

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析

陈同同, 陈辉*, 韩璐, 邢星, 付阳阳

(河北师范大学环境与资源科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

摘要: 根据2013年4月到2014年5月测得的石家庄市降水及2013年石家庄市雨季土壤水、灌溉水的稳定氢氧同位素, 通过稳定同位素示踪的方法从时间和空间的角度分析了不同土壤层位中的稳定同位素的变化规律, 进而得出土壤的水分迁移过程。结果表明, 过量氘均值为 $-6.1885‰$, 反映了石家庄2013~2014年的年降水主要来自季风带来的海洋水汽, 同时有一定的局地蒸发。石家庄土壤水的来源主要是降水, 灌溉水在雨季前期有辅助作用, 且雨季的降水量足以对土壤进行适当补给。10~100 cm土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随深度增大而减小, 雨季最大蒸发深度在40 cm左右, 取样期间基本上形成了一个土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 峰值沿剖面徘徊中不断向下推进的情况, 反映了降水的入渗、蒸发和新老水的混合的相互作用。

关键词: 石家庄市; 稳定氢氧同位素; 降水; 土壤水; 土壤水入渗

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3641-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.012

Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City

CHEN Tong-tong, CHEN Hui*, HAN Lu, XING Xing, FU Yang-yang

(Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: In this study, we analyzed the stable hydrogen and oxygen isotope values of precipitation, soil water, irrigation water that collected in Shijiazhuang City from April 2013 to May 2014 to investigate the changing rule of the stable isotopes in different soil profiles and the process of soil water movement according to using the isotope tracer technique. The results showed that the mean excess deuterium of the local precipitation was $-6.1885‰$. Those reflected that the precipitation in Shijiazhuang City mainly brought by the monsoon from the ocean surface moisture, and also to some extent by the local evaporation. Precipitation was the main source of the soil water and the irrigation water played the supplementary role. In the rainy season, precipitation was enough to supply the soil water. The stable oxygen isotopes at 10-100 cm depth decreased with the increase of depth, the maximum depth of evaporation in the rainy season reached 40 cm. The peak of stable oxygen isotopes of soil water pushed down along the profile, which was infected by the interaction of the precipitation infiltration, evaporation and the mixing water.

Key words: Shijiazhuang City; stable hydrogen and oxygen isotope; precipitation; soil water; soil water movement

土壤水是土壤物质组成的重要肥力因素, 不仅是植物生长所必须的生态因子, 也是土壤生态系统中物质和能量的流动介质。土壤水分的主要来源是大气降水、地下水、灌溉用水, 还有少量的水汽凝结; 土壤耗散的主要途径有土壤蒸发、植被吸收利用和蒸腾、水分的渗漏和径流。而土壤水补给和耗散的过程构成了土壤的水分运移。前人已经对土壤水运移展开了较多的研究: 郝芳华等^[1,2]利用土壤水运动模型研究干旱半干旱农灌区土壤水和地下水的运移规律, 陈有君等^[3]利用土壤含水量研究沙地中植被下土壤水分状况, 张军等^[4]利用P-M修正公式研究了番茄根系层土壤水分的运移规律, 张英虎等^[5]通过室内土柱穿透性分析研究了鹫峰地区根系和石砾对土壤水运移的影响, 吕斯丹等^[6]运用ENVIRO-GRO模型模拟不同灌溉条件下的土壤水分运动。20世纪70年代稳定性同位素开始应用到生态学领域, 并被逐渐引进到土壤水的研究当中, 稳

定氢氧同位素为有效示踪剂可以有效揭示土壤水的来源、蒸发和入渗等各种水分运移过程。国外运用此方法已取得不少研究成果^[7,8]。在我国, 研究者也将此方法利用到不同区域的土壤水的研究当中并且取得了一定成果: 田立德等^[9]运用 $\delta^{18}\text{O}$ 研究青藏高原中部土壤水中稳定同位素的变化, 发现地下水在青藏高原中部土壤水分活动中的活跃作用; 田日昌等^[10]用稳定同位素研究湘西红壤油茶林和玉米地土壤水的运动规律并计算了土壤水的入渗速度; 徐庆等^[11]用 δD 研究了卧龙高山针叶林不同群落土壤水的特征; 陈建生等^[12]运用同位素示踪分析了阿拉善沙漠湿沙层的水分来源。我国此领域的相关研究多集中在干旱半干旱地区和湿润半湿润地区, 且

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971118)

作者简介: 陈同同(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境演变与全球变化, E-mail: chentongtongking@126.com

