

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



**2019**

Vol.40 No.1  
第40卷 第1期

目次

|                                                     |                                               |       |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| 2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM <sub>2.5</sub> 成因分析及效果评估 | 吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦                          | (1)   |
| 长三角地区重点源减排对PM <sub>2.5</sub> 浓度的影响                  | 于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉                         | (11)  |
| 上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析                                | 戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东     | (24)  |
| 京津冀及周边地区PM <sub>2.5</sub> 时空变化特征遥感监测分析              | 陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉                 | (33)  |
| MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性                  | 王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强         | (44)  |
| 气象因素对香港地区臭氧污染的影响                                    | 赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳            | (55)  |
| 天津夏季边界层低层大气中PAN和O <sub>3</sub> 的输送特征分析              | 姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹              | (67)  |
| 成都冬季PM <sub>2.5</sub> 化学组分污染特征及来源解析                 | 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健                         | (76)  |
| 郑州市冬季PM <sub>2.5</sub> 传输路径和潜在源分析                   | 段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹                             | (86)  |
| 常州春季PM <sub>2.5</sub> 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析           | 李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东                   | (94)  |
| 天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子                                | 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧 | (104) |
| 机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征                                 | 梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻                  | (114) |
| 超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性                    | 杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义                         | (121) |
| 超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性                                     | 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋         | (126) |
| 北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放                                 | 张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀               | (135) |
| SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除               | 任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军            | (143) |
| 古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义                           | 桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟           | (149) |
| 夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征                                  | 程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳                          | (157) |
| 亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析                        | 朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏                         | (164) |
| 基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源         | 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓           | (172) |
| 分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性                              | 李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双                          | (185) |
| 重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO <sub>2</sub> 交换通量及其影响因素           | 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦                                 | (192) |
| 基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用                             | 李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠               | (200) |
| 巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征                            | 李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉                             | (211) |
| 特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例                         | 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚          | (219) |
| 黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量                         | 李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文           | (228) |
| 重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源                              | 苗迎, 孔祥胜, 李成展                                  | (239) |
| 沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价                            | 张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华              | (248) |
| 多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险                           | 付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭                              | (256) |
| 原水性质对新型含Ca <sup>2+</sup> 复合混凝剂混凝过程的影响               | 曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升                    | (263) |
| 水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用                                     | 李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国                        | (273) |
| MoS <sub>2</sub> /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能           | 张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐               | (281) |
| 纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星                                  | 倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖               | (293) |
| 不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能                          | 张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋          | (300) |
| 单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能                               | 邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意                             | (310) |
| 新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化                                  | 唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设                    | (318) |
| 不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应                      | 胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌                  | (327) |
| 碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响                          | 崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶                             | (336) |
| 进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响                             | 甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明             | (343) |
| 不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响                           | 王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆          | (352) |
| 后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷                     | 巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇         | (360) |
| 缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行                          | 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰                         | (369) |
| 低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式                                    | 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰                         | (376) |
| 不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性                           | 严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建                             | (383) |
| 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响                                   | 冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊                        | (392) |
| 紫色土N <sub>2</sub> O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应     | 黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅                 | (401) |
| 岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征                            | 张双双, 靳振江, 贾远航, 李强                             | (412) |
| 丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析                   | 孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进       | (421) |
| 硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化                                  | 贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿                        | (430) |
| 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估                         | 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲                   | (437) |
| 新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响                              | 杨伟光, 王美娥, 陈卫平                                 | (445) |
| 九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价                                | 林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖                   | (453) |
| 草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征                                | 许议元, 何天容                                      | (461) |
| Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响                       | 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹      | (470) |
| 不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响                             | 王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥                  | (480) |
| 广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析                              | 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成             | (488) |
| 6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响                           | 邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民                        | (496) |
| 一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价                            | 冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟                        | (504) |
| 《环境科学》征订启事(113)                                     |                                               |       |
| 《环境科学》征稿简则(238)                                     |                                               |       |
| 信息(93, 262, 342)                                    |                                               |       |

# 紫色土 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应

黄容<sup>1</sup>, 高明<sup>1\*</sup>, 王莹燕<sup>1</sup>, 黎嘉成<sup>1</sup>, 徐国鑫<sup>1</sup>, 罗梅<sup>1</sup>, 徐畅<sup>2</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国烟草总公司重庆市公司, 重庆 400023)

