

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用水安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源

朱建佳^{1,2,3}, 陈辉^{1*}, 巩国丽⁴

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 山西省环境规划院, 太原 030024)

摘要: 稳定性氢氧同位素可以作为示踪剂来判断大气降水的水汽来源. 本研究选择柴达木盆地南部的格尔木和东北部的德令哈两个区域, 在分析这两个地区2010年6~9月降水同位素组成特征、时间变化以及降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系的基础上, 探讨柴达木盆地降水的水汽来源. 结果表明: ①格尔木和德令哈地区6~9月大气降水线分别为, 格尔木: $\delta D = 7.840 \delta^{18}O - 4.566$ ($R^2 = 0.918, P < 0.001$), 德令哈: $\delta D = 7.833 \delta^{18}O + 8.606$ ($R^2 = 0.986, P < 0.001$). 两地区6~9月大气降水线的斜率和截距均低于全球大气降水线, 而格尔木地区的截距仅为-4.566, 反映出格尔木极其干旱的气候特点. ②格尔木降水的 $\delta^{18}O$ 在7月初较高, 表现出一定的重同位素富集; 在7月中下旬至9月初, $\delta^{18}O$ 较低; 9月中下旬更低. 德令哈降水的 $\delta^{18}O$ 在6~8月相对较高, 9月中下旬较低. ③格尔木和德令哈地区水汽来源有一定的差异, 格尔木地区可能是西南季风能够到达青藏高原的北部边界, 德令哈地区水汽来源主要为局地蒸发.

关键词: 柴达木盆地; 氢氧同位素; 水汽来源; 大气降水线; 过量氘

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2784-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.008

Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin

ZHU Jian-jia^{1,2,3}, CHEN Hui^{1*}, GONG Guo-li⁴

(1. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Shanxi Academy of Environmental Planning, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Stable hydrogen and oxygen isotopes can be used as a tracer to analyze water vapor sources of atmospheric precipitation. We choose Golmud and Delingha as our study areas, Golmud locates in the south of Qaidam basin, and Delingha locates in the northeast. Based on the analysis of monthly change of hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation during June to September of 2010, and the relationship between δD and $\delta^{18}O$ in precipitation, we investigated the water vapor sources of precipitation in eastern Qaidam basin. The results show that: ① meteoric water line between June to September in Golmud is: $\delta D = 7.840 \delta^{18}O - 4.566$ ($R^2 = 0.918, P < 0.001$), and in Delingha is: $\delta D = 7.833 \delta^{18}O + 8.606$ ($R^2 = 0.986, P < 0.001$). The slopes and intercepts of meteoric water line between June to September in both Golmud and Delingha are lower than the global average, and the intercept in Golmud is only -4.566, which indicates the extremely arid climate condition. ② the $\delta^{18}O$ content of precipitation is much higher in Golmud in early July, it shows the enrichment of some heavier isotopes. However, the $\delta^{18}O$ content of precipitation becomes lower from late July to early September, especially for the late September. The $\delta^{18}O$ content of precipitation in Delingha is higher in June to August than that in late September. ③ the water vapor sources of precipitation in Golmud and Delingha are different, Golmud area is the northern border of Qinghai-Tibet Plateau where the southwest monsoon can reach, and the southwest monsoon brings water vapors of precipitation, but the water vapors of precipitation in Delingha are mainly from local evaporation.

Key words: Qaidam Basin; hydrogen and oxygen isotopes; water vapor sources; meteoric water line; deuterium excess

大气降水作为水循环中的重要组成部分, 其稳定同位素的组成受到水汽来源地、水汽输送过程、大气环流及水汽输送路径等因素的影响^[1]. 全球水分最终都来自于海洋水的蒸发, 在水循环过程中会发生同位素分馏(即同位素以不同的比率分配到两种物质或物相中的现象^[2]). 水汽由海洋向陆地输送时, 含重同位素组分的水汽往往先形成降水, 而高空中水汽逐渐富集轻同位素, 因此, 水汽输送路程越长, 氢氧同位素值就会越小. 然而, 区域河水、湖泊

等蒸发形成的降水中氢氧同位素值与当地的气候关系紧密, 例如干旱区由于降水稀少、蒸发强烈, 河水、湖泊、土壤水等往往具有较高的同位素值, 使得由当地水分蒸发形成的降水同位素值也偏高. 因此, 可以将水体中的氢氧同位素作为水汽来源及运

收稿日期: 2014-12-16; 修订日期: 2015-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971118)

作者简介: 朱建佳(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为综合自然地理学, E-mail: zhujj.13b@igsnr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: chenhui@igsnr.ac.cn

动路径的自然示踪剂,进而利用其变化规律来反演天气系统及大气环流过程^[3,4].

