

极端降水条件下白洋淀主淀区水化学特征及水质变化*

韩玉丽^{1,2}, 卜红梅^{1,2**}

(1: 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院重点实验室, 北京 100101)

(2: 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 极端降水是影响水环境质量的重要气象因素之一, 随着全球气候变暖, 极端降水事件的频率和量级呈显著上升的趋势, 对湖泊水化学和水环境产生了深刻的影响. 白洋淀是华北地区重要的湖泊型湿地和生态功能区, 为查明极端降水条件下白洋淀主淀区的水化学和水质特征, 本研究利用 Piper 三线图、Gibbs 图和多元统计方法阐明了白洋淀极端降雨后的水化学特征、氢氧稳定同位素特征和水质空间变化, 揭示了极端降水条件对白洋淀主淀区水化学和水质的影响. 结果表明: (1) 在极端降水条件下, 白洋淀主淀区湖水呈弱碱性, 水化学类型主要为 $\text{Ca-HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型, 极端降水减弱了蒸发结晶作用和人类活动等对白洋淀主淀区湖水水化学组成的影响. 极端降水是导致白洋淀主淀区 pH、电导率和总溶解性固体发生大幅度变化的原因之一. (2) 极端降水条件下白洋淀主淀区湖水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围分别为 $-60.86\text{‰} \sim -35.01\text{‰}$ 和 $-8.84\text{‰} \sim -3.45\text{‰}$, 其值均与水深呈显著负相关. 极端降水使得白洋淀主淀区湖水的氢、氧稳定同位素贫化, 但对其空间分布的影响不大, 湖水氢、氧同位素关系受降水本身氢、氧同位素关系的影响更为强烈. 强降水引起白洋淀的水深突然增加, 导致湖水受到的蒸发分馏作用影响减弱. (3) 极端降水增加了面源污染扩散的速度, 导致白洋淀主淀区湖水中的氨氮、硝态氮和总磷等营养物质浓度升高, 白洋淀大气降水中的氨氮也可能导致极端降水条件下主淀区湖水中氨氮浓度升高, 而上游水库为了应对强降雨事件进行的调蓄放水使得白洋淀东北部水质有所改善. 该研究为白洋淀的生态修复治理和雄安新区的生态系统管理提供了科学依据.

关键词: 极端降水; 水化学特征; 氢、氧稳定同位素; 水质; 白洋淀

Hydrochemical characteristics and water quality variations in the main area of Lake Baiyangdian under extreme precipitation*

Han Yuli^{1,2} & Bu Hongmei^{1,2**}

(1: Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China)

(2: College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Extreme precipitation is one of the important meteorological factors affecting water quality. With global warming, the frequency and magnitude of extreme precipitation events have increased significantly, which greatly influenced the hydrochemistry and water environment in lakes. Lake Baiyangdian is an important wetland and ecological area in North China. In order to identify the hydrochemical characteristics and water quality variations in the main area of Lake Baiyangdian under an extreme precipitation event, the Piper diagram, Gibbs diagram, and multivariate statistical methods were used to elucidate the hydrochemical characteristics, hydrogen and oxygen stable isotope characteristics, and spatial variations of water quality in this study. Accordingly, the effects of the extreme precipitation event on the hydrochemistry and water quality were detected in the main area of Lake Baiyangdian. The results showed that (1) Lake water is weakly alkaline, and the hydrochemistry type is $\text{Ca-HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ under the extreme precipitation event. The extreme precipitation weakened the effects of evapotranspiration and human activities on the chemical compositions of the lake water. The extreme precipitation also led to the large changes in pH, electrical conductivity and total dissolved

* 2021-12-19 收稿; 2022-04-12 收修改稿.

国家重点研发计划项目 (2019YFA0607102) 资助.

** 通信作者; E-mail: buhm@igsrr.ac.cn.

solid values in the lake water. (2) The hydrogen and oxygen isotopic values ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) respectively ranged from -60.86‰ to -35.01‰ and from -8.84‰ to -3.45‰ , showing significant negative correlations with water depths. Although the hydrogen and oxygen stable isotopes of the lake water were depleted by the extreme precipitation, the extreme precipitation did not affect their spatial distribution. The relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values is more strongly influenced by the correlation between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation itself. Additionally, the heavy precipitation caused a sudden increase in the water depth of the main area of the lake, which weakened the influence of evaporative fractionation on the lake water. (3) The extreme precipitation raised the diffusion rate of non-point source pollution and increased the concentrations of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total phosphorus in the lake water. The ammonia nitrogen, in precipitation may also increase the ammonia nitrogen concentration in lake water. Additionally, releasing water from reservoirs located in the upper reaches of the lake in response to extreme precipitation improved the water quality in the northeastern area of the lake. This study provides a scientific basis for the ecological restoration of Lake Baiyangdian and the ecosystem management of Xiong'an New Area.

Keywords: Extreme precipitation; hydrochemical characteristics; hydrogen and oxygen stable isotopes; water quality; Lake Baiyangdian

湖泊是生态系统的重要组成部分,为周围区域提供了多项生态系统服务功能,湖泊水质状况不仅影响区域生态环境健康,对区域的可持续发展也具有极为重要的意义^[1-3]. 当前正面临着全球性气候变化,变化环境下水文循环与水资源脆弱性成为了世界研究热点之一,而气候变化带来的水文效应问题也受到各国学者的广泛关注. 降水是河流、湖泊非点源污染的主要驱动力之一^[4],极端降水事件的产流量和污染物携带量往往更大,导致水体中的污染物通量增大^[5-7],因此极端降水是影响水环境质量的重要气象因素之一^[4,8-9]. 随着气候变暖,极端降水事件的频率和量级呈显著上升的趋势,对生态系统产生的影响不断加大^[10-12]. 在气候变化和人类活动共同作用下,湖泊水循环及湖水中的物理、化学、生物过程都发生了深刻改变,引起了一系列生态环境问题^[13-14]. 水化学特征是湖泊水体的一个基本要素,表征其周围环境特点、水质现状及水体中的离子来源分布等^[15],而区域气候、水文地质条件、人类活动都会对地表水的水化学特征及离子来源产生深刻影响^[16-19].

