学院水资源实验室进行测定分析, 使用液态水同位素分析仪 (Triple-Liquid Water Isotopic Analyzer), 由 Los Gatos Research (LGR) 公司研发生产, 型号 T-LWIA-45-EP (912-0050), 根据操作人员的编程自动连续测量, 由 LGR Post-Processing 后处理软件分析后, 得到水体氢氧稳定同位素的测定样品中 δD 、 $\delta^{18}O$ 及 $\delta^{17}O$ 的值. LGR 公司采用 VSMOW-2 及 SLAP-2 这两种标准水样作为校准, 并利用 OA-ICOS 技术测定并制备了一系列参比标样. IAEA 及中国科学院青藏高原研究所检测的成都地大气降水的 δD 范围为 $-85.1\text{‰} \sim 6.3\text{‰}$, 故选用 LGR3C、LGR4C、LGR5C 作为参比标样. 其中 LGR3C、LGR5C 为校准标样, 其同位素值的范围在待测样品同位素值的两端, 且与待测样品同位素值相差不远; LGR4C 为控制标样, 其同位素值在两个校准标样的范围内, 且与待测样品的期望值相近. 本次测试环境温度为 25°C , 以避免样品蒸发引起的同位素分馏. 测试结果以千分偏差值 (δ 值) 表示, 测量精度为: $\delta D < 0.3\text{‰}$, $\delta^{18}O < 0.08\text{‰}$, $\delta^{17}O < 0.08\text{‰}$.

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

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别表示降水样品和标准样品的同位素比率 (元素的稀有同位素原子丰度与丰富同位素原子丰度的比值), 标准样品为维也纳标准

平均海洋水 (vienna standard mean ocean water, VSMOW).

Luz 等^[18]指出在处理多种同位素系统中的高精度比率时,应该使用修正后的 δ ,被定义为 δ' :

$$\delta' = 1\,000 \ln\left(\frac{\delta}{1\,000} + 1\right) = \ln\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}}\right)$$

本研究期内共采集到次降水量大于 0.1 mm 的降雨样品 113 个,并同步记录了气温、湿度、降雨量等气象要素.

2 结果与分析

2.1 氢氧同位素特征

分析研究期内 113 个降水样品 (δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$) 的实际检测值,次降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 值的年际变化较大 (表 1): 相比于 δD 的 137.7‰ 的变化幅度, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 值的变化幅度则很小,分别为 18.6‰ 和 9.3‰,这一显著差异主要是由氢氧同位素性质的不同导致的. D 和 H 的相对原子质量相差 50%,是所有同位素中相差最大的,故其分馏作用比氧同位素强得多,因此 D 在降雨过程中对环境变化的响应更加灵敏,全年的变化幅度也更大.

根据成都的气候特征,将研究期分为旱季 (11

月~次年 3 月) 和雨季 (4~10 月), δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 的变化存在明显的季节性差异,并且与降水量的季节性变化刚好相反,降水量较少的旱季同位素富集,而雨季同位素相对贫化. 不同的水汽来源在某种程度上是决定降水同位素组成的关键因素,来自海洋性气团的降水 δ 值较低,来自局地蒸发形成的降水 δ 值较高^[19]. 成都雨季受太平洋高压与印度洋低压双重影响,季风降水主要为来自海洋的暖湿气流,湿度大,在沿程移动中不断降水,重同位素不断贫化,使得降水中同位素的 δ 值较低;旱季受蒙古高压和阿留申低压影响,从偏北方向吹来的强劲干冷冬季风,湿度低,蒸发性强,分馏系数较大,沿程降水少,使气团较为富集重同位素,因此旱季降水 δ 值较高.

δ 低值集中出现在季风期末 (9~10 月),重同位素含量明显低于其他月份,最低值亦低于 GNIP 的历史监测数据,季风期末全国大量降水发生,水汽团到达成都地区已贫化重同位素,同时受降雨量效应影响,使得此时大气降水中的 δ 最低; δ 高值出现在雨季初期的 4 月,因为此时同位素经历了整个旱季的分馏富集,富集月份的同位素组成相对稳定, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 分别基本在 -9‰、+1‰ 和 +0.1‰ 微弱变化 (图 2).

