

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

基于区域氮循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N_2O 排放量估算

韩云芳^{1,2}, 韩圣慧^{2*}, 严平¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 本研究采用区域氮循环模型 IAP-N 估算了 2011 年安徽省县级共计 7 种农用地类型的 N_2O 排放, 估算所需的统计数据来源于安徽省各市统计年鉴, 排放因子来源于已发表文献中的观测数据. 结果表明, 2011 年安徽省农用地 N_2O 总排放量 (以 N_2O -N 计) 为 3.51 万 t. 其中, 直接排放 2.76 万 t, 间接排放 0.66 万 t, 田间秸秆燃烧排放 0.08 万 t. 淮北平原 (I 区) 和沿江圩丘 (II 区) 是安徽农用地 N_2O 主要排放区, 对农用地 N_2O 总排放的贡献分别为 41% 和 35%. 单纯旱作农田是各区最主要的直接排放源, 约占直接排放的 74%. II 区和 III 区水旱轮作中的旱作地 N_2O 排放居第二位 (分别占 II 区和 III 区直接排放的 19% 和 14%), IV 区的果园茶园 N_2O 直接排放居第二位 (占 IV 区直接排放的 22%). 间接排放源中由大气氮沉降引起的 N_2O 排放占三分之二. 该研究结果可为决策者合理利用肥料, 制定安徽省农业土壤温室气体减排措施提供科学依据.

关键词: IAP-N 模型; 农用地; N_2O 排放量; N_2O 直接排放; N_2O 间接排放

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2395-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.07.010

Estimation of N_2O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N

HAN Yun-fang^{1,2}, HAN Sheng-hui^{2*}, YAN Ping¹

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: N_2O emissions from seven categories of Anhui croplands in 2011 were estimated by using a regional nitrogen cycling model IAP-N. The required statistical data were from each city's statistical yearbook in Anhui Province. The emission factors were from the published field data. The results showed that total N_2O emissions from Anhui croplands in 2011 were 35.1 thousand ton, in which direct and indirect N_2O emissions were, respectively, 27.6 thousand ton and 6.6 thousand ton, and N_2O emission from residues/straws burning in the field was 800 ton. Huaibei Plain (Region I) and Jianghuai Hilly (Region II) were the main contribution regions in Anhui, accounting for 41% and 35% of its regional total N_2O emissions, respectively. The most important source for direct N_2O emission is the year round upland fields with 74% contribution of the province total direct N_2O emission. The second important source in Region II and Region III is upland cropping season of the rotation fields with rice and upland-crops, accounting for 19% and 14%, respectively. While in Region IV, the second direct N_2O emission sources are tea gardens and orchards, accounting for 22%. About two-thirds of the indirect N_2O were from atmospheric nitrogen deposition. The results can provide a scientific basis for policy makers to make agricultural soils GHG mitigation measures in Anhui Province, such as reasonable use of fertilizers.

Key words: IAP-N model; agricultural land; N_2O emissions; direct N_2O emissions; indirect N_2O emissions

农业活动是非二氧化碳的重要温室气体排放源之一. 近年来, 全球氧化亚氮 (N_2O) 的排放量以每年 $(0.73 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的速度增加^[1]. IPCC 第五次评估报告指出, 2006 年全球人为源中的农业活动引起的土壤 N_2O 排放量 (以 N_2O -N 计, 下同) 为 4.1 Tg, 占总人为源的 59%^[1].

目前, 对 N_2O 排放量的估算方法根据 IPCC 方法^[2~4] 规定, 依据数据可获得性, 可分成 3 个级别, 方法 1 给出推荐的排放因子^[5]; 方法 2 建议采用当地特有的观测数据, 如区域氮循环模型 IAP-N^[6,7]、

以及排放因子经验公式法^[8~10] 等; 方法 3 为过程模型计算 N_2O 直接排放因子, 如 DNDC 模型^[11~15]、DAYCENT 模型^[16] 以及由 DNDC 模型扩充和改进的模型等. 目前, IPCC 方法 1 或方法 2 已经被广泛运用于各国温室气体清单报告研究. 而过程模型由于

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2015-03-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2012CB417100); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05020203)

作者简介: 韩云芳 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向气候变化与响应, E-mail: 290997635@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: shenghui_han@post.iap.ac.cn

缺乏大量的数据验证,还未被广泛应用于国家温室气体清单编制.

对于中国而言,由于其复杂农业耕作制度,《中华人民共和国气候变化初始信息通报》(INC)和《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》(SNC)采用了区域氮循环模型(IAP-N)来编制中国农田N₂O排放清单. SNC 报告显示,2005 年中国N₂O总排放量为 127 万 t,其中农业活动排放占 73.79%,农田排放占 52.91%^[17]. 杨俊等^[18]也采用 IAP-N 模型估算了川渝地区 1990~2004 年农业生态系统N₂O的排放及时空排放,结果表明川渝地区农业生态系统的N₂O中 55%的排放量来自于农田直接排放. 其中,INC 和杨俊等^[18]的估算虽然根据农田类型对排放因子进行了分类,但是由于当时的氧化亚氮排放因子因观测方法存在缺陷,即 CO₂ 的存在干扰 GC-N₂-ECD 分析系统对 N₂O 的检测,使 N₂O 直接排放因子存在过高估计. 因此,当新的 GC-N₂/CO₂ 补气-ECD 分析系统得到应用时,以往的 N₂O 排放因子需要矫正^[19]才能用于农田 N₂O 直接排放的估算. SNC 的估算中,排放因子已经经过矫正,并且通过统计学的分析验证,但在估算过程中,仅根据农用地类型对排放因子进行了分类,并未分区,即全国采用的是统一值. 本研究则综合以上研究方法,采用矫正后的分农田类型的排放因子,对安徽省农用地分区域进行了 N₂O 排放估算.

