



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

我国东部典型内源和外源性静态水体 N_2O 排放与生态系统呼吸的关系初探

李春旺, 王华, 淦冲, 赵学梅, 张声权, 颜晓元, 夏永秋

引用本文:

李春旺, 王华, 淦冲, 赵学梅, 张声权, 颜晓元, 夏永秋. 我国东部典型内源和外源性静态水体 N_2O 排放与生态系统呼吸的关系初探[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 401–409.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脲酶/硝化抑制剂减少农田土壤氮素损失的作用特征

宋涛, 尹俊慧, 胡兆平, 王亮亮, 张强, 陈清, 曹文超

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 585–597 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0344>

安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征

张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 龙昶宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 295–304 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0374>

丹江口水库总氮、氨氮遥感反演及时空变化研究

刘轩, 赵同谦, 蔡太义, 肖春艳, 陈晓舒, 张文静

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 829–838 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0195>

利用整合分析方法探究我国不同土地利用类型区域河流硝酸盐的来源

张金兰, 蔺祖弘, 白文荣, 郇正来, 张婷婷, 林爱军, 肖勇

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 746–754 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0492>

长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 422–430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李春旺, 王华, 淦冲, 等. 我国东部典型内源和外源性静态水体 N_2O 排放与生态系统呼吸的关系初探[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 401–409.

LI C W, WANG H, GAN C, et al. Preliminary study of the relationship between N_2O emission and ecosystem respiration in typical endogenous and exogenous static water bodies in eastern China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 401–409.



开放科学 OSID

我国东部典型内源和外源性静态水体 N_2O 排放与生态系统呼吸的关系初探

李春旺^{1,2}, 王华^{1*}, 淦冲², 赵学梅², 张声权², 颜晓元², 夏永秋^{2*}

(1. 湖南农业大学环境与生态学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏常熟农田生态系统国家野外观测研究站, 南京 210018)

摘要: 内陆水体是大气中 N_2O 的重要排放源, 受到国内外广泛关注, 为了探讨水生生态系统中水体 N_2O 排放通量与生态系统呼吸的响应关系, 本研究以我国东部典型外源性和内源性静态水体为研究对象, 在 2022 年 4 月 29 日—5 月 4 日对 10 个表层水体 N_2O 排放通量和生态系统呼吸指标进行测定, 结合贝叶斯方法初步探讨了水体 N_2O 排放通量和生态系统呼吸之间的关系。结果表明: 外源性水体 N_2O 排放通量和生态系统呼吸均显著高于内源性水体 ($P < 0.05$), 水体 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量和 BOD_5 均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。通过贝叶斯方法构建了水体 N_2O 排放通量与生态系统呼吸 (CO_2 和 BOD_5) 之间的数学模型, 可解释水体 N_2O 排放通量变异性的 61%~71%, 并且明确了模拟结果的不确定性。此外, 本研究进一步区分了内源性水体与外源性水体 N_2O 排放通量和生态系统呼吸的关系, 在内源性水体中, N_2O 的产生受碳源限制的影响大于氮源限制, 而在外源性水体中 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量的耦合关系大于内源性水体。研究表明, 生态系统呼吸与水体 N_2O 排放通量间有很强的响应关系, 本研究为区域水体 N_2O 排放通量估算方法和生态系统呼吸耦合机制研究提供了基础。

关键词: 贝叶斯方法; N_2O 排放通量; 生态系统呼吸; 内源性水体; 外源性水体

中图分类号: X143

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2024)02-0401-09

doi: 10.13254/j.jare.2023.0302

Preliminary study of the relationship between N_2O emission and ecosystem respiration in typical endogenous and exogenous static water bodies in eastern China

LI Chunwang^{1,2}, WANG Hua^{1*}, GAN Chong², ZHAO Xuemei², ZHANG Shengquan², YAN Xiaoyuan², XIA Yongqiu^{2*}

(1. College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Changshu Agro-ecological National Field Scientific Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210018, China)

Abstract: Inland waters emit large amounts of nitrous oxide (N_2O) to the atmosphere, which has attracted extensive attention worldwide. The goal of this study was to investigate the relationship between N_2O flux and ecosystem respiration (ER) in aquatic ecosystems. We measured N_2O and ER in 10 typical exogenous and endogenous static water bodies in eastern China and identified the relationship between N_2O flux and ER in the aquatic environments using a Bayesian method from April 29 to May 4, in 2022. The results showed that N_2O flux and ER were significantly higher in exogenous water bodies than in endogenous water bodies. There was a significant positive correlation between N_2O flux and carbon dioxide (CO_2) flux and BOD_5 in the water. The Bayesian model explained 61% to 71% of the variability of N_2O flux and clarified the uncertainty of the model. We also distinguished the relationship between N_2O flux and ER in endogenous and exogenous water bodies. In endogenous water bodies, the effect of carbon source limitation on N_2O flux is greater than the effect of nitrogen source limitation. However, the coupling relationship between N_2O and CO_2 is stronger in exogenous water bodies than in endogenous water bodies. In summary, ER indirectly promotes N_2O emission, which provides a basis for an estimation method of N_2O flux from water bodies and the coupling mechanism of ER.

Keywords: Bayesian method; N_2O flux; ecosystem respiration; endogenous water bodies; exogenous water bodies

收稿日期: 2023-05-09 录用日期: 2023-05-16

作者简介: 李春旺(1994—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向为氮素环境效应与过程模拟研究。E-mail: 724180484@qq.com

*通信作者: 王华 E-mail: wangchina926@hunau.edu.cn; 夏永秋 E-mail: yqxia@issas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177401)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42177401)

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告中指出,氧化亚氮(N_2O)是重要的温室气体之一,其百年尺度上的增温潜势是二氧化碳(CO_2)的273倍^[1]。近半个世纪以来,由于人为因素的干扰,进入全球水生生态系统的活化氮含量不断增加,加速了水生生态系统中氮素的循环进程,导致水体 N_2O 的大量排放,其排放量约占全球生态系统总释放量的25%~30%^[2]。我国东部地区分布有大量的河流、湖泊、水库、池塘等水体,有研究表明其中85%以上的水体处于富营养化状态^[3]。高浓度的人为活化氮负荷导致水体排放大量的 N_2O 。