* 通讯联系人, E-mail: chenhui@igsnr.ac.cn

多集中在地下水相关的联系方面^[13],而对处在温带季风气候的华北平原地区的小尺度土壤水运移的研究则相对较少. 随着华北平原近年来地下水位下降,地下水已经很少能够自动上升补给土壤水,灌溉水的需求量增大,水资源供需矛盾日益突出,研究市区土壤水分运移已成为合理规划城市水资源的必然选择. 因此,本研究运用稳定氢氧同位素的示踪技术,通过对比分析降水、灌溉水以及各层土壤水同位素值来分析以石家庄市为代表的华北平原山前洪积平原土壤水的运移特征,对于掌握市区人工土壤的水分运动机制,解决植被的实际需水、植被恢复等问题有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石家庄市地处河北省中南部,位于北纬 37°27' ~ 38°47',东经 113°30' ~ 115°20'之间,平均海拔 77.9 m. 地貌单元属太行山山前冲洪积平原. 气候属于暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热,春季温和,四季分明;年平均气温 11 ~ 14℃,年平均降水量 450 ~ 550 mm;受季风气候影响,降水量季节分布差异显著,降水主要集中在夏季(6 ~ 8月)占全年降水量的 70%左右^[14]. 自然植被区划属于暖温带落叶阔叶林带^[15]. 采样点的位置是石家庄市南二环河北师大新校区北门口东侧绿化带内(37°59'40"N, 114°30'55"E),范围内主要乔木为杨树,此样地 2009 年以前为工厂的废弃荒地.

1.2 样品的采集与测试

1.2.1 取样方法

在 2013 年的雨季(5 ~ 9 月)期间于石家庄市南二环绿化带内完成对土壤、地下水(灌溉水)、降水样品的采集. 样品共 159 个,其中土壤样品 110 个、地下水(灌溉水)样品 5 个、降水样品 44 个(其中所有样品都含有 3 个平行样).

土壤样品的采集采用的是 100 cm 长的土钻手工钻取,从 5 月 3 日开始每月中旬和月底分别取一次,每次采集 10 个层次,即取样间隔为 10 cm. 将其中一份平行样通过烘干称重的方法进行土壤含水量的测定;将另外样品迅速放入 4 mL 样品瓶内,密封,分别标注取样日期、土壤深度并立即进行冷冻;期间收集的降水、地下水样品冷藏保存.

降水样品的采用标准的雨量桶在样地附近宽敞的六层楼顶收集,每次降水结束后立即收集水样测量降水量,冷藏样品. 2013 年雨季共收集降水 33 次.

从石家庄市环卫绿化公司获得灌溉水的基本情况,南二环绿化带每年 3 月浇一次透水,10 t 左右;4 ~ 5 月浇一次水,土湿 10 cm 左右;6 ~ 8 月不浇水;9 ~ 10 月浇一次水,土湿 10 cm 左右;上冻后浇一次水,土湿 10 cm 左右. 期间分别收集到 2013 年 3 月 21 日、2013 年 5 月 5 日、2013 年 5 月 15 日、2014 年 3 月 15 日的灌溉水样. 由于本研究样地地下水水位是 40 m 左右不能达到所取土层,因此文中所讨论的地下水实为使用了地下水的灌溉水.

与取样日期相对应的日均温在 History: Weather Underground(http://classic.wunderground.com/history/airport/ZBSJ/2013/4/1/DailyHistory.html?req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA)气象网上进行下载.

1.2.2 样品分析

样品的分析全部在河北师大资源与环境科学学院自然地理实验室完成. 土壤含水量通过传统的烘干称重的方法进行测定. 土壤水提取采用低温真空蒸馏的方法^[16]. 提取出的土壤水分与降水、地下水样品过滤后经 Picarro A0214 微型高温裂解模块反应后可去除大部分有机物污染,并通过 Picarro L2130-i 超高精度液态水和水汽同位素分析仪进行 δD 和 $\delta^{18}O$ 的测定,其误差分别小于 0.100‰ 和 0.025‰. 分析得出的 δD 、 $\delta^{18}O$ 是同标准平均海洋水 SMOW 的千分差.

$$\delta X = [R_{\text{sam}}/R_{\text{std}} - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_{sam} 为待测样品的氢或氧同位素自然丰度比, R_{std} 为标准海洋水 SMOW 的氢或氧同位素自然丰度比.

1.2.3 数据分析

不同土壤层含水量以及不同深度和日期土壤水 $\delta^{18}O$ 的差异用 SigamaPlot 10.0 统计软件进行分析. 各土层土壤含水量随时间的变化和降水中同位素值的变化通过软件 Sigmaplot 进行分析.

2 结果与讨论

2.1 降水中稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系及过量氘

Craig^[17]根据全球降水中氢氧同位素存在的线性关系,通过计算得出全球尺度下二者的关系表达式: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$,并将其定义为大气降水线(MWL). Dansgaard^[18]提出了过量氘(deuterium excess)的概念: $d = \delta D - 8 \delta^{18}O$,用来评价样地降水偏离全球大气降水线的程度, d 值在全球尺度下为 10‰,即全球尺度下大气水线的截距. 过量氘反映