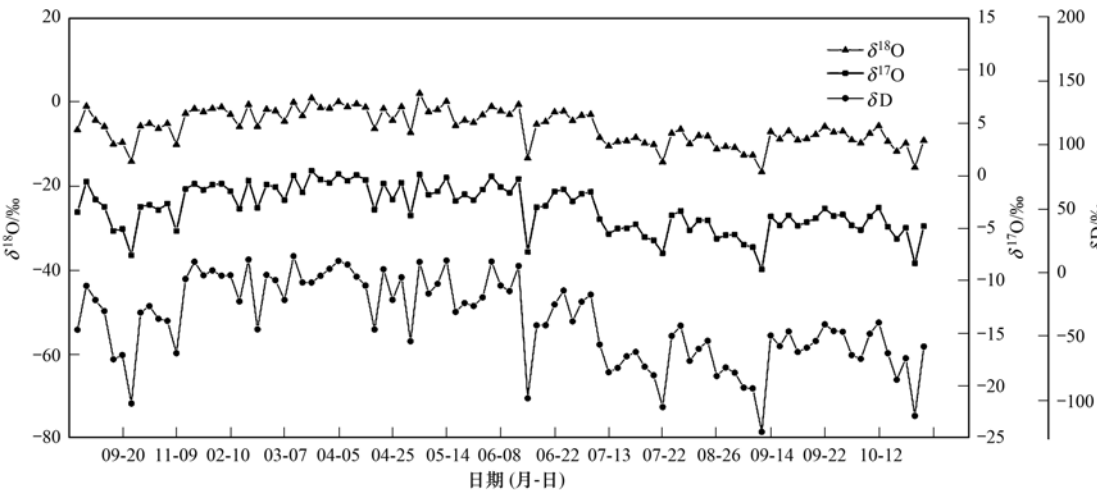


图 2 次降水事件的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 值

Fig. 2 Values of δD , $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$ in event-based precipitation

表 1 成都地区次降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$ 值的变化情况/‰

Table 1 Variations of δD , $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{17}\text{O}$ in event-based precipitation in Chengdu Area/‰

项目	全年		旱季		雨季	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
δD	-124.9 ~ 12.8	-37.8	-63.3 ~ 12.8	-11.0	-124.9 ~ 9.4	-43.2
$\delta^{18}\text{O}$	-16.7 ~ 1.9	-5.9	-10.2 ~ 0.9	-2.9	-16.7 ~ 1.9	-6.5
$\delta^{17}\text{O}$	-8.9 ~ 0.4	-3.1	-5.7 ~ -4.8	-1.5	-8.9 ~ 0.4	-3.5

δ 值在 2016 年 9 月出现了个别的偏正值,这可能是受到了厄尔尼诺现象的影响,2016 年厄尔尼诺

还没有结束,在此期间东南信风减弱,其越过赤道形成的西南季风也减弱,使西南季风带来的降水也

相对较少,而成都受由海陆热力性质差异所形成的东南季风的影响下,来自太平洋的降水较多,太平洋与印度洋水汽输送距离相比,前者距离我国成都地区较近,使得其同位素 δ 值偏正。

2.2 氢氧同位素关系

2.2.1 δD 和 $\delta^{18}O$ 相关关系

分别拟合成都全年和旱、雨两季的 δD - $\delta^{18}O$ 关系(图 3 和表 2),成都地区全年 D-O 大气降水线(LMWL)为 $\delta D = 7.83 \delta^{18}O + 8.79$ ($n = 113, R^2 = 0.97, P < 0.001$),与 GMWL^[9]: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ 和我国 LMWL^[11]: $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$ 很接近,但斜率和截距均偏小。卫克勤等^[20]得到的北京地区 LMWL 的斜率和截距也比 GMWL 低,认为在采样过程中,可能存在自由液面的蒸发,而本研究的采样装置使用了乒乓球装置避免蒸发,且在降雨结束时及时取回,基本可排除受到自由液面蒸发的影响。孟玉川等^[21]的研究表明小降雨事件有明显的云下二次蒸发现象,并且伴随着强烈的同位素动力分馏效应,会使降水线的斜率和截距变小。本次监测的 113 场次降雨中有 100 场是降雨量 ≤ 10 mm 的小降雨事件,占到总样本数量的 85% 以上,故认为雨滴降落时受到了严重的二次蒸发影响,氢同位素发生了不平衡分馏,从而造成斜率和截距偏低。此外,LMWL 的斜率小于 8 表明成都地区的降水来源于具有不同稳定同位素比率的源地^[22]。与 GMWL 相比,旱季和雨季的 D-O 大气降水线的斜率和截距也都偏小,雨季的斜率略大于旱季,这是由于雨季降雨量较大,持续降雨使大气中水汽含量趋于饱和或过饱和,水汽压变大,云下二次蒸发减弱,同位素分馏效应也减弱。旱季大气降水线的截距相比于雨季偏大,且更接近 10,表明成都地区旱季的水汽团形成时湿度较低,动力分馏作用强。

