

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                        |                                                |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| PM <sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例 .....          | 吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)                           |
| 北京地区近35年大气污染扩散条件变化 .....                               | 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)                      |
| 北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响 .....                           | 韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)                     |
| 北京山谷风环流特征分析及其对PM <sub>2.5</sub> 浓度的影响 .....            | 董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)                        |
| 北京市建筑施工扬尘排放特征 .....                                    | 薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)                  |
| 生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征 .....                              | 吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)                |
| 广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O <sub>3</sub> 与SOA的生成潜势 .....     | 邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)                            |
| 南京北郊大气臭氧周末效应特征分析 .....                                 | 王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)                    |
| 亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降 .....                            | 王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)                 |
| 宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性 .....                         | 王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)          |
| 垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估 .....                           | 杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)    |
| 重庆市新型干法水泥厂汞排放特征 .....                                  | 张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)                |
| 轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性 .....                | 王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)                     |
| 不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性 .....                           | 楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)                       |
| 西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义 .....                             | 许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)                        |
| 基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程 .....                   | 韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)                         |
| 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较 .....                      | 姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326) |
| 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征 .....                              | 王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)                    |
| 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 .....                          | 罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)                   |
| 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 .....                          | 张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)            |
| 海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成 .....                 | 齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)                    |
| 两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用 .....                           | 王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)                            |
| 高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验 .....                           | 金建荣,李田,时珍宝(2379)                               |
| 稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚 .....                           | 张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)                         |
| 超声、紫外增强H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI降解磺胺甲基嘧啶 ..... | 魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)                           |
| 不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比 .....                         | 姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)                |
| 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果 .....                         | 郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)               |
| 组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析 .....                          | 张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)                          |
| 温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响 .....                                 | 张玲,彭党聪,常蝶(2429)                                |
| 海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性 .....                              | 冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)                        |
| 不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析 .....                          | 周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)                   |
| 磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响 .....                             | 周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)                    |
| 碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制 .....                            | 秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)            |
| 外源Ca <sup>2+</sup> 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响 .....         | 任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)                              |
| 膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析 .....                               | 张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)                   |
| 反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析 .....                            | 谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)                       |
| 硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制 .....                         | 李欢,王磊,王亚楠(2496)                                |
| 关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征 .....                            | 乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)                        |
| 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析 .....                       | 陈秀端,卢新卫(2513)                                  |
| 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例 .....                      | 佟瑞鹏,杨校毅(2522)                                  |
| Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制 .....                              | 钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)    |
| 典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系 .....                            | 陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)                     |
| 复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果 .....                            | 陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)                   |
| 两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果 .....                      | 田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)                  |
| 大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性 .....                            | 王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)                    |
| 源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响 .....                    | 杨宁伟,毕二平(2568)                                  |
| 地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 .....                       | 罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)                     |
| 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N <sub>2</sub> O排放的影响 .....   | 郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)                  |
| 基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径 .....                     | 袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)                         |
| 广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价 .....                          | 王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)          |
| 活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响 .....                           | 甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)            |
| 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 .....                       | 王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)                              |
| 《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384) |                                                |

# 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N<sub>2</sub>O排放的影响

郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 周应田, 杨学云, 顾江新\*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 为定量研究有机物料还田对农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响, 采用静态暗箱-气相色谱法对关中平原冬小麦-玉米轮作 24 a 长期定位施肥试验地土壤 N<sub>2</sub>O 排放速率和相关环境因子进行了周年观测, 试验处理为对照 (CK, 0 kg·hm<sup>-2</sup>)、氮磷钾 (NPK, 353 kg·hm<sup>-2</sup>)、氮磷钾加秸秆还田 [NPKS, (353 + 40) kg·hm<sup>-2</sup>] 和氮磷钾加牛粪 [NPKM, (238 + 115) kg·hm<sup>-2</sup>] 4 个处理。结果表明观测期内, CK 处理 N<sub>2</sub>O 排放速率较小 [ < 2.9 g·(hm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> ]; 施肥处理在冬小麦季施肥和玉米季灌溉后均出现排放峰, 最高值分别为 NPKS [ 113.4 g·(hm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> ] 和 NPKM [ 495.0 g·(hm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> ] 处理。各处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤湿度均呈显著正相关关系 ( $r > 0.28, P < 0.05$ )。CK、NPK、NPKS 和 NPKM 处理 N<sub>2</sub>O 年排放总量分别为 (0.1 ± 0.0)、(2.6 ± 0.1)、(3.4 ± 0.7) 和 (2.9 ± 0.3) kg·hm<sup>-2</sup>, 施肥处理排放总量显著高于 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 但施肥处理之间差异不显著 ( $P = 0.06$ ), 说明施肥促进了 N<sub>2</sub>O 排放, 但有机物料还田未能显著增加 N<sub>2</sub>O 排放。各施肥处理 N<sub>2</sub>O 直接排放系数分别为 0.72%、0.83% 和 0.80%, 均低于 IPCC 缺省值 1%。施肥处理中, NPKM 处理的单位产量 N<sub>2</sub>O 排放量最低。

**关键词:** N<sub>2</sub>O 排放; 秸秆还田; 牛粪; 直接排放系数; 长期定位施肥; 单位产量 N<sub>2</sub>O 排放量

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2586-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609258

## Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N<sub>2</sub>O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain

HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, ZHOU Ying-tian, YANG Xue-yun, GU Jiang-xin\*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The primary aim of this study was to quantify the effects of long-term organic amendments on soil nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions. Using static chamber-gas chromatograph technique, we measured N<sub>2</sub>O fluxes from winter wheat-maize rotation system and related environmental factors in the Guanzhong Plain for one year (October 2014 to October 2015). Field experiments were based on the "Chinese National Loess Fertility and Fertilizer Effects Long-term Monitoring Experiment". Four treatments were control (CK, 0 kg·hm<sup>-2</sup>), NPK (NPK, 353 kg·hm<sup>-2</sup>), NPK combined with maize straw [NPKS, (353 + 40) kg·hm<sup>-2</sup>] and cattle waste [NPKM, (238 + 115) kg·hm<sup>-2</sup>]. During the experimental period, N<sub>2</sub>O fluxes from CK treatment were small [ < 2.9 g·(hm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> ]; while emissions from fertilized treatments peaked after fertilization [ up to 113.4 g·(hm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> for NPKS ] and irrigation [ up to 495.0 g·(hm<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> for NPKM ] during winter wheat and maize seasons, respectively. N<sub>2</sub>O flux was significantly correlated to soil water-filled pore space for all treatments ( $r > 0.28, P < 0.05$ ). Annual N<sub>2</sub>O emissions were (0.1 ± 0.0), (2.6 ± 0.1), (3.4 ± 0.7) and (2.9 ± 0.3) kg·hm<sup>-2</sup> for CK, NPK, NPKS and NPKM, respectively. The fertilized treatments released higher N<sub>2</sub>O emissions than CK treatment ( $P < 0.05$ ), indicating that fertilization stimulated N<sub>2</sub>O emissions. However, the differences in N<sub>2</sub>O emissions were not significant among the fertilized treatments ( $P = 0.06$ ), suggesting that organic amendments did not increase N<sub>2</sub>O emissions obviously. The direct emission factors were 0.72%, 0.83% and 0.80% for NPK, NPKS and NPKM, respectively, all of which were lower than the IPCC default of 1%. The yield-scaled N<sub>2</sub>O emission for NPKM was the lowest among the fertilized treatments.

