

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响

廖安然^{1,2}, 宋献方^{2,3,*}, 张应华², 杨丽虎², 卜红梅², 马英², 韩冬梅^{2,3}, 秦文婧^{1,2}, 杨胜天⁴

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 再生水受水河道水文条件作为河流水生环境及生化反应重要控制因子, 会受到丰水季降水汇入的影响. 以潮白河典型受水河道——顺义段为例, 通过丰水期前(2017-06-11)、降水中(2017-07-06)、降水后(2017-07-08、2017-07-09)河水中氢氧同位素特征和氯离子浓度的变化, 识别地表径流组成对 2017 年最大日降水量(重现期 3.3a)的响应, 揭示河流汇水过程径流组成的时空差异及原因. 结果表明, 在降水初期, 降水中氢氧同位素主要受雨量效应影响, 后期微小变幅主要受水汽来源差异影响, 整个河段接受降水的同位素值相近. 降水后 3 d 内坡地汇流尚未停止, 在各断面占比各异; 坡地汇流占比沿程增加(2%~85.6%), 再生水占比沿程减少(90%~67%), 再生水通过优先通道到达下游断面. 降水后 3 d 内 SY01~SY05 断面水量由坡地汇流、再生水、原位水组成, 有明显的河网汇水过程, SY06~SY07 断面水量由坡地汇流及原位水组成.

关键词: 2017 最大日降水; 3 年一遇; 再生水; 氢氧同位素; 径流组成; 潮白河; 北京

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5440-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201804037

Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River

LIAO An-ran^{1,2}, SONG Xian-fang^{2,3,*}, ZHANG Ying-hua², YANG Li-hu², BU Hong-mei², MA Ying², HAN Dong-mei^{2,3}, QIN Wen-jing^{1,2}, YANG Sheng-tian⁴

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The hydrology of rivers recharged with reclaimed water is an important factor controlling its aquatic environment and biochemical processes, which change during the wet season. To understand the impacts of precipitation on hydrological conditions, water samples were collected from seven sites in three periods (before the wet season and during and after the maximum precipitation in July 2017, with 3.3 return periods) throughout a reclaimed water intake area of the Chaobai River in the Shunyi District, Beijing. The hydrogen-oxygen isotope characteristics and chloride content were measured. The results show that the hydrogen and oxygen isotopes of precipitation are mainly affected by the amount of the effect. The minor variation in the later period is due to changes in the sources of moisture. Within three days after precipitation, the slope runoff continues and the fraction of each section varies greatly. The reclaimed water reaches the downstream section through the preferred pathway. The water component ratio of the slope runoff increases from 2% to 85.6% in the direction of the flow, while the reclaimed water ratio decreases from 90% to 67%. The stream remains effluent from sections SY01 to SY05 that are recharged by the slope runoff, reclaimed water, and in-site river water, while the sections SY06 to SY07 are mainly recharged by the slope runoff and in-site river water within three days after the precipitation (the stream effluent is unremarkable).

Key words: maximum daily precipitation in 2017; 3.3 return periods; reclaimed water; hydrogen and oxygen isotopes; slope runoff component; Chaobai River; Beijing

再生水补给干涸河道水体通常具有较高环境风险^[1], 丰水季藻类等微生物活性较高, 易发生强烈生化过程造成水体污染, 而河流水生化反应受控于河流水文条件^[2]. 由再生水维持的河流, 降水是唯一稀释源, 降水-径流与河水的混合过程是其水文条件变化的关键, 是揭示河流生化反应过程的基础, 也是城市雨洪调控的重点^[3]. 反应溶质示踪剂如氢氧同位素, 为揭示降雨径流过程提供重要手

段^[4]. 河水氢氧同位素时空分布受到地形、地貌^[5]和人为活动的制约, 是对流域内降水^[6]、冰雪融水^[7]、地下水^[8]等补给源的氢氧同位素特征以及河水所受蒸发影响^[9]的综合响应. 在大流域范围内,

收稿日期: 2017-04-04; 修订日期: 2018-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(4173000223)

作者简介: 廖安然(1990~), 女, 博士, 主要研究方向为流域水循环与水环境过程, E-mail: liaoar.16b@igsnrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: songxf@igsnrr.ac.cn

一场降水前后河水氧同位素变幅较大^[6], 无论是老水(土壤水)、新水(径流)同位素值均有空间差异^[10], 老水的差异主要与蒸发过程相关, 而新水取决于降水同位素、气象因素^[11]; 而在小流域内降水同位素出现较大差异主要由于降水类型不同^[12]. 同位素暴雨径流分割方法是基于 5 大假设^[13], 对于大流域来说, 造成径流分割出现较大误差的原因主要是认为老水、新水为时空常量, 而对于小流域河流来说, 误差的原因主要是不考虑渗出面^[14]. 许多小流域降雨径流实验^[15]得到暴雨径流较大部分由老水组成^[14], 与传统的产汇流机制相悖^[16]. 1950 年全球城市居住人口占总人口 30%, 至 2014 年达到 54%, 将在 2050 年增长至 66%^[17], 城市人口的扩张伴随着城市覆盖、用地的变化(如不透水面增加^[18]、管网系统铺设^[19]). 城市降水-径流机制不同于自然流域^[20], 主要受控于降水量大小、不透水面积比例^[17]、降水前流域湿度条件^[18], 目前较多结合流量、稳定示踪剂的时程变化研究降水事件前后的径流路径、储水量的变化^[18, 21], 而对于无径流观测地区, 稳定示踪剂在降水事件前后的变化规律对研究城市降水-径流机制有重要意义. 在中国北方典型缺水城市北京, 再生水大量补给干涸河道, 通常只能维持数十至几十 km 河段^[22], 较少受地下水补给, 另外, 再生水、降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 值及

Cl^- 浓度相差较大, 为径流分割提供有利条件. 因此, 以典型再生水受水河道——潮白河顺义段为例, 根据丰水季前、降水中、降水后河水氢氧同位素、氯离子, 阐明各断面在降水后汇水的时空差异性, 量化不同水源比例, 以期为以再生水为补给源的城市型河流径流识别、汇流过程提供阈值参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为北京市顺义区城北减河段(SY01 ~ SY04, I 河段)、潮白河下游段(SY05 ~ SY07, II 河段)及潮白河上游段(SY08 ~ SY10, III 河段)(图 1), 该区域为“引温济潮”工程主要受水区. I 河段约 4 km, 宽约 50 ~ 90 m, 属于人工型河道, 两侧砌边坡, 自然河底, 平均流速在 $0.015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右. II 河段约 3.1 km, 宽度在 200 ~ 450 m 之间, 流速为 $0.00149 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, I 河段平均水深 1.11 m, II 河段平均水深 2.45 m, 整个受水区蓄水量约 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[23]. 利用 GIS 技术将河道矢量化, 进行地理校准后估算其受水面积(表 1). 由于潮白河上游(SY08 ~ SY10)在受水初始阶段为蓄水状态, 而目前上游段干涸, III 与 I、II 河段均无水力联系, 其中 SY08 ~ SY10 各断面均无水力联系, 只在河谷区形成片段水面, 其河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 不作讨论.

