

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

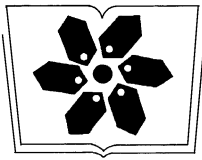
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第21期 Vol.31 No.21 **2011**

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 31 卷 第 21 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

基于景观格局理论和理想风水模式的藏族乡土聚落景观空间解析——以甘肃省迭部县扎尕那村落为例·····	史利莎,严力蛟,黄璐,等 (6305)
武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律·····	游巍斌,何东进,巫丽芸,等 (6317)
旅游地道路生态持续性评价——以云南省玉龙县为例·····	蒋依依 (6328)
城市空间形态紧凑度模型构建方法研究·····	赵景柱,宋瑜,石龙宇,等 (6338)
丹顶鹤多尺度生境选择机制——以黄河三角洲自然保护区为例·····	曹铭昌,刘高焕,徐海根 (6344)
西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征·····	凡非得,王克林,熊鹰,等 (6353)
流域尺度海量生态环境数据建库关键技术——以塔里木河流域为例·····	高凡,闫正龙,黄强 (6363)
雌雄异株植物鼠李的生殖分配·····	王娟,张春雨,赵秀海,等 (6371)
长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应·····	王晓明,赵秀海,高露双,等 (6378)
不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局·····	赵成章,任珩,盛亚萍,等 (6388)
残存银杏群落的结构及种群更新特征·····	杨永川,穆建平, TANG Cindy Q, 等 (6396)
濒危植物安徽羽叶报春两种花型的繁育特性及其适应进化·····	邵剑文,张文娟,张小平 (6410)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林的乔木叶片功能性状特征·····	罗璐,申国珍,谢宗强,等 (6420)
不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征·····	王丽艳,韩有志,张成梁,等 (6429)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林分的影响·····	张喜,崔迎春,朱军,等 (6442)
内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性·····	马成仓,高玉葆,李清芳,等 (6451)
古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析·····	司朗明,刘彤,刘斌,等 (6460)
白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏·····	周永斌,殷有,殷鸣放,等 (6469)
黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势·····	张常智,张明海 (6481)
基于 GIS 的马铃薯甲虫扩散与河流关系研究——以新疆沙湾县为例·····	李超,张智,郭文超,等 (6488)
2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析·····	蒋春先,齐会会,孙明阳,等 (6495)
B 型烟粉虱对寄主转换的适应性·····	周福才,李传明,顾爱祥,等 (6505)
利用 PCR-DGGE 方法分析不同鸡群的盲肠微生物菌群结构变化·····	李永洙, Yongquan Cui (6513)
鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响·····	张宏,沈章军,阳贵德,等 (6522)
铜绿微囊藻对紫外辐射的生理代谢响应·····	汪燕,李珊珊,李建宏,等 (6532)
10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系·····	王燕,李瑞香,董双林,等 (6540)
冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度·····	李大命,孔繁翔,于洋,等 (6551)
城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应·····	蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,等 (6561)
新疆城镇化与土地资源产出效益的空间分异及其协调性·····	杨宇,刘毅,董雯,等 (6568)
山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源·····	徐春英,李玉中,李巧珍,等 (6579)
增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响·····	肖国举,张强,张峰举,等 (6588)
一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数·····	梁亮,杨敏华,邓凯东,等 (6594)
黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征·····	张惠,杨正礼,罗良国,等 (6606)
专论与综述	
植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望·····	黄娟,莫江明,孔国辉,等 (6616)
植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成·····	李宁,白冰,鲁长虎 (6624)
研究简报	
遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响·····	杜成凤,李潮海,刘天学,等 (6633)
学术信息与动态	
科学、系统与可持续性——第六届工业生态学国际大会述评·····	石海佳,梁赛,王震,等 (6641)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 340 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2011-11	



封面图说: 鹤立——丹顶鹤是世界 15 种鹤数量极小的一种,主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地,以捕食小鱼虾、昆虫、蛙蚺、软体动物为主,也吃植物的根茎、种子、嫩芽。善于奔驰飞翔,喜欢结群生活。丹顶鹤属迁徙鸟类,主要在我国的黑龙江、吉林、俄罗斯西伯利亚东部、朝鲜北部以及日本等地繁殖。在长江下游一带越冬。在中国文化中有“仙鹤”之说。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录,濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

张惠,杨正礼,罗良国,张晴雯,易军,杨世琦,陈媛媛,王明. 黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6606-6615.

Zhang H, Yang Z L, Luo L G, Zhang Q W, Yi J, Yang S Q, Chen Y Y, Wang M. The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6606-6615.

黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征

张 惠^{1,2}, 杨正礼^{1,*}, 罗良国^{1,*}, 张晴雯¹, 易 军¹, 杨世琦¹, 陈媛媛¹, 王 明¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081;

2. 宁夏职业技术学院, 银川 750002)

摘要:黄河上游灌区稻田高产区分量施肥现象十分突出,氮肥过量施用引起土壤氮素盈余,导致 N_2O 排放量增大,由此引起的温室效应引起广泛关注。采用静态箱-气相色谱法研究黄河上游灌区稻田不同施肥处理下 N_2O 排放特征。试验设置 5 个施肥处理,包括常规氮肥 300 kg/hm² 下单施尿素和有机肥配施 2 个处理,分别用 N300 和 N300-OM 代表;优化氮肥 240 kg/hm² 下单施尿素和有机肥配施 2 个处理,分别用 N240 和 N240-OM 代表;对照不施氮肥用 N0 代表。试验结果得出,灌区水稻生长季稻田土壤 N_2O 排放主要集中在水稻分蘖前及水稻生长的中后期,稻田氮肥施用、灌水及土壤温度的变化对 N_2O 排放通量影响较大,不同处理水稻各生育阶段 N_2O 累积排放量与稻田土壤耕层 NO_3^- -N 含量动态变化显著相关。稻田 N_2O 排放不是黄河上游灌区稻田氮素损失的主要途径,但灌区稻田 N_2O 排放的增温潜势较大;稻田氮肥过量施用会显著增加 N_2O 排放量,在相同氮素水平下,有机肥配施会显著增加稻田土壤 N_2O 的排放量 ($P < 0.01$)。优化施氮能有效减少灌区稻田水稻生长季 N_2O 排放量。稻田不同处理的水稻整个生长季土壤 N_2O 排放总量为 2.69—3.87 kg/hm²,肥料氮通过 N_2O 排放损失的百分率仅为 0.43%—0.64%。在灌区习惯灌水和高氮肥 300 kg/hm² 时, N300-OM 处理的稻田 N_2O 排放量达 3.87 kg/hm²,在 100 a 时间尺度上的全球增温潜势 (GWPs) 为 20.76×10⁷ kg CO₂/hm²;优化施氮 240 kg/hm² 水平下, N240 和 N240-OM 处理的 N_2O 累计排放量较 N300-OM 处理,分别降低了 1.18 kg/hm² 和 0.57 kg/hm²,在 100 a 尺度上每年由稻田 N_2O 排放引起的 GWPs 分别降低了 6.33×10⁷ kg CO₂/hm² 和 3.06×10⁷ kg CO₂/hm²。

