

# Study of N<sub>2</sub>O Emission at Drawdown Area in Zhuyi River, Three Gorges Reservoir

Xiaohong Wan, Qiwen Wang, Yuchun Wang

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing  
Email: wanxh@iwhr.com

Received: Feb. 4<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

There are some drawdown areas around the three gorges reservoir. Drawdown areas of the three gorges reservoir have many characteristics of wetland ecosystem. However, the ecological characteristics are very complex. The greenhouse gas production and emissions are seldom studied in this zone. This study selected the drawdown area in three gorges upstream tributaries Zhuyi River as the research object. The N<sub>2</sub>O emission flux and the change of environmental nitrogen had been studied continuously. The results showed that the drawdown areas were the important source of N<sub>2</sub>O emission in Zhuyi river and summer was the biggest period of N<sub>2</sub>O emission. Temperature and soil moisture content were the main influencing factors of N<sub>2</sub>O emissions in drawdown area.

## Keywords

Three Gorges Reservoir, Zhuyi River, Drawdown Areas, Greenhouse Gas, N<sub>2</sub>O

---

# 三峡支流朱衣河消落带N<sub>2</sub>O排放特征研究

万晓红, 王启文, 王雨春

中国水利水电科学研究院, 北京  
Email: wanxh@iwhr.com

收稿日期: 2018年2月4日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月28日

---

## 摘要

三峡成库后, 根据其“蓄清排浑”的运行方案, 水库周围形成垂直落差达30 m、总面积达348.93 km<sup>2</sup>的消落带。三峡水库消落带具有湿地生态系统的诸多特征, 但在“反季节性”水库干湿交替和近岸农民

高强度垦殖等多重因素影响下, 其生态特征与过程甚为复杂, 特别是温室气体产生和排放目前研究仍有限, 消落带 $N_2O$ 释放的主要影响因素也尚不明晰。本研究选取三峡上游支流朱一河河湾消落带为研究对象, 通过1年的野外试验, 对 $N_2O$ 排放通量和环境氮素的变化进行了现场连续监测。结果表明, 消落带是三峡上游支流朱衣河河湾温室气体 $N_2O$ 的重要排放源, 夏季是 $N_2O$ 排放最大的时期; 温度和土壤含水率是朱衣河河湾消落带 $N_2O$ 排放的主要影响因素,  $N_2O$ 排放通量随温度的升高呈指数增加, 土壤含水率在35%~60%之间,  $N_2O$ 排放显著。

## 关键词

三峡水库, 朱衣河, 消落带, 温室气体,  $N_2O$

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 科学界逐渐认识到水库(特别是水电水库)温室气体排放及其减排的重要性。目前研究主要关注水体、泄洪沟的温室气体排放及涡轮机带出的大量通过气泡形式排放的温室气体, 但忽视了水库消落带湿地作为水库重要组成部分对水库总温室气体排放的贡献。作为水陆生态系统的交汇地带, 河岸带及湖泊消落带已经在温室气体排放及生物学机制的研究上得到科学界的关注, 并逐步成为生物地球化学循环的研究热点。

$N_2O$ 是一种重要的温室气体, 其辐射强迫(RF)为  $+0.15 \pm 0.02 \text{ Wm}^{-2}$ 。在100年时间尺度上, 氧化亚氮单位分子量的全球增温潜势是 $CO_2$ 的296倍, 是 $CH_4$ 的13倍。作为具有第四大增温潜势的温室气体, 在全球氮循环中,  $N_2O$ 是大气中唯一的长寿命的人类活动干扰示踪物。三峡成库后, 根据其“蓄清排浑”的运行方案, 水库周围将形成垂直落差达30 m(水位145~175 m)、总面积达348.93  $km^2$ 的消落带[1]。三峡水库消落带具有湿地生态系统的诸多特征, 但在“反季节性”水库干湿交替和近岸农民高强度垦殖等多重因素影响下, 其生态特征与过程甚为复杂[2] [3] [4]。但目前相关研究仍有限, 消落带 $N_2O$ 释放的主要影响因素仍不明晰。本研究选取三峡库区上游支流朱一河河湾消落带为研究对象, 通过对 $N_2O$ 排放通量的现场连续监测, 定量分析河湾消落带生态系统中 $N_2O$ 的排放通量变化, 查明消落带非均质生态环境中 $N_2O$ 产生和排放的时空变化特征; 同时, 结合水动力条件和主要水环境化学因素的系统分析, 阐明非均质生态环境中反硝化脱氮作用的主要影响因子, 正确评估河湾消落带在调节河流氮循环以及在 $N_2O$ 释放中的作用, 进而为消除三峡水库蓄的影响, 大幅提高奉节城市水生态景观水平, 全面构建人水和谐城市, 高度体现城市建设的水生态文明, 改善人居环境, 促进奉节经济社会的全面发展提供技术支持[5] [6]。