水生生态系统中 N_2O 排放过程复杂,主要来源为厌氧氨氧化、自养硝化作用中微生物将氨态氮(NH_4^+-N)氧化为 NO_2^--N 和 NO_3^--N ,以及反硝化作用中硝酸盐(NO_3^--N)被微生物还原为亚硝酸盐(NO_2^--N)、一氧化氮(NO)和氮气(N_2)等过程^[4]。目前我国对水生生态系统中 N_2O 产生特征与影响因素已经开展了一些研究。例如,熊正琴等^[5]研究了太湖地区水体 N_2O 排放,指出浅水型水体是 N_2O 的重要排放源。庞吉丽等^[6]研究发现,小型水体中 N_2O 浓度及排放通量与水体 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量均呈显著正相关关系。Yan等^[7]在对典型农业-城市梯度河流的研究中发现,集约农业水体 N_2O 排放通量较低的主要原因是高浓度溶解性有机碳(DOC)和低浓度溶解氧(DO)促进 N_2O 完全反硝化转化为 N_2 。以往对水体 N_2O 排放通量的研究主要关注单一理化性质的关系探讨,但是其与水生生态系统呼吸作用之间的响应关系尚不清楚,这种局限性使我们难以深刻认识 N_2O 排放通量在水生生态系统物质循环和能量转化以及碳氮耦合机制过程的作用。

生态系统呼吸是生态系统中能够将有机质氧化分解为 CO_2 的所有有机体(包括消费者和初级生产者)进行呼吸消耗的过程。有机质的分解往往伴随着氮的矿化和迁移转化,如能产生 N_2O 的反硝化作用和硝化作用^[8]。近年来有研究发现,沉积物反硝化与水体生态系统呼吸具有显著相关关系。例如,Patrick等^[9]通过 ^{15}N 添加试验研究了美国农业、森林和城市72条河流反硝化与生态系统呼吸的关系,发现反硝化消纳速率有很大的变异(0.5%~100%),在所有监测河流水平上反硝化速率能解释生态系统呼吸变异的13%。Hilary等^[10]研究了森林流域中13条河流生态系统呼吸与反硝化产物 N_2 的关系,发现河流生态系统呼吸与反硝化作用呈显著相关性,反硝化作用占河流

硝态氮消纳量的19%,但是仅占生态系统呼吸的1.1%。目前,国内对于 N_2O 排放与生态系统呼吸关系之间的耦合反应尚未开展系统性研究,然而,二者之间存在潜在的关联性:水体中存在一部分可利用碳源,微生物对有机碳的分解既能促进水生生态系统的呼吸作用,又能够刺激反硝化微生物进行呼吸代谢产生 N_2O ;同时生态系统呼吸会消耗水中DO形成的缺氧环境,进一步促进 N_2O 的生产过程,最终导致生态系统呼吸和 N_2O 排放的耦合关系(图1)。

水体中营养盐来源不同,影响微生物对有机质的利用率^[12],进而影响水体 N_2O 排放通量与生态系统呼吸之间的关系。在森林生态系统水体中,上覆水中营养物质主要通过沉降和土壤矿化来补充,水体营养物浓度低(本研究简称内源性水体),氮素转化速率和生态系统呼吸受到限制。而在农业和城市等生态系统水体中,大量生活污水与农业废水等外源污染物进入水体,水体营养物浓度高(本研究简称外源性水体),是氮素转化和生态系统呼吸的热点区域。因此,本研究选择南京市典型内源性和外源性水体为研究对象,探讨不同水体 N_2O 排放通量和生态系统呼吸的相关性,建立水体 N_2O 排放通量和生态系统呼吸之间的数学关系模型,为水体 N_2O 排放通量估算方法和 N_2O 排放通量与生态系统呼吸耦合机制研究提供基础。

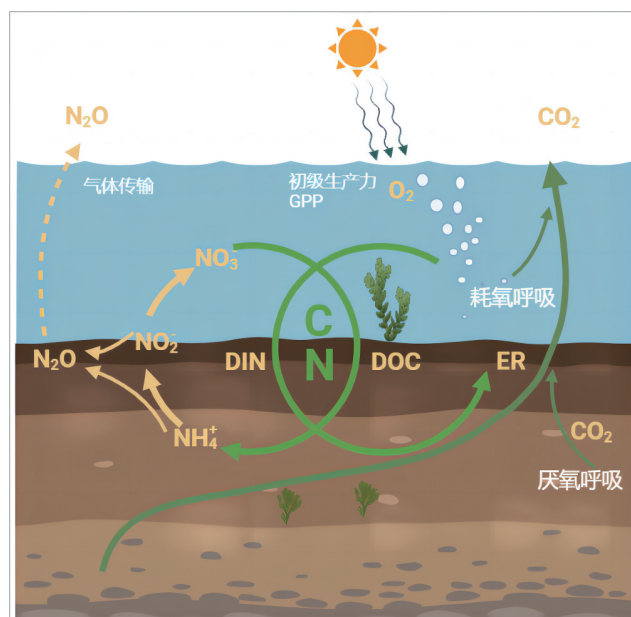


图1 N_2O 产生过程与生态系统呼吸关系^[11]

Figure 1 Relationship between N_2O production and ecosystem respiration^[11]

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于江苏省南京市(图2),属于亚热带季风气候区,年平均气温 15 ℃,年平均降水量 1 033 mm,降雨多发生在夏季^[13]。本研究选取受内源性污染和外源性污染的6个静态水体(玄武湖、月牙湖、琵琶湖、琵琶山居水塘、前湖和燕雀湖)进行采样调查。其中琵琶湖、琵琶山居水塘、前湖和燕雀湖位于紫金山,除降雨和地表径流外无明显污染源,属于内源性水体。月牙湖和玄武湖为城市观赏性湖泊,水质变化主要由外部污染所致,属于外源性水体^[14]。受城市生活污水的影响,早在 20 世纪 80 年代后期,玄武湖已严重富营养化^[15]。在玄武湖内不同位置选取 5 个代表性采样点,其他水体各选择 1 个采样点,共计 10 个采样点。