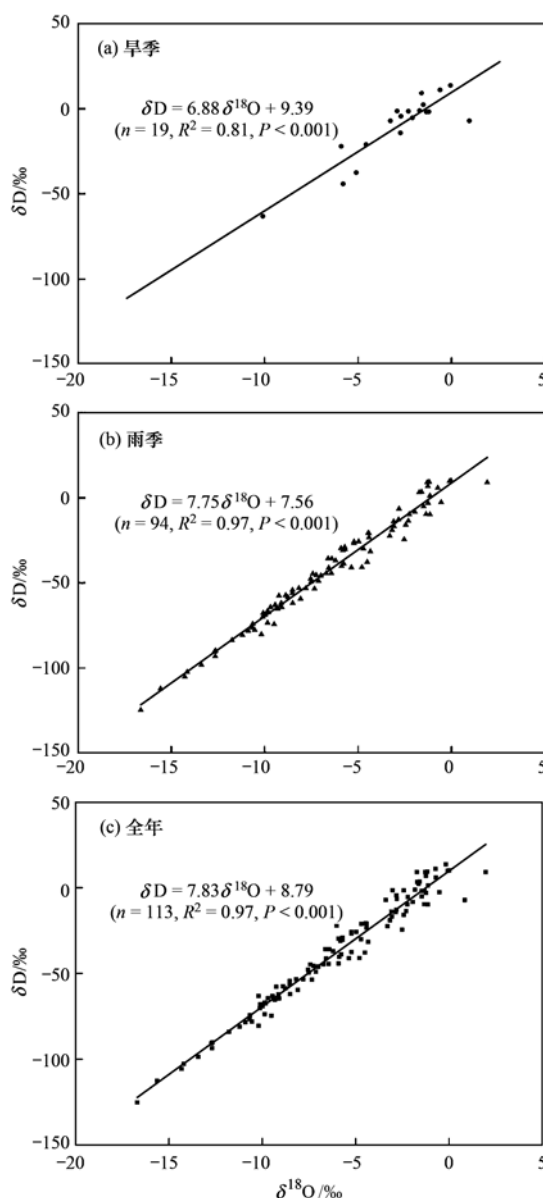


图 3 成都地区 δD - $\delta^{18}O$ 大气降水线

Fig. 3 Local meteoric water line for δD and $\delta^{18}O$ of the Chengdu area

表 2 成都地区大气降水线

Table 2 Local meteoric water line of the Chengdu area

阶段	δD - $\delta^{18}O$	d -excess/‰	$\delta^{17}O$ - $\delta^{18}O$	^{17}O -excess $\times 10^{-6}$
雨季	$\delta D = 7.75 \delta^{18}O + 7.56$	9.2	$\delta^{17}O = 0.5282 \delta^{18}O - 0.0511$	-6.1
旱季	$\delta D = 6.88 \delta^{18}O + 9.39$	12.7	$\delta^{17}O = 0.5208 \delta^{18}O + 0.0165$	37.8
全年	$\delta D = 7.83 \delta^{18}O + 8.79$	9.8	$\delta^{17}O = 0.529 \delta^{18}O + 0.0075$	1.3

2.2.2 $\delta^{17}O$ 和 $\delta^{18}O$ 相关关系

Luz 等^[23]通过测试全球多个国家地区大气降水样品的氧同位素组成,得出氧同位素的全球大气降水线为: $\delta^{17}O = 0.528 \delta^{18}O + 0.000033$ ($R^2 = 0.99999$),当在海面上海水蒸发达到平衡分馏($RH = 100\%$)时其斜率是 0.529,当扩散到干空气后斜率会逐渐降低至 0.518。

对成都全年、旱季和雨季次降水中的氧同位素进行拟合(图 4 和表 2)发现,全年的三氧同位素大气降水线的斜率略小于 0.529,表明成都地区处于海洋气团向内陆干旱区迁移的路径上,大气降水主要来自海洋气团。雨季的大气降水线的斜率和截距均与 Luz 等^[23]得出的降水线比较接近,说明成都雨季次降水的氧同位素主要受到平衡分馏的影响;而