## 2. 研究区域概况

朱衣河是长江一级支流, 发源于奉节县与云阳县交界处的仙女寺, 沿朱衣河背斜轴部呈东西发育, 在口前汇入长江。朱衣河干流全长31.4公里, 流域面积153.6平方公里, 多年平均流量3.25  $m^3/s$ , 年径流量1.025亿  $m^3$ , 弯曲系数1.25, 库区回水位至朱衣场镇。研究区域多年平均气温为16.8 $^{\circ}C$ , 多年平均年降水量1151.2 mm, 降水多集中于5~9月, 约占全年降水量的70%, 12月至次年2月降水较少。为了研究的可行性和代表性, 采样点分别选择朱衣(109 $^{\circ}25'16''E$ , 31 $^{\circ}01'11''N$ )、清水(109 $^{\circ}26'20''E$ , 31 $^{\circ}01'07''N$ )和口前(109 $^{\circ}27'01''E$ , 31 $^{\circ}00'43''N$ )作为研究区, 如图1所示。



Figure 1. Sketch of the study area

图 1. 研究区示意图

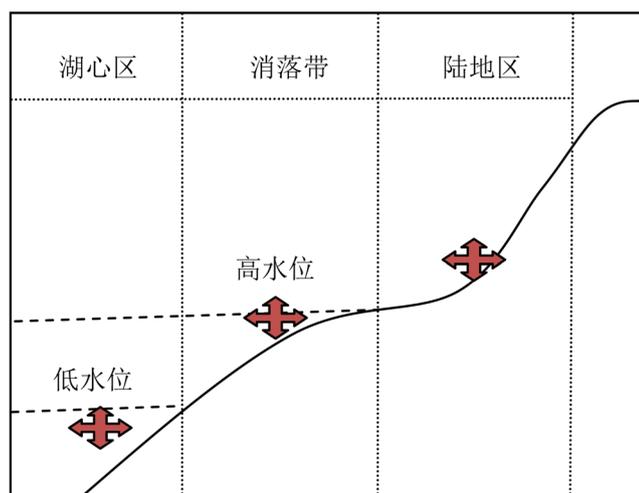


Figure 2. Sketch of the sampling point

图 2. 采样点示意图

根据 Wetzel 的分类方法[7], 将各研究区分为三个采样区, 陆地区是指完全位于水体高水位之上的植被长区(陆地区种植植被主要为经济作物脐橙); 湖心区是完全淹水的区域, 无大型水生植物生长; 在陆地区 and 湖心区之间是水位变幅较大的消落带, 每个采样区设一个采样点, 具体布点如图 2 所示。

### 3. 材料与方法

#### 3.1. 样品采集

##### 3.1.1. 上覆水样

本次研究采用有机玻璃管采集表层(0~10 cm)完整水柱混合样, 将样品装入洗涤干净的 500 mL 聚乙烯样品瓶中, 放入含有冰袋的保温箱中。

### 3.1.2. 沉积物孔隙水样

沉积物孔隙水通过对采集的新鲜分层沉积物在 4000 r/min 的转速下离心 10 min, 上清液过 0.45 μm 醋酸纤维微孔滤膜获得, 置于玻璃瓶中冷藏保存。

### 3.1.3. 沉积物/土壤样

采用两种方法采集沉积物/土壤样品, 第一种采用柱状采样器采集完整软泥层沉积物样品, 然后静置 10 分钟, 虹吸去除上覆水, 从表层到底层, 按 2 cm 间隔切割获得分层泥样; 第二种是采集岸上无水区的表层(0~10 cm)土壤样品。每点随机采集 3 个样品, 分别测定后取平均值为该采样点样品值。所有样品装入聚乙烯的保鲜袋中, 暂存于便携保温箱中冷藏保存。