1.2 样品采集与测定

为了避开生态系统呼吸最强和最弱的时间点(夏季和冬季),使数据更具有代表性,同时确保每次采样的气候条件基本一致,本研究于 2022 年 4 月 29 日—2022 年 5 月 4 日期间共进行 50 次采样,采样时间介于

10:00—16:00,天气条件均为晴朗或多云,且风速较低。在每个采样点附近重复 3 次采样,共收集 150 个样本,每个样本分成 3 份重复水样,用于分析 N₂O 和 CO₂ 通量。采样时,用移液枪在水面以下 50 cm 取 5 mL 上覆水立刻注入到顶空瓶(15 mL)中,然后盖上丁基胶塞。另外,每个采样点采集 1 份原位水体上方大气样品,用于分析 N₂O 和 CO₂ 背景值浓度。样品采集后,送到实验室用带有三通阀的针管抽取顶空瓶中 5 mL 顶空气体,注入气相色谱(Agilent 7890A,美国)内进行测定。在使用气相色谱仪测气体浓度之前,对气相色谱仪进行烤柱,确保仪器的准确性。

取水样的同时,现场采用便携式多参数水质监测仪(YSI EXO Multiparameter probe,美国)测定水样 pH、DO、盐度(S)和水温(WT)。每个采样点使用 1 L 的透明采水器采集水体表层(距水面 0.5 m)水样,装入无菌采水袋(500 mL)带回实验室,过 0.45 μm 微孔滤膜后,用流动分析仪(荷兰SAKLAR公司 San++System)测定滤液的氨态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)。上覆水 DOC 采用总有机碳/总氮分析仪(德国耶拿分析仪器股份公司 ZX_2015)进行测定。BOD₅ 的测定采用数字式 BOD₅ 测定仪(JC870H 型,青岛聚创环保

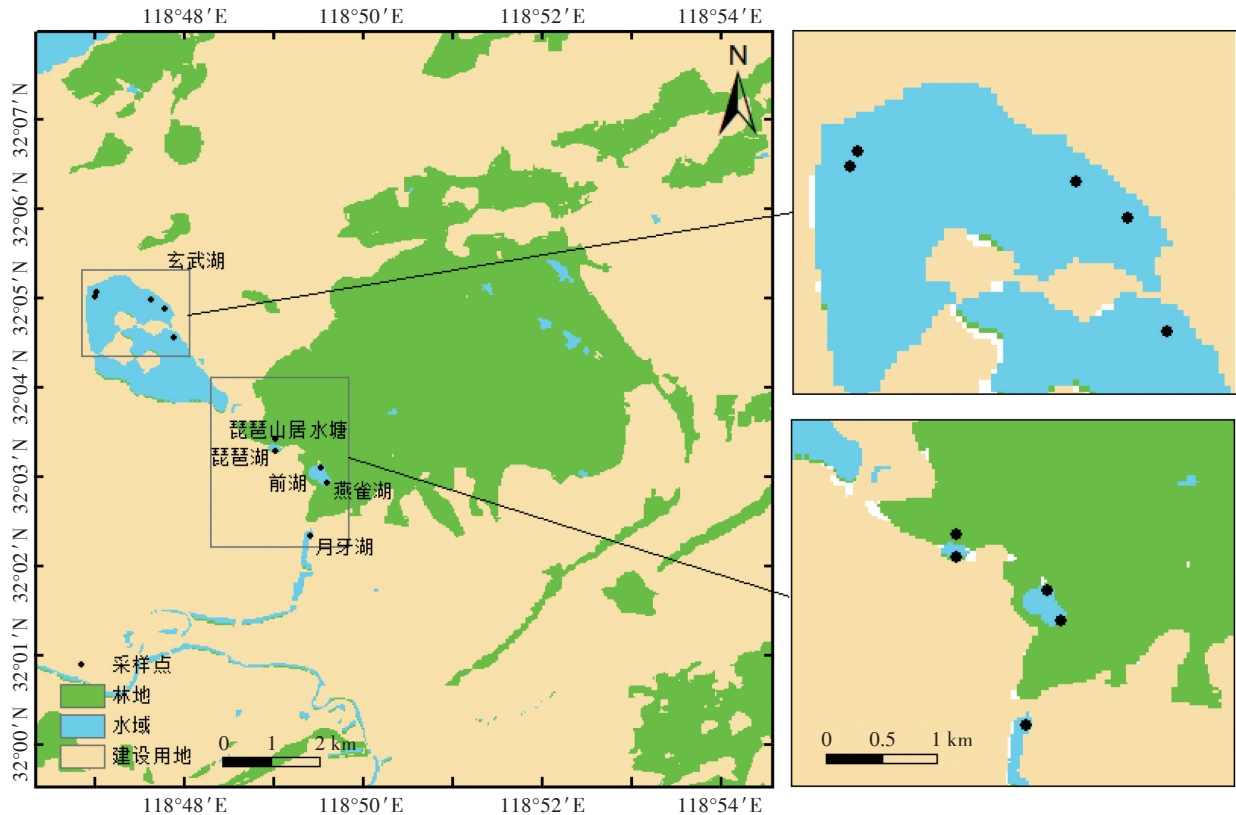


图2 采样点分布示意图

Figure 2 Location diagram of sampling points

集团有限公司)。

1.3 水体 N₂O 和 CO₂ 的浓度与排放通量计算

水体中 N₂O 和 CO₂ 浓度计算参考文献[16], 标准气体浓度/标准气体峰面积等于气样浓度/气样峰面积。本研究中, 水气界面 N₂O 和 CO₂ 交换通量(F)的计算公式如下:

$$F_{N_2O(CO_2)} = k(C_{water} - C_{eq}) \times 3\ 600 \times 44 \times 1\ 000 \quad (1)$$

