

基于人工甜味剂时序特征的白洋淀 对地下水补给量研究

马荣^{1,2}, 张冰², 周晓妮²

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 中国地质科学院 第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要: 研究白洋淀对区域地下水的补给量,对雄安新区生态水城的建设具有重要意义。目前对湖水与地下水补给量的计算,主要基于同位素测试以及水位和水温长序列监测等方法,具有较高的计算成本和局限性。以人工甜味剂为示踪剂,在查明安赛蜜、三氯蔗糖、糖精、甜蜜素4种典型人工甜味剂在白洋淀和浅层地下水空间分布的基础上,通过构建白洋淀的金龙淀内安赛蜜时序特征,结合淀内补排特征和气象监测数据,厘清金龙淀对地下水的补给量。计算结果显示:4种人工甜味剂在地下水中的平均浓度分别为0.11、0.14、0.04、0.05 $\mu\text{g/L}$,在白洋淀内的平均浓度为1.16、2.17、0.21、0.38 $\mu\text{g/L}$ 。金龙淀内安赛蜜浓度在监测时间段内介于0.73~1.31 $\mu\text{g/L}$,其向地下水的渗漏率为 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,年渗漏量为 $273.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。研究结果表明:在研究区南部和白洋淀内水环境受人类活动干扰最为严重,在后期的水生态环境保护 and 治理中需对该区域进行重点研究;白洋淀是雄安新区地下水主要补给来源,其对区域地下水量和水质均有重要影响,精确刻画白洋淀与地下水的交互补给作用,能够为雄安新区水资源的科学调控提供重要支撑。

关键词: 地下水补给量;示踪剂;人工甜味剂;白洋淀;雄安新区

中图分类号:P641.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)03-0024-06

Recharge volume of the Baiyangdian Lake to the groundwater based on the time series of artificial sweeteners

MA Rong^{1,2}, ZHANG Bing², ZHOU Xiaoni²

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-environmental Evolution, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Clarifying the infiltration volume of the Baiyangdian Lake to the groundwater is crucial to the establishment of ecology – water city in Xiongan New Area. Currently, the isotope test, long time series monitoring of water table and water temperature are used to calculate the recharge volume of the lake to the groundwater. However, these methods are costly and have certain limitations. Here, we used four representative artificial sweeteners (AS) as anthropogenic tracers, namely acesulfame (ACE), sucralose (SUC), saccharin (SAC) and cyclamate (CYC), the spatial distribution of which in surface water and shallow groundwater were described, and then the time series of ACE in the Jinlongdian Lake were used to calculate the lake's recharge volume to the groundwater considering its recharge and discharge characteristics and the climate monitoring data. The average contents of ACE, SUC, SAC, and CYC in the groundwater were 0.11, 0.14, 0.04, 0.05 $\mu\text{g/L}$ respectively, whereas those in Baiyangdian Lake were 1.16, 2.17, 0.21, 0.38 $\mu\text{g/L}$ respectively. The concentrations of ACE were in the range of 0.73 – 1.31 $\mu\text{g/L}$ in the Jinlongdian Lake during the monitoring time, and its recharge volume to the groundwater was $7.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$, the annual recharge volume was $2.7375 \times 10^6 \text{ m}^3$. This result demonstrates that the water environment of the Baiyangdian Lake and the ground-

收稿日期:2020-09-24; 修回日期:2021-03-03

基金项目:“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2019NKMS01);中国地质调查局地质调查项目(DD20190303)

作者简介:马荣(1982-),男,陕西延安人,博士,副研究员,研究方向为地球多圈层交互带。

通讯作者:张冰(1983-),男,河北石家庄人,硕士,高级工程师,研究方向为地下水污染评价。

water in the south part of the study area are significantly affected by anthropogenic activities, and therefore these regions should be protected and restored in the future. Baiyangdian Lake is the main recharge source of the groundwater, it has a significant effect on the volume and quality of the groundwater. The accurate description of the interaction between the Baiyangdian Lake and the groundwater can provide scientific support for the management of water resources in Xiongan New Area.