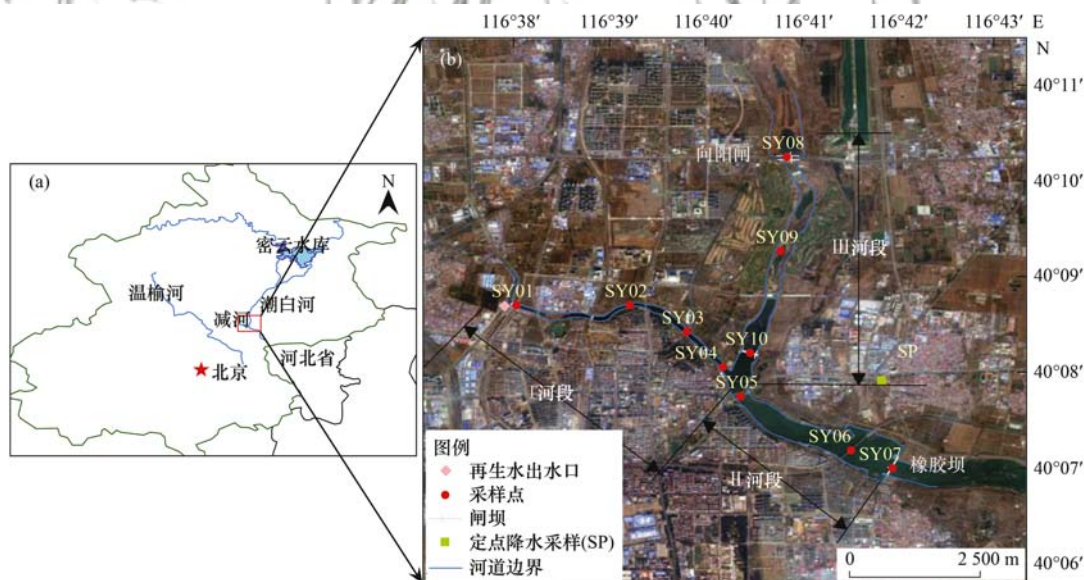


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

本研究区(WMO ID 54416) 1959 ~ 2017 年共 59a 年均降水量为 644.76 mm, 最大日降水量为 157.6 mm(2012-07-21), 月均降水量最大为 7 月, 59 a 中 6 月、7 月、8 月的月均降水量分别为

86.51、207.65、178.05 mm, 7 月降水量占全年降水量平均为 32%. 日最大降水量有 33 a 发生在 7 月, 其中 19 a 日最大降水量超过 100 mm. 59 a 内日降水量超过 100 mm 共 22 d, 其中 13 场日降水发

表 1 基于 GIS 的受水河段面积及地形特征

Table 1 Water-receiving area and topographic features based on GIS data							
河段编号	平均河深 /m	采样点	距出水口距离 /m	断面宽 /m	面积 ¹⁾ /m ²	海拔高度 ²⁾ /m	坡类型
I	1. 11	SY01	0	85	—	25(20~30)	陡
		SY02	1 851	55	279 565	25(20~30)	陡
		SY03	2 890	81	155 425	25(20~30)	缓
		SY04	3 750	83	112 600	25(20~30)	缓
II	2. 45	SY05	4 389	226	167 279	25(20~30)	缓
		SY06	6 358	442	1 274 610	25(20~30)	缓
		SY07	7 442	316	786 560	25(20~30)	陡
		SY08	0	261	644 987	15(10~20)	缓
III		SY09	1 957	49	616 865	20	缓
		SY10~SY05 ³⁾	3 937	274	230 210	20	陡

1) SY02 面积表示 SY01~SY02 采样点之间面积, 其边界垂直于河道, 其他采样点依此类推; 2) 基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)的海拔高度, 括号里区间代表采样点处于两者海拔高度之间; 3) 忽略 I 河段汇入时 SY10~SY05 间的面积

生在 7 月^[24](表 2). 根据 1959~2017 年日最大降水量降水频率分布(图 2), 出现 100 mm 暴雨天气的重现期为 3. 3 a.

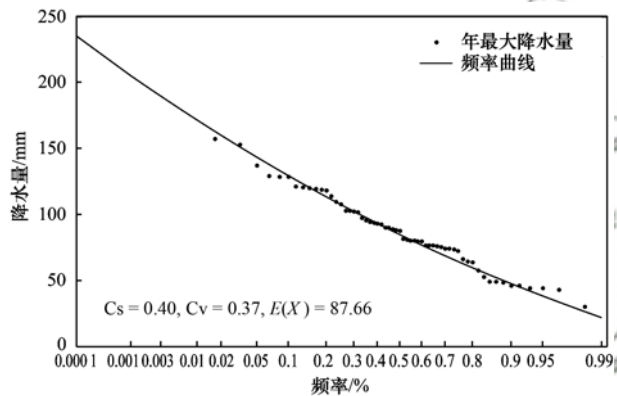


图 2 受水区年最大降水量频率曲线

Fig. 2 Annual maximum precipitation frequency curve for the study area

1.2 样品采集与数据处理

1.2.1 样品采集与测试

为分析次降水前后河水径流组成变化, 在受水河段均匀布设 10 个河水采样点, 采集时间为丰水季前(2017-06-11T15:18~20:06)、降水中(2017-07-06)、降水后(2017-07-08、2017-07-09), 见表 3. 7 月 6 日降水分为沿程降水(along-precipitation, AP)、定点降水(station-precipitation, SP)采集与降水量测量(12:58~18:08, 位于 SP 采集处), AP、SP 各采集 10 个降水样品. 点位见图 1, 采样时间见表 3.

降水、河水水样均用 50 mL 高密度聚乙烯塑料瓶进行保存, 取样前用水样冲洗取样瓶 3 次并过 0.22 μm 滤膜后迅速装瓶密封, 所有河水样品在河道断面中心取样, 利用漏斗采集降水样品至采样瓶中. 降水、河水 δD、δ¹⁸O 采用 Los Gatos Research 公

表 2 1959~2017 年对应日期及当日最大降水量^[24]

Table 2 Daily maximum precipitations and its date from 1959-2017															
年份	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
日期(月-日)	07-21	07-20	07-17	07-26	08-19	08-05	07-23	08-13	07-31	07-22	08-11	10-23	07-14	07-20	07-02
D _{pm} ¹⁾ /mm	102.3	97.6	64.1	93.9	79.7	128.8	120.7	119.7	103.1	45.9	80.5	76.7	30.4	95.4	75.2
年份	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
日期(月-日)	07-24	08-07	08-07	08-02	08-27	07-24	06-06	07-04	07-25	08-06	07-01	08-25	07-19	08-26	08-06
D _{pm} /mm	128.7	72.2	79.8	93.5	113.9	66.4	43	44.6	76	89.9	108	137	120.1	88	73.8
年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
日期(月-日)	07-22	07-07	08-15	07-26	07-07	07-13	09-23	08-28	07-19	07-06	07-22	08-18	08-19	08-04	08-15
D _{pm} /mm	109.6	81.6	153	64.6	74.1	118	90.2	94.6	119.1	80.9	49	48.6	121.5	92.3	77
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
日期(月-日)	09-15	07-23/29	08-09	07-18	08-11	07-20	07-12	07-24	07-21	07-15	09-02	07-19	07-20	07-06	
D _{pm} /mm	45.9	57.8	80.3	74	88.7	76.8	49	101.6	157.6	88.2	52.9	44.4	129.2	102.8	