关键词:黄河上游灌区;稻田;氮肥施用; N_2O 排放;全球增温潜势

The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River

ZHANG Hui^{1,2}, YANG Zhengli^{1,*}, LUO Liangguo^{1,*}, ZHANG Qingwen¹, YI Jun¹, YANG Shiqi¹, CHEN Yuanyuan¹, WANG Ming¹

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS/Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

2 Ningxia Vocational and Technical College, Yinchuan 750002, China

Abstract: Input of nitrogen (N) is essential for high crop yields, but excessive application of N fertilizer increased the loss of gaseous nitrogen. Gaseous loss of N is a main way of nitrogen loss in the paddy fields of the irrigation area. The static chamber-gas chromatograph method was used to measure the N_2O emission from the paddy field. The five N treatments of field experiment were conducted, including two treatments of the conventional N application rate (300 kg/hm²), i. e. the application of only urea (N300) and the application of the organic fertilizer (manure) with the urea nitrogen (N300-OM); two treatments of the optimized N application rate (240 kg/hm²), i. e., the application of only urea (N240) and the

基金项目:中国-欧盟科技合作项目 (S2010GR0977); 国家科技重大专项资助 (No. 2009ZX07212-004)

收稿日期:2011-03-04; **修订日期:**2011-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangzl426@126. com; luolg@caas. net. cn

application of the organic fertilizer (manure) with the urea nitrogen ($\text{N}_{240}\text{-OM}$), and no N fertilizer application plot (CK).

The results showed that N_2O emissions mainly occurred before the tiller stage or at the pre- and late- rice growth stages, and more N_2O emissions were measured after rice planting and irrigation. At different nitrogen levels, the total amount of N_2O emissions during the whole rice growing season varied among 2.69—3.87 kg/hm², and the loss of fertilizer N due to N_2O emissions was only 0.43%—0.64%. N_2O emissions from the paddy field is not an important way of nitrogen loss at the Yellow River irrigation area, but the warming potential through N_2O emissions in the irrigation area is not neglectable. Excessive application of nitrogen fertilizer in the paddy field significantly increased N_2O emissions, and at the same level of nitrogen application, organic fertilizer amendment increased N_2O emissions from the paddy soil ($P < 0.01$). Optimization of nitrogen application in the irrigated paddy field during the rice growing season reduced N_2O emissions. With the conventional irrigation practice, N_2O emissions from paddy fields in $\text{N}_{300}\text{-OM}$ treatment reached 3.87 kg/hm². In the scales of 100a, the global warming potentials (GWPs) were 20.76×10^7 kg CO₂/hm². Optimization of N application in the irrigated paddy field during the rice growing season reduced N_2O emissions. Compared with $\text{N}_{300}\text{-OM}$ treatment, cumulative N_2O emissions in N_{240} and $\text{N}_{240}\text{-OM}$ treatments decreased by 1.18 kg/hm² and 0.57 kg/hm², respectively. In the scales of 100a, GWPs caused by N_2O emissions in the paddy field decreased 6.33×10^7 kg CO₂/hm² and 3.06×10^7 kg CO₂/hm², respectively.

Key Words: The irrigation area of the Yellow River; paddy; nitrogen application; N_2O emission; global warming potential

N_2O 作为一种重要的温室气体,虽然在大气中的浓度比 CO_2 低,却有很大的增温潜势,在 20 a、100 a、500 a 的时间尺度上,单位质量 N_2O 的全球增温潜势(Global Warming Potentials, GWPs)分别为 CO_2 的 275、298、156 倍^[1-2]。IPCC 的最新研究报告指出,大气中的 N_2O 浓度每年以 0.2%—0.3% 的速率在增加,预计到 2050 年 N_2O 在大气中的体积分数将增加到 350—400 ppb^[2]。大气中 90% 的 N_2O 来自地表生物源,农田土壤是全球最主要的 N_2O 排放源,中国农业土壤每年由于过分依赖化学氮肥构成了农田 N_2O 排放量占排放总量的 40%,化肥氮消耗产生的 N_2O 排放量占 N_2O 排放总量的 74%^[3]。据估计,稻田排放的 N_2O 约占中国农田总排放的 7%—11%^[4]。尽管有研究表明,农田土壤中旱地的 N_2O 排放大于水田土壤^[5],但 N_2O 作为土壤反硝化的中间产物,水稻生长期的排干和烤田、水分变化剧烈的干湿交替都会使土壤 N_2O 排放大大增强^[6-10]。随着全球水资源匮乏,中国大多数地区稻田水分管理方式由传统的淹水灌溉转向中期晒田和湿润灌溉等节水方式^[11],在减少稻田 CH_4 排放的同时不可避免地增加了 N_2O 排放。因此,对稻田采取适宜的减排措施,为减缓气候变暖做出贡献,是目前需要解决的重要问题。

黄河上游灌区稻田高产区分量施肥现象十分突出,氮肥过量施用引起土壤氮素盈余。稻田水分管理由常规灌溉向节水灌溉转变,稻田施肥以化肥为主,有肥源的地区配施有机肥,随着黄河来水量的逐渐减少,水稻生长季土壤经常处于频繁干湿交替状态,对 N_2O 产生及排放会有较大影响。已有研究表明,氮肥施用、土壤温度、水分、有机质含量、pH 值与土壤 NO_3^- 的浓度等对稻田 N_2O 的产生和排放影响较大,其中氮肥运筹是影响土壤 N_2O 排放的重要因素^[12-16]。但关于黄河上游灌区农田 N_2O 排放的研究目前还几乎是空白。为此,本研究于 2010 年选择黄河上游灌区具有代表性的宁夏灌区开展试验研究,探明灌区稻田 N_2O 排放特征、排放总量及影响因素,为未来更大尺度上研究农田 N_2O 生成和排放机理及准确估算我国稻田 N_2O 排放总量提供数据支撑和科学依据。

1 材料及方法

1.1 试验区概况

试验地点选择黄河上游灌区具有代表性的宁夏银川灵武良种繁殖场(38°8'N, 106°16'E)。该区位于黄河

上游下段,属于宁夏中部干旱带。干旱少雨,多年平均降雨量 192.9 mm,年蒸发量 1762.9 mm,年均气温 8.9℃,无霜期 152 d,年日照时数 3011 h,年内水量分配不均,春季占 18.2%,夏季占 58%,秋季占 21%,冬季占 2.1%。该区农业以引黄自流灌溉为主,地势平坦。土壤类型主要是灰钙土和灌淤土,耕作层厚度为 30 cm 左右,肥力水平中等偏上,试验区以水稻为主,水稻多年均产 8850 kg/hm²。在选地布置试验小区前对试验区土壤剖面 0—120 cm 进行分层取样测定,其理化性状如表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 Physical and chemical properties of experimental soil

土壤剖面 Soil depth /cm	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 T-N /(g/kg)	全磷 T-P /(g/kg)	土壤有效养分 Soil available nutrients/(mg/kg)					pH	全盐量 T-salt /(g/kg)
				N	P	K	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N		
0—20	14.87	1.09	0.80	96.33	29.27	151.67	10.10	1.09	8.58	1.13
20—40	13.07	0.99	0.76	69.00	16.80	144.00	7.52	1.08	8.71	0.93
40—80	5.73	0.52	0.48	41.67	4.50	101.67	7.05	0.80	8.93	0.75
80—120	3.67	0.38	0.51	21.33	4.80	89.33	6.25	0.94	9.29	0.64