柴达木盆地位于青藏高原北部,在众多关于季风分区的研究中,柴达木盆地被认为是西南夏季风、东南夏季风以及冬季风三者的交界地带,其中东南季风影响很微弱^[5-7],水汽输送情况较复杂.以往对青藏高原水汽来源的研究认为:青藏高原南部和北部降水的水汽来源不同,南部降水主要为西南季风带来的印度洋的水汽,而北部地区深居大陆内部,距海洋远,降水主要来自本地蒸发的水汽和西风带输送的水汽,中部为过渡区^[8-10].全球大气降水同位素网络(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)和青藏高原大气降水同位素网络(Tibetan Network for Isotopes in Precipitation, TNIP)在青藏高原共设24个观测台站,只有受西风带控制的德令哈站在柴达木盆地内部^[10],对于柴达木盆地其他地区的水汽来源尚不明确.本研究选择柴达木盆地南部过渡区的格尔木和东北部已有相关研究的德令哈,在分析这两个地区降水同位素组成时间变化以及降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系的基础上,探讨柴达木盆地降水的水汽来源,以期增进对柴达木盆地水汽输送过程的了解.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

柴达木盆地位于青藏高原北部边缘(图1),是

一个封闭的中新生代断陷盆地,东西长约800 km,南北宽约300 km,地形呈北西西-南东东走向^[11].具有典型的高原大陆性干旱气候,降水量少,且主要集中在6~9月.多年平均降水量为107.2 mm,降水分布由东南向西北、由四周高山区向盆地中心递减.柴达木盆地四周为高山环抱,高山上的积雪和冰川为盆地的地下水和地表径流提供了可靠的补给来源^[12].

格尔木位于柴达木盆地南缘,南邻昆仑山,平均海拔2 800 m;德令哈是青海省海西州首府所在地,位于柴达木盆地东北边缘,属祁连山地,西南距格尔木市387 km,平均海拔2 980 m.格尔木和德令哈属于高原大陆性气候,降水稀少且集中在夏季,格尔木年蒸发量高达3 000 mm以上,德令哈年蒸发量为2 439.4 mm.1981~2010年格尔木多年平均气温为5.8℃,降水量为45.2 mm;2010年平均气温为6.8℃,年降水量为90.8 mm,6~9月降水量占全年降水总量的76.5%.1981~2010年德令哈多年平均气温为4.4℃,降水量为202.9 mm;2010年德令哈平均气温为5.0℃,年降水量为265.1 mm,6~9月降水量占全年降水总量的64.1%(蒸发量数据由格尔木和德令哈气象站提供,气温和降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网).