**摘要:** 以紫色土为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法, 通过田间原位试验, 设置了对照(CK)、常规施肥(F)、秸秆与全量化肥配施(100FS)、秸秆分别与化肥减量30%(70FS)、40%(60FS)、50%(50FS)处理, 观测了玉米秸秆与化肥配施下的菜地土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放动态变化特征, 并利用克隆技术和实时荧光定量PCR技术, 结合土壤理化性质和氨氧化微生物 *amoA* 功能基因丰度, 分析了秸秆与化肥配施对土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及相关微生物的影响, 以期为调控和减缓紫色土 $\text{N}_2\text{O}$ 排放提供理论依据。结果表明, 玉米秸秆与化肥配施处理较F处理提高了土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量和试验期内的累积排放量, 其中100FS处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量最高[57.59~6238.02  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ], 累积排放量高达60.76  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与F处理相比, 秸秆与化肥配施处理降低了土壤铵态氮和硝态氮含量, 提高了土壤有机质含量, 但对土壤总氮和pH值没有显著的影响。本试验条件下, 土壤AOB *amoA* 基因拷贝数比AOA高出1~2个数量级, 其中F处理的AOA *amoA* 基因拷贝数( $50.9 \times 10^3 \text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ )明显高于其他处理, 但AOB *amoA* 基因拷贝数最低( $1.36 \times 10^5 \text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ )。100FS处理降低了AOA和AOB *amoA* 基因多样性指数和均匀度, 同时也显著降低了AOA *amoA* 基因拷贝数, 但秸秆与化肥减量配施可以提高AOA和AOB *amoA* 基因多样性, 同时显著增加了AOB *amoA* 基因拷贝数。土壤AOA优势菌群OTU1可能是硝化作用的主要驱动者, 直接和间接地影响 $\text{N}_2\text{O}$ 排放。通过冗余(RDA)分析, 土壤铵态氮、有机质和有效磷含量对AOA群落结构存在显著影响( $P < 0.05$ , 蒙特卡罗算法); 土壤可溶性有机氮、总氮、速效钾以及有效磷含量显著影响AOB群落结构( $P < 0.05$ , 蒙特卡罗算法), 其中AOB对不同环境因子的耐受性和生态位低于AOA。总体上, 玉米秸秆配施60%~70%的化肥, 在保证蔬菜产量的前提下, 有效提高了AOA和AOB *amoA* 基因多样性, 在一定程度上减缓了土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放。

**关键词:** 秸秆还田; 化肥减量;  $\text{N}_2\text{O}$ ; 氨氧化细菌(AOB); 氨氧化古菌(AOA)

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0401-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805125

## Response of the Soil $\text{N}_2\text{O}$ Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil

HUANG Rong<sup>1</sup>, GAO Ming<sup>1\*</sup>, WANG Ying-yan<sup>1</sup>, LI Jia-cheng<sup>1</sup>, XU Guo-xin<sup>1</sup>, LUO Mei<sup>1</sup>, XU Chang<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Municipal Tobacco Company, Chongqing 400023, China)

**Abstract:** Crop straw is an important agricultural source, which can replace chemical fertilizers. A field experiment with six different amounts of fertilization combined with maize straw residues was carried out in purple soil, including the control (CK), conventional fertilizing (F), straw return with conventional fertilizing (100FS), straw return with 70% conventional fertilizing (70FS), straw return with 60% conventional fertilizing (60FS), and straw return with 50% regular fertilizing (50FS), to determine the response of the soil  $\text{N}_2\text{O}$  emission and ammonia-oxidizing microorganism community distribution to straw return with reducing fertilizer. The dynamic characteristics of the  $\text{N}_2\text{O}$  emission in purple soil were observed using an *in situ* closed chamber and gas chromatography-based system. The ammonia-oxidizing microorganism community distribution was analyzed with multiple molecular techniques (DNA-based clone library and qPCR) linked to physical-chemical soil properties. The results show that the combination of straw with fertilizer increases the  $\text{N}_2\text{O}$  emission and cumulative  $\text{N}_2\text{O}$  emission. The highest  $\text{N}_2\text{O}$  emission [57.59~6238.02  $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ] and cumulative  $\text{N}_2\text{O}$  emission (60.76  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) were observed for the 100FS treatment. Compared with the F treatment, the soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents are reduced and the soil organic matter increases after crop straw return with chemical fertilizer. However, significant changes of the soil total nitrogen and pH were not observed. The bacterial ammonia oxidizer (AOB) *amoA* gene abundance is higher than that of the archaeal ammonia oxidizer (AOA). The AOA *amoA* gene abundance during F treatment ( $50.9 \times 10^3 \text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ ) is significantly higher than that of others, while the AOB *amoA* abundance gene of the F treatment is the lowest ( $1.36 \times 10^5 \text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ ). The 100FS reduces the community diversity and Pielou index of AOA and AOB *amoA* gene. Their *amoA* gene abundance significantly declines during 100FS treatment. However, the increment of the AOA and AOB *amoA* gene diversity and dominant increment of AOB *amoA* gene abundance are significant when applying straw with reducing fertilizer. The specific AOA indicator OTU1 may be most important with respect to the direct and indirect production of  $\text{N}_2\text{O}$  in purple soil. The

收稿日期: 2018-05-15; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 黄容(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 277840241@qq.com

\* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

redundancy analysis (RDA) shows that the community structure of AOA is remarkably relevant to the soil ammonium nitrogen, organic matter, and available phosphorus ( $P < 0.05$ ) and that the community structure of AOB is remarkably relevant to the soil dissolved organic nitrogen, total nitrogen, available potassium, and available phosphorus ( $P < 0.05$ ). The tolerance to different environments and ecological niches of AOB is weaker than that of AOA. Our results illustrate that the maize straw return with 60%-70% regular fertilizing dramatically increases the community diversity and abundance of the AOA and AOB *amoA* genes and partly mitigates the soil  $N_2O$  emission without significantly decreasing the vegetable yields.