1.2 试验设计

试验采用小区设计,随机排列。共设置 5 个施肥处理,包括常规氮肥 300 kg/hm²下的 2 个施肥处理,分别用 N300 和 N300-OM 代表;优化氮肥 240 kg/hm²下的 2 个施肥处理,分别用 N240 和 N240-1/2OM 代表,对照 (CK) 不施氮肥,用 N0 代表,具体肥料种类及施肥量见表 2。其中猪粪的含 N 量为 0.3%,含水量为 197%,通过计算得出猪粪的实际含氮量,即 30×10³ kg/hm²的猪粪相当于 90 kg/hm²的氮素,15×10³ kg/hm²猪粪相当于 45 kg/hm²的氮肥;磷、钾肥常规施用,分别为 105 kg/hm²和 60 kg/hm²。以上处理能够代表常规高氮肥和优化氮肥水平下,有机肥化肥配合施用的 4 种施氮肥组合和 1 个不施氮肥处理,是研究灌区稻田系统氮素利用的典型处理。

表 2 试验处理及施肥量
Table 2 Treatments and the amount of fertilizer applied/(kg/hm²)

处理 Treatment		氮肥 Fertilizer-N (N)	有机肥 NPKOM (N)	磷肥 Fertilizer-P (P ₂ O ₅)	钾肥 Fertilizer-K (K ₂ O)
常规施氮 I (N300)	单施化肥	300	—	105	60
常规施氮 II (N300-OM)	化学氮肥+有机肥	210	90	105	60
优化施氮 I (N240)	单施化肥	240	—	105	60
优化施氮 II (N240-1/2OM)	化学氮肥+有机肥	195	45	105	60
对照 N0	不施氮肥	0	—	105	60

NPKOM: Organic Fertilizer

水稻采用育苗移栽的方式。有机肥(猪粪)、磷肥(重过磷酸钙)和钾肥(K₂O)在整地泡田之前作为基肥结合翻耕入土。氮肥分底肥和 3 次追肥,施用比例分别为:40% 的尿素做基肥施用,在稻田灌水泡田后结合平田撒施在耕作层表面,5 月 12 日插秧;60% 的尿素做追肥施用,追肥比例分别为分蘖肥(5 月 30 日)占尿素总氮肥量的 30%,拔节肥(6 月 23 日)占 20%,粒肥(7 月 21 日)占 10%。其他田间栽培管理与当地习惯一致。灌水按照每个处理分别灌溉,对单施化肥的 N240 处理灌溉节水 30%,其它处理灌水量保持一致。2010 年水稻整个生育期常规灌水处理共灌水 23 次,灌水量为 1600 mm,节水 30% 处理的灌水次数为 21 次,灌水量为 1042 mm。

1.3 N₂O 气体样品的收集和测定

N₂O 气体样品采用密闭静态暗箱法采集、气相色谱法检测。采样箱是水密封型可移动采样暗箱,由采样

顶箱(500 mm × 600 mm × 1000 mm)和底座(500 mm × 600 mm × 3000 mm)两部分组成,箱壁用1 mm 厚不锈钢板制成,不锈钢底座于插秧前固定于土壤中,采样时底座水槽内加水密封,顶箱外包有保温材料,防止在太阳辐射下箱体内温度升高。顶箱上端装有两个空气搅拌风扇、温度探头和气体样品采集口,在气体样品采集时,可以同步监测箱体内温度和土表0—5 cm 土壤温度。具体气体田间采样设备和方法参见徐华和王跃思的田间气体采样方法和设备^[17,31]。

每次采样时间固定在9:00—12:00,采样频次定为每10 d 测定1次,同时根据水稻生育期间施肥和灌水管理,适当增加取样次数。采用5个处理的5箱体平行采样。采样时把握在扣箱后30 min 内完成3次采样。分别在罩箱后0、15、30 min 时用微型真空泵(VBH2005, L/min)分别抽取300 mL 气体样品保存。

N_2O 浓度的测定方法为气相色谱分析法。具体分析测定过程是在中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室完成,用岛津GC-14A 气相色谱仪分析样品的 N_2O 浓度。 N_2O 气体通过十通进样和四通切换阀,由电子捕获器(ECD)分析。样品 N_2O 浓度的定量由比较样品与标准 N_2O 样品的峰高计算得来。单位时间内和单位面积上,稻田向大气释放或吸收的 N_2O 通量的计算公式为:

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \frac{273}{(273+t)}$$

式中, F 为 N_2O 排放通量($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为 N_2O 标准状态下的密度($\rho = 1964.28 \text{ g/m}^3$); h 为采样箱的罩箱高度(m); dc/dt 为采样箱内 N_2O 浓度变化率; t 为箱体内温度($^{\circ}\text{C}$)。 N_2O 季节排放通量由相邻2次测定值求平均值,再乘以2次采样相隔天数,积累相加后得出总的排放通量。

1.4 稻田 N_2O 排放的全球增温潜势估算

全球增温潜势(Global Warming Potentials, GWP_s)是一个相对辐射强度指数,被用来定量评估人类排放的温室气体可能对全球气温升高造成的影响^[2]。通常用GWP_s(CO_2 的GWP_s 为1)来表示相同质量的不同温室气体对温室效应增强的相对辐射效应。稻田系统 N_2O 气体排放对全球变暖具有重要影响,在100 a 的时间尺度上,单位质量 N_2O 的全球增温潜势为 CO_2 的298 倍^[2]。由此,在100 a 时间尺度上,稻田生长季 N_2O 排放的GWP_s 的计算方法是将 N_2O 排放累积量分别乘以298,得出 N_2O 排放的GWP_s。

1.5 数据处理

采用Excel 2007 和SPSS13.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果

2.1 水稻生长季土壤 N_2O 排放动态变化特征

水稻整个生长季土壤 N_2O 排放动态变化如图1。不同处理均在稻田灌水泡田后第2天有较高的排放峰,其峰值为224.38—73.73 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,插秧后田间持续保持一定水层直到拔节前,田间检测仅有少量的 N_2O