式中: F 为水-气界面气体(N₂O、CO₂)排放通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; C_{water} 为表层水体 N₂O(CO₂)浓度, $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$; C_{eq} 为原位环境下大气 N₂O(CO₂)平衡浓度, $\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$; k 为 N₂O(CO₂)气体传输速率, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本研究对 k 的估算参考 Wanninkhof^[17] 的 DM_{w92a} 模型, 其计算公式为:

$$k = 0.39 \times U_{10}^2 \times (S_c / S_{c600})^{-n} \quad (2)$$

式中: S_c 为 t °C 下无量纲 N₂O 气体的施密特常数^[18], S_{c600} 是 20 °C 时的施密特数 600; n 为风速相关系数, $n=0.5$ 时, $U_{10} > 3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $n=2/3$ 时, $U_{10} < 3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 U_{10} 表示研究区 10 m 高空的平均风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本研究中的 U_{10} 利用采样期间国家气象科学数据中心中国地面气象站逐小时观测资料数据进行计算^[19]。

1.4 贝叶斯方法和不确定性分析

贝叶斯方法的优点之一是可表征模拟结果的不确定性和可靠性。根据以往研究^[10], 本研究选取 BOD₅ 和 CO₂ 通量来表征生态系统呼吸, 采用正态分布作为先验分布以简化计算, 并通过贝叶斯方法求得后验分布, 最后量化结果的不确定性和可靠性, 从而更好地理解水体中 N₂O 排放通量与生态系统呼吸之间的相关性。通过贝叶斯方法建立水体 N₂O 排放通量与生态系统呼吸之间的关系模型:

$$F_{N_2O} = e_1 + e_2 \times F_{BOD_5} + e_3 \times F_{CO_2} \quad (3)$$

式中: F_{N_2O} 、 F_{BOD_5} 和 F_{CO_2} 分别表示 N₂O、BOD₅ 和 CO₂ 通量; e_1 为常数项; e_2 为 BOD₅ 通量的系数; e_3 为 CO₂ 通量的系数。

贝叶斯参数估计的原理如下:

$$P(\theta/X) = P(X/\theta)P(\theta)/P(X) \quad (4)$$

式中: $P(\theta/X)$ 是指后验分布, 参数的后验分布由先验分布和样本的似然函数导出, 代表给定观测数据(X)情况下, 模型参数 θ 的条件分布。在模型中, θ 代表 e_1 、 e_2 和 e_3 。它集中了总体、样本和先验 3 种信息中关于 θ 的一切信息。因此基于后验分布 $P(\theta/X)$ 对 θ 进行统计推断是更为有效的, 也是最合理的。 $P(X)$ 是参数分布上似然函数的期望值。 $P(\theta)$ 是先验分布, 是观测数据之前所有 θ 值的概率密度函数。 $P(X/\theta)$ 是概率密度函数(似然函数), 它描述了预测变量和响

应变变量之间的统计关系。对于参数后验分布的获取通常需要借助马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)算法^[20], 本研究仅以常数项 e_1 和 BOD₅、CO₂ 通量作为模型中的关键参数进行 N₂O 通量的校正, 并推断由参数的不确定性导致的 N₂O 通量的不确定性区间。本研究在模型中使用了两条链, 进行了 5 000 次马尔可夫链参数分布模拟。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 26 统计软件包中 LSD 法分析内外源水体数据间的差异性, 用 Origin 2021 软件绘制相关性图。基于贝叶斯框架, 通过 Python 库建立水体 N₂O 排放通量与生态系统之间的关系, 最后利用 WinBUGS 软件和马尔可夫链蒙特卡罗方法(MCMC)估算模型参数的不确定性。

2 结果与分析

2.1 水体 N₂O 排放通量、生态系统呼吸与理化性质特征

研究区典型水体理化性质如表 1 所示。在整个采样期间, 水体 CO₂ 排放通量范围在 $-0.45 \sim 7.43 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值为 $(1.60 \pm 0.38) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其中, 最小值出现在内源性水体中, CO₂ 排放通量平均值为 $(0.70 \pm 0.21) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 最大值出现在外源性水体中, CO₂ 排放通量平均值为 $(2.43 \pm 0.64) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 内源性水体、外源性水体的理化性质
Table 1 Physicochemical properties of endogenous and exogenous water bodies

指标 Index	内源+外源性 水体 All water bodies	内源性水体 Endogenous water body	外源性水体 Exogenous water body
水温/°C	21.89±0.28	22.42±0.56	21.52±0.54
DO/(mg·L ⁻¹)	11.82±0.77ab	13.79±1.51a	10.51±0.72b
pH	8.16±0.18bAB	8.47±0.09aA	7.99±0.10bB
盐度/‰	0.14±0.01	0.14±0.01	0.14±0.01
CO ₂ 排放通量/ (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	1.60±0.38ab	0.70±0.21b	2.43±0.64a
N ₂ O排放通量/ (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	0.31±0.02bA	0.20±0.01cB	0.39±0.03aA
DOC/(mg·L ⁻¹)	4.07±0.16bB	5.13±0.13aA	3.34±0.09cC
NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	0.07±0.01	0.03±0.01	0.08±0.02
NO ₃ ⁻ -N/(mg·L ⁻¹)	0.19±0.03bA	0.04±0.01cB	0.29±0.03aA
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	13.97±1.09bA	8.70±0.61cB	17.92±1.39aA
DOC/NO ₃ ⁻	27.26±3.16bAB	41.04±5.46aA	19.91±2.23bB

注: 同行不同小写和大写字母分别表示处理间差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase and uppercase letters in a line indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

两种类型水体间CO₂排放通量具有显著性差异($P<0.05$)。水体N₂O排放通量平均值为 $(0.31\pm0.02)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,说明水体是N₂O的排放源,内源性水体中N₂O排放通量的平均值为 $(0.20\pm0.01)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,显著低于外源性水体N₂O排放通量的平均值 $(0.39\pm0.03)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。BOD₅与N₂O排放通量表现出相似特征,其排放通量范围在 $4.0\sim35.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $(13.97\pm1.09)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。内源性水体中BOD₅平均值为 $(8.70\pm0.61)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,显著低于外源性水体BOD₅平均值 $(17.92\pm1.39)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从内源性和外源性水体数据发现,内源性水体中DOC浓度较高,而外源性水体中DOC浓度相对较低,同时外源性水体NO₃⁻-N浓度大于内源性水体。在内源性水体中DOC/NO₃⁻较高(平均值为41.04),外源性水体中较低(平均值为19.91),且两者差异极显著。N₂O的产生主要是DOC作为电子供体、NO₃⁻作为电子受体的呼吸过程,合适的DOC/NO₃⁻有利于N₂O的产生^[21]。