Key words: groundwater recharge; tracer; artificial sweetener (AS); Baiyangdian Lake; Xiongan New Area

1 研究背景

设立雄安新区,是重大的历史性战略选择,是千年大计、国家大事^[1]。白洋淀是雄安新区内重要的生态要素之一,与大气圈、生物圈和岩石圈之间进行着密切的物质循环和能量传递,是各圈层相互作用的重要连接点,对雄安新区生态水城的建设具有重要意义。白洋淀内纵横交错的3700余条沟壕将全淀分割成143个大小不等又相互连通的淀泊,均与地下水存在着密切的水力联系。

目前已对白洋淀流域水生态与水环境等开展了大量研究,如杨薇等^[2]对2000–2018年关于白洋淀生态需水量的研究成果进行了归纳总结;王欢欢等^[3]对1988–2016年白洋淀水质时空演化特征进行了研究;白洁等^[4]对白洋淀流域水环境承载力开展了定量评价,但对白洋淀与地下水的相互作用模式,尤其是其对区域地下水补给量等,尚未见到广泛报道。国内外对湖水与地下水转化关系也开展了大量研究^[5–7],研究人员通过物理、化学、数值模拟等多种方法对二者间的补给模式和补给量进行刻画^[8]。如Wilson等^[9]以氡同位素为示踪剂,结合遥感影像数据探究了爱尔兰劳夫湖与地下水的交互补给作用模式,研究结果表明地下水主要通过北侧和东侧的石灰岩补给湖泊,在西部的砂岩和混合花岗岩中并未发现补给通道;Yang等^[10]根据热力学模型精确计算了地下水对云南阳宗海的补给量;Su等^[11]根据同位素和热力学模型对内蒙古达克湖与地下水作用模式进行了研究,计算结果表明地下水对湖水的补给速率在春、夏、秋3季为 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ m/s,在冬季由于湖水–地下水潜流带结冰,阻隔了地下水的补给;Liao等^[12]利用氢、氧稳定同位素和镭同位素识别出地下水对鄱阳湖的补给区;尹立河等^[13]以湖水与地下水位监测数据为基础,结合水化学数据,对鄂尔多斯高原乞盖淖与地下水的动态补排关系进行了研究。上述研究均取得良好成果,但同时也面临以下问题:当镭、氢等同位素在地下水和地表水间未有显著差异时,对二者间的

交互作用模式便难以精确刻画^[9];利用水位或热力学模型进行研究时,需投入较大工作量完成对水位或温度的长期监测,且研究成果多以定性为主^[14]。基于此,结合雄安新区实际的水化学特征和土地利用类型,本研究以人工甜味剂 (artificial sweeteners, AS) 为示踪剂,通过构建其在白洋淀中的时序特征,来探究典型淀区对地下水的补给量。

AS是一类广泛应用于食品、饮料、药物和个人护理品的人工合成或半合成的代替蔗糖的有机化合物^[15],由于大部分AS几乎不被人体转化,因此被称为无热量的糖。自20世纪末通过美国食品和药物管理局许可以来,全球每年的AS消耗量为 15.9×10^4 t,我国是AS第一大消费与制造国,约占全球消耗量的32%^[16]。部分AS,如安赛蜜(acesulfame, ACE)、三氯蔗糖(sucralose, SUC)等具有较高的稳定性与持久性^[17],研究人员在大气粉尘^[18]、地表水^[19–21]、地下水^[22]、土壤^[23]、地表植被^[24]等不同环境要素中均发现其广泛存在。我国对AS的研究尚处于起步阶段,目前以厘清其在各生态要素单元内的空间分布特征为主,如马晓雁等^[17]对浙江省某市水处理及供水系统内ACE、糖精(saccharin, SAC)、阿斯巴甜(aspartame, ASP)、纽甜(neotame, NEO)的分布特征进行了研究;Gan等^[24]对天津市大气粉尘、土壤、地表水中AS的空间分布进行了调查,对比干、湿季节下大气粉尘中AS含量的变化,其浓度范围介于 $0.02 \sim 1\,940$ pg/m³;Yang等^[25]对珠江支流东江流域内地表水和地下水中AS含量的时空分布进行了研究,查明其主要来源于东江沿岸生活污水。但充分利用AS较强水溶性、较弱吸附性、单一来源等特性^[18],将其作为示踪剂探究人类活动的影响范围与强度、精确刻画地表水与地下水交互补给作用模式等方面的研究较少^[26]。

