

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

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

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源

孔晓乐^{1,2}, 王仕琴^{1*}, 丁飞³, 梁慧雅^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 中国科学院农业水资源重点实验室, 河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 为探究白洋淀流域生活污水河附近地表水和地下水硝酸盐来源, 于 2014 年 7 月沿着生活污水纳污河——府河采集地表水和地下水。通过分析水化学和氢氧同位素($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)明确地表水和地下水转化关系, 并通过硝酸盐氮($\delta^{15}\text{N}$)同位素确定硝酸盐来源。结果表明, 河水来源于城市和农村生活污水, 同时受蒸发作用影响。浅层地下水受府河、白洋淀和太行山山区地下水侧向补给。浅层地下水硝酸盐超标(世界卫生组织)率为 16.7%。受水体自净能力的影响, 府河上游硝酸盐浓度大于下游。受区域水流方向的影响, 南岸浅层地下水硝酸盐浓度大于北岸。近河和近淀区域浅层地下水硝酸盐主要来自于地表水。此外, 土壤、化肥及其点源污染也是地下水硝酸盐的主要来源。城市和乡村居民生活及农业生产活动影响区域地表水和地下水硝酸盐。

关键词: 硝酸盐; 同位素; 生活污水; 府河; 雄安新区; 白洋淀

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2624-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201709149

Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes

KONG Xiao-le^{1,2}, WANG Shi-qin^{1*}, DING fei³, LIANG Hui-ya^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-saving, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the source of nitrate in surface water and groundwater near a domestic sewage discharge river in the Baiyangdian watershed, including the Fuhe River and Baiyangdian Lake, shallow groundwater and deep groundwater samples were collected in July 2014. Water chemistry and stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) were used to study the relationship between the surface water and groundwater. $\delta^{15}\text{N}$ was used to explore the source of nitrate. The results show that urban and rural domestic sewage discharge to Fuhe River and then experience evaporation. Shallow groundwater is affected by the Fuhe River, Baiyangdian Lake, and lateral recharge from groundwater in the Taihang Mountain area. There are 16.7% of shallow groundwater samples exceeds the NO_3^- threshold for drinking water according to the World Health Organization standard. Due to the effect of self-purification capacity, the NO_3^- mass concentration in the Fuhe River is higher in the upstream area than in the downstream area. Due the regional water flow from northwest to southeast, the NO_3^- mass concentration in the shallow groundwater is higher in the south bank area than in north bank area. The shallow groundwater near the Fuhe River and Baiyangdian Lake is recharged by surface water. In addition, soil, fertilizer, and point sources are also major sources for groundwater nitrate. Urban and rural residential living and agricultural production activities are the main reasons for surface water and groundwater nitrate.

Key words: nitrate; isotopic; domestic sewage; Fuhe River; Xiong'an New Area; Baiyangdian Lake

随着城市化的进行,我国城市生活污水排放量不断增加^[1]。生活污水中的污染物随水流入渗透到含水层影响地下水水质。保定市每年生活污水 6 070.1 万 t, 废污水处理率为 49.5%, 污废水入河率 87.5%, 有大量处理过的和未经任何处理的生活污水直接排入河道^[2]。府河是保定市主要的生活污水接纳河, 污水经由府河从“安州闸”入白洋淀。没有天然径流, 污水排入后得不到稀释和自净, 入淀后严重威胁白洋淀水质, 其中硝酸盐浓度过高引发

的水体富营养化是白洋淀的主要问题^[3]。2017 年 4 月 1 日, 中共中央、国务院印发通知, 决定设立河北雄安新区, 规划范围涵盖河北省雄县、容城、安新等 3 个县及周边部分区域。根据估算日均用水量

收稿日期: 2017-09-17; 修订日期: 2017-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471028); 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金重点项目(41530859)

作者简介: 孔晓乐(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水文水资源和土壤盐渍化, E-mail: xlkong@sjziam.ac.cn

* 通信作者, E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn

大约为 480 万 t, 而目前雄安 3 县的供水量约为 20 万 $t \cdot d^{-1}$ [4, 5]. 未来在提高供水量的同时, 面临着大量的城市生活污水排放的问题.

同位素和水化学相结合的方法在示踪地下水污染源方面有着广泛的应用 [6, 7]. δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 同位素被用来研究不同水体之间的补给关系 [8, 9]. $\delta^{15}N-NO_3$ 在识别硝酸盐来源方面也有广泛的应用 [10~12]. 过去的研究表明, 氨氮是府河主要的污染物 [13, 14]. 梁慧雅 [3] 等利用水中氢氧同位素和硝酸盐氮同位素研究表明, 府河沿线由于反硝化作用以及河流自净作用的存在, 硝酸盐浓度有下降的趋势, 但相对于白洋淀硝酸盐超标严重. 淀西平原农业面源污染导致府河入淀口区域氮素污染浓度呈增大趋势 [15]. 府河硝酸盐氮作为主要的污染物, 不仅直接影响白洋淀水环境安全, 而且通过入渗补给, 使得周边地下水水质下降 [16]. 综上所述, 以往的研究主要集中在府河本身氮污染的研究, 但对于其附近地下水的研究相对较少. 本研究将府河及其附近的地下水作为整体进行研究, 研究地表水和地下水转化关系, 同时识别不同水体硝酸盐氮的来源, 以期为未来雄安新区生活污水的处理及其地表水和地下水硝酸盐的治理提供一定的技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于河北省保定市 [图 1(a)], 属于温带大陆性季风气候区, 年降水量为 510 mm, 降水年内分布不均, 其中 75% 的降水集中在 6~9 月, 蒸发量为 1 369 mm, 年平均气温为 13.8℃ [9, 17, 18]. 府河属大清河南支, 是白洋淀九条入淀河流中唯一一条常年有水的河流, 属于典型非常规水源补给的河流, 每天入河的生活污水和废水占河水平均流量的 45.24% [13].