2.2 水体N₂O排放通量与生态系统呼吸等理化性质的相关性

水体中N₂O排放通量与生态系统呼吸和水质参数之间的关系如图3所示。水体中N₂O排放通量与水生生态系统呼吸的重要指标呈显著正相关关系:BOD₅与N₂O呈显著正相关关系($R^2=0.50, P<0.05$),CO₂排放通量与N₂O排放通量也呈显著正相关关系($R^2=0.81, P<0.05$)。CO₂排放通量与产生N₂O相关的底物NH₄⁺-N浓度呈显著正相关关系。同时,CO₂排放通量与水体NO₃⁻-N也呈显著正相关关系。BOD₅随上覆水

NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度的增加而显著增加。pH与BOD₅呈显著负相关关系。

2.3 模型参数估计

表2为不同水体类型的模型参数 e_1 、 e_2 和 e_3 。对于常数项 e_1 ,外源性水体(0.143 1)大于内源性水体(-0.146 5)。对于BOD₅系数项 e_2 ,内源性水体(0.043 0)大于外源性水体(0.009 7)。对于CO₂系数项 e_3 ,外源性水体(0.066 0)大于内源性水体(0.001 1)。进一步分析模型参数的迭代轨迹(图4)可知,参数呈现近似正态分布,参数 e_1 、 e_2 和 e_3 的后验马尔科夫链均达到平稳和收敛状态。

2.4 模型的不确定性

贝叶斯方法的优点之一是可表征模拟结果的不确定性和可靠性^[22]。达到收敛状态的后验样本经Python库模拟,输出的总体N₂O排放通量不确定性(97.5%置信区间)范围为 $0.178\sim0.264\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。对比N₂O排放通量观测值(图5)可知,MCMC方法估计的不确定性区间几乎包含了所有的N₂O排放通量观测值。为了进一步验证贝叶斯模型对研究区水体N₂O排放通量的预测能力,将模型预测值和测定值进行比较(图6)。模型总体解释度为68%,其中在内源性水体中,贝叶斯模型解释了N₂O排放通量变异性的61%,而外源性水体中,贝叶斯模型的解释度为71%。

3 讨论

本研究初步开展了水体N₂O与生态系统呼吸之间的关系研究。前人研究已经证明了反硝化速率与

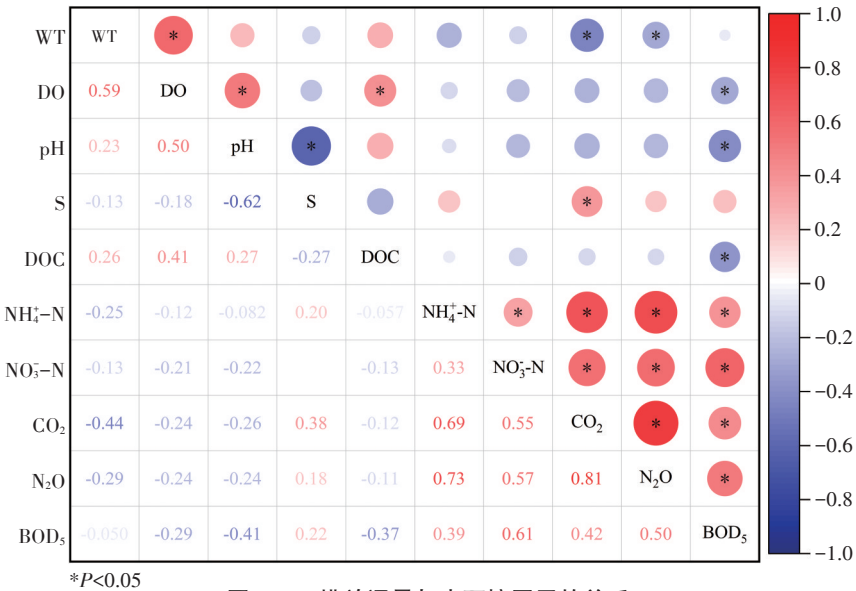


图3 N₂O排放通量与水环境因子的关系

Figure 3 Relationship between N₂O flux and water environmental factors

表2 贝叶斯模型参数的后验分布

Table 2 Statistics of model posterior parameters in Bayesian method

水体分类 Type of water	参数 Parameter	均值 Mean value	标准误差 Standard deviation	蒙特卡罗误差 MC error	2.5%	中位数 Median	97.5%
内源+外源性水体	e_1	0.102 6	0.072 1	0.001 1	-0.039 6	0.103 2	0.243 8
	e_2	0.012 8	0.005 2	0.000 1	0.002 5	0.012 8	0.023 1
	e_3	0.061 5	0.007 8	0.000 1	0.046 1	0.061 5	0.077 1
内源性水体	e_1	-0.146 5	0.178 5	0.002 6	-0.488 7	-0.146 5	0.205 5
	e_2	0.043 0	0.019 0	0.000 3	0.004 9	0.043 2	0.079 6
	e_3	0.001 1	0.033 0	0.000 5	-0.063 0	0.000 5	0.068 4
外源性水体	e_1	0.143 1	0.101 8	0.001 6	-0.056 1	0.144 1	0.342 9
	e_2	0.009 7	0.006 2	0.000 1	-0.002 3	0.009 6	0.022 1
	e_3	0.066 0	0.008 2	0.000 1	0.049 9	0.066 0	0.082 6