**Key words:** N<sub>2</sub>O emission; straw retention; cattle waste; direct emission factor; long-term fertilization; yield-scaled N<sub>2</sub>O emission

氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是重要的温室气体之一, 目前对全球变暖的贡献约为 6%, 在 100 a 时间尺度上 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的 298 倍<sup>[1]</sup>. N<sub>2</sub>O 还是造成平流层臭氧减少的主要光化学反应底物<sup>[1]</sup>. 大气中约有 70% 的 N<sub>2</sub>O 来自土壤, 其中农田土壤年排放量占全球排放总量的 20% ~ 30%, 是最重要的人为排放源<sup>[1]</sup>.

土壤 N<sub>2</sub>O 主要由微生物硝化和反硝化作用产

生, 其首要控制因子是氮底物浓度和土壤氧化还原状态<sup>[2]</sup>. 大量施用氮素化肥是造成农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放增加的主要原因<sup>[3]</sup>. 我国是世界上氮肥施用量最

收稿日期: 2016-09-30; 修订日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475128); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM4138); 中央高校基本科研业务费专项(2014YB063)

作者简介: 郝耀旭(1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田温室气体排放观测, E-mail: haoyaoxu912@163.com

\* 通信作者, E-mail: gujiangxin@nwsuaf.edu.cn

多的国家之一,年氮肥施用总量达到 24 ~ 33 Tg<sup>[4]</sup>. 据估计,我国农田 N<sub>2</sub>O 年排放总量约 0.37 ~ 0.39 Tg,约占全球农田 N<sub>2</sub>O 排放的 10%<sup>[5]</sup>. 影响农田 N<sub>2</sub>O 排放的因素包括气候条件、土壤性质和田间管理措施等<sup>[6,7]</sup>. 这些因素之间以及与土壤微生物活动之间存在复杂的相互作用关系,造成 N<sub>2</sub>O 排放存在极大的时空变异性. 研究农田 N<sub>2</sub>O 的产生机制、影响因素及其相应的减排措施,对于控制农业温室气体排放具有重要的现实意义.

土壤添加有机物料是农田保护性耕作的重要措施之一,不仅能够促进土壤团聚体的形成,提高土壤肥力和抗侵蚀能力,还能够提高土壤碳库储量,有利于固定大气 CO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>. 但有机物料还田对减缓全球变暖的贡献还必须考虑其对其它温室气体排放的影响. 已有的研究显示,不同地区农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放对有机物料还田的响应存在一定差异,如华北平原土壤有机质含量较低,导致 N<sub>2</sub>O 排放较低且以硝化作用为主;若增加有机物料还田量,则可能促进反硝化作用和 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[9,10]</sup>. 而在燕山东麓,有机肥和化肥配施处理 N<sub>2</sub>O 排放总量较纯化肥处理显著 ( $P < 0.05$ ) 减少 20%<sup>[11]</sup>,其主要原因可能是有机物料分解消耗氧气,土壤微环境处于厌氧状态下,有利于 N<sub>2</sub>O 还原为氮气(N<sub>2</sub>). 其他研究则显示施用有机肥对 N<sub>2</sub>O 排放的影响不显著<sup>[12]</sup>. 这主要与有机物料的还田量和质量以及局地气候、土壤和农田管理措施有关<sup>[13]</sup>. 因此,有机物料还田对 N<sub>2</sub>O 排放的影响及

其机理仍然需要进一步的研究.

关中平原属半湿润易干旱气候区,该地区农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放峰值总是出现在降水和灌溉后<sup>[14]</sup>,此时土壤湿度较高,反硝化作用是 N<sub>2</sub>O 主要来源. 因此,本研究假设有机物料还田将促进 N<sub>2</sub>O 排放. 为验证该假设,本研究对关中平原典型冬小麦-玉米轮作农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放速率进行了周年观测,定量研究添加不同有机物料(秸秆和牛粪)对 N<sub>2</sub>O 排放的季节动态和年排放总量的影响.

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验处理

本试验在“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”(34°17'N,108°00'E)实施. 试验地位于关中平原腹地陕西省杨凌区,海拔 534 m,属于典型的暖温带大陆性季风气候,年均气温 13.0℃,年均降雨量 550 mm,年均蒸发量在 1 400 mm. 该地普遍采用冬小麦-夏玉米一年两熟制. 试验地土壤为土垫旱耕人为土,土壤质地为重壤土.

本研究试验区域依托于长期定位施肥试验点,长期定位施肥试验始于 1990 年秋季. 在施肥试验开始前连续 3 年,土壤中未施入化肥和有机物料,以保证土壤肥力尽可能一致. 1990 年试验开始时 0 ~ 20 cm 土壤基本理化性质列于表 1. 除有效磷的变异系数为 15% 外,其余土壤理化指标变异系数均低于 6%,表明各施肥处理小区之间较低的空间异质性.

