

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

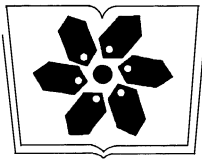
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203270420

袁淑方, 王为东. 太湖流域源头溪流氧化亚氮 (N_2O) 释放特征. 生态学报, 2012, 32(20): 6279-6288.

Yuan S F, Wang W D. Characteristics of nitrous oxide (N_2O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6279-6288.

太湖流域源头溪流氧化亚氮 (N_2O) 释放特征

袁淑方^{1,2}, 王为东^{1,*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用密闭箱法研究太湖流域源头溪流 N_2O 释放特征及其影响因素。结果显示: 南苕溪 N_2O 释放通量范围在 $-18.11 \sim 397.42 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值为 $(30.37 \pm 10.87) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。溪流 N_2O 释放呈现明显的季节模式。冬季释放通量最低, 仅为 $(9.69 \pm 7.10) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 夏季释放通量较高, 为 $(17.17 \pm 17.35) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 而释放高峰发生于汛期, 其 N_2O 释放通量可达 $(125.97 \pm 90.77) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。持续降雨带来的山洪爆发及大量径流输入是造成汛期 N_2O 大量释放的主要原因。从上游源头区至下游农田与城区, N_2O 释放通量逐渐升高; 流域污染梯度对 N_2O 释放通量影响显著。统计分析表明: 水体硝态氮负荷是控制流域 N_2O 释放通量变化的主导因素, 其他因素如磷含量、溶解氧、地势因素对通量也具有倾向性的显著影响。估算苕溪干流临安段 N_2O 年释放通量可达到 0.38 t/a 。结果显示: 河流人为污染负荷增加时可显著促进河流 N_2O 的释放。

关键词: 排放通量; 污染负荷; 景观梯度; 硝态氮; 源头河流; 南苕溪

Characteristics of nitrous oxide (N_2O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin

YUAN Shufang^{1,2}, WANG Weidong^{1,*}

1 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Anthropogenic sources of nitrous oxide (N_2O) have received a great deal of attention in recent years. Agricultural fertilization has been shown to be one of the most important sources of N_2O . However, the impact of urbanization in the agricultural watershed on regional N_2O emission is currently not well understood. China has been undergoing rapid urbanization, which has had a stimulating effect on aquatic N_2O emissions. Accordingly, there is an urgent need for assessment of the regional N_2O budget. Therefore, this study was conducted to reveal the N_2O emission characteristics and possible response mechanisms of a typical headstream under the human disturbed landscape gradients. The specific objectives were to investigate how nitrogen is transported and transformed with landscape gradient, as well as whether N_2O emission fluxes are significant and responsive to the load gradient over spatial and temporal scales in the South Tiaoxi River (STR), which is the most important headwater stream in the Taihu Lake Basin. N_2O emission rates ranged from -18.11 to $397.42 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and averaged $(30.37 \pm 10.87) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Moreover, the emissions followed a seasonal pattern, with the lowest values $(9.69 \pm 7.10) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ being observed in winter, moderate values $(17.17 \pm 17.35) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ occurring in summer, and the highest values $(125.97 \pm 90.77) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ being recorded during the flood season. The significantly high N_2O emission rates during the flood period were mainly ascribed to the large amount of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40701086); 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题 (2008ZX07101-006-08); 环境水质学国家重点实验室青年人才自由探索基金 (10Y01ESPCR)

收稿日期: 2012-03-27; 修订日期: 2012-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wdwangh@yahoo.com

overland runoff input caused by continuous rainfall. N_2O emission rates responded to the landscape gradient in the watershed, gradually increasing along the stream from the upper headwaters region to the lower farmland and urban areas. Statistical analyses revealed that the nitrate (NO_3^- -N) load predominantly determined the variations in stream N_2O emission rates, while other factors such as phosphorus content, dissolved oxygen, and topography played lesser roles. The South Tiaoxi River was found to be a net source of N_2O to the atmosphere, with total annual N_2O emissions from the main stream of the STR estimated to be as high as 0.38 t/a. This case study demonstrated that allochthonous pollution load inputs might dramatically stimulate aquatic N_2O emissions from a montane headstream with relatively little sediment. Since the exchange of N_2O across the gas-water interface is a complex process that involves river microbial activities, pollution loading, gas-water exchange dynamic factors as well as river hydrology and hydraulics, its mechanism requires deeper and more extensive study to enable more accurate estimation of N_2O emission fluxes and relevant climate effects at the global scale.

Key Words: headwater stream; release rate; landscape gradient; pollution loading; nitrate nitrogen (NO_3^- -N); South Tiaoxi River

氧化亚氮(N_2O)因具有显著的增温潜势、臭氧层破坏效应及在大气环境中持续存在的特性而逐渐受到广泛的关注^[1-2]。随着人类向自然界输入氮(N)负荷的急剧增加,人为源 N_2O 释放占总释放量的比重也越来越大^[3]。以农田为代表的陆地生态系统已有较广泛的 N_2O 释放通量研究与报道^[4]。水域生态系统作为氮源输入的最终受体,近几年其 N_2O 释放效应关注逐渐增加。以河流湖库为主的淡水生态系统是氮素非常重要的“汇”,伴随淡水生态系统氮负荷大量增加,其氮循环中 N_2O 的释放不可忽视。Seitzinger 等人根据河流无机氮的输出,估算河流、河口和海岸带中人为输入造成的 N_2O 释放,中国和东南亚占到了全球水域系统 N_2O 释放的 50%^[5]。国外已有大量针对不同类型河流 N_2O 含量及释放通量的报道,包括入海河口、大型河流、源头溪流等^[6-10]。国内报道多数集中在大型河流个别位点或河流入海口^[11-14],尚未见就单个河流流域做较为系统的研究。