1.2 样品采集与分析方法

采样点分别位于格尔木市气象站(36°20'44.6" N, 95°05'26.0"E;海拔2 889 m)和德令哈市气象站

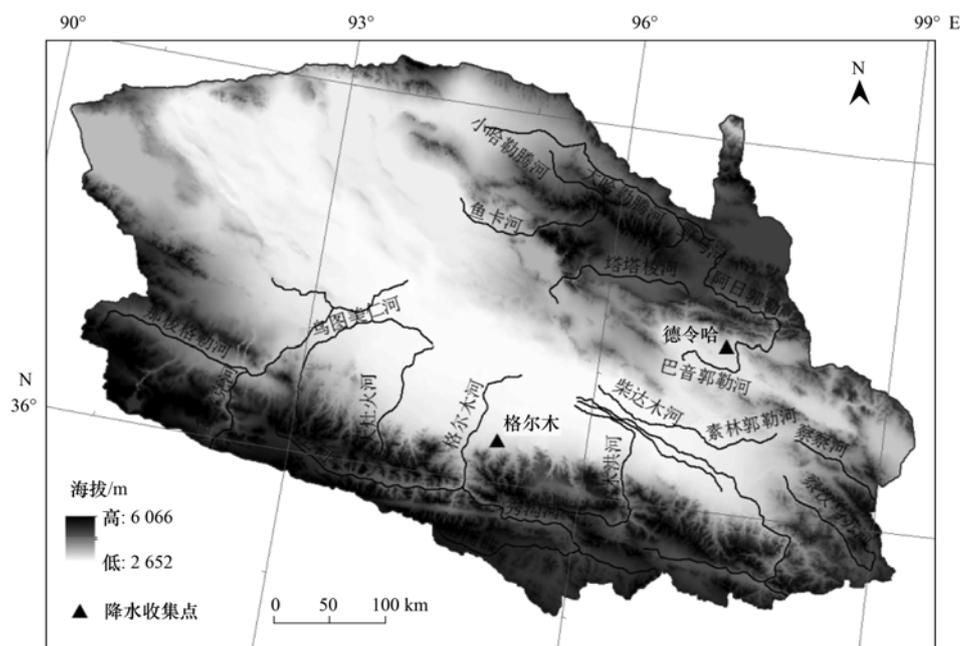


图1 采样点在柴达木盆地的位置

Fig. 1 Sampling locations in the Qaidam Basin

(37°20'56.9"N, 97°17'02.5"E; 海拔2971 m)内,于2010年6月17日至9月30日,收集格尔木和德令哈的每一次降水,并记录降水的起止时间、降水量以及降水前后的温度. 格尔木、德令哈两地区分别收集到降水13次和20次. 并于2010年6~9月每隔半月收集一次气象站附近的河水和表层土壤样品(0~10 cm). 所有采集的样品均立即装在4 mL玻璃样品瓶中,并用Parafilm封口膜密封,冷藏保存,以防止水分发生分馏. 所有样品取3个平行样.

土壤中水分采用低温真空蒸馏法提取,提取出来的水分与河水、降水样品在河北师范大学稳定同位素实验室用Picarro L2130-i液态水同位素分析仪进行 δD 和 $\delta^{18}O$ 的测定. δD 的误差小于0.100‰, $\delta^{18}O$ 的误差小于0.025‰. Picarro L2130-i液态水同位素分析仪采用稳定同位素红外光谱技术,由于水分抽提过程中容易混入与水分子具有相似光谱吸收峰的甲醇和乙醇等有机物,会引起光谱污染,造成结果的偏差,因此需要对结果进行检验并校正. Picarro ChemCorrect水同位素分析仪数据校验软件能够有效检验出有机物污染,本实验未检验出有机污染样品,结果可靠. 测定结果用国际原子能机构(IAEA)提供的3个梯度的国际标准样品进行校正.

2 结果与分析

2.1 降水氢氧同位素组成特征随时间的变化

2010年6月17日至9月30日格尔木总降水量

为35.4 mm,总降水次数13次,其中大于5 mm降水3次,最大1次降水量为8.3 mm. 德令哈降水相对较多,采样期间总降水量为154.8 mm,共观测到大小降水20次,两次较大降水分别是发生在7月1日的21.1 mm和7月16日的15.1 mm,除这两次之外,降水量均在10 mm以下,大于5 mm降水共8次. 格尔木降水零星分布在7、8、9月这3个月,德令哈在6、7、9月这3个月中降水较多.

两地区6~9月降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 存在较大波动,格尔木 δD 的变化范围为: -125.42‰ ~ 21.06‰,平均值为-56.32‰, $\delta^{18}O$ 的变化范围: -16.23‰ ~ 1.89‰,平均值为-6.60‰; 德令哈 δD 的变化范围为: -125.50‰ ~ 13.20‰,平均值为-50.45‰, $\delta^{18}O$ 的变化范围: -17.21‰ ~ 0.29‰,平均值为-7.54‰.

格尔木降水的 $\delta^{18}O$ 在7月初较高,平均为 $-0.66‰ \pm 1.27‰$ (Mean \pm S. E., 下同),表现出一定的重同位素富集; 在7月中下旬至9月初, $\delta^{18}O$ 较低,平均为 $-5.29‰ \pm 1.70‰$; 9月中下旬更低,平均为 $-13.04‰ \pm 1.60‰$. 德令哈降水的 $\delta^{18}O$ 在6~8月相对较高,平均为 $-4.56‰ \pm 0.77‰$; 9月中下旬较低,平均为 $-14.47‰ \pm 0.65‰$ (图2). 格尔木和德令哈降水的 $\delta^{18}O$ 值与降水量、降水前温度的相关分析表明,两地区均无降水量效应,仅德令哈表现出一定的温度效应: $\delta^{18}O = 0.77T - 18.65$ (T 为降水前温度, $R^2 = 0.27, P = 0.02$).

