

潘家口水库温室气体溶存、排放特征及影响因素

杨凡艳^{1,2},张松林^{1*},王少明³,胡晓康^{2,4},王洪伟²,汤梦瑶²,张敏²,钟继承^{2**} (1.西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所,湖泊与环境国家重点实验室,江苏 南京 210008; 3.水利部海河水利委员会引滦工程管理局,河北 迁西 064309; 4.安徽师范大学环境科学与工程学院,安徽 芜湖 241000)

摘要:以大型深水水电类水库潘家口水库为例,于2020年春季(5月)、夏季(8月)在研究区设置33个采样点,采用顶空平衡—气相色谱法和经验模型法对水柱温室气体浓度和水—气界面扩散通量进行了观测及估算,并分析了潘家口水库温室气体浓度及通量的主要影响因素。结果表明:春季潘家口水库水—气界面CH₄、CO₂、N₂O平均通量分别为(1.11±1.60)μmol/(m²·h),(1333.31±546.43) μmol/(m²·h),(76.65±19.54)nmol/(m²·h)。夏季潘家口水库水—气界面CH₄、CO₂、N₂O平均通量分别为(0.62±1.13) μmol/(m²·h),(746.08±1152.44)μmol/(m²·h),(141.18±256.02)nmol/(m²·h)。潘家口水库温室气体排放呈现出大的时空异质性,空间上春季和夏季各温室气体通量均表现为干流大于支流;季节上CH₄与CO₂扩散通量表现为春季大于夏季,而N₂O扩散通量夏季大于春季。统计分析表明CH₄扩散通量主要受电导率、风速等环境因子影响,CO₂扩散通量受风速、pH及DOC影响,N₂O扩散通量主要受水柱NO₃⁻-N、NO₂⁻-N的影响。

关键词:水库; 温室气体; 水—气界面; 扩散通量; 影响因子

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)11-5303-11

Dissolution and emission patterns and influencing factors of greenhouse gases in Panjiakou Reservoir. YANG Fan-yan^{1,2}, ZHANG Song-lin^{1*}, WANG Shao-ming³, HU Xiao-kang^{2,4}, WANG Hong-wei², TANG Meng-yao², ZHANG Min², ZHONG Ji-cheng^{2**} (1.College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Bureau of Luanhe Diversion Project, Haihe Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Qianxi 064309, China; 4.School of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China). *China Environmental Science*, 2021,41(11): 5303~5313

Abstract: Hydropower reservoirs are important natural source of greenhouse gas emissions. Therefore, taking Panjiakou Reservoir, a large hydroelectric reservoir with deep water as an example, 33 sampling stations were set up in Panjiakou Reservoir in spring (may) and summer (August) of 2020. Headspace equilibrium gas chromatography and empirical model methods were used to measure the greenhouse gas concentrations in surface water and estimate the diffusive fluxes at the water-air interface, and the main influencing factors of greenhouse gas concentrations and fluxes in Panjiakou Reservoir were also analyzed. The results show that the average fluxes of CH₄, CO₂ and N₂O at the water-air interface of Panjiakou Reservoir in spring were (1.11±1.60)μmol/(m²·h), (1333.31±546.43) μmol/(m²·h), (76.65±19.54) nmol/(m²·h), respectively. In summer, the average fluxes of CH₄, CO₂ and N₂O at the water-air interface of Panjiakou Reservoir were (0.62±1.13) μmol/(m²·h), (746.08±1152.44)μmol/(m²·h), (141.18±256.02) nmol/(m²·h), respectively. The greenhouse gas emissions of Panjiakou Reservoir showed large spatio-temporal heterogeneity, the greenhouse gas fluxes of the main body were larger than those of the tributaries in spring and summer; the diffusion fluxes of CH₄ and CO₂ in spring were larger than those in summer, and the diffusion fluxes of N₂O in summer are larger than those in spring. The results of statistical analysis shows that methane diffusion fluxes were mainly affected by environmental factors such as conductivity and wind speed, CO₂ diffusion fluxes were affected by wind speed, pH and DOC, and N₂O diffusion fluxes were mainly affected by NO₃⁻-N、NO₂⁻-N in water column.

Key words: reservoir; greenhouse gases; water-gas interface; diffusion flux; impact factor

自工业时代开始以来,大气温室气体浓度不断上升,对气候变化产生巨大影响,引起人们对温室气体“源/汇”的广泛关注。大气中最主要的三种温室气体分别为CO₂、CH₄和N₂O,这三种温室气体增温效应分别占温室气体对全球变暖总贡献率的63%、

15%和4%^[1]。大气中CO₂的数量占据绝对优势,是最

收稿日期: 2021-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371457;41771122);水利部海河水利委员会引滦工程管理局潘家口水库内源污染专项

* 责任作者,副研究员, jczhong@niglas.ac.cn; **教授, zhongsonglin65@nwnu.edu.cn

主要的温室气体。虽然 CH_4 和 N_2O 在大气中的浓度远小于 CO_2 ,但在 100a 尺度下,它们的全球增温潜势分别是 CO_2 的 28 倍和 265 倍(IPCC,2013)。目前,存在于大气中的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 平均浓度正分别以每年 0.5%、0.8% 和 0.3% 的速度高速增长^[2]。由于温室气体不断增加带来的温室效应已成为当今主要的全球性环境问题之一,全球变暖问题已成为人类发展面临的严峻挑战。

近年来研究发现水生生态系统尤其是淡水湖泊和水库是温室气体 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的重要来源^[3-4]。有研究指出,水库排放的温室气体对全球的增温潜力占全球温室气体排放的 1%~28%^[5],也有研究表明水库所释放温室气体的全球变暖潜能值相当于人类活动总释放量的 7%^[6]。目前,国内外对温室气体溶存浓度的研究主要集中于富营养化的城市湖泊、河流系统等。Chanudet 等^[7]发现位于亚热带气候区的越南 Nam Ngum 典型水库与世界其他水库特点具有较大差异, CH_4 表现为吸收状态。龚琬晴等^[8]采用顶空平衡法对北方典型富营养化水库—大黑汀水库进行研究发现甲烷浓度与通量夏季均小于秋季,而氧化亚氮夏季大于秋季,各温室气体均表现为过饱和。水库承接大量的陆源物质输入,其稳定的水文条件对于水体温室气体产生有重要的影响,其排放强度也与水库的地理位置、气候条件、淹没的土壤与植被类型等因素有关^[9]。Juutinen 等^[10]认为水体富营养化会导致生物量的增加,而且对微生物过程也有显著影响,从而对温室气体产生造成影响^[11];赵小杰等^[12]研究发现,pH 值通过影响沉积物和上覆水中有机质的矿化分解和水生植物、微生物的代谢过程,从而间接影响水生生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放通量;Enquist 等^[13]的研究指出,温室气体的排放也与温度的昼夜变化和季节变化有关^[14];此外秦宇等^[15]的研究中指出水库温室气体排放强度与水库库龄等因素也有关。由此可见,影响水库温室气体排放影响因素较多且过程复杂。尽管国内外学者针对水库温室气体溶存及排放已开展较多的研究,但大多数研究集中于热带和亚热带水库,对于温带气候区的研究相对缺乏,另外现阶段对于深水水库温室气体排放及主要影响因素的研究报道仍然较少。