表 1 1990 年长期定位施肥试验开始时表层土壤(0 ~ 20 cm)基本理化性质<sup>1)</sup>

| Table 1 Selected soil properties (0-20 cm soil layer) before the long-term fertilization experiment started in 1990 |                             |                           |                             |                             |            |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|
| 项目                                                                                                                  | 总有机碳<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 全氮<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 有效磷<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 总孔隙度<br>/% | 容重<br>/g·cm <sup>-3</sup> |
| 平均值 ± 标准差                                                                                                           | 7.4 ± 0.4                   | 0.9 ± 0.0                 | 9.57 ± 1.5                  | 191 ± 6.3                   | 49.6 ± 2.9 | 1.35 ± 0.0                |
| 变异系数/%                                                                                                              | 6.0                         | 3.0                       | 15.7                        | 3.3                         | 5.8        | 3.7                       |

1) 平均值根据长期定位施肥试验点所有施肥处理小区计算

本研究选取其中 4 个施肥处理小区,分别为:对照(CK)、氮磷钾(NPK)、氮磷钾加秸秆还田(NPKS)和氮磷钾加有机肥(NPKM)处理. CK 处理不施用氮磷钾肥,其余田间管理与施肥处理一致. NPK、NPKS 和 NPKM 处理的施肥管理仅在冬小麦季有差异(表 2),NPK 处理施氮量为 165 kg·hm<sup>-2</sup>,磷钾肥充分满足,氮磷钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾;NPKS 处理化肥施用量与 NPK 处理一致,仅在秋播冬小麦时保留本处理全部前茬玉米秸秆,用铡刀切成 3 cm 长小段平铺施入,由秸秆引入的氮约为 40 kg·hm<sup>-2</sup>;NPKM 处理施氮总量为 165

kg·hm<sup>-2</sup>,其中有机肥氮和尿素氮的质量比为 7:3,按含氮量折合成牛粪,磷钾化肥用量与 NPK 处理一致. 而在玉米季,NPK、NPKS 和 NPKM 处理均施用化肥,施氮量为 188 kg·hm<sup>-2</sup>,磷钾肥充分满足(表 2). 冬小麦季所有肥料于播种时撒施于土壤表面,而玉米季肥料于拔节期穴施于土壤.

本试验观测期为 2014 年 10 月至 2015 年 10 月,试验期间各处理表层土壤(0 ~ 20 cm)的部分理化性质列于表 3. 小麦在 2014 年 10 月 9 日播种并施肥,2015 年 1 月 17 日灌溉,6 月 6 日收获;玉米在 2015 年 6 月 7 日种植播种,7 月 17 日施肥,7 月 25

日灌溉,10月2日收获.灌溉方式为漫灌.作物生长期多次施用除草剂和杀虫剂控制杂草和昆虫的生长.

表 2 长期定位施肥试验施肥量/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

Table 2 Application rates of fertilizers in the long-term fertilization experiment/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

| 处理方式 | 作物   | 化肥  |    |    | 牛粪  | 秸秆 |
|------|------|-----|----|----|-----|----|
|      |      | N   | P  | K  |     |    |
| CK   | 冬小麦季 | —   | —  | —  | —   | —  |
|      | 玉米季  | —   | —  | —  | —   | —  |
| NPK  | 冬小麦季 | 165 | 58 | 68 | —   | —  |
|      | 玉米季  | 188 | 25 | 78 | —   | —  |
| NPKS | 冬小麦季 | 165 | 58 | 68 | —   | 40 |
|      | 玉米季  | 188 | 25 | 78 | —   | —  |
| NPKM | 冬小麦季 | 50  | 58 | 68 | 115 | —  |
|      | 玉米季  | 188 | 25 | 78 | —   | —  |

表 3 2014 年长期定位施肥试验各处理表层土壤(0~20 cm)的理化性状

Table 3 Selected soil properties (0-20 cm soil layer) during the long-term fertilization experiment in 2014

| 处理方式 | 容重<br>$/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 有机质<br>$/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 全氮<br>$/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 全磷<br>$/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
|------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| CK   | 1.49                                 | 12.8                                  | 0.90                                 | 0.82                                 |
| NPK  | 1.50                                 | 17.7                                  | 1.21                                 | 1.06                                 |
| NPKS | 1.42                                 | 20.9                                  | 1.39                                 | 1.17                                 |
| NPKM | 1.40                                 | 27.2                                  | 1.75                                 | 1.54                                 |

1.2 观测方法

使用静态暗箱-气相色谱分析方法测定 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放通量.每个处理小区随机设3个重复,采样箱使用不锈钢制作( $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ ),外覆绝热材料,能够保证观测过程中箱内温度变化小于 $2^\circ\text{C}$ .每个重复安装 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的底座,底座顶端为水槽.底座一直埋设在田间,仅在作物收获时移开.为了减少采样时对土壤和作物的扰动,在采样点附近架设栈桥;当作物高度超过 $50\text{ cm}$ 时,增加中段箱提高箱体高度.通常情况下,每周采样1次,仅在施肥、灌溉及明显降雨(地面润湿)后,立即进行采样,并保持每日1次的采样频率,直至排放速率趋于背景值.采样时间为09:00~11:00.采样时,将采样箱罩在不锈钢底座上并用水密封,立即用注射器收集箱内气体样品( $40\text{ mL}$ ),随后每隔 $15\text{ min}$ 收集1次气体样品,共收集4次.样品采集完毕后,使用气相色谱仪(7890B,美国Agilent公司)分析样品的 $\text{N}_2\text{O}$ 浓度,检测器为电子捕获检测器(ECD).气相色谱采用氮气作载气,尾吹气为氩甲烷.

收集气体样品的同时,分别使用数字温度计(JM22L,天津今明仪器有限公司)和土壤水分速测仪(ML3,英国Delta-T公司)观测土壤温度和含水的体积分数( $5\text{ cm}$ ),每个处理随机重复9次.

每2周采集1次土壤样品( $0\sim 20\text{ cm}$ )用于铵( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )态氮测定,每个处理随机重复3次.鲜土样品用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KCl}$ 溶液(国药优级纯)浸提,并用连续流动分析仪(AA3,德国SEAL公司)测定浸提液 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 的浓度.

作物收获时,各处理随机设置3个重复样点.冬小麦季,每个取样面积为 $10\sim 20\text{ m}^2$ ,将小麦脱粒,计算小麦产量.玉米季,随机选取3行为一样点,计算玉米棒个数和重量,随机选取20个玉米棒折合干籽粒重量.