**Key words:** straw return; reducing fertilizer;  $N_2O$ ; bacterial ammonia oxidizer (AOB); archaeal ammonia oxidizer (AOA)

氮(N)元素生物地球化学循环是陆地生态系统中最基本的物质循环过程,在农业生态系统的氮循环中,氮的投入和损失是氮循环的关键过程.氮素以 $N_2O$ 的形式排放到大气中是氮损失的重要途径,其中农业生态系统是 $N_2O$ 重要的排放源<sup>[1]</sup>.菜地生态系统是重要的旱地生态系统,与粮食作物种植系统不同,菜地种植系统具有化肥施用量大、灌水频繁、复种指数高等特点<sup>[2]</sup>,易造成土壤微生物(特别是N转化功能微生物)群落结构和数量发生变化<sup>[3]</sup>、导致土壤 $N_2O$ 大量排放<sup>[4]</sup>、引发土壤酸化等一系列环境问题<sup>[5]</sup>.Wang等<sup>[4]</sup>的研究表明,我国菜地土壤因施肥产生的 $N_2O$ 直接排放量(以N计)每年高达 $6.7 \times 10^7$  kg.我国氮肥投入量大,但利用率却只有30%,剩余的氮肥将以氨挥发、 $N_2O$ 、硝酸盐等形式进入到环境中,成为污染源.因此,在菜地土壤中开展有机物料替代部分化肥研究,同时掌握菜地土壤N循环相关的微生物的群落结构和丰度,不仅能提高土壤质量,而且能改善因氮肥施用带来的生态环境问题(缓解 $N_2O$ 排放).

硝化作用是土壤N转化的重要过程,含氨单加氧酶基因(*amoA*)的氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)和氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)驱动的氨氧化过程是硝化作用的关键步骤,该过程的中间产物 $NH_2OH$ 会发生化学分解而释放 $N_2O$ ,同时硝化作物的产物 $NO_3^-$ 可以为反硝化微生物所用间接影响 $N_2O$ 的释放<sup>[6,7]</sup>.硝化作用是旱地土壤 $N_2O$ 排放的主要途径,土壤pH、水分和温度等性质以及底物和产物通过影响AOA和AOB群落结构和丰度,进而影响土壤 $N_2O$ 排放<sup>[7]</sup>.与 $N_2O$ 释放相关的微生物种群特征是决定土壤 $N_2O$ 释放的基础<sup>[8]</sup>,AOA是土壤重要的 $N_2O$ 释放来源,在红壤蔬菜田土壤氨氧化过程中占绝对优势<sup>[9]</sup>.而在极高的氮素投入的设施菜地中,土壤氨氧化微生物主要以AOB为主<sup>[10]</sup>.由于产生 $N_2O$ 的主要微生物可能是反硝化真菌、AOA或异养氨氧化微生物等,因此部分研究中未发现相关功能微生物种群特征与 $N_2O$ 释放之间的关系<sup>[11,12]</sup>.

秸秆是我国重要的农业资源,将其还田不仅可以提高土壤肥力和改善土壤结构,还能促进微生物

活性,并能够减缓因焚烧而带来的大气污染<sup>[13,14]</sup>.秸秆还田对菜地土壤的 $N_2O$ 排放存在重要影响<sup>[2]</sup>,同时也会影响土壤氨氧化微生物群落.有研究表明,水稻秸秆还田对氨氧化细菌群落丰度和结构都没有明显的影响<sup>[14]</sup>,甚至降低了*amoA*基因多样性指数和均匀度<sup>[15]</sup>.但在酸性水稻土(pH约5.3)中,水稻秸秆还田可以显著增加AOA种群丰度<sup>[16]</sup>.萨如拉等<sup>[17]</sup>基于秸秆还田定位试验,表明玉米秸秆深翻还田能提高土壤AOB*amoA*基因多样性指数,且随着还田时间的增加呈增加趋势.AOA在红壤微生物组成和生态系统中具有重要地位<sup>[9]</sup>,AOB是石灰性紫色土硝化作用的主要推动者<sup>[18]</sup>,可见不同来源的秸秆、土壤类型对土壤氨氧化微生物群落结构和丰度的影响存在不一致性.国内对水稻秸秆还田研究较多,且以往的研究主要集中探讨了秸秆还田对土壤 $N_2O$ 排放或土壤氨氧化微生物的影响,关于秸秆还田,尤其是玉米秸秆与化肥减量配施后,菜地土壤AOA、AOB微生物群落结构和丰度变化与土壤 $N_2O$ 排放的综合分析研究较少.紫色土为初育岩性土,在我国农业生产中占有重要地位,因此本研究以紫色土为研究对象,采用静态箱-气相色谱法,原位观测了玉米秸秆与化肥配施下的菜地土壤 $N_2O$ 排放,并利用克隆技术和实时荧光定量PCR技术,结合土壤理化性质和氨氧化微生物功能基因丰度,分析了秸秆与化肥配施对土壤 $N_2O$ 排放及相关微生物的影响,以期调控和减缓紫色土 $N_2O$ 排放提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究概况及试验材料

位于重庆市北碚区的“国家紫色土土壤肥力与肥料效益长期监测基地”,海拔266.3 m,年平均气温18.3℃.最高和最低气温平均为28.7℃和7.7℃,≥10℃,积温6006℃,年降雨量1086.6 mm,年日照时数1276.7h,属于亚热带季风气候.试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属,是重庆四川紫色土区分布最广的一种土壤.其基本理化性

质为：有机质含量 11.12 g·kg<sup>-1</sup>，碱解氮 83.02 mg·kg<sup>-1</sup>，速效磷 44.10 mg·kg<sup>-1</sup>，速效钾 208.75 mg·kg<sup>-1</sup>，pH 为 5.8。试验中所用秸秆为玉米秸秆，取自试验基地农田，其有机碳含量为 338.8 g·kg<sup>-1</sup>，C/N 为 33.9，经晒干后切成 5~10 cm 左右，备用。