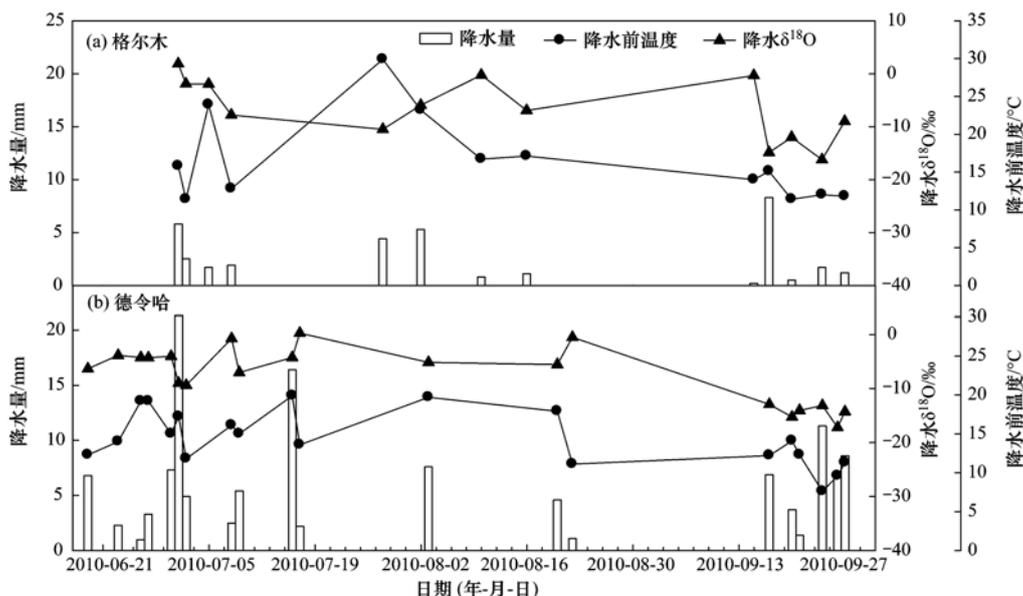


图2 2010年6~9月格尔木、德令哈日降水量、降水前温度及降水 $\delta^{18}O$ 值

Fig. 2 Daily precipitation, anterior temperature before precipitation and $\delta^{18}O$ in precipitation of Golmud and Delingha during June to September, 2010

2.2 降水 δD 与 δ¹⁸O 的关系

降水同位素中 δD 与 δ¹⁸O 的线性关系称为大气降水线, 全球大气降水线方程^[13]为 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$, 而 δD 与 8 倍 δ¹⁸O 的差值被定义为过量氘, 用 *d* 表示 ($d = \delta D - 8 \delta^{18}O$)^[14]. 大气降水线、过量氘对判断区域干旱程度和水汽来源具有重要意义.

两地区 6~9 月大气降水线的斜率和截距均低

于全球大气降水线, 格尔木 6~9 月大气降水线的截距为 -4.566, 德令哈的截距为 8.606 (图 3), 都小于全球大气降水线方程的截距, 符合干旱区的特点. 而格尔木由于强烈的蒸发和极少的降雨量使得降水过程中氢氧同位素分馏明显, 降水中的氢氧同位素值相对较高, 反映出格尔木极其干旱的气候特点.