潘家口水库位于唐山市迁西县与承德市宽城

县的交界处($40^{\circ}22' \sim 40^{\circ}35'\text{N}, 118^{\circ}13' \sim 118^{\circ}25'\text{E}$),建成于 1979 年,是跨流域调水引滦入津工程的源头。大坝以上控制流域面积 33700km^2 ,占滦河流域总面积的 75%,多年平均径流量 24.5 亿 m^3 ^[16]。1990s 以来受上游来水污染负荷增加以及库区大面积网箱养殖的影响,水库氮磷负荷快速增加,水体处于富营养化状态^[17],主要超标指标为总磷与总氮^[18]。这一方面与水库来水水质常年为劣 V 类,另一方面与早期水库网箱养鱼无序发展、饵料大量施用加重库底沉积物污染有关,对于水体温室气体的产生和排放有着更显著的影响。本研究以我国温带气候区典型深水水电水库潘家口水库为研究对象,利用顶空平衡-气相色谱法和经验模型法,对其水体中温室气体溶存浓度,饱和度及扩散通量进行研究,比较和分析了水体温室气体溶存浓度和水-气界面通量的时空差异及主要影响因素。研究结果能够为区域和全球的水库温室气体排放通量估算提供数据支持,另外也对我国水电水库的温室气体减排提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置与样品采集

在潘家口水库布设采样点 33 个(图 1),其中 22 个位于水库滦河干流,11 个位于入库支流。样品分别于 2020 年 5 月(春季)、8 月(夏季)在潘家口水库采集。考虑到温室气体的排放存在日变化,为了尽量避免采样过程对温室气体时空变化带来的影响,每次采样均按采样编号顺序进行采集,样品采集时间设定在 10:00 到 15:00,采样天气均为风浪较小的晴天。在每一个采样点用采水器采集表层水样(水面以下 0.5m),采用虹吸法注入预先加入 0.2mL 饱和 HgCl_2 溶液的 20mL 血清瓶中,饱和 HgCl_2 用来抑制微生物活性,溢流以排出血清瓶中的空气,拧紧瓶塞密封确保没有气泡,低温避光保存,每个样点重复采集 3 次作为平行样。同时用采水器采集表层水样 1L,装入样品瓶中,冷藏运回实验室用于水体理化性质的测定。在每一个采样点,用多参数水质仪(YSI,美国)测定表层水体温度(WT)、 Eh 、溶解氧(DO)等指标,用深度计测定每个采样点水深,并用 20mL 血清瓶采集水库水面以上空气样品,用于测定采样点大气中温室气体浓度背景值。同时用手持气象站(Kestrel5500,美国)

测定风速及气温等指标。

1.2 样品分析方法

表层水样溶存温室气体浓度采用顶空-气相色谱法进行测定,样品带回实验室后用 10mLN₂(纯度 99.999%)置换出上述血清瓶中等体积的水,室温下

剧烈震荡 1min,所有血清瓶均倒置静置隔夜,使待测气体在液相和气相中均达到平衡后,用配有三通阀的注射器抽取≥5mL 顶空气体注入气相色谱仪(Agilent 7890B,美国)进行分析。在分析过程中随机插入标准气体样品进行分析过程的质量控制。

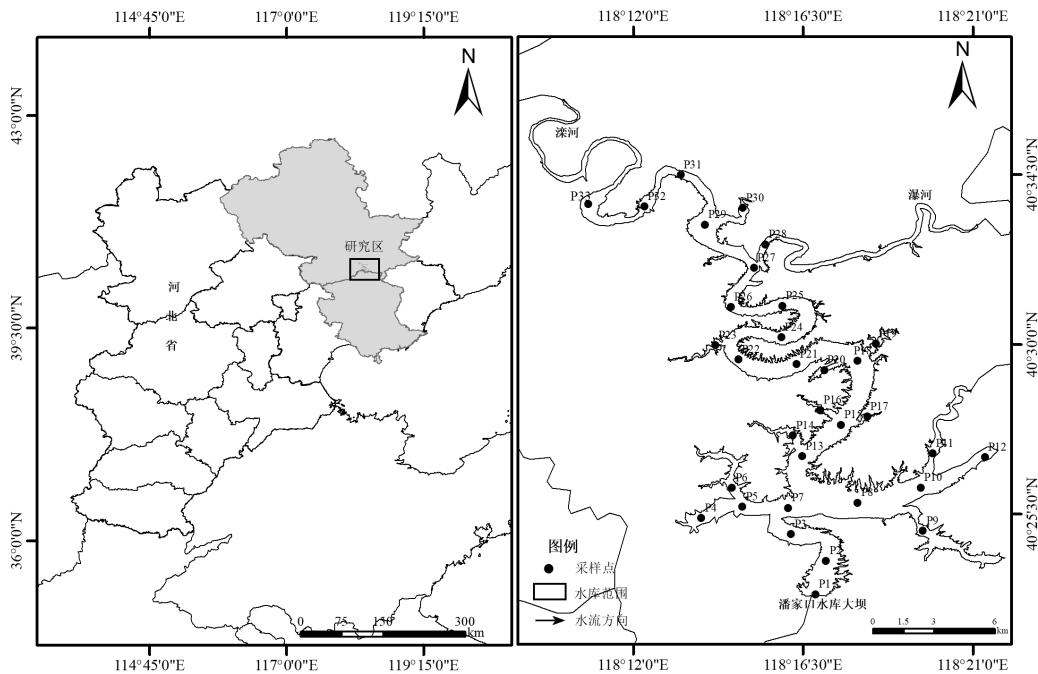


图 1 潘家口水库采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Panjiakou Reservoir

水样总氮(TN)和总磷(TP)采用碱性过硫酸钾氧化,使用紫外可见光分光光度计(SHIMADZU,UV-2700,日本)测定。水样溶解性无机氮的测定用 0.45μm 滤膜(Whatman GF/F)过滤后,硝酸盐氮(NO₃⁻-N)用紫外分光光度法测定,亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法,水样溶解性活性磷(SRP)测定采用比色法,氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法,水样高锰酸盐指数浓度(COD_{Mn})采用酸性法,叶绿素 a(Chl-a)浓度的测定采用 90%丙酮提取分光光度法测定。所有分析方法参考《水和废水监测分析方法》(第四版)^[19]。

1.3 水样温室气体浓度与水-气界面通量计算

1.3.1 原位水样中温室气体浓度计算 采样瓶经顶空平衡后顶空气体浓度根据道尔顿分压定律计算得到。瓶内水体溶存气体的浓度根据文献[20-21]提供的溶解度公式计算。根据质量平衡原理,原位水样中温室气体质量包括平衡瓶中水样溶存的及顶空内的气体质量,换算为原位水样溶存浓度。温室气体饱和度为原