白洋淀流域自西向东为山区、山前平原区和洼淀区 [19]. 山区部分属于太行山隆起区, 平原区部分位于冀中拗陷区. 区域内水流方向为自西北山区向东南平原区流动. 区域内地层由第四系松散堆积物构成, 自西向东由薄变厚. 沉积物包括沙土, 黏土或沙土和黏土互层. 有 4 个含水层组, 第一和第二含水层组 (I, II) 分别为深度 10~20 m 的全新世 Q_h 含水层和深度 80~160 m 的上更新世 Q_p^3 含水层. 第三含水层组 (III) 是中更新世 Q_p^2 含水层组, 深度为 330~400 m (图 2). 第四含水层组 (IV) 是下更新世 Q_p^1 含水层组. 第一和第二含水层组为浅层

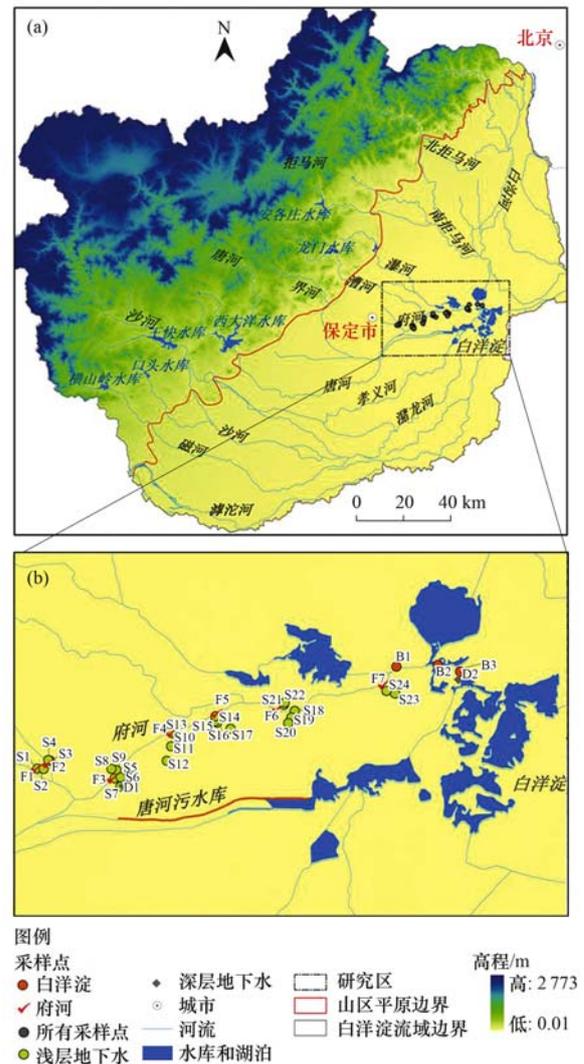


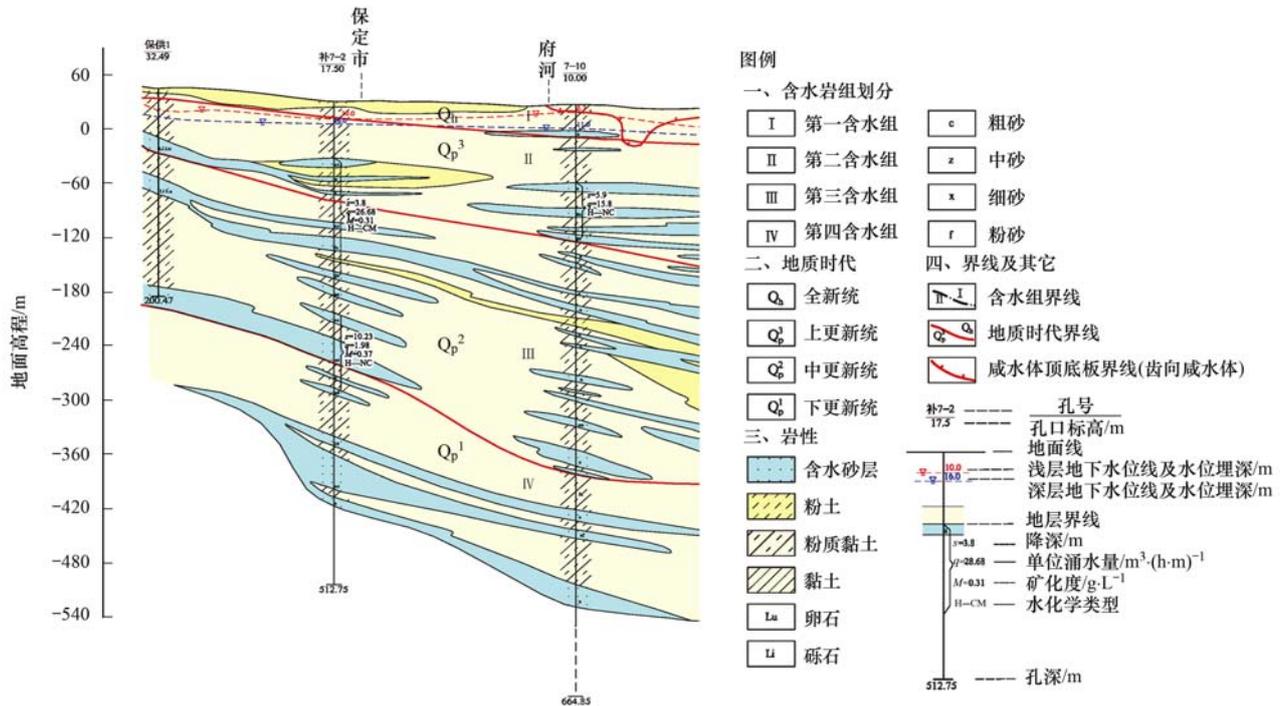
图 1 白洋淀流域位置和采样点位置

Fig. 1 Position of Baiyangdian watershed and sampling sites

地下水含水层, 为农业灌溉的主要水源 [19]. 第三和第四含水层为深层地下水含水层, 主要为居民的饮用水水源.

1.2 样品采集和分析

2014 年 7 月, 沿府河从上游到下游 (F1~F7), 并依据距离河流的垂直距离进行实地调查和水样采集, 采样点如图 1(b) 所示. 水样包括府河水 (FR)、白洋淀水 (BYD), 浅层地下水 (SGW) 和深层地下水 (DGW). 采用便携式参数仪 (pH/ORP/DO METER D-75, HORIBAR Scientific, 日本) 现场测定 pH、溶解氧 (DO)、氧化还原电位 (ORP), 电导率仪 (COND METER ES-71, HORIBAR Scientific, 日本) 现场测定电导率 (EC). 地下水采样前先抽水 3 min 左右, 然后用 100 mL 的塑料瓶采集水样装满并密封带回实验室, 放于 4℃ 冰箱保存, 分析水化学和同位素 (δ^2H 和 $\delta^{18}O$). 用 1.5 L 水样瓶采集水样,



依据文献[19]绘制

图2 区域水文地质剖面

Fig. 2 Hydrogeology profile in the study area

分析硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素。

水化学和同位素分析均在中国科学院农业水资源重点实验室进行,水样 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 采用离子色谱(ICS-2100, Dionex, 美国)分析, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用滴定法测定,所有水样进行阴阳离子平衡验证,保证可信的误差范围在 $\pm 5\%$ 以内。 