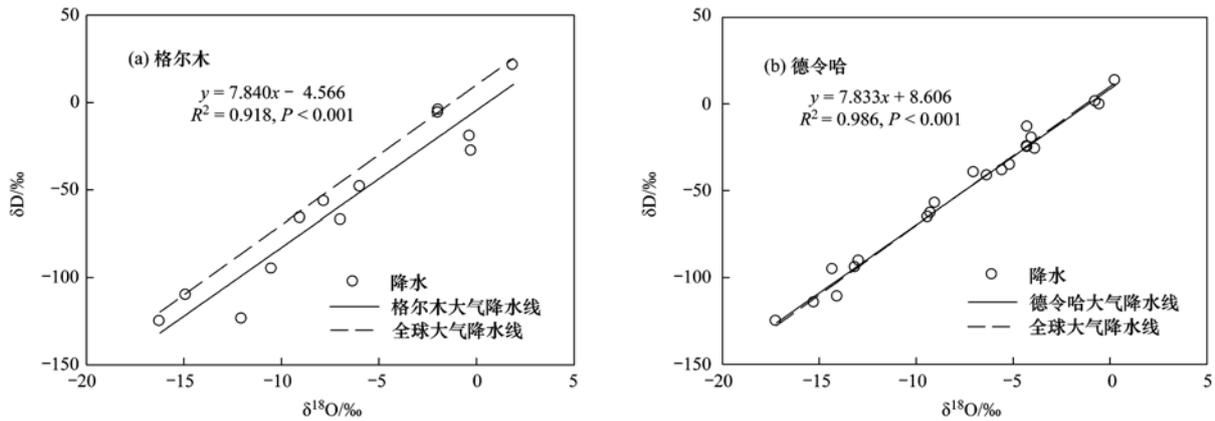


图 3 格尔木与德令哈 6~9 月大气降水线

Fig. 3 Meteoric water line between June to September of Golmud and Delingha

两地区降水的 *d* 具有一定的差异, 且波动范围较大. 格尔木 *d* 的变化范围为: -27.86‰ ~ 10.79‰, *d* 的降水量加权平均值为 1.87‰; 德令哈 *d* 的变化范围为: 0.96‰ ~ 20.25‰, *d* 的降

水量加权平均值为 12.41‰. 格尔木 *d* 在 7 月中下旬至 9 月初值较低, 7 月初和 9 月中下旬较高; 德令哈的 *d* 在 6~9 月都比较高, 随时间无明显变化 (图 4).

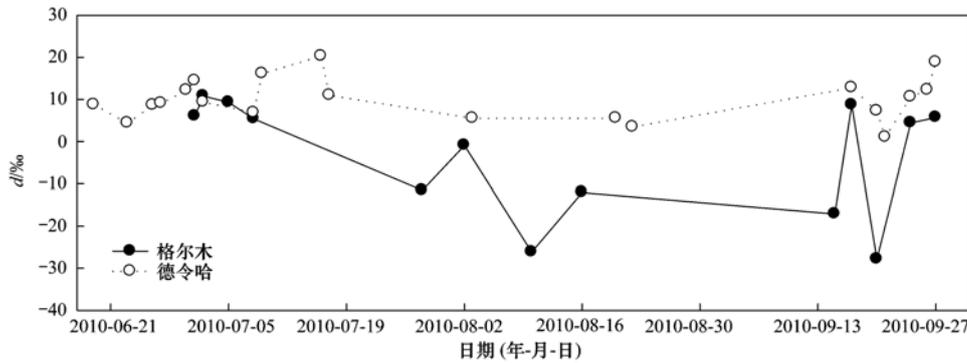


图 4 2010 年 6~9 月格尔木与德令哈过量氘的时间变化

Fig. 4 Variation in *d*-excess of Golmud and Delingha during June to September, 2010