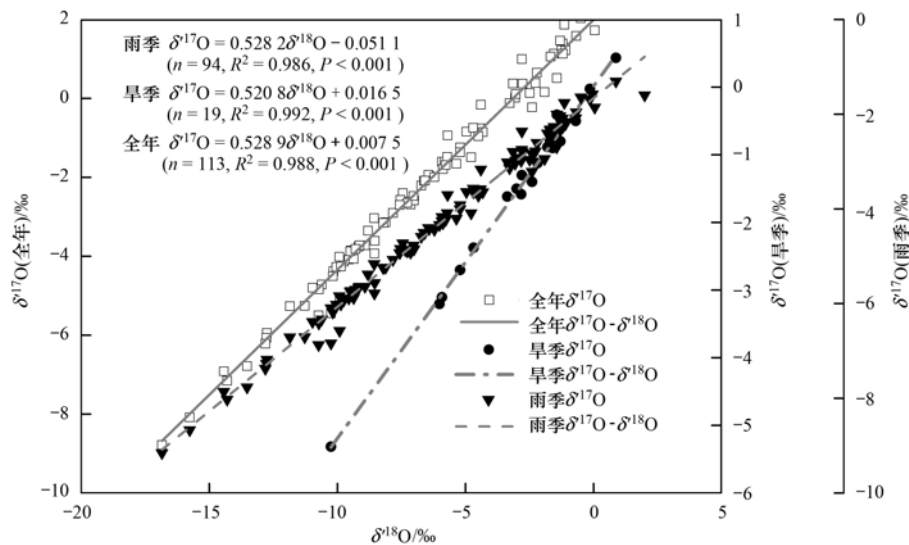


图4 成都地区三氧同位素大气降水线

Fig. 4 Triple oxygen isotope on the local meteoric water line of the Chengdu area

旱季空气湿度较小, 存在不平衡的动力分馏, 因此旱季三氧同位素大气降水线的斜率相对偏低.

2.3 氘盈余(*d*-excess)分析

本研究次降水的 *d* 值变化范围(图5): $-7.6‰ \sim 25.4‰$, 平均值为 $9.8‰$, 接近全球平均值 $10‰$, 表明成都地区的水汽来源应该是海洋气团主导. *d* 值表现出与氢氧同位素一致的季节性差异(表2), 同样是因为成都两季降水的水汽来源及蒸发条件不同, 这也是季风区降水的一个明显特点^[24]. 具体分析发现, 雨季有 45 场(占雨季总次降水数量的 48%)次降水的 *d* 值都高于全球平均水平 $10‰$, 有个别极高值: $18.4‰$ (2017 年 4 月 24 日)、 $17.8‰$ (2017 年 6 月 4 日)、 $16.6‰$ (2016 年 9 月 18 日)和 $16.1‰$ (2016 年 10 月 20 日), 这与下垫面蒸发水汽的混合补给有关, 局地蒸发速率大于凝结速率时, 水汽处于不平衡状态, 受分子扩散速度影响, 蒸发相中 ^{18}O 相对 D 贫化, 从而水汽中含有较高的 *d*

值^[25]. 旱季次降水中, 在 2017 年 2 月 23 日和 2016 年 11 月 7 日 *d*-excess 出现了极低值, 分别为 $2.7‰$ 和 $3.7‰$. 旱季出现 *d* 低值的两场次降水的降水量都很小, 分别为 1.5 和 2.2 mm, 且都是持续降水过程, 那么这些低值都是受到了严重的云下二次蒸发效应的影响. 此外, 根据成都气象局发布的人影作业预报, 出现 *d* 低值期间成都进行了多次人工降雨, *d* 低值很可能是受到了人工增雨的影响, 因为使用人工催化技术, 借助火箭高炮等发射工具, 会改变云层天然成雨的条件, 使得水汽团温度快速降低, 水汽迅速冷凝形成降水, D 和 ^{18}O 的分馏速率之比减小, 使 *d* 值偏低.

2.4 ^{17}O 盈余(^{17}O -excess)分析

2.4.1 ^{17}O -excess 的变化

成都地区年内次降水的 ^{17}O -excess 值平均为 1.3×10^{-6} , 远较海水的 ^{17}O -excess(一般为负值)大, 说明海洋气团到达成都的过程中同位素经历了严重的富集. ^{17}O -excess 的负值占总数的 42.5%, 由前述分析得出成都地区全年主要受到平衡分馏的影响, 一般平衡过程中 ^{17}O -excess 值相对偏负^[26]. Angert 等^[27]的研究认为, 当冷却空气中通过简单的瑞利蒸馏使得 $\delta'^{18}\text{O}$ 减少时, 则 ^{17}O -excess 会增加. 成都地区全年都有蒸发, 而且有大量的二次蒸发, 会导致水残留比率降低, $\delta'^{18}\text{O}$ 增加, 从而 ^{17}O -excess 值降低达到负值.