位水样中溶存浓度与经过原位温度校正的水-气平衡状态时水中温室气体的平衡浓度的比值。

1.3.2 水-气界面温室气体通量计算

$$F=K\times\Delta C \quad (9)$$

$$K=0.251U^2(S_c/600)^{-0.5} \quad (10)$$

$$\Delta C=C-C_s \quad (11)$$

$$S_c=A+Bt+Ct^2+Dt^3+Et^4 \quad (12)$$

式中: F 为水-气界面温室气体的扩散通量,μmol/(m²·h); K 为温室气体迁移系数,cm/h; U 为风速,现场用手持风速仪获得,m/s; S_c 是施密特常数; C 为原位水样温室气体实际浓度,μmol/L; C_s 为水气平衡状态时水中温室气体的平衡浓度,μmol/L; t 为实测水温,℃; A 、 B 、 C 、 D 、 E 为常数,其值详见文献[22]。

1.4 数据分析与处理

本文首先对各温室气体通量、浓度及环境变量进行正态性检验,结果表明大部分变量不服从正态分布,因而采用 Kruskal-Wallis 方差分析进行差异性检验。采用 origin2018 进行 Spearman 相关性分析,采

用 SPSS25 进行逐步回归分析并找出温室气体的关键影响因子,采用 ArcGIS10.3 克里金插值法进行空间分析.

2 结果分析

2.1 表层水样理化性质

表 1 列出了主要环境因子的平均值,可以看出

Eh 、 NO_3^- -N 和 TN、 COD_{Mn} 、Chl-a 具有显著的季节差异,水温平均值从春季的 19.64°C 上升到夏季的 26.54°C ,季节变化较大.春季水体 DO、 COD_{Mn} 、 NO_3^- -N 浓度显著高于夏季($P<0.05$),而水体磷负荷及 TN 浓度夏季显著高于春季($P<0.05$).Chl-a 与 DOC 时空差异显著($P<0.05$),其中 Chl-a 夏季显著高于春季,DOC 春季显著高于夏季.

表 1 潘家口水库表层水样理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of surface water in Panjiakou Reservoir

指标	春季	干流	支流	夏季	干流	支流
WT(°C)	19.64 ± 0.87	19.60 ± 0.92	19.74 ± 0.74	26.54 ± 1.08	26.40 ± 1.22	26.83 ± 0.62
DO(mg/L)	10.96 ± 1.54	11.08 ± 1.84	10.72 ± 0.53	9.84 ± 1.24	10.05 ± 1.24	9.42 ± 1.14
Eh	58.95 ± 17.16	60.44 ± 17.40	55.98 ± 16.26	48.64 ± 13.71	46.78 ± 13.38	52.35 ± 13.63
pH 值	8.66 ± 0.06	8.65 ± 0.07	8.67 ± 0.03	8.72 ± 0.21	8.72 ± 0.23	8.71 ± 0.18
电导率(μS/cm)	536.32 ± 30.83	539.43 ± 35.28	530.09 ± 17.42	535.53 ± 24.77	533.44 ± 23.05	539.71 ± 27.41
水深(m)	28.56 ± 16.21	31.48 ± 17.53	22.72 ± 11.10	25.64 ± 15.42	28.60 ± 17.05	19.71 ± 8.89
NH_4^+ -N(mg/L)	0.13 ± 0.05	0.12 ± 0.05	0.13 ± 0.05	0.15 ± 0.05	0.16 ± 0.06	0.13 ± 0.05
NO_3^- -N(mg/L)	3.31 ± 0.23	3.36 ± 0.23	3.20 ± 0.18	2.60 ± 0.48	2.66 ± 0.57	2.48 ± 0.19
NO_2^- -N(mg/L)	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.10 ± 0.03	0.10 ± 0.04	0.10 ± 0.03
TN(mg/L)	4.20 ± 0.33	4.31 ± 0.32	4.02 ± 0.16	5.34 ± 1.23	5.51 ± 1.46	5.02 ± 0.39
TP(mg/L)	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.00	0.05 ± 0.04	0.06 ± 0.05	0.04 ± 0.01
SRP(mg/L)	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.01 ± 0.01
COD_{Mn} (mg/L)	1.68 ± 0.26	1.72 ± 0.27	1.58 ± 0.23	1.38 ± 0.94	1.54 ± 0.31	1.29 ± 0.19
DOC(mg/L)	6.79 ± 4.74	6.78 ± 4.81	6.80 ± 4.59	4.79 ± 2.16	4.49 ± 1.23	5.38 ± 3.24
Chl-a(μg/L)	0.21 ± 0.68	0.32 ± 0.82	0.01 ± 0.02	3.96 ± 6.54	3.58 ± 4.12	4.72 ± 9.47

2.2 表层水样温室气体浓度和饱和度

潘家口水库春季表层水样 CH_4 平均浓度为 $(0.146 \pm 0.19)\mu\text{mol/L}$, 饱和度范围为 $(1534.71 \sim 36963.37)\%$, 干流和支流平均浓度依次为 $(0.17 \pm 0.23), (0.11 \pm 0.09)\mu\text{mol/L}$, 空间差异较为明显, 表现为干流显著高于支流(图 2a); 夏季 CH_4 平均浓度 $(0.152 \pm 0.12)\mu\text{mol/L}$, 饱和度变化范围为 $(1607.97 \sim 17428.83)\%$, 干流和支流平均浓度依次为 $(0.16 \pm 0.14), (0.13 \pm 0.03)\mu\text{mol/L}$, 空间变化较春季小, 整体上也表现为干流大于支流; 季节上夏季 CH_4 浓度高于春季. 春夏季水—气界面溶存 CH_4 处于过饱和状态(图 2b).

春季表层水样溶存 CO_2 平均浓度 $(195.07 \pm 64.01)\mu\text{mol/L}$, 各点位之间溶存 CO_2 浓度差异较大, 饱和度范围 $(176.30 \sim 2536.43)\%$, 干流和支流 CO_2 平均浓度依次为 $(202.01 \pm 68.29), (181.19 \pm 58.40)\mu\text{mol/L}$; 夏季溶存 CO_2 浓度 $(187.52 \pm 61.09)\mu\text{mol/L}$, 饱和度变化范围 $(315.42\% \sim 1733.23)\%$, 干流和支流 CO_2 平均浓度依次为 $(184.46 \pm 63.64), (193.63 \pm 61.21)\mu\text{mol/L}$; 总体

而言空间上春季水库溶存 CO_2 浓度干流略大于支流, 而夏季则表现为支流大于干流的特征(图 2c); 季节上春夏季溶存 CO_2 浓度差异不明显. 春夏季水—气界面溶存 CO_2 均处于极高的过饱和状态(图 2d).