1.3 数据处理与分析

采用公式(1)计算 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放通量( $F$ ).

$$F = k \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \times H \times \rho \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, $F$ 为气体通量 $[\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{d})^{-1}]$ ;  $k$ 为单位换算系数;  $p$ 为采样点气压(kPa);  $T$ 为采样时空气的绝对温度(K);  $H$ 为采样箱高度(m);  $\rho$ 为标准状态下( $T_0 = 273\text{ K}$ ,  $p_0 = 101.3\text{ kPa}$ )  $\text{N}_2\text{O}$ 气体的密度( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $dc/dt$ 为采样时气体浓度随时间的变化率.

假定观测所得 $\text{N}_2\text{O}$ 排放速率为日排放速率的平均值,利用线性内插法估算未观测日的排放速率,逐日累加,估算 $\text{N}_2\text{O}$ 年排放量.

采用公式(2)计算 $\text{N}_2\text{O}$ 排放系数( $\text{EF}_d$ ).

$$\text{EF}_d = \frac{F_N - F_{\text{CK}}}{N} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $F_N$ 和 $F_{\text{CK}}$ 分别为施肥和不施肥处理 $\text{N}_2\text{O}$ 年排放总量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $N$ 为氮肥施用量 $[\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ ,包括尿素、秸秆和牛粪.

另外,根据各处理 $\text{N}_2\text{O}$ 排放总量和作物产量计算单位产量 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量.

采用公式(3)计算土壤充水孔隙度(WFPS).

$$\text{WFPS} = \frac{\text{VSWC}}{1 - \text{BD}/2.65} \times 100\% \quad (3)$$

式中,VSWC为土壤含水量体积分数( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), BD为土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),并假定土壤密度为 $2.65(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ .

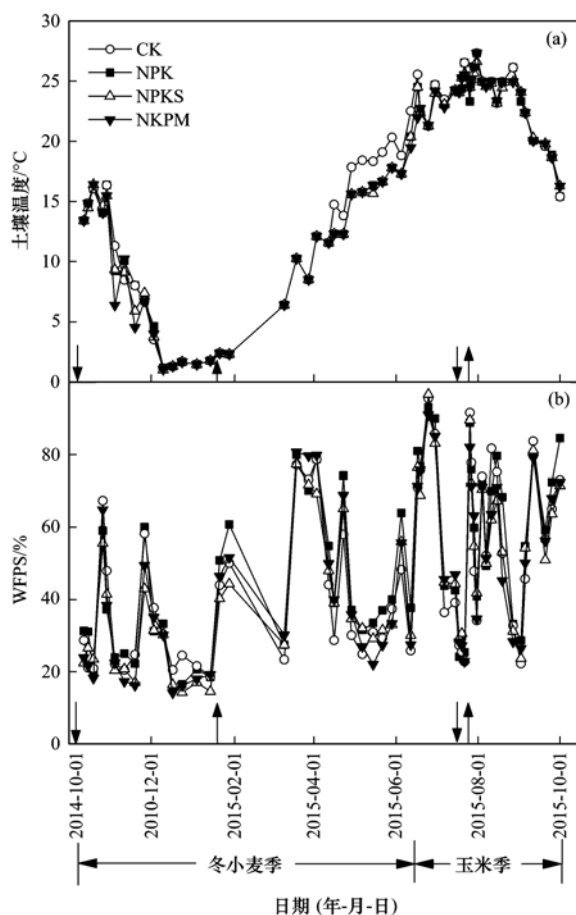
使用SPSS Statistics Client 22.0进行统计分析.对各处理土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量进行单因素方差分析( $P<0.05$ ),土壤温度、湿度、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$

和通量间进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤温、湿度和 $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$ 含量的季节变化

各处理 5 cm 土壤温度、WFPS 的变化趋势一致(图 1)。土壤温度的变化范围为 1.0~27.3℃,小麦季和玉米季平均土壤温度分别为 10.0℃和 23.3℃。土壤 WFPS 的变化范围为 14%~97%,小麦季和玉米季平均 WFPS 分别为 38%和 57%,降雨、灌溉对 WFPS 有较大影响。



图中下箭头表示施肥时间,上箭头表示灌溉时间,下同  
图 1 试验处理 5 cm 土壤温度和土壤充水孔隙度(WFPS)

Fig. 1 Seasonal variations in soil temperature and water-filled pore space (5 cm depth) in the long-term fertilization experiment

CK 处理中土壤  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  含量变化幅度较小,变化范围分别在 0.5~9.8  $mg \cdot kg^{-1}$  和 0.9~26.5  $mg \cdot kg^{-1}$  之间(图 2)。施肥处理土壤  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  含量均有较大的季节变化,分别在 0.8~60.4  $mg \cdot kg^{-1}$  和 1.4~180.2  $mg \cdot kg^{-1}$  之间。土壤  $NH_4^+-N$  含量保持在较低水平,仅在施肥一周内出现峰值; $NO_3^--N$  峰值较  $NH_4^+-N$  峰值高,且出现时间晚

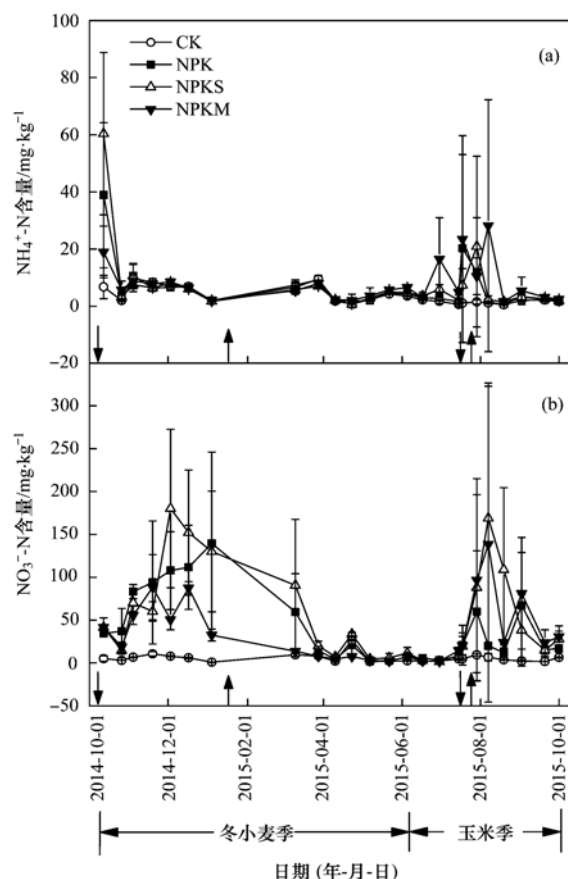


图 2 试验处理 0~20 cm 土壤  $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$  动态变化