苕溪水系作为太湖上游最大水系,地处流域内的暴雨区,每年汇入太湖约 30 亿 m^3 水资源,约占入太湖水总量的 70%。目前苕溪上游农业及城镇面源污染已成为威胁源头河流水质安全的重要隐患。南苕溪所在临安市处于典型城镇化进程之中。与城镇化进程对应的是土地利用结构类型的转换及农业面源污染的加剧。在城镇化进程带来高污染负荷的背景下,源头河流中氮素如何迁移转化? 河流 N_2O 释放通量是否随污染负荷变化? 以南苕溪为代表的山溪性河流时空上表现出怎样的 N_2O 释放特征? 其影响因素是否具有一定特异性? 这些都亟待展开研究。

选取苕溪临安段为对象,开展源头溪流 N_2O 释放特征及其影响因素研究。该区段自流域上游至下游依次经过太湖源、里畈水库、杨岭乡、临安城区至河口段最后汇入青山湖水库。流域具有典型的土地利用变迁及相应污染梯度变化特征。源头森林区以山溪为主,地势较高,溪流汇水至里畈水库。中游杨岭乡主要分布农田、村镇,其中不乏各类工厂。下游至临安市区,地势较为平缓,河流渠道化十分严重。及至马溪汇入,河流经长桥河口后汇入青山湖水库。流域山溪性源头溪流特征以及人类活动影响的污染负荷效应均较为凸显。在此相对完整的溪流流域开展 N_2O 释放特征的研究,其结果可以为加强了解源头溪流及类似河流 N_2O 释放特征及其污染负荷响应机制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南苕溪属于山溪性河流,坡陡流急。研究区域自太湖源至入青山湖水库河口(图 1),大致覆盖了南苕溪总河长 47.5 km 的范围。河道平均坡度 6‰,流域面积 603 km^2 。桥东村以上,河道坡降约为 10‰;其后至临安段,河道坡降约为 6.7‰;临安市区至青山湖水库段约为 2.86‰。青山湖水库水文站多年实测南苕溪上游

平均流量为 $14.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上游里畈水库为临安市主要饮用水水源地,相应库容 1603 万 m^3 。下游青山湖水库为余杭及杭州市备用水库,正常蓄水库容 3600 万 m^3 ,控制了南苕溪主要来水量^[15]。流域属北亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛,多年平均降水量 1500 mm 。5 月中旬至 7 月中旬为梅汛期,其后至 10 月中旬为台汛期。多年平均降雨日为 161 d,多年平均气温 $15.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 研究方法

经过对苕溪上游临安段河流实地考察及流域特征研究,于不同土地利用类型区域及支流汇入位置合理设置采样点。2011 年 1 月至 9 月间,每月由上游至下游采集水样及气样。于每个采样点处原位测定水质参数并采集表层水样。使用密闭箱法采集气体样品(图 2)。采样前将箱内环境与背景空气混匀 1—2 min,通量箱固定浮于水上后用铝箔气袋每 4—6 min 采集一个气样,20—25 min 内共采集 5 个样品用于计算通量。每个位点设置两个通量箱以作平行。由于河流坡陡流急,河床构成主要为卵石及沙粒,因此未采集沉积物样品。

原位水质参数包括温度($^\circ\text{C}$)、溶解氧(DO)、pH 值、电导率(EC)及氧化还原电位(ORP),由 YSI Professional Plus 便携式水质分析仪(YSI 公司,美国)现场测得。表层水样采集后冷藏保存运至当地实验站,24 h 内完成分析测定。原水样用过硫酸钾消解法测定总氮(TN)与总磷(TP),用反应器消解法测定化学需氧量(COD_{Cr})。抽滤水样采用铈钼还原法测定硝态氮(NO_3^--N),纳氏试剂比色法测定氨态氮(NH_4^+-N),盐酸萘乙二胺比色法测定亚硝态氮(NO_2^--N);活性磷(SRP)测定采用钼锑抗分光光度法。用称量法测得总悬浮颗粒物(TSS)。总碳(TC)、总无机碳(TIC)、总有机碳(TOC)由德国 Elementar 公司 TOC 仪测定。气体样品避光保存运回北京实验室于一周内完成分析测定。气样中 N_2O 浓度采用带 10 通阀的气相色谱仪(SP-3410)进行测定。色谱预处理柱(2 m, 4 mm 外径)和主分离柱(2 m, 4 mm 外径)用 Porapad-Q (80—100 目)填充。检测器为电子捕获检测器(ECD, Ni^{63}),测定 N_2O 的柱温、进样口温度和检测器温度分别为 $72 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $72 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $390 \text{ }^\circ\text{C}$ 。少量的 CO_2 ($6 \text{ mL}/\text{min}$) 气体通入检测器以提高检测器的灵敏性和重复性。

1.3 统计分析

采用 SAS System for Windows 9.0 统计软件(美国 SAS 软件研究所)进行数据处理和统计分析,若无特别说明,均采用 $\alpha=0.05$ 显著性水平。首先对 N_2O 通量及环境变量进行正态性检验。包括 N_2O 通量在内的大部分变量不服从正态分布,从而采用非参数方法对 N_2O 通量的时间及空间差异进行方差分析。为研究影响 N_2O 释放通量的因素,分别于流域尺度及各土地利用类型河段计算 N_2O 通量及环境变量间的 Spearman 相关系数,寻找对前者具有显著影响的环境因素。由于众多环境变量相互之间存在关联,因此采用因子分析对原始环境变量进行共性分析,选取最大方差法旋转原始因子,得出少数相互独立的公因子;然后以所得因子对 N_2O 通量进行逐步回归。