1) D_{pm} 表示日最大降水量

表 3 沿程、定点降水及河水的采样时间

Table 3 Time of along-precipitation, station precipitation, and river sample collection

SP 降水采样时间 (年-月-日 T 时)	AP		采样时差 造成的 降水量 /mm	河水采 样断面	河水采样				是否到 达下一 断面 ³⁾
	降水采样时间 (年-月-日 T 时)	降水 历时 ¹⁾			河水采样时间 (年-月-日 T 时)	降水后 2 d 各断面采 样时差 ²⁾ /min			
2017-07-06T13:03	2017-07-06T11:04	00:04:00		SY01	2017-07-06T15:48	2017-07-09T08:05	2017-07-08T15:54	971	否
2017-07-06T13:50	2017-07-06T12:36	01:36:00		SY02	2017-07-06T16:30	2017-07-09T08:47	2017-07-08T16:16	991	否
2017-07-06T14:20	2017-07-06T14:18	03:18:00	5.6	SY03	2017-07-06T15:18	2017-07-09T09:05	2017-07-08T16:40	985	是
2017-07-06T14:50	2017-07-06T14:43	03:43:00	2.1	SY04	2017-07-06T14:43	2017-07-09T09:30	2017-07-08T15:35	1 075	是
2017-07-06T15:20	2017-07-06T15:04	04:04:00	1.3	SY05	2017-07-06T14:18	2017-07-09T09:46	2017-07-08T15:00	1 126	否
2017-07-06T15:50	2017-07-06T15:18	04:18:00	6.5	SY06	2017-07-06T12:36	2017-07-09T10:25	2017-07-08T14:36	1 189	否
2017-07-06T16:20	2017-07-06T15:48	04:48:00	2.8	SY07	2017-07-06T11:04	2017-07-09T10:36	2017-07-08T14:05	1 231	
2017-07-06T16:50	2017-07-06T16:30	05:30:00	1.7	SY08	2017-07-06T17:11	2017-07-09T11:10	2017-07-08T17:05	1 085	
2017-07-06T17:20	2017-07-06T17:11	06:11:00	0.4	SY09	2017-07-06T17:29	2017-07-09T11:50	2017-07-08T17:28	1 102	
2017-07-06T17:50	2017-07-06T17:29	06:29:00		SY10	2017-07-06T15:04	2017-07-09T12:11	2017-07-08T18:15	1 076	

1) 计算降水历时的初始降水时间为 2017-07-09T11:00; 2) 表示各断面在 7 月 8~9 日之间的采样时差; 3) 判断是否到达下一断面是采用平均流速与采样时差乘积估算水体流动距离, 并与表 1 中两河道断面的距离对比得出

司的液态水同位素分析仪 (IWA-35d-EP) 分析, δD 、 $\delta^{18}O$ 测量精度分别为 $\pm 1‰$ 和 $\pm 0.1‰$ ^[25]. 测量结果均以相对于维也纳标准平均海水 (Vienna standard mean ocean water, VSOMW) 的千分偏差表示为:

$$\delta(‰) = (R_{\text{sample}} - R_{\text{VSOMW}}) \times 1\,000 / R_{\text{VSOMW}}$$

式中, R_{sample} 为水样中的 δD 或 $\delta^{18}O$ 的浓度; R_{VSOMW} 为 VSOMW 中 δD 或 $\delta^{18}O$ 的浓度.

Cl^- 用离子色谱仪 (ICS-2100, Dionex, USA) 分析, 检出限为 $0.007\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 测量精度下限为 1.2% ^[26], 所有水样的阴阳离子平衡误差 $< 10\%$. 降水量利用翻斗式雨量计放置周边无高楼屋顶进行测量.

1.2.2 气象数据获取

由于 7 月 6 日降水量测量并未覆盖所有降水时段, 降水总量采用中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)^[24] 北京密云站点 (54416) (距河段最近, 位于河段上游约 30 km) 地面监测值, 利用实测降水量 (SP) 对降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 进行分析, 氡盈余 $d\text{-excess}$ 的计算公式为:

$$d\text{-excess} = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$$

采用 HYSPLIT 模型 (hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model) 的后向轨迹法 (backwards trajectory) 对翻斗式雨量计所在位置不同降水阶段 1 500 m (850 hPa)、3 000 m (750 hPa)、5 500 m (500 hPa) 高度的水汽轨迹进行后向反演^[27], 追踪 96 h 水汽块的运动轨迹, 辨认不同高度的水汽来源, 辨别降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 变化原因.

1.2.3 多元线性混合模型 (IsoSource)

IsoSource 模型是建立在质量守恒模型基础上的多源线性混合模型, 基本原理是将各源的组成比例之和定为 100%, 通过预先定制增量 (source increment, 通常为 1‰), 计算得到每种来源潜在贡献的所有可能的组合. 基于质量守恒方程基础上的线性混合模型计算各种组合, 得到混合物的预期稳定同位素值, 与实测值相比, 在容差 (tolerance) 范围之内, 计算所得的组合来反映各源在混合水中所占比例^[28]. 本文主要利用 IsoSource 模型确定各潜在源贡献比例的上、下限值.

不同来源所有可能的百分比组合的计算公式:

$$N = \frac{[(100 - i) + (s - 1)]!}{(100 - i)!(s - 1)!}$$

式中, N 表示组合数量, i 表示增量参数, s 表示水样中示踪剂来源的数量.

2 结果与分析

2.1 降水量与 $\delta^{18}O$ 、 δD 、 $d\text{-excess}$ 、 Cl^- 时空分布特征

北京 7 月 6 日 08:00~20:00 累积降水量为 102.8 mm^[24], 属暴雨天气, 为 2017 年最大日降水量 (重现期为 3.3 a), 6 月 22 日降水量为 67.1 mm. 随着气候变暖, 极端降水出现频率增高, 在华北地区, 暴雨降水占整个夏季降水量的主要部分^[29].

此次 SP 测量的累积降水量为 45.6 mm, 测量时间为 12:58~18:08, 根据采样记录, 7 月 6 日抵达研究区采样时 (10:00~11:00) 无降水, 而 11:00~18:08 历经过了从初期小降水至降水峰值, 最后逐

渐停止,经历了较为完整的降水过程,期间持续停雨最久为 22 min 25 s,其余停雨时间未超过 4 min [图 3(a)]. 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $d\text{-excess}$ 、 Cl^- 变化范围见表 4,初始降水阶段 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 较高, $d\text{-excess}$ 较低,随着降水量增大, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 值减小, $d\text{-excess}$ 值增大[图 3(b)~图 3(d)].