Fig. 2 Seasonal variations in ammonium and nitrate nitrogen content (0-20 cm soil layer) in the long-term fertilization experiment

于  $NH_4^+-N$  峰值。NPK、NPKS、NPKM 处理  $NO_3^--N$  含量的平均值显著高于 CK 处理( $P < 0.05$ )。

### 2.2 $N_2O$ 排放通量季节变化

CK 处理  $N_2O$  排放通量变化幅度较小 [ $-0.5 \sim 2.9 g \cdot (hm^2 \cdot d)^{-1}$ ], 而施肥处理  $N_2O$  排放通量有明显的季节变化且变化趋势一致(图 3)。小麦季,各施肥处理  $N_2O$  排放高峰分别在施肥事件 1~3 周内, NPK、NPKS、NPKM 处理峰值分别为 37.3、113.4、23.0  $g \cdot (hm^2 \cdot d)^{-1}$ , 各处理间差异显著( $P < 0.05$ )。玉米季灌溉事件后立即出现了  $N_2O$  排放高峰, NPK、NPKS、NPKM 处理峰值分别为 280.0、382.1、495.0  $g \cdot (hm^2 \cdot d)^{-1}$ , 均高于小麦季  $N_2O$  排放高峰, 各处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.3 $N_2O$ 排放总量和直接排放系数

CK、NPK、NPKS 和 NPKM 处理  $N_2O$  年排放总量分别为  $(0.1 \pm 0.0)$ 、 $(2.6 \pm 0.1)$ 、 $(3.4 \pm 0.7)$  和  $(2.9 \pm 0.3) kg \cdot hm^{-2}$  (表 4)。施肥处理排放总量显著高于 CK 处理( $P < 0.05$ ), 但施肥处理之间差异不显著( $P = 0.06$ ), 说明施肥促进了  $N_2O$  排放, 但有机



物料还田未能明显增加N<sub>2</sub>O排放. 小麦季,NPKS 处理N<sub>2</sub>O年排放总量显著高于其他 3 种处理,而玉米季,NPKM 处理N<sub>2</sub>O年排放总量显著高于其他 3 种处理( $P < 0.05$ ).

冬小麦季 NPK、NPKS、NPKM 处理N<sub>2</sub>O排放系数分别为 0.33%、0.63%、0.22%;玉米季各处理排放系数分别为 1.07%、1.05%、1.31%. 但全年冬小麦-玉米轮作体系中各处理N<sub>2</sub>O直接排放系数分别为 0.72%、0.83%、0.80%,均低于 IPCC 缺省值 1%.

2.4 作物产量和单位产量N<sub>2</sub>O排放量

冬小麦季,CK 处理产量最低,仅为 1 042.5 kg·hm<sup>-2</sup>,施肥处理(NPK、NPKS、NPKM)较 CK 处理增产 377.2%~484.7%. NPKM 处理产量最高,达到 5 893.5 kg·hm<sup>-2</sup>,较 NPK、NPKS 处理分别增产 22.5%、3.4%. 玉米季,CK 处理产量最低,仅为 1 942.3 kg·hm<sup>-2</sup>,施肥处理(NPK、NPKS、NPKM)较 CK 处理增产 245.1%~303.6%. NPKS 处理玉米季产量最高,为 7 838.9 kg·hm<sup>-2</sup>,较 NPK、NPKM 处理分别增产 16.9%、6.0%(表 4).

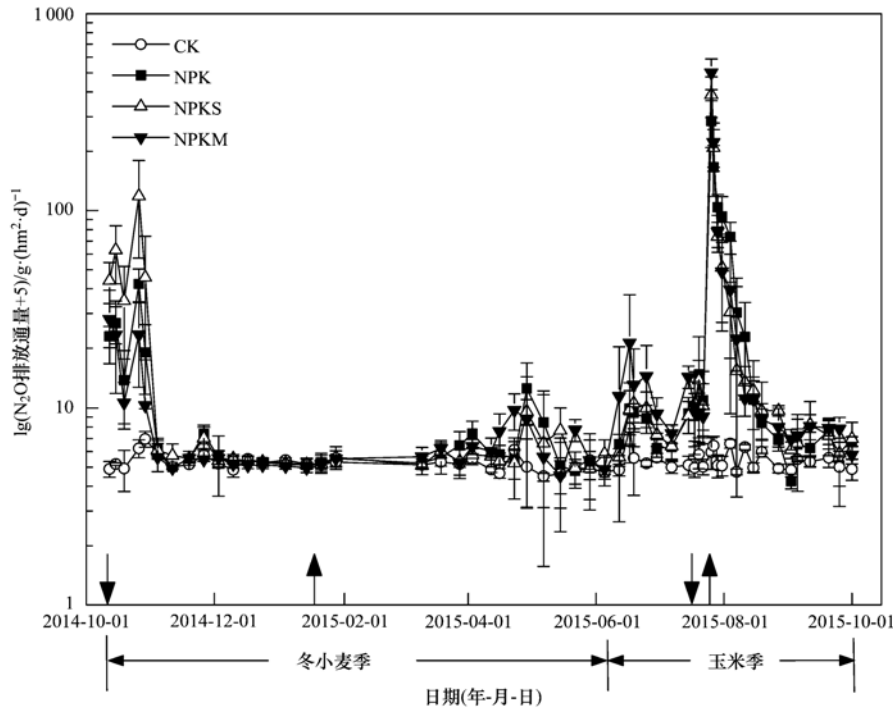


图 3 试验处理N<sub>2</sub>O排放通量年际动态变化

Fig. 3 Seasonal variations in N<sub>2</sub>O fluxes in the long-term fertilization experiment