基于此,本研究首先对雄安新区水环境中AS空间分布特征进行研究,查明人类活动对雄安新区水环境的影响;在此基础上通过构建AS在典型淀区内的时序特征,结合气象资料与补排特征,精确计算白洋淀内的金龙淀对地下水的补给量,为雄安新区水资源科学调控提供支撑。

2 研究区概况

雄安新区位于华北腹地,主要包括安新、雄县、容城三县及周边区域,面积约 $1\,760\text{ km}^2$ ^[1],区域内地势平坦,新区土地利用分为农业种植区、生态林地、交通运输地、建成区、水体 5 种类型,其中农田面积最大,2019 年遥感影像资料显示农业种植区面积占比达 70.4%^[27],主要分布于新区西部和南部,作物以玉米和小麦为主。研究区属暖温带大陆性季风气候,具有夏季高温多雨、冬季干旱寒冷的特点,1965–2019 年平均气温为 $7.3\sim 12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 553.1 mm ,70% 集中于 6–8 月份,降水年际变化大。区域内有华北地区最大的湖泊湿地白洋淀,具有完备的沼泽和水域生态系统,在区域气候、地下水补给、洪水调蓄以及生态系统稳定性等方面发挥着重要作用。白洋淀淀区总面积为 366.4 km^2 ,多年平均明水面积约占 41.0%^[28],从北、南、西 3 个方向接纳 9 条入淀河流。

研究区地势由西北向东南逐渐降低,地面海拔高程多在 $15\sim 50\text{ m}$,坡降小于 2‰,第四纪沉积以冲洪积、冲湖积、冲积为主,地下水以孔隙水为主。根据华北平原含水层组划分原则,可分为浅层与深层地下水两大类,其中大部分地区浅层地下水水位埋深在 $5\sim 15\text{ m}$,单井涌水量在 $1\,000\sim 3\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ^[1],大气降雨和河湖入渗是其主要补给来源,地面蒸发、农业灌溉、生活用水是其主要排泄方式。

3 样品采集与测试

2019 年 7 月在雄安新区采集 42 组浅层地下水和 6 组白洋淀地表水样品,测试 ACE、SUC、SAC、甜蜜素(cyclamate, CYC)4 种在我国最为常见的人工甜味剂^[29],所有样品均由自然资源部地下水科学与工程重点实验室测试完成,通过测试得出的雄安新区地下水位及人工甜味剂空间分布特征见图 1。在此基础上,选择白洋淀南部的金龙淀作为试点,金龙淀紧临由中国地质科学院水文地质环境地质研究所建立的雄安新区地球多圈层交互带监测站^[30]。为恢复白洋淀流域生态功能,河北省利用南水北调与引黄工程在每年 3–7 月对白洋淀实施生态补水,故在 8–9 月内,金龙淀补给来源仅为大气降雨,排泄渠道为蒸发与地下水渗漏,无外界水源对淀区内的 AS 含量造成干扰。本次研究从 2019 年 8 月 1 日起,每间隔 7 d 在金龙淀水域中心取地表水样品,截止至 2019 年 9 月 26 号,累积获取 8 组样品,结合不