图1 南苕溪流域采样点分布

Fig. 1 Sampling stations in South Tiaoxi River watershed

采样点由上游至下游分别为:①源头区:太湖源景区、太湖源、里畈水库入口、里畈水库出口;②农田区:杨岭、浪口、出水坝、弯道;③临安区:近弯道、钢铁实业、平台2、平台1、平台;④马溪支流:马溪、马溪口、长桥;⑤河口区:河口上段、河口中段、河口下段;⑥入湖口:青山湖入口

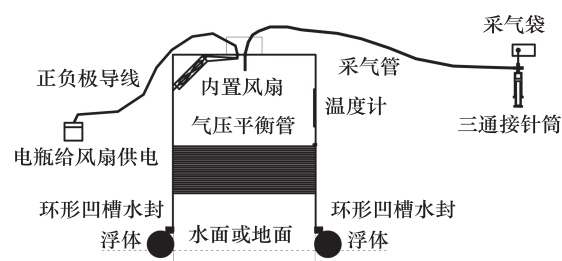


图2 水陆两用密闭箱法气体采样箱示意图

Fig. 2 Setup of closed opaque chamber for amphibious gas sampling

2 结果

2.1 N₂O 释放通量时间差异

N₂O 释放通量具有较明显的季节模式(图3)。从1月至6月,N₂O 释放通量逐渐升高。1月为临安一年中温度最低时期,N₂O 平均通量仅为(7.96 ± 0.66) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随着温度逐渐升高,2月至4月通量值逐渐增长,4月时达到(48.29 ± 12.60) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。N₂O 释放的峰值出现在梅汛期中期而非夏季。6月初开始出现一年中首次较高强度且持续的降雨,至6月中旬累计降雨量达到了400—500 mm。南苕溪整体上呈现典型山溪性河流山洪爆发的特征。此时温度有所降低,均温约20℃,而河流N₂O 释放通量高达(397.42 ± 70.51) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于一年中其他时期通量值($P < 0.0001$)。相反,温度最高的夏季(7—9月)N₂O 释放通量仅为(19.93 ± 6.95) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,并不显著高于其他时期。

河流水体营养盐指标同样呈现一定季节模式(图3b—3e)。研究区域整体无机氮水平在(3.58 ± 0.23) mg/L,其中NO₃⁻-N为(2.58 ± 0.14) mg/L。各氮指标均在汛期出现了突变。汛期6月TN与NO₃⁻-N均显著高于其他月份($P < 0.0001$),流域内NO₃⁻-N平均质量浓度可达(10.96 ± 0.26) mg/L。冬季1—2月与夏季8—9月NO₃⁻-N浓度显著低于其他时期($P < 0.0001$)。

2.2 N₂O 释放通量空间差异

结合流域土地利用现状,根据流域高程值与主要离子单位电荷物质的量浓度(Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺+K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻等八大离子)对采样点进行聚类,可将流域划分为源头区、农田区、城区、河口区及入湖口等,其水文特征与N₂O 释放通量见表1和图4。由于通量分布不服从正态分布,采用非参数方法(NPAR1WAY过程)对各不同土地利用区域通量做方差分析,结果显示不同区域通量具有较显著差异($P = 0.044$)。上游以里畈水库为主的源头区水量充足,水深达10 m以上,水流稳定。N₂O 释放通量较低,5%修剪均数仅为8.46 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。中游村镇土地利用以农田为主,分布一些造沙厂。农田区相应氮营养盐浓度均有所提升,其中NO₃⁻-N质量浓度增长近1倍,达(2.44 ± 0.34) mg/L。而N₂O 释放通量在此亦有较为剧烈的提升,约为源头区的3.67倍。之后虽然河水氮盐浓度持续增长,但N₂O 释放通量水平仅为(8.24 ± 1.48) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。其后马溪汇入大量污水使得各指标浓度均显著增长($P < 0.05$),N₂O 释放通量达到了(35.74 ± 11.9) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。河口区域为苕溪河水与库区水体的交换区。其N₂O 释放通量为(33.86 ± 14.60) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其中极高值397.42 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 出现在汛期中期。

2.3 N₂O 释放通量的影响因素

就南苕溪流域总体而言,Spearman 相关分析显示:在众多环境变量中,只有水中NO₃⁻-N含量与N₂O 通量呈显著正相关($r = 0.314, P = 0.038$)。而温度与通量间并无显著关联($r = 0.010, P = 0.953$)。在 $\alpha = 0.10$ 的显

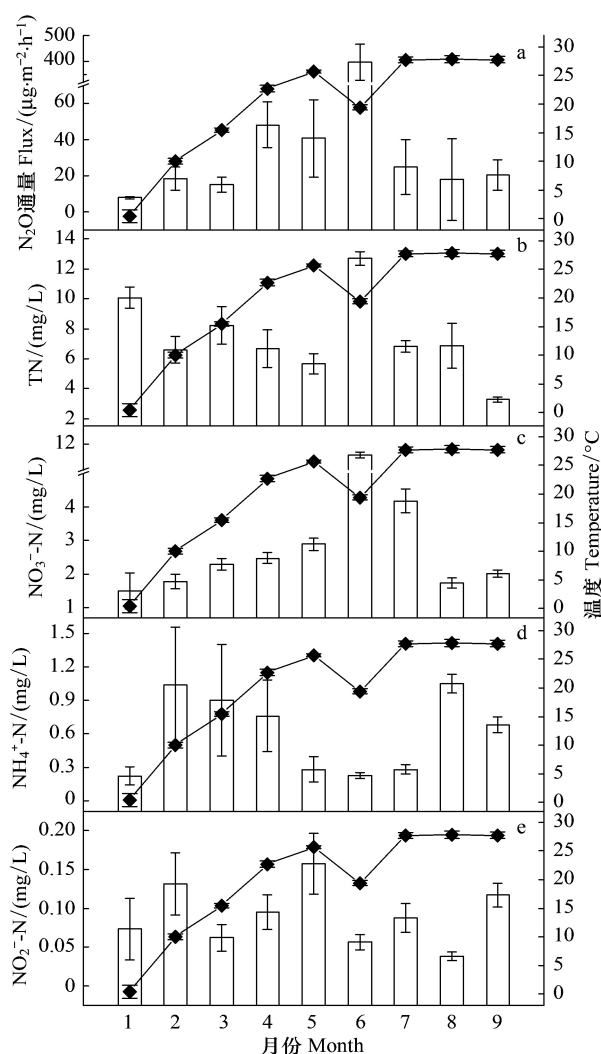


图3 南苕溪N₂O 释放通量与营养盐指标(5%修剪均数±标准差)时间变化

Fig.3 Temporal variation of N₂O emission fluxes and nutrient variables in South Tiaoxi River