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 采用液态水稳定性同位素分析仪(L2120-i Isotopic H_2O ; Picarro 美国)进行分析,采用VSMOW标准,其中 $\delta^2\text{H}$ 的分析精度为 $\pm 0.5\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素采用树脂吸附洗脱的方法进行富集^[11], $\delta^{15}\text{N}$ 的吸附在采样当天晚上进行,用稳定同位素质谱仪(Isoprime100; Elementar, 德国)分析。所有的分析工作在一周之内完成。

2 结果与讨论

2.1 地表水和地下水理化性质

表1为野外调查参数及主要离子浓度统计值。从中可知,区域内地表水和地下水均呈碱性,不同水体pH平均值表现为:浅层地下水<府河<白洋淀<深层地下水。ORP表现为:白洋淀>府河>浅层地下水>深层地下水。不同水体主要阳离子均为 Na^+ 和 Ca^{2+} ,主要阴离子地表水为 HCO_3^- 和 Cl^- ,

地下水为 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 。浅层地下水TDS和主要离子(除 Cl^- 和 K^+ 外)浓度平均值和标准差大于其它水体,说明不同地下水采样点其水质影响因素不同。白洋淀 Cl^- 浓度最大,为 $124\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,府河和浅层地下水中 Cl^- 浓度接近。府河和浅层地下水 NO_3^- 不仅浓度高,且变幅大,说明这两种水体 NO_3^- 的空间变异性较大。

以往研究表明:线性排污河会影响其附近区域地下水水质^[9],地下水流在运动过程中与周围环境的相互作用导致其水化学特征的改变^[20]。为明确生活污水河流对区域地表水和地下水水化学特征的影响,采用Piper图分析。由府河向白洋淀(图3中箭头①方向),受沿河农村居民生活污水排放和蒸发的共同影响地表水 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度增加。上游府河水水化学类型以 $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{HCO}_3$ 为主,下游以 $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}$ 为主。

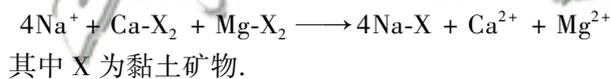
太行山山区地下水侧向径流是平原区地下水的主要补给源^[19],取太行山山区地下水离子质量浓度的平均值做为山区地下水特征^[21]。区域内浅层地下水采样点位于山区地下水、府河水和白洋淀之间(图3),说明区域地下水受到山区侧向径流、府河以及白洋淀的共同影响。府河和白洋淀附近浅层地下水水化学类型与府河和白洋淀相近,说明地表

表 1 野外调查参数及主要离子质量浓度统计值

Table 1 Statistical values of field investigation parameters and main ion mass concentrations