了来源降水形成水汽团时的重要信息,以及降水过程中的二次蒸发的条件^[19],因此被比较普遍地运用到降水水汽来源以及降水地气候特征的研究中。

根据 2013 年和 2014 年的石家庄降水样品分析结果(图 1): 44 个降水样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别在 $-87.59‰ \sim -36.05‰$ 和 $-11.90‰ \sim 7.79‰$ 之间, 平均值分别是 $-47.13‰$ 和 $-7.19‰$ 。根据测得的石家庄 2013 年 5 月到 2014 年 5 月的降水样品中稳定同位素的值, 计算出该地的大气降水线 $y = 6.547x - 1.667$ ($R^2 = 0.941$, $P < 0.001$) 斜率为 6.547, 截距为 -1.667, 斜率略小于全球平均的斜率值, 这是由于观测点降水在受到来自太平洋东南季风的影响同时也受到一定局地蒸发的影响。对该地过量氘的计算其均值为 $-6.1885‰$, 过量氘值低于全球的平均过量氘值 $10‰$ 。这是由于 2013 ~ 2014 年较大降水量多集中于夏季, 降水量虽大但次数有限, 且全年单次降水量小但持续时间长的降水过程较多, 10 mm 以下降水就有 24 次(表 1), 说明石家庄的大部分水汽来自东南季风, 但部分水汽来自局地蒸发且降雨过程中有一定的二次蒸发。通过对该地区地下水、分层土壤水中 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 分布点与该样地大气降水线进行比较, 分析结果表明: 除了降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的值变动范围较大以外, 地下水、土壤水的稳定同位素值分布都较集中, 且都位于该地大气降水线右下方, 重同位素富集的现象明

显。地下水和各层土壤水的同位素值都分布在大气降水线附近, 比降水同位素值更接近, 且灌溉水(地下水)彼此之间十分接近, 说明地下水稳定同位素常年较稳定变化极小。

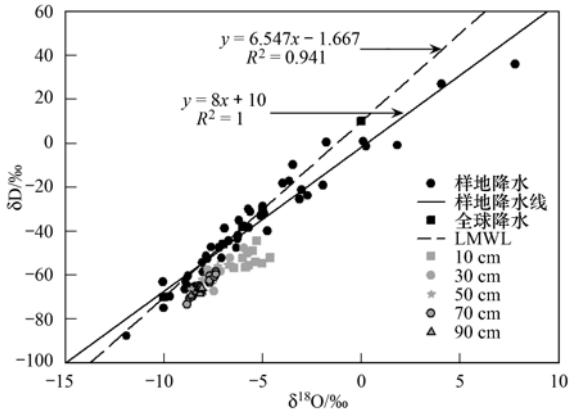


图 1 石家庄降水和土壤水的 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 1 Relations between δD and $\delta^{18}O$ of precipitation, soil water at Shijiazhuang City

2.2 降水量、温度及降水中 $\delta^{18}O$ 的变化特征

2013 年 4 月到 2014 年 5 月共收集降水 44 次, 其中 12 次降水量超过 20 mm, 降水日期分别是: 4 月 20 日、5 月 26 日、6 月 7 日、6 月 9 日、6 月 20 日、7 月 1 日、7 月 9 日、7 月 10 日、7 月 21 日、8 月 1 日、9 月 20 日、9 月 22 日。8 次降水量在 10 ~ 20 mm 之间, 24 次在 10 mm 以下(表 1)。

表 1 石家庄降水量和降水的稳定同位素¹⁾

Table 1 Stable hydrogen and oxygen isotope values and the amount of precipitation at Shijiazhuang City

日期	降水量/mm	$\delta^{18}O/‰$	$\delta D/‰$	日期	降水量/mm	$\delta^{18}O/‰$	$\delta D/‰$
2013-04-20	26.0	-10.06	-63.03	2013-08-06	3.0	-2.72	-23.77
2013-05-08	0.6	-3.66	-17.16	2013-08-07A	17.3	-8.91	-62.92
2013-05-21	0.1	-7.79	36.05	2013-08-07B	9.0	-6.73	-44.34
2013-05-26	22.5	-4.92	-31.87	2013-08-11A	4.5	-8.92	-66.33
2013-05-28	0.3	-4.75	-39.80	2013-08-11B	3.2	-10.02	-74.93
2013-06-01	0.9	0.24	-1.33	2013-08-13	2.5	-8.42	-64.96
2013-06-07	38.8	-5.94	-37.66	2013-08-28	1.7	-6.33	-47.56
2013-06-09	42.5	-7.21	-47.31	2013-09-04	13.7	-5.71	-38.47
2013-06-20	40.0	-7.60	-47.24	2013-09-17	17.6	-5.62	-31.16
2013-06-25	18.1	-6.26	-43.38	2013-09-20	23.1	-5.72	-29.99
2013-07-01	20.5	-8.77	-60.48	2013-09-22	23.1	-6.94	-38.81
2013-07-09	22.0	-7.79	-52.51	2013-10-14	7.0	-3.99	-18.14
2013-07-10	71.0	-7.87	-51.44	2013-11-01	1.2	-5.09	-32.90
2013-07-11	10.4	-8.06	-54.26	2013-11-09	2.7	-1.95	-19.10
2013-07-12	0.8	-7.71	-58.59	2014-02-26	2.0	-1.77	0.38
2013-07-14	4.0	-9.69	-69.68	2014-03-28	1.4	-3.03	-21.23
2013-07-15	1.0	-7.08	-52.32	2014-04-10	0.5	1.83	-0.916
2013-07-17	17.0	-8.80	-65.13	2014-04-15	0.2	4.07	26.93
2013-07-21	35.0	-11.90	-87.59	2014-04-18	2.6	0.08	0.903
2013-08-01	39.0	-6.24	-42.07	2014-04-18	18.0	-3.46	-9.79
2013-08-02	7.9	-6.20	-35.02	2014-04-25	5.9	-4.99	-28.56
2013-08-04	4.1	-3.14	-25.40	2014-05-10	14.1	8.01	-58.65