著性水平下,TP、TC 与 N_2O 释放通量正相关($r=0.266, P=0.085; r=0.327, P=0.073$)。DO 饱和度则与通量呈负相关($r=-0.353, P=0.092$)。其余营养盐及环境变量均对 N_2O 通量无显著影响。

表 1 南苕溪流域 N_2O 释放通量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$

Table 1 N_2O emission fluxes in South Tiaoxi River watershed

区域 Region	5% 修剪均数± 标准误 5% trimmed mean± standard error	中位数 Median	范围 Range	河长/km Stream length	水文特征 Hydrological characteristics
源头区 Headwaters region	8.46±0.68	7.99	-18.11—48.54	14.5	水较深,水流较慢
农田区 Farmland area	31.10±8.41	31.68	6.14—168.36	16.5	中等水深及水流
城区 Urban area	8.24±1.48	7.47	1.46—13.68	6.4	水较浅,水流较慢
马溪支流 Maxi tributary	35.74±11.90	28.92	23.62—81.13	0.4	水流较快,汇流
河口区 Confluence area	33.86±14.60	26.94	7.17—397.42	0.6	中等水深及水流
入湖口 Reservoir entrance	22.60±6.84	24.95	2.13—50.31	0.2	水较深,水流较慢

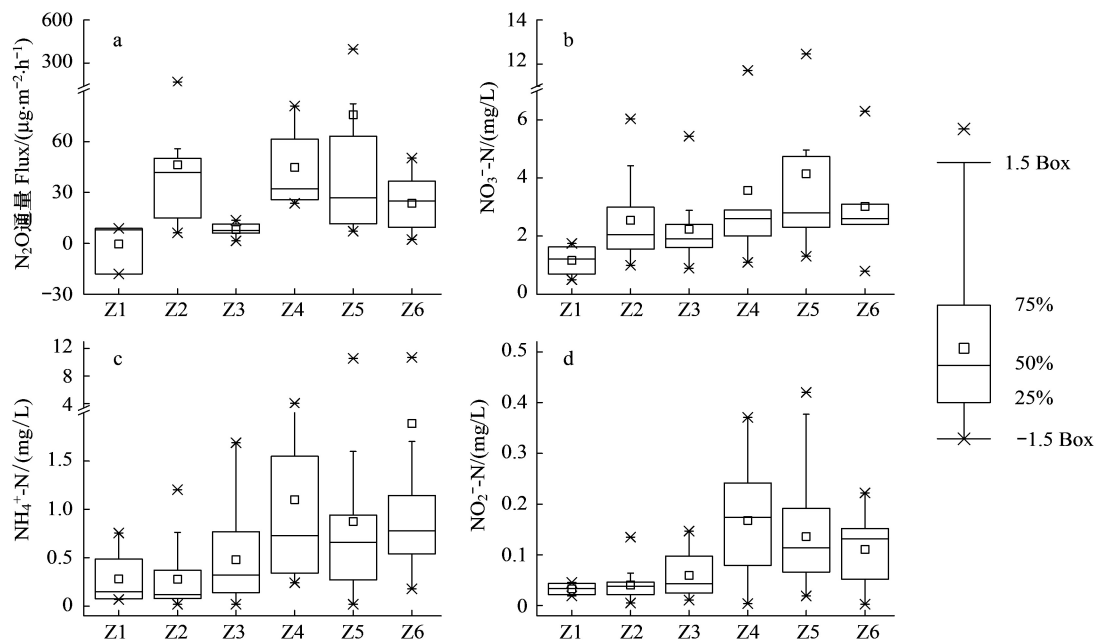


图 4 南苕溪 N_2O 释放通量及营养盐指标空间变化

Fig. 4 Spatial variation of N_2O emission fluxes and nutrient variables in South Tiaoxi River

Z1:源头区 Headwaters region; Z2:农田区 Farmland area; Z3:城区 Urban area; Z4:马溪支流 Maxi tributary; Z5:河口区 Confluence area; Z6:入湖口 Reservoir entrance; 其中:Z1 为上游 Upstream,共 14.5 km; Z2 为中游 Midstream,共 16.5 km; Z3—Z6 为下游 Downstream,共 7.6 km

进一步分析区域内影响 N_2O 释放通量的特异因素。在中游农田村镇区, N_2O 释放通量与水中 TOC 正相关($r=0.679, P=0.09$)。下游水体 N_2O 释放通量与 EC、TOC 显著正相关($r=0.497, P=0.012; r=0.555, P=0.011$)。在 $\alpha=0.10$ 的显著性水平下, N_2O 释放通量亦与气压变化呈负相关($r=-0.389, P=0.055$), 与 TIC 负相关($r=-0.405, P=0.077$)。