白洋淀位于海河流域,是华北平原仅存的为数不多的湖泊型湿地生态系统之一. 白洋淀生态系统的生物多样性丰富,构成复杂,不仅为人类生产生活提供多种资源,而且具有蓄水灌溉、调节局部地区气候、改善生态环境、补充地下水和保护生物多样性等多种生态功能^[20]. 2017年国务院设立的雄安新区建设对于推进京津冀协同发展、优化城市空间结构和国家发展,具有重大意义. 白洋淀位于雄安新区的核心区域,占雄县、容城和安新县总面积的23.4%,但白洋淀目前的水环境问题仍较为严重,大部分水域的水质依然为V类甚至劣V类^[6]. 受强降雨影响,2021年7月京津冀降雨量较常年偏多1~2倍,局部降雨强度大、时段集中,中小河流涨势迅猛,汛情严重,海河流域滦河及漳卫河各出现1次编号洪水^[21]. 白洋淀流域则出现了罕见的大暴雨及局部大暴雨的极端天气状况,此次降水达到了近5年最大降水,日最大降水量为59.9 mm,比2020年同月最大日降水量增加33.4 mm(图1). 中国气象上规定,每小时降雨量16 mm以上、或连续12小时降雨量30 mm以上、24小时降水量为50 mm或以上的雨称为暴雨,按其降水强度大小又分为3个等级,即24小时降水量为50~99.9 mm称暴雨、100~249.9 mm之间为大暴雨、250 mm以上称特大暴雨(中国气象局, <http://www.cma.gov.cn/>). 根据等级划分,白洋淀本次降水属于暴雨等级.

为探究这种极端降水条件是否会对白洋淀的水质产生影响,本研究采集了白洋淀暴雨过后的湖泊水样,分析主淀区湖水的水化学特征、氢氧稳定同位素特征和水质空间差异特征,从而揭示极端降水条件对白洋淀主淀区水化学和水质的影响,为白洋淀的生态修复治理和雄安新区的生态系统管理提供科学依据.

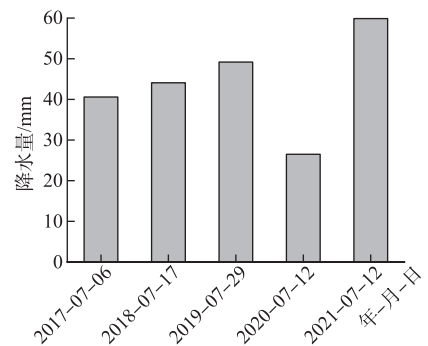


图1 保定市近5年7月最大日降水量
Fig.1 Maximum daily precipitation of Baoding City in July in recent 5 years

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀流域(38°10′~40°0′N, 113°40′~116°20′E)位于河北省中部,属于海河流域大清河水系,由143个淀泊和3700多条沟壕组成,以水体为主,水域间有苇田、台地、村庄,是华北平原最大的淡水湿地^[15,20,22],被誉为“华北明珠”(图2)。该地区为北温带半湿润大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,最低气温可达-26.7℃;夏季高温多雨,最高气温为40.7℃,年平均降水量为530 mm,且降水多集中在7—9月份。自1970年以来,入淀河流和淀区水质逐渐恶化,1980年后入淀水源主要来自于周围城市的污水,之后很长一段时间内,白洋淀水质长期处于恶化的阶段^[23-24]。雄安新区成立以后,各级政府通过外源污染管控、内源污染治理、生态补水等措施治理白洋淀水体,污染治理力度加大,白洋淀的水质状况明显好转^[23]。

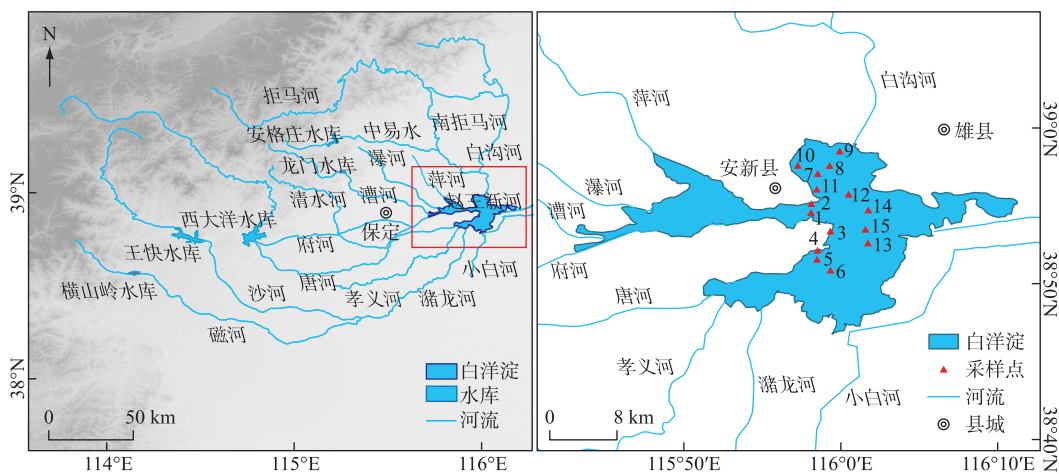


图2 白洋淀地理位置及采样点分布

Fig.2 Location and sampling sites distribution of Lake Baiyangdian

进入白洋淀的大部分河流为山前带河流,研究区地表经过冲刷、溶蚀和物理风化等作用形成了复杂的岩溶地貌^[25]。研究区内的基岩以碳酸盐岩为主,硅和镁的含量高,且受大气降雨补给^[16,26]。流域土地利用主要有林地、耕地、建设用地、草地和水域等类型,土地利用类型的变化受地形和人类活动的共同影响^[16,25,27]。

研究区在2021年受极端气候条件影响气候变化显著。2021年7月11日至13日,河北省自西南向东北出现大到暴雨、局部大暴雨的极端天气状况,单日降水量达到近5年最大值(图1),受持续强降雨影响,大清河、永定河等河系部分河流的水位明显上升。为应对极端气候,从7月11日开始,位于白洋淀上游的王快水库、安格庄水库以及白洋淀向下游河道泄水,最大泄水流量达到 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[28]。强降雨和泄洪对白洋淀水体的水化学和水质必然造成一定的影响。

1.2 样品采集及水质理化指标测定

强降雨过后,于2021年7月底选取了15个采样点对研究区进行了湖泊水样采集(图2)。采样点1~3和11~15位于白洋淀的中部,水生植物分布相对较少,水面面积大,水深较深,且靠近景区;采样点4~6位于白洋淀的南部,水生植物分布较多;其余采样点位于北部,靠近岸边,水生植物分布相对集中。每个采样点均分成表层、中层和底层分别进行采样。

采样过程中,现场共测定了8个水质参数,包括水温(WT)、pH值、溶解氧(DO)、电导率(EC)、总溶解性固体(TDS)、盐度(SAL)、叶绿素 a (Chl. a)、藻蓝蛋白(PC)。其中,WT、pH、EC、SAL和DO利用多参数水质监测仪 YSI Professional Plus (USA)测定,Chl. a 和PC浓度则使用多参数水质监测仪 YSI EXO2 (USA)测定。

湖水样品被收集在聚乙烯瓶中,聚乙烯瓶在收集水样前用原水冲洗3次。在实验室分析之前,水样保存

在4℃的冰箱里. 利用孔径为0.45 μm的滤膜对水样进行过滤后用于测定阳离子、阴离子、氨氮和硝态氮浓度及氢、氧同位素值($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$). 阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+})浓度采用电感耦合等离子体发光光谱仪(Perkin Elmer, USA)测定,阴离子(F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)浓度采用离子色谱法(Dionex ICS-3000, USA)测定;重碳酸根及碳酸根(HCO_3^- 和 CO_3^{2-})浓度则采用滴定法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度采用连续流动分析仪(SEAL Analytical, UK)测定, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的检出限分别为0.025和0.02 mg/L; $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 采用液态水稳定同位素分析仪(Los Gatos Research, USA)测定, $\delta^2\text{H}$ 的相对标准偏差 $<0.5\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 的相对标准偏差 $<0.1\%$. 未过滤的水样用过硫酸钾氧化法处理后,在连续流动分析仪(Bran+Luebbe AutoAnalyzer3, German)上测定总氮(TN)浓度,未过滤的水样采用过硫酸钾消解法处理后,利用化学分析仪(Alliance Smart Chem200, France)测定总磷(TP)浓度;TN和TP的检出限分别为0.05和0.01 mg/L. 水化学和同位素分析均在中国科学院地理科学与资源研究所理化中心进行.