### 3.1.4. 气体样

N<sub>2</sub>O 气体采集采用密闭静态箱法。气体采样箱由顶部密封的箱体(内部抛光的不锈钢圆筒)和中通的底座两部分组成, 箱体规格为直径 40 cm, 高 50 cm, 箱体顶部开有三个小孔, 分别是聚四氟乙烯管(3 mm)连通的采气孔、风扇接线口和箱内温度探头接线口, 箱内顶部边缘两侧对称斜向 45°安装两个搅拌小风扇。底座规格为直径 40 cm, 高 25 cm, 上部外缘加密封槽(内径 1 cm, 深 2 cm), 密封槽下缘装有充气轮胎(内径 40 cm, 外径 50 cm), 起到浮圈的作用。采样箱内还设有测量箱内气体温度的探头, 温度探头与温度数显表相连, 数显温度计和风扇均由 12 V 蓄电池供电。

N<sub>2</sub>O 气体采集分为无水区采集和水上采集两种形式, 在无水区于前一天将采样箱底座下部压入土中 5 cm 深, 周围踩实, 采样当天将箱体与底座连接; 水面上则将底座、箱体和浮圈固定好, 由浮圈保证通量箱在水中的平衡。采样时, 先开启风扇, 让箱内气体与采样点周围的空气充分混合 5 min, 立刻用 100 mL 一次性注射器采集第一个背景值气样, 气样量约为 300 mL 左右, 随后每间隔十分钟采集一次, 共采集四次, 完成一点气体的采集。每次抽气采样时都要测定该时刻的气压和气温, 采集的气体储存于气体采集袋中, 低温避光保存, 并尽快完成浓度测定。

一般水体中 N<sub>2</sub>O 的释放高峰较陆地的提前 1~5 h, 水体在 11:00~12:00 左右达到最大值, 而陆地则在 13:00~17:00 达到最大[8], 有研究表明 N<sub>2</sub>O 排放的日平均值出现在 09:00 和 19:00 时[9], 但是排放的规律并非固定不变的, 通常气温决定了其排放的模式[10]。为尽可能保证样品具有很好的全天代表性, N<sub>2</sub>O 排放通量年变化的样品采集时间一般设在上午 9:30~14:00, 从水体向岸边依次采集。

## 3.2. 样品分析

### 3.2.1 水样和土样分析

为保证数据可对比性, 研究中水样和土壤样品分析尽量选用标准方法, 主要方法见表 1。

### 3.2.2. 温室气体分析

本研究对 N<sub>2</sub>O 排放通量进行分析。在实验室用气象色谱同时测定 N<sub>2</sub>O 浓度, 其中 N<sub>2</sub>O 采用电子捕获检测器检测。

通量(F)计算公式如下:

$$F = \Delta m / (A \cdot \Delta t) = \rho \cdot v \cdot \Delta c / (A \cdot \Delta t) = \rho \cdot h \cdot \Delta c / \Delta t$$

式中, F 为被测气体通量(mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>), A 为采样箱底座所包围的土壤面积, Δm/Δt 为采样箱内被测气体质量随时间的变化, v 为采样箱的容积, ρ 为箱内气体密度(ρ = n/v = P/RT, 单位为 mol·m<sup>-3</sup>, P 为箱内气压, T 为箱内气温, R 为气体常数), h 为采样箱高度, Δc/Δt 为被测气体在采样时间内浓度随时间的变化。

气体采集同时, 现场对气温、气压、风速和风向进行测定, 其中气温和气压用长春气象仪器厂生产

**Table 1.** Project of analysis and method of measurement**表 1.** 水样分析项目和测定方法

项目	测定方法	备注
水温	便携式多参数测定仪	
DO	便携式多参数测定仪(膜电极法)	德国生产的 schott 便携式水质测定仪测定
pH	便携式多参数测定仪(玻璃电极法)	
COD <sub>Mn</sub>	高锰酸钾法	GB 11892-89
NH <sup>4+</sup> -N	纳氏试剂光度法	GB 7479-87
NO <sup>3-</sup> -N	酚二磺酸光度法	GB 7480-87
NO <sup>2-</sup> -N	N-(1-萘基)-乙二胺光度法	GB 7493-87
TN	碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法	GB 11894-89
土壤含水率	质量差量法	新鲜土样水分测定