因子分析 (FACTOR 过程) 得到前 6 个公共因子特征值大于或约等于 1, 累计解释所选变量总方差的 81.5% (表 2)。因子 1 与硝态氮、无机氮及无机氮磷比呈正相关, 因而赋为硝态氮负荷因子; 因子 2 与高程负相关, 与气压和电导率正相关, 赋为地势及污染梯度因子; 因子 3 与亚硝态氮及活性磷成正比, 赋为活性氮磷因子; 因子 4 与温度正相关, 与气压及溶解氧负相关, 将其赋为温度因子; 因子 5 与 COD 及氨态氮正相关, 称为还原因子; 因子 6 与总氮及总氮磷比正相关, 称之为总氮因子。采用所得公共因子作为自变量与 N_2O 通量

进行逐步回归 (STEPWISE 过程)。硝态氮因子 ($P < 0.0001$)、还原因子 ($P = 0.0103$) 及总氮因子 ($P = 0.0104$) 显著影响 N_2O 释放通量 ($R^2 = 0.551$, $P < 0.0001$, $C(p) = 1.11$), 其中硝态氮因子单独可解释通量变异的 35.3%。回归模型可表示为: N_2O 通量 = $48.76 + 75.53 \times \text{硝态氮因子} - 21.60 \times \text{还原因子} + 21.80 \times \text{总氮因子}$ 。

表 2 因子分析: 公共因子与原始变量
Table 2 Factor analysis: common factors and original variables

变量 Variable	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5	因子 6 Factor 6
高程 Elevation	-0.15	-0.91	0.03	0.01	0.03	-0.12
温度 Temperature	-0.09	0.00	-0.12	0.91	-0.11	-0.14
气压 Atmospheric pressure	-0.06	0.77	0.12	-0.52	0.08	0.04
溶解氧 DO	-0.12	0.20	-0.44	-0.66	0.04	0.05
电导率 Electrical conductivity	0.11	0.81	0.29	0.06	0.08	0.11
pH	-0.51	0.31	-0.37	0.04	0.24	-0.16
总氮 TN	0.27	0.16	0.01	-0.01	0.13	0.90
硝态氮 NO_3^- -N	0.89	0.12	-0.04	0.04	-0.23	0.17
氨态氮 NH_4^+ -N	0.07	0.14	0.42	-0.16	0.77	0.06
亚硝态氮 NO_2^- -N	0.05	0.40	0.74	0.00	0.18	-0.13
总磷 TP	-0.03	0.15	0.22	0.23	0.10	-0.11
活性磷 Soluble reactive phosphorus	-0.20	0.09	0.70	0.01	0.04	-0.02
化学需氧量 COD_{Cr}	0.00	-0.02	-0.09	-0.04	0.88	0.18
总无机氮 Total inorganic nitrogen	0.87	0.20	0.21	-0.04	0.20	0.19
总氮磷比 TN/TP ratio	0.13	0.07	-0.18	-0.33	0.20	0.79
无机氮磷比 Inorganic nitrogen/phosphorus ratio	0.82	0.01	-0.37	-0.03	0.20	0.03
解释率 Explanatory percentage/%	23.80	19.50	15.40	10.00	6.90	5.90

TOC、TIC (total inorganic carbon)、TC (total carbon) 自 3 月开始测量, 为使因子分析及后续回归分析包含尽量多的观测数, 未将其纳入因子分析变量中; 3 个变量的影响已经做过分析, 去除后并不影响因子结构及通量回归模型

3 讨论

3.1 时间变异分析

除去个别负通量 (分别出现在 2 月的长桥站点, 9 月里畈水库及杨岭站点), 苕溪临安段总体表现为大气中 N_2O 的释放源。其释放通量与国内外部分河流相比情况如表 3 所示。总体而言, 南苕溪 N_2O 释放通量水平略低于大型河流或湖泊。然而与其他源头水体相比, 该释放通量水平属于中等偏高; 尤其在河流污染负荷较高时, N_2O 释放十分显著。南苕溪 N_2O 释放通量呈现显著的季节模式, 最低释放时期为冬季; 释放活跃时期出现在汛期, 夏季 N_2O 释放相对而言并不显著。这与大多数研究所指出的河流、湖泊生态系统内 N_2O 释放通量冬低夏高的季节模式有所冲突^[7, 16]。相关分析亦证明温度与 N_2O 通量之间并无显著关联 ($r = 0.010$, $P = 0.953$)。事实上夏季温度较高, 水-气界面交换更活跃, 微生物反应活性亦较强。理应观测到较高的 N_2O 释放。二者的矛盾与控制河流 N_2O 释放通量的主导因素有关。

在氮负荷 (N 质量浓度 < 1.4 mg/L) 及 N_2O 释放通量均较低的 Neuse 河流域内, 虽然 TOC 及水体温度均与 N_2O 通量正相关, 但水中硝态氮含量才是影响 N_2O 通量的主要驱动因子^[22]。而对美国西北部的 12 条小型溪流研究则发现冬季 N_2O 释放最高、夏季最低^[6]。在 Ohio 河流域的研究中, 36% 的通量变异可由季节模式导致的温度变化来解释。综合天然水体 N_2O 通量研究, N_2O 释放通量的变异主要由温度及氮素可利用性控制^[7]。二者在具体河流的 N_2O 释放通量中的相对重要性各不相同, 多数情况下河流中温度与水体无机氮水平共同变化。不同研究区域不同河流主导因素也不一致。当流域无机氮水平较为恒定时, 季节模式下的温度变化会成为主导流域 N_2O 释放通量变异的主要因素^[7]。而当河流无机氮含量变化较为剧烈时, 氮的可利用性差异会胜过季节温度模式成为主导 N_2O 释放通量的关键因素。本研究中南苕溪无机氮水平在 0.4—

13.2 mg/L 范围内变化,尤其汛期时无机氮水平显著高于其他时期(平均值 (5.11 ± 0.55) mg/L),从而该因素成为影响南苕溪 N_2O 释放通量变异的主要因素。因此评估特定河流 N_2O 年释放变异时,应当综合考虑温度效应及营养盐输入效应。