1.3 数据处理及分析方法

本研究采用单因素方差分析比较各变量的空间差异,显著性水平为 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$. 在分析前,采用S-W法进行数据正态分布检验和方差齐性检验. 对于不满足正态分布的水质变量进行对数转换,转换后仅pH和Chl.a的分布基本符合正态分布,其他不满足正态分布的水质变量则采用非参数秩和检验Kruskal-Wallis法进行方差分析. 利用KMO统计量检验判断原有变量是否适合因子分析,KMO值越接近于1,表明白洋淀水质变量间的相关性越强,越适合作因子分析. 采用因子分析法判断水质的空间特征,计算各采样点的综合因子得分,从而判断各采样点之间的水质差异^[29].

采用Piper三线图及相关性分析判断白洋淀主淀区湖水水样的水化学类型并分析其水质特征. 同时,利用Gibbs图解法对其水化学成因进行定性分析,判断区域岩石风化、大气降水、蒸发结晶作用对湖泊水化学特征的影响,主要考虑的因子包括TDS、 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值,其中TDS的分界点为80和300 mg/L,离子比值分界点为0.5^[15-16,30-31].

以上数据分析及制图过程分别利用软件Microsoft Excel、SPSS 25、Origin 2017及ArcMap 10.8完成,空间插值采用反距离权重法.

2 结果与分析

2.1 白洋淀主淀区水体理化指标空间变化特征

对白洋淀主淀区各样点表层、中层和底层湖水水质分别进行分析,结果表明,白洋淀各样点湖水的理化指标、藻类指标和营养盐指标浓度存在空间差异(图3). 单因素方差分析表明,pH和Chl.a在不同采样点间的空间差异显著($P < 0.05$). 非参数检验结果表明,水温、TDS、EC、SAL、DO、PC、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN在各采样点间具有显著的空间差异($P < 0.05$),而DO和TP在各采样点间的空间差异不显著($P > 0.05$).

白洋淀主淀区湖水的水温平均值为 $(27.3 \pm 0.9)^\circ\text{C}$,其中采样点2、9和12处的水温相对较低,分别为26.4、25.9和26.4℃. 湖水的pH值平均为 7.4 ± 0.2 ,所有采样点的水体均呈弱碱性,符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中关于pH的规定,整体pH表征良好;而位于淀区南部的采样点5和6以及位于淀区北部的采样点7、8和10的pH值相对较高,最高达到7.9. 水体中DO平均浓度为 (3.4 ± 1.7) mg/L,大部分点位的DO浓度属于水质标准中的IV类和V类,位于淀区南部的采样点5和6的DO浓度相对较高,分别为5.5和4.8 mg/L. 水体中TDS、EC和SAL的平均值分别为 (386 ± 49) mg/L、 (622 ± 84) μS/cm和 $(0.28 \pm 0.04)\%$,位于淀区南部的采样点5、6和13以及位于淀区西北部的采样点10的TDS、EC和SAL都相对较高,最大值分别为436 mg/L、738 μS/cm和0.34%.

Chl.a和PC的平均浓度分别为 (57.5 ± 33.3) 和 (9.8 ± 13.0) μg/L. 位于淀区南部的采样点13、位于淀区中部的采样点1以及位于淀区西北部的采样点10的Chl.a浓度相对较高,最高可达165 μg/L. 位于淀区南部的采样点5和13以及位于淀区西北部的采样点10的PC浓度相对较高,最大值为75.4 μg/L. 白洋淀部分采样点的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度低于检测限,未检出. $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度分别为 (2.9 ± 1.3) 和 (0.13 ± 0.17) mg/L,其中淀区南部的采样点5、6和13,淀区中部的采样点1以及淀区西北部的采样点10的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度相对较低,最小值为0.75 mg/L,而采样点10和13的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度相对较高,最高可达0.83 mg/L.