的 DYM3 型空盒气压表测定，风速和风向用天津气象仪器厂生产的 DEM6 型三杯风向风速表测定。

### 3.3. 统计方法

本论文采用 Kolmogorov-Smirnov 方法检验各变量的正态分布，如不服从正态分布，通过自然对数转换使之标准化。采用方差分析检验正态分布或标准化后的变量之间的差异性，如对数转换无法实现标准化，则用非参数方法(Mann-Whitney U 和 Kruskal-Wallis Post Hoc tests)比较变量的差异。分别采用 Pearson 和 Spearman 方法检验正态分布的变量之间和非正态分布环境变量之间的相关性。除特殊声明，所有分析方法的置信度都为 95%。对所有残差进行独立性，一致性和正态分布性的检验。一些特殊的分析方法在各章具体阐述。所有分析均是通过 EXCEL 和 SPSS 软件完成。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 河湾消落带 N<sub>2</sub>O 产生和排放的时空变化特征分析

#### 4.1.1. N<sub>2</sub>O 排放通量的时间变化

由于温度、水分、氧气和微生物等环境和生物因素是影响 N<sub>2</sub>O 的排放的重要因子，而这些因子直接受到季节的影响，因此，季节的变化会导致朱衣河河湾消落带 N<sub>2</sub>O 排放量的改变，朱衣河河湾消落带 N<sub>2</sub>O 排放通量的时间变化结果见图 3。

由图 3 可以看出，朱衣河河湾消落带 4 月 N<sub>2</sub>O 的排放量较高，5 月以后 N<sub>2</sub>O 排放量呈现明显的时间变化，即在 5~8 月 N<sub>2</sub>O 排放量逐渐增加，8 月达到最大，9 月 N<sub>2</sub>O 排放量减少。N<sub>2</sub>O 排放量的这一变化趋势不仅与季节变化有关，也与三峡水库水量调度关系相一致。朱衣河河湾随着水量的调度消落带土壤含水量不断变化，从而影响了 N<sub>2</sub>O 的排放。

土壤含水量直接影响微生物的硝化作用，当土壤含水量在最适时增加或减少都会影响微生物的活性，从而降低土壤中氮素的硝化作用。有研究指出当土壤水分达到饱和时，其硝化作用接近于零，这很可能是影响到了土壤的通气性，使得硝化作用所需的氧化剂，即氧严重匮乏，阻碍了硝化作用的进行。氨氧化的过程中硝化过程中主要产生气相氮化物，而在此过程中首先由亚硝酸细菌将其氧化为亚硝酸离子，继而由硝酸细菌将亚硝酸离子氧化为硝酸离子。气态氮化物包括 NO 和 N<sub>2</sub>O 的产生，其中 NO 产生的量一般高于 N<sub>2</sub>O，NO 与 N<sub>2</sub>O 的比值通常在 20% 左右。而在异养硝化过程中，低价氮化合物氧化的能量并不是微生物的唯一能源，它们还可同时利用其它化合物氧化所得能量，如碳水化合物。相比自养硝化而

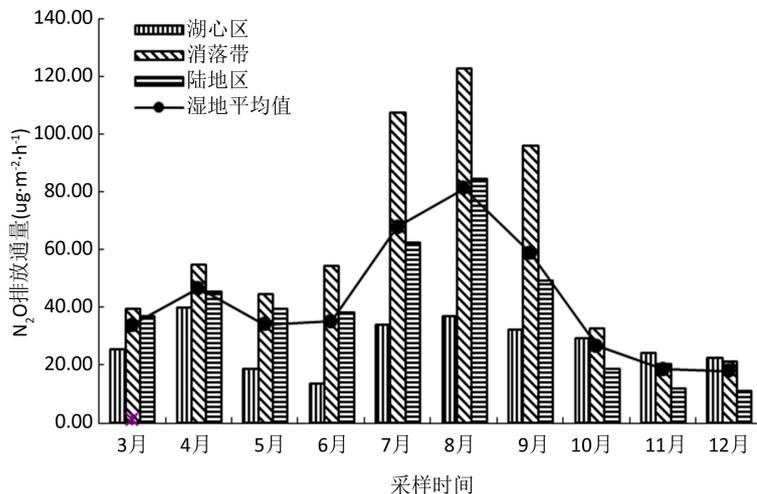


Figure 3. The time variation of N<sub>2</sub>O emission fluxes  
图 3. N<sub>2</sub>O 排放通量时间变化图

言, 异养硝化过程在很大程度上不受土壤氮矿化过程的限制; 并且  $\text{NH}_4^+$  离子或有机物质都可进行硝化作用。

在大多数情况下, 有的反硝化微生物并不能够彻底完成整个反硝化的全过程, 因而  $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$  都可能产生。其中更为常见的终极产物是  $\text{N}_2\text{O}$ , 因为相对  $\text{NO}$  的还原作用而言, 只有少数反硝化微生物能够将  $\text{N}_2\text{O}$  还原为氮气。