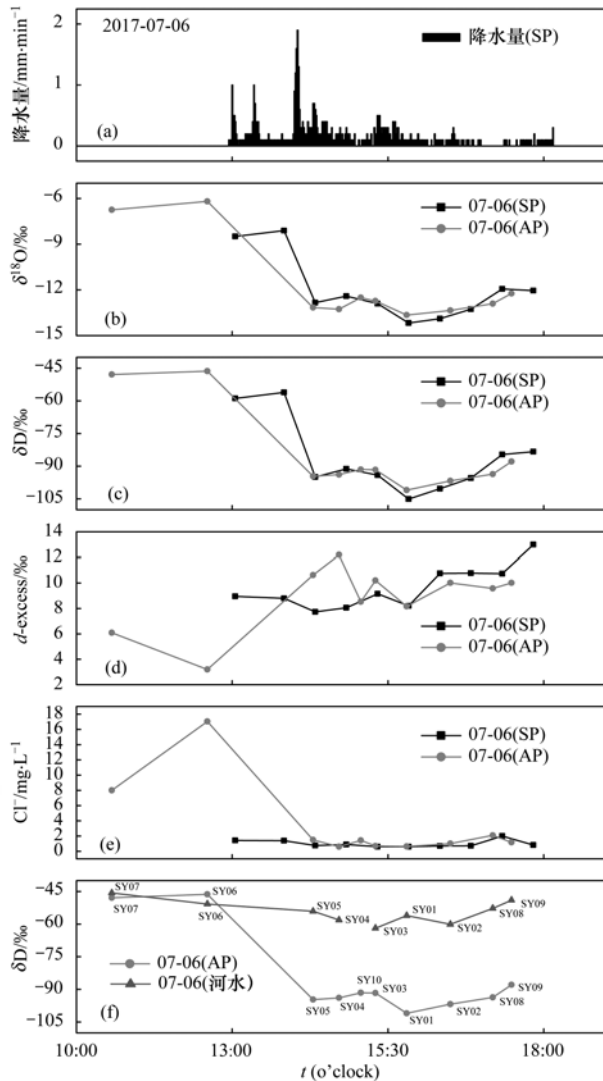


图 3 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $d\text{-excess}$ 、 Cl^- 与降水量时间的分布

Fig. 3 Variation of $\delta^{18}\text{O}$, δD , $d\text{-excess}$, and Cl^- during precipitation

其中, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变化趋势较为一致($r^2 = 0.99$) [图 3(b)、3(c)], $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 均表现出明显的时程效应^[30]. $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $d\text{-excess}$ 主要由二次蒸发强度及水汽来源控制^[25],城市降水中 Cl^- 离子除了来自于海洋外^[31],还与降水气团途径地区的污染排放源有关^[32],并且 Cl^- 非海盐部分的比例在总降水与初期降水过程中有明显不同^[33]. 次降水(SP、AP共 20 个降水水样)所形成的当地大气降水线(local

meteoric water lines, LMWLs)为: $\delta\text{D} = 7.4 \times \delta^{18}\text{O} + 2.7$ ($r^2 = 0.99$, $n = 20$) (表 4),与北京其他地区大气降水线的斜率、截距有一定的差异^[25],相比于全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)斜率、截距均偏小,表明经历平衡分馏、动力分馏过程.

SP 降水量有明显的 3 个峰值,降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 在降水初期 12:36~14:18 时段内发生较大变幅,为了分析这种变化是否由水汽来源差异造成,分别进行 12:36、14:18 的水汽后向轨迹模拟[图 4(a)、4(c)]. 结果表明:3 层水汽来源并无较大的差异,降水在 1 500 m (850 hPa)、3 000 m (750 hPa)水汽来源于远源大气水汽和局地大陆水汽,5 500 m (500 hPa)来源于西向水汽输送^[25].

因此,降水前期 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 发生较大变化的原因主要是二次蒸发引起的平衡、动力分馏^[27],并且 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的贫化与降水量强度峰值呈较好的对应关系,主要由于随降水量的增加,空气中湿度较大,减少了二次蒸发强度所致^[25], $d\text{-excess}$ 随降水量增加而增加也证明了二次蒸发的减少^[34].

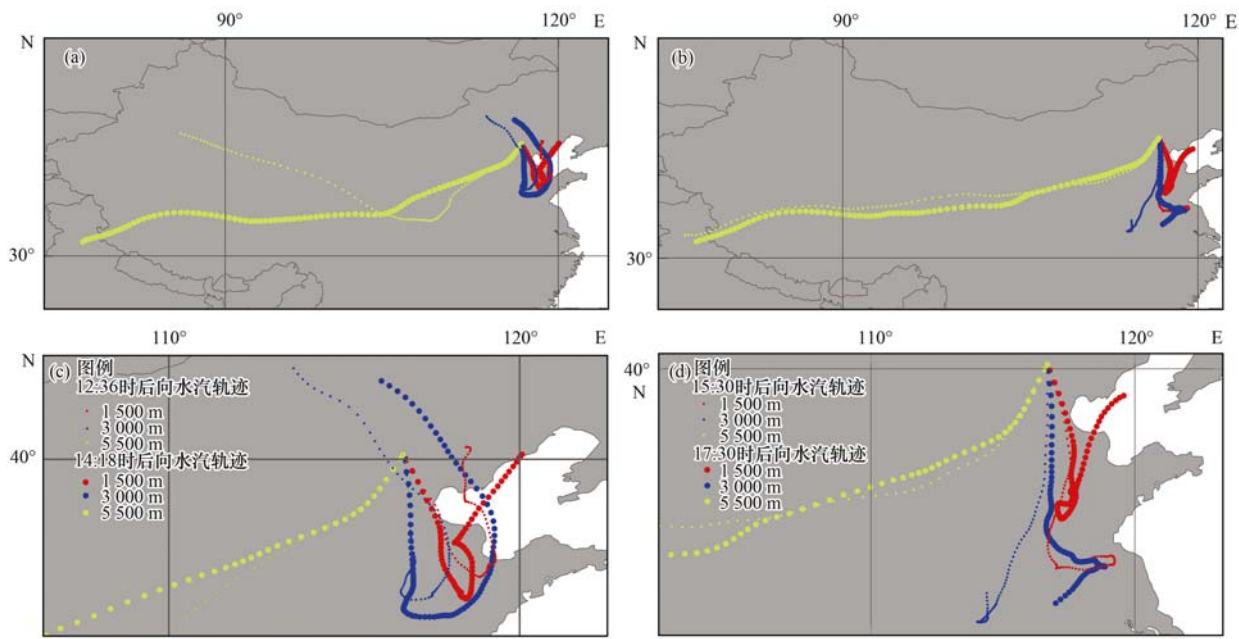
由于降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 在降水后期 15:30~17:30 之间出现极低值(此时降水量较小),随后升高,分别追踪 15:30、17:30 时刻的水汽来源[图 4(b)、4(d)],较低高度两层水汽主要来源由远源大气水汽和局地大陆水汽控制演变为局地大陆水汽控制,而高层水汽来源无变化,均为西向水汽输送. 后期降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 没有随着雨量的减少而大幅增加, δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值微小变幅主要由于水汽输送差异,连续暴雨后期,降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 蒸发分馏影响有限.

此次监测的降水过程较完整,作为河道输入水量,降水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 受水汽来源差异的影响较小,可以认为河道各断面所接受该场降水雨量加权后的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近.