生态系统呼吸(ER)之间具有显著相关性,比如:Patrick等^[9]通过¹⁵N添加试验发现,在美国农业、森林和城市所有监测河流水平上反硝化速率能解释生态系统呼吸变异的13%;Barnes等^[23]通过在科罗拉多州中部从高山到平原的生态系统梯度上收集上覆水和沉积物样本发现,反硝化速率与有氧呼吸速率具有显著相关关系。但是作为反硝化中间产物的N₂O和生态系统呼吸之间的相关研究还鲜见报道。生态学参数中的CO₂、BOD₅是表征生态系统呼吸的主要因子。在本研究中N₂O排放通量与水体生态系统呼吸表现出极为一致的规律,这与三江平原淡水沼泽湿地N₂O排放通量与CO₂排放通量的研究结果一致^[24]。除此以外,本研究还发现水体BOD₅与N₂O排放通量呈显著正相关($R^2=0.50$, $P<0.05$)。因此,结合生态系统呼吸特征因子CO₂和BOD₅,本研究发现贝叶斯模型可以解释水体N₂O排放通量变异的61%~71%。

在本研究中,水体N₂O排放通量与生态系统呼吸指标(CO₂和BOD₅)均有显著相关性,表明碳氮生物地球化学循环高度耦合。水生生态系统中生物地球化学过程的发生离不开微生物对有机质的分解作用^[25]。微生物对有机质中碳、氮的利用率都会影响N₂O的产生和排放^[26]。与此同时,反硝化微生物和硝化微生物进行呼吸作用会导致CO₂的产生。在厌氧反硝化进行的同时,还有一部分耗氧微生物分布在沉积物和上覆水中,依靠碳氮源提供营养物质,持续进行呼吸作用,进而将BOD₅与N₂O的产生联系起来^[27]。BOD₅表征了耗氧微生物消耗有机物的生物化学过程,耗氧微生物进行生化反应的同时为反硝化提供厌氧条件,促进了水体N₂O的产生。此外,硝化作用和微生物呼吸作用消耗氧气形成的缺氧环境进一步促进了N₂O的产生。

基于贝叶斯方法,本研究建立了N₂O与生态系统呼吸之间的数学关系。从N₂O模型参数的后验分布统计(表2)中得出,内源性水体和外源性水体中3个参数各有差异,其可能原因在于不同的污染来源改变了水体中的碳氮耦合关系。就参数BOD₅而言,内源性水体中 e_2 大于外源性水体中 e_2 。这表明内源性水体中生化需氧量与水体N₂O排放通量关系的重要性大于外源性水体,其可能原因为水体碳氮比的差异。本研究发现内源性水体DOC/NO₃⁻大于外源性水体。DOC/NO₃⁻代表水生生态系统中有效碳氮比,表明N₂O排放通量受水体碳源限制作用大于水体氮源限制作用^[28]。而参数CO₂的系数在外源性水体中显得更加重要,这可能是由于外源性水体N₂O与CO₂的耦合关系大于内源性水体。因为外源性水体中的营养盐和有机质主要来自地表径流和生活污水排放,这些污染源带来高营养盐(NO₃⁻-N、NH₄⁺-N)输入,能够促进硝化反硝化微生物的呼吸作用,在增加CO₂排放的同时也促进N₂O排放^[29-30]。另外,本研究还发现,外源性水体中DO和DOC浓度显著低于内源性水体。其可能原因是,受外源污染物输入的影响,外源性水体中大量微生物和藻类生长导致水体DO和DOC消耗,甚至可能出现局部缺氧现象。而内源性水体通常没有受到大规模污染和人为干扰,水中微生物和有机质较为单一,并且其低营养盐也限制了微生物活性,因此内源性水体具有DOC和DO较高但N₂O与CO₂排放通量较低的特点^[31]。综合以上分析,相较于内源性水体,外源性水体能够提供更适宜反硝化微生物生存的厌氧环境,这可能是促成其水体N₂O与CO₂排放通量之间高度耦合的原因之一^[32]。总之,通过建立N₂O与生态系统呼吸之间的贝叶斯模型,能够了解不同水体N₂O排放通量在生态系统呼吸中的限制因素,从而为