同 AS 半衰期,选择半衰期最长的 ACE 作为示踪剂^[21],构建其在金龙淀内的时序特征,计算该淀对地下水的补给量。

4 结果与分析

相较于其他天然示踪剂,AS 最大的特点在于其具有较强极性、不易被土壤吸附、极易溶于水,且在自然界中无背景值^[31]。目前 AS 被作为一种理想人工示踪剂,广泛用于定量刻画人类活动对生态系统的影响^[32–34]。图 1 表明在雄安新区内,地下水中 ACE 含量为 $0.000\,5\sim 1.34\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $0.11\text{ }\mu\text{g/L}$,在白洋淀中其浓度为 $0.95\sim 1.40\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $1.16\text{ }\mu\text{g/L}$;地下水中 SUC 浓度为 $0.003\sim 0.93\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $0.14\text{ }\mu\text{g/L}$,在白洋淀中其浓度为 $1.14\sim 3.16\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $2.17\text{ }\mu\text{g/L}$ 。SAC 和 CYC 在地下水中浓度较低,SAC 在地下水中浓度最大值为 $0.32\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $0.04\text{ }\mu\text{g/L}$,在白洋淀中其浓度最大值为 $0.27\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $0.21\text{ }\mu\text{g/L}$;CYC 在地下水中浓度最大值为 $0.30\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $0.05\text{ }\mu\text{g/L}$,在白洋淀中其浓度最大值为 $0.50\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值为 $0.38\text{ }\mu\text{g/L}$ 。因 SAC 和 CYC 在水中半衰期较短,且在自然条件下极易发生生物降解,故其含量远低于 ACE 和 SUC^[20]。

雄安新区水环境中的 AS 含量远高于德国^[35]、瑞士^[22]、加拿大^[34]、新加坡^[36]以及中国天津等地^[37],但与珠江流域东江河内的 AS 浓度相似,这充分表明人类活动对雄安新区与东江流域的影响强度较为相似,且远大于其他区域。从总体空间分布特征来看,上述 4 种 AS 在雄安新区西南部含量显著高于其他区域,这表明西南部区域受人类活动的影响更为强烈,结合新区目前的产业结构,人类活动主要为生活污水排放和农业灌溉,这些活动导致大量的 AS 进入白洋淀内,在白洋淀对地下水补给作用下,AS 又进一步进入含水层;在研究区北部,地下水以山前侧向补给为主,地下水受白洋淀影响较小,故其 AS 浓度较低。

通过位于金龙淀南部的地球多圈层交互带监测站,采集到 2019 年 8–9 月金龙淀的日降雨和蒸发量及数据 ACE 时序分布特征,见图 2。由图 2 可见,2019 年 8–9 月金龙淀内降雨量较小,日降雨量为 $0\sim 19.46\text{ mm}$,累计降雨量为 62.75 mm ,蒸发量较大,日蒸发量为 $0.13\sim 8.33\text{ mm}$,累计蒸发量为 235.8 mm ,累计蒸发量远大于累计降雨量,在强烈蒸发和渗漏作用下,金龙淀内 AS 浓度持续升高。