只有细菌是能够参与土壤反硝化过程的微生物, 当然其中好气、嫌气和兼性这几种呼吸类型都包括。基本上所有的反硝化微生物都通过氧化有机碳而得到电子和碳源, 这是因为反硝化这个过程本身是一个吸热反应, 需要外界提供反应所需的能量。因此, 其反硝化强度常与土壤中有有机碳的含量(热源)有着密切的关系, 呈正相关。对于诸如  $\text{N}_2\text{O}$  这种温室气体的排放过程及源汇研究而言, 极为重要的是反硝化过程所释放的  $\text{N}_2\text{O}$  释放量要多于硝化过程的  $\text{N}_2\text{O}$  的数量, 反硝化作用是土壤氮素转化过程中释放气相氮化物的主要过程。

在反硝化过程中, 土壤有机碳的有效性、土壤水分含量、底物含量或氧分压、pH 等都会影响释放气相氮化物的数量和它们的组成比例。土壤中的氧气, 不论是土壤溶液中溶解的游离氧还是土壤空隙中的非溶解氧, 相比其他的环境因子更易于抑制  $\text{N}_2\text{O}$  还原到氮气这一过程, 原因在上文中已经提到, 反硝化过程本身是一个吸热反应。因此在一定范围内, 当氧分压增加时, 反硝化过程所产生的氧化亚氮的量就会增加, 单质氮气的含量会减少, 即  $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$  值增加, 反之, 则  $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$  值会降低。相关报道在土壤处于干湿交替的过程中时, 就会发生较高的反硝化作用率[11]。这是由于干湿交替的土壤中, 为硝化和反硝化作用都会间隙地提供有利反应条件, 处于干性条件下的土壤为硝化作用提供了相对好氧的环境, 而土壤含水量较大, 即土壤湿度较大时, 土壤中的含氧量就会相对降低, 此时会为反硝化作用提供一个相对厌氧的有利条件。土壤存水孔隙超过 60% 时, 反硝化作用随土壤含水量的升高而升高[12]。但土壤处于此时的时间不宜过长, 若土壤在一段时期内很湿, 虽然相对较高的含水量为反硝化作用提供相对厌氧的条件, 反硝化作用反而会停止, 这很可能是土壤含水量太大超过一定的时间反而阻止会气体的扩散。

土壤中的通气状况和气体的扩散速率受土壤水分控制, 在水分状况下较为合适时, 硝化作用中亚硝酸根离子与硝酸根离子的比率和产量都会随土壤含水量的增加而增加; 但土壤含水量增加至一定值后, 会因为土壤的通气性变差, 反硝化作用趋势会长超过硝化作用的趋势而占主导,  $\text{N}_2\text{O}$  的产量也会在一定范围内增加。

### 4.1.2. N<sub>2</sub>O 排放通量的空间变化

随着时间的变化, 朱衣河河湾消落带 N<sub>2</sub>O 的排放通量呈现明显的空间差异性, 图 4 是朱衣河河湾消落带 N<sub>2</sub>O 排放通量的空间变化图。由图 4 可以看出, 湖心区 N<sub>2</sub>O 的排放通量除 4 月份外都较低, 且没有明显的变化规律; 陆地区则呈现出较好的变化规律, 随时间变化 N<sub>2</sub>O 的排放通量平稳增加, 8 月达到最大值后逐渐降低; 消落带是 N<sub>2</sub>O 排放通量变化最大的区域。

5 月份以后降雨逐渐增多, 消落带土壤出现频繁的干湿交替现象, N<sub>2</sub>O 的排放特征也表现为消落带 > 陆地区 > 湖心区。消落带的干湿交替作用一方面保持了土壤的良好水分状况, 另一方面创造了有利于硝化和反硝化作用的氧化还原条件, 硝化产物为反硝化作用提供了充足的硝态氮源, 促进了 N<sub>2</sub>O 的生成和排放[13], 使消落带成为朱衣河 N<sub>2</sub>O 排放通量最大的区域。陆地区生长旺盛的植被通过组织向根际输送氧气, 在根际附近形成氧化区, 将矿化形成的铵态氮转化为硝态氮, 生成的硝态氮通过浓度梯度扩散到远离根际的还原区进行反硝化反应, 对 N<sub>2</sub>O 的排放起到一定的促进作用, 但仍小于消落带 N<sub>2</sub>O 的排放通量。而湖心区由于长期处于淹水状况, 不利于 N<sub>2</sub>O 的产生和排放, 所以表现为较小的 N<sub>2</sub>O 排放通量。由此可知, 在植物生长季节中, 朱衣河 N<sub>2</sub>O 排放活跃区是处于水位变幅区的消落带。