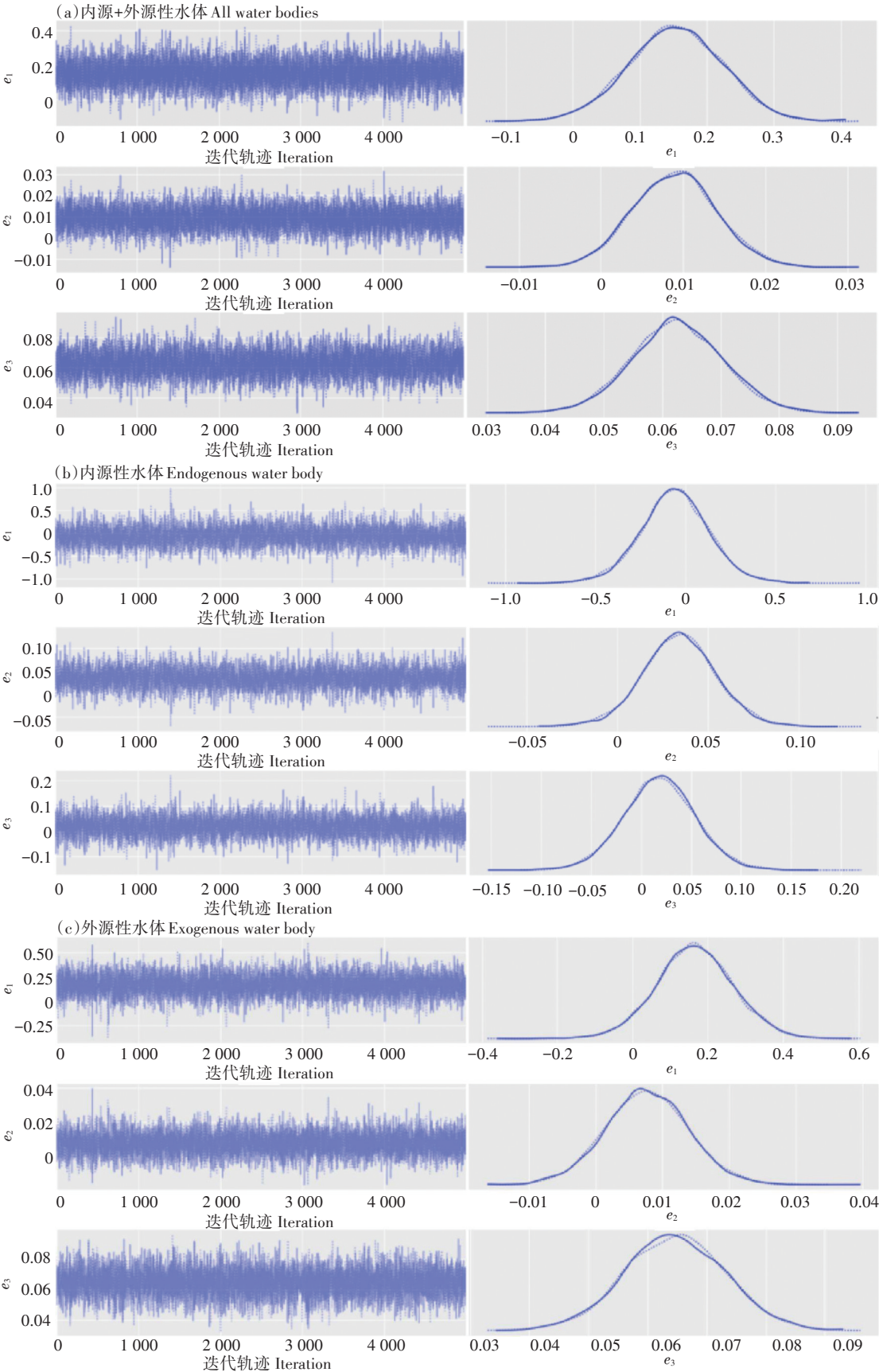


图4 模型参数的后验分布密度和迭代轨迹图

Figure 4 Posterior distribution density and iteration of model parameters

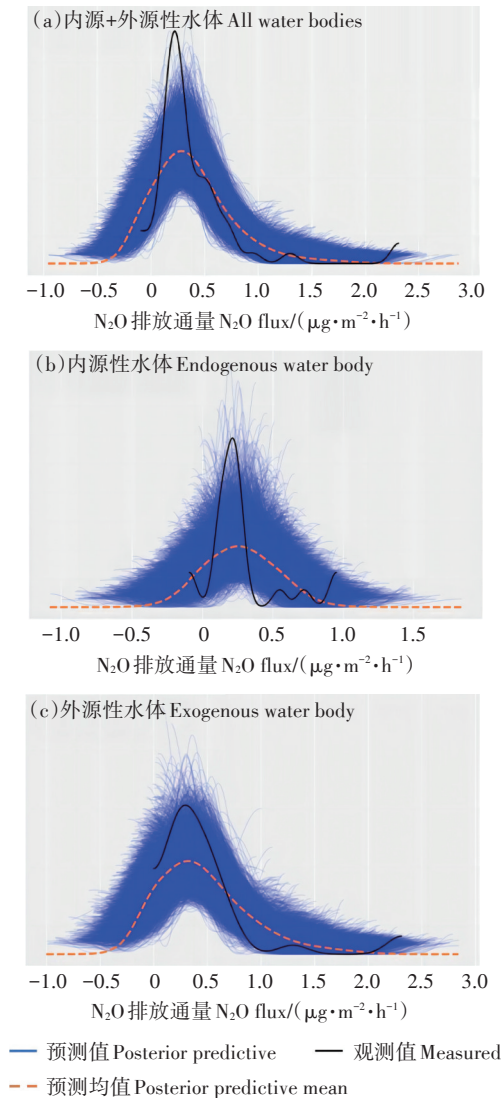
图5 N₂O排放通量模型模拟值与观测值分布

Figure 5 Distribution of the simulated value and the measured value of N₂O flux model

水体 N₂O 排放通量与生态系统呼吸之间耦合关系的研究提供科学的依据。

4 结论

本研究基于野外观测初步探讨了我国东部典型静态水体中 N₂O 排放通量和生态系统呼吸的关系,主要得到以下结论:

(1)外源性水体 N₂O 排放通量与生态系统呼吸均显著高于内源性水体,底物(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N)浓度和 DOC/NO₃是影响该差异的主要原因。

(2)通过贝叶斯方法构建的水体 N₂O 排放通量与生态系统呼吸之间的数学模型,可解释水体 N₂O 排放通量变异性的 61%~71%,并且明确了模拟结果的不确

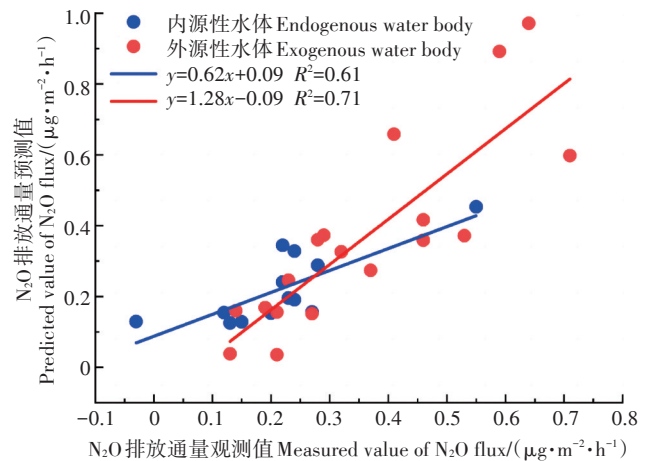
图6 N₂O排放通量模型预测值与观测值比较

Figure 6 Comparison between the predicted value and the measured value of N₂O flux model

定性。

(3)在内源性水体中,N₂O排放通量主要受碳源限制的影响;而在外源性水体中,N₂O与呼吸作用产生的CO₂耦合关系更明显。

参考文献:

- [1] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. Climate change: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 1.
- [2] BATTLE M, BENDER M, SOWERS T, et al. Atmospheric gas concentrations over the past century measured in air from firm at the South Pole[J]. *Nature*, 1996, 383: 231-235.
- [3] 吴雅丽, 许海, 杨桂军, 等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 19-28. WU Y L, XU H, YANG G J, et al. Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu[J]. *Lake Science*, 2014, 26(1): 19-28.
- [4] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276.
- [5] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 等. 太湖地区湖水与河水中溶解 N₂O 及其排放[J]. 环境科学, 2002, 23(6): 26-30. XIONG Z Q, XING G X, SHEN G Y, et al. Dissolved N₂O concentrations and N₂O emissions from aquatic systems of lake and river in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(6): 26-30.
- [6] 庞吉丽, 王晓锋, 刘婷婷, 等. 城市小型景观水体溶存 N₂O 浓度及排放通量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8991-9007. PANG J L, WANG X F, LIU T T, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of N₂O concentration and flux from urban small landscape waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 8991-9007.
- [7] YAN X, HAN H J, QIU J, et al. Suburban agriculture increased N lev-

- els but decreased indirect N₂O emissions in an agricultural-urban gradient river[J]. *Water Research*, 2022, 220: 118639.
- [8] RODRIGUEZ-CARDONA B M, WYMORE A S, MCDOWELL W H. Nitrate uptake enhanced by availability of dissolved organic matter in tropical montane streams[J]. *Freshwater Science*, 2021, 40(1): 65–76.
- [9] PATRICK J, MULHOLLAND, ROBERT O, et al. Nitrate removal in stream ecosystems measured by ¹⁵N addition experiments: denitrification[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(3): 666–680.
- [10] HILARY L M, ROBERT O. Linking denitrification with ecosystem respiration in mountain streams[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2019, 4(5): 145–154.
- [11] WAN X S, SHENG H X, DAI M, et al. Epipelagic nitrous oxide production offsets carbon sequestration by the biological pump[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(1): 29–36.
- [12] HU M P, CHEN D J, DAHLGREN R A, et al. Modeling nitrous oxide emission from rivers: a global assessment[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(11): 3566–3582.
- [13] 梅卓华, 方东, 宋永忠, 等. 南京城市生态环境质量评价指标体系研究[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(3): 81–82, 95–120. MEI Z H, FANG T, SONG Y Z, et al. Evaluation index system for urban eco-environmental quality of Nanjing[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 28(3): 81–82, 95–120.
- [14] 马越, 黄廷林, 谭盼, 等. 分层型城市水源水库水质污染及成因分析[J]. 价值工程, 2011, 30(34): 327–329. MA Y, HUANG T L, TAN P, et al. Water quality pollution and cause analysis of stratified reservoir as urban water source[J]. *Value Engineering*, 2011, 30(34): 327–329.
- [15] 许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1239–1247. XU H, CHEN J, ZHU G W, et al. Effect of concentrations of phosphorus and nitrogen on the dominance of Cyanobacteria[J]. *Lake Science*, 2019, 31(5): 1239–1247.
- [16] TERRY R E, TATE R L, DUXBURY J M. The effect of flooding on nitrous oxide emissions from an organic soil[J]. *Soil Science*, 1981, 132(3): 228–232.
- [17] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C5): 7373–7382.
- [18] RAYMOND P A, COLE J J. A Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity[J]. *Estuaries*, 2001, 24(2): 312–317.
- [19] 中国气象数据网. 国家气象科学数据中心[DB/OL].[2023-02-11]. <http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0012.0001.html>. 2022. China Meteorological Data Service Centre. National Meteorological Information Centre[DB/OL].[2023-02-11]. <http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0012.0001.html>. 2022.
- [20] QIAN S S, CRAIG A S, MARK E B. On Monte Carlo methods for Bayesian inference[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 159(2): 269–277.
- [21] WEYHENMEYER G A, JEPPESEN E. Nitrogen deposition induced changes in DOC:NO₃-N ratios determine the efficiency of nitrate removal from freshwaters[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2358–2365.
- [22] DAVID J L, ANDREW T, NICKY B, et al. WinBUGS—a Bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility[J]. *Statistics and computing*, 2000, 10(4): 325–337.
- [23] BARNES R T, SMITH R L, AIKEN G R. Linkages between denitrification and dissolved organic matter quality, Boulder Creek watershed, Colorado[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2012, 117: G01014.
- [24] 孙丽, 宋长春, 黄耀. 沼泽湿地 N₂O 通量特征及 N₂O 与 CO₂ 排放间的关系[J]. 中国环境科学, 2006(5): 532–536. SUN L, SONG C C, HUANG Y. Characteristics of N₂O flux and the relationship between N₂O and CO₂ emission in the marsh wetland[J]. *China Environmental Science*, 2006(5): 532–536.
- [25] 肖化云, 刘丛强, 王仕禄, 等. 硝化和反硝化对湖泊有机质沉积成岩前降解作用的研究[J]. 地球化学, 2003(4): 375–381. XIAO H Y, LIU C Q, WANG S L, et al. Organic degradation by nitrification and denitrification before diagenesis in the Hongfeng Lake, SW China[J]. *Geochimica*, 2003(4): 375–381.
- [26] SOMMERFELD R A, MOSIER A R, MUSSELMAN R C. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets[J]. *Nature*, 1993, 361(6408): 140–142.
- [27] REBECCA T B, RICHARD L S, GEORGE R A. Linkages between denitrification and dissolved organic matter quality, Boulder Creek watershed, Colorado[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G1): 1–14.
- [28] 底阳平, 曾辉, 张扬建, 等. 多尺度碳利用效率研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1849–1860. DI Y P, ZENG H, ZHANG Y J. Research advances in carbon use efficiency at multiple scales[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1849–1860.
- [29] TAYLOR P G, TOWNSEND A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea[J]. *Nature*, 2010, 464(7292): 1178–1181.
- [30] JOHANNA S, LARS L. Greenhouse gas production in a pond sediment: effects of temperature, nitrate, acetate and season[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 387(1): 194–205.
- [31] LIU F, WANG D. Dissolved organic carbon concentration and biodegradability across the global rivers: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151828.
- [32] LIKANEN A, MURTONIEMI T, TANSKANEN H, et al. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 59(3): 269–286.