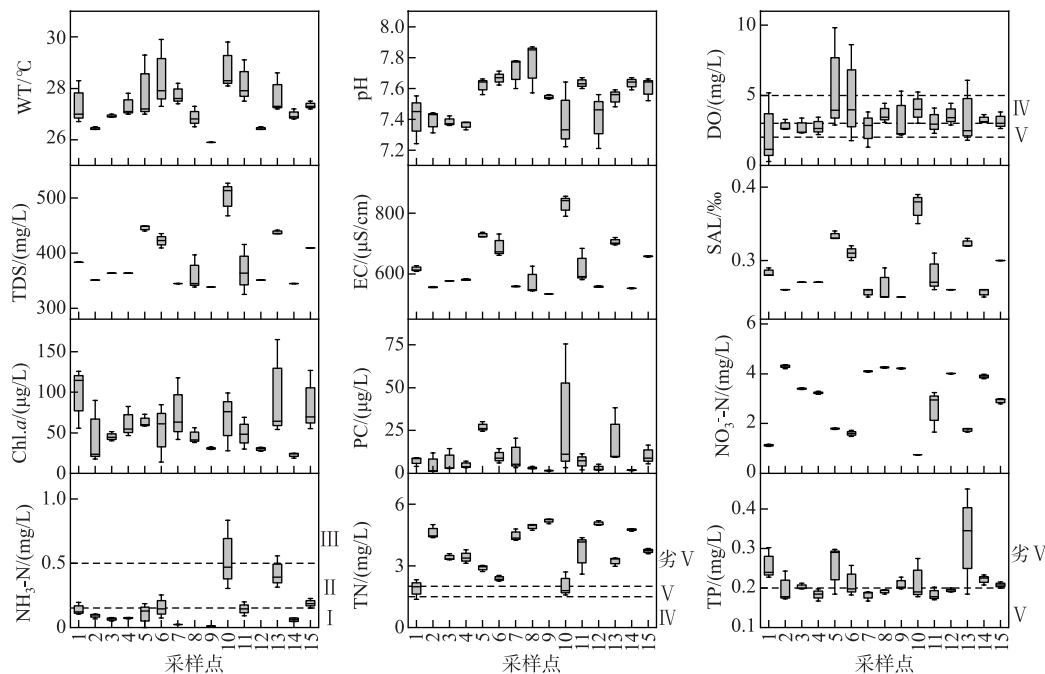


图3 白洋淀主淀区水体物理化学指标监测值

Fig.3 Values of physicochemical parameters in the main area of Lake Baiyangdian

所有点位的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均符合 III 类水质标准, 其中大部分点位的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度处于 I 类和 II 类地表水水质标准. TN 和 TP 的平均浓度分别为 (3.7 ± 1.1) 和 (0.22 ± 0.05) mg/L , 其中采样点 1 和 10 的 TN 浓度相对较低, 最小值为 1.37 mg/L , 采样点 13 的 TP 浓度 (0.45 mg/L) 显著高于其他点位. 大部分点位的 TN 浓度处于 V 类和劣 V 类的地表水水质标准, 所有点位的 TP 浓度均处于 V 类和劣 V 类的地表水水质标准.

2.2 白洋淀主淀区水化学特征

白洋淀主淀区湖水主要离子 Piper 三线图的结果表明(图 4), 其水化学类型主要为 $\text{Ca-HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型. 水体中的主要阳离子 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 K^+ 的平均浓度分别为 1.19 、 1.18 、 0.81 和 0.11 mmol/L , 平均浓度大小的趋势为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. 水体中主要阴离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的平均浓度分别为 3.39 、 2.96 、 0.93 和 0.08 mmol/L , 其平均浓度大小的趋势为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$.

在 Gibbs 图中(图 5), 若 TDS 浓度较高, 且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-) > 0.5$ 时, 水中的离子来源主要受蒸发结晶作用控制; 若 TDS 浓度中等, 且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-) < 0.5$ 时, 水中的离子来源主要受岩石风化控制; 若 TDS 浓度较低, 且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-) > 0.5$ 时, 水中的离子来源主要受大气降水控制. 白洋淀主淀区水体的 Gibbs 图结果表明(图 5), 采样点的值基本都落在 Gibbs 分布模型内, 湖水的 TDS 浓度为

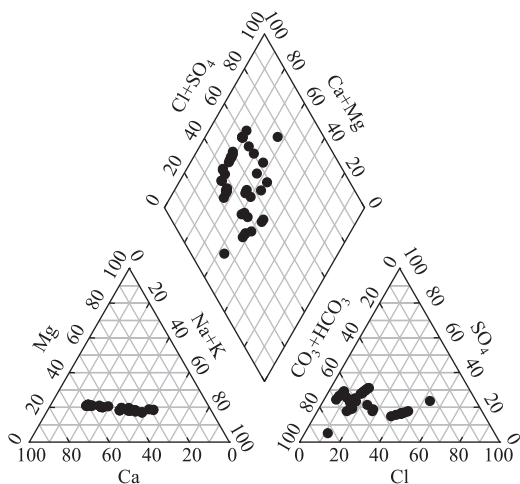


图4 白洋淀主淀区湖水主要离子 Piper 三线图

Fig.4 Piper diagram showing major ion composition of the main area of Lake Baiyangdian

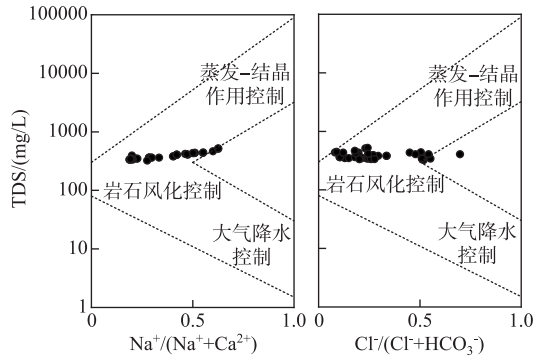


图5 白洋淀主淀区湖水 Gibbs 图

Fig.5 Gibbs diagram of lake water in the main area of Lake Baiyangdian

300~550 mg/L, 浓度中等偏高。Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺) 的变化范围为 0.18~0.63, 均值为 0.40, Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻) 的变化范围为 0.08~0.70, 均值为 0.29。当 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)>0.5 或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)>0.5 时, TDS 的浓度大于 300 mg/L 但小于 550 mg/L。也就是说, 在极端降水的条件下, 白洋淀主淀区水中的离子来源主要受岩石风化作用控制, 受到的蒸发结晶作用控制较弱, 且基本不受人类活动作用影响。

2.3 白洋淀主淀区水体氢、氧稳定同位素特征

白洋淀主淀区湖水的 δ²H 范围为 -60.86‰~-35.01‰, 平均值为 -54.91‰; δ¹⁸O 范围为 -8.84‰~-3.45‰, 平均值为 -7.61‰; 氘盈余 (D-excess) 的变化范围为 -7.76‰~10.11‰, 平均值为 5.96‰, 其中仅采样点 10 的 D-excess 值为负值, 其余采样点的 D-excess 值均大于 3‰ (图 6)。反距离空间插值结果表明, 白洋淀 δ²H 和 δ¹⁸O 都表现出西北部和南部富集, 而西部和东北部有河流补给的地区则较为贫化, 而 D-excess 低值则主要分布在西北部, 东北部和东部有河流补给的地区其 D-excess 值较高, D-excess 值的空间分布特征与 δ²H 和 δ¹⁸O 的空间分布特征基本相反。

根据测得的白洋淀氢、氧稳定同位素值, 得到了白洋淀主淀区湖水氢、氧同位素关系线方程: δ²H = 4.86δ¹⁸O - 17.90 (R² = 0.993, P < 0.01) (图 7)。将白洋淀水体同位素值与全球大气水线 (GMWL: δ²H = 8 δ¹⁸O + 10) 进行对比, 结果发现白洋淀主淀区湖水的同位素值大部分在全球大气水线的右下方, 并且采样点 9 和 12 水体的同位素值基本在 GMWL 上, 而采样点 10 的同位素值距离 GMWL 最远。与白洋淀流域大气水线 (LMWL: δ²H = 7.19δ¹⁸O - 0.74) 进行对比^[32], 结果表明除了采样点 10, 其余采样点的同位素