1.2 试验设计

试验设置：① CK，无物料还田；② F，常规化肥处理；③ 100FS，秸秆还田配施 100% 化肥处理；④ 70FS，秸秆还田配施 70% 化肥处理；⑤ 60FS，秸秆还田配施 60% 化肥处理；⑥ 50FS，秸秆还田配施 50% 化肥处理。每个处理 3 个重复，采用随机区组排列在 18 个 2 m×1 m 能独立排灌的微区内，各个微区的水肥管理均相同。

试验于 2016 年 11 月开始，共种植 3 季蔬菜，施用两次秸秆，分别在种植蔬菜（莴笋，辣椒）前将

秸秆均匀撒覆在土壤表面进行翻耕（每次施用量为 12 000 kg·hm<sup>-2</sup>），翻耕深度为 30~40 cm，为保持相对一致性，对照 CK 和 F 处理也进行同样翻耕。各作物的氮、磷、钾肥的常规施用量按文献[19]的化肥施用量，化肥减量处理在常规使用量的基础上减少相应的百分比，各季作物栽培方式和灌溉、除草等田间管理按照当地习惯进行，松根除草的深度为 10 cm 左右，灌溉时间通常在施肥和追肥后，以及土壤含水量较低的时候，每个处理均进行灌溉。氮、磷、钾肥品种分别为尿素（N46%）、过磷酸钙（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>12%）、氯化钾（K<sub>2</sub>O 60%）。具体的蔬菜种植及施肥情况详见表 1。在辣椒最后一次收获后（2017 年 9 月 14 日），采集 0~20 cm 表层土壤，取部分鲜样用于铵态氮、硝态氮、可溶性氮含量和氨氧化微生物（AOA 和 AOB）群落分析，剩余土壤自然风干后用于测定土壤理化性质。

表 1 种植及施肥情况

Table 1 Planting and fertilization

| 项目  | 需氮(N)量<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 需磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )量<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 需钾(K <sub>2</sub> O)量<br>/kg·hm <sup>-2</sup> | 种植及施肥情况                                                                                                                            |
|-----|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 莴笋  | 300                            | 90                                                          | 150                                           | 2016 年的 10 月 20 日施入有机物料并翻耕，10 月 27 日移栽莴笋苗，10 月 30 日施基肥（氮肥 60%，磷肥和钾肥一次性施入），12 月 9 日追肥（氮肥 40%），2017 年 1 月 9 日收获莴笋                    |
| 卷心菜 | 300                            | 70                                                          | 300                                           | 2017 年的 1 月 10 日施基肥（氮肥 40%，钾肥 40%，磷肥一次性施入），1 月 11 日移栽卷心菜苗，2 月 21 日第一次追肥（氮肥 30%，钾肥 30%），3 月 27 日第二次追肥（氮肥 30%，钾肥 30%），5 月 4 日收获卷心菜   |
| 辣椒  | 300                            | 80                                                          | 150                                           | 2017 年的 5 月 5 日施入有机物料并翻耕，5 月 10 日施基肥（氮肥 50%，钾肥 50%，磷肥一次性施入），5 月 11 日移栽辣椒苗，6 月 19 日追肥（氮肥 50%，钾肥 50%），7 月 20 日、8 月 18 日、9 月 14 日收获辣椒 |

1.3 试验方法

1.3.1 N<sub>2</sub>O 排放

采用静态箱-气相色谱法测定菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量，采样箱材质为不锈钢材料，由底座和顶箱 2 部分组成，底座（横截面为 50 cm×50 cm）长期固定于田间，底壁插入土中约 10 cm，底座顶端有深、宽均为 3 cm 的密封水槽，采样前往槽内注水以防底座和顶箱结合处漏气。顶箱（50 cm×50 cm×50 cm）外覆绝热材料以减少采样箱内温度随外界气温升高对试验结果的影响，同时，顶箱内部安装 2 个小风扇，用于混合箱内气体。顶箱侧面安装电源插头、温度探头（JM624 型便携式测温计）和采样管。试验期间，采样频率为每周 1 次，每次控制在当天 09:00~11:00 间进行，采样时用 60 mL 注射器采集第 1 次样品，之后每间隔 10 min 采样 1 次，罩箱时间为 30 min，共采集 4 个气体样品。在气体样品采集的同时，记下开始和结束时的气温和 5 cm 深土壤温度，并采集表层土

样，测定含水量。遇到下雨及施肥情况，采样频率增加，为每 2 d 一次，持续一周。

1.3.2 土壤氨氧化微生物

土壤 DNA 利用 FastDNA® SPIN Kit for soil (MP Biomedicals, LLC) 试剂盒，分别称取 0.5 g 新鲜土样，按照试剂盒上的操作步骤进行土壤微生物总 DNA 的提取。提取后的 DNA -20℃ 存放，用于 AOA 和 AOB *amoA* 基因拷贝数和克隆测序。