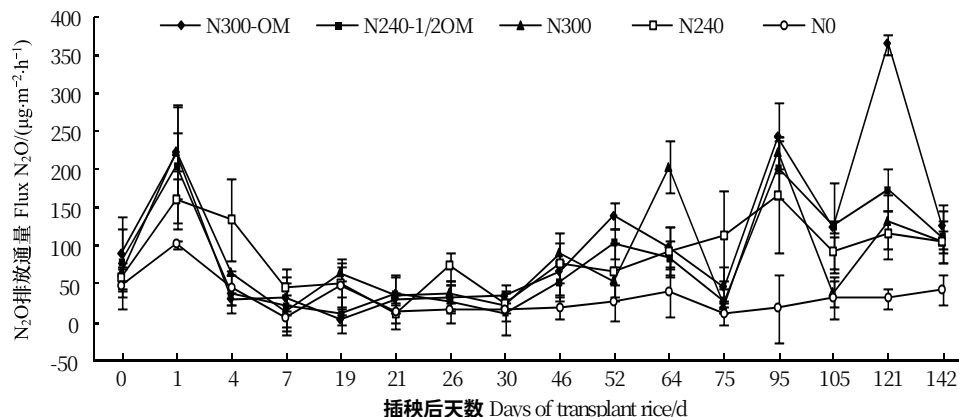


图1 2010 年稻田生长季土壤 N_2O 排放通量动态变化

Fig.1 Temporal variations of N_2O fluxes in the rice field in 2010

排放;6月22日拔节肥后检测到有不同程度的排放峰值;到7月22日穗肥后检测到较大的排放峰,N300-OM、N240-1/2OM、N300、N240、N0处理的排放速率分别为242.9、157、223.26、128.52、18.77 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$);水稻成熟期即稻田最后一次灌水后到收获前后稻田土壤 N_2O 排放速率较大,N300-OM、N240-1/2OM、N300、N240、N0处理的最大排放速率分别为364.4、1174.1、132.47、115.4、31.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。相较于单施尿素的N300和N240处理,有机肥和氮素化肥配合施用的N300-OM、N240-1/2OM处理,在水稻生长中后期有较大的排放速率,且高氮肥处理N300-OM的排放峰值最大。

2.2 不同施肥时期 N_2O 总排放量

不同施肥处理水稻整个生长季土壤 N_2O 总排放量为0.84—3.87 kg/hm^2 ,肥料氮通过 N_2O 排放损失百分率仅为0.43%—0.64%(表3)。梁国庆等^[16]研究得出,水稻季土壤 N_2O 排放量为0.89—2.45 kg/hm^2 ,肥料氮通过 N_2O 排放的损失率为0.39%—0.47%;丁洪等研究表明, N_2O 排放不是稻田氮素损失的主要途径^[18-20]。本研究也得出,在黄河上游灌区稻田 N_2O 排放损失氮量及肥料氮损失百分率也相对较低,与前人研究结论一致。

比较2个有机肥配合施用处理的 N_2O 排放总量变化得出,在高氮肥300 kg/hm^2 水平下,N300-OM处理的水稻整个生长季 N_2O 累积排放量最大,其值为3.87 kg/hm^2 ,较其它处理差异显著;优化氮肥240 kg/hm^2 时,N240-1/2OM处理的 N_2O 排放量为3.30 kg/hm^2 ,较N300-OM处理的排放量减少0.57 kg/hm^2 ,方差分析得出差异显著($P<0.05$)。比较2个单施尿素氮肥处理结果得出,高氮肥300 kg/hm^2 处理N300的水稻整个生长季 N_2O 排放总量为2.86 kg/hm^2 ,优化施氮240 kg/hm^2 处理N240的 N_2O 排放总量为2.69 kg/hm^2 ,较高氮肥N300的减少0.17 kg/hm^2 ,方差分析得出2个处理之间 N_2O 排放总量变化差异不显著。比较2个有机肥处理N300-OM和N240-1/2OM的累计总排放量与单施尿素处理N300和N240的差异显著($P<0.05$)。结果分析表明,稻田氮肥施用对土壤 N_2O 排放量影响较大,灌区稻田高氮肥施用会显著增加水稻生长季 N_2O 排放量;在相同氮素水平下,有机肥的配合施用会显著增加稻田土壤 N_2O 的排放量。在此处需要特别说明的是,由于本试验是在2009年试验的基础上进行的,由2009年的试验结果得出,在常规灌溉下的高氮肥处理稻田 N_2O 排放量较优化氮肥处理的差异显著;2010年对N240进行节水30%处理后,试验结果得出,常规灌溉且高氮肥处理N300和优化施氮N240的 N_2O 总排放量之间差异不显著,表明灌区稻田节水会增加稻田土壤 N_2O 的排放量。

表3 不同施肥处理水稻生长季土壤 N_2O 总排放量

Table 3 Total emissions of N_2O from the paddy field during the whole experimental period

处理 Treatments	N_2O 排放量 Emission amounts of N_2O / (kg/hm^2)				肥料氮损失率 Loss rate of fertilizer N / %
	排放总量 Total emission amounts	分蘖前 Before Tillering	分蘖—拔节 Tillering to jointing	成熟期 Ripening stage	
N300-OM	3.87 [2.46] a	0.22 (5.75)	1.32 (34.13)	2.32 (60.12)	0.64
N240-1/2OM	3.30 [2.08] b	0.38 (11.88)	1.36 (42.50)	1.56 (48.75)	0.51
N300	2.86 [1.82] c	0.44 (15.57)	1.38 (48.41)	1.03 (36.02)	0.43
N240	2.69 [1.71] c	0.43 (16.13)	1.17 (43.48)	1.09 (40.40)	0.49
N0	0.84 [0.54] d	0.21 (25.43)	0.32 (38.09)	0.31 (36.48)	

同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平,下同;括号“[]”内数值表示通过 N_2O 排放损失的总N量,括号“()”内数值表示水稻不同生育阶段 N_2O 排放量占全生育期 N_2O 排放量的百分比

水稻不同生育阶段土壤 N_2O 累积排放量如表3。比较分蘖前(0—26 d)、分蘖-拔节(27—75 d)和成熟期(76—142 d)3个阶段, N_2O 累积排放量主要发生在水稻生长的中后期,其中有机肥和尿素配合施用的N300-OM和N240-1/2OM两处理, N_2O 排放主要发生在水稻成熟期,其排放量分别占总排放量的60.12%和47.43%;其次是分蘖—拔节期排放量也相应较大,分别占总排放量的34.13%和41.17%,分析原因与农田灌

水、温度及土壤有机质含量等的影响有关。而分蘖前期排放量相对较低;单施尿素的 N300 和 N240 两个处理 N_2O 排放量在水稻分蘖—拔节期所占比例最大,分别占总排放量的 48.41% 和 43.48%,其次是成熟期分别占总排放量的 36.02% 和 40.40%。

2.3 稻田耕层土壤硝态氮含量与 N_2O 排放通量的相关性

水稻不同生育阶段稻田土壤耕层 0—30 cm 的 NO_3^- -N 含量如图 2。水稻生长季稻田土壤 NO_3^- -N 含量变化表现出,施肥前(FF)含量较高,分蘖期(TS)到孕穗期(BS) NO_3^- -N 含量很低,成熟期(MS)至收获后(AH)有所提高的变化趋势。不同处理比较得出,施肥对浅层 0—15 cm 土壤 NO_3^- -N 含量影响较大,有机肥配合施用的 NO_3^- -N 含量相对较高,在插秧前高氮肥且有机肥配合施用 N300-OM 处理的 NO_3^- -N 含量最高。相关性分析得出,水稻不同生育阶段 N_2O 累计排放量与耕层土壤 NO_3^- -N 含量呈极显著相关,其相关系数相对较高($R = 0.76^{**}$)。Skiba 等也发现 N_2O 排放与表土 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度成正相关关系;增加 NO_3^- -N 含量显著增加 N_2O 排放^[21-22]。本研究表明,不同生育阶段施肥是耕层 0—15 cm 土壤 NO_3^- -N 含量增加的主要原因,土壤表层 NO_3^- -N 含量的多少与水稻各生育阶段 N_2O 累计排放量显著相关。