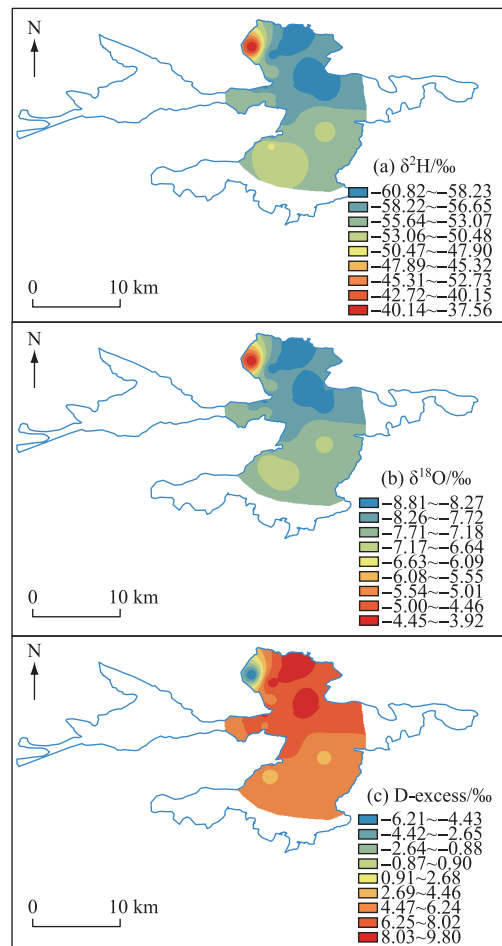


图6 白洋淀主淀区水体氢、氧同位素及氘盈余空间分布

Fig.6 Spatial distributions of δ²H, δ¹⁸O and D-excess in lake water of the main area of Lake Baiyangdian

值都比较靠近当地大气降水线,并且采样点 9 和 12 的同位素值基本也在 LMWL 上. 此外,白洋淀湖水氢、氧同位素关系线的斜率和截距均小于 GMWL 和 LMWL 的斜率和截距. 回归分析表明,白洋淀主淀区湖水中的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均与水深呈显著负相关 ($P < 0.05$),水深每增加 1 m, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别降低 6.62‰ 和 1.37‰ (图 8).

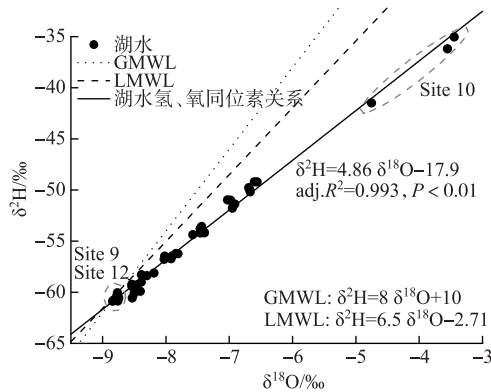


图 7 白洋淀主淀区水体氢、氧稳定同位素关系

Fig.7 The relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in lake water of the main area of Lake Baiyangdian

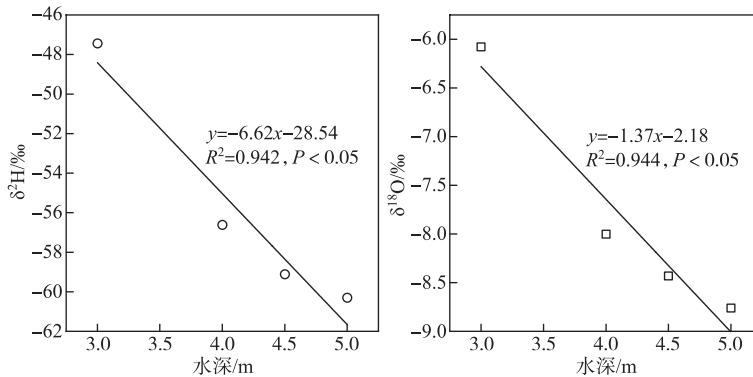


图 8 白洋淀主淀区湖水氢、氧稳定同位素与水深之间的线性回归关系
(图中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为同一水深处的平均值)

Fig.8 Linear regressions between stable isotope values of lake water $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ and water depth in the main area of Lake Baiyangdian ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ were mean values at the same water depth)

2.4 白洋淀主淀区整体水质空间差异特征

采用因子分析法对主淀区湖泊水质现状进行了综合评价. 共选择了 16 个指标进行分析,包括水温、DO、pH、EC、SAL、Chl.a、PC、 NO_3^- -N、 NH_3 -N、TN、TP、TDS、DOC、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 K^+ . 大部分指标之间存在显著的相关性 (表 1),且 KMO 值为 0.807,满足因子分析的要求,因此因子分析适用于判断白洋淀的水质状况. 根据特征值大于 1 的条件,共提取了 3 个共同因子 F1、F2 和 F3,反映了水质数据 80.3% 的信息.

F1 解释了总方差的 53.3%,F1 中水温、EC、SAL、PC、 NO_3^- -N、 NH_3 -N、TN、TDS、DOC、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 K^+ 所占的因子载荷较大,其中 NO_3^- -N 和 TN 与 F1 呈显著负相关,其余指标都与 F1 呈正相关. 大多数变量与 F1 呈显著相关,因此 F1 反映了白洋淀主淀区的整体化学特征. F2 解释了总方差的 16.5%,其中 Chl.a、PC 和 TP 的因子载荷较高且均与 F2 呈显著正相关,Chl.a、PC 和 TP 与水体的富营养化程度关系密切,因此 F2 表示主淀区湖水中的营养物质水平. F3 解释了总方差的 10.5%,其中水温、DO 和 pH 的因子载荷较高,且与 F3 呈

显著正相关,因此 F3 表示主淀区水质变化的物理条件. 因子得分反映了采样点的水质状况,因子得分越高则水质越差^[29]. 白洋淀主淀区水质因子得分反距离空间插值的结果表明(图 9),淀区整体上水质良好,湖泊东北部的综合因子得分相对较低,代表了较好的水质状态,而位于淀区南部和西北部的因子得分较高,污染较为严重.

3 讨论

3.1 极端降水对主淀区湖水水化学特征的影响

在极端降水条件下,白洋淀主淀区 pH 值平均为 7.4,EC 值范围为 533~857 $\mu\text{S}/\text{cm}$,TDS<500 mg/L. 而在以往年份的雨季,白洋淀的 pH 平均值均大于 8,EC 的平均值大于 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$,TDS 浓度的平均值大于 600 mg/L^[15, 33]. 对比结果表明(表 2),极端降水过后的 pH、EC 和 TDS 值显著低于以往年份雨季的 pH、EC 和 TDS 值. 极端降水期间,白洋淀主要接受大气降水的补给,极端降水使得湖泊水体的补给量在短时间内迅速增加,由于稀释作用导致 pH、EC 和 TDS 值降低.

极端降水对白洋淀水化学类型的影响较大. 极端降水后,白洋淀水化学类型主要为 $\text{Ca}-\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型,而以往雨季湖水的水化学类型为 $\text{Na} \cdot \text{Ca}-\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型^[16]. 极端降水后湖泊水体的主要阳离子、 HCO_3^- 和 NO_3^- 浓度显著低于以往雨季,而 Cl^- 和 SO_4^{2-} 则高于以往雨季. 此外,湖水主要阴离子和阳离子的浓度趋势也发生了变化,以往雨季白洋淀湖水的主要阳离子和阴离子浓度趋势分别为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ ^[16],此次极端降水后主要阳离子和阴离子的浓度趋势则分别变为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. 白洋淀湖水中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的溶解^[16],极端降水可能会使碳酸盐岩和硅酸盐岩的溶解速率加快,使得水体中的离子浓度发生改变,进而白洋淀的水化学特征有所转变. 白洋淀流域地表水中的化学组成同时受到岩石风化作用和蒸发结晶作用控制,且受到人类活动等因素的影响^[15-16, 25, 33]. 本研究的结果表明,在极端降水条件下,白洋淀湖水的水化学组成主要受岩石风化作用控制且基本不受人类活动等其他因素的影响. 因此认为,短期内极端降水减弱了蒸发结晶作用和人类活动等对白洋淀湖水水化学组成的影响.