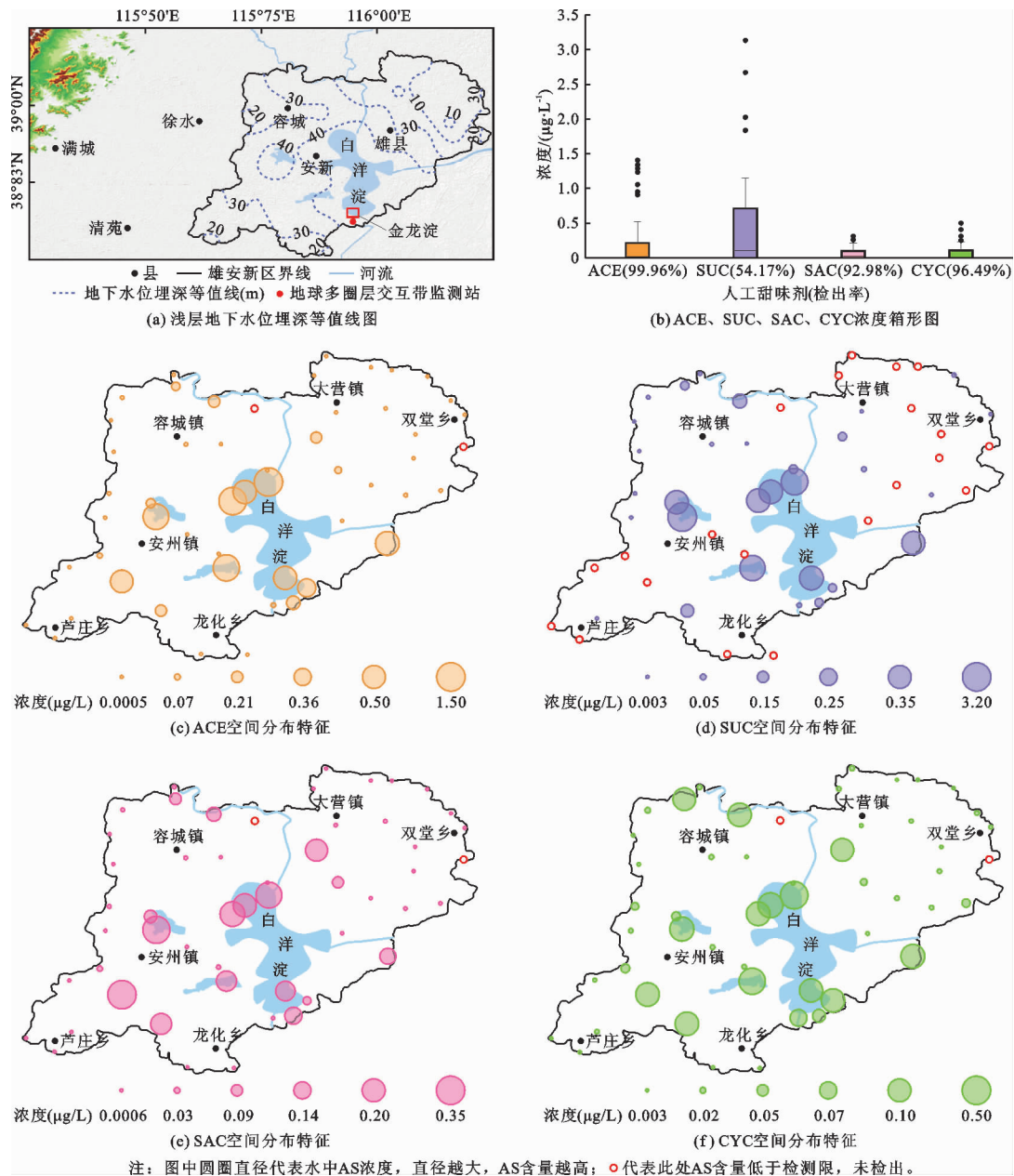


图 1 雄安新区地下水位及 4 种典型人工甜味剂空间分布特征(2019 年 7 月)