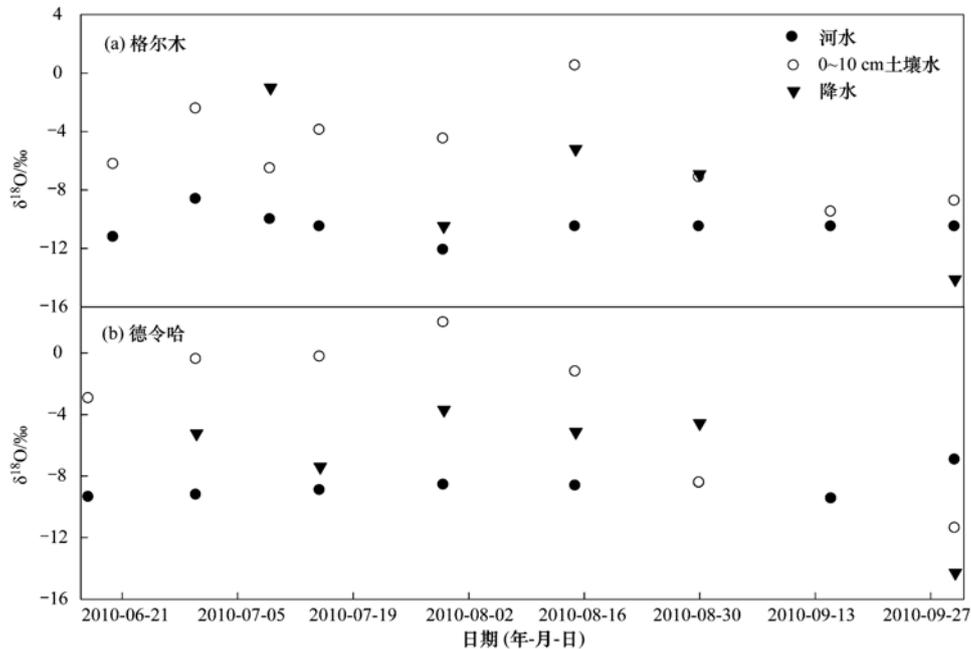
3 讨论

降水中氢氧同位素值和 *d* 都可以用来指示水汽来源, 降水中 *d* 的高低主要取决于水汽来源地的温度、相对湿度和风速等因素^[14], 因此, 由湿润的海洋性气团带来的水汽, 降水中 *d* 较低, 而海洋性气团在输送过程中重同位素不断贫化, 形成的降水中氢氧同位素值低于局地蒸发的水汽. 杨梅学等^[15]在

研究藏北高原夏季水汽来源时, 认为降水中 δ¹⁸O < -20‰, 水汽来源为海洋性气团; 降水中 δ¹⁸O > -13‰, 水汽来源为局地蒸发. 格尔木和德令哈同属青藏高原北部地区, 两地区在 2010 年 6~9 月的降水中 δ¹⁸O 都高于 -20‰, 这主要是由于青藏高原北部气候干旱、蒸发强烈, 海洋性气团向内陆输送过程中与当地蒸发的水汽混合^[16], 使降水的 δ¹⁸O 值有所升高. 而且两地区降水同位素值在 7 月初至 9 月上旬都高

于河水(图5),证实了青藏高原北部降水水汽来源主要为局地蒸发的结论^[10].然而,格尔木和德令哈降水

的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 变化特征还存在一些差异,说明柴达木盆地内部不同地区水汽来源不完全相同.



格尔木取样河流在8月以后出现断流,由于河水同位素值时间变化不大,因此可以用前几次河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值作为8月以后河水的同位素值,和降水进行比较

图5 2010年6~9月格尔木、德令哈降水、河水和表层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值

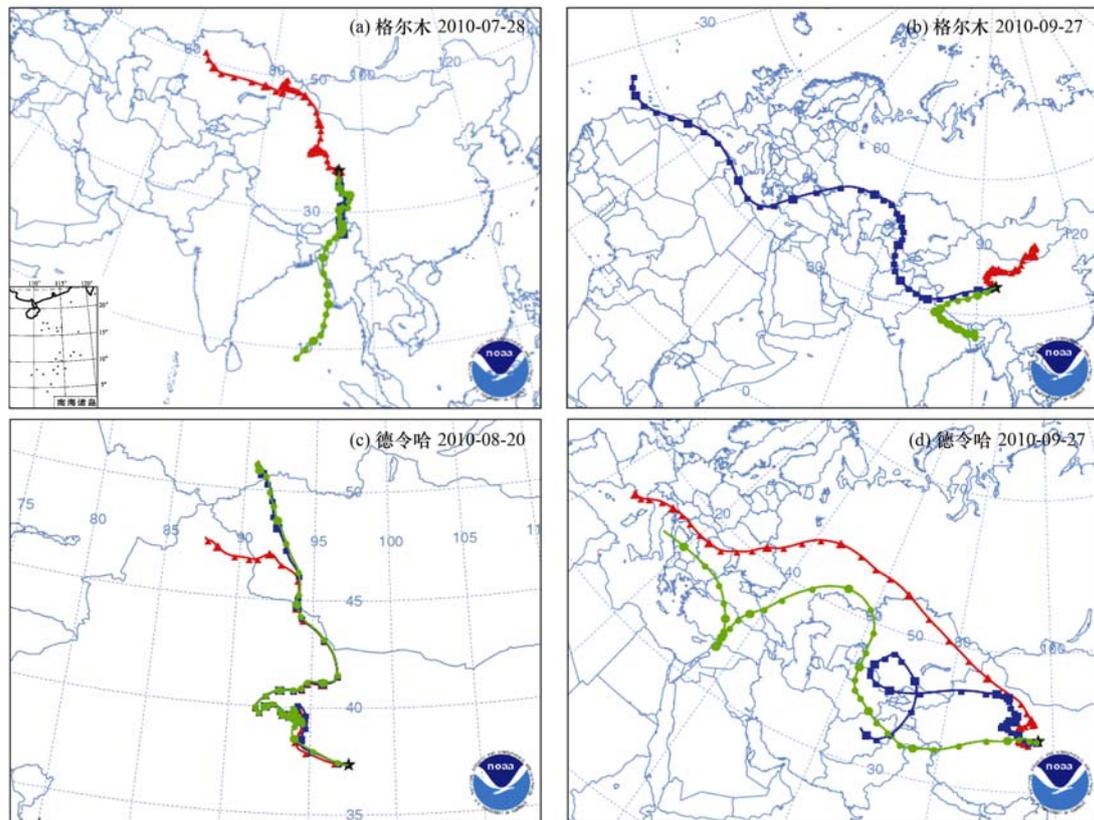
Fig. 5 $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation, river water and surface soil water of Golmud and Delingha during June to September, 2010