3.2 极端降水对主淀区湖水氢、氧稳定同位素特征的影响

极端降水使得白洋淀湖水的氢、氧稳定同位素发生贫化. 极端降水条件下湖水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围分别为 $-60.86\text{‰} \sim -35.01\text{‰}$ 和 $-8.84\text{‰} \sim -3.45\text{‰}$,而以往雨季湖水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围分别约为 $-49\text{‰} \sim -18\text{‰}$ 和 $-5.8\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$ ^[34-35]. 白洋淀湖水中氢氧稳定同位素值与水深之间呈显著的负相关,且随

表 1 旋转因子载荷矩阵*

Tab.1 Matrix of rotated factor loadings

因子	F1	F2	F3
水温	0.656	-0.010	0.614
DO	0.313	-0.209	0.728
pH	-0.228	-0.035	0.767
EC	0.920	0.289	0.157
SAL	0.915	0.303	0.076
Chl.a	0.183	0.797	-0.029
PC	0.501	0.642	-0.103
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	-0.862	-0.345	-0.071
$\text{NH}_3 \text{-N}$	0.713	0.491	-0.258
TN	-0.798	-0.178	-0.091
TP	0.081	0.863	-0.124
TDS	0.909	0.309	0.078
DOC	0.907	0.080	-0.095
Mg^{2+}	0.909	0.231	0.054
K^+	0.854	-0.137	-0.009
Na^+	0.934	0.257	0.156
特征值	8.5	2.6	1.7
贡献率/%	53.3	16.5	10.5
累计贡献率/%	53.3	69.8	80.3

* 粗体代表较高的因子载荷,其绝对值大于 0.500.

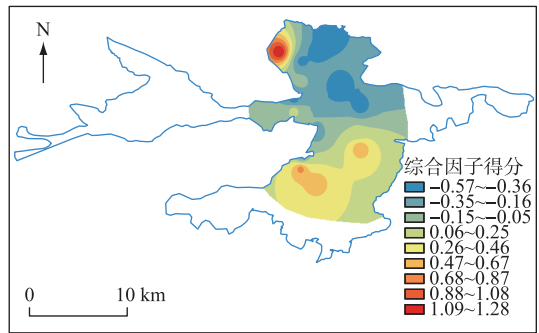


图 9 白洋淀主淀区综合因子得分的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of total factor scores of the main area of Lake Baiyangdian

表 2 以往年份雨季与本次极端降水后白洋淀主淀区物理化学指标对比

Tab.2 Comparison on physicochemical parameters of lake water during rainy season in the past years and this extreme precipitation in the main area of Lake Baiyangdian

指标	以往年份雨季	本次极端降水条件下
pH	8.0~8.8	7.2~7.6
EC/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1155~1192	538~706
TDS/(mg/L)	610~650	227~435
$\delta^2\text{H}$	-49‰~-18‰	-60.86‰~-35.01‰
$\delta^{18}\text{O}$	-5.8‰~-0.3‰	-8.84‰~-3.45‰

随着水深增加,氢、氧稳定同位素值显著降低(图8),这可能是由于极端降水事件导致白洋淀的水深突然增加,而使得湖水受到的蒸发分馏作用减弱引起的^[36-37]。在这种条件下,极端降水后湖水氢、氧同位素关系线的斜率明显小于以往雨季湖水氢、氧同位素关系线的斜率,而截距却大于以往年份雨季关系线的截距。因此认为,在极端降水条件下降水本身的氢、氧同位素特征对湖水氢、氧同位素关系的影响更为强烈。

从空间上来看,白洋淀雨季河流入淀口和补水口氢、氧稳定同位素值最低,而西北部和南部的氢、氧稳定同位素值呈富集趋势^[34]。在极端降水条件下,白洋淀的氢、氧稳定同位素同样也表现出西北部和南部富集的趋势,故极端降水对白洋淀氢、氧同位素的空间分布影响不大。

3.3 极端降水对主淀区湖水水质的影响

白洋淀水质因子分析的结果表明,Chl.a、PC和TP的因子载荷较高且都与F2呈显著正相关。这表明极端气候条件下,主淀区水体中的营养物质浓度仍较高。正常气候条件下,白洋淀 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的汛前平均浓度小于 $0.1\text{ mg}/\text{L}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和TP的汛前平均浓度分别为 1 和 $0.07\text{ mg}/\text{L}$ ^[33, 38];而在极端降水条件下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度则升高至 $0.13\text{ mg}/\text{L}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和TP平均浓度分别升高至 2.90 和 $0.22\text{ mg}/\text{L}$ 。研究发现 NH_4^+ 为北京地区大气降水中主要的阳离子($0.59\text{ mg}/\text{L}$)^[39],白洋淀地区大气降水与北京地区相似,因此白洋淀大气降水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 可能导致极端降水条件下主淀区湖水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高。同时,白洋淀湖水中的氮、磷营养物受周边陆域面源污染影响较大^[38],汛期降水的冲淋作用会增加面源污染扩散的速度,从而促使淀内湖水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP等营养盐浓度的升高^[38, 40-42],极端降水则加剧了这种增加趋势。此外,白洋淀沉积物中的内源氮、磷负荷较高^[43],降水量的增加会加快湖泊中沉积物的再悬浮作用,促进有机氮的转化作用、氨氮的硝化作用和磷的转化,并影响水体中的氮、磷浓度^[44]。另一方面,有研究表明pH值可以调节水中微生物对氮化合物的分解作用,影响水中的氮浓度,进而影响湖水富营养状况^[45]。数据表明极端降水促使白洋淀pH发生大幅度的变化,因此,这也可能间接导致了白洋淀湖水营养物质浓度的升高。

在空间上,极端气候条件下西南部和西北部的水质仍然比较差。白洋淀在没有接受外来补水时,淀区水动力条件差,西南部和西北部的水体几乎不流动,容易形成死水区而导致水质较差^[46],且极端降水后的湖泊水动力情况依旧没有明显变化,因此极端降水没有大幅度改善湖泊的水动力条件。湖泊东北部受上游水库防洪调蓄放水的影响,其水质较为良好。《2020年河北省生态环境状况公报》显示,安格庄水库的水质达到了II类水质标准且处于轻度营养或中营养状态^[47],水质状况显著好于白洋淀。因此,安格庄水库的来水补给是白洋淀东北部保持水质良好的重要原因。