1) 相同日期后的 A 和 B 分别表示虽在同一天降水, 但降水停歇间隔时间超 6 h, A 在前 B 在后

石家庄市 2013 ~ 2014 年降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和温度和降水量的关系散点分布(图 2),降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月均温和月均降水量之间的回归分析的直线方程分别为:

$$\delta^{18}\text{O} = -0.239T - 1.089 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.824, P < 0.01)$$

$$\delta^{18}\text{O} = -0.028P - 3.673 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.575, P < 0.01)$$

降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈正相关关系叫做温度效应,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈负相关关系时说明存在降水量效应^[20]. 式(1)虽然相关系数较大但由于显示的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈负相关关系,所以没有明显的温度效应;式(2)里降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量呈负相关关系. 由于受夏季风影响,雨季降水主要来自海洋性气团,石家庄稳定同位素的夏季降水量效应明显^[21]. 并且,石家庄市 2013 年雨季降水次数较多

且集中,6~9 这 4 个月集中了全年几乎大部分的降水,最多一次降水量超过 70 mm,连续降水也较多(表 1). 夏季的降水量足以对土壤进行适当的补给. 另外看出 2013 年石家庄市大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 存在明显的季节性变化,夏季的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低,冬季的高,且季节性的变化较大,夏季半年与冬半年平均差值($\Delta \delta^{18}\text{O} = \overline{\delta^{18}\text{O}_{4\sim 9\text{月}}} - \overline{\delta^{18}\text{O}_{10\text{月}\sim \text{次年}3\text{月}}}$)可达 -2.644‰ 之多. 反映出石家庄 2013 年受季风气候影响明显,雨季降水主要是东南季风带来的海洋水汽团,湿度较大、蒸发较弱、降水量大、 $\delta^{18}\text{O}$ 随之变低,降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 随降水量的增加而降低(图 3);冬季受大陆性气团影响其特征正好相反,再加上 2013 年 12 月和 2014 年 1 月两个月的空雨期,其反映的季节效应更加明显,从而导致石家庄降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的降水量效应掩盖了温度效应使得温度效应无法体现.

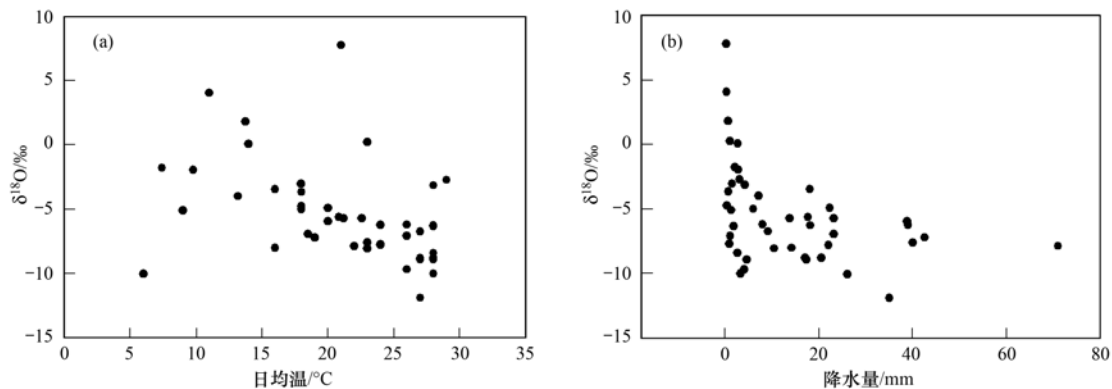


图 2 石家庄降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度和降水量的相关散点分布

Fig. 2 Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with temperature and precipitation amount in Shijiazhuang City

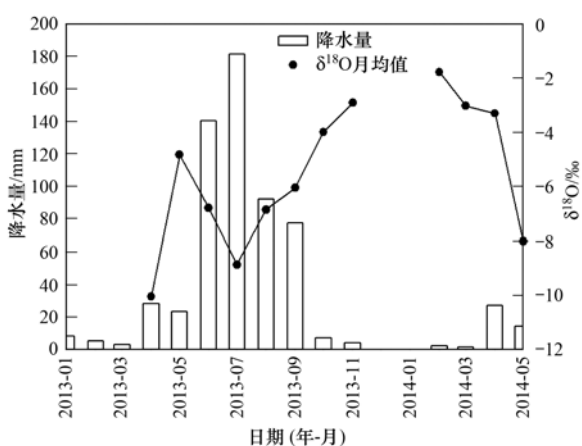


图 3 2013 ~ 2014 年石家庄各月降水量与各月 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值关系