## 4.2. 河湾消落带 N<sub>2</sub>O 产生和排放的主要影响因子分析

### 4.2.1. 温度与 N<sub>2</sub>O 排放通量的关系

温度也是影响反硝化作用的重要因素之一, 大量研究发现温度高的地方, 反硝化速率也高, 随着温度的降低反硝化速率明显变小。在各种浅水环境中, 温度表现出强烈的季节变化, 有可能成为控制反硝化速率的主要因子。土壤温度影响微生物的代谢活动及硝化和反硝化。在一定温度范围内, 土壤微生物的活性、硝化-反硝化速率和 N<sub>2</sub>O 排放速率一般都随土壤温度升高而增加。有研究表明, 在 10℃~30℃ 范围内, 随着土壤表层温度的升高, N<sub>2</sub>O 的排放通量在不同程度上有一定的增加[14]。

由图 5 温度和朱衣河河湾消落带 N<sub>2</sub>O 排放通量的关系图可以看出, 朱衣河河湾消落带 N<sub>2</sub>O 排放通量随温度的升高呈指数增加, 主要是因为温度升高促进了硝化、反硝化细菌的生长, 同时它们的各种活性也相应增加, 促进了 N<sub>2</sub>O 的产生和排放。

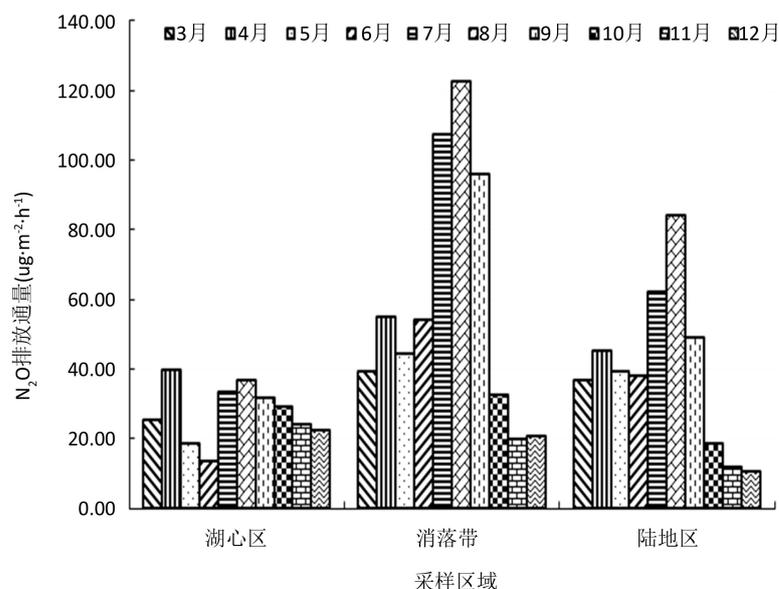


Figure 4. The space variation of N<sub>2</sub>O emission fluxes

图 4. N<sub>2</sub>O 排放通量空间变化图

### 4.2.2. 土壤含水率与 N<sub>2</sub>O 排放通量的关系

土壤水分是土壤的重要组成部分，土壤中不断进行着的各种物质和能量的转换过程都必须在水分的参与下进行。水对所有微生物的生命过程都是必须的，当土壤含水量极低时，水的可利用性就会限制微生物过程，而当含量过高时，透气性则成为主要的调节因子[15]。因此，土壤水分含量直接影响硝化和反硝化过程，进而改变 N<sub>2</sub>O 的排放量。当土壤含水量较小时，土壤呈氧化状态，有利于硝化作用并最终产生 NO<sup>3-</sup>；当土壤含水量太高时，土壤呈还原态，铵氮氧化酶活性受到抑制，N<sub>2</sub>O 还原酶活性较高，有利于反硝化作用并最终生成 N<sub>2</sub>；只有含水量处于中等水平时，硝化作用和反硝化作用产生 N<sub>2</sub>O 的贡献几乎相当，并导致大量的 N<sub>2</sub>O 生成与排放[16]。