由于 ACE 在水中的半衰期长达 15 a^[21],其在短期内衰减量基本可忽略不计,ACE 在淀内时空演

化主要与大气降雨、蒸发、地下水渗漏有关,金龙淀与浅层地下水作用模式示意图见图 3。

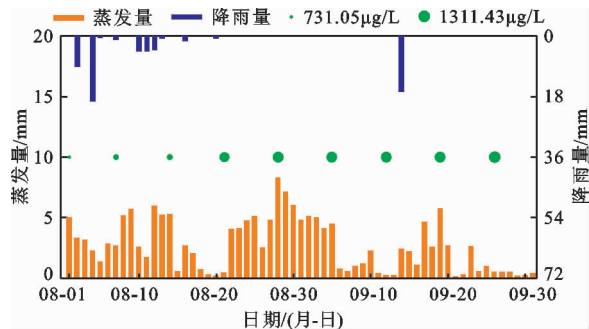


图 2 2019 年 8-9 月金龙淀内降雨量、蒸发量及 ACE 浓度时序分布特征

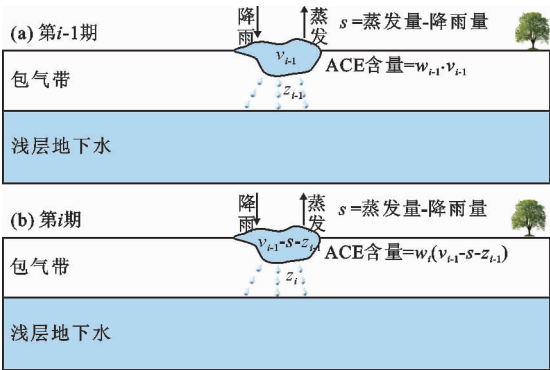


图 3 金龙淀与浅层地下水作用模式示意图

根据公式(1)~(5)即可反演出湖水对地下水的渗漏量。

$$w_i = \frac{w_{i-1}(v_{i-1} - s)}{v_{i-1} - s - z_{i-1}} \quad (1)$$

$$\frac{z_{i-1}}{v_{i-1} - s} = \frac{w_i - w_{i-1}}{w_i} \quad (2)$$

$$z_{i-1} \frac{w_i}{w_i - w_{i-1}} = v_{i-1} - s \quad (3)$$

$$z_i \frac{w_{i+1}}{w_{i+1} - w_i} = v_i - s \quad (4)$$

$$z = z_i \frac{w_{i+1}}{w_{i+1} - w_i} - z_{i-1} \frac{w_i}{w_i - w_{i-1}} \quad (5)$$

式中: w_i, w_{i-1} 分别为第*i*期、第*i*-1期金龙淀中ACE的浓度($i = 1, 2, \dots, 8$), $\mu\text{g/L}$; v 为湖水体积, m^3 ; s 为第*i*-1到*i*期间湖水净蒸发量,即蒸发量与降雨量之差, m^3 ; z 为湖水向地下水渗漏量, m^3 。

根据实地调查,金龙淀的水域面积为 8.947 km^2 ,结合净蒸发量数据和淀内ACE浓度的时序数据(图2),根据公式(1)~(5),确定金龙淀每7d内平均向地下水渗漏量为 $5.25 \times 10^4 \text{ m}^3$,则年渗漏量为 $273.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

5 结 论

(1)研究表明,人类活动对雄安新区水环境的影响大于天津等地,尤其是在研究区南部和白洋淀内受人类活动影响最为严重,在后期的水生态环境保护 and 治理中需对该区域进行重点研究。ACE和SUC在地下水中的浓度平均值分别为 0.11 和 $0.14 \mu\text{g/L}$,在白洋淀中的平均浓度分别为 1.16 和 $2.17 \mu\text{g/L}$ 。在农业灌溉与生活污水的影响下,AS首先在地表水中富集,在其从湖水向地下水渗透过程中,在包气带内发生吸附与衰减,导致其在白洋淀内浓度远高于地下水。

(2)本研究以AS中ACE为示踪剂,构建其在地表水中的时序特征,在整个监测时间段内ACE浓度介于 $0.73 \sim 1.31 \mu\text{g/L}$,在强烈蒸发和渗漏作用下,金龙淀内ACE浓度持续升高。结合地球多圈层交互带监测站降雨与蒸发数据,通过迭代计算,查明金龙淀向浅层地下水的渗漏量为 $0.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,则年渗漏总量为 $273.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。白洋淀是雄安新区浅层地下水系统主要补给来源,其对区域内地下水水量和水质均有重要影响,精确刻画白洋淀与地下水的交互补给作用,对雄安新区水资源科学调控具有重要意义。