样品种类	样品个数	测试项目	pH	T/°C	ORP /mV	DO /mg·L ⁻¹	EC /μS·cm ⁻¹	Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	Na ⁺ /mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	TDS /g·L ⁻¹
府河	7	最小值	7.49	25.0	91	1.07	953	73	92	0	317	51	11	32	72	0.51
		最大值	8.36	31.2	269	5.91	1526	133	124	15	496	109	25	37	84	0.70
		平均值	7.86	28.4	136	2.08	1363	117	112	6	445	96	21	35	79	0.69
		标准差	0.29	2.0	66	1.75	189	21	10	5	62	20	5	2	5	0.08
白洋淀	3	最小值	7.10	29.9	120	3.83	1155	118	94	0	343	95	11	35	57	0.61
		最大值	8.80	30.3	173	5.77	1192	134	113	2	362	111	18	45	69	0.65
		平均值	8.05	30.1	145	4.86	1168	124	104	1	356	104	14	41	62	0.63
		标准差	0.87	0.2	27	0.98	21	8	9	1	11	8	4	5	6	0.02
浅层地下水	24	最小值	6.94	15.8	-36	1.00	803	37	51	0	273	54	0	29	34	0.40
		最大值	8.19	19.2	218	5.41	2410	250	337	62	603	288	2	103	153	1.42
		平均值	7.49	17.1	108	2.27	1319	119	140	18	469	126	1	58	90	0.79
		标准差	0.28	0.9	89	1.14	335	50	61	22	78	54	0	17	32	0.20
深层地下水	2	最小值	8.13	24.0	91	1.06	549	7	43	2	206	49	2	8	19	0.25
		最大值	8.41	24.0	100	1.14	601	37	50	13	207	91	3	17	22	0.32
		平均值	8.27	24.0	96	1.10	575	22	47	8	206	70	2	12	20	0.28
		标准差	0.20	—	6	0.06	37	21	5	8	1	30	0	6	2	0.05

水对其附近浅层地下水具有补给作用. 降雨不是区域内浅层地下水的主要补给源, 降水入渗补给地下水的平均速率为(3.8 ± 0.6) mm·a⁻¹, 约占多年平均降水量的 0.7% [22]. 施肥、污水灌溉和点源污染是影响区域地下水水质的因素 [11]. 地下水水化学类型复杂, 但与地表水相比, 浅层地下水 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 百分比增加. 这与地表水补给地下水过程中, 水中的 Na⁺ 和黏土矿物吸附交换出 Ca²⁺ 和 Mg²⁺, 并随水运移到浅层地下水(图 3 中箭头②方向) [23] 有关. 具体过程为:



2.2 地表水和地下水转化关系

明确地表水和地下水转化关系, 对于进一步分析 NO₃⁻ 来源至关重要. 表 2 为地表水和地下水 δ²H 和 δ¹⁸O 同位素值统计特征. 受蒸发作用影响, 地表水 δ²H 和 δ¹⁸O 同位素值大于地下水, 具体表现为: 白洋淀 > 府河 > 浅层地下水 > 深层地

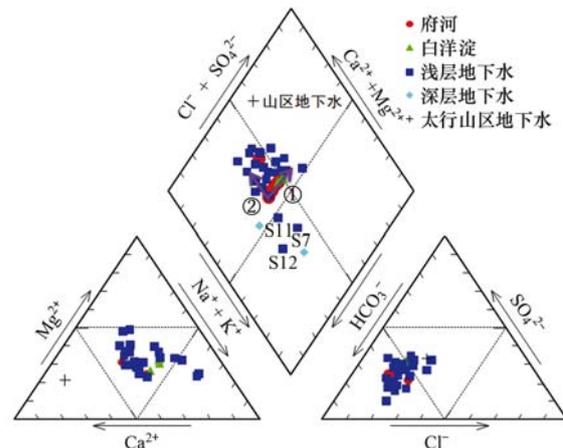


图 3 地表水和地下水 Piper 图

Fig. 3 Piper figure of surface water and groundwater

下水. 区域内浅层地下水和深层地下水之间存在弱透水层, 二者之间水力联系较弱, 深层地下水滞留时间长, 其稳定性同位素的值也较小 [19, 24]. 因此, 以下主要讨论地表水和浅层地下水之间的转化关系.

表 2 地表水和地下水 δ²H 和 δ¹⁸O 同位素值统计特征

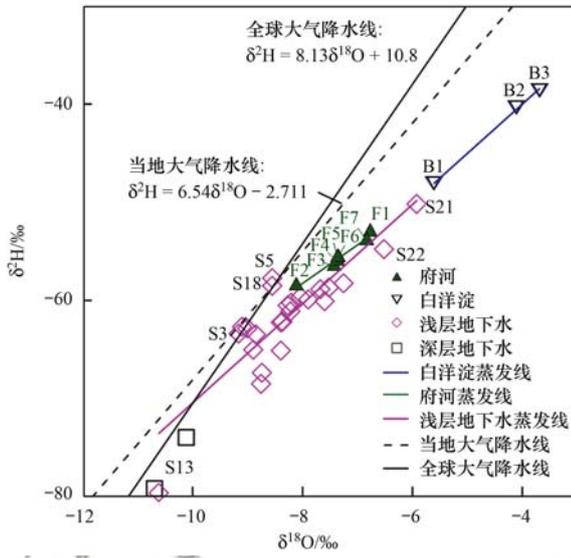
Table 2 Statistical value of δ²H and δ¹⁸O in surface water and groundwater