由图 6 可见，朱衣河河湾在 5~9 月由于受到三峡水库在汛期按防洪限制水位 145 m 高程运行的影响，消落带大面积裸露，同时雨季的到来使得消落带出现频繁的干湿交替现象，土壤含水率保持在 35%~60% 之间，因此导致 N<sub>2</sub>O 排放通量增加。相关报道在土壤处于干湿交替的过程中时，就会发生较高的反硝化作用率。这是由于干湿交替的土壤中，为硝化和反硝化作用都会间隙地提供有利反应条件，处于干性条

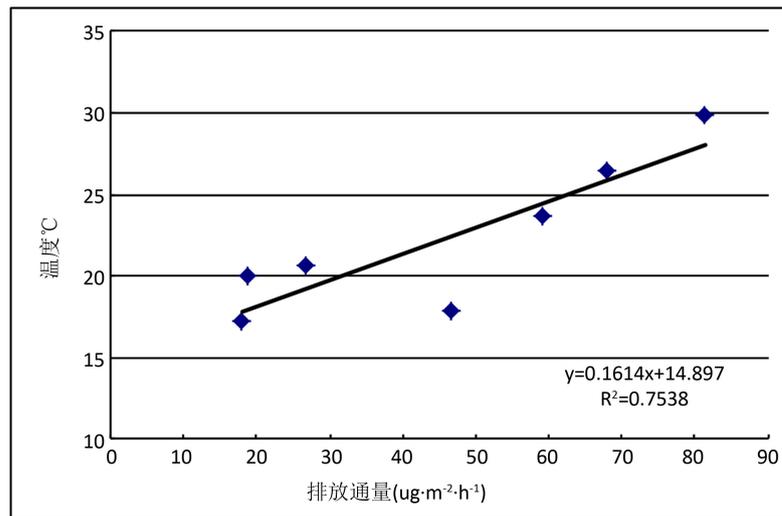


Figure 5. The relationship between water temperature and N<sub>2</sub>O emission flux  
图 5. 水温与 N<sub>2</sub>O 排放通量的关系图

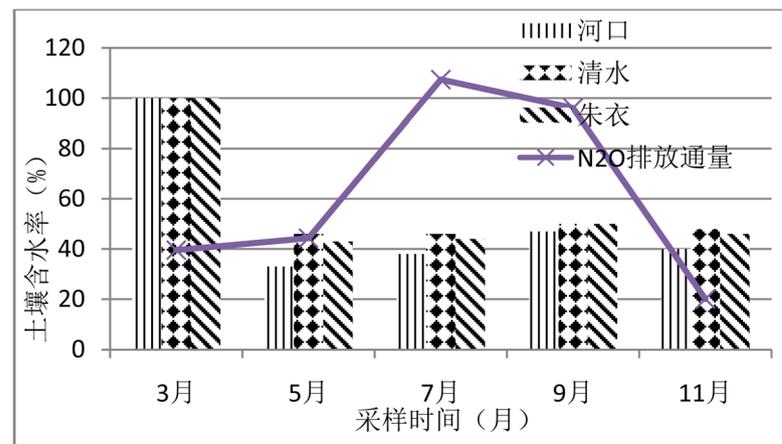


Figure 6. The relationship between soil moisture content and N<sub>2</sub>O emission flux  
图 6. 土壤含水率与 N<sub>2</sub>O 排放通量的关系

件下的土壤为硝化作用提供了相对好氧的环境，而土壤含水量较大，即土壤湿度较大时，土壤中的含氧量就会相对降低，此时会为反硝化作用提供一个相对厌氧的有利条件。土壤存水孔隙超过 60% 时，反硝化作用随土壤含水量的升高而升高。但土壤处于此时的时间不宜过长，若土壤在一段时期内很湿，虽然相对较高的含水量为反硝化作用提供相对厌氧的条件，反硝化作用反而会停止，这很可能是土壤含水量太大超过一定的时间反而阻止会气体的扩散。

土壤中的通气状况和气体的扩散速率受土壤水分控制，在水分状况下较为合适时，硝化作用中亚硝酸根离子与硝酸根离子的比率和产量都会随土壤含水量的增加而增加；但土壤含水量增加至一定值后，会因为土壤的通气性变差，反硝化作用趋势会长超过消化作用的趋势而占主导， $N_2O$  的产量也会在一定范围内增加。

一般而言，适宜于进行硝化作用的水分含量为 30%~70%，但当其值超过 60% 时，由于土壤通气性降低，随着反硝化作用的增强，所产生的  $N_2O$  也增加。但是当土壤含水量过高时，使硝化作用的产物以单质氮气为主， $N_2O$  生产的过程会受到抑制，其产量将降低。