Fig. 3 Relationship between monthly rainfall and $\delta^{18}\text{O}$ at Shijiazhuang City from April 2013 to May 2014

2.3 土壤含水量和土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值总的变化特征

由于氢同位素与氧同位素相比更容易受到外界

的影响,从而导致较大的计算结果误差;并且在以往的研究中氢同位素值的波动较氧同位素值大且波动剧烈,对较长时间的土壤水运移状况的反映有失真^[22],用氧同位素分析较长时间的土壤水分运移可以得到更为可靠的结果. 因此本研究中对每半个月一次土壤水稳定同位素的分析采用的是 $\delta^{18}\text{O}$ 而非 δD .

石家庄市 2013 年 5 月到 9 月不同深度土壤剖面含水量在时间的变化显示 6 月中旬到 8 月中旬之间土壤含水量较大,尤其是 7 月中旬. 虽然 6~8 月间没有灌溉水源的补给,但是从全年月均降水量来看,6、7、8 月是石家庄 2013 年降水量最多的 3 个月,有效验证了雨季降水对石家庄土壤的补给作用. 与之相比 5 月到 9 月不同时期土壤含水量在深度上的变化规律性较差,造成这种变化的原因可能是:①降水和灌溉水的入渗与土壤水的蒸发过程在土壤

中交替进行,土层剖面中 $\delta^{18}\text{O}$ 和相应的土壤含水量之间的关系更趋于复杂。②本文取样期间土壤含水量分布并不均匀,而目前关于含水率对土壤入渗的影响研究多数是在含水量分布均匀的前提下进行的。③本研究前期样地有过两次灌溉水的积累加上期间多次降水,导致土壤含水量的变化更为复杂。Bodman 等^[23]认为在土壤入渗初期随着含水率的增

加土壤入渗速率减小,随着时间的延续含水量对入渗的影响变小最终可以忽略[图 4 (a)]。但是 5~9 月土壤含水量的均值随深度变化显示,40~70 cm 层的含水量较少,均值为 16.9%,变化也较稳定。国内一些研究结果表明土壤平均入渗率与土壤含水率呈负相关的线性关系^[24],照此推测 40~70 cm 应该有一定的平均入渗速率[图 4 (b)]。

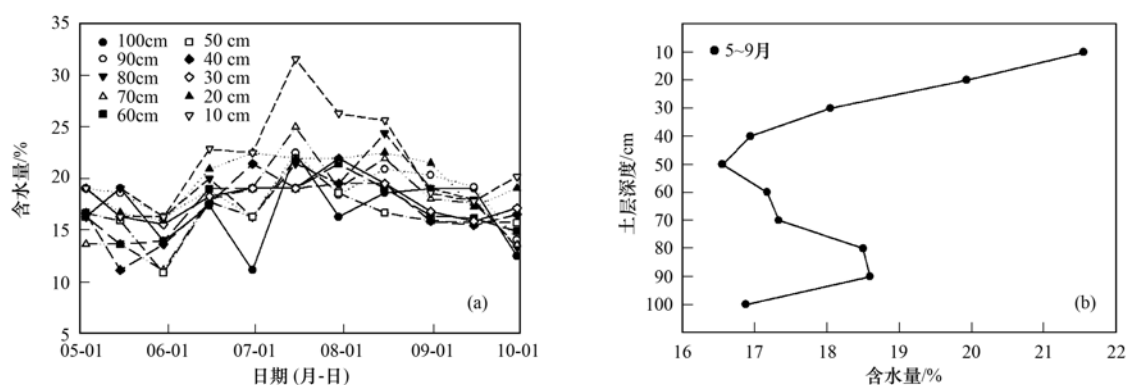


图 4 石家庄 2013 年雨季土壤含水量和含水量均值的变化

Fig. 4 Changes of soil water content and its mean values at Shijiazhuang City during the rainy season in 2013

该研究期间土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -11.4‰ 和 -4.6‰ 之间。不同取样时期土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 随土壤深度的变化显示 10~100 cm 土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体上呈递减的趋势,尤其是 10~30 cm 变化最大,变化幅度有向下逐渐减小的趋势。这是由蒸发导致的土壤水重同位素在土壤表层不断富集导致的。80~100 cm 大部分同位素值较稳定,除个别情况外几乎变化不大,并且有逐渐接近灌溉水(地下水) $\delta^{18}\text{O}$ 均值: -8.581‰ 的趋势。有研究认为^[25~27]:深层土壤水与地下水交换较活跃,而地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 常年较稳定变化不大;同时降水向土壤入渗的过程中,新水只取代了一部分旧水,导致越向深层土壤水同位素值变化越微小。本研究中,由于地下水位较低,不存在与地下水的交换情况。土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 6 月 15 日和 7 月 15 日的 80 cm 处以及 7 月 30 日的 100 cm 处分别出现了 3 个较小的值,尤其是 7 月 30 日的值,8 月 15 日不同深度土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的值最为接近差值最小。原因是:80 cm 为该样地土壤分层的交接处,容易造成积水,而 8 月上旬在没有灌溉水的情况下降水量也较少,只有 8 月 1 日降水量在 20 mm 以上,土壤有半个月的时间没有较大量水源补给,旧水可以充分地混合(图 5)。