本研究选择估算安徽省农用地N₂O排放,是因为安徽省地处长江中下游,是我国农业生产大省之一,其种植制度兼具南北方特色. 通过收集县级统计数据和应用 IAP-N 模型,以及矫正后的分农田类型的N₂O直接排放因子来估算安徽省 2011 年农用地N₂O的排放量,通过得到比较详细的安徽省农用地N₂O排放的空间分布,以期决策者制定合理的温室气体减排措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

安徽省地处长江下游,为暖温带与亚热带过渡地区,地形复杂,由平原、丘陵和山区组成. 根据安徽省综合地理^[20],将安徽省划分为 4 个区域:淮北平原(I 区)、江淮丘陵(II 区)、沿江圩丘(III 区)、山区(IV 区)(图 1). 其中 I 区种植制度与山东、河南相似,以一年一熟为主;其它三区种植制度与江苏、浙江等地相似,以一年二熟、三熟为主. 各区主要农田类型参见表 1.

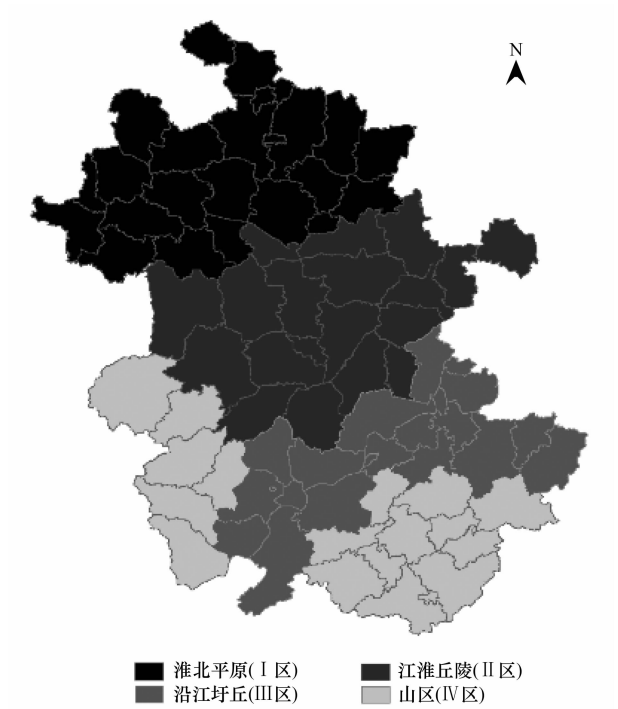


图 1 安徽省区域划分
Fig. 1 Sub-regional definition for Anhui province

1.2 研究方法

区域氮循环模型 IAP-N 是 Zheng 等^[6,7]在遵循 IPCC 基本方法^[2,3]的基础上,充分考虑氮素在农业生态系统各个环节的循环而建立,是具有中国自主知识产权的区域氮循环模式. 农田N₂O排放量的估算是 IAP-N 模型的功能之一.

农用地N₂O排放[式(1)]包括直接排放、间接排放以及田间秸秆燃烧引起的N₂O排放. 主要计算过程如下:

N₂O = N₂O_{dir} + N₂O_{indir} + N₂O_{ErbN₂O} (1)

(1) 农用地N₂O直接排放

直接排放是指当年输入到农用地的氮就地转化为N₂O并释放到大气的过程,主要来源于化肥氮、粪肥氮和秸秆还田氮,不包括背景排放. 其中化肥氮包括氮肥和复合肥氮[式(3)];粪肥氮[式(4)]为畜禽和乡村人口排泄物作为肥料进入农用地的部分,需要扣除放牧和做燃料部分(安徽省不存在上述情况)后,还要扣除经淋溶径流、氨及 NO_x 挥发,以及粪便管理系统以 N₂O 形式排放的氮;秸秆还田氮[式(5)]包括田间秸秆直接还田氮(地上部分 + 地下秸秆残留)和秸秆焚烧还田灰炔氮.

N₂O_{dir} = ∑_{k=1}^S ∑_{i=1}^p ((F_{SN_i} + F_{ON_i} + F_{CR_i}) × EF_{li}) (2)

$$F_{\text{SN}_i} = F_{\text{fert1}} + F_{\text{fert2}} \quad (3)$$

$$F_{\text{ON}_i} = \left[\sum_{T=1}^m (P_{\text{A}(T)} \times N_{\text{ex}(T)}) + \text{PH}_{\text{agro}} \times N_{\text{hm}} \right] \times (1 - \text{Frac}_{\text{lr}(T)} - \text{Frac}_{\text{vol}}) - \text{N}_2\text{O}_{\text{AWMS}} \quad (4)$$

$$F_{\text{CR}_i} = P_{\text{H}(J)} \times (1/I_{\text{Hi}(J)} - 1) \times f_{\text{Dr}(J)} \times f_{\text{Nrot}(J)} \times \text{Frac}_{\text{return}(J)} + P_{\text{Hp}(J)}/I_{\text{Hi}(J)} \times R_{\text{Rs}(J)} \times f_{\text{Dr}(J)} \times f_{\text{Nrot}(J)} \quad (5)$$

式中， i 表示农田类型编号， $i = 1, 2, \cdots, 7$ ，依次分别表示：蔬菜地、水稻 + 旱休闲、非蔬菜地的单纯旱作、双季稻 + 旱休闲、水旱轮作-旱作、水旱轮作-水稻、果园茶园； $S = 78$ ，表示安徽共 78 个县区； EF_{li} 为 i 类型农用地的 N_2O 的直接排放因子（表 1），等于当年施肥处理的 N_2O -N 排放量，扣除

不施肥处理的 N_2O -N 排放量，再除以当年的施肥氮量而得到，其单位为 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； F_{SN} 、 F_{ON} 分别为施入到农用地的化学合成氮肥、粪肥氮； F_{CR} 为秸秆还田氮； F_{fert1} 氮肥氮； F_{fert2} 复合肥氮； $P_{\text{A}(T)}$ 为畜禽年末存栏量； N_{ex} 畜禽氮年排泄率； PH_{agro} 乡村人口数； N_{hm} 乡村人口氮年排泄氮率； $\text{Frac}_{\text{lr}(T)}$ 氮素淋溶径流损失率； Frac_{vol} 氮素挥发损失率； $\text{N}_2\text{O}_{\text{AWMS}}$ 畜禽粪便管理系统 N_2O 排放量估算采用文献 [21]（内部资料）的方法，即等于畜禽饲养量乘以其相应的粪便管理系统 N_2O 排放因子； J 为农作物类型； P_{Hp} 作物产量； I_{Hi} 、 f_{Dr} 、 f_{Nrot} 、 $\text{Frac}_{\text{return}}$ 和 R_{Rs} 分别为：收获指数、干重比、秸秆含氮量、秸秆还田率和根冠比。