春季水—气界面溶存 N_2O 平均浓度 $(18.25 \pm 1.76)\text{nmol/L}$, 水—气界面 N_2O 饱和度 $(192.77 \sim 343.91)\%$, 干流和支流溶存 N_2O 平均浓度依次为 $(18.49 \pm 1.99), (17.78 \pm 1.24)\text{nmol/L}$, 春季水库溶存 N_2O 浓度空间差异较小各区域差异不明显; 夏季溶存 N_2O 平均浓度 $(36.04 \pm 17.35)\text{nmol/L}$, 饱和度范围 $(175.27\% \sim 945.60)\%$, 干流和支流溶存 N_2O 平均浓度依次为 $(33.22 \pm 16.21), (41.67 \pm 19.75)\text{nmol/L}$, 夏季溶存 N_2O 浓度空间差异较显著, 整体呈现干流显著小于支流(图 2e); 季节上春夏季溶存 N_2O 浓度差异性显著, 具体表现为春季小于夏季(图 2f). 各点位 N_2O 溶存浓度均为过饱和状态, 均表现为大气 N_2O 的源.

2.3 水—气界面温室气体通量

潘家口水库春季 CH_4 平均通量为 $(1.11 \pm 1.60)\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 干流和支流 CH_4 通量依次为 $(1.26 \pm$

1.91)、 (0.80 ± 0.79) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 春季 CH_4 通量干流显著大于支流(图 3a); 夏季 CH_4 平均通量为 (0.62 ± 1.13) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 干流和支流 CH_4 通量依次为

$(0.79\pm1.37),(0.29\pm0.37)$ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 空间上具体表现为干流略大于支流(图 3d); 季节上表现为春季大于夏季.

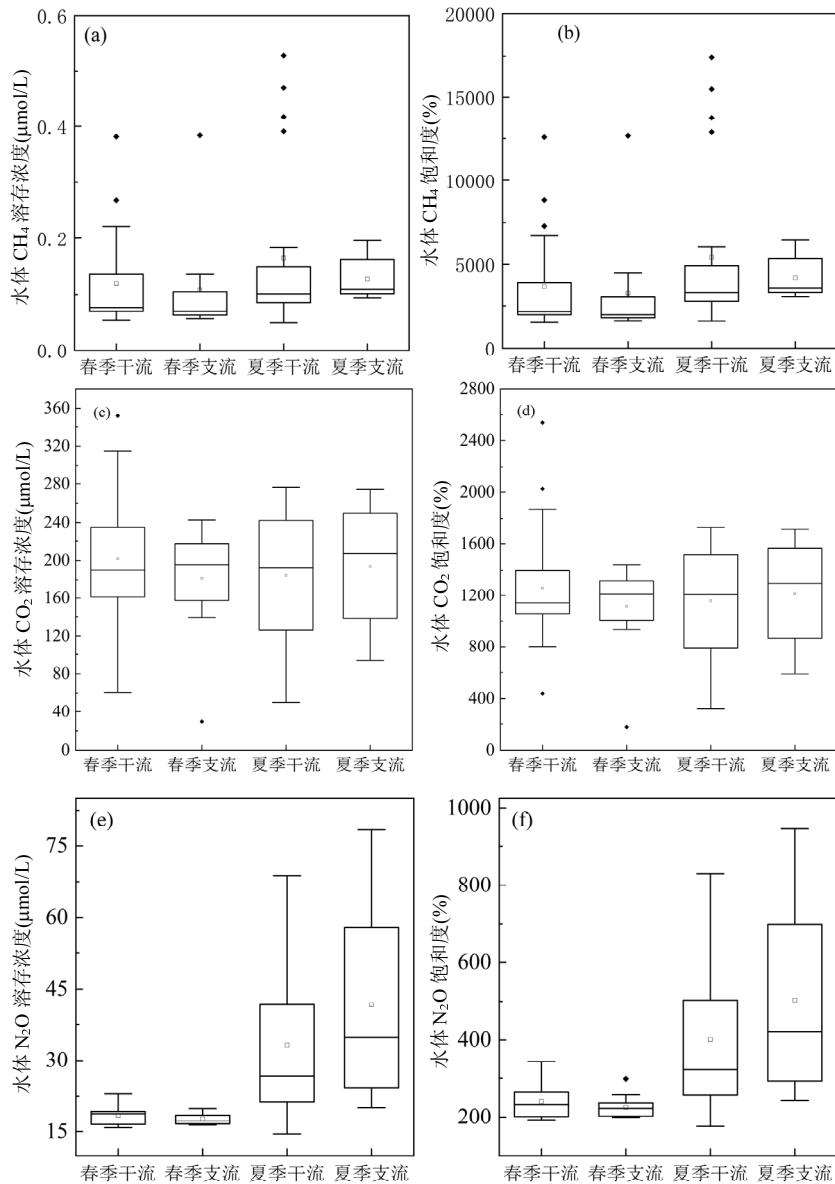


图 2 潘家口水库表层水样温室气体浓度及饱和度

Fig.2 Greenhouse gas Concentration and saturation of surface water in Panjiakou Reservoir

春季 CO_2 平均通量为 (1333.31 ± 546.43) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 干流和支流 CO_2 排放通量依次为 $(1376.19\pm594.46),(1247.55\pm480.71)\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 总体空间分布特征干流大于支流, 但空间变化差异并不显著(图 3b); 夏季 CO_2 平均通量分别为 (746.08 ± 1152.44) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 干流和支流 CO_2 排放通量依次为 $(866.70\pm1352.43),(504.85\pm667.61)\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 总体空间变化差异较为显著, 表现为干流显著大于支流

(图 3e); 在季节变化特征上春季 CO_2 排放通量显著高于夏季.

春季 N_2O 平均通量为 (76.65 ± 19.54) $\text{nmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 干流和支流 N_2O 排放通量依次为 $(78.54\pm22.50),(72.87\pm13.16)\text{nmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 总体空间差异较小(图 3c); 夏季 N_2O 平均通量分别为 $(141.18\pm256.02)\text{nmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 干流和支流 N_2O 排放通量依次为 $(157.92\pm302.30),(107.70\pm150.16)\text{nmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 空间上夏季

N_2O 排放通量干流显著大于支流(图3f);季节上表现

为春季显著小于夏季.