克隆文库：选用不同的引物对土壤 AOA 和 AOB *amoA* 基因进行扩增（引物见表 2）。利用 DNA 纯化回收试剂盒（Universal DNA Purification Kit, TIANGEN）对扩增 PCR 产物进行纯化，纯化产物通过 pGEM-T 载体（Promega Corp, USA）进行克隆。根据“蓝白斑”（抑制剂：0.2% X-Gal，0.1% Amp，0.05% IPTG）对克隆子进行初步筛选，再通过菌液 PCR 扩增（体系 25 μL）电泳筛选后，选出目的大小片段的克隆，每个处理选择 30 个克隆子送至生工

生物有限公司进行序列测定. 利用 Muthur 软件将测序成功的结果进行序列分析, 筛选核糖酸序列相似度 >97% 序列, 将其视为同一个可操作分类单元 (operational taxonomic units, OTU). 将代表基因序

列提交 NCBI (National Center for Biotechnology Information) 以获取基因登录号. AOA 和 AOB *amoA* 基因登录号分别为: MH200776-MH200817, MH200739-MH200775.

表 2 氨氧化细菌和氨氧化古菌扩增引物

Table 2 Primers of ammonia oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing bacteria

| 名称           | 引物                                         | 序列(5'-3')                                    | 过程                                                                                                                                                                    |
|--------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氨氧化细菌<br>AOB | <i>amoA</i> -1F<br><i>amoA</i> -1R         | GGGGTTTCTACTGCTGGT<br>CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC   | PCR 扩增体系为 50 $\mu$ L, PCR 条件为 94 $^{\circ}$ C 变性 1 min, 53 $^{\circ}$ C 复性 1 min, 72 $^{\circ}$ C 延伸 1min, 共 34 个循环; 最后 72 $^{\circ}$ C 再延伸 10 min. 扩增产物通过琼脂糖凝胶电泳进行检测 |
| 氨氧化古菌<br>AOA | Arch- <i>amoA</i> F<br>Arch- <i>amoA</i> R | STAATGGTCTGGCTTAGACG<br>GCGGCCATCCATCTGTATGT |                                                                                                                                                                       |

采用实时荧光定量 PCR 法测定 AOA 和 AOB *amoA* 基因拷贝数. 分别选取 1 份质量高的 qPCR 产物, 利用 DNA 凝胶纯化试剂盒 (Universal DNA Purification Kit, TIANGEN) 对扩增的产物进行纯化, 并将纯化后的产物进行克隆. 将测序成功的阳性克隆子利用质粒提取试剂盒 (TIAN prep Mini Plasmid Kit, TIANGEN) 提取克隆子的质粒, 测定其 DNA 浓度, 并将其以 10 倍为间隔系列稀释成实时荧光定量 PCR 测定标准品. 将样品与标准品一起进行 Real-Time PCR 检测, 包括阴性对照在内每个样品设 3 个重复. AOA 和 AOB 引物分别为 *amo\_F*/*amoRa* (序列 5'-3': ATGGTCTGGCTAAGACGMTGTA/GCGGCCATCCATCTGTATGT) 和 *amoA\_1F*/*amoA\_1R* (序列 5'-3'同表 1). AOA 反应体系: ABI Prower SybrGreen qPCR Master Mix (ABI, USA) 12.5  $\mu$ L, 引物各 1  $\mu$ L, DNA 模板 1  $\mu$ L, 加 ddH<sub>2</sub>O 至 25  $\mu$ L; 反应程序: 预变性 95 $^{\circ}$ C 1 min, 变性 94 $^{\circ}$ C 45 s, 退火 55 $^{\circ}$ C 45 s, 延伸温度 72 $^{\circ}$ C 45 s, 共进行 35 个循环. AOB 反应体系: ABI Prower SybrGreen qPCR Master Mix (ABI, USA) 12.5  $\mu$ L, 引物各 0.5  $\mu$ L, DNA 模板 2.5  $\mu$ L, 加 ddH<sub>2</sub>O 至 25  $\mu$ L. 反应程序: 预变性 94 $^{\circ}$ C 5 min, 变性 94 $^{\circ}$ C 1 min, 退火 53 $^{\circ}$ C 1 min, 延伸温度 72 $^{\circ}$ C 1 min, 共进行 35 个循环. 每个循环中荧光收集在 83 $^{\circ}$ C 下进行, 以防止由于引物二聚体的存在所引起的误差. 溶解曲线程序为 65~98 $^{\circ}$ C, 每 0.2 $^{\circ}$ C 读数, 其间停留 6 s. qPCR 测定控制软件 ABI7500 sequence detection system.

### 1.3.3 土壤理化性质

土壤全氮: 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-蒸馏滴定测定, 所用仪器为上海纤化仪器公司生产的 KDN-02C 定氮仪; 土壤全磷: 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-钒钼黄比色法测定; 土壤全钾: 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-火焰光度计法测定 (FP640 型仪器); 土壤碱解氮: 碱解扩散法测定; 土壤速效钾: NH<sub>4</sub>Ac 浸提-火焰光度计法测定; 土壤有效磷: 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提-

钼蓝比色法测定; 土壤有机质: 重铬酸钾容量法测定. 土壤铵态氮和硝态氮采用 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl 提取, 取滤液分别用靛酚蓝比色法和紫外分光光度计法测定. 具体测定详细步骤参见文献[20, 21].