表 1 排放因子及不确定性范围¹⁾
Table 1 Emission factors and their uncertainties

1) 直接排放因子观测数据来自中国生态系统研究网络，且排放因子 = (施肥处理 N_2O -N 排放量 - 不施氮肥处理 N_2O -N 排放量) / 施氮量

(2) N_2O 间接排放

农用地 N_2O 间接排放 [式 (6)] 源于施肥土壤、乡村人口和畜禽排泄物氮氧化物和氨挥发经过大气氮沉降引起的 N_2O 排放 ($\text{N}_2\text{O}_{\text{deposition}}$)，以及经由土壤氮淋溶或径流损失进入水体而引起的 N_2O 排放 ($\text{N}_2\text{O}_{\text{leaching}}$)。

$$\text{N}_2\text{O}_{\text{indir}} = \text{N}_2\text{O}_{\text{deposition}} + \text{N}_2\text{O}_{\text{leaching}} \quad (6)$$

大气氮沉降引起的 N_2O 的排放 [式 (7)] 包括沉降到农田内的氮 (N_{DC}) 引起的 N_2O 的排放和沉降到农田外的氮 (N_{DNC}) 引起的 N_2O 的排放。

$$\text{N}_2\text{O}_{\text{deposition}} = \sum_{k=1}^S \left[\sum_{i=1}^p (N_{\text{DC}_i} \times \text{EF}_{\text{li}}) + N_{\text{DNC}} \times \text{EF}_2 \right] \quad (7)$$

$$N_{\text{d}} = \sum_{i=1}^p (F_{\text{SN}_i} + F_{\text{ON}_i} + F_{\text{CR}_i}) \times f_{\text{NH}_3i} + \sum_{i=1}^p (F_{\text{SN}_i} + F_{\text{ON}_i} + F_{\text{CR}_i}) \times f_{\text{NO}_xi} +$$

$$\sum_{i=1}^p (P_{\text{Ai}} \times \text{Net}_i) \times f_{\text{AM}} \quad (8)$$

$$N_{\text{DC}} = N_{\text{d}} \times f_{\text{DL}} \times L_{\text{arable}}/L_{\text{land}} \quad (9)$$

$$N_{\text{DNC}} = N_{\text{d}} - N_{\text{DC}} \quad (10)$$

式中， N_{d} 为大气氮沉降量， f_{NH_3i} 、 f_{NO_xi} 和 f_{AM} 分别为施肥土壤和畜禽排泄物氮氧化物和氨的排放率， f_{DL} 为氮沉降到陆地的比例， L_{arable} 为耕地面积， L_{land} 行政区划面积。

淋溶径流引起的间接排放

$$\text{N}_2\text{O}_{\text{leaching}} = \sum_{k=1}^S \left[\sum_{i=1}^q N_{\text{Lri}} \times \text{EF}_3 \right] \quad (11)$$

$$N_{\text{Lri}} = (F_{\text{SN}_i} + F_{\text{ON}_i} + F_{\text{CR}_i}) \times f_{\text{Lri}} \quad (12)$$

式中， f_{Lri} 为第 i 类农用地的淋溶径流氮损失率，其中，蔬菜地、水稻田及其它类型农田分别为 0.2、0.02 和 0.08^[15]。

(3) 秸秆焚烧引起的 N_2O 的排放

$$N_2O_{\text{Erb}N_2O} = \sum_j \left[\left(\sum_j^{10} N_{\text{AR}(j)} \times \text{Frac}_{\text{Crburn}} \right) \times f_{\text{rb}N_2O} \right] \tag{13}$$
$$N_{\text{AR}(j)} = P_{\text{Hp}(j)} \times (1/I_{\text{Hi}(j)} - 1) \times f_{\text{Dr}(j)} \times f_{\text{Nrot}(j)} \tag{14}$$

式中, $N_2O_{\text{Erb}N_2O}$ 为田间秸秆燃烧 N_2O 的排放量, $\text{Frac}_{\text{Crburn}}$ 为秸秆燃烧比例, N_{AR} 为秸秆氮量, $f_{\text{rb}N_2O}$ 为秸秆燃烧的 N_2O 排放因子.

上述各过程相关的参数基本来源于文献[7, 22]及其引用的文献,安徽本地区经调查的参数数据在下节给出.

需要特别注意的是,由于本研究农用地 N_2O 直接排放因子 = (施肥处理的 N_2O -N 排放量 - 不施肥处理的 N_2O -N 排放量) / 当年施肥氮量, 因此, 对于农用地 N_2O 直接排放是不涉及相关背景排放的.

1.3 数据来源

1.3.1 活动水平数据

本研究活动水平数据是指各类型农用地的施入氮量,需要相关的统计数据 and 参数数据,采用上述公式进行估算.

(1) 直接排放活动水平数据

化肥氮由[式(3)]估算,所需数据:各县区的氮肥和复合肥的消费量(来源于安徽省各市统计年

鉴),及复合肥实物含氮量(18.5%,来源于文献[23]),蔬菜地、果园茶园年施氮量(来源于文献[22]).

粪肥氮由[式(4)]估算,所需数据:各县区主要畜禽年末存栏量、乡村人口数(来源于安徽省各市统计年鉴)、畜禽和乡村人口年末排泄氮率(见表2).

表 2 家畜和乡村人口个体年排泄氮量¹⁾
Table 2 Annual nitrogen excretion by unit
of livestock production and rural population

项目	年排泄氮量	文献
非奶牛/kg·(头·a) ⁻¹	56.02 *	[24]
奶牛/kg·(头·a) ⁻¹	70.50 *	[24]
猪/kg·(头·a) ⁻¹	8.75 *	[24]
家禽/kg·(只·a) ⁻¹	0.36 *	[24]
羊/kg·(只·a) ⁻¹	5.68	[22]
其它大牲畜 骆驼/kg·(头·a) ⁻¹	27.2	[22]
驴骡/kg·(头·a) ⁻¹	15.5	
乡村人口/kg·(人·a) ⁻¹	5.4	[25]

1) * 表示该数据由文献[24]整合而来

秸秆还田氮量采用[式(5)]估算,所需数据:各县区主要作物播种面积、产量(来源于安徽省各市统计年鉴)和农业参数数据(见表3)及作物秸秆用途:秸秆田间燃烧比率 39.40%^[22],秸秆还田率: I 区 28.21%^[26]、其它区 19.20%^[22].