样品种类	¹⁸ O/ ¹⁶ O/‰				² H/ ¹ H/‰			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
府河	-8.1	-6.8	-7.3	0.4	-58.5	-53.0	-55.6	1.8
白洋淀	-5.6	-3.7	-4.5	1.0	-48.1	-38.6	-42.3	5.1
浅层地下水	-10.6	-5.9	-8.3	0.9	-79.6	-50.2	-61.7	5.4
深层地下水	-10.7	-10.1	-10.4	0.4	-79.2	-74.0	-76.6	3.7

图 4 为地表水和地下水 δ²H-δ¹⁸O 同位素关系, 从中可知, 除 S3、S5 和 S18 采样点外, 大部分地表

水和浅层地下水采样点分布在全球大气降水线和当地大气降水线右侧. 沿水流方向(除 F1 外)地表水

呈现出由府河到白洋淀同位素富集的趋势,表明河水在流动过程中受到蒸发作用的影响. 白洋淀、府河、浅层地下水蒸发线分别为: $\delta^2\text{H} = 5.027 \times \delta^{18}\text{O} - 19.88$ ($R^2 = 0.998$)、 $\delta^2\text{H} = 3.920 \times \delta^{18}\text{O} - 21.6$ ($R^2 = 0.969$)、 $\delta^2\text{H} = 5.056 \times \delta^{18}\text{O} - 19.89$ ($R^2 = 0.756$). 较低的蒸发斜率说明水体经历了强烈的蒸发作用,同时不同水体之间具有密切的水力联系,这与 Wang 等^[9]对该地区的研究结果一致. S21 和 S22 地下水埋深为 3 m 左右,小于该地区地下水蒸发的极限埋深^[25],其 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值大于河水,一方面受地表水的补给,另一方面与地下水通过毛细作用蒸发引起的同位素富集有关.



当地大气降水线依据文献[9]绘制, 全球大气降水线依据文献[26]绘制

图 4 地表水和地下水 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 同位素关系

Fig. 4 Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in surface water and groundwater

氡盈余和 TDS 的关系被用来区别蒸发作用和溶滤作用对水体的影响^[6]. 图 5 是不同水体氡盈余值(d)和 TDS 关系. 针对府河而言, d 值小于 10 ‰, 而且在 d 值不断减小的同时, TDS 值变化不大, 证明了除蒸发作用外还存在着其它的水源补给. 部分浅层地下水 d 值大于 10 ‰, 证明这些点存在着其它的水源补给. 另一部分小于 10 ‰, 甚至为负值, 证明浅层地下水受蒸发作用影响. 靠近白洋淀的 S22 和 S23, d 值小于府河, 大于白洋淀, 证明了白洋淀对周边浅层地下水的影响, 与前面水化学分析结果一致.

综上所述, 河流流动过程中除受蒸发作用影响

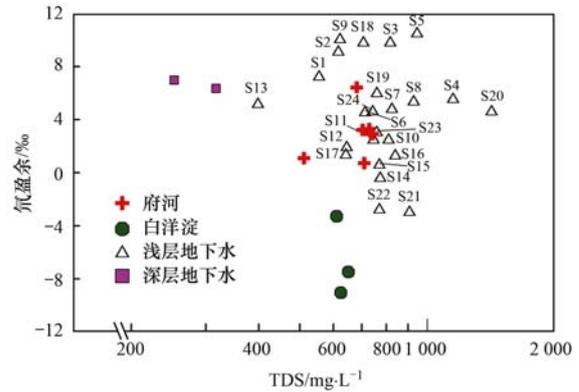


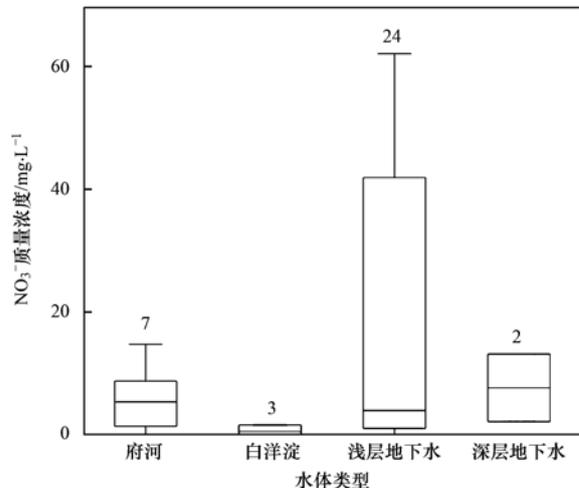
图 5 不同水体氡盈余值和 TDS 关系

Fig. 5 Relationship between deuterium excess and TDS of different water bodies

外, 还受附近农村居民生活污水排放的影响. 浅层地下水受地表水和山区侧向补给的影响, 除此之外, 也受施肥、灌溉等人类活动的影响. 张宗祜等的研究结果与本研究一致^[27].