表 4 不同施肥条件下N<sub>2</sub>O的排放总量、直接排放系数、作物产量和单位产量N<sub>2</sub>O排放量<sup>1)</sup>

Table 4 Cumulative N<sub>2</sub>O emission, direct emission factor, crop yield and yield-scaled N<sub>2</sub>O emission in different treatments of the long-term fertilization experiment

| 处理   | N <sub>2</sub> O排放总量/kg·hm <sup>-2</sup> |            |            | N <sub>2</sub> O排放系数/% |      |      | 产量/kg·hm <sup>-2</sup> |         |          | 单位产量N <sub>2</sub> O排放量/mg·kg <sup>-1</sup> |       |       |
|------|------------------------------------------|------------|------------|------------------------|------|------|------------------------|---------|----------|---------------------------------------------|-------|-------|
|      | 冬小麦季                                     | 玉米季        | 全年         | 冬小麦季                   | 玉米季  | 全年   | 冬小麦季                   | 玉米季     | 全年       | 冬小麦季                                        | 玉米季   | 全年    |
| CK   | 0.1 ± 0.0b                               | 0.0 ± 0.0c | 0.1 ± 0.0b | —                      | —    | —    | 1 042.5                | 1 942.3 | 2 984.8  | 57.5                                        | 23.8  | 35.6  |
| NPK  | 0.6 ± 0.2b                               | 2.0 ± 0.1b | 2.6 ± 0.1a | 0.33                   | 1.07 | 0.72 | 4 975.5                | 6 704.7 | 11 680.2 | 120.7                                       | 306.1 | 227.1 |
| NPKS | 1.4 ± 0.6a                               | 2.0 ± 0.1b | 3.4 ± 0.7a | 0.63                   | 1.05 | 0.83 | 5 893.5                | 7 838.9 | 13 732.4 | 230.2                                       | 257.3 | 245.7 |
| NPKM | 0.4 ± 0.0b                               | 2.5 ± 0.3a | 2.9 ± 0.3a | 0.22                   | 1.31 | 0.80 | 6 096.0                | 7 395.3 | 13 491.3 | 70.8                                        | 338.6 | 217.6 |

1) 同列数据后不同字母表示处理之间在  $P < 0.05$  水平差异显著

冬小麦季,NPKS 处理单位产量N<sub>2</sub>O排放量最高,为 230.2 mg·kg<sup>-1</sup>,CK、NPK、NPKM 处理单位产量N<sub>2</sub>O排放量分别为 57.5、120.0、70.8 mg·kg<sup>-1</sup>. 玉米季,NPKM 处理单位产量N<sub>2</sub>O排放量最高,为 338.6 mg·kg<sup>-1</sup>,CK、NPK、NPKS 处理单位产量N<sub>2</sub>O排放量

分别为 23.8、306.1、257.3 mg·kg<sup>-1</sup>(表 4).

3 讨论

3.1 N<sub>2</sub>O季节变化及其环境控制

有研究指出,N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤温度、

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 呈显著正相关或指数相关<sup>[15,16]</sup>. 土壤温度主要通过影响土壤微生物的活性,影响硝化和反硝化反应的速率,而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分别为硝化作用和反硝化作用的底物. 但本研究中仅 NPK 处理N<sub>2</sub>O排放通量与土壤温度在全年尺度上呈显著相关,NPKM 处理冬小麦季N<sub>2</sub>O排放通量与土壤温度、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈显著性相关,NPKS 处理玉米季N<sub>2</sub>O排放通量与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈显著性相关( $P < 0.05$ ),见表5.

表5 N<sub>2</sub>O通量与各环境因子的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 5 Pearson correlation coefficients between N<sub>2</sub>O flux and the related environmental factors

| 处理   | 时期   | 土壤充水孔隙度 (WFPS) | 土壤温度    | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |
|------|------|----------------|---------|---------------------------------|---------------------------------|
| CK   | 冬小麦季 | 0.372 *        | -0.016  | -0.050                          | 0.488                           |
|      | 玉米季  | 0.431 *        | 0.259   | 0.334                           | -0.459                          |
|      | 全年   | 0.434 *        | 0.155   | -0.042                          | 0.055                           |
| NPK  | 冬小麦季 | 0.038          | 0.361   | 0.306                           | -0.148                          |
|      | 玉米季  | 0.262          | 0.258   | 0.357                           | 0.540                           |
|      | 全年   | 0.291 *        | 0.322 * | 0.211                           | 0.034                           |
| NPKS | 冬小麦季 | 0.262          | 0.258   | 0.357                           | 0.540                           |
|      | 玉米季  | 0.354          | 0.244   | 0.938 *                         | 0.341                           |
|      | 全年   | 0.313 *        | 0.251   | 0.326                           | -0.062                          |
| NPKM | 冬小麦季 | 0.001          | 0.373 * | 0.594 *                         | -0.040                          |
|      | 玉米季  | 0.305          | 0.221   | 0.124                           | 0.473                           |
|      | 全年   | 0.285 *        | 0.260   | 0.267                           | 0.368                           |

1) \* 表示  $P < 0.05$  显著相关

全年尺度上,各处理N<sub>2</sub>O排放通量与WFPS均呈显著正相关,但这种相关关系(除CK外)在作物生长季中并不显著(表5).WFPS是影响N<sub>2</sub>O排放的主要因素.土壤水分状况主要通过影响土壤通气状况、土壤的氧化还原状况以及土壤微生物的活性来影响土壤N<sub>2</sub>O的排放<sup>[17]</sup>.研究表明,在土壤WFPS>60%时,以反硝化作用为主,土壤会发生较强的N<sub>2</sub>O排放;当土壤WFPS<55%时,土壤中主要以硝化作用为主<sup>[18,19]</sup>.冬小麦季施肥事件1周内,施肥处理硝化作用底物NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N充足,WFPS在22%~31%范围内,此时主要以硝化作用为主;施肥1周后,连续降雨造成WFPS上升至56%~65%,硝化作用和反硝化共同作用造成冬小麦季N<sub>2</sub>O排放最高峰.玉米季,7月17日施肥后,由于WFPS较低,未出现N<sub>2</sub>O排放明显高峰.7月25日灌溉事件后,施肥处理WFPS为82%~90%,形成厌氧环境,有利于反硝化作用的发生,N<sub>2</sub>O排放通量也达到全年最高峰.

N<sub>2</sub>O排放通量的季节变化为各因素相互作用的

结果.研究表明,N<sub>2</sub>O排放的最适土壤温度需高于20℃,当WFPS高于60%,N<sub>2</sub>O排放则快速增长<sup>[20]</sup>.本研究中,冬小麦季土壤温度平均值在9.7~10.5℃之间,WFPS平均值在36%~41%之间,造成冬小麦季各施肥处理N<sub>2</sub>O排放总量低.NPK、NPKS、NPKM玉米季N<sub>2</sub>O排放总量分别占全年总排放量的77.4%、59.8%、85.3%(表4),主要原因为玉米季高温多雨,各处理土壤温度平均值在23.2~23.5℃之间,WFPS平均值在56%~60%之间,环境条件适宜,易形成厌氧环境,反硝化作用强烈,使得N<sub>2</sub>O排放增加,N<sub>2</sub>O排放系数高于1%.而CK处理N<sub>2</sub>O排放通量全年变化较小,主要是受土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量较低限制(图2).