### 1.4 数据处理

采用气相色谱 (Agilent 7890A 气相色谱仪) 测定气体 N<sub>2</sub>O 浓度. N<sub>2</sub>O 检测器为 ECD (电子俘获检测器), 检测温度 300 $^{\circ}$ C, 柱温 50 $^{\circ}$ C, 气体排放速率由 4 个气样浓度值经线性回归分析得出具体工作条件详见文献[22]. 温室气体排放通量 ( $f$ ) 的计算公式<sup>[2]</sup>为:

$$f = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中,  $f$  表示 N<sub>2</sub>O 排放通量 [ $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ];  $\rho$  表示标准状态下 N<sub>2</sub>O-N 的密度;  $V$  为采样箱体积 ( $\text{m}^3$ );  $A$  为采样底座内土壤表面积 ( $\text{m}^2$ );  $\Delta c / \Delta t$  表示气体的排放速率, 即通过每个小区每次采集的 4 个样品的气体浓度与时间进行一次线性回归, 回归方程的系数就是  $\Delta c / \Delta t$ ;  $T$  为采样箱内温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

OTU 代表着克隆文库中不同基因类型, 可计算各项多样性指数<sup>[23, 24]</sup>.

香农指数 (Shannon-Weaver,  $H$ ):

$$H = - \sum P_i (\ln P_i)$$

均匀度 (Pielou,  $E$ ):

$$E = H / H_{\max}$$

优势度 (Simpson,  $D$ ):

$$D = 1 / \sum P_i^2$$

式中,  $P_i$  为同一种 OTU 的克隆数占总克隆数的比例,  $S$  为不同 OTU 种类数,  $H_{\max} = \ln S$ .

采用 SPSS 20.0、Origin 8.5 和 Excel 2010 软件进行数据处理、绘图制表. 不同处理间差异性比较采用 LSD 最小显著差数法和非参数 Kruskal-Wallis 检验 ( $P < 0.05$ ). 利用 Mothur 软件对测序的序列进行 OTU 分析, 然后利用 HemI 1.0 软件对功能基因进行热度分析. 利用 CANOCO 软件对土壤环境

参数和多样性指数相关性进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆与化肥减量配施对 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

在整个试验观测期内, 各处理的土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量存在明显的季节变化规律, 表现为冬季较低, 夏季较高。如图 1 所示, 秸秆与化肥配施较对照 CK 均提高了土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量, 各处理的土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放

峰值分别出现在 2017 年的 5 月 12 日和 6 月 23 日。其中 100FS 处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量最高, 为  $57.59 \sim 6238.02 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 其次为 70FS 处理, 而 F 处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量较低, 可见秸秆与化肥配施处理较常规施肥处理提高了土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量。通过计算试验期内的 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放通量, 秸秆与化肥配施处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放通量明显高于 CK 和 F 处理 ( $P < 0.05$ ), 其中 100FS 处理高达  $60.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其次为 70FS 处理。

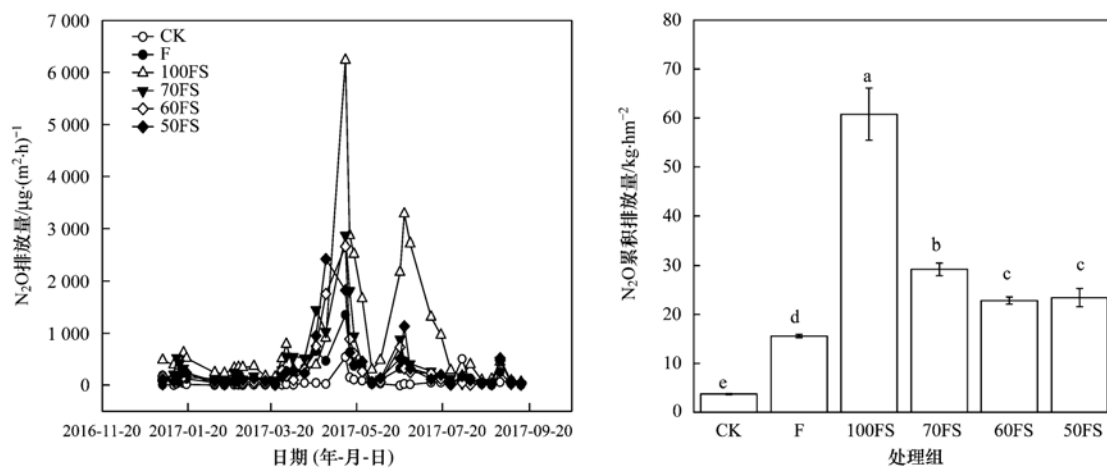


图 1 不同处理下 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量和累积排放量

Fig. 1 Emission fluxes and cumulative emission of  $\text{N}_2\text{O}$  under different treatments