表 3 作物参数¹⁾
Table 3 Crops' parameters

农作物	f_{Dr}	f_{Np}	f_{Nrot}	I_{Hi}	R_{Rs}
水稻	0.855	0.012 9 ^[27]	0.009 15 ^[27]	0.510 46 ^[26]	0.085 ^[28]
小麦	0.87	0.014	0.005 16	0.472 63 ^[26]	0.063 8 ^[29]
玉米	0.86	0.017	0.005 8	0.441 68 ^[26]	0.17(0.14 ~ 0.2)
大豆	0.86	0.06	0.018 1	0.383 54 ^[26]	0.13 ^[30]
棉花	0.83	0.005 48	0.005 48	0.103 02 ^[26]	0.2(0.1 ~ 0.3)
油菜	0.82	0.005 48	0.005 48	0.384 54 ^[26]	0.15(0.1 ~ 0.2)
花生	0.9	0.05	0.018 2	0.382 95 ^[26]	0.2
薯类	0.45	0.004	0.011	0.666 67 ^[26]	0.05
蔬菜	0.15	0.008	0.008	0.83	0.25(0.2 ~ 0.3)
烤烟	0.83	0.041	0.014 4	0.83	0.23 ^[31]
芝麻	0.9	0.05	0.0131	0.417	0.2
麻类	0.83	0.013 1	0.013 1	0.83	0.2
甘蔗(叶)	0.83	—	0.83	—	—
甘蔗(茎)	0.32	0.004	—	0.75	0.26

1) 未标记的作物参数引自文献[22]

(2) 间接排放活动水平数据

间接排放活动水平数据包括大气氮沉降量、淋溶径流损失氮量,分别采用式(8)~(10)和式(12)估算,其中,大气氮沉降来源于施肥土壤和畜禽排泄物氮氧化物和氨的排放,所需数据可以从直接排放

活动水平数据中得到,以及各县区耕地面积、行政区划面积、果园茶园及作物播种面积(来源于安徽省各市统计年鉴).

(3) 秸秆焚烧活动水平数据

秸秆焚烧活动水平数据由式(14)估算,所需数

据同不同作物秸秆产生量,以及田间焚烧比例.

1.3.2 排放因子数据

直接排放因子优先采用选取相似地区的排放因子观测数据,该观测数据,如果是 GC-N₂-ECD 分析系统(DN 法)的测定值,则根据 Zheng 等^[19]的矫正方案进行矫正. 间接排放因子采用 IPCC 默认值.

2 结果与分析

2.1 安徽省农用地氮输入量

2011 年安徽省农用地总氮输入量为 191.2 万 t (表 4). 其中 I 区和 II 区氮素输入量较大,占安徽

省总氮输入量的 76%. 各区域中单纯旱作地氮输入量占主导地位(约占 41% ~87%), II 区 ~ IV 区水旱轮作氮肥输入量约占各区的 22% ~37%, IV 区的果园茶园的氮输入量约占 IV 区的 17%.

表 5 显示,2011 年安徽省农用地 N₂O 直接排放源中,74% 来源于化肥氮的输入. 间接排放源中,淋溶径流损失氮量为 31.2 万 t,大气氮沉降氮量 37.3 万 t. 秸秆焚烧氮量较小,仅 10.9 万 t.

2.2 安徽省农用地 N₂O 直接排放

2011 年安徽省农用地 N₂O 直接排放 2.76 万 t, 75% 来自于 I 区和 II 区(表 6). 其中, I 区的宿州

表 4 不同农用地类型氮输入量/10⁴ t

Table 4 Nitrogen input of different croplands in Anhui/10 ⁴ t								
位置	单纯旱作	水稻 + 旱休闲	水旱轮作(旱作季)	水旱轮作(水稻季)	双季稻 + 旱休闲	蔬菜地	果园茶园	总氮输入
I 区	70.3	3.8	—	—	—	5.4	1.5	81.0
II 区	30.6	5.1	11.8	11.8	1.5	2.8	0.5	64.1
III 区	13.9	1.7	4.0	4.0	2.5	2.2	1.3	29.5
IV 区	6.7	0.8	1.8	1.8	1.4	1.2	2.9	16.6
安徽省	121.5	11.3	17.6	17.6	5.4	11.6	6.1	191.2

表 5 2011 年安徽省农用地氧化亚氮排放的活动水平数据/10⁴ t

Table 5 Activity data of Anhui in 2011/10 ⁴ t								
位置	直接排放源				间接排放源			秸秆焚烧
	化肥氮	粪肥氮	秸秆还田氮	合计	氮沉降	淋溶/径流损失氮	合计	
I 区	57.2	18.1	5.6	81	15.6	13	28.6	5
II 区	49.7	11	3.5	64.1	12.5	10	22.5	3.4
III 区	22.7	5	1.8	29.5	5.7	5.1	10.8	1.7
IV 区	11.6	4.2	0.8	16.6	3.4	3	6.4	0.8
安徽省	141.2	38.3	11.7	191.2	37.3	31.2	68.5	10.9

市、怀远县, II 区的寿县、霍邱县的直接排放量均超过 900 t. 对于不同农用地类型而言,单纯旱作是安徽省农田土壤 N₂O 最主要的直接排放源,占安徽省农田土壤 N₂O 直接排放的 74%. I 区 94% 的 N₂O 来自单纯旱作地,其它区域 52% ~63% 的排放来自单纯旱作地. II 区、III 区的水旱轮作中的旱作季 N₂O 排放氮量居第二位,分别占 II 区、III 区的 19% 和 14%. 而在 IV 区,其果园茶园 N₂O 排放氮量量居第二位,约占该区的 22% (图 2). 安徽省各类型农用地 N₂O 直接排放量分别为:单纯旱作地 2.05 万 t、水稻 + 旱休闲 0.87 万 t、水旱轮作(旱作季)0.28 万 t、水旱轮作(水稻季)0.14 万 t、双季稻 + 旱休闲 0.01 万 t、蔬菜地 0.09 万 t、果园茶园 0.10 万 t.