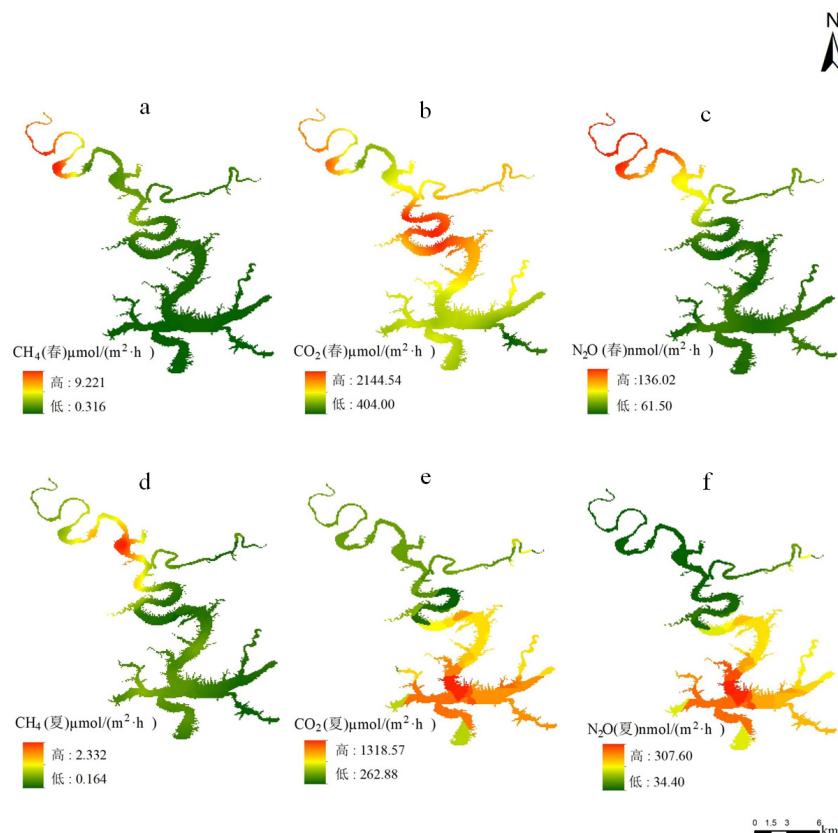


图3 潘家口水库温室气体扩散通量的时空变化特征

Fig.3 Temporal and spatial variation of greenhouse gas diffusive fluxes in Panjiakou Reservoir

3 讨论

3.1 潘家口水库温室气体浓度和通量的时空差异

3.1.1 潘家口水库温室气体浓度与通量空间特征 水库 CH_4 是在水库深水厌氧沉积物中产甲烷菌类分解有机质产生的,水库 CH_4 的产生也与水体营养化程度密切相关.本研究中,春夏季干流和支流 CH_4 浓度和通量具有显著性差异,总体而言水库 CH_4 是大气 CH_4 的“源”.相关性分析结果表明,春季支流水温与 CH_4 浓度和通量呈正相关关系,而与水深呈负相关关系.这是因为支流水深较浅水体温度较高(表1),较高的水温刺激产甲烷菌的活性^[23],而深水区产生的 CH_4 在上升的过程中会被氧化,另外由于深水区水压的作用 CH_4 也不容易释放到水柱;夏季干流 CH_4 浓度与SRP、 COD_{Mn} 呈显著正相关关系($P<0.05$),与水深呈显著负相关关系($P<0.05$),水体中较高的 COD_{Mn} 往往预示着有机质含量较高^[24],加之较高的SRP通过影响初级生产力对 CH_4 浓度产生

影响.

人类活动向水库等内陆生态系统中输入大量的营养盐以及有机质等,这些过量的外源负荷一方面在水体中分解释放出大量的 CO_2 ^[25];另一方面造成水体富营养化及其初级生产力增加,光合作用增强,增加 CO_2 吸收量,从而降低 CO_2 浓度^[26].本研究发现,潘家口水库春季干流 CO_2 通量和浓度与pH值呈显著负相关关系($P<0.05$),由于春季pH值较高(表1), CO_2 在水中易形成碳酸盐,降低 CO_2 分压,从而减少 CO_2 排放通量.夏季支流 CO_2 浓度与氮等营养盐呈显著正相关($P<0.05$).由于水库承接大量的外源输入,使得水体中营养盐负荷过高,营养盐是浮游植物主要的营养源,浮游植物的光合作用和呼吸作用对 CO_2 交换产生影响.

N_2O 的产生主要是经含氮化合物的微生物转化,通过好氧的硝化作用^[27]、厌氧的反硝化作用和硝化细菌的反硝化产生^[28]. N_2O 作为硝化和反硝化过程的中间产物,其产生取决于水体N的转化速率及环

境条件^[29],因此,N₂O 的扩散通量与氮负荷关系密切^[30].本研究中,春季干流 N₂O 通量与浓度与 TN 呈显著正相关关系($P<0.05$).春季干流 TN 含量较高(表 1),一般认为 N 输入会直接增加 N₂O 产率,N₂O/N₂ 比值随 TN 增加而增加^[31].夏季干流和支流 N₂O 通量与浓度与 DO 呈显著负相关关系($P<0.05$),与 NO₂⁻-N 呈正相关关系,这主要是因为夏季水体中 DO 含量较低(表 1),在硝化作用过程中,低 DO 使 N₂O 产生量增加^[32];同时较高浓度的 NO₂⁻-N 会促进 N₂O 的产生,原因是 NO₂⁻-N 对 N₂O 还原酶有较强的抑制作用^[33].这也与袁淑方等^[34]在对于太湖流域源头溪流 N₂O 的研究结果具有一致性.

3.1.2 潘家口水库温室气体浓度与通量季节特征

潘家口水库水体 CH₄、CO₂、N₂O 浓度和通量季节差异显著,CH₄ 浓度春季低于夏季,而通量春季高于夏季.沉积在底泥中的有机残体在厌氧条件下分解产生 CH₄ 释放进入水体和大气,加之滦河作为外源输入到水体中的氮、磷等营养盐类,为浮游生物供应养分,富营养化加剧,同时较低的溶解氧含量,CH₄ 氧化能力较弱^[35],这也与 Podgrajsek 等^[36]的研究结果一致,需要指出的是,冬季水面结冰,产生的 CH₄ 由于冰面的阻挡无法散逸出来,春季温度回升冰层融化,CH₄ 通过水气界面散逸出来也可能是春季 CH₄ 通量高于夏季的原因之一.水体中 CO₂ 浓度和通量均呈现出春季高于夏季的规律.温度的季节变化,导致水体浮游植物的生长周期变化,通过光合和呼吸作用,影响了水体中无机盐、pH 值、DO 含量等变化,最终影响了水气界面 CO₂ 的排放和吸收^[37].N₂O 浓度和通量均表现为夏季显著高于春季的季节变化规律,这种明显的季节模式与春夏季不同的水体水温密切相关,加之北方夏季高温多雨的气候类型,外源土壤中存在的 N₂O 随地表径流和壤中流进入水库,构成外源输入^[38],也可能是导致夏季 N₂O 产量高的原因.

3.2 温室气体排放通量的主要影响因素分析

水库深层水体有机物是 CH₄ 的来源基础,有机物主要通过水库消落带淹没植被和土壤、流域陆源有机物以及水体浮游植物自生有机物等途径输入^[39].逐步回归分析结果表明,影响 CH₄ 通量和浓度的关键影响因子为电导率(表 2),电导率值越大,溶解于水中的杂质越多,用于生物分解氧化的生物有效

碳越多,CH₄ 的产生量越多^[8].此外,风速是 CH₄ 通量和浓度的另一关键影响因子(表 3),风速增大可导致水体表层含氧量增加,加速水体中 CH₄ 氧化,减少 CH₄ 排放^[36].但也有研究表明,风力越大,扰动的水体降低了水气界面甲烷的扩散阻力,进而促进 CH₄ 排放^[40];此外,水体温度也是影响 CH₄ 通量和浓度的另一关键影响因子,这是因为温度影响产甲烷菌活性.