表 3 国内外河流 N_2O 释放通量对比Table 3 N_2O emission fluxes from the international and domestic rivers

	来源 Data source	研究区域 Study area	N_2O 释放通量范围 N_2O emission fluxes range	方法 Method
国外 International	Mcmahon 等 ^[17]	South Platte River, nitrogen-rich	90—32600 $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	密闭箱法 Closed chamber method
	Hendzel 等 ^[18]	Boreal forest reservoirs	-3.5—-1.0 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	估算 Estimation
	Garnier 等 ^[19]	Tidal Seine River estuary (France)	25—60 kg N/d	估算
	Clough 等 ^[20]	Spring-fed LII river, New Zealand	52—140 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 13—25 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	密闭箱法 估算
	Beaulieu 等 ^[6]	Headstream, Michigan	-8.9—266.8 $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	估算
	Beaulieu 等 ^[7]	Ohio River, cut by 20 dams	12.2—623 $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	密闭箱法
国内 Domestic	熊正琴等 ^[13]	太湖流域 Taihu Lake Basin	河流 River: 122.5 $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 湖泊 Lake: 3.53 $\mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	密闭箱法
	王仕禄等 ^[21]	太湖流域	河流: 142.1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 湖泊: 14.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	估算
	李飞跃等 ^[11]	句容水库, 农业流域 Jurong Reservoir, agricultural watershed	河流: 0.29—8.41 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 水塘 Pond: -0.42—16.76 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	密闭箱法
	本研究 This study	太湖流域, 南苕溪 Taihu Lake Basin, South Tiaoxi River	-18.11—397.42 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	密闭箱法

事实上,一年中第一轮持续降雨从汛期初开始。南苕溪作为典型的山溪性源头河流,流域在该时期总体呈现山洪爆发特征,具体表现为流量显著增加,流速湍急,河水变浑。降雨及径流携带大量营养盐及颗粒物进入河流,使得河流水体污染负荷大幅增加。8—9 月虽然温度较高,但硝态氮含量低于年平均水平,因此通量也较低。7 月河流水体虽具有较高的 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 含量(>4 mg/L)和较高的温度,而 N_2O 释放通量也不高,可能因为该月 TOC 水平较低,仅为 2.18 mg/L(年均 3.07 mg/L)。

多年水文监测数据亦表明,南苕溪上游年径流量多年平均为 1.88 亿 m^3 ,其中 4—9 月径流量占全年的 72.5%。而每年的 11 月至翌年的 1 月,径流量仅占全年径流量的 7.3%。因此,以南苕溪为代表的源头溪流在汛期时大量径流汇入造成氮负荷及 N_2O 温室气体释放剧烈增加的效应需引起注意。

3.2 空间变异分析

南苕溪上游至下游依次经历森林、农田、城区的土地利用类型变迁。与土地利用变迁对应的是逐渐升高的污染负荷梯度。上游源头至下游河口河流水体中 TN 由 4.28 mg/L 增至 8.25 mg/L, $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 由 1.36 mg/L 增加至 4.14 mg/L, $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 由 0.39 mg/L 增至 0.89 mg/L, $\text{NO}_2^- \cdot \text{N}$ 由 0.035 mg/L 增至 0.136 mg/L。水中 TIC 则由 0.52 mg/L 增长至 10.62 mg/L, TOC 及 SRP 有小幅增长。河口 N_2O 释放通量较上游源头增长了 300%。根据南苕溪各河段河长、河宽及 N_2O 释放通量均值估算,南苕溪干流 N_2O 年释放量可达 0.38 t/a,单位面积 N_2O 年释放量为 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与黄土高原农田土壤单位面积年排放相当($2.0—2.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[23-24],但远低于华北平原典型农田土壤作物生长季 N_2O 平均排放通量($80—250 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 大于 $7000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[25]。

除临安城区河段以外,南苕溪 N_2O 释放通量随着上游至下游逐步升高的污染负荷而逐渐增加。统计分析亦支持地势因素及氮营养负荷因素对 N_2O 通量具有显著影响的结论。城区段 N_2O 释放通量偏低的现象应当归因于城区段河道因素。城区段河道渠道化较严重,橡胶坝较多,河流流量较小。城区上段流速较快,但水流较小;下段虽然流量有所增加,但流速缓慢。虽然该河段污染负荷继续升高,但由于总体流量小,水流太缓,

该区段 N_2O 释放通量甚至低于源头区。

3.3 影响因素分析

苕溪临安段河床主要构成为卵石、砾石及生物膜,未见有明显沉积物形成。源头溪流水深较浅,原位测定结果表明大部分河床界面偏离厌氧环境,沉积物 N_2O 产量受到限制。

本研究中水体无机氮水平是控制 N_2O 释放通量的主导因子, N_2O 通量随水中可利用态氮含量增加而增加。流域由山区源头至低处城区其 N_2O 通量逐渐增高。回归模型显示总氮水平对 N_2O 释放通量也具有正效应。此外,较高的有机碳与活性磷水平也会促进 N_2O 释放。本研究中温度对河流 N_2O 通量无显著效应,概因流域无机氮水平波动较大而使得温度效应因此减弱。决定河流 N_2O 通量变化的主要因素因不同流域河流特异状况而异。