从图 5 可以看出, ^{17}O -excess 值与 *d*-excess 表现出基本同步的变化趋势. ^{17}O -excess 主要受控于水汽源区的相对湿度(RH), 与之成反比^[28], 成都雨季水汽源区的相对湿度大于旱季, 因此, 雨季的 ^{17}O -excess 值比旱季的偏小. 但是个别 ^{17}O -excess 值

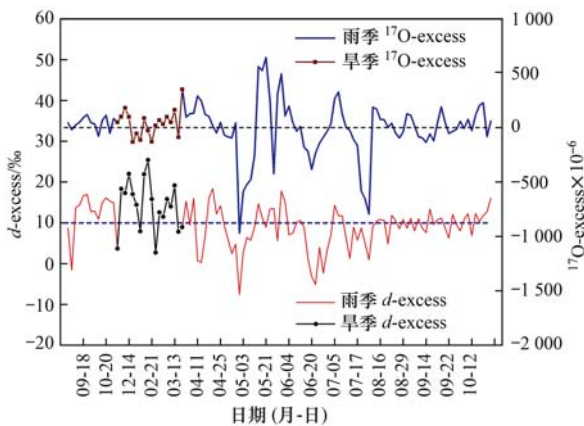


图5 次降水 *d*-excess、 ^{17}O -excess 值年内时间变化

Fig. 5 Variation of *d*-excess and ^{17}O -excess values in event-based precipitation during the year

反而在湿度大的雨季偏高,湿度小的旱季偏低,无法只用相对湿度解释其变化, Landais 等认为 ^{17}O -excess 可能还会受到上游水汽团对流的影响,因为 $\delta^{18}\text{O}$ 对于对流过程的响应很敏感,从而可能进一步影响到 ^{17}O -excess 值的变化. 雨季初期(4 月初)正是上游大量大气对流现象发生的阶段,也就解释了图 5 中在雨季初期 ^{17}O -excess 几乎保持稳定而 d -excess 变化较大的原因. 此外, ^{17}O -excess 值介于 $-970.6 \times 10^{-6} \sim 642.5 \times 10^{-6}$ 之间,极值之间相差较大,这是由于次降水相比于月降水而言,更容易受相对湿度以及水汽来源等短期天气因素的影响,离散程度相对较大. 从图 5 中可以看出,大幅度的波动主要集中在 5~7 月,其余时间的 ^{17}O -excess 值变幅则很小. 5~7 月正处于成都的雨季中期,大气对流现象较少,因此 ^{17}O -excess 值几乎完全取决于水汽源地的相对湿度和降水发生地的再蒸发程度. 这一时期成都地区受太平洋高压和印度洋低压的双重影响,水汽来源复杂;且降水频繁,各次降水的降水量差异较大,使得再蒸发程度不同,导致 ^{17}O -excess 波动较大.

表 3 研究期 ^{17}O -excess 和区域气象因素(相对湿度、温度、降水量)之间的相关关系

Table 3 Relationships between the ^{17}O -excess and local meteorological parameters (relative humidity, temperature and precipitation amount) over the study period

项目	相对湿度		温度		降水量	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
^{17}O -excess(旱)	0.560	0.016	0.197	0.434	0.091	0.720
^{17}O -excess(雨)	0.015	0.882	-0.252	0.014	-0.004	0.969
^{17}O -excess(全年)	0.048	0.615	-0.182	0.054	-0.002	0.980

2.4.3 ^{17}O -excess 与 $\delta^{18}\text{O}$ 及 d -excess 之间的关系

成都地区年内水汽来源较复杂,为了探寻水汽源的蒸发状况,定量分析了降水中 ^{17}O -excess 与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d -excess 之间的关系(表 4).

从表 4 和图 6 中可以看出,雨季降水的 ^{17}O -excess 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的正相关关系很微弱($r = 0.062$),这表明除了水汽源区的动力分馏效应外,多种因素也会影响降水同位素组成. 旱季的降水 ^{17}O -excess 与 $\delta^{18}\text{O}$ 存在负相关关系($r = -0.362$),而且旱季成都地区的相对湿度为 80%~98%, $\delta^{17}\text{O}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 三氧同位素大气降水线的斜率为 0.520 8(表 2),小于海水平衡分馏的斜率 0.529,这表明,成都地区旱季的

表 4 全年及旱雨两季 ^{17}O -excess 与 $\delta^{18}\text{O}$ 、 d -excess 之间的相关关系

Table 4 Relationships between ^{17}O -excess, $\delta^{18}\text{O}$, and d -excess during the year in two seasons(dry and wet)

项目	$\delta^{18}\text{O}$		d -excess	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
^{17}O -excess(旱)	-0.362	0.140	0.401	0.099
^{17}O -excess(雨)	0.062	0.554	0.449	<0.001
^{17}O -excess(全年)	0.064	0.504	0.208	0.027