表 2 春季潘家口水库温室气体通量、浓度与环境因子之间的回归方程

Table 2 Regression equation between greenhouse gas flux, concentration and environmental factors in Panjiakou Reservoir in spring

春季	回归方程	F	P
CH ₄ 通量	$Y=-15.03+0.06X_{\text{电导率}}-8.91X_{\text{WT}}$	55.067	<0.001
CH ₄ 浓度	$Y=0.483+0.004X_{\text{电导率}}-0.078X_{\text{WT}}$	43.069	<0.001
CO ₂ 通量	$Y=41867.88+3059.94X_{\text{风速}}-5317.71X_{\text{pH}}$	11.666	<0.001
CO ₂ 浓度	$Y=236.72-21.66X_{\text{DO}}+100.09X_{\text{COD}_{\text{MN}}}$	8.217	<0.001
N ₂ O 通量	$Y=17.58+866.04X_{\text{TP}}+792.36X_{\text{NO}_2^--\text{N}}$	40.030	<0.001
N ₂ O 浓度	$Y=37.62-14.75X_{\text{风速}}+127.22X_{\text{TP}}$	40.311	<0.001

表 3 夏季潘家口水库温室气体通量、浓度与环境因子之间的回归方程

Table 3 Regression equation between greenhouse gas flux, concentration and environmental factors in Panjiakou Reservoir in summer

夏季	回归方程	F	P
CH ₄ 通量	$Y=7.02+0.95X_{\text{风速}}-0.01X_{\text{电导率}}$	22.906	<0.001
CH ₄ 浓度	$Y=1.235+0.052X_{\text{COD}_{\text{MN}}}-0.042X_{\text{WT}}-0.003X_{\text{水深}}$	53.259	<0.001
CO ₂ 通量	$Y=-321.50+1151.32X_{\text{风速}}$	82.149	<0.001
CO ₂ 浓度	$Y=-426.20+1.15X_{\text{电导率}}$	8.536	<0.001
N ₂ O 通量	$Y=469.07+219.49X_{\text{风速}}-54.00X_{\text{DO}}$	26.698	<0.001
N ₂ O 浓度	$Y=-56.30-6.25X_{\text{DO}}+229.98X_{\text{NO}_2^--\text{N}}$	32.275	<0.001

水—气界面的 CO₂ 交换通量方向及大小主要取决于大气与水表 CO₂ 分压差及大小^[41],由于短时间内大气 CO₂ 分压保持恒定,因此水—气界面 CO₂ 通量主要由水表 CO₂ 分压决定.水表 CO₂ 分压主要受风速、碱度、水温、碳酸盐分解和生物泵的影响^[42].逐步回归分析结果表明风速是影响 CO₂ 通量和浓度的关键影响因子(表 2、表 3),风速对温室气体的影响与风力大小、水深等参数相关.风力扰动水体表面后,导致平静水体表层破碎化、增大水气接触面,从而影响水体与大气 CO₂ 浓度,影响水气表面 CO₂ 的扩散^[12],也有可能是风速与水流流速、温度的共同作用

下,影响了其他交换系数^[15].

水体 N₂O 产生主要由反硝化、短程硝化及硝化菌的反硝化作用产生.N₂O 是反硝化过程的必要中间产物,继续还原时可生成氮气.硝化作用中本应氧化为 NO₂⁻-N 的羟胺因环境变化可发生短程硝化转化为 N₂O^[43].本研究中水体无机氮水平是控制 N₂O 浓度与通量的主导因子(表 2、表 3),N₂O 通量随水中可利用态氮含量增加而增加^[44],此外风速通过影响 N₂O 在水—气界面的分压平衡来影响水体 N₂O 释放^[45].

3.3 潘家口水库温室气体排放通量与国内外其他水库比较

本研究结果表明 CH₄、CO₂ 春季扩散通量显著高于夏季,而 N₂O 春季扩散通量显著低于夏季.经与国内外多个水库比较发现(表 4),潘家口水库 CH₄ 通量高于江西省柘林水库、白云山水库、陡水水库等,江西省地表水污染程度较低,且土壤类型以低有机质、低肥力的红壤为主^[30],水体及底质中有机质浓度低,不利于温室气体的产生和释放.但潘家口水库 CH₄ 通量远低于热带 Curua-Una、Petit Saut、亚热带 Lake Baroon、Little Nerang Dam 及寒带

Kotsamolampi 水库,这主要是由于各水库库龄不同^[46]加之水库周边土地利用类型不同造成的^[47].潘家口水库 CO₂ 通量低于热带 Curua-Una 和 Petit Saut 及温带玉渡山水库等,高于洪家渡、水布垭、江西各水库及其他亚热带、温带、寒带水库,可以发现气候类型、样地类型、水库类型、消落带植被及水库对环境因素的响应等也是影响温室气体排放的重要因素.潘家口水库 N₂O 扩散通量低于温带洪门水库、亚热带 Lake Baroon、Little Nerang Dam 及温带玉渡山水库,高于本文所列出的其它热带、亚热带、温带及寒带水库,这也与水库周边分布不同的土地利用类型,为水库提供了不同的有机质输入有关.可以看出不同区域水库温室气体排放通量差异较大,这个结果与水库周边土地利用方式、营养盐负荷、水库所处的不同气候类型以及水库的库龄等因素都有关系.本研究结果也表明 3 种不同的温室气体尤其是 CO₂ 与 N₂O 具有显著的时空差异,这为准确评估潘家口水库的温室气体通量带来了很大的挑战,同时也要求我们进一步开展高频次的监测研究来阐明水库温室气体生成、排放特征及控制因子.

表 4 国内外不同区域水库温室气体排放通量比较

Table 4 Comparison of greenhouse gas emission fluxes from reservoirs in different regions at home and abroad

水库名称	气候类型	CH ₄ [μmol/(m ² ·h)]	CO ₂ [μmol/(m ² ·h)]	N ₂ O [nmol/(m ² ·h)]	数据来源
Curua-Una(巴西)	热带	173.25	2768.18	—	[46]
Petit Saut(圭亚那)	热带	3045	4257.27	—	[6]
Lake Baroon(澳大利亚)	亚热带	5.99~19.53	—	30~90	[48]
Little Nerang Dam(澳大利亚)	亚热带	12.52~53.53	—	70~390	[48]
柘林水库	亚热带	0.22	51.56	20	[30]
白云山水库	亚热带	0.37	8.04	10	[30]
陡水水库	亚热带	0.30	7.78	10	[30]
洪门水库	亚热带	1.42	31.44	220	[30]
洪家渡水库	亚热带	—	255.83	—	[49]
水布垭水库	亚热带	—	632.92~6951.25	—	[50]
F.D.Roosevelt(美国)	温带	6.04	415.23	—	[51]
Cabonga(加拿大)	温带	19.69	763.64	—	[52]
玉渡山水库	温带	54.38±6.88	15097.95±190.68	12270±69550	[53]
潘家口水库(春)	温带	1.11±1.60	1333.31±546.43	76.65±19.54	本文
潘家口水库(夏)	温带	0.62±1.13	746.08±1152.44	141.18±256.02	本文
Kotsamolampi(芬兰)	寒带	9.17	15.83	—10	[47]

4 结论

4.1 潘家口水库春夏季水体温度、Eh 值、pH 值、

水深、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN、COD_{Mn}、DOC、Chl-a、DO 含量的干流支流空间差异较大,季节上除 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN、TP、Chl-a 和 pH 值外,其