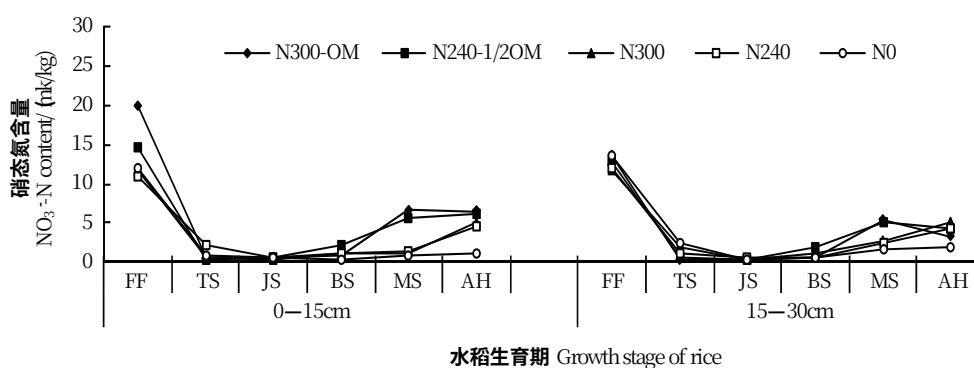


图 2 水稻不同生育时期耕层土壤硝态氮含量动态变化

Fig. 2 Dynamics of NO_3^- -N contents in top soil during the rice growing season

图中缩写字母 FF: 施肥前; TS: 分蘖期; JS: 拔节期; BS: 孕穗期; MS: 成熟期; AH: 收获后

2.4 水稻生长季土壤 N_2O 排放全球增温潜势

由水稻生长季稻田 N_2O 排放总量计算得出,在 100 a 的时间尺度上,不同处理单位质量 N_2O 的全球增温潜势(Global Warming Potentials, GWP_s)如表 4。稻田氮肥施用显著增加了 N_2O 排放的大气增温效应。灌区稻田不同处理的 GWP_s 在 100 a 的时间尺度上较对照差异显著($P < 0.05$),N300-OM、N240-1/2OM、N300 和 N240 处理的 GWP_s 分别较对照 N0 增加了 358.39%、291.40%、238.75% 和 219.52%,说明稻田由氮肥输入引起的 N_2O 排放的大气温室效应十分显著。

比较 2 个有机肥配合施用处理的水稻生长季 N_2O 排放的 GWP_s 得出,高氮肥 300 kg/hm² 下, N300-OM 处理在 100 a 时间尺度上的 GWP_s 为 1151.73 kg CO₂/hm²,优化氮肥 240 kg/hm² 时, N240-1/2OM 处理在 100 a 时间尺度上的 GWP_s 为 983.40 kg CO₂/hm²,较 N300-OM 处理减少了 168.33 kg CO₂/hm²,方差分析得出差异显著($P < 0.05$)。在相同氮素水平下,单施尿素高氮肥 300 kg/hm² 处理在 100a 时间尺度上的 GWP_s 为 851.11 kg CO₂/hm²,较 N300-OM 处理低 300.62 kg CO₂/hm²,方差分析得出差异显著($P < 0.05$)。以上结果表明,高氮肥施用会显著增加稻田 N_2O 排放的 GWP_s;在相同氮素水平下,有机肥(猪粪)的配合施用显著增强了 N_2O 排放的温室效应。

单位产量的 GWP_s 为一定时间尺度上稻田 N_2O 排放的 GWP_s 与单位产量的比值,其值大小可以综合反映水稻生产的经济效益和环境效益。通过对水稻单位产量的 GWP_s 分析表明(表 4), N300-OM 处理的单位产量的 GWP_s 最高,且显著高于其它处理($P < 0.05$),优化氮肥 N240 处理的单位产量的 GWP_s 最低, N240-1/

2OM、N300 和 N240 处理之间差异不显著。4 个处理 N300-OM、N240-1/2OM、N300 和 N240 的单位产量的 GWP_s 分别较不施氮肥处理(N0)增加了 175.02%、96.53%、92.01% 和 74.12%,表明高氮肥且有机肥的配合施用会显著增加单位产量的 GWP_s。

表 4 不同施肥处理水稻生长季土壤 N₂O 排放全球增温潜势

Table 4 Global warming potentials (GWP_s) of N₂O emissions from the rice field during the whole experimental period

处理 Treatments	100 年 GWP _s (kg CO ₂ /hm ²)	比对照增长 ΔGWP _s Increase by CK/%	单位产量的 GWP _s GWP _s of yield per unit/(100a)
N300-OM	1151.73a	358.39	0.142 a(175.02%)
N240-1/2OM	983.40b	291.40	0.101 b(96.53%)
N300	851.11bc	238.75	0.099b(92.01%)
N240	802.81bc	219.52	0.090b(74.12%)
N0	251.25d		0.051 c

1)表中 100 年 GWP_s 指在 100a 时间尺度上单位质量 N₂O 的全球增温潜势,其值为 CO₂ 的 298 倍;2)ΔGWP_s 指同一时间尺度不同处理与对照 N0 比较 GWP_s 增减的百分数;3)单位产量的 GWP_s 是指各处理 N₂O 的 GWP_s 与经济产量的比值;4)表中括号内数据表示各处理较对照单位产量的 GWP_s² 增长百分率

2.5 不同施肥处理对稻谷产量的影响

不同处理稻谷产量结果如表 5。与 CK 相比,4 个施肥处理的增产百分率为 66.68%—99.15%,氮肥的增产效果显著。与 2 个高氮肥处理比较,优化施肥可显著提高水稻产量,其中 N240-1/2OM 的产量最高,增产效果十分显著,较 CK 增产达 99.15%。结合田间不同生育时期的水稻植株群体动态和产量构成因素,2 个高氮肥处理的在水稻生育中后期田间郁闭出现倒伏,对产量影响较大。

2.6 黄河上游灌区稻田 N₂O 排放与大气温室效应

黄河上游灌区 2010 年水稻种植面积为 18×10^4 hm²^[23],在习惯高氮肥 300 kg/hm² 时,有机肥和尿素配合施用 N300-OM 处理的稻田 N₂O 排放量达 3.87 kg/hm²,计算得出黄河上游灌区 2010 年水稻整个生长季 N₂O 总排放量为 69.66×10^4 kg/a,在 100a 时间尺度上的全球增温潜势(GWP_s)为 20.76×10^7 kg CO₂/hm²;单施尿素 N300 处理的 N₂O 排放量达 2.86 kg/hm²,计算得出 2010 年黄河上游灌区水稻整个生长季 N₂O 总排放量为 51.48×10^4 kg/a,较 N300-OM 处理减少 18.18×10^4 kg/a;在 100 a 时间尺度上的全球增温潜势(GWP_s)为 15.34×10^7 kg CO₂/hm²,较 N300-OM 减少 5.4×10^7 kg CO₂/hm²;

优化氮肥 240 kg/hm² 时,与高氮肥 M300-OM 比较,N240-1/2OM 处理的在灌区水稻整个生长季 N₂O 积累排放量减少 10.26 kg/a,在 100a 时间尺度上的全球增温潜势(GWP_s)减少了 3.06×10^7 kg CO₂/hm²;单施尿素 N240 处理的 N₂O 累计排放量较高氮肥 M300-OM 减少了 21.24 kg/a,在 100a 时间尺度上的全球增温潜势(GWP_s)减少 6.31×10^7 kg CO₂/hm²。