2.3 NO₃⁻ 的质量浓度和空间分布

不同水体 NO₃⁻ 质量浓度表现为浅层地下水 (18 mg·L⁻¹) > 深层地下水 (8 mg·L⁻¹) > 府河 (6 mg·L⁻¹) > 白洋淀 (1 mg·L⁻¹), 见表 1. 依据 WHO 饮用水标准, NO₃⁻ 质量浓度限值为 50 mg·L⁻¹, 浅层地下水 NO₃⁻ 超标率为 16.7%, 其余水体均无 NO₃⁻ 超标. 受农业活动影响, S20 处 NO₃⁻ 质量浓度为 55 mg·L⁻¹. 不同水体 NO₃⁻ 质量浓度变化范围为: 浅层地下水 > 府河 > 深层地下水 > 白洋淀 (图 6). 浅层地下水 NO₃⁻ 的变化特征与其广泛的来源有关. 白洋淀和府河 NO₃⁻ 质量浓度低, 变化幅度小. 这与除地表水体本身的自净能力有关外, 还与



图上数字表示采样点个数

图 6 不同水体 NO₃⁻ 质量浓度

Fig. 6 Mass concentration of NO₃⁻ in different water bodies

近年来污染物排放的控制有关. Wang 等的研究表明^[11], 2008~2009 年府河水和白洋淀 NO_3^- 质量浓度分别为 $63.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是本研究的 10.6 倍和 11.8 倍.

图 7 为地表水和浅层地下水 NO_3^- 质量浓度的空间分布特征. 整体上, 地表水和地下水 NO_3^- 质量浓度上游大于下游. 受河流流动过程中 NO_3^- 迁移转化的影响, 在河流上游附近, 地表水和地下水 NO_3^- 质量浓度大于 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 然而沿着河流的流

向, NO_3^- 质量浓度逐渐减小, 在下游靠近白洋淀的区域地表水和地下水 NO_3^- 质量浓度小于 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 除此之外, 地下水 NO_3^- 质量浓度在靠近河流的区域大于远离河流的区域. 这与距离线性河流近的区域, 受地表水补给比例大有关^[9]. 受区域上地下水西北向东南流向的影响, 河流南岸浅层地下水 NO_3^- 质量浓度大于北岸^[19]. 因此, 不同的来源及其迁移转化影响地表水和地下水 NO_3^- 质量浓度和空间分布.

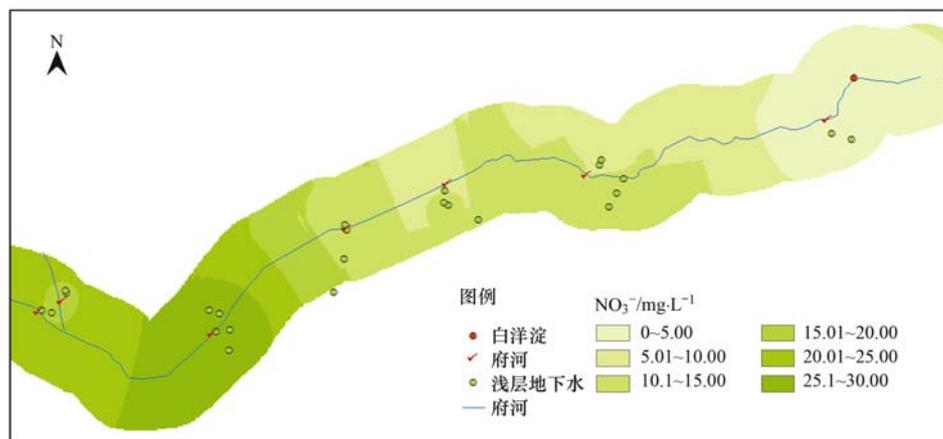


图 7 地表水和浅层地下水 NO_3^- 质量浓度的空间分布特征

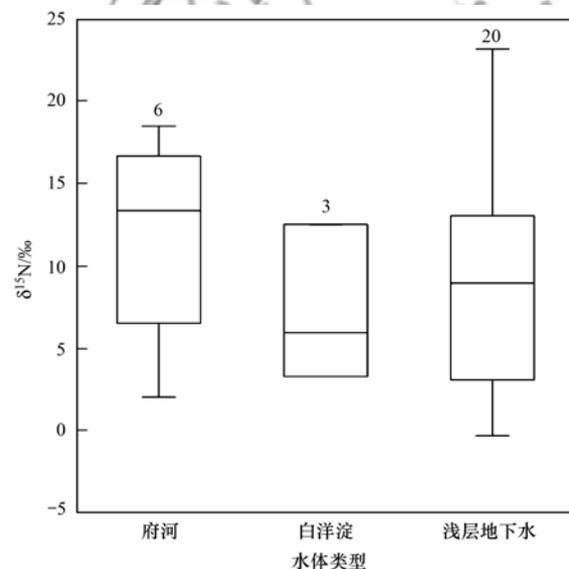
Fig. 7 Spatial distribution characteristics of NO_3^- mass concentration in surface water and shallow groundwater

2.4 地表水和地下水 NO_3^- 来源和迁移转化

图 8 为不同水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值. 整体上, 不同水体 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围: 浅层地下水 > 府河 > 白洋淀. 变化范围越大, 说明来源越复杂. 府河水 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素值分布对生活污水范围内, 白洋淀 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素值分布在地表水范围内. 浅层地下水 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素值跨度较大, 来源也较复杂, 需要根据具体值进一步确定.