余均表现为春季大于夏季的特征。

4.2 潘家口水库总体春季各温室气体浓度均为干流大于支流,夏季 CH₄ 浓度干流大于支流,而 CO₂ 和 N₂O 浓度为干流小于支流;CH₄ 和 N₂O 浓度均为春季小于夏季,而 CO₂ 浓度春季略大于夏季。

4.3 潘家口水库春季和夏季温室气体通量空间上和季节上差异都较大,具体表现为:空间上春夏季各温室气体通量均为干流高于支流。季节上 CH₄ 和 CO₂ 通量春季大于夏季,N₂O 通量春季小于夏季。

4.4 春季甲烷排放主要受电导率影响,而夏季 CH₄ 排放主要受风速、TP、NH₄⁺-N 等影响;春季 CO₂ 扩散通量主要受 DO 含量、风速和 SRP 影响,夏季 CO₂ 扩散通量主要受风速和电导率影响;DO 含量和风速对春夏季 N₂O 排放通量影响较大,同时春季 N₂O 排放受电导率、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量的影响也较大。

参考文献:

- [1] Plattner G K, Gillett N P, Zwiers F W, et al. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. 2014, 4(2): 85–88.
- [2] Forster P, Ramaswamy V. Changes in Atmospheric Constituents in Radiative Forcing [J]. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 2007: 129–234.
- [3] 赵炎,曾源,吴炳方,等.三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测 [J].水科学进展,2011,22(4):546–553.
Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, et al. Observations on greenhouse gas emission fluxes in Xiangxi River tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 546–553.
- [4] Kumar D, Sharma M. Estimation of green house gas emissions from Koteshwar hydropower reservoir, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189: 240–251.
- [5] WCO Dams. Dams and development: A new framework for decision-making [R]. Environmental Management and Health, 2001, 12(4): 444–445.
- [6] St Louis V L, Kelly C A, Duchemin E, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate [J]. BioScience, 2000, 50(9): 766.
- [7] Chanudet V, Descloux S, Harby A, et al. Gross CO₂ and CH₄ emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR [J]. Science of The Total Environment, 2011, 409(24): 5382–5391.
- [8] 龚琬晴,文帅龙,王洪伟,等.大黑汀水库夏秋季节温室气体赋存及排放特征 [J].中国环境科学,2019,39(11):4611–4619.
Gong W Q, Wen S L, Wang H Q, et al. Characteristics of greenhouse gas emission in Daheiting reservoir in summer and autumn [J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2019, 39(11): 4611–4619.
- [9] Yang M, Grace J, Geng X, et al. Carbon Dioxide Emissions from the Littoral Zone of a Chinese Reservoir [J]. Water, 2017, 9: 539.
- [10] Juutinen S, Alm J, Martikainen P, et al. Effects of spring flood and water level draw-down on methane dynamics in the littoral zone of boreal lakes [J]. Freshwater Biology, 2001, 46(7): 855–869.
- [11] Liikanen A, Martikainen P J. Effect of ammonium and oxygen on methane and nitrous oxide fluxes across sediment–water interface in a eutrophic lake [J]. Chemosphere, 2003, 52(8): 1287–1293.
- [12] 赵小杰,赵同谦,郑华,等.水库温室气体排放及其影响因素 [J].环境科学,2008,29(8):2377–2384.
Zhao X J, Zhao T Q, Zheng H, et al. Greenhouse gas emission in reservoirs and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2377–2384.
- [13] Enquist B J, Economo E P, Huxman T E, et al. Scaling metabolism from organisms to ecosystems [J]. Nature, 2003, 423(6940): 639–642.
- [14] Yvon-Durocher G A A, Montoya J, et al. The temperature dependence of the carbon cycle in aquatic ecosystems [J]. Advances in Ecological Research, 2010, 43: 267–313.
- [15] 秦宇,杨博道,李哲,等.夏季金沙江下游水-气界面 CO₂、CH₄ 通量特征初探 [J].湖泊科学,2017,29(4):991–999.
Qin Y, Yang B X, Li Z, et al. Preliminary study on the characteristics of CO₂ and CH₄ fluxes at the water-gas interface in the lower reaches of Jinshajiang River in summer [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 991–999.
- [16] Domagalski J, Lin C, Luo Y, et al. Eutrophication study at the Panjiakou-Daheiting Reservoir system, northern Hebei Province, People's Republic of China: Chlorophyll- α model and external and internal sources of phosphorus and nitrogen [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2006, 25(1): 136–137.
- [17] 陈勇,张敏,渠晓东,等.潘大水库水环境时空格局演变动态 [J].应用与环境生物学报,2016,22(6):1082–1088.
Chen Y, Zhang M, Qu X D, et al. Evolution of spatial-temporal pattern of water environment in Panta reservoir [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, 22(6): 1082–1088.
- [18] 王燕,邢海燕,赵恩灵,等.潘家口、大黑汀水库水污染现状及治理措施浅析 [J].海河水利,2016,(3):17–19.
Wang Y, Xing H Y, Zhao E L, et al. Panjiakou and Daheiting Reservoir water pollution status and control measures [J]. Haihe Water Resources, 2016, (3): 17–19.
- [19] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法 [M].北京:中国环境出版集团,2002:1–748.
State Environmental Protection Administration of China. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater (fourth edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 1–784.
- [20] Weisenburg D A, Guinasso N. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide and hydrogen in water and seawater [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1979, 24(4): 354–360.
- [21] Weiss R F, Price B A. Nitrous oxide solubility in water and seawater [J]. Marine Chemistry, 1980, 8(4): 347–359.
- [22] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2014, 12(6): 351–362.
- [23] Yang L B, Li X Y, Yan W J, et al. CH₄ concentrations and emissions