安徽省农用地作物生长季的排放通量由各类型农用地 N₂O 排放量及其播种面积决定. 2011 年安徽省农用地作物生长季 N₂O 直接排放平均通量为 2.0 kg·hm⁻² (表 6). 不同类型农用地的平均排放通量

中,果园茶园最大(4.2 kg·hm⁻²),水旱轮作(旱作季)次之(2.6 kg·hm⁻²),单纯旱作地第三(2.2 kg·hm⁻²),蔬菜地、水稻 + 旱休闲地和水旱轮作(水稻季)的直接排放通量相近(1.1 ~ 1.3 kg·hm⁻²),双季稻 + 旱休闲地的排放通量最小,仅 0.2 kg·hm⁻². 对于各区域农用地 N₂O 的平均直接排放通量,安徽北部(I 区)较安徽南部小(表 6),这可能与淮河以南地区作物复种指数大,单位耕地面积的总施肥量也大相关.

2.3 安徽省农用地 N₂O 间接排放

2.3.1 大气氮沉降引起的 N₂O 间接排放

2011 年安徽省因大气氮沉降引起的 N₂O 间接排放量为 0.43 万 t,其中,氮沉降到农用地引起的排放为 0.19 万 t,氮沉降到农田以外的 N₂O 排放为 0.24 万 t. 安徽省中北部地区(I 区和 II 区)较高,约占氮沉降引起 N₂O 排放的 77%,该区域大气氮沉降强度也高于其他区域[图 3(a)和 3(b)],大气氮沉降引

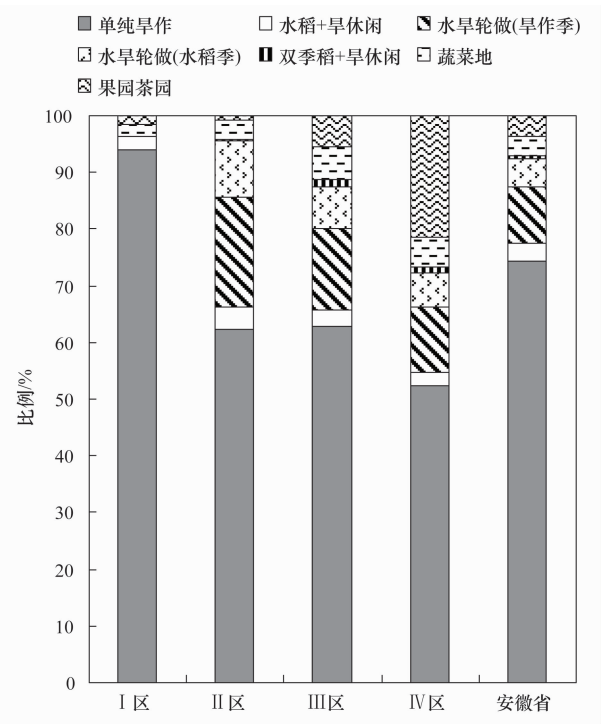


图2 不同耕作方式下土壤N₂O直接排放比例
Fig. 2 Proportion of direct N₂O emissions under different tillage systems

起N₂O高排放(>150 t)县区主要分布在II区(江淮丘陵)的西部,而氮沉降强度大(>50 kg·hm⁻²)的县区分布呈“Y”字形,分布在淮河沿岸县区和江淮丘陵中西部地区. 各区的平均氮沉降强度分别为: I区42.3 kg·hm⁻²、II区31.4 kg·hm⁻²、III区20.9

kg·hm⁻²、IV区9.7 kg·hm⁻²(其中hm²为行政区划面积).

2.3.2 淋溶径流引起的N₂O间接排放

2011年安徽省由于氮淋溶径流引起的N₂O间接排放总量为0.23万t,且各县区的排放量由北至南呈依次减少的趋势. I区和II区为主要的排放区,分别占全省的42%和32%. 这与I区、II区的总氮输入量较大有关.

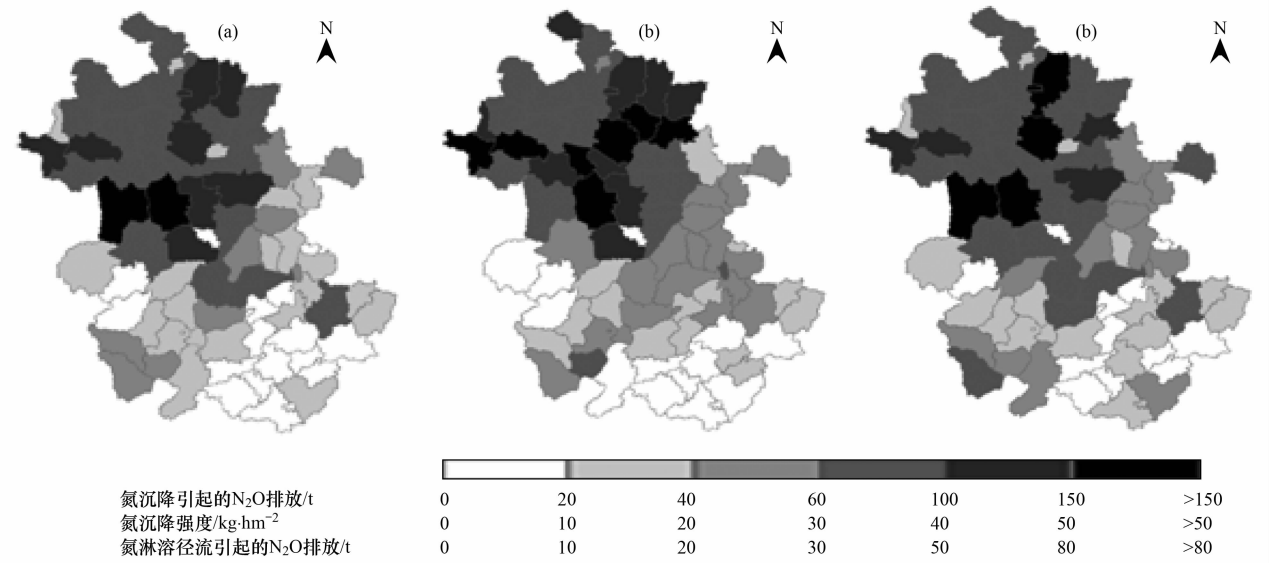
2.4 田间秸秆焚烧引起的N₂O的排放

2011年安徽省因秸秆焚烧引起的N₂O的排放量较小,仅0.08万t. 其中,77%来自I区和II区. 由于,I区和II区是安徽省作物的主要生产区域,作物秸秆产量较大,农民缺乏秸秆应用的途径,为了保证下一季作物正常生长,出现田间焚烧作物秸秆的现象(图4).