综合分析得出,黄河上游灌区稻田优化氮肥 240 kg/hm²,每年可减少 N₂O 排放量 10.26—21.24 kg/a,在 100a 时间尺度上的全球增温潜势(GWP_s)降低了 3.06×10^7 — 6.2×10^7 kg CO₂/hm²。

3 讨论

土壤中 N₂O 的产生主要是在微生物参与下,通过硝化和反硝化作用完成的^[12],影响硝化与反硝化作用的因素也相应会影响土壤 N₂O 的产生和排放,土壤温度、湿度、pH 值与土壤 NH₄⁺ 的浓度通过控制硝化作用的进

表 5 不同施肥处理对水稻产量的影响

Table 5 Rice yields of different fertilizer treatments

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	增产 Increase /%
N300-OM	8132.57±411.7b	66.68
N240-1/2OM	9717.16±295.9a	99.15
N300	8608.04±572.0b	76.42
N240	8953.42±195.7ab	83.5
N0	4879.2±72.9c	

P<0.05

程,影响农田 N_2O 的生产和排放,农田肥水运筹是影响 N_2O 生成与排放的主要因素^[13],化学氮肥施用量的增加是 N_2O 排放量增加的主要因素,氮肥的施用引起 N_2O 季节性排放^[15]。本研究结果表明,在黄河上游灌区氮肥施用对稻田 N_2O 排放影响较大,稻田高氮肥施用使土壤 N_2O 的累积排放量显著增加,在相同氮素水平下,增施有机肥显著增加稻田土壤 N_2O 的排放,与许多研究结果一致。相同施氮量时,施用有机肥处理的稻田土壤 N_2O 累积排放量大于单施化肥处理^[24-27]。有机肥的施用促进灌区稻田土壤 N_2O 产生和排放的主要原因是,有机肥的施用增加了土壤有机质含量,在较高的温度条件下,土壤有机质的矿化产物不仅为反硝化过程提供了反应底物,而且有机质本身还为参与这一过程的微生物提供了能源,导致土壤 N_2O 的大量产生和排放^[28-29]。

从整个水稻生长季 N_2O 累积排放量来看,猪粪配合尿素施用, N_2O 的排放主要发生在稻田生育后期,特别是在水稻成熟期,这主要受灌区夏季高温影响,在灌区夏季气温达 28—32 °C 时,稻田土壤温度也相应较高,在 24—25 °C 左右,使土壤微生物活性增强,有利于土壤有机质转化,同时也促进了硝化-反硝化作用的进行,因而 N_2O 排放量较高。Skiba 等^[21] 研究发现 N_2O 排放与表土 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度成正相关;增加土壤中的 NH_4^+ 浓度,可以提高硝化作用对 N_2O 排放的贡献率,增加 NO_3^--N 含量显著增加 N_2O 排放^[22]。本研究也得出,灌区稻田不同氮肥施用是耕层 0—15 cm 土壤 NO_3^--N 含量增加的主要原因,耕作土壤 NO_3^--N 含量与水稻各生育阶段 N_2O 累积排放量显著相关。

农田生态系统 N_2O 排放具有明显的季节变化,土壤 N_2O 排放通量随水分含量和温度变化而呈现季节性变化^[26],稻田干湿交替处理会增加 N_2O 的排放^[13],稻田间歇灌溉、土壤频繁干湿交替及水稻生长期的排干和烤田都会有 N_2O 大量产生及排放,间歇灌溉稻田 N_2O 排放峰值出现在水稻分蘖前期和成熟期^[10,30]。渍水期间稻田土壤处于厌氧条件,田面水氮素大量以 NH_4^+-N 存在,促进了氨挥发;在水稻晒田时,增强了土壤的通透性,促进了氮素矿化、硝化过程发生,增加了 N_2O 排放^[31]。本研究得出,不同处理下灌区水稻生长季稻田土壤 N_2O 排放主要集中在水稻分蘖前及水稻生长的中后期,同时在稻田土壤水分干湿交替时也有较大的排放量,在稻田淹水状态,田间采样检测仅有少量的 N_2O 排放。徐华^[17] 等研究也表明土壤含水量很低或长期持续淹水等极端条件均不利于硝化和反硝化细菌的生长。水稻季 N_2O 排放主要集中在非淹水阶段,田间持续淹水期 N_2O 排放很低,中期烤田时期是 N_2O 排放的关键时期^[30]。

黄河上游灌区春季插秧前后气温不稳定,2010 年在水稻插秧后,大气温度持续偏低,0—5 cm 地表温度在 10.9—17.5 °C,且在插秧后的 1 周内连阴雨天,造成 N_2O 的排放量相对较低;此外,为了保温护苗,田间持续保持浅水层,不利于 N_2O 排放。同时灌区基肥施用时,尿素氮肥习惯上都是结合泡田整地在田间有水层时撒施在田面的,大量的氮素溶于水后,在氨化作用下,通过氨挥发损失,相应地减少了稻田 N_2O 的产生和排放。综合分析得出,温度对稻田 N_2O 排放通量的季节变化影响较大,但由于受灌水、施肥量及施肥方式等多种因素的相互影响,灌区稻田 N_2O 排放通量的季节变化与温度变化的相关性较低。

农田氮素输入增强了 N_2O 排放的温室效应,其未来的增温潜势不容忽视^[32]。水稻季土壤 N_2O 排放量为 0.89—2.45 kg/hm²,肥料氮通过 N_2O 排放的损失率为 0.39%—0.47%^[16]。本研究得出,稻田不同处理的水稻整个生长季土壤 N_2O 排放总量为 2.69—3.87 kg/hm²,肥料氮通过 N_2O 排放损失的百分率仅为 0.43%—0.64%,表明稻田 N_2O 排放不是黄河上游灌区稻田氮素损失的主要途径,但灌区稻田 N_2O 排放的增温潜势较大。在灌区习惯灌水和高氮肥 300 kg/hm² 时,有机肥和尿素配合施用下,在 100 a 时间尺度上灌区稻田生长季 N_2O 排放的全球增温潜势(GWPs)为 20.76×10^7 kg CO₂/hm²;单施尿素时的稻田生长季土壤 N_2O 排放 100 a 时间尺度上的全球增温潜势(GWPs)为 15.34×10^7 kg CO₂/hm²。有研究表明,稻田 CH₄ 和 N_2O 的排放之间具有相互消长关系^[32],稻田长期淹水状态下, N_2O 排放量较低,但会导致 CH₄ 的大量产生和排放,因此在未来研究灌区稻田温室气体排放控制时,需要考虑 CH₄ 和 N_2O 的综合全球增温潜势。