2.4 石家庄市不同月份土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值连续变化特征

土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空分布对记录土壤的补给水

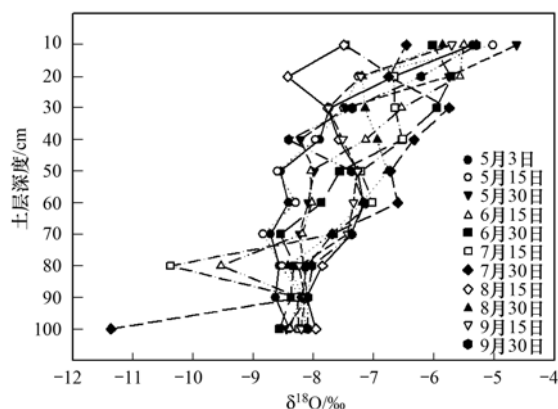


图 5 石家庄市 2013 年雨季土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 随深度的变化

Fig. 5 Spatial Changes of soil water $\delta^{18}\text{O}$ at Shijiazhuang City during the rainy season in 2013

由地表向地下入渗的过程,以及受蒸发作用土壤水或地下水向上运移过程有良好指示作用。由于受降水、灌溉水、土壤水的蒸发、旧水和新水的混合等因素的影响,土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布虽然复杂但也存在一定的规律性。本研究期间 5~9 月 10~70 cm 的土壤水同位素受到以上几种因素的混合作用比较明显。曾有研究发现干旱半干旱地区和红壤区持续干旱时段 30 cm 以上土壤水由于受蒸发的影响^[7],土壤水稳定同位素会随深度增加而减少(图 6)。图 6 中 5 月的 3 次取样 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 10~30 cm 处随深度

减少得非常明显,而 40~100 cm 的值却非常接近且都位于 -8.5‰ 左右,这一数值正好十分接近灌溉水(地下水)的 $\delta^{18}\text{O}$ 均值 (-8.581‰)。表明 5 月土壤水受蒸发作用的蒸发深度位于 10~40 cm 左右,原因是 5 月前期经历长时间的春旱降水稀少,天气干燥,5 月期间有过多次降水,但除了 5 月 26 日 22 mm 外其余几次降水量都不足 1 mm(表 1),且 5 月中旬虽有过灌溉,水量也极其有限,土湿不到 10 cm,40~100 cm 的土壤水自从 3 月分浇的一次透水后还未受其他的影响。6 月和 7 月由于月降雨量分别达到 140 mm 和 180 mm 以上,土壤水分运移以降水入渗为主,蒸发作用表现得不明显。8 月 9 月随着降水量逐渐减少表层又出现明显的蒸发效应,即 8 月的 10~20 cm 和 9 月的 10~30 cm、10~40 cm,可见

40 cm 以上蒸发作用明显,40 cm 为雨季土壤水蒸发达到的最大深度。

从 6 月开始便出现了土壤水同位素随深度增加而增大的情况,这种情况分别在 6~9 月都有表现,这是由降水入渗推动混合水向下移动引起的。但是 6~9 月不同取样期间稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 增大的深度却是不同的,分别是:6 月的 10~20 cm,7 月的 10~40 cm、20~30 cm,8 月的 20~60 cm、20~50 cm,9 月的 30~70 cm、40~70 cm。每半个个月的连续取样基本上形成了一个 $\delta^{18}\text{O}$ 沿土壤剖面峰值在徘徊中不断向下推进的情况,土壤水有活塞式补给的特点,与有关实验研究发现的 60 cm 厚度土层储水能力不足相类似^[28]。期间分别在 6 月 15 日和 7 月 15 日的 80 cm 处出现了异常小的值,并形成明显的拐点,且