2.5 安徽省农用地N₂O总排放

2011年安徽省农用地N₂O的总排放量为3.51万t(折合1461.66万t的CO₂当量),其中,I区和II区分别排放了1.45万t和1.20万t,共占安徽省农用地N₂O总排放的75%. I区的宿州市、怀远县和II区的寿县、霍山县的排放量均在1000 t以上,上述市县农用地N₂O排放约占安徽省的16%.

表7显示,直接排放是安徽省农用地N₂O最重要的排放源,约占79%;其间接排放,占19%,其中2/3来源于大气氮沉降引起的N₂O排放;田间秸秆燃烧引起的N₂O排放较小,约占2%.



(a) 大气氮沉降引起的N₂O排放; (b) 氮沉降强度; (c) 淋溶径流引起的N₂O排放

图3 2011年安徽省由大气氮沉降引起的N₂O排放量、淋溶径流引起的N₂O排放量及氮沉降强度

Fig. 3 N₂O emissions caused by atmospheric nitrogen deposition and nitrogen leaching /runoff, and nitrogen deposition density

表 6 不同类型农用地N₂O直接排放量及其排放通量¹⁾

Table 6 Direct N ₂ O emissions from different croplands and their emission fluxes									
项目	位置	单纯旱作地	水稻 + 旱休闲	水旱轮作 (旱作季)	水旱轮作 (水稻季)	双季稻 + 旱休闲	蔬菜地	果园茶园	合计
直接排放量/t	I 区	10 518	290	—	—	—	226	172	11 207
	II 区	5 976	391	1 849	951	32	317	87	9 604
	III 区	2 709	131	619	319	53	245	239	4 315
	IV 区	1 313	61	288	148	29	131	539	2 510
	安徽省	20 516	874	2 756	1 418	115	919	1 037	27 636
排放通量/kg·hm ⁻²	I 区	1. 9	1. 3	—	—	—	0. 5	2. 8	1. 7
	II 区	3. 0	1. 4	2. 8	1. 4	0. 2	2. 1	5. 3	2. 5
	III 区	2. 5	1. 2	2. 4	1. 2	0. 2	2. 1	5. 1	2. 1
	IV 区	2. 3	1. 1	2. 3	1. 2	0. 2	1. 7	4. 4	2. 1
	安徽省 (平均)	2. 2	1. 3	2. 6	1. 3	0. 2	1. 1	4. 2	2. 0

1) 直接排放通量均是作物生长季的排放通量,直接排放通量 = 各类型农用地N₂O的直接排放量/播种面积

表 7 2011 年安徽省农用地N₂O排放/万 t¹⁾

Table 7 N ₂ O emission from Anhui croplands in 2011/10 ⁴ t						
位置	直接排放	间接排放		秸秆燃烧引起	总排放	
		氮沉降引起	淋溶径流引起		N ₂ O总排放	折合 CO ₂ 当量/万 t
I 区	1. 12	0. 19	0. 1	0. 04	1. 45	603. 82
II 区	0. 96	0. 14	0. 08	0. 02	1. 20	499. 71
III 区	0. 43	0. 06	0. 04	0. 01	0. 54	224. 87
IV 区	0. 25	0. 04	0. 02	0. 01	0. 32	133. 26
安徽省	2. 76	0. 43	0. 23	0. 08	3. 51	1 461. 66

1) 1 t N₂O = 44/28 t N₂O-N; 全球增温潜势采用《IPCC 第五次评估报告》给出的 100 a 时间尺度下的数值,1 t N₂O = 265 t CO₂eq

3 讨论

3.1 方法学和数据源的选取对直接排放的影响

本研究与相关研究结果做了比较(表 8)。首先,在排放源上,SNC 与本研究在农田N₂O直接排放源上考虑较为全面,包括了化肥氮、秸秆还田氮、乡村人口和畜禽排泄物。王效科等^[32]研究的排放源未将乡村人口的排泄物考虑进去,而在中国的相对不发达地区,乡村人口的排泄物几乎全部作为有机肥施入农用地。卢燕宇等^[33]的研究仅将化肥氮作为农田N₂O的直接排放源。其次,在气象要素上,王效科等^[32]和卢燕宇等^[33]的模型均将气象要素直接考虑到模型运算里。本研究是间接地将相关气象要素直接体现在模型上,即根据气候带进行区域划分。在排放因子方面,卢燕宇等^[33]的排放因子仅划分为旱地和水田两种,而本研究和 SNC 则根据中国特有的耕作制度将农田划分为 9 种农田类型,相应的排放因子也不同。SNC 在估算过程中,不同区域中相同农田类型的排放因子采用的是全国统一值,忽略了区域的差异。而本研究在排放因子的选择上,根据安徽省的种植制度,将安徽省划分为南北两