河流 N_2O 产生主要由反硝化、短程硝化及硝化菌的反硝化作用产生。 N_2O 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亚硝态氮的羟胺因环境变化可发生短程硝化转化为 N_2O 。一定条件下硝化菌可将亚硝态氮还原转而变为反硝化路径从而产生 N_2O ^[26]。河流水体溶解氧对其中微生物活性影响重大。水体若原本为厌氧性,遇氧小幅增加时 N_2O 产量将剧烈增加^[27];而当溶解氧含量始终较充足时, N_2O 产量反而有限。 N_2O 在河流水体中产生后,向水-气界面传输过程被 N_2O 还原酶(*nos*)捕获,促进 N_2O 进一步还原为 N_2 ,最终导致河流 N_2O 产量受限。而土壤则不存在这一障碍, N_2O 一旦生成后可相对自由地逸散至大气中,从而具有较高的 N_2O 释放通量^[8]。当温度升高或其他原因造成水中溶解氧降低时,水体中反硝化过程得到强化,从而促进了反硝化过程中 N_2O 的生成。同样,硝化过程初始步骤的中间产物羟胺因溶解氧不足会更倾向于不完全氧化生成 N_2O ^[26],如此硝化过程中的 N_2O 产量也得以增加。即是,河流水体溶解氧含量降低时将既促进硝化过程产生 N_2O ,也利于反硝化作用生成 N_2O ,结果都是 N_2O 释放得到加强。这与本研究中 DO 饱和度与 N_2O 释放负相关($r=-0.353, P=0.092$)对应。

Beaulieu 等人在美国 72 条源头溪流进行的¹⁵N 同位素研究显示,激流系统可成为原位 N_2O 产生的活跃区,尤其当人为输入造成水体硝态氮大幅增长时^[8]。当水中硝态氮浓度较高时,硝化产物(包括硝态氮与亚硝态氮)浓度过高,导致硝化过程中间产物羟胺继续转化受限转而氧化为 N_2O ,造成后者产量增加。水中反硝化过程 N_2O 产量由 $(\text{NO}_3+\text{NO}_2)-\text{N}$ 供给及电子供体需求的平衡调控^[28]。硝态氮浓度升高时,硝态氮作为比 N_2O 更强的电子受体对 *nos* 的抑制使得 N_2O 难以继续还原,从而得以累积产生并释放。总之,水体中硝态氮浓度增加也可同时促进硝化与反硝化过程中 N_2O 生成。本研究及较多其他河流 N_2O 释放通量研究^[22, 29]亦都支持水体硝态氮含量增加对 N_2O 释放的正效应。

N_2O 气体从水体中释放的过程是一个动力过程,必然也与水流动力及水-气界面动力息息相关。因此,水深、水流速率、流量、风速等河道动力因素都会对水中气体释放通量具有一定影响。较快的水流速度及较大的风速利于水-气交换从而利于 N_2O 的释放^[30]。水深相对较深与水量相对充足的河段其 N_2O 释放通量高于水浅流小的河段^[7]。

南苕溪流域水体溶解氧充足,平均 DO 饱和度达 96.1%,因而水体中硝化过程优于反硝化过程而占主导。Beaulieu 提到持留时间、水体悬浮颗粒物含量及底质表面积与水体体积比率是决定水体或沉积物作为硝化主体的重要因素^[7]。小型溪流中水体持留时间较短,水中悬浮颗粒较少,河床面积与水体体积比较大,因而沉积物硝化占主导。河口和海口区域悬浮颗粒浓度较高,且水体持留时间较长,由此形成浊度最大化的状态有利于水体硝化反应的进行,此时水体硝化可占主导。推及本研究区域,南苕溪农田区及河口区具有较长的停留时间、较充足的悬浮颗粒因而水中硝化较为活跃。图 4b 中两区段硝态氮水平高于其他区段,显示出较强的硝化活性。两区域较高的 N_2O 释放通量也与之对应。

4 结论

南苕溪流域总体表现为 N_2O 的净释放源。时间上表现为冬季 N_2O 释放最低、汛期最高。空间上下游释放通量高于上游源头。污染物负荷与 N_2O 释放通量趋势基本一致。控制南苕溪 N_2O 释放通量的主导因素是

流域无机氮(主要为硝态氮)负荷。其他影响 N_2O 通量变化的因素还包括碳、磷含量、溶解氧含量及地形地势等。由于 N_2O 水-气交换过程是个涉及河流微生物活性、污染负荷、河流水文水力及水-气界面动力因素等多方面影响的复杂过程,其释放机制有待更深入的研究。这对更准确地估计与衡量大尺度上 N_2O 的释放量及相应气候效应具有重大意义。