4 结论

(1) 黄河上游灌区稻田高氮肥施用会显著增加水稻生长季土壤 N_2O 排放量,在相同氮素水平下,有机肥

配合施用会显著促进稻田土壤 N_2O 的产生和排放;优化施氮能有效减少灌区稻田水稻生长季 N_2O 的排放量。在灌区稻田常规灌水和有机肥配合施用,习惯高氮肥 300 kg/hm^2 水平下,水稻整个生长季 N_2O 累积排放达 3.87 kg/hm^2 ,优化氮肥 240 kg/hm^2 处理的 N_2O 排放量为 3.3 kg/hm^2 ,较高氮肥处理排放量减少 0.57 kg/hm^2 。对单施尿素的 2 个处理,高氮肥 300 kg/hm^2 的稻田 N_2O 排放量为 2.86 kg/hm^2 ,较高氮肥有机肥配合施用处理的减少 1.01 kg/hm^2 ;优化氮肥 240 kg/hm^2 的 N_2O 排放量为 2.69 kg/hm^2 ,与高氮肥且有机肥配合施用的减少 1.18 kg/hm^2 。

(2) 灌区水稻生长季稻田土壤 N_2O 排放主要集中在水稻分蘖前及水稻生长的中后期,同时在稻田土壤水分干湿交替时也有较大的排放量。稻田氮肥施用、灌水及土壤温度的变化对 N_2O 排放通量影响较大。不同处理稻田土壤耕层 NO_3^--N 含量动态变化与水稻各生育阶段 N_2O 累积排放量显著相关。从整个水稻生长季来看,有机肥配合施用的稻田土壤 N_2O 的排放主要发生在水稻生育后期,特别是在水稻成熟期,其排放量占总排放量的 $50.37\%—62.82\%$ 。

(3) 稻田 N_2O 排放不是黄河上游灌区稻田氮素损失的主要途径,但灌区稻田 N_2O 排放的增温潜势较大。稻田不同处理的水稻整个生长季土壤 N_2O 排放总量为 $2.69—3.87\text{ kg/hm}^2$,肥料氮通过 N_2O 排放损失的百分率仅为 $0.43\%—0.64\%$ 。2010 年在灌区习惯灌水和高氮肥 300 kg/hm^2 下,有机肥和尿素配合施用,在 100 a 时间尺度上灌区稻田 N_2O 排放的全球增温潜势(GWPs)为 $20.76\times 10^7\text{ kg CO}_2/\text{hm}^2$;单施尿素时,在 100 a 时间尺度上 N_2O 排放的 GWPs 为 $15.34\times 10^7\text{ kg CO}_2/\text{hm}^2$,较有机肥配合施用的 GWPs 减少 $5.4\times 10^7\text{ kg CO}_2/\text{hm}^2$;优化施氮 240 kg/hm^2 水平下,N240 和 N240-1/2OM 处理的 N_2O 累计排放量与 N300-OM 处理比较,分别降低 1.18 kg/hm^2 和 0.57 kg/hm^2 ,在 100a 时间尺度上由稻田 N_2O 排放引起的 GWPs 降低了 $6.31\times 10^7\text{ kg CO}_2/\text{hm}^2$ 和 $3.06\times 10^7\text{ kg CO}_2/\text{hm}^2$ 。

致谢:宁夏农林科学院李友宏、王芳、赵天成、陈晨、刘汝亮、王世荣、罗昀等和中国农业科学院科学院农田灌溉研究所吴海卿、朱东海等在试验中给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Wigley T M L, Raper S C B. Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science*, 2001, 293(5529): 451-454.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Nature Publishing Group, A Division of Macmillan Publishers Limited, 2007.
- [3] Mosier A R, Dom J W, Freney J R. Managing soil denitrification. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 57(6): 505-513.
- [4] Xing G X, Yan X Y. Analysis and estimation of N_2O emissions from croplands in China and its mitigation options. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 1-6.
- [5] Wang M X, Zhang R J, Zheng X H. Sources and sinks of green house gases. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 75-79.
- [6] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, Xu H, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14.
- [7] Li C S, Frolking S, Xiao X M, Moore B III, Boles S, Qiu J J, Huang Y, Salas W, Sass R. Modeling impacts of farming management alternatives on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions: a case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(3): GB3010.1-GB3010.10.
- [8] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, Zheng X H, Sass R L. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2021.1-GB2021.9.
- [9] Huang S H, Pant H K, Lu J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1): 9-15.
- [10] Yuan W L, Cao C G, Cheng J P, Xie N N. CH_4 and N_2O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4294-4300.
- [11] Li C S, Frolking S, Xiao X M, Moore B III, Boles S, Qiu J J, Huang Y, Salas W, Sass R. Modeling impacts of farming management alternatives on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions: a case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(3): GB3010.1-GB3010.10.
- [12] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. IPCC-Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 38-41.
- [13] Li H, Wang L G, Qiu J J. Studies of N_2O emissions from croplands and strategies for reducing N_2O emission. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007, (5): 1-5.

- [14] EIA-Energy Information Administration. Emissions of Greenhouse Gas in the United States 1997. DOE/EIA-0573(97). Washington DC, 1998.
- [15] Lee J, Hopmans J W, van Kessel C, King A P, Evatt K J, Louie D, Rolston D E, Six J. Tillage and seasonal emissions of CO_2 , N_2O and NO across a seed bed and at the field scale in a Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 2009, 129(4): 378-390.
- [16] Liang G Q, Zhou W, Xia W J, Wang X B, Sun J W, Li S L, Hu C, Chen Y F. Effect of optimized nitrogen application on N_2O emission from paddy field under wheat-rice rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 304-311.
- [17] Xu H, Xing G X, Cai Z C, Tsuruta H. Characteristics of N_2O emissions from paddy fields in hilly area. *Soil Environmental Sciences*, 1999, 8(4): 266-270.
- [18] Ding H, Cai G X, Wang Y S, Chen D L. Nitrification-denitrification losses of nitrogen fertilizer and N_2O emission from Maize-chao Soil System in North China Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(4): 416-421.
- [19] Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, Li X X, Dong W X. Nitrogen cycling and balance in agricultural ecosystem in piedmont plain of Taihang Mountains. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 5-11.
- [20] Lu Y Y, Huang Y, Zou J W, Zheng X H. An inventory of N_2O emissions from agriculture in China using precipitation-rectified emission factor and background emission. *Chemosphere*, 2006, 65(11): 1915-1924.
- [21] Skiba U, Smith K A, Fowler D. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(11): 527-536.
- [22] Stevens R J, Laughlin R J, Malone J P. Soil pH affects the processes reducing nitrate to nitrous oxide and di-nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(8/9): 1119-1226.
- [23] National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2009. Beijing: China Statistics Press.
- [24] Chen Y F, Yang J, Gu W L, Wu S Z. Relation between nitrous oxide emission flux and fertilization and irrigation of the late rice paddy-fields in Guangzhou Area. *Journal of South China Agricultural University*, 1990, 20(2): 80-84.
- [25] Zeng J H, Wang Z P, Zhang Y M, Song W Z, Wang S B, Su W H. Flux of N_2O emission from the fields in a wheat and maize rotation system. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1995, 16(1): 32-35.
- [26] Zou J W, Huang Y, Zong L G. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7-12.
- [27] Qin X B, Li Y E, Liu K Y, Wan Y F. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 143-148.
- [28] Moore T R, Roulet N T. Methane emissions from Canadian Peatlands//Lal R, Kimble J, Levine E, Stewart B A, eds. *Soils and Global Change (Advances in Soil Science)*. Boca Raton: CRC-Lewis Publishers, 1995: 153-164.
- [29] Martikainen P J, de Boer W. Nitrous oxide production and nitrification in acidic soil from a dutch coniferous forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(3): 343-347.
- [30] Xiong Z Q, Xing G X, Shi S L, Du L J. Effects of cropping systems on nitrous oxide emissions from paddy soils during the rice-growing season. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1761-1764.
- [31] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844.
- [32] Huang Y. Emissions of greenhouse gases in china and its reduction strategy. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 722-733.