2.2 河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $d\text{-excess}$ 、 Cl^- 时空分布特征

降水初期降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 接近于河水,而降水后期差异变大[图 3(f)]. 降水前后河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均分布于大气降水线下方偏右,降水后河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的斜率、截距经历了一个先增加后减少的过程(表 4). 河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 在 I 河段呈现随时间向左下方偏移的趋势,并且沿程逐渐贫化,在 II 河段呈现随时间向右上方偏移的趋势,并且沿程逐渐富集[图 5(g)、5(h)].

在丰水季前(6 月 11 日),各断面 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布集中;II 河段整体较 I 河段富集重同位素[图 5



(a) 和 (b) 分别为 12:36 ~ 14:18、15:30 ~ 17:30 时段的水汽来源变化, (c) 和 (d) 分别为 (a) 和 (b) 主要水汽区域的放大

图 4 定点降水 (SP) 水汽轨迹

Fig. 4 Moisture source for the station precipitation event classified by 96h back trajectories

(h)], 主要由于 II 河段水流较缓, 形成水力滞时较长的湖区导致河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 表现为蒸发效应^[35], 6 月 11 日河水蒸发线斜率(s) 低于 LMWL 斜率也可证实(表 4)^[36]. 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 在降水中(7 月 6 日)、降水后(7 月 8 日、7 月 9 日)较丰水季前的空间差异性较大(标准偏差大)(表 4). 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 值在降水中分布范围较丰水季前变大, 主要由于河水与降水混合程度不同所致, 降水后第 2d(7 月 8 日)河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 较降水中(7 月 6 日)贫化[图 5(b)、5(d)], 主要由于降水、坡地汇流与河水混合导致. 降水后河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 在各断面时间变化趋势不同: SY01 ~ SY05 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 表现为 7 月 8 日小

于 7 月 9 日, 而 SY06 ~ SY10 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 表现为 7 月 8 日大于 7 月 9 日[图 5(a)、5(c)]. 整个河段 Cl^- 随时间逐渐减少[图 5(f)], 主要由于坡地汇流稀释导致.

降水中(7 月 6 日)河水采样分为: ①降水前采样(SY07); ②降水时采样(SY01 ~ SY06). 因此, 降水中(7 月 6 日)河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 Cl^- 值取决于采样时间先后, 另外与汇水过程有关. 研究区在 6 月 22 日经历一场降水(67.1 mm)^[24], SY07 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 在降水后(7 月 6 日)较降水前(6 月 11 日)富集, 表明在降水后 14 d, SY07 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 未呈现被降水稀释的特征; 有研究表明, 对城市流域的降

表 4 各采样时段的特征值分布¹⁾

Table 4 Statistical description of the water quality parameters during sampling

项目	统计量	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$Cl^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$d\text{-excess}/\text{‰}$	项目	统计量	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$Cl^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$d\text{-excess}/\text{‰}$
06-11	Min	-56.9	-7.2	99.74	-6.3	07-06	Min	-61.9	-8.4	66.65	-9.7
	Max	-49.5	-5.4	109.15	0.7		Max	-45.7	-4.5	105.79	5.0
	Mean	-53.0	-6.3	103.34	-2.5		Mean	-54.3	-6.7	84.04	-0.7
	Std.	2.9	0.7	3.60	2.6		Std.	5.3	1.3	13.92	5.4
	$n=9$						$n=9$				
07-08	Min	-71.4	-8.9	24.28	-7.8	07-09	Min	-67.0	-9.2	11.67	-8.0
	Max	-46.6	-4.8	100.78	7.7		Max	-47.1	-4.9	102.03	8.4
	Mean	-57.6	-7.4	61.65	1.7		Mean	-55.7	-7.5	44.71	4.1
	Std.	7.1	1.4	30.12	5.2		Std.	5.9	1.1	31.11	5.2
	$n=10$						$n=10$				
AP	Min	-101.0	-13.7	0.58	3.2	SP	Min	-105.2	-14.2	0.57	7.7
	Max	-46.3	-6.2	17.03	12.2		Max	-56.1	-8.1	1.97	13.0
	Mean	-84.5	-11.7	3.41	8.9		Mean	-86.4	-12.0	0.98	9.6
	Std.	20.0	2.8	5.27	2.6		Std.	16.6	2.1	0.46	1.7
	$n=10$						$n=10$				