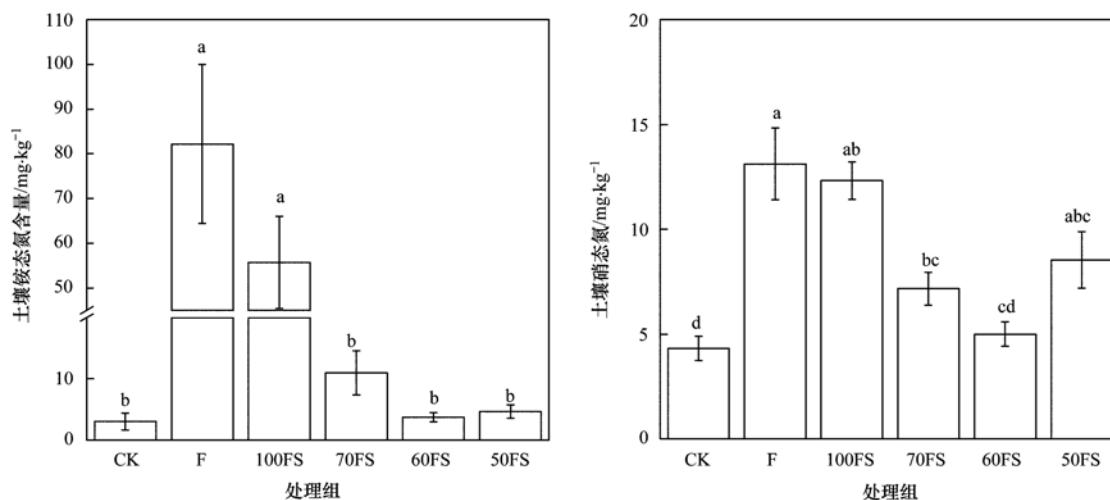
### 2.2 秸秆与化肥减量配施对土壤铵态氮及硝态氮的影响

如图 2 所示, F 处理的土壤铵态氮含量最高, 为  $82.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其次为 100FS ( $55.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 分别较 CK 明显增加了  $79.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $52.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.05$ )。秸秆与化肥减量配施处理较 F 和 100FS 处理显著降低土壤铵态氮含量, 但处理间差异不显著。对土壤硝态氮而言, F 和 100FS 处理

含量最高, 分别为  $13.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $12.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 而 60FS 处理的硝态氮含量最低, 为  $5.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 2.3 秸秆与化肥减量配施对土壤理化性质、产量的影响

从表 3 可以看出, 施肥处理的土壤总氮 (TN) 含量较 CK 提高了  $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 但处理间不存在显著差异。100FS 处理能显著提高土壤碱解氮



不同小写字母表示同一指标在不同处理间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 2 不同处理下铵态氮和硝态氮含量

Fig. 2 Soil ammonium- and nitrate-nitrogen contents under different treatments

(AN)含量,较F处理提高了 $15.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而秸秆与化肥减量配施处理较F处理有所下降,其中70FS和60FS处理显著降低了 $31.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $39.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .对土壤可溶性有机氮(DON)而言,各处理的含量表现为 $50\text{FS} > 100\text{FS} > \text{F} > 60\text{FS} > 70\text{FS} > \text{CK}$ 处理.与F处理相比,秸秆与化肥配施处理能增加土壤有机质(SOM)含量,其中化肥减

量配施处理显著提高了 $4.2 \sim 6.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,同时F处理的SOM较CK下降了 $3.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .秸秆与化肥减量配施处理的pH值较F和100FS处理提高了 $0.7 \sim 0.9$ 个单位,但处理间差异不显著.从表3还可以看出,施肥可以显著提高蔬菜的产量,秸秆与化肥减量处理的产量较F处理略有下降,但是差异不显著.

表3 不同处理下土壤理化性质的变化<sup>1)</sup>

Table 3 Changes of the physico-chemical soil parameters under different treatments

| 处理    | 土壤理化性质                              |                                      |                                       |                                      |                       | 产量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ |                         |                         |
|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|       | TN/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | AN/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | DON/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | SOM/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | pH                    | 莴笋                                  | 卷心菜                     | 辣椒                      |
| CK    | $0.8 \pm 0.1\text{a}$               | $68.3 \pm 3.6\text{d}$               | $4.49 \pm 0.64\text{b}$               | $19.6 \pm 2.7\text{ab}$              | $5.4 \pm 0.7\text{a}$ | $16.4 \pm 3.0\text{b}$              | $57.6 \pm 7.0\text{b}$  | $0.57 \pm 0.04\text{b}$ |
| F     | $0.9 \pm 0.0\text{a}$               | $120.0 \pm 16.8\text{ab}$            | $9.33 \pm 2.1\text{ab}$               | $15.9 \pm 0.0\text{b}$               | $4.7 \pm 0.4\text{a}$ | $20.6 \pm 2.2\text{ab}$             | $113.8 \pm 8.8\text{a}$ | $1.25 \pm 0.27\text{a}$ |
| 100FS | $1.0 \pm 0.0\text{a}$               | $135.2 \pm 12.3\text{a}$             | $10.03 \pm 3.01\text{ab}$             | $19.4 \pm 1.8\text{ab}$              | $4.7 \pm 0.3\text{a}$ | $21.6 \pm 1.5\text{a}$              | $122.0 \pm 4.3\text{a}$ | $1.22 \pm 0.20\text{a}$ |
| 70FS  | $1.0 \pm 0.1\text{a}$               | $88.7 \pm 3.3\text{c}$               | $5.34 \pm 0.4\text{ab}$               | $21.7 \pm 0.8\text{a}$               | $5.4 \pm 0.2\text{a}$ | $20.7 \pm 2.9\text{ab}$             | $112.3 \pm 3.2\text{a}$ | $1.16 \pm 0.16\text{a}$ |
| 60FS  | $0.9 \pm 0.1\text{a}$               | $80.3 \pm 1.9\text{cd}$              | $8.98 \pm 4.83\text{ab}$              | $20.1 \pm 0.0\text{a}$               | $5.6 \pm 0.3\text{a}$ | $18.0 \pm 1.6\text{ab}$             | $119.6 \pm 7.7\text{a}$ | $0.94 \pm 0.36\text{a}$ |
| 50FS  | $1.0 \pm 0.0\text{a}$               | $110.1 \pm 5.2\text{b}$              | $20.03 \pm 7.76\text{a}$              | $22.5 \pm 1.2\text{a}$               | $5.6 \pm 0.1\text{a}$ | $17.1 \pm 0.3\text{ab}$             | $108.8 \pm 1.6\text{a}$ | $1.04 \pm 0.68\text{a}$ |