参考文献:

- [4] 邢光熹, 颜晓元. 中国农田 N_2O 排放的分析估算与减缓对策. *农村生态环境*, 2000, 16(4): 1-6.
- [5] 王明星, 张仁健, 郑循华. 温室气体的源与汇. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 75-79.
- [10] 袁伟玲, 曹涛贵, 程建平, 谢宁宇. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4294-4300.
- [13] 李虎, 王立刚, 邱建军. 农田土壤 N_2O 排放和减排措施的研究进展, *中国土壤与肥料*, 2007, (5): 1-5.
- [16] 梁国庆, 周卫, 夏文建, 王秀斌, 孙静文, 李双来, 胡诚, 陈云峰. 优化施氮下稻-麦轮作体系土壤 N_2O 排放研究. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 304-311.
- [17] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 鹤田治雄. 丘陵区稻田 N_2O 排放的特点. *土壤与环境*, 1999, 8(4): 266-270.
- [18] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 陈德立. 玉米-潮土系统中氮肥硝化反硝化损失与 N_2O 排放. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 416-421.
- [19] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 李晓欣, 董文旭. 太行山前平原农田生态系统氮素循环与平衡研究. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 5-11.
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [24] 陈玉芬, 杨军, 顾蔚蓝, 伍时照. 广州地区晚造稻田氧化亚氮排放量与施肥灌溉关系的研究. *华南农业大学学报*, 1990, 20(2): 80-84.
- [25] 曾江海, 王智平, 张玉铭, 宋文质, 王少彬, 苏维瀚. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及总量估算. *环境科学*, 1995, 16(1): 32-35.
- [26] 邹建文, 黄耀, 宗良纲. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响. *环境科学*, 2003, 24(4): 7-12.
- [27] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 万扬帆. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143-148.
- [30] 熊正琴, 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟. 轮作制度对水稻生长季节稻田氧化亚氮排放的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1761-1764.
- [32] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 722-733.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 21 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Landscape spatial analysis of a traditional tibetan settlement based on landscape pattern theory and feng-shui theory; the case of Zhagana, Diebu, Gansu Province	SHI Lisha, YAN Lijiao, HUANG Lu, et al (6305)
Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District	YOU Weibin, HE Dongjin, WU Liyun, et al (6317)
Evaluation of eco-sustainability of roads in a tourism area; a case study within Yulong County	JIANG Yiyi (6328)
Study on the compactness assessment model of urban spatial form	ZHAO Jingzhu, SONG Yu, SHI Longyu, et al (6338)
A multi-scale analysis of red-crowned crane's habitat selection at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China	CAO Mingchang, LIU Gaohuan, XU Haigen (6344)
Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China	FAN Feide, WANG Kelin, XIONG Ying, et al (6353)
Construction of an eco-environmental database for watershed-scale data; an example from the Tarim River Basin	GAO Fan, YAN Zhenglong, HUANG Qiang (6363)
Reproductive allocation in dioecious shrub, <i>Rhamnus davurica</i>	WANG Juan, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, et al (6371)
Age-dependent growth responses of <i>Pinus koraiensis</i> to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China	WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (6378)
Fine-scale spatial point patterns of <i>Stipa krylovii</i> population in different alpine degraded grasslands	ZHAO Chengzhang, REN Heng, SHENG Yaping, et al (6388)
Community structure and population regeneration in remnant <i>Ginkgo biloba</i> stands	YANG Yongchuan, MU Jianping, TANG Cindy Q., et al (6396)
Reproductive characteristics and adaptive evolution of pin and thrum flowers in endangered species, <i>Primula merrilliana</i>	SHAO Jianwen, ZHANG Wenjuan, ZHANG Xiaoping (6410)
Leaf functional traits of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia	LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al (6420)
Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile	WANG Liyan, HAN Youzhi, ZHANG Chengliang, et al (6429)
Influence of fire on stands of <i>Pinus massoniana</i> in a karst mountain area of central Guizhou province	ZHANG Xi, CHUI Yingchun, ZHU Jun, et al (6442)
Morphological and physiological adaptation of <i>Caragana</i> species in the Inner Mongolia Plateau	MA Chengcang, GAO Yubao, LI Qingfang, et al (6451)
A comparative study on reasons of degenerated of <i>Haloxylon ammodendron</i> population in the western part of Gurbantunggut desert	SI Langming, LIU Tong, LIU Bin, et al (6460)
Self-thinning of natural broadleaved forests in Baishilazi Nature Reserve ...	ZHOU Yongbin, YIN You, YIN Mingfang, et al (6469)
Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province	ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai (6481)
The relationship between the occurrence of Colorado Potato Beetle, <i>Leptinotarsa decemlineata</i> , and rivers based on GIS: a case study of Shawan Country	LI Chao, ZHANG Zhi, GUO Wenchao, et al (6488)
Occurrence dynamics and trajectory analysis of <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010	JIANG Chunxian, QI Huihui, SUN Mingyang, et al (6495)
Adaptability of B-biotype <i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius) to Host Shift	ZHOU Fucui, LI Chuanming, GU Aixiang, et al (6505)
Structural change analysis of cecal bacterial flora in different poultry breeds using PCR-DGGE ...	LI Yongzhu, Yongquan Cui (6513)
Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities	ZHANG Hong, SHEN Zhangjun, YANG Guide, et al (6522)
Physiological response of <i>Microcystis</i> to solar UV radiation	WANG Yan, LI Shanshan, LI Jianhong, et al (6532)
Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates	WANG Yan, LI Ruixiang, DONG Shuanglin, et al (6540)
The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter	LI Daming, KONG Fanxiang, YU Yang, et al (6551)
Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons	LIN Yinding, WU Xiaogang, HAO Xingyu, et al (6561)
Spatio-temporal variation analysis of urbanization and land use benefit of oasis urban areas in Xinjiang	YANG Yu, LIU Yi, DONG Wen, et al (6568)
Nitrate contamination and source tracing from NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ in groundwater in Weifang, Shandong Province	XU Chunying, LI Yuzhong, LI Qiaozhen, et al (6579)
The impact of rising temperature on spring wheat production in the Yellow River irrigation region of Ningxia	XIAO Guoju, ZHANG Qiang, ZHANG Fengju, et al (6588)
A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy	LIANG Liang, YANG Minhua, DENG Kaidong, et al (6594)
The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River	ZHANG Hui, YANG Zhengli, LUO Liangguo, et al (6606)
Review and Monograph	
Research perspective for the effects of nitrogen deposition on biogenic volatile organic compounds	HUANG Juan, MO Jiangming, KONG Guohui, et al (6616)
Recruitment limitation of plant population: from seed production to sapling establishment	LI Ning, BAI Bing, LU Changhu (6624)
Scientific Note	
Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes	DU Chengfeng, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (6633)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 21 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 21 2011

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:100717	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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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