## 5. 结论

面对三峡这样的特大型水库，上游形成大面积的消落带区域，因此，我们要重视消落带夏季出露期间氮的排放，以及冬季淹没季节植物在水下厌氧分解所产生的二次污染及少量的氮排放。本次研究通过 1 年的野外试验，获得了以下的主要结论：

1) 消落带是三峡上游支流朱衣河河湾温室气体  $N_2O$  的重要排放源：

朱衣河河湾消落带不同试验区  $N_2O$  排放通量都表现出较一致的变化趋势，在时间上，夏季是  $N_2O$  排放较大的时期，8 月的排放量达到最大值；在空间上，消落带的  $N_2O$  排放通量大多数时间都大于湖心区和陆地区，说明消落带是朱衣河河湾消落带  $N_2O$  排放通量的主要区域。

2) 消落带  $N_2O$  排放通量的变化与其环境条件密切相关：

朱衣河河湾消落带  $N_2O$  排放通量随温度的升高呈指数增加，说明温度升高促进了硝化、反硝化细菌的生长，同时它们的各种活性也相应增加，促进了  $N_2O$  的产生和排放。

朱衣河河湾在 5~9 月由于受到三峡水库在汛期按防洪限制水位 145 m 高程运行的影响，消落带大面积裸露，同时雨季的到来使得消落带出现频繁的干湿交替现象，土壤含水率保持在 35%~60% 之间，进而导致  $N_2O$  排放通量的增加。

## 参考文献 (References)

- [1] 郭劲松, 贺阳, 付川, 等. 三峡库区腹心地带消落带土壤氮磷含量调查[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 311-317.
- [2] 余明星, 邱波, 夏凡, 等. 三峡水库蓄水前后干流水质特征与变化趋势研究[J]. 人民长江, 2011, 42(23): 34-38.
- [3] 郭平, 龚宇, 李永建, 等. 三峡水库 135 Hi 水位蓄水典型次级河流回水段富营养化检测评价[J]. 中国环境检测, 2005, 21(2): 88-89.
- [4] 周子然, 邓兵, 王雨春, 等. 三峡库区干支流水体交换特征初步研究[J]. 人民长江, 2015, 46(22): 1-6.
- [5] 邵蕾. 后三峡时期三峡库区可持续发展研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [6] 潘晓洁, 万成炎, 张志永, 等. 三峡水库消落区的保护与生态修复[J]. 人民长江, 2015, 46(19): 90-96.
- [7] Wetzel, R.G. (2001) Limology Lake and River Ecosystems. 3rd Edition, Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, 151-167, 274-288.
- [8] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田  $CH_4$  和  $N_2O$  的排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 231-237.
- [9] Dong, Y., Zhang, S., Qi, Y., et al. (2000) Fluxes of  $CO_2$ ,  $N_2O$  and  $CH_4$  from a Typical Temperate Grassland in Inner Mongolia and Its Daily Variation. *Chinese Science Bulletin*, 45, 1590-1594.

<https://doi.org/10.1007/BF02886219>

- [10] 刘景双, 王金达, 李仲根, 等. 三江平原沼泽湿地  $N_2O$  浓度与排放特征初步研究[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 33-39.
- [11] Gardner, L.M. and White, J.R. (2010) Denitrification Enzyme Activity as an Indicator of Nitrate Movement through a Diversion Wetland. *Soil Science Society of America Journal*, **74**, 1037-1047.
- [12] Beare, M.H., Gregorich, E.G. and St-Georges, P. (2009) Compaction Effects on  $CO_2$  and  $N_2O$  Production during Drying and Rewetting of Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**, 611-621. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.024>
- [13] Fennessy, M.S. and Cronk, J.K. (1997) The Effectiveness and Restoration Potential of Riparian Ecotones for the Management of Nonpoint Source Pollution, Particularly Nitrate. *Critical Review in Environmental Science and Technology*, **27**, 285-317. <https://doi.org/10.1080/10643389709388502>
- [14] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田  $N_2O$  产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- [15] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 等. 太湖地区湖水与河水中溶解  $N_2O$  及其排放[J]. 环境科学, 2002, 23(6): 26-30.
- [16] 杨晶, 张桂玲, 赵玉川, 等. 胶州湾河口潮滩沉积物中  $N_2O$  的产生和释放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2723-2732.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)