3.2 施肥对N<sub>2</sub>O排放、产量的影响

本研究中CK处理N<sub>2</sub>O排放年总量为0.1 kg·hm<sup>-2</sup>,位于农田土壤背景排放的变化范围之内(0.1~3.67 kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[21]</sup>.由于缺少外源氮,背景排放主要受土壤有机碳含量控制<sup>[22]</sup>.

施肥处理(NPK、NPKS、NPKM)N<sub>2</sub>O排放总量显著高于CK( $P < 0.05$ ),说明施肥促进N<sub>2</sub>O排放.施肥后土壤氮底物浓度提高(图2),促进硝化作用和反硝化作用.经过长期施肥,NPK、NPKS、NPKM施肥处理有机质含量分别为CK的1.4、1.6、2.1倍(表3),有机质作为绝大多数异养微生物的细胞能源和电子受体,可促进异养硝化和反硝化作用,从而促进N<sub>2</sub>O排放<sup>[23]</sup>.

NPKS、NPKM处理N<sub>2</sub>O年排放总量分别是NPK处理的1.3和1.1倍,但差异不显著( $P = 0.06$ ),说明有机物料还田未能明显增加N<sub>2</sub>O排放,因此,本研究结果并未支持有机物料还田促进N<sub>2</sub>O排放的假设.秸秆、牛粪都可增加土壤有机质的含量,消耗土壤O<sub>2</sub>浓度,形成厌氧环境,促进反硝化和N<sub>2</sub>O排放量增加<sup>[24,25]</sup>.但有机物料还田未能显著增加N<sub>2</sub>O排放主要因为施入高C/N有机物料(玉米秸秆C/N为65~85,牛粪C/N为23),刺激土壤异养微生物生长和繁殖,固定土壤中的游离NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,从而抑制土壤中的硝化微生物活性<sup>[26]</sup>.同时N<sub>2</sub>O排放可能主要以硝化作用为主,反硝化作用仅在玉米季灌溉后作用强烈,因此有机物料对促进N<sub>2</sub>O排放作用短暂.

NPKS处理N<sub>2</sub>O年排放总量较NPKM处理增加14.9%,差异不显著( $P = 0.06$ ).小麦季NPKS处理单位产量N<sub>2</sub>O排放量和N<sub>2</sub>O排放系数均高于其他施肥处理,主要原因为NPKS处理秸秆还田引入更多的氮素,总施氮量高于NPKM处理;施肥加上连续



降雨之后,由于气温相对较高,玉米秸秆引入新鲜有机物料并迅速矿化,具有高的有机物料碳分解速率,为土壤微生物活动提供氮素, $N_2O$ 的排放提高<sup>[27]</sup>;而粪肥充分腐殖质化,由于微生物氮固定,减少了氮源,NPKM 处理 $N_2O$ 排放偏低, $N_2O$ 排放系数低于 NPK、NPKM 处理. 玉米季 NPKS 没有新鲜有机物料施入,而 NPKM 处理土壤有机质最高,因此 NPKM 处理排放高峰显著高于其他处理,并且 NPKM 处理单位产量 $N_2O$ 排放量和 $N_2O$ 排放系数均高于其他施肥处理.

对于关中平原冬小麦-玉米轮作体系,NPKS、NPKM 处理全年作物产量较 NPK 处理分别增产 17.6%、15.5%,说明有机物料还田提高作物产量,与其他研究结果一致<sup>[28]</sup>. 主要因为有机物料还田改善土壤肥力状况、增加了土壤团聚体稳定性<sup>[29]</sup>. 合理的施肥方式可以增加作物产量,提高经济效益,同时减少 $N_2O$ 排放. NPKM 处理产量较 NPKS 处理仅减产 1.8%,但 NPKM 处理全年单位产量 $N_2O$ 排放量较 NPK、NPKS 分别降低 4.2%、11.4%. NPKM 处理可收获较大产量并释放较少的 $N_2O$ (表 4). 因此,相对于秸秆还田,牛粪还田更趋近于农田经济效益和环境效益的平衡点.

#### 4 结论

(1) 全年尺度上,各处理 $N_2O$ 排放通量均与 WFPS 呈显著相关关系,表明在本试验条件下土壤水分是影响 $N_2O$ 排放的主要环境因子.

(2) 施肥处理排放总量显著高于 CK 处理,但施肥处理之间差异不显著( $P = 0.06$ ),施肥促进了 $N_2O$ 排放,但有机物料还田未能明显增加 $N_2O$ 排放.

(3) NPKM 处理全年单位产量 $N_2O$ 排放量较其他施肥方式偏低,可推荐为关中平原农田较理想的施肥方式.

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. 1535-1535.
- [2] Hou A X, Chen G X, Wang Z P, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(6): 2180-2186.
- [3] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. Nature Geoscience, 2009, **2**(9): 659-662.
- [4] Zheng X H, Han S H, Huang Y, *et al.* Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct  $N_2O$  emission from Chinese croplands[J]. Global

Biogeochemical Cycles, 2004, **18**(2): GB2018.