图 9 为地表水和浅层地下水 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间分布特征. 整体上, 地表水和地下水 $\delta^{15}\text{N}$ 值在区域内沿着河流流向先增加, 再减小, 再增加最后减小. 河流上游 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 8‰ 以上, 中游上游 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $6\text{‰} \sim 8\text{‰}$, 下游部分区域小于 6‰ . Xue 等^[12] 认为 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $-6\text{‰} \sim 6\text{‰}$ 时来源于化肥, 范围为 $4\text{‰} \sim 19\text{‰}$ 时来源于生活污水, 范围为 $0\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 时来源于土壤. 综上可知, 生活污水影响上游地表水和地下水, 中游和下游受土壤和化肥的影响.

图 10 为研究区地表水和地下水 NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ 关系. 除了不接纳生活污水的 F1 外, 府河其余采样点 $\delta^{15}\text{N}$ 值均在 13‰ 以上, 这也说明生活污水河具有稳定的水源 (图 10). 工业废水不稳定排放使得 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化大^[11]. 依据不同来源的硝酸盐 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[12], 结



图上数字表示采样点个数

图 8 不同水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Fig. 8 $\delta^{15}\text{N}$ value in different water bodies

合现场调查情况, 府河水中 N 来源于城市和沿岸居民生活污水^[28].

针对白洋淀, B1 为 12.5‰ , B2 和 B3 在 $3\text{‰} \sim 7\text{‰}$ 之间, B1 为白洋淀与乡村道路的交汇地带, 居



图9 地表水和浅层地下水δ¹⁵N的空间分布特征

Fig. 9 Spatial distribution characteristics of δ¹⁵N in surface water and shallow groundwater

民生活污水是主要来源, B2 和 B3 可能与淀内农田施肥有关. 可见, 白洋淀的 N 除了来自府河的注入外, 还受淀边居民生活污水和淀区农田地表径流影响. 浅层地下水δ¹⁵N 的值除 S24 为 -0.27‰外, 其余的分布在 2 ~ 22‰之间(图 10). 大部分浅层地下水分布在土壤和化肥的δ¹⁵N-NO₃⁻区域, 化肥和土壤是区域地下水 NO₃⁻的主要来源. Sebilo 等^[29]的研究结果表明肥料 N 中有 8% ~ 12% 淋溶到地下水, 对地下水产生污染. 部分浅层地下水分布生活污水的范围内, 证明部分浅层地下水 NO₃⁻ 来源于生活污水. 除此之外, 点源污染也是地下水 NO₃⁻ 质量浓度增加的原因. S5 和 S6 汽车修理厂, 生活污水入渗是这两个采样点质量浓度升高的主要原因.

3 结论

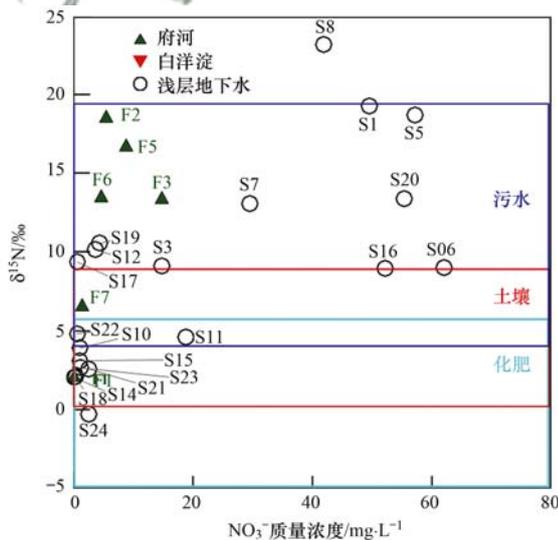
由府河向白洋淀, 沿着水流方向, 河水除受蒸发作用外, 还受农村居民生活污水排放的影响. 上游府河水以 Na·Ca-HCO₃ 为主, 下游以 Na·Ca-HCO₃·Cl 为主. 浅层地下水受到山区侧向补给、府河以及白洋淀的影响, 然而府河和白洋淀仅对其附近浅层地下水具有补给作用. 地表水补给地下水过程中, 水中的 Na⁺ 交换出黏土矿物上吸附的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺, 并进入浅层地下水体, 导致其 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 百分比增加. 河流自身的净化作用使得府河水硝酸盐从上游到下游减小. 浅层地下水硝酸盐超标率为 16.7%. 受区域内水流方向的影响, 河流南岸硝酸盐质量浓度大于北岸. 生活污水、施肥、污水灌溉和点源污染是影响浅层地下水硝酸盐的主要因素. 虽然生活污水限排措施使得区域内地表水和地下水硝酸盐污染状况均有所改善, 但点源和农业耕作依然是导致地下水硝酸盐持续增高的主要原因. 在未来雄安新区的发展和建设中, 控制点源污染、合理的生活污水排放及农业耕作对实现区域内水资源的可持续利用至关重要.

参考文献:

[1] 韩振宇. 中国 2020 年城市生活污水排放量预测及对策研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.
Han Z Y. The disquisition about forecast and countermeasure of the discharge of domestic sewage from Chinese cities at 2020 [D]. Changchun; Jilin University, 2004.

[2] 张林. 保定市地表水资源的的质量构成与污染治理[J]. 地下水, 2012, 34(4): 84, 102.

[3] 梁慧雅, 翟德勤, 孔晓乐, 等. 府河-白洋淀硝酸盐来源判定及迁移转化规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1236-1244.