参考文献:

- [1] 郝爱兵,吴爱民,马震,等. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报,2018,39(5):513-522.
- [2] 杨薇,赵彦伟,刘强,等. 白洋淀生态需水:进展及展望[J]. 湖泊科学,2020,32(2):294-308.
- [3] 王欢欢,白洁,刘世存,等. 白洋淀近30年水质时空变化特征[J]. 农业环境科学学报,2020,39(5):1051-1059.
- [4] 白洁,王欢欢,刘世存,等. 流域水环境承载力评价-以白洋淀流域为例[J]. 农业环境科学学报,2020,39(5):1070-1076.
- [5] HAJATI M C, FRANSEN M, PEDERSEN O, et al. Flow reversals in groundwater-lake interactions: A natural tracer study using $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Limnologia, 2018, 68: 26-35.
- [6] MAAVARA T, SLOWINSKI S, REZANEZHAD F, et al. The role of groundwater discharge fluxes on Si:P ratios in a major tributary to Lake Erie [J]. Science of the Total Environment, 2018, 622-623: 814-824.
- [7] ZOU Junyu, YANG Yuesuo, ZHANG Haiyan. Sr isotope fingerprinting of multiple water-source characterizations and its environmental implications in a complex lake-groundwater system, Wudalianchi, Northeast China [J]. Chemosphere, 2018, 212: 1095-1103.
- [8] YANG Jing, YU Zhongbo, YI Peng, et al. Evaluation of surface water and groundwater interactions in the upstream of Kui River and Yunlong Lake, Xuzhou, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124549.
- [9] WILSON J, ROCHA C. A combined remote sensing and multi-tracer approach for localising and assessing groundwater-lake interactions [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 44: 195-204.
- [10] YANG Benqin, YANG Shiju, WAN Xing, et al. Temperature models for quantifying groundwater seepage flux applied in a deep lake of a plateau: Yangzonghai Lake, Yunnan, China [J]. Chemosphere, 2020, 238: 124674.
- [11] SU Xiaosi, CUI Geng, DU Shanghai, et al. Using multiple environmental methods to estimate groundwater discharge into an arid lake (Dakebo Lake, Inner Mongolia, China) [J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(7): 1707-1722.
- [12] LIAO Fu, WANG Guangcai, YI Lixin, et al. Identifying locations and sources of groundwater discharge into Poyang Lake (eastern China) using radium and stable isotopes (deuterium and oxygen-18) [J]. Science of the Total Environment, 2020, 740: 140163.
- [13] 尹立河,陶正平,李瑛,等. 鄂尔多斯高原盖兹地下水与湖水动态补排关系研究[J]. 盐湖研究,2010,18(1):33-37.
- [14] MATHESON E J, HAMILTON S M, KYSER K. Shallow groundwater salinization of the Niagara Peninsula, Ontario