1) n 为样品数, s 和 i 为大气降水线或河水蒸发线的斜率和截距

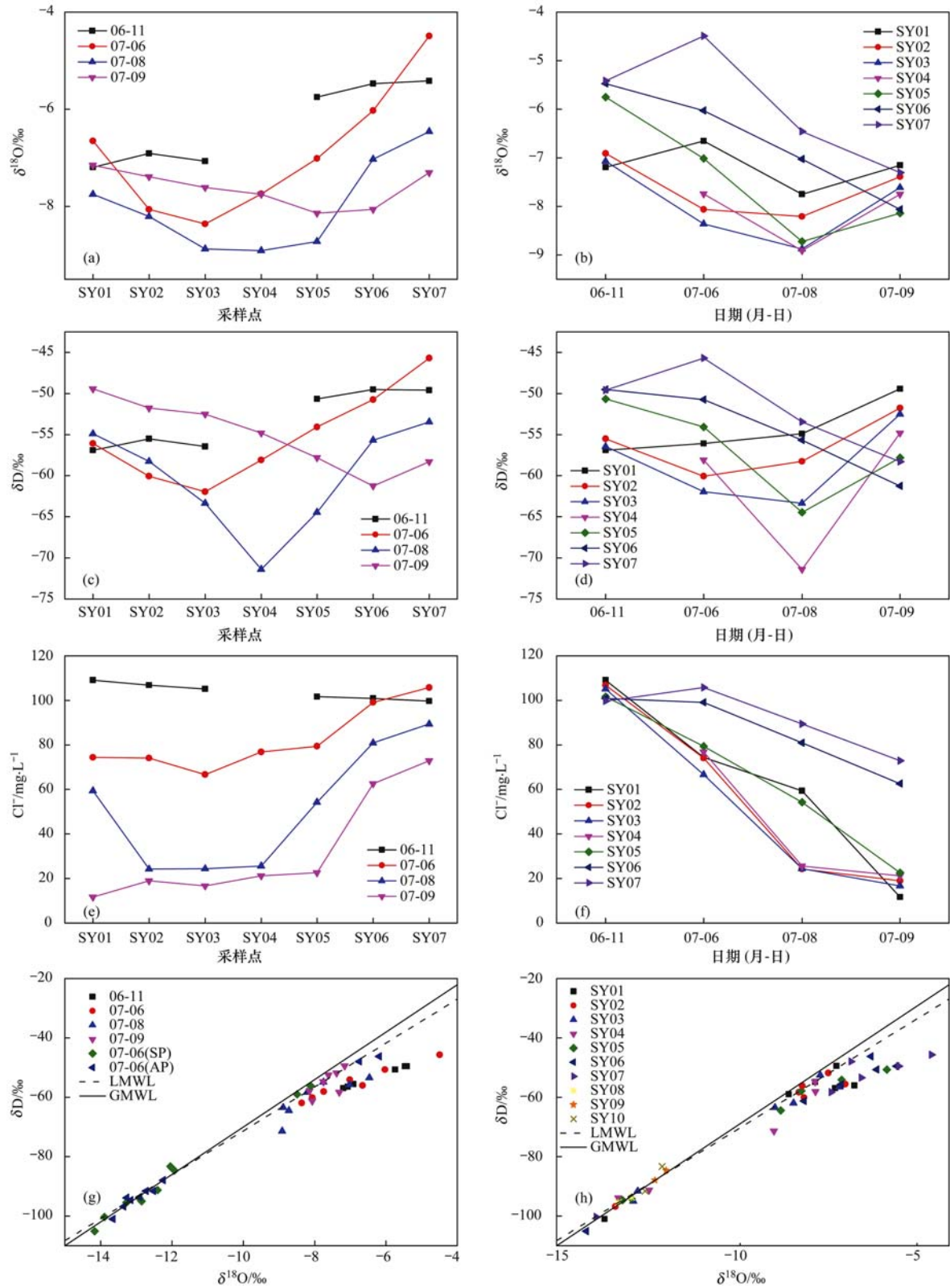


图 5 河水、降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 Cl^{-} 时空分布及 δD 、 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 5 Temporal and spatial variation of δD and the $\delta^{18}O$ and δD - $\delta^{18}O$ relationship for river and precipitation samples

水量、蒸发量及径流中的 δD 进行了长达一年的日尺度观测, 蒸发最强时期发生在高温季节降水前后(6 月初期), 此时伴随着径流中 δD 的富集, 径

流量在降水后明显减小. 6 月末期经历年最大降水量, 此时, 径流中的 δD 出现明显的贫化随后呈富集趋势, 该变化过程时间尺度为 7 月 1 ~ 15 日

的 15 d 以内, 与 6 月 22 日的降水后河水 δD 值变化一致。

3 讨论

3.1 河水水量对降水响应的空间差异性

天然流域接受一场降水形成地面径流与地下径流, 包括坡地汇流、河网汇流两个过程^[37]。而再生水受水河道位于平原城区, 坡地汇流由于不均匀的下垫面分布较为复杂^[38], 由于研究区地下水位较深, 不考虑地下水补给河水的情况。一场降水及其形成的汇流导致河道水体的稀释程度在各断面异同, 主要分为降水中直接稀释、降水后汇流的稀释。稀释程度主要取决于直接进入河道的降水量及雨停之后坡地、河网汇流过程, 其主要影响因素有流速、河道断面形态、边坡处理方式及再生水补给程度。

降水后 Cl^- 在各断面均降低[图 5(e)、5(f)], 说明坡地汇流过程尚未结束; I 河段 Cl^- 降低幅度较 II 河段低, 由于 I 河段为水泥边坡, 而 II 河段为自然边坡, 接受坡地汇流较 I 河段多。SY01 ~ SY05 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 在降水后逐渐富集, 根据是否受再生水影响, 可分为两种情况: ①再生水(为富集 δD 、 $\delta^{18}O$ 的水体)通过河网汇流补给各断面; ②坡地汇流带来富集的 δD 、 $\delta^{18}O$ 水体。有研究表明, 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 较地表径流、降水富集^[30]。因此, 降水后河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 逐渐富集主要为情况①。SY06 ~ SY07 河水 δD 、 $\delta^{18}O$ 在降水后逐渐贫化, 主要由于坡地汇流影响, 根据 II 河段平均流速, SY06 ~ SY07 均未受到上一断面影响(表 3)。

SY01 ~ SY05、SY06 ~ SY07 为降水后两类不同的汇水类型, SY01 ~ SY05 各断面 7 月 9 日河水由 7 月 8 日原位水(I_s)、再生水(U_p)、坡地汇流(R)组成, 属于三端元混合。7 月 9 日 SY06 ~ SY07 河水由 7 月 8 日原位水(I_s)、坡地汇流(R)组成, 属于二端元混合。

综上, 河道各断面对一场降水的响应过程具有空间差异, 主要受河道形态、再生水补给程度不同影响, 雨停后 3 d 内各断面仍旧在接受坡地汇流, I 河段河网汇流过程明显。

3.2 河水水量对降水响应的持续性

为确定不同断面降水后第 3 d(7 月 9 日)较降水后第 2 d(7 月 8 日)河水汇水差异, 结合 3.1 节分析的降水后汇水概念模型, 利用 δD 和 Cl^- ($\delta^{18}O$ 和 Cl^- 有较强相关性) 值计算 SY02 ~ SY05 三端元

混合比例^[39](SY01 为再生水出口, 不计算其混合比例), 分别利用 $\delta^{18}O$ 、 δD 、 Cl^- 值计算二端元混合比例, 得出 R 端元占断面水量的比例^[40](表 5)。

再生水出水口 δD 、 $\delta^{18}O$ 在 7 月 8 日、7 月 9 日这两天不稳定, 7 月 9 日 δD 、 $\delta^{18}O$ 值更为接近再生水真实值, 因此利用 7 月 9 日 SY01 δD 、 $\delta^{18}O$ 作为 U_p 端元值; R 端元为降水量加权平均 δD 、 $\delta^{18}O$ 值。城市坡地汇流在雨后汇入河水中, 经过不同用地类型的径流水化学组分不同, 取其流量加权平均浓度能代表径流污染负荷的平均值^[41], 同理, 利用降水量加权平均 δD 、 $\delta^{18}O$ 值作为降水后坡地径流的平均 δD 、 $\delta^{18}O$ 值, 非本次降水加入和以降水端元代替径流端元均会导致计算结果有偏差^[38], 降水后地表径流 δD 、 $\delta^{18}O$ 值变化与经历的不透水面类型^[38]、气象条件相关^[42], 此假设条件下导致计算结果的误差将在后文讨论。

表 5 端元分析计算的坡地汇流占比结果

Table 5 Results calculated for the fraction of stormwater based on hydrograph separation

断面	二端元/%			三端元/%
	$\delta^{18}O$	δD	Cl^-	$\delta D-Cl^-$
SY02	1.22	1.23	0.77	0.37
SY03	1.41	1.46	0.67	0.43
SY04	1.38	2.05	0.83	0.19
SY05	1.18	1.29	0.41	0.20
SY06	0.79	0.82	0.77	
SY07	0.85	0.86	0.81	

由于 U_p 端元、R 端元 δD 、 $\delta^{18}O$ 为估计值, 利用 IsoSource 估算 SY02 ~ SY05 的三端元混合比例范围(表 6), 与三端元混合模型结果对比。

SY02 ~ SY05 利用 $\delta^{18}O$ 、 δD 值进行二端元分析时, R 端元所占比例均大于 1, 而 SY06 ~ SY07 小于 1(表 5), 证实在 SY01 ~ SY05 断面有再生水的补给。