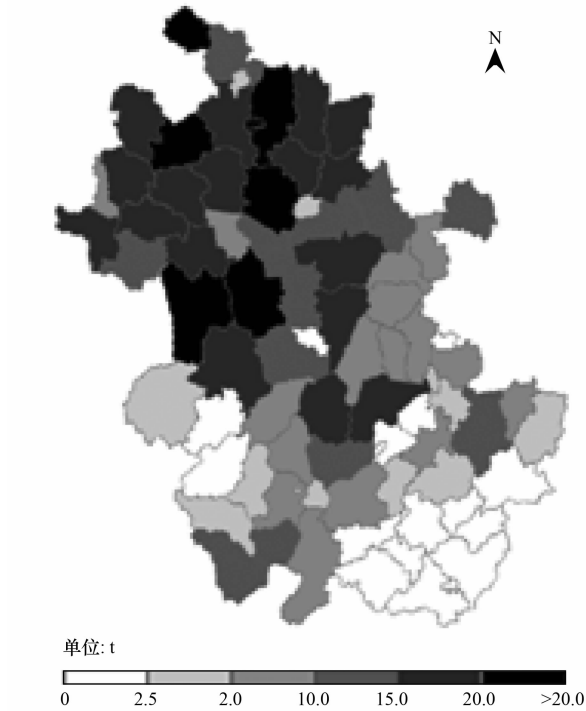


图 4 田间秸秆焚烧引起的N₂O的排放

Fig. 4 N₂O emissions caused by field straw burning

个部分,采用与其种植制度相似的相邻省份的观测数据确定排放因子. 此外,本研究根据相关报道,进

行了部分农业参数本地化处理,降低了估算的不确定性.

表 8 文献调研¹⁾
Table 8 Literature survey

年份	氮源	总氮输入量 /万 t	耕地面积 × 10 ³ /hm ²	单位耕地面积总氮 输入量/kg·hm ⁻²	直接排放量 /t	直接排放通量 /kg·hm ⁻²	文献
1989	化肥氮、畜禽排泄物、秸秆还田	—	4 926. 0	—	9 429. 0 ~ 22 314. 0	1. 91 ~ 4. 53	[32]
1997	化肥氮	—	4 866. 0	—	17 726. 0	3. 64	[33]
2005	化肥氮、畜禽和乡村人口排泄物、秸秆还田	226. 9	5 971. 7 ²⁾	380. 0	23 737. 0	3. 97 ⁴⁾	[22]
			4 092. 5 ³⁾	554. 4	23 737. 0	5. 80 ⁴⁾	[22, 34]
2011	化肥氮、畜禽和乡村人口排泄物、秸秆还田	191. 2	4 184. 4	456. 9	43 371. 0	10. 36	本研究

1) N₂O量 = 氮量 × 44/28, 以上数据均为换算后数据; 直接排放通量 = 直接排放量/耕地面积; 2) 2005 年的耕地数据是全国土地调查之前的数据, 而 2011 年安徽省的耕地面积数据是全国土地调查之后的数据, 两者的统计标准有所不同, 因此差别较大; 3) 2005 年的耕地面积数据来源于文献[34]; 4) 2005 年安徽省农用地N₂O直接排放通量差别较大, 主要是由于农用地N₂O直接排放量相同, 而耕地面积差别较大造成

3.2 清单的不确定性

不确定性是温室气体清单研究中的重要问题之一. 温室气体清单计算中不确定性主要来自于 4 个方面: 统计数据、参数数据(作物参数、动物个体年排泄氮)、调查数据(作物秸秆焚烧率、秸秆还田率等)和排放因子. 本研究将安徽省统计数据与国家统计数据进行了校核, 确定其不确定性为 ± 7%, 本地化的作物参数数据不确定性为 ± 5%, 其它作物参数数据的不确定性为 ± 10%, 本地化的动物个体年排泄氮不确定性为 ± 20%, 其它动物个体年排泄氮的不确定性为 ± 30%, 调查数据的不确定性为 ± 50%, 排放因子不确定性见表 1. 根据《国家温室气体清单优良做法指南和不确定性管理》中提供的误差传递公式, 并根据农用地类型分区域计算了安徽省农用地N₂O排放的不确定性, 计算结果表明: 安徽省农用地N₂O直接

排放不确定性为 ± 52%, 间接排放不确定性为 ± 80%, 田间秸秆焚烧引起的N₂O排放的不确定性为 ± 30%, 农用地N₂O总排放的不确定性为 ± 44%.

影响农用地N₂O估算的不确定性的最重要因素来自于排放因子. 本研究分别计算了 revised IPCC 1996、IPCC 2006 和省级清单编制方法下, 2011 年安徽省农用地N₂O排放的不确定性(表 9), 并与本研究做了比较. 计算结果表明, 根据农用地类型分区域计算农用地N₂O的排放, 可以有效地降低估算结果的不确定性(表 9). 因此, 在接下来的研究中, 应加强安徽省典型农田类型田间N₂O排放的观测, 获得本地化的排放因子数据. 由于目前对N₂O间接排放的研究较薄弱, 因此, 需增加间接排放的观测, 以期获得较为准确的间接排放因子, 降低清单研究的不确定性.

表 9 排放因子及估算不确定性¹⁾
Table 9 Emission factors and estimation uncertainty

项目	指标	本研究	省级清单编制方法	revised IPCC 1996 方法	IPCC 2006 方法
排放因子及其不确定性范围	直接排放 EF ₁	见表 1	0. 010 9 (± 89%) ^[21]	0. 0125 (± 80%) ^[2]	0. 01 (± 135%) ^[4]
	大气氮沉降 EF ₂	见表 1	0. 01 (± 240%) ^[21]	0. 01 (± 90%) ^[2]	0. 01 (± 240%) ^[4]
	淋溶、径流 EF ₃	见表 1	0. 007 5 (± 163%) ^[21]	0. 025 (± 236%) ^[2]	0. 007 5 (± 163%) ^[4]
	田间秸秆焚烧	见表 1			
不确定性	直接排放	± 52%	± 90%	± 80%	± 135%
	间接排放	± 80%	± 172%	± 107%	± 178%
	田间秸秆焚烧	± 30%			
	总排放	± 44%	± 80%	± 68%	± 114%

1) 括号内数据表示排放因子的不确定性, 括号外的数据是排放因子的均值; 排放因子的不确定性 = (高值 - 低值)/2/平均值

3.3 安徽省农用地N₂O减排对策

针对安徽省农用地N₂O的排放分布特征, 若今后实现减排, 可以采取如下措施: 第一, 控制施肥量. 为了保证有较高的产量, 农民向农田大量施肥, 导致施肥过量. 过量的氮素或以氨或氮氧化物的形式释

放到大气中, 或以硝酸盐或铵盐的形式经雨水或灌溉水冲洗而淋溶/径流流失, 造成水体污染. 因此, 需在保证安徽省农用地作物产量的前提下, 采用测土配方施肥, 防止过量施肥. 第二, 改变施肥策略, 稻田以施无机肥为主, 旱地则多施有机肥. 第三, 控

制安徽省畜禽养殖数量,尤其要控制猪的饲养量,建立科学粪便处理工艺(如沼气工程、堆肥、SBR 处理法等),实现畜禽粪便资源化利用. 第四,重视作物秸秆的开发利用,如造纸、沼气工程等,为农民提供解决作物秸秆堆积问题的方法.