4 结论

本研究分析了暴雨过后白洋淀的水化学特征、氢氧稳定同位素特征和水质空间差异特征,并揭示了极端气候条件对白洋淀水化学和水质的影响,主要结论如下:

1) 极端降水后白洋淀主淀区湖水水质呈弱碱性,水化学类型主要为 $\text{Ca-HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 型,其水化学组成主要受到岩石风化作用控制,受到的蒸发结晶作用影响较小且基本不受人类活动等其他因素的影响。极端降水是导致白洋淀主淀区pH、EC和TDS发生大幅度变化的主要原因之一,并且减弱了蒸发结晶作用和人类活动等对白洋淀主淀区湖水水化学组成的影响。

2) 极端降水后白洋淀主淀区水体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布表现出西北部和南部富集, 而西部和东北部较为贫化的特征。极端降水是导致水体氢、氧稳定同位素贫化的一个重要原因, 水体中氢、氧稳定同位素关系受降水本身氢、氧稳定同位素关系的影响更为强烈, 而受蒸发分馏作用影响较弱。极端降水对白洋淀主淀区氢、氧稳定同位素的空间分布影响不大。

3) 极端降水增加了面源污染扩散的速度, 导致水体中营养物质 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TP 浓度的升高, 白洋淀大气降水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 也可能导致极端降水条件下主淀区湖水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高, 而上游水库为了应对强降雨事件进行的调蓄放水使得白洋淀东北部水质有所改善。

5 参考文献

- [1] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22** (6): 799-810. DOI: 10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [2] Erwin KL. Wetlands and global climate change; The role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 2008, **17**(1): 71-84. DOI: 10.1007/s11273-008-9119-1.
- [3] Xia J, Cheng SB, Hao XP *et al.* Potential impacts and challenges of climate change on water quality and ecosystem; Case studies in representative rivers in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, **1**(1): 31-35.
- [4] Carpenter SR, Booth EG, Kucharik CJ *et al.* Extreme daily loads: Role in annual phosphorus input to a north temperate lake. *Aquatic Sciences*, 2015, **77**(1): 71-79. DOI: 10.1007/s00027-014-0364-5.
- [5] Motew M, Booth EG, Carpenter SR *et al.* The synergistic effect of manure supply and extreme precipitation on surface water quality. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**(4): 044016. DOI: 10.1088/1748-9326/aaade6.
- [6] Carpenter SR, Booth EG, Kucharik CJ. Extreme precipitation and phosphorus loads from two agricultural watersheds. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1221-1233. DOI: 10.1002/lno.10767.
- [7] Duan ZZ, Wang MJ, Gao W *et al.* Extreme precipitation and the responds of water quality in Lake Dianchi Basin between 1951-2017. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 615-622. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0354. [段仲昭, 王明净, 高伟等. 1951—2017年滇池流域极端降水变化及湖体水质响应. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 615-622.]
- [8] de Eyto E, Jennings E, Ryder E *et al.* Response of a humic lake ecosystem to an extreme precipitation event; Physical, chemical, and biological implications. *Inland Waters*, 2016, **6**(4): 483-498. DOI: 10.1080/IW-6.4.875.
- [9] Cheng GW, Du ZP, Yan CA *et al.* Impacts of water quality monitoring frequency and extreme climate on the estimation of nitrogen and phosphorus fluxes in river of Plateau Lake Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(11): 3982-3989. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0155. [程国微, 杜展鹏, 严长安等. 水质监测频率与极端气候对高原湖泊入湖河流氮磷通量估算的影响. 环境科学学报, 2020, **40**(11): 3982-3989.]
- [10] Moberg A, Jones PD. Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901-99. *International Journal of Climatology*, 2005, **25**(9): 1149-1171. DOI: 10.1002/joc.1163.
- [11] Morse NB, Wollheim WM. Climate variability masks the impacts of land use change on nutrient export in a suburbanizing watershed. *Biogeochemistry*, 2014, **121**(1): 45-59. DOI: 10.1007/s10533-014-9998-6.
- [12] Wang AH, Fu JJ. Changes in daily climate extremes of observed temperature and precipitation in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, **6**(5): 312-319. DOI: 10.3878/j.issn.1674-2834.12.0106.
- [13] Fossey M, Rousseau AN. Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach. *Journal of Environmental Management*, 2016, **184**(Pt 2): 327-339. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.09.043.
- [14] Xia XH, Wu Q, Mou XL. Advances in impacts of climate change on surface water quality. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(1): 124-133. [夏星辉, 吴琼, 牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展. 水科学进展, 2012, **23**(1): 124-133.]
- [15] Cui X, Zhang B, He MX *et al.* Impacts of ecological water replenishment on the hydrochemical characteristics of surface water and groundwater in Lake Baiyangdian Watershed. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1675-1686. DOI: 10.18307/2021.0606. [崔旭, 张兵, 何明霞等. 生态补水对白洋淀流域地表水和地下水水化学特征的影响. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1675-1686.]