2.4.2 影响 ^{17}O -excess 的区域气象因素

^{17}O -excess 可以反映不同降水的形成机制,如在非洲出现的雨滴再蒸发效应[与相对湿度(RH)呈正相关]^[29],极地过饱和的固体凝结(与温度正相关)^[30,31],以及在中纬度地区与温度的负相关^[32]. 为了更好地识别降水过程中 ^{17}O -excess 的影响因素,利用 SPSS 分析了研究期间它对相对湿度,温度和降水量的敏感性(表 3). 本研究期内 ^{17}O -excess 全年几乎不受区域气象因子的影响,其相关性均较弱($|r| < 0.30$),而旱、雨两季的 ^{17}O -excess 对区域气象因子的敏感性比整个研究期内的更复杂. 旱季, ^{17}O -excess 与 RH 呈正相关($r = 0.56$),说明旱季成都水汽来源中掺杂的海洋水汽较少,主要来源于内陆, RH 大时,降水从云层底部降落到地面的二次蒸发效应弱,相应地 ^{17}O -excess 值大; RH 小时,需要经历强烈的二次蒸发以形成降水,使得 ^{17}O -excess 值偏小甚至为负值. 而雨季, ^{17}O -excess 基本没有受到成都地区气象因子的影响($|r| < 0.30$),因此,雨季降水的 ^{17}O -excess 可以作为水源蒸发状况的示踪剂.

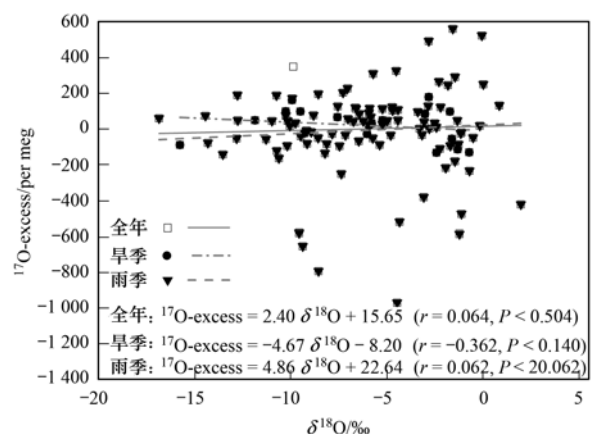


图 6 全年及旱雨两季降水的 ^{17}O -excess 与 $\delta^{18}\text{O}$ 相关关系

Fig. 6 Relationships between ^{17}O -excess and $\delta^{18}\text{O}$ of event-based precipitation during the year in two seasons(dry and wet)

降水过程大多受到了动力分馏效应影响,但在相对湿度较高时也存在稳定的平衡分馏. 雨季降水 ^{17}O -excess 与 d -excess 之间存在显著的正相关关系($r = 0.449$, $P < 0.001$),大于旱季的相关性($r = 0.401$, $P = 0.099$),进一步证明了平衡动力分馏效应对降

水同位素组成的影响。

3 讨论

本文分析得出的成都次降水同位素变化特征与吴旭东^[17]的研究结果相同,雨季低旱季高,也和中低纬季风区的降水同位素特征一致,说明成都地区主要受季风活动影响,两季的水汽来源和蒸发条件不同。 δ 最低值出现在季风期末且小于 GNIP 历史监测值,季风期末大量降水贫化了重同位素,且受降水量效应影响出现了 δ 低值,这一情况也在王昕卉对海河流域的大气降水同位素展开研究时出现^[33]。此季风期末还出现了个别偏正的 δ 值,研究认为是受到了厄尔尼诺现象的影响,这与之前的研究结果相近,例如:温艳茹等^[34]发现重庆 2015 年的大气降水在厄尔尼诺影响下,其 δ 值明显偏正。GNIP 历史监测数据中 1997 年为厄尔尼诺年,也出现了 δ 值偏正的情况。

与吴旭东^[17]得出的成都大气降水线相比,本文拟合出的成都次降水 LMWL 的斜率和截距偏大,GNIP 的监测时期(1986~1998 年)与本次研究期相距时间较长,且其每年 10 月~次年 2 月的大气降水数据多缺测,本研究则对成都地区大气降水在一个水文年内进行的短期研究,因此取样期差异及较为久远的时间跨度使得大气降水线的分析结果出现差异,此外,本研究对象为次降水,不同于 GNIP 的月降水数据,二者所携带的信息不同,次降水稳定同位素值及大气降水量更容易受到风速、湿度以及水汽来源等短期天气因素的影响,表现为 $\delta^{18}\text{O}$ 离散程度较大,从而导致基于次降水所建立的 LMWL 的斜率和截距偏大^[35]。