- [5] Gu J X, Zheng X H, Zhang W. Background nitrous oxide emissions from croplands in China in the year 2000[J]. Plant and Soil, 2009, **320**(1-2): 307-320.
- [6] Gu J X, Nicoulaud B, Rochette P, *et al.* A regional experiment suggests that soil texture is a major control of  $N_2O$  emissions from tile-drained winter wheat fields during the fertilization period[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **60**: 134-141.
- [7] van Kessel C, Venterea R, Six J, *et al.* Climate, duration, and N placement determine  $N_2O$  emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2013, **19**(1): 33-44.
- [8] Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties[M]. Madison, UK: American Society of Agronomy, Inc., 1982. 581-594.
- [9] Cui F, Yan G X, Zhou Z X, *et al.* Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **48**: 10-19.
- [10] Ju X T, Lu X, Gao Z L, *et al.* Processes and factors controlling  $N_2O$  production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(4): 1007-1016.
- [11] 翟振, 王立刚, 李虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田 $N_2O$ 排放及净温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(12): 2495-2501.
- Zhai Z, Wang L G, Li H, *et al.* Nitrous oxide emissions and net greenhouse effect from spring-maize field as influenced by combined application of manure and inorganic fertilizer[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(12): 2495-2501.
- [12] Wei X R, Hao M D, Xue X H, *et al.* Nitrous oxide emission from highland winter wheat field after long-term fertilization[J]. Biogeosciences, 2010, **7**(10): 3301-3310.
- [13] 谢燕, 陈曦, 胡正华, 等. 短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1499-1506.
- Xie Y, Chen X, Hu Z H, *et al.* Effects of short-time conservation tillage managements on greenhouse gases emissions from soybean-winter wheat rotation system[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1499-1506.
- [14] 梁东丽, 同延安, Emteryd O, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 $N_2O$ 气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(3): 298-302.
- Liang D L, Tong Y A, Emteryd O, *et al.* Effect of irrigation and rainfall on the  $N_2O$  losses in dryland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, **8**(3): 298-302.
- [15] 段智源. 不同施肥处理对春玉米 $N_2O$ 排放和综合温室效应的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. 27-33.
- [16] 石洪艾, 李禄军, 尤孟阳, 等. 不同土地利用方式下土壤温度与土壤水分对黑土 $N_2O$ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2286-2292.
- Shi H A, Li L J, You M Y, *et al.* Impact of soil temperature and moisture on soil  $N_2O$  emission from mollisols under different land-use types[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(11): 2286-2292.
- [17] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 $N_2O$ 产生的关键微

- 生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 792-800.
- Zhu Y G, Wang X H, Yang X R, *et al.* Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 792-800.
- [18] Bateman E J, Baggs E M. Contributions of nitrification and denitrification to  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from soils at different water-filled pore space[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, **41**(6): 379-388.
- [19] Sehy U, Ruser R, Munch J C. Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, **99**(1-3): 97-111.
- [20] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(11): 2037-2045.
- [21] 李平儒, 任卫东, 李志军, 等. 长期施肥管理对土全碳和易氧化有机碳的影响[J]. 西北农业学报, 2010, **19**(12): 194-201.
- Li P R, Ren W D, Li Z J, *et al.* Effects of long-term fertilization and management on total organic carbon and readily oxidizable organic carbon in Lou soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, **19**(12): 194-201.
- [22] Gu J X, Zheng X H, Wang Y H, *et al.* Regulatory effects of soil properties on background  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from agricultural soils in China[J]. Plant and Soil, 2007, **295**(1-2): 53-65.
- [23] Morley N, Baggs E M. Carbon and oxygen controls on  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{N}_2$  production during nitrate reduction[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(10): 1864-1871.
- [24] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(1): 176-182.
- Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, **32**(1): 176-182.
- [25] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(3): 522-528.
- Lu W T, Jia Z K, Zhang P, *et al.* Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(3): 522-528.
- [26] Recous S, Mary B, Faurie G. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, **22**(7): 913-922.
- [27] 徐钰, 江丽华, 孙哲, 等. 玉米秸秆还田和施氮方式对麦田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(6): 552-558.
- Xu Y, Jiang L H, Sun Z, *et al.* Effects of corn straw returning and nitrogen fertilizer application methods on  $\text{N}_2\text{O}$  emission from wheat growing season[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, **32**(6): 552-558.
- [28] 王芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(3): 702-709.
- Wang F, Zhang J S, Gao P C, *et al.* Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, **17**(3): 702-709.
- [29] 宓文海, 吴良欢, 马庆旭, 等. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(13): 103-108.
- Mi W H, Wu L H, Ma Q X, *et al.* Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(13): 103-108.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                             |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Comparison of Models on Spatial Variation of PM <sub>2.5</sub> Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                  | WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)              |
| Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years .....                                                                    | GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)            |
| Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer .....                                               | HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)            |
| Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing .....                                                               | DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)           |
| Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing .....                                                                    | XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)               |
| Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers .....                                                              | WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)               |
| Effect of VOCs on O <sub>3</sub> and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station ..... | ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)                     |
| Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O <sub>3</sub> in Northern Suburb of Nanjing .....                                              | WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)               |
| Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....                    | WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)             |
| Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential .....                                          | WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)        |
| Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator .....                                                 | DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)             |
| Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing .....                                                            | ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)          |
| Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems .....                                                       | WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)            |
| Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel .....                     | LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)              |
| Spatial Variation and Environmental Significance of δ <sup>18</sup> O and δD Isotope Composition in Xijiang River .....                                     | XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)                  |
| Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed .....                                                           | HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)                |
| Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir .....                               | JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)                 |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake .....           | WANG Yi-nu, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)            |
| Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River .....                                       | LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)          |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake .....                                                    | ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)              |
| Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination .....              | QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)                    |
| Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters .....                           | WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)             |
| Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level .....                              | JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao, <i>et al.</i> (2379)              |
| Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron .....                                                                | ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)              |
| Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation .....                             | WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)              |
| Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels .....                                         | JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)          |
| Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis .....          | ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)             |
| Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater .....                                                    | ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419) |
| Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition .....                                                                                       | ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die, <i>et al.</i> (2429)             |
| Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....                                                       | FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)                     |
| Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater .....                                   | ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)           |
| Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....                                                                               | ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)                     |
| Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress .....                                | QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)                |
| Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors .....   | REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen, <i>et al.</i> (2470)          |
| Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge .....                                                  | ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)         |
| Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers .....                                                                 | TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)                          |
| Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism .....                                            | LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (2496)                    |
| Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains .....                                                     | QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)         |
| Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics .....                                     | CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, <i>et al.</i> (2513)                         |
| Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs .....                                                 | TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (2522)                       |
| Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil .....                                                                      | ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)   |
| Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice .....                                           | CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)                     |
| Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice .....                                                  | CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)           |
| Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As .....                                                          | TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)                     |
| Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene .....                                                    | WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)               |
| Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil .....                     | YANG Ning-wei, BI Er-ping, <i>et al.</i> (2568)                         |
| Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions .....                                                      | LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)                  |
| Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain .....            | HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)           |
| Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling .....                                                             | YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)                 |
| Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi .....                            | WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)       |
| Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions .....                             | GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)                |
| Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review .....                                        | WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (2617)        |