4 结论

(1)2011 年安徽省农业土壤N₂O的总排放量为 3.51 万 t,其中农用地土壤N₂O的直接排放量为 2.76 万 t,间接排放量为 0.66 万 t,田间秸秆燃烧排放 0.08 万 t.

(2)淮北平原和江淮丘陵农田氮输入量较大,是农业土壤N₂O主要排放区,对安徽省农业土壤N₂O总排放的贡献分别为 41% 和 35%.

(3)单纯旱作是安徽省农田土壤N₂O最主要的直接排放源,对农田土壤N₂O直接排放源的贡献分别为 I 区 94%,其它区域 52% ~ 63%. 水旱轮作中旱作季是 II 区和 III 区第二直接排放源,而 IV 的果园茶园是第二直接排放源.

(4)单纯旱作地、水稻 + 旱休闲、水旱轮作(旱作季)、水旱轮作(水稻季)、双季稻 + 旱休闲、蔬菜地和果园茶园的 N₂O 直接排放量依次为:2.05、0.09、0.28、0.14、0.01、0.09 和 0.10 万 t; 生长季排放通量依次为:2.2、1.3、2.6、1.3、0.2、1.1 和 4.2 kg·hm⁻².

致谢:感谢中国生态系统研究网络(CERN)提供的不同农田类型N₂O的观测数据.

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 483-714.

[2] IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Volume 2. Agriculture [M]. Paris: The Organization for Economic Cooperation and Development. 1997. 21-40.

[3] IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. [M]. Hayama, Japan: IPCC/OECD/IEA/IGES, 2000. 40-76.

[4] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry, and other Landuse [M]. Kaganawa, Hayama, Japan,: The Organization for Economic Cooperation and Development, 2006. 5-24.

[5] 张强,巨晓棠,张福锁. 应用修正的 IPCC 2006 方法对中国农田N₂O排放重新估算[J]. 中国生态农业学报,2010,**18** (1): 7-13.

[6] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, *et al.* The Asian nitrogen cycle case study [J]. AMBIO, 2002, **31**(2): 79-87.

[7] Zheng X H, Liu C Y, Han S H. Description and application of a model for simulating regional nitrogen cycling and calculating nitrogen flux[J]. Advances in Atmospheric Science, 2008, **25** (2): 181-201.

[8] Zou J W, Lu Y Y, Huang Y. Estimates of synthetic fertilizer N-induced direct nitrous oxide emission from Chinese croplands during 1980- 2000 [J]. Environmental Pollution, 2010, **158** (2): 631-635.

[9] 邹建文,刘树伟,秦艳梅,等. 不同水分管理方式下水稻生长季N₂O排放量估算: 模型应用[J]. 环境科学, 2009, **30** (4): 949-955.

[10] 廖千家骅,王书伟,颜晓元. 中国稻田水稻生长季N₂O排放估算[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 212-218.

[11] Li C S, Frolking S, Frolking T A, *et al.* A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. model structure and sensitivity [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, **97**(D9): 9759-9776.

[12] Li C S, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, **8** (3): 237-254.

[13] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystem, 2000, **58**(1-3): 259-276.

[14] Joshua P, Robert J H, William R H. A metamodeling approach to estimate global N₂O emissions from agricultural soils [J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, **23**(8): 912-924.

[15] 张庆国,李鹏飞,徐丽,等. 皖中沿江平原水稻田 CH₄ 和 N₂O排放估算及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2012, **43** (1): 212-218.

[16] Parton W J, Holland E A, Del Grosso S J, *et al.* Generalized model for NO_x and N₂O emission from soils [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, **106**(D15): 17403-17419.

[17] 国家发展和改革委员会应对国家气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013. 29-29.

[18] 杨俊,韩圣慧,李富春,等. 川渝地区农业生态系统氧化亚氮排放[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2684-2693.

[19] Zheng X H, Mei B L, Wang Y H, *et al.* Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology [J]. Plant and Soil, 2008, **311** (1-2): 211-234.

[20] 万荣荣,贾宏骏. 安徽省综合地理区划初步研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2001, **24**(3): 298-301.

[21] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 2011. 53-68(内部资料).

[22] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2005 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014. 215-221.

[23] 谢昕云. 安徽省园地氮磷流失的监测研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012. 14-15.

[24] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 环境保护部南京环境科学研究所. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册[M]. 2009. 7-8.

[25] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数[J]. 土壤通报, 1996, **27**(4): 145-151.

[26] 王光宇. 安徽省主要农作物秸秆资源现状及平衡利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2010, **28**(1): 13-17.

[27] 田雁飞. 秸秆还田与减量施肥对作物产量及土壤养分的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012. 32-36.

[28] 张玉屏. 水稻旱作条件下根系生长特性的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2001. 12-13.

[29] 王道中, 郭熙盛. 氮肥深施对水稻生长和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(31): 15630-15631.

[30] 蒋跃林, 张庆国, 张仕定, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对大豆根瘤量及其固氮活性的影响[J]. 大豆科学, 2006, **25**(1): 53-57.

[31] 王世济, 刘炎红, 崔权仁, 等. 皖南烟区烤烟干物质和养分的积累研究[J]. 烟草科技/栽培与调制, 2004, (7): 40-43.

[32] 王效科, 李长生. 中国农业土壤N₂O排放量估算[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(4): 483-488.

[33] 卢燕宇, 黄耀, 张稳, 等. 基于 GIS 技术的 1991-2000 年中国农田化肥氮源一氧化二氮直接排放量估算[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7): 1539-1545.

[34] 安徽省历史学会编. 安徽 60 年(1949-2009)[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009. 562.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱 (海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行