- o, Canada [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2018, 18(2): 155–174.
- [15] LUO Jingyang, ZHANG Qin, CAO Miao, et al. Ecotoxicity and environmental fates of newly recognized contaminants — artificial sweeteners: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1149–1160.
- [16] PRAVEENA S M, CHEEMA M S, GUO H R. Non-nutritive artificial sweeteners as an emerging contaminant in environment: A global review and risks perspectives [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170(2): 699–707.
- [17] 马晓雁,胡慧,陆思嘉,等. 浙江省H市水处理及供水系统4种人工甜味剂的分布特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1629–1635.
- [18] OPPENHEIMER J A, BADRUZZAMAN M, JACANGELO J G. Differentiating sources of anthropogenic loading to impaired water bodies utilizing ratios of sucralose and other microconstituents [J]. *Water Research*, 2012, 46(18): 5904–5916.
- [19] RIBBERS K, BREUER L, DÜRING R A. Detection of artificial sweeteners and iodinated X-ray contrast media in wastewater via LC–MS/MS and their potential use as anthropogenic tracers in flowing waters [J]. *Chemosphere*, 2019, 218: 189–196.
- [20] WOLF L, ZWIENER C, ZEMANN M. Tracking artificial sweeteners and pharmaceuticals introduced into urban groundwater by leaking sewer networks [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 430: 8–19.
- [21] ZIRLEWAGEN J, LICHA T, SCHIPERSKI F, et al. Use of two artificial sweeteners, cyclamate and acesulfame, to identify and quantify wastewater contributions in a karst spring [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 356–365.
- [22] BUERGE I J, BUSER H R, KAHLE M, et al. Ubiquitous occurrence of the artificial sweetener acesulfame in the aquatic environment: An ideal chemical marker of domestic wastewater in groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(12): 4381–4385.
- [23] BUERGE I J, KELLER M, BUSER H R, et al. Saccharin and other artificial sweeteners in soils: Estimated inputs from agriculture and households, degradation, and leaching to groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(2): 615–621.
- [24] GAN Zhiwei, SUN Hongwen, YAO Yiming, et al. Distribution of artificial sweeteners in dust and soil in China and their seasonal variations in the environment of Tianjin [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 488–489: 168–175.
- [25] YANG Yuanyuan, ZHAO Jianliang, LIU Yousheng, et al. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and artificial sweeteners (ASs) in surface and ground waters and their application as indication of wastewater contamination [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616–617: 816–823.
- [26] MA Rong, LI Lei, ZHANG Bing. Impact assessment of anthropogenic activities on the ecological systems in the Xiongan New Area in the North China Plain [J/OL]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2021 [2021–01–23]. <https://doi.org/10.1002/ieam.4390>.
- [27] 贾玉娜,张文超,康会涛,等. 2016–2019年雄安新区土地覆盖变化研究[J]. *测绘通报*, 2020, 522(9): 79–82.
- [28] 杨泽凡,胡鹏,赵勇,等. 新区建设背景下白洋淀及入淀河流生态需水评价和保障措施研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(6): 563–570.
- [29] MA Ling, LIU Yarui, XU Jiayao, et al. Mass loading of typical artificial sweeteners in a pig farm and their dissipation and uptake by plants in neighboring farmland [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 605–606: 735–744.
- [30] 石建省,马荣,马震. 区域地球多圈层交互带调查探索研究[J]. *地球学报*, 2019, 40(6): 767–780.
- [31] LANGE F T, SCHEURER M, BRAUCH H J. Artificial sweeteners — a recently recognized class of emerging environmental contaminants: A review [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 403(9): 2503–2518.
- [32] ROY J W, VAN – STEMPVOORT D R, BICKERTON G. Artificial sweeteners as potential tracers of municipal landfill leachate [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 89–93.
- [33] VAN – STEMPVOORT D R, ROY J W, BROWN S J, et al. Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 401(1–2): 126–133.
- [34] VAN – STEMPVOORT D R, ROY J W, GRABUSKI J, et al. An artificial sweetener and pharmaceutical compounds as co-tracers of urban wastewater in groundwater [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 461–462: 348–359.
- [35] SCHEURER M, STORCK F R, BRAUCH H J, et al. Performance of conventional multi-barrier drinking water treatment plants for the removal of four artificial sweeteners [J]. *Water Research*, 2010, 44(12): 3573–3584.
- [36] TRAN N H, HU Jiangyong, LI Jinhua, et al. Suitability of artificial sweeteners as indicators of raw wastewater contamination in surface water and groundwater [J]. *Water Research*, 2014, 48: 443–456.
- [37] GAN Zhiwei, SUN Hongwen, FENG Biting, et al. Occurrence of seven artificial sweeteners in the aquatic environment and precipitation of Tianjin, China [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 4928–4937.