从格尔木降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 随时间的变化(图2、图4)可以看出,7月初 d 值较高,而且降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 高于河水和表层土壤水(图5),水汽主要为局地蒸发.在7月中下旬至9月初,降水同位素值处于表层土壤水和河水之间,降水主要来源为局地蒸发;而低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 反映了降水水汽来源地气候湿润,说明这段时间的降水除了当地河、湖、土壤水等蒸发的水汽外,可能还混有少量西南季风输送的印度洋水汽.研究表明,印度洋水汽是青藏高原南部降水的主要来源^[17,18],随着纬度增加,西南季风影响逐渐减弱,局地蒸发水汽组成的大陆性气团所占比例逐渐增大^[17].印度洋区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的多年平均值为 -4.26‰ ^[19],输送到拉萨(青藏高原南部),降水 $\delta^{18}\text{O}$ 降低到 -16.24‰ ,再向北输送,印度洋水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 会更加贫化,但是由于混入越来越多局地蒸发的水汽,使得青藏高原中北部降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值有所升高(青藏高原中部沱沱河降水 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -11.85‰ ^[9]).姚檀栋等^[9]将青藏高原上 35°N 以北地区划分为西风区,而格尔木的纬度为 36°N ,在西南季风较强的年份,可能会有部分印度洋的水汽影响到格尔木地区的降水.

德令哈降水的 d 值始终保持较高的水平(图

4),反映出德令哈水汽来源主要为局地河水、土壤水的蒸发.格尔木和德令哈两地区9月下旬降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 为6~9月的最低值,均低于河水和表层土壤水(图5),说明此时除了当地河水、土壤水的蒸发之外,降水还有其他来源;然而较高的 d 反映出水汽来源地的气候相对干燥,因此可以推断还有部分来自西风输送的中亚内陆地区的水汽(中亚地区降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 -9.79‰ ^[20]).德令哈地区9月下旬降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 较低,还受到了“温度效应”的控制,与Yao等^[21]、章新平等^[22]的结论一致.

为了验证稳定氢氧同位素技术指示柴达木盆地降水水汽来源结果的可靠性,本研究还应用HYSPLIT模型^[23](Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model),对格尔木和德令哈2010年6~9月的每次降水气团进行后向轨迹模拟,垂直方向上选取1000、2500、3000 m这3个高度作为模拟的初始高度,模拟其向后追踪10 d的运动轨迹(图6).该模型在确定降水水汽来源的研究中也得到了广泛的应用^[24,25].从格尔木和德令哈2010年6~9月的降水气团的后向轨迹可以看出,两地区主要的水汽来源是西风带输送的中亚内陆水汽以及局地蒸发的水汽,格尔木在7月有来自西南



不同颜色轨迹代表的垂直高度分别为,红色:1 000 m,蓝色:2 500 m,绿色:3 000 m

图 6 2010 年 6~9 月格尔木、德令哈降水水汽团典型后向轨迹

Fig. 6 Typical air mass backward trajectories of Golmud and Delingha during June to September, 2010

方向的水汽,9月下旬西风带对两地区水汽输送影响较大.后向轨迹模拟的结果与稳定氢氧同位素的分析结果相符合.

综合以上研究结果,格尔木和德令哈水汽来源以局地蒸发为主,但不同时间水汽来源也存在一些差异.格尔木地区位于柴达木盆地南缘,昆仑山北麓,夏季强盛的西南季风可能会将少量印度洋的暖湿气流带到格尔木,形成降水.德令哈地区位于柴达木盆地东北部,祁连山南麓,到达格尔木的西南季风已经比较微弱,因此印度洋水汽很难到达德令哈.格尔木地区可能是西南季风能够到达青藏高原的北部边界.