NO₃⁻ 的来源划分依据文献[12]绘制

图 10 地表水和地下水 NO₃⁻ -δ¹⁵N 关系

Fig. 10 Relationship between NO₃⁻ and δ¹⁵N isotopes in surface water and groundwater

- Liang H Y, Zhai D Q, Kong X L, *et al.* Sources, migration and transformation of nitrate in Fuhe River and Baiyangdian Lake, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(8): 1236-1244.
- [4] 齐鲁财富网. 雄安新区污水大气治理迫在眉睫 受益行业浮出水面 [EB/OL]. <http://stock.qlmoney.com/news/850861799476559872.html>, 2017-04-09.
- [5] 常纪文. 雄安新区的科学定位与绿色发展路径[J]. 党政研究, 2017, (3): 22-24.
- [6] Huang T M, Pang Z H. The role of deuterium excess in determining the water salinisation mechanism: A case study of the arid Tarim River Basin, NW China[J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(12): 2382-2388.
- [7] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- Ma Y H, Su C L, Liu W J, *et al.* Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: Evidences from isotopic and Hydrochemical characteristics[J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- [8] Clark I D, Fritz P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [9] Wang S Q, Tang C Y, Song X F, *et al.* The impacts of a linear wastewater reservoir on groundwater recharge and geochemical evolution in a semi-arid area of the Lake Baiyangdian watershed, North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2014, **482-483**: 325-335.
- [10] 赵庆良, 马慧雅, 任玉芬, 等. 利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1692-1698.
- Zhao Q L, Ma H Y, Ren Y F, *et al.* $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ tracing of nitrate sources in Beijing urban rivers [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1692-1698.
- [11] Wang S Q, Tang C Y, Song X F, *et al.* Using major ions and $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ to identify nitrate sources and fate in an alluvial aquifer of the Baiyangdian lake watershed, North China Plain [J]. Environmental Science; Processes & Impacts, 2013, **15**(7), 1430-1443.
- [12] Xue D M, Botte J, De Baets B, *et al.* Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater[J]. Water Research, 2009, **43**(5): 1159-1170.
- [13] Qiu R Z, Li Y X, Yang Z F, *et al.* Influence of water quality change in Fu River on Wetland Baiyangdian [J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009, **3**(4): 397-401.
- [14] Qi Y, Wang Z Y, Pei Y S. Evaluation of water quality and nitrogen removal bacteria community in Fuhe River[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **13**: 1809-1819.
- [15] 龙幸幸, 杨路华, 夏辉, 等. 白洋淀府河入淀口周边水质空间变异特征分析[J]. 水电能源科学, 2016, (9): 35-38.
- Long X X, Yang L H, Xia H, *et al.* Spatial variability characteristics analysis of water quality surrounding Fuhe River entrance in Baiyangdian Lake[J]. Water Resources and Power, 2016, (9): 35-38.
- [16] 袁瑞强, 宋献方, 王鹏, 等. 白洋淀渗漏对周边地下水的的影响[J]. 水科学进展, 2012, **23**(6): 751-756.
- Yuan R Q, Song X F, Wang P, *et al.* Impacts of percolation in Baiyangdian Lake on groundwater [J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(6): 751-756.
- [17] Cui B S, Li X, Zhang K J. Classification of hydrological conditions to assess water allocation schemes for Lake Baiyangdian in North China[J]. Journal of Hydrology, 2010, **385**(1-4): 247-256.
- [18] Liu C L, Xie G D, Huang H Q. Shrinking and drying up of Baiyangdian Lake wetland: A natural or human cause? [J]. Chinese Geographical Science, 2006, **16**(4): 314-319.
- [19] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [20] 孙一博, 王文科, 段磊, 等. 关中盆地浅层地下水地球化学的形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(3): 29-35.
- Sun Y B, Wang W K, Duan L, *et al.* Geochemical evolution mechanisms of shallow Groundwater in Guanzhong basin, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, **41**(3): 29-35.
- [21] 赵焕, 王仕琴, 孔晓乐, 等. 华北低山丘陵区潜龙河流域地下水水质特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(2): 17-24.
- Zhao H, Wang S Q, Kong X L, *et al.* A study of the water quality characteristics and factors in the Zhulong River basin in the hilly region of North China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, **43**(2): 17-24.
- [22] 袁瑞强. 人类活动影响下的白洋淀流域浅层地下水循环机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究所院, 2011.
- Yuan R Q. Study on the mechanism of shallow groundwater circulation in the Baiyangdian catchment with the influence of human activities [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [23] Appelo C A J, Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed.) [M]. London: Taylor & Francis Group, 2005.
- [24] 陈宗宇. 从华北平原地下水系统中古环境信息研究地下水资源演化[D]. 长春: 吉林大学, 2001.
- Chen Z Y. Groundwater resources evolution based on paleoenvironmental information from groundwater system in the North China Plain[D]. Changchun: Jilin University, 2001.
- [25] 霍思远. 潜水位下降对入渗补给的影响研究-以华北平原为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- [26] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [27] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源(河北卷)[M]. 北京: 中国地图出版社, 2005.
- [28] 孙添伟, 陈家军, 王浩, 等. 白洋淀流域府河干流村落非点源负荷研究[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 568-572.
- Sun T W, Chen J J, Wang H, *et al.* Study on non-point source pollution loads in Villages along the Fuhe River, Baiyangdian watershed [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(5): 568-572.
- [29] Sebilio M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(45): 18185-18189.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)