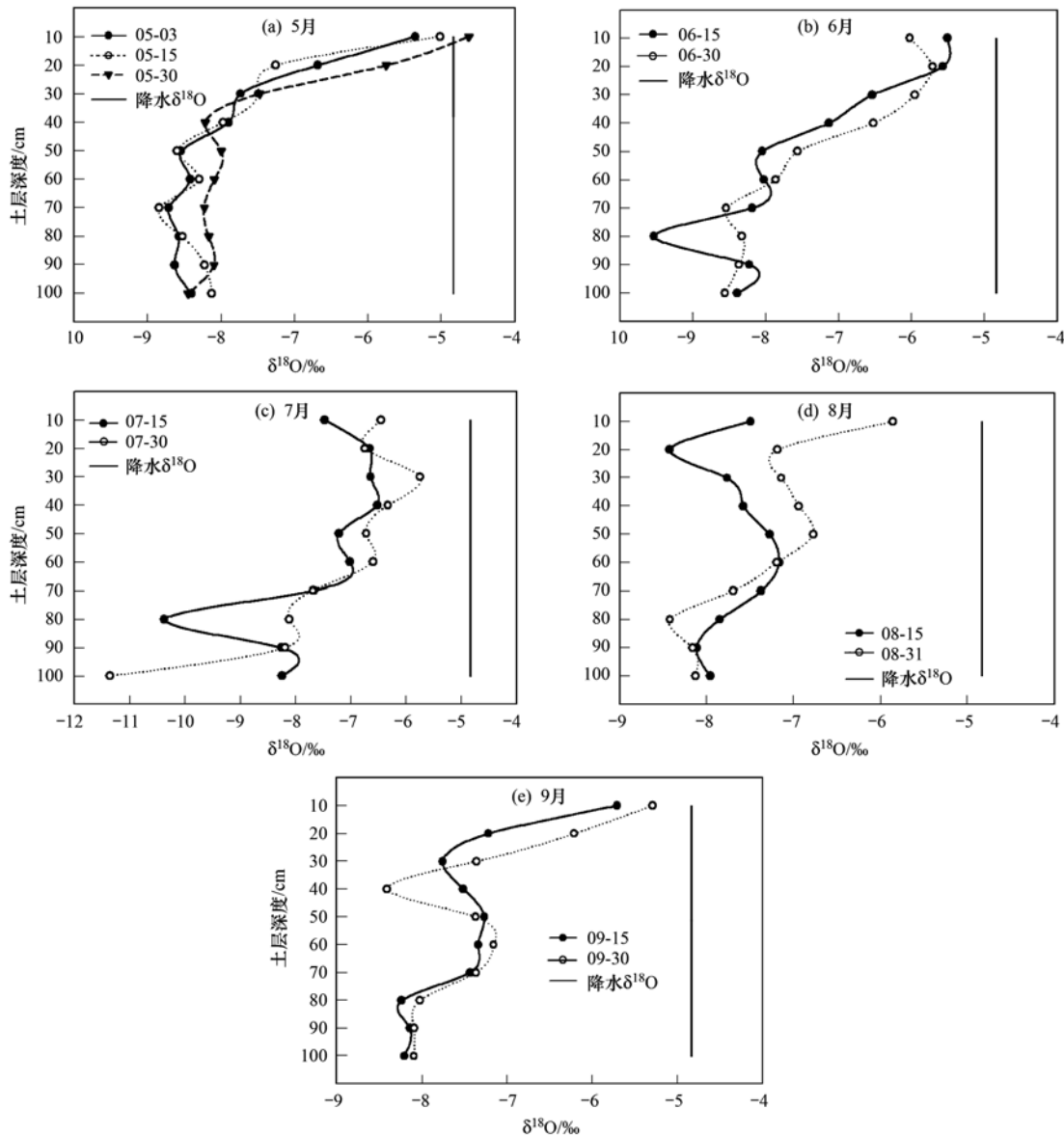


图 6 不同月份的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$

Fig. 6 $\delta^{18}\text{O}$ of soil water in different months

期间每个月 80 cm 处都容易形成拐点,同位素值相对周围低(图 6)。原因可能是:①6 月上旬的 6 月 7 日、6 月 9 日分别降 38.8 mm 和 42.5 mm 的水,7 月上旬 7 月 1 日、7 月 9 日、7 月 10 日的降水量分别为 20.5、22、71 mm,降水次数多,降水量大,多次新旧水充分混合后向下移动到达土壤质地分界线的 80 cm 后长期积累所致。②80 cm 以上根系发达,是杨树根系吸收根的分布层,有可能有较大空隙的存在,通透性较好^[29]。降水随优先通道快速到达此层。

5 个月中 7 月的降水量最大,总量达到 180 mm 以上,降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 月加权均值最小,为 -8.87‰ , 5、6、8、9 月降水的加权均值分别为 -4.831‰ 、 -6.779‰ 、 -6.856‰ 、 -6.059‰ 。7 月 70 cm 以上土壤水同位素值是大于降水的,表明 7 月土壤受前期降水形成的混合水的影响最明显(图 6)。

3 结论

(1)通过 2013 ~ 2014 年收集的降水建立了石家庄市大气降水线: $y = 6.547x - 1.667$ ($R^2 = 0.941$, $P < 0.001$, $n = 44$), 过量氘均值为 -6.1885 , 过量氘值偏低。说明影响石家庄降水形成的水汽大部分来自海洋,还有一部分是局地蒸发形成的,且降水过程之中有一定的云下二次蒸发作用。土壤水稳定同位素较降水普遍重同位素富集。

(2)2013 年石家庄市降水主要集中在了 6 ~ 9 这 4 个月,降雨量达 491.7 mm,降水是石家庄土壤水的主要来源,灌溉水则主要在雨季前期有缓解干旱的辅助作用,且雨季的降水量足以对土壤进行适当补给。不同季节的大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的变动幅度较大,有明显的季节效应的存在。