- from Three Rivers in the Chaohu Lake Watershed in Southeast China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012,11(4):665–673.
- [24] 孙玮玮,王东启,陈振楼,等.长江三角洲平原河网水体溶存 CH₄ 和 N₂O 浓度及其排放通量 [J]. *中国科学(B辑:化学)*, 2009,39(2):165–175.
- Sun W W, Wang D Q, Chen Z L, et al. A study on the concentration of dissolved CH₄ and N₂O and its emission fluxes in the Yangtze River Delta plain [J]. *Science in China (Series B: Chemistry)*, 2009,39(2):165–175.
- [25] Chang C, Janzen H H, Nakonechny E M, et al. Nitrous oxide emission through plants [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(1):35–38.
- [26] Weyhenmeyer G A, Kosten S, Wallin M B, et al. Significant fraction of CO₂ emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs [J]. *Nature Geoscience*, 2015,8(12):933–936.
- [27] Ogilvie B G, Nedwell D, Harrison R, et al. High nitrate, muddy estuaries as nitrogen sinks: The nitrogen budget of the River Colne Estuary (United Kingdom) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 150:217–228.
- [28] Wang D, Chen Z, Wang J, et al. Summer-time denitrification and nitrous oxide exchange in the intertidal zone of the Yangtze Estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007,73:43–53.
- [29] 邢 涛,李俊雄,李彬彬,等.水生植物对草型富营养化湖泊气态氮排放及沉积物氮去除的影响 [J]. *生态学杂志*, 2018,37(3):771–778.
- Xing T, Li J X, Li B B, et al. Nitrogen removal from a herbivorous eutrophication lake in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(3):771–778.
- [30] 姜星宇,张 路,姚晓龙,等.江西省水库温室气体释放及其影响因素分析 [J]. *湖泊科学*, 2017,29(4):1000–1008.
- Jiang X Y, Zhang L, Yao X L et al. Emissions of greenhouse gases from reservoirs in Jiangxi Province and their influencing factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017,29(4):1000–1008.
- [31] 王仕禄.太湖梅梁湾温室气体(CO₂,CH₄ 和 N₂O)浓度的昼夜变化及其控制因素 [J]. *第四纪研究*, 2010,30(6):1186–1192.
- Wang S L. Variation of greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) concentrations and their controlling factors in Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. *Quaternary Sciences*, 2010,30(6):1186–1192.
- [32] 孙英杰,吴昊,王亚楠.硝化反硝化过程中 N₂O 释放影响因素 [J]. *生态环境学报*, 2011,20(2):384–388.
- Sun Y J, Wu H, Wang Y N. Influence factors of N₂O release during nitrification and denitrification [J]. *Chinese Journal of Ecology and Environment*, 2011,20(2):384–388.
- [33] Alinsafi A, Adouani N, Béline F, et al. Nitrite effect on nitrous oxide emission from denitrifying activated sludge [J]. *Process Biochemistry*, 2008,43(6):683–689.
- [34] 袁淑方,王为东.太湖流域源头溪流氧化亚氮(N₂O)释放特征 [J]. *生态学报*, 2012,32(20):6279–6288.
- Yuan S F, Wang W D. Characteristics of nitrous oxide (N₂O) release in the headstream of Taihu Lake Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20):6279–6288.
- [35] Schreiber F, Wunderlin P, Udert K M, et al. Nitric oxide and nitrous oxide turnover in natural and engineered microbial communities: biological pathways, chemical reactions, and novel technologies [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012,3:372–.
- [36] Podgrajsek E, Sahlée E, Rutgersson A. Diurnal cycle of lake methane flux [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014,119(3):236–248.
- [37] 彭文杰,李强,宋昂,等.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 [J]. *环境科学*, 2018,39(6):2673–2679.
- Peng W J, Li Q, Song A, et al. Effects of primary productivity on the spatial-temporal variation of carbon dioxide and methane emission rates at the water-gas interface in Wulixia Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2018,39(6):2673–2679.
- [38] Hama-Aziz Z Q, Hiscock K M, Cooper R J. Dissolved nitrous oxide (N₂O) dynamics in agricultural field drains and headwater streams in an intensive arable catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2017,31(6):1371–1381.
- [39] 赵登忠,程学军,汪朝辉,等.清江流域典型发电水库甲烷源汇时空变化规律研究 [J]. *水力发电学报*, 2014,33(5):128–137.
- Zhao D Z, Chen X J, Wang Z H, et al. A study on the spatial-temporal variation of methane sources and sinks in typical power generation reservoirs in Qingjiang River Basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014,(5):128–137.
- [40] 杨平,全川.淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展 [J]. *生态学报*, 2015,35(20):6868–6880.
- Yang P, Tong C. Research progress of greenhouse gas emission in freshwater ecosystem and its influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(20):6688–6880.
- [41] 严国安,刘永定.水生生态系统的碳循环及对大气 CO₂ 的汇 [J]. *生态学报*, 2001,21(5):827–833.
- Yan G A, Liu Y D. Carbon cycling in aquatic ecosystems and its sinks to atmospheric CO₂ [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001,21(5):827–833.
- [42] Biswas H, Mukhopadhyay, et al. Biogenic controls on the air-water carbon dioxide exchange in the Sundarban mangrove environment, northeast coast of Bay of Bengal, India [J]. *Limnology & Oceanography*, 2004,49:95–101.
- [43] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of earth nitrogen cycle [J]. *Science*, 2010,330:192–196.
- [44] 张丽华,宋长春,王德宣,等.外源氮对沼泽湿地 CH₄ 和 N₂O 通量的影响 [J]. *生态学报*, 2007,27(4):1442–1449.
- Zhang L H, Song C C, Wang D X, et al. Effects of exogenous nitrogen on CH₄ and N₂O fluxes in a marsh wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(4):1442–1449.
- [45] 韩洋,郑有飞,吴荣军,等.南京河流夏季水-气界面 N₂O 排放通量 [J]. *环境科学*, 2014,35(1):348–355.
- Han Y, Zheng Y F, Wu R J, et al. N₂O emission fluxes at the water-gas interface in Nanjing River in summer [J]. *Environmental Science*, 2014,35(1):348–355.
- [46] Eric, Duchemin, Marc, et al. Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide [J]. *SIL Proceedings*, 1922–2010,2017.
- [47] Huttunen J T, Väistönen T S, Heikkilä M, et al. Exchange of CO₂, CH₄ and N₂O between the atmosphere and two northern boreal ponds with catchments dominated by peatlands or forests [J]. *Plant and Soil*, 2002,242(1):137–146.

- [48] Musenze R, Grinham A, Werner U, et al. Assessing the Spatial and Temporal Variability of Diffusive Methane and Nitrous Oxide Emissions from Subtropical Freshwater Reservoirs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(24):14499–14507.
- [49] 喻元秀,刘从强,汪福顺,等.洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量 [J]. *生态学杂志*, 2008,27(7):1193–1199.
Yu Y X, Liu C Q, Wang F S, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of dissolved carbon dioxide partial pressure and diffusion flux in Hongjiadu Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008,27(7):1193–1199.
- [50] 汪朝辉,杜清运,赵登忠.水布垭水库 CO₂ 排放通量时空特征及其与环境因子的响应研究 [J]. *水力发电学报*, 2012,31(2):146–151.
Wang Z H, Du Q Y, Zhao D Z. Study on the spatial-temporal characteristics of CO₂ emission flux and its response to environmental factors in Shuibuya Reservoir [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012,31(2):146–151.
- [51] Soumis N, Duchemin É, Canuel R, et al. Greenhouse gas emission from reservoirs of the western United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004,18(3).
- [52] Duchemin É, Lucotte M, Canuel R, et al. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995,9(4):529–540.
- [53] 李红丽,杨萌,张明祥,等.玉渡山水库生长季温室气体排放特征及其影响因素 [J]. *生态学杂志*, 2012,31(2):406–412.
Li H L, Yang M, Zhang M X, et al. Characteristics and influencing factors of greenhouse gas emission in Yudushan Reservoir during the growing season [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012,31(2):406–412.

致谢: 本文研究工作受到水利部海河水利委员会引滦工程管理局的诸多帮助,在此深表谢意。

作者简介: 杨凡艳(1994-),女,甘肃通渭人,西北师范大学硕士研究生,研究方向为水体温室气体。