利用 Cl^- 进行二端元分析时, SY01 ~ SY07 断面 R 端元占比均小于 1, 除 SY05 R 端元占比较小(0.41), 其余断面 R 端元占比在 67% ~ 82% 之间; 对于二端元假设不合理的是, 在 SY01 ~ SY05 断面没有考虑再生水汇入, SY06 ~ SY07 未考虑非本次降水-径流的汇入, 以及径流冲刷地表污染物的影响, 因此 Cl^- 计算所得的 R 端元占比为各断面上限。

根据三端元混合模型计算结果可知, SY02、SY03 R 端元占比(37% ~ 43%)大于 SY04、SY05 R 端元占比(19% ~ 20%), 而 SY05 Cl^- 降低幅度较

SY02 ~ SY04 大, 推断 SY05 同时受到 SY04、SY10 断面河水补给, 不能简单利用三端元混合模型估算. 利用 IsoSource 进行混合比例估算时(表 6), SY02 ~ SY04 呈现 Up 端元占比沿程减少, Is 端元占比沿程增加, R 端元占比沿程减少的趋势, 符合三端元混合模型的推断, 对于 R 端元占比, SY02 ~ SY04 三端元混合模型计算结果较 IsoSource 估算结果偏大(表 5 和表 6), 推断主要由于低估了 R 端元中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值.

根据二端元分析可知, SY06 ~ SY07 沿程 R 端元占比逐渐增加(77.2% ~ 85.6%), $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 均得出了一致的结论. 丰水季前 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 值在 SY06 ~ SY07 较接近, 降水后河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 呈明显的沿程升高趋势[图 5(a)、5(c)、5(e)], 且 7 月 8 ~ 9 日变幅为 SY06 大于 SY07. 主要由于: ①SY06 河宽较 SY07 大, 直接进入河道降水量较大; ②SY05 ~ SY06 断面间距离较 SY06 ~ SY07 大(表 1), SY06 接受汇入水量较 SY07 大(与 R 端元占比的概念不同).

利用降水量加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 作为坡地径流端元, 低估了 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 Cl^- 值, 因此 R 端元占比均偏大. 将 R 端元作为常量将产生误差^[13], 由于 7 月 8 ~ 9 日两天河水取样相隔时间约 18 h, 并且经历时段为夜间, 推断由于蒸发分馏引起的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变幅不大. 有研究证实, 6 月降水后对城市流域径流中 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值进行观测, 在 1 d 之内变幅较小^[18]; 因此, 其作为常量产生的误差可以忽略. 以往研究中利用稳定示踪剂进行径流分割主要针对自然流域暴雨径流过程, 新水(降水)、老水(地下水或土壤水)共同组成径流, 各端元示踪剂浓度相差较大能够提高结果的精确度^[43]. 而将降水后第 2 d 作为“老水”端元, 降水后第 3 d 河水作为“混合”端元, 再生水出口作为补给端元之一, 三者之间 $\delta^{18}\text{O}$ 、 D 值差异不显著将影响计算的精确性. 这种情况也出现在以往研究中, Bazemore 等^[44] 基于多次采样数据, 利用 Monte Carlo 方法分析了端元值接近、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 D 存在测试误差条件下, 径流分割的结果的不确定性及其误差范围.

表 6 基于 IsoSource 计算的新水占比¹⁾

Table 6 Results calculated for the fraction of runoff based on IsoSource

端元	$\delta^{18}\text{O}$			δD		
	R	Is	Up	R	Is	Up
SY02	—	—	—	0.05 (100)	0.05 (100)	0.9 (100)
SY03	0 ~ 0.09 (100)	0.01 ~ 0.27 (100)	0.73 ~ 0.90 (100)	0 ~ 0.03 (100)	0.14 ~ 0.22 (100)	0.78 ~ 0.83 (100)
SY04	0 ~ 0.12 (100)	0.01 ~ 0.34 (100)	0.66 ~ 0.87 (100)	0.02 (100)	0.21 (100)	0.77 (100)
SY05	0 ~ 0.2 (100)	0.02 ~ 0.63 (100)	0.37 ~ 0.78 (100)	0.15 ~ 0.21 (100)	0.03 ~ 0.18 (100)	0.67 ~ 0.76 (100)

1) “—”代表不收敛, 增量为 1%, 容差为 0.01, 小括号中数字为组分比例(%)

4 结论

(1) 经历一场典型暴雨后 3 d 内, 整个河段仍在接受坡地汇流, 坡地汇流在不同断面水量的占比各异, 在人工水泥边坡的 I 河段(SY01 ~ SY04)坡地汇流占比较低(2% ~ 5%), 而在下游自然边坡河段(SY06、SY07)坡地汇流占比 77.2% ~ 85.6%, 在两河交汇处(SY05)占比为 15% ~ 21%; I、II 河段坡地汇流所占比例沿程增加(2% ~ 85.6%), 再生水占比沿程减少(90% ~ 67%), 再生水所能影响河道断面至 SY04 断面, 其通过优先通道补给达到 SY04 断面处, 并未完全取代上游河水.

(2) 降水 3 d 后 I 河段有较明显的河网汇水过程, SY01 ~ SY05 接受坡地汇流、上游水源的补给,

SY06 ~ SY07 主要接受坡地汇流补给.

(3) 对于夏季 102.8 mm 的降水, 河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 在 3 d 之内受控于混合过程, 而对于 67.1 mm 的降水, 河水 14 d 后已经无明显被稀释的特征, 河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受控于蒸发过程.

(4) 城市河道汇水范围以及汇水时间较难确定, 利用 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 Cl^- 为示踪再生水受水河道径流组成提供了有力手段. 降水事件后城市产汇流过程河水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 Cl^- 在丰枯季节存在不同的变化规律, 若要追踪整个退水过程, 揭示该类河道地表径流组分对降水事件的响应机制, 需要获取不同雨量条件下的河水稳定示踪剂更密集的变化趋势, 并结合径流量分析其城市径流量与稳定示踪剂之间的关系.

参考文献:

- [1] Rice J, Westerhoff P. High levels of endocrine pollutants in US streams during low flow due to insufficient wastewater dilution [J]. *Nature Geoscience*, 2017, **10**(8): 587-591.
- [2] Carey R O, Migliaccio K W. Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review [J]. *Environmental Management*, 2009, **44**(2): 205-217.
- [3] Risch E, Gasperi J, Gromaire M C, *et al.* Impacts from urban water systems on receiving waters-How to account for severe wet-weather events in LCA? [J]. *Water Research*, 2018, **128**: 412-423.
- [4] 刘彦广. 基于水化学和同位素的高寒山区雨季径流过程示踪 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- Liu Y G. Using hydrochemical and isotope tracers analyzing to delineate hydrologic process in cold alpine watershed in rainy season [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [5] 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.
- Yao T D, Zhou H, Yang X X. Indian monsoon influences altitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation/river water on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(16): 2724-2731.
- [6] Sklash M G, Farvolden R N, Fritz P. A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1976, **13**(2): 271-283.
- [7] McGlynn B L, McDonnell J J, Shanley J B, *et al.* Riparian zone flowpath dynamics during snowmelt in a small headwater catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, **222**(1-4): 75-92.
- [8] 宋献方, 李发东, 于静洁, 等. 基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征 [J]. *地理研究*, 2007, **26**(1): 11-21.
- Song X F, Li F D, Yu J J, *et al.* Characteristics of groundwater cycle using deuterium, oxygen-18 and hydrochemistry in Chaobai River Basin [J]. *Geographical Research*, 2007, **26**(1): 11-21.
- [9] Simpson H J, Herczeg A L. Stable isotopes as an indicator of evaporation in the river murray, australia [J]. *Water Resources Research*, 1991, **27**(8): 1925-1935.
- [10] Kendall C. Impact of isotopic heterogeneity in shallow systems on modeling of stormflow generation [D]. College Park: University of Maryland (College Park, Md), 1993.
- [11] 苏小四, 林学钰, 廖资生, 等. 黄河水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 和 ^3H 的沿程变化特征及其影响因素研究 [J]. *地球化学*, 2003, **32**(4): 349-357.
- Su X S, Lin X Y, Liao Z S, *et al.* Variation of isotopes in the Yellow River along the flow path and its affecting factors [J]. *Geochimica*, 2003, **32**(4): 349-357.
- [12] 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.
- [13] Sklash M G, Farvolden R N. The role of groundwater in storm runoff [J]. *Journal of Hydrology*, 1979, **43**(1-4): 45-65.
- [14] Crouzet E, Hubert P, Olive P, *et al.* Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Determination experimentale du coefficient de ruissellement [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, **11**(3): 217-229.
- [15] 顾慰祖, 陆家驹, 唐海行, 等. 水文实验求是传统水文概念——纪念中国水文流域研究 50 年、滁州水文实验 20 年 [J]. *水科学进展*, 2003, **14**(3): 368-378.
- Gu W Z, Lu J J, Tang H X, *et al.* Challenges of basin study to traditional hydrological conceptions: the 50 years anniversary of hydrological basin study of PRC and the 20 years anniversary of Chuzhou Hydrological Laboratory [J]. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(3): 368-378.
- [16] Horton R E. The Role of infiltration in the hydrologic cycle [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1933, **14**(1): 446-460.
- [17] Bhaskar A S, Welty C. Analysis of subsurface storage and streamflow generation in urban watersheds [J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**(3): 1493-1513.
- [18] Jefferson A J, Bell C D, Clinton S M, *et al.* Application of isotope hydrograph separation to understand contributions of stormwater control measures to urban headwater streams [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(25): 5290-5306.
- [19] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2287-2293.
- Li L Q, Yin C Q, Kong L L, *et al.* Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(10): 2287-2293.
- [20] Konrad C P, Booth D B, Burges S J. Effects of urban development in the Puget Lowland, Washington, on interannual streamflow patterns: consequences for channel form and streambed disturbance [J]. *Water Resources Research*, 2005, **41**(7): 07009.
- [21] Soulsby C, Birkel C, Tetzlaff D. Assessing urbanization impacts on catchment transit times [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(2): 442-448.
- [22] 于一雷. 河道景观再生水对地下水影响研究——以潮白河北京段为例 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- YU Y L. A research of the impact of reclaimed water as scenic water on the groundwater in water channel - a case study of Beijing segment of Chaobai River [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [23] He B N, He J T, Wang J, *et al.* Characteristics of GHG flux from water-air interface along a reclaimed water intake area of the Chaobai River in Shunyi, Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **172**: 102-108.
- [24] 中国气象局气象数据中心. 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) [EB/OL]. http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0/keywords/3.0.html, 2012-08-04.
- [25] 宋献方, 唐瑜, 张应华, 等. 北京连续降水水汽输送差异的同位素示踪 [J]. *水科学进展*, 2017, **28**(4): 488-495.
- Song X F, Tang Y, Zhang Y H, *et al.* Using stable isotopes to study vapor transport of continuous precipitation in Beijing [J]. *Advances in Water Science*, 2017, **28**(4): 488-495.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. HJ 84-2016 水质 无机阴离子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-}) 的测定 离子色谱法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

- [27] Liu J R, Song X F, Fu G B, *et al.* Precipitation isotope characteristics and climatic controls at a continental and an island site in-Northeast Asia[J]. *Climate Research*, 2011, **49**(1): 29-44.
- [28] Phillips D L, Koch P L. Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models[J]. *Oecologia*, 2002, **130**(1): 114-125.
- [29] 梁萍, 何金海, 陈隆勋, 等. 华北夏季强降水的水汽来源[J]. *高原气象*, 2007, **26**(3): 460-465.
Liang P, He J H, Chen L X, *et al.* Anomalous moisture sources for the severe precipitation over North China during summer[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, **26**(3): 460-465.
- [30] 王轶凡, 瞿思敏, 李代华, 等. 小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, **45**(4): 365-371.
Wang Y F, Qu S M, Li D H, *et al.* Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, **45**(4): 365-371.
- [31] Kulshrestha U C, Kulshrestha M J, Sekar R, *et al.* Chemical characteristics of rainwater at an urban site of south-central India[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 3019-3026.
- [32] Fujita S I, Takahashi A, Weng J H, *et al.* Precipitation chemistry in East Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(4): 525-537.
- [33] 张泽锋, 沈利娟, 朱彬, 等. 南京市降水化学特征及其来源研究[J]. *大气科学学报*, 2015, **38**(4): 473-482.
Zhang Z F, Shen L J, Zhu B, *et al.* Chemical characteristics and potential sources of precipitation in Nanjing[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, **38**(4): 473-482.
- [34] Merlivat L, Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium - oxygen 18 relationship for precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, **84**(C8): 5029-5033.
- [35] 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 等. 景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3797-3803.
Yang Y G, Hu J F, Xiao H L, *et al.* Spatial and temporal variations of hydrological characteristic on the landscape zone scale in alpine cold region[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3797-3803.
- [36] 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 等. 湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2470-2477.
Xu J Z, Xiao W, Xiao Q T, *et al.* Temporal dynamics of stable isotopic composition in lake taihu and controlling factors[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2470-2477.
- [37] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [38] 顾慰祖, 尚煜廷, 翟劲蕊, 等. 天然实验流域降雨径流现象发生的悖论[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(4): 471-478.
Gu W Z, Shang M T, Zhai S Y, *et al.* Rainfall-runoff paradox from a natural experimental catchment[J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(4): 471-478.
- [39] Hinton M J, Schiff S L, English M C. Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two-and three-component hydrograph separations[J]. *Water Resources Research*, 1994, **30**(4): 983-993.
- [40] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, **37**(1): 102-110.
Song X F, Liu X C, Xia J, *et al.* A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, **49**(12): 1299-1310.
- [41] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2896-2904.
Li L Q, Zhu R X, Guo S G, *et al.* Research on spatial differentiation of urban stormwater runoff quality by source area monitoring[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 2896-2904.
- [42] 孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 中国东北地区地表水资源与气候变化关系的研究[J]. *地理科学*, 2004, **24**(1): 42-49.
Sun L, An G, Gao Z T, *et al.* Relationship between climate variation and surface water resources in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, **24**(1): 42-49.
- [43] Genereux D. Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations[J]. *Water Resources Research*, 1998, **34**(4): 915-919.
- [44] Bazemore D E, Eshleman K N, Hollenbeck K J. The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, **162**(1-2): 47-75.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)