- [16] Yuan XM, Liu Q, Ma XJ *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Lake Baiyangdian Basin. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(10): 1-6. DOI: 10.13205/j.hjgc.202010001. [袁晓敏, 刘强, 马晓婧等. 白洋淀流域地表水化学特征及控制因素. 环境工程, 2020, **38**(10): 1-6.]
- [17] Li R, Zhang F, Gao YX *et al.* Surface hydrochemistry characteristics and controlling factors in the Ebinur Lake region during dry and wet seasons. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(5): 1394-1403. [李瑞, 张飞, 高宇潇等. 艾比湖区域地表水化学特征干湿季变化及其控制因素. 冰川冻土, 2016, **38**(5): 1394-1403.]
- [18] Zhou JX, Ding YJ, Zeng GX *et al.* Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324. DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.09.011. [周嘉欣, 丁永建, 曾国雄等. 疏勒河上游地表水化学主离子特征及其控制因素. 环境科学, 2014, **35**(9): 3315-3324.]
- [19] Tang XW, Wu JK, Xue LY *et al.* Major ion chemistry of surface water in the Xilin River Basin and the possible controls. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 131-142. DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.01.065. [唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋等. 锡林河流域地表水化学主离子特征及控制因素. 环境科学, 2014, **35**(1): 131-142.]
- [20] Cheng L. Analysis of Baiyangdian water environment situation. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2016, (5): 50-52. [程磊. 白洋淀水环境现状分析. 水科学与工程, 2016, (5): 50-52.]
- [21] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2021 年 7 月全国自然灾害情况. 2021-12-09. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202108/t20210806_395377.shtml.
- [22] Li YH, Cui BS, Yang ZF. Effects of changes in hydrological characteristics on wetland ecology in Baiyangdian. *Journal of Natural Resources*, 2004, **19**(1): 62-68. [李英华, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响. 自然资源学报, 2004, **19**(1): 62-68.]
- [23] Xia J, Zhang YY. Water resource and pollution safeguard for Xiong'an new area construction and its sustainable development. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(11): 1199-1205. [夏军, 张永勇. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战. 中国科学院院刊, 2017, **32**(11): 1199-1205.]
- [24] Zhang T, Liu JL, Wang XM. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Lake Baiyangdian. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(2): 261-267. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2010.02.023. [张婷, 刘静玲, 王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析. 环境科学学报, 2010, **30**(2): 261-267.]
- [25] Yao P, Lu GP. Hydrochemical and isotopic characteristics of the Juma River and their implications. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(7): 1525-1536. [姚鹏, 卢国平. 拒马河的水化学、同位素特征及其指示意义. 环境化学, 2017, **36**(7): 1525-1536.]
- [26] Liu YY. Evolution analysis and health assessment of Baiyangdian wetland ecosystem [Dissertation]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019. [刘园园. 白洋淀湿地生态系统的演变分析及健康评价 [学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2019.]
- [27] Wen J, Huang DZ. Spatio-temporal variation rules of landscape structure and pattern and their relationship with topographic factors in Baiyangdian Basin. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2020, **43**(3): 86-95. [温静, 黄大庄. 白洋淀流域景观结构和格局时空变化规律及其与地形因子关系. 河北农业大学学报, 2020, **43**(3): 86-95.]
- [28] 水利部海河水利委员会. 河北省启动水旱灾害防御IV级应急响应. 2021-12-09. http://www.hwcc.gov.cn/wwgj/lysl/202107/t20210712_95134.html.
- [29] Bu HM, Liu WZ, Zhang QF. Application of multiple statistical analysis to spatial-temporal variations of water quality of the Jinshui River. *Resources Science*, 2009, **31**(3): 429-434. [卜红梅, 刘文治, 张全发. 多元统计方法在金水河水质时空变化分析中的应用. 资源科学, 2009, **31**(3): 429-434.]
- [30] Wang YP, Wang L, Xu CX *et al.* Hydro-geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, **29**(S1): 446-456. [王亚平, 王岚, 许春雪等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因. 地质通报, 2010, **29**(S1): 446-456.]
- [31] Luan FJ, Zhou JL, Jia RL *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(2): 380-389. [栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因. 环境化学, 2017, **36**(2): 380-389.]
- [32] Wang SQ, Tang CY, Song XF *et al.* The impacts of a linear wastewater reservoir on groundwater recharge and geochemical evolution in a semi-arid area of Lake Baiyangdian watershed, North China Plain. *Science of the Total Environment*, 2014, **482/483**: 325-335. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.130.

- [33] Kong XL, Wang SQ, Ding F *et al.* Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Lake Baiyangdian area based on hydrochemical and stable isotopes. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2624-2631. DOI: 10.13227/j.hjkk.201709149. [孔晓乐, 王仕琴, 丁飞等. 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. 环境科学, 2018, **39**(6): 2624-2631.]
- [34] Wang YS, Yin DC, Qi XF *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Lake Baiyangdian. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1920-1929. DOI: 10.13227/j.hjkk.202108202. [王雨山, 尹德超, 祁晓凡等. 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义. 环境科学, 2022, **43**(4): 1920-1929.]
- [35] He MX, Zhang B, Wang YD *et al.* Stable hydrogen and oxygen isotopic characteristics of surface water and underground water in Lake Baiyangdian. *Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition*, 2020, **40**(6): 62-67. [何明霞, 张兵, 王义东等. 白洋淀地表水和地下水的稳定氢氧同位素特征. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2020, **40**(6): 62-67.]
- [36] Pu JB, Li JH, Wu X *et al.* Hydrogen and oxygen isotope characteristics controlled by thermal stratification effect in a subtropical reservoir, SW China. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 561-568. [蒲俊兵, 李建鸿, 吴夏等. 热分层效应控制的水库水体氢氧同位素特征. 水科学进展, 2016, **27**(4): 561-568.]
- [37] Li WB, Liu ZJ, Yang X *et al.* Changes of stable oxygen and hydrogen isotopes in summer Dali-nor Lake in Inner Mongolia of Northern China. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 539-550. DOI: 10.18307/2019.0222. [李文宝, 刘志娇, 杨旭等. 内蒙古高原达里诺尔湖夏季水体稳定同位素变化特征. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 539-550.]
- [38] Zhang H, Liu MZ, Miao PP *et al.* Analysis of spatial characteristics and source of main pollutants in Baiyangdian before and after flood season. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, **27**(5): 28-31. [张浩, 刘明喆, 缪萍萍等. 汛期前后白洋淀主要污染物空间特征及来源分析. 水资源与水工程学报, 2016, **27**(5): 28-31.]
- [39] Liu J. Analysis of characteristics of atmospheric precipitation in Beijing urban area [Dissertation]. Jinan: University of Jinan, 2016. [刘进. 北京城区大气降水水质特征分析[学位论文]. 济南: 济南大学, 2016.]
- [40] Zhuang CW, Ouyang ZY, Xu WH *et al.* Impacts of human activities on the hydrology of Lake Baiyangdian, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(7): 1343-1350. DOI: 10.1007/s12665-010-0620-5.
- [41] Wang X, Wang Y, Liu LS *et al.* Phytoplankton and eutrophication degree assessment of Lake Baiyangdian wetland, China. *The Scientific World Journal*, 2013, **2013**: 436965. DOI: 10.1155/2013/436965.
- [42] Han Q, Tong RZ, Sun WC *et al.* Anthropogenic influences on the water quality of Lake Baiyangdian in North China over the last decade. *Science of the Total Environment*, 2020, **701**: 134929. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134929.
- [43] Du YH, Liu C, Chen KN *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1537-1551. DOI: 10.18307/2018.0606. [杜奕衡, 刘成, 陈开宁等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1537-1551.]
- [44] Schiedek D, Sundelin B, Readman JW *et al.* Interactions between climate change and contaminants. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **54**(12): 1845-1856. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.09.020.
- [45] Zhang MK, He ZL, Calvert DV *et al.* Spatial and temporal variations of water quality in drainage ditches within vegetable farms and Citrus groves. *Agricultural Water Management*, 2004, **65**(1): 39-57. DOI: 10.1016/j.agwat.2003.07.005.
- [46] Zeng QH, Hu P, Zhao CP *et al.* Influence of multi-water resource replenishment on the hydrodynamic behavior of Baiyangdian wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(20): 7153-7164. [曾庆慧, 胡鹏, 赵翠平等. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响. 生态学报, 2020, **40**(20): 7153-7164.]
- [47] Li LF. Analysis on hydrological characteristics of An'gezhuang Reservoir basin. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2013, **3**(S1): 22-23, 41. [李丽芳. 安格庄水库流域水文特性分析. 农业灾害研究, 2013, **3**(S1): 22-23, 41.]