致谢:本研究得到中国科学院生态环境研究中心牟玉静研究员、刘俊锋博士的大力支持,美国杜克大学湿地中心王洪君博士给予帮助,采样过程中得到晁向东工程师的协助,实验得到董慧峪博士的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 2009, 326(5949): 123-125.
- [2] Wuebbles D J. Nitrous oxide: no laughing matter. *Science*, 2009, 326(5949): 56-57.
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [4] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, Oenema O, Seitzinger S, van Cleemput O. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 225-248.
- [5] Seitzinger S P, Kroeze C, Styles R V. Global distribution of N_2O emissions from aquatic systems: natural emissions and anthropogenic effects. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(3/4): 267-279.
- [6] Beaulieu J J, Arango C P, Hamilton S K, Tank J L. The production and emission of nitrous oxide from headwater streams in the Midwestern United States. *Global Change Biology*, 2008, 14(4): 878-894.
- [7] Beaulieu J J, Shuster W D, Rebbholz J A. Nitrous oxide emissions from a large, impounded river: the Ohio River. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(19): 7527-7533.
- [8] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, Wollheim W M, Hall R O Jr, Mulholland P J, Peterson B J, Ashkenas L R, Cooper L W, Dahm C N, Dodds W K, Grimm N B, Johnson S L, McDowell W H, Poole G C, Valett H M, Arango C P, Bernot M J, Burgin A J, Crenshaw C L, Helton A M, Johnson L T, O'Brien J M, Potter J D, Sheibley R W, Sobota D J, Thomas S M. Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(1): 214-219.
- [9] Clough T J, Bertram J E, Sherlock R R, Leonard R L, Nowicki B L. Comparison of measured and EF5-r-derived N_2O fluxes from a spring-fed river. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 477-488.
- [10] Cole J J, Caraco N F. Emissions of nitrous oxide (N_2O) from a tidal, freshwater river, the Hudson River, New York. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(6): 991-996.
- [11] Li F Y, Wang J F, Li X L, Xiao X, Zou H M, Li F R. N_2O emission from pond and river in the agricultural watershed of Jurong reservoir, Jiangsu Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 2022-2027.
- [12] Li P P. Methane and Nitrous Oxide in the Yellow River Estuary, the Yellow Sea and the Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [13] Xiong Z Q, Xing G X, Shen G Y, Shi S L, Du L J. Dissolved N_2O concentrations and N_2O emissions from aquatic systems of lake and river in Taihu Lake region. *Environmental Science*, 2002, 23(6): 26-30.
- [14] Zhao Y C. Distributions and Fluxes of Methane and Nitrous Oxide in the Changjiang (Yangtze River) and Its Estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [15] Xu B B. Analysis on Water Pollution Character of South Tiaoxi River Qiangshan Lake Basin [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2011.
- [16] Wang H J, Wang W D, Yin C Q, Wang Y C, Lu J W. Littoral zones as the "hotspots" of nitrous oxide (N_2O) emission in a hyper-eutrophic lake in China. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(28): 5522-5527.
- [17] McMahon P B, Dennehy K F. N_2O emissions from a nitrogen-enriched river. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33(1): 21-25.
- [18] Hendzel L L, Matthews C J D, Venkiteswaran J J, Louis V L St, Burton D, Joyce E M, Bodaly R A. Nitrous oxide fluxes in three experimental boreal forest reservoirs. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(12): 4353-4360.
- [19] Garnier J, Cébron A, Taliec G, Billen G, Sebilo M, Martinez A. Nitrogen behaviour and nitrous oxide emission in the tidal Seine River estuary (France) as influenced by human activities in the upstream watershed. *Biogeochemistry*, 2006, 77(3): 305-326.
- [20] Clough T J, Buckthought L E, Kelliher F M, Sherlock R R. Diurnal fluctuations of dissolved nitrous oxide (N_2O) concentrations and estimates of N_2O emissions from a spring-fed river: implications for IPCC methodology. *Global Change Biology*, 2007, 13(5): 1016-1027.

- [21] Wang S L, Liu C Q, Wang G J, Li J, Lv Y C, Liu F. Spatial distribution and exchange fluxes of nitrous oxide (N_2O) in Lake Taihu and surrounding rivers. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(1): 144-152.
- [22] Stow C A, Walker J T, Cardoch L, Spence P, Geron C. N_2O emissions from streams in the Neuse River watershed, North Carolina. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(18): 6999-7004.
- [23] Pang J Z, Wang X K, Mu Y J, Ouyang Z Y, Zhang H X, Lu F, Liu W Z. Nitrous oxide emissions from apple orchard soil in the semiarid Loess Plateau of China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(12): 2518-2525.
- [24] Pang J Z, Wang X K, Mu Y J, Ouyang Z Y, Zhang H X, Lu F, Liu W Z. Nitrous oxide emissions from winter wheat field in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1896-1903.
- [25] Ye X, Li J, Wang Y H, Liu E M, Li R X, Yu Q, Chen B X. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China Plain. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1186-1191.
- [26] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science*, 2010, 330(6001): 192-196.
- [27] Firestone M K, Smith M S, Firestone R B, Tiedje J M. The influence of nitrate, nitrite, and oxygen on the composition of the gaseous products of denitrification in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43(6): 1140-1144.
- [28] Usui T, Koike I, Ogura N. N_2O production, nitrification and denitrification in an estuarine sediment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 52(6): 769-781.
- [29] Clough T J, Buckthought L E, Casciotti K L, Kelliher F M, Jones P K. Nitrous oxide dynamics in a braided river system, New Zealand. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(5): 1532-1541.
- [30] Silvennoinen H, Liikanen A, Rintala J, Martikainen P J. Greenhouse gas fluxes from the eutrophic Temmesjoki River and its estuary in the Liminganlahti Bay (the Baltic Sea). *Biogeochemistry*, 2008, 90(2): 193-208.

参考文献:

- [11] 李飞跃, 汪建飞, 李孝良, 肖新, 邹海明, 李粉茹. 江苏句容水库农业流域水塘和河流 N_2O 排放速率的研究. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 2022-2027.
- [12] 李佩佩. 黄河口及黄、渤海溶存甲烷和氧化亚氮的分布与释放通量 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [13] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 施书莲, 杜丽娟. 太湖地区湖水与河水中溶解 N_2O 及其排放. *环境科学*, 2002, 23(6): 26-30.
- [14] 赵玉川. 长江流域及长江口溶解甲烷和氧化亚氮的分布与释放通量 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [15] 徐兵兵. 南苕溪青山湖流域水污染特征分析 [D]. 临安: 浙江农林大学, 2011.
- [21] 王仕禄, 刘丛强, 万国江, 李军, 吕迎春, 刘芳. 太湖及其周围河流中 N_2O 的空间分布与释放通量. *第四纪研究*, 2009, 29(1): 144-152.
- [23] 庞军柱, 王效科, 牟玉静, 欧阳志云, 张红星, 逯非, 刘文兆. 黄土高原苹果园土壤 N_2O 排放研究. *环境科学学报*, 2010, 30(12): 2518-2525.
- [24] 庞军柱, 王效科, 牟玉静, 欧阳志云, 张红星, 逯非, 刘文兆. 黄土高原冬小麦地 N_2O 排放. *生态学报*, 2011, 31(7): 1896-1903.
- [25] 叶欣, 李俊, 王迎红, 刘恩民, 李瑞雪, 于强, 陈炳新. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1186-1191.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元