(3)石家庄市土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 随深度变化较土壤含水量规律性更明显。从总的变化情况来看,10 ~ 100 cm 土壤水稳定同位素的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈递减的趋势,受降水入渗和蒸发的影响,在土壤表层 10 ~ 40 cm 的波动变化大,随深度向下波动变小并不断接近灌溉水(地下水)的 $\delta^{18}\text{O}$ 。雨季的蒸发深度最深达 40 cm 左右,40 ~ 70 cm 土壤水分运移呈现由上而下活塞式的补给特征,有较大的平均入渗速率,80 cm 以下土壤水较稳定。

(4)土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 随土壤深度和日期的变化情况反映了降水的入参与土壤水的蒸发之间的互相平衡,记录了降水、灌溉水、土壤水的蒸发、旧水和新水的混合等因素的影响。5、8、9 月相较于 6、7 月

蒸发作用更明显,6、7 月由于降水丰富土壤水降水的入渗表现更明显,7 月土壤受前期降水形成的混合水的影响最明显。并且,取样期间基本上形成了一个 $\delta^{18}\text{O}$ 峰值沿土壤剖面在徘徊中不断向下推进的情况,反映了降水的入渗、蒸发和新旧水混合的相互作用。

(5)利用稳定同位素的示踪研究华北地区城市典型土壤水分的运移规律可以为人们揭示更多土壤内部的水情信息,对依据降水的情况种植时宜生长的植被、安排合理的灌溉次数和灌溉水量有重要的参考价值,是合理利用市区水资源较为可行的方法。

参考文献:

- [1] 郝芳华, 孙铭泽, 张璇, 等. 河套灌区土壤水和地下水动态变化及水平衡研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(3): 771-779.
- [2] 郝芳华, 欧阳威, 岳勇, 等. 内蒙古农业灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(5): 825-831.
- [3] 陈有君, 红梅, 李绍良, 等. 浑善达克沙地不同植被下的土壤水分状况[J]. 干旱区资源与环境, 2004, **18**(1): 68-73.
- [4] 张军, 范兴科. 番茄根系层土壤水分变化规律及标定方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, **34**(1): 53-58.
- [5] 张英虎, 牛健植, 韩旖旎, 等. 鹫峰地区林木根系和石砾对土壤水分运移速率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(5): 121-126.
- [6] 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥. 模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4100-4107.
- [7] Marfia A M, Krishnamurthy R V, Atekwana E A, *et al.* Isotopic and geochemical evolution of ground and surface waters in a karst dominated geological setting: a case study from Belize, Central America[J]. Applied Geochemistry, 2004, **19**(6): 937-946.
- [8] Froehlich K, Sanjidorj S. Some results on the use of environmental isotope techniques in groundwater resources studies in Mongolia[A]. In: Isotopes in Water Resources Management. V. 2. Proceedings of a symposium[C]. IAEA, 1996.
- [9] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 等. 青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化[J]. 土壤学报, 2002, **39**(3): 289-294.
- [10] 田日昌, 陈洪松, 宋献方, 等. 湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2747-2754.
- [11] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征[J]. 林业科学, 2007, **43**(1): 8-14.
- [12] 陈建生, 陈茜茜, 王婷. 阿拉善沙漠湿沙层水分来源同位素示踪[J]. 水科学进展, 2014, **25**(2): 196-206.
- [13] 章斌, 宋献方, 郭占荣, 等. 用氯和氢氧同位素揭示洋戴河平原地下水的形成演化规律[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 2965-2972.
- [14] 河北省地方志编纂委员会. 河北省志[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1993. 340-345.

- [15] 吴征镒, 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980. 788-799.
- [16] 毛绪美, 梁杏, 王凤林. 一种同位素水样提取与提纯装置[P]. 中国, 2010105144580, 2010.
- [17] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [18] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [19] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, **23**(1): 33-41.
- [20] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013. 68-74.
- [21] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. 地理学报, 1998, **53**(4): 356-364.
- [22] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 等. 柴达木盆地诺木洪地区5种优势荒漠植物水分来源[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6277-6286.
- [23] Bodam G B, Colman E A. Moisture and energy conduction during down-ward entry of water into soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, **2**(8): 166-182.
- [24] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 等. 土壤含水率对坡耕地入渗影响的研究[J]. 中国水土保持, 1987, (9): 25-27.
- [25] Li F D, Song X F, Tang C Y, *et al.* Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt., North China[J]. Environmental Geology, 2007, **53**(3): 687-696.
- [26] 李辉, 蒋忠诚, 周宏飞, 等. 准噶尔盆地降水、土壤水和地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化特征——以中国生态系统研究网络阜康站为例[J]. 水土保持研究, 2008, **15**(5): 105-108.
- [27] 徐学选, 张北赢, 田均良. 黄土丘陵区降水-土壤水-地下水转化实验研究[J]. 水科学进展, 2010, **21**(1): 16-22.
- [28] 刘川顺, 赵慧, 罗继武. 垃圾填埋场覆盖系统渗沥控制试验和数值模拟[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 289-296.
- [29] 傅建平. 杨树人工林滴灌技术研究[D]. 北京: 北京林业科学研究院, 2013.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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