4 结论

(1) 格尔木和德令哈地区 6~9 月大气降水线分别为,格尔木: $\delta D = 7.840 \delta^{18}O - 4.566$ ($R^2 = 0.918, P < 0.001$),德令哈: $\delta D = 7.833 \delta^{18}O + 8.606$ ($R^2 = 0.986, P < 0.001$).两地区 6~9 月大气降水线的斜率和截距均低于全球大气降水线,而格尔木地区的截距仅为 -4.566 ,反映出格尔木极其干旱的

气候特点.

(2) 格尔木降水的 $\delta^{18}O$ 在 7 月初较高,平均为 $-0.66\text{‰} \pm 1.27\text{‰}$,表现出一定的重同位素富集;在 7 月中下旬至 9 月初, $\delta^{18}O$ 较低,平均为 $-5.29\text{‰} \pm 1.70\text{‰}$;9 月中下旬更低,平均为 $-13.04\text{‰} \pm 1.60\text{‰}$.德令哈降水的 $\delta^{18}O$ 在 6~8 月相对较高,平均为 $-4.56\text{‰} \pm 0.77\text{‰}$;9 月中下旬较低,平均为 $-14.47\text{‰} \pm 0.65\text{‰}$.

(3) 根据 6~9 月大气降水线方程截距、 d 特征及大气降水与河水、表层土壤水 $\delta^{18}O$ 比较,格尔木和德令哈地区水汽来源有一定的差异.格尔木 7 月上旬水汽来源于当地河湖等的蒸发,7 月中旬至 9 月上旬降水来源为局地蒸发和少量印度洋水汽;德令哈地区水汽来源主要为局地蒸发;格尔木和德令哈两个地区 9 月下旬主要水汽来源为当地河湖等蒸发的水汽和西风输送的中亚地区水汽.格尔木地区可能是西南季风能够到达青藏高原的北部边界.

参考文献:

- [1] Bouchaou L, Michelot J L, Vengosh A, *et al.* Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of

- recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **352**(3-4): 267-287.
- [2] 杨杰东, 徐士进. 同位素与全球环境变化[M]. 北京: 地质出版社, 2007. 5-8.
- [3] Yamanaka T, Tsujimura M, Oyunbaatar D, *et al.* Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **333**(1): 21-34.
- [4] 陈粉丽, 张明军, 马潜, 等. 兰州及其周边区域大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其水汽来源[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3755-3763.
- [5] Xiao J, An Z S. Three large shifts in East Asian monsoon circulation indicated by loess-paleosol sequences in China and late Cenozoic deposits in Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, **154**(3): 178-189.
- [6] An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, *et al.* Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**(8): 743-762.
- [7] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 区域特征及其对古气候研究的意义[J]. *地球与环境*, 2008, **36**(1): 47-55.
- [8] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(3): 214-220.
- [9] 姚檀栋, 周行, 杨晓新. 印度季风水汽对青藏高原降水和河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程递减率的影响[J]. *科学通报*, 2009, **54**(15): 2124-2130.
- [10] Yao T D, Masson-Delmotte V, Gao J, *et al.* A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, **51**(4): 525-548.
- [11] 刘燕华. 柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1-8.
- [12] 张家楨, 刘恩宝. 柴达木盆地河流水文特性[J]. *地理学报*, 1985, **40**(3): 242-255.
- [13] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [14] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [15] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析[J]. *地理科学*, 2004, **24**(4): 426-431.
- [16] 徐彦伟, 康世昌, 张玉兰, 等. 夏季纳木错湖水蒸发对当地大气水汽贡献的方法探讨: 基于水体稳定同位素的估算[J]. *科学通报*, 2011, **56**(13): 1042-1049.
- [17] 尹常亮, 田立德, 余武生, 等. 羊卓雍错流域降水中稳定氧同位素变化特征[J]. *冰川冻土*, 1994, **28**(6): 918-924.
- [18] 田立德, 姚檀栋, Numaguti A, 等. 青藏高原南部季风降水中稳定同位素波动与水汽输送过程[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(B12): 215-220.
- [19] Tian L, Masson-Delmotte V, Stievenard M, *et al.* Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [20] 章新平, 刘晶淼, 中尾正义, 等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 613-619.
- [21] 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.
- [22] 章新平, 中尾正义, 姚檀栋, 等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(5): 353-361.
- [23] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model [EB/OL]. http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php, 2014-8-13.
- [24] 郭晓方, 崔阳, 王开扬, 等. 近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 388-395.
- [25] 李小飞, 张明军, 李亚举, 等. 西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 711-719.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行