研究期内 $^{17}\text{O-excess}$ 的负值占总数的 42.5%,而 Luz 等^[23]研究的世界 52 个场次降水中只有黑山和印度 2 个 $^{17}\text{O-excess}$ 负值。其中印度受季风影响较大,在湿度和蒸发的作用下出现了负值,与成都相似,数量比例上的差异是由研究区域尺度、研究期以及样品数量的不同导致的。个别次降水 $^{17}\text{O-excess}$ 值在湿度大的雨季偏低,湿度小的旱季偏高,故认为无法只用相对湿度解释 $^{17}\text{O-excess}$ 的变化,它还可能与上游水汽团的对流强度有关,因为 $\delta^{18}\text{O}$ 对于对流过程的响应很敏感,而 $\delta^{18}\text{O}$ 会进一步影响到 $^{17}\text{O-excess}$ 值的变化。这一观点与 Landais 等^[29]相同,他们也认为,相对湿度引起的再蒸发不能解释所有 $^{17}\text{O-excess}$ 值的变化。

整个研究期的降水 $^{17}\text{O-excess}$ 主要受水汽源和水分运输轨迹的大气条件影响,而几乎没有受到当地气象因素的影响,而季节性降水的 $^{17}\text{O-excess}$ 受

到了部分区域气象因子的影响。这与美国中部观察到的情况相同^[36]。旱季 $^{17}\text{O-excess}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 呈反比,与 $d\text{-excess}$ 呈正相关,且三氧同位素大气降水线的斜率 0.520 8 介于 0.518 3~0.526 5 之间,根据稳定和非稳定条件下的概念蒸发模型理论^[37],这表明了旱季成都地区的降水主要受到由蒸发引起的动力分馏影响,同时 $^{17}\text{O-excess}$ 也可以反映蒸发发生地的相对湿度。

本研究针对次降水事件展开,某种程度上补充了 GNIP 在成都地区大气降水的缺测数据,也补充了成都小天气尺度下氢氧同位素的变化规律以及对水汽来源的指示意义。本研究认为,旱季出现的 d 低值很可能是受到了人工增雨的影响,但研究期尚较短,且有数次人工增雨后的降水样品未采集到,且在非人工增雨密集时期的 9 月亦出现了 d 值偏低的情况,若要深入研究人工增雨是否会改变在天然环境下大气降水的同位素组成还应延长观测时间,并对成都人工增雨的历史及具体工作情况展开详细的调查。此外,其他可能导致 $^{17}\text{O-excess}$ 发生变化的大尺度过程(如:上游气团对流、陆地水汽再循环等),还有待进一步地研究。

4 结论

(1)成都次降水中的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 ^{17}O 、 $d\text{-excess}$ 和 $^{17}\text{O-excess}$ 都有一致的季节性变化,雨季低旱季高, δ 最低值集中在季风期末,最高值集中在雨季初期。最低值低于 GNIP 历史监测数据,可能与 2016 年厄尔尼诺现象有关。

(2)成都 LMWL 的斜率和截距都比 GMWL 偏小,表明其降水来源于具有不同稳定同位素比率的源地,且受到了二次蒸发的影响;全年三氧同位素大气降水线的斜率略小于 0.529,表明成都处于海洋气团向内陆干旱区迁移的路径上,雨季斜率接近 0.529,而旱季斜率偏低,表明雨季基本只受平衡分馏影响,旱季多发生动力分馏。

(3)次降水中 d 值接近全球平均值,其中雨季的极高值很可能与下垫面蒸发水汽的混合补给有关;旱季的极低值是受到二次蒸发效应影响,也可能是受到了人工降雨作业的影响。

(4)成都次降水的 $^{17}\text{O-excess}$ 值偏大,说明海洋气团到达成都地区的过程中同位素经历了严重的富集。水汽源地的相对湿度是影响 $^{17}\text{O-excess}$ 变化的主要因素,但无法解释所有次降水 $^{17}\text{O-excess}$ 的变化,上游气团发生对流也会影响 $^{17}\text{O-excess}$ 的变化。

(5)整个研究期的降水 $^{17}\text{O-excess}$ 基本不受区域气象因素的影响,因此 $^{17}\text{O-excess}$ 可以指示成都水

汽蒸发状况;旱、雨两季 ^{17}O -excess 对区域气象因素的响应不同,为研究区域大气降水过程提供了更多的信息。

参考文献:

- [1] Treble P C, Budd W F, Hope P K, *et al.* Synoptic-scale climate patterns associated with rainfall $\delta^{18}\text{O}$ in southern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **302**(1-4): 270-282.
- [2] Argiriou A A, Lykoudis S. Isotopic composition of precipitation in Greece[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **327**(3-4): 486-495.
- [3] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, *et al.* Annually resolved ice core records of tropical climate variability over the past ~ 1800 years[J]. *Science*, 2013, **340**(6135): 945-950.
- [4] Jasechko S, Gibson J J, Edwards T W D. Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 336-346.
- [5] Li Z X, Qi F, Wang Q J, *et al.* Contributions of local terrestrial evaporation and transpiration to precipitation using $\delta^{18}\text{O}$ and D-excess as a proxy in Shiyang inland river basin in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, **146**: 140-151.
- [6] Wang S J, Zhang M J, Che Y J, *et al.* Contribution of recycled moisture to precipitation in oases of arid central Asia: A stable isotope approach[J]. *Water Resources Research*, 2016, **52**(4): 3246-3257.
- [7] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [8] 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.
- [9] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [10] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 738-747.
Zhang Y H, Wu Y Q, Wen X H, *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle[J]. *Advances in Water Science*, 2006, **17**(5): 738-747.
- [11] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, (13): 801-806.
- [12] 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.
- [13] 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. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam basin[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2784-2790.
- [14] Landais A, Barkan E, Luz B. Record of $\delta^{18}\text{O}$ and ^{17}O -excess in ice from Vostok Antarctica during the last 150,000 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(23): L02709.
- [15] Landais A, Barkan E, Yakir D, *et al.* The triple isotopic composition of oxygen in leaf water[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(16): 4105-4115.
- [16] Barkan E, Luz B. Diffusivity fractionations of in air and their implications for isotope hydrology[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2007, **21**(18): 2999-3005.
- [17] 吴旭东. 成都地区大气降水稳定同位素组成反应的气候特征[J]. *四川地质学报*, 2009, **29**(1): 52-54, 58.
Wu X D. Stable isotope compositions for meteoric water from Chengdu and their implication of climate[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, **29**(1): 52-54, 58.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 卫克勤, 林瑞芬, 王志祥. 北京地区降水中的氕、氧-18、氡含量[J]. *中国科学 B 辑*, 1982, (8): 754-757.
- [21] 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.
- [22] 章新平. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. *地理学报*, 1998, **53**(4): 356-364.
Zhang X P. Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, **53**(4): 356-364.
- [23] 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.
- [24] He S Y, Richards K. Stable isotopes in monsoon precipitation and water vapour in Nagqu, Tibet, and their implications for monsoon moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **540**: 615-622.
- [25] Gat J R, Bowser C J, Kendall C. The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere: estimate based on stable isotope data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **21**(7): 557-560.
- [26] 黄荷, 罗明明, 陈植华, 等. 香溪河流域大气降水稳定氢氧同位素时空分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2016, **43**(4): 36-42.
Huang H, Luo M M, Chen Z H, *et al.* The spatial and temporal distribution of stable hydrogen and oxygen isotope of meteoric water in Xiangxi river basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, **43**(4): 36-42.
- [27] 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.
- [28] 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*, 2016, **121**(19): 11215-11247.
- [29] Landais A, Risi C, Bony S, *et al.* Combined measurements of $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ and d_{excess} in African monsoon precipitation: Implications for evaluating convective parameterizations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **298**(1-2): 104-112.
- [30] Landais A, Ekaykin A, Barkan E, *et al.* Seasonal variations of ^{17}O -excess and d -excess in snow precipitation at Vostok station, East Antarctica[J]. *Journal of Glaciology*, 2012, **58**(210): 725-733.
- [31] Pang H X, Hou S G, Landais A, *et al.* Spatial distribution of ^{17}O -excess in surface snow along a traverse from Zhongshan

- station to Dome A, East Antarctica [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, **414**: 126-133.
- [32] Affolter S, Häuselmann A D, Fleitmann D, *et al.* Triple isotope (δD , $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$) study on precipitation, drip water and speleothem fluid inclusions for a Western Central European cave (NW Switzerland) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **127**: 73-89.
- [33] 王昕卉. 海河流域降水稳定同位素研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2014. 22-23.
- [34] 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.
- [35] 刘梦娇. 重庆市北碚区不同水体稳定同位素特征及其气候指示意义[D]. 重庆: 西南大学, 2016. 17-18.
- [36] Tian C, Wang L X, Kaseke K F, *et al.* Stable isotope compositions ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$) of rainfall and snowfall in the central United States [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 6712.
- [37] Li S N, Levin N E, Chesson L A. Continental scale variation in ^{17}O -excess of meteoric waters in the United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, **164**: 110-126.

环境科学

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)