1) 不同小写字母表示同一指标在不同处理间的差异显著( $P < 0.05$ )

## 2.4 秸秆与化肥减量配施对土壤氨氧化微生物 *amoA* 基因丰度及多样性的影响

### 2.4.1 土壤氨氧化微生物 *amoA* 基因丰度

通过荧光定量PCR技术获得土壤AOA和AOB *amoA* 基因拷贝数(图3).供试土壤中的AOB的基因拷贝数远高于AOA,可见本研究的土壤AOB占有一定优势.对AOA而言,F处理的土壤中AOA基因拷贝数高达 $50.9 \times 10^3 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ,明显高于其他处理,而100FS处理的AOA基因拷贝数明显低于其他处理( $P < 0.05$ ),秸秆与化肥减量配施处理的AOA基因拷贝数不存在显著差异.各处理对AOB基因拷贝数的影响不同于AOA,如图3所示,60FS处理的AOB基因拷贝数最大( $1.03 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ),明显高于其他处理,其次为50FS和70FS( $P < 0.05$ ),而F处理的AOB基因拷贝数最低( $1.36 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ ),但与CK和100FS处理间不存在显著差异.

### 2.4.2 多样性指数

不同处理对土壤AOA和AOB *amoA* 基因多样

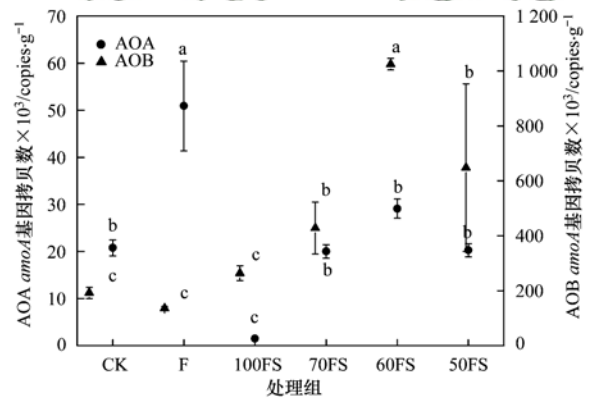


图3 不同处理下土壤AOA和AOB *amoA* 基因拷贝数

Fig. 3 AOA *amoA* and AOB *amoA* gene copies in the soil under different treatments

性的影响存在差异.从表4可以看出,70FS处理的土壤AOA的OTUs、香农指数( $H$ )、均匀度( $E$ )和优势度( $D$ )均最高,其次为CK和F处理,而100FS处理的多样性各指标较低.对土壤AOB而言,60FS处理的OTUs、 $H$ 、 $E$ 和 $D$ 指数均最高,而100FS处理的 $H$ 和 $D$ 指数最低,70FS处理的 $E$ 指数最低.

表4 不同处理下土壤AOA和AOB *amoA* 基因多样性指标

Table 4 Biodiversity indices of AOA *amoA* and AOB *amoA* in soil under different treatments

| 处理    | AOA  |             |            |            | AOB  |             |            |            |
|-------|------|-------------|------------|------------|------|-------------|------------|------------|
|       | OTUs | 香农指数( $H$ ) | 均匀度( $E$ ) | 优势度( $D$ ) | OTUs | 香农指数( $H$ ) | 均匀度( $E$ ) | 优势度( $D$ ) |
| CK    | 13   | 2.36        | 0.921      | 0.889      | 10   | 2.14        | 0.929      | 0.864      |
| F     | 13   | 2.28        | 0.889      | 0.874      | 10   | 2.20        | 0.954      | 0.877      |
| 100FS | 9    | 1.66        | 0.757      | 0.718      | 8    | 2.01        | 0.965      | 0.857      |
| 70FS  | 14   | 2.50        | 0.947      | 0.906      | 15   | 2.43        | 0.896      | 0.888      |
| 60FS  | 11   | 2.09        | 0.870      | 0.842      | 19   | 2.85        | 0.967      | 0.936      |
| 50FS  | 9    | 1.98        | 0.902      | 0.837      | 10   | 2.19        | 0.950      | 0.875      |

### 2.4.3 土壤氨氧化微生物热度分析

通过 Heatmap 分析发现(图 4), 50FS 处理的 AOA 群落结构不同于其他处理, 此外 100FS 和 60FS 处理、F 和 70FS 处理的 AOA 群落结构较为类

似; 其中 100FS 处理的 OTU1 菌群占有优势地位, F 处理 OTU3 菌群占优势. 对 AOB 而言, CK 的群落结构明显不同于其他处理, 50FS 和 60FS 处理的 AOB 群落结构较为相似, 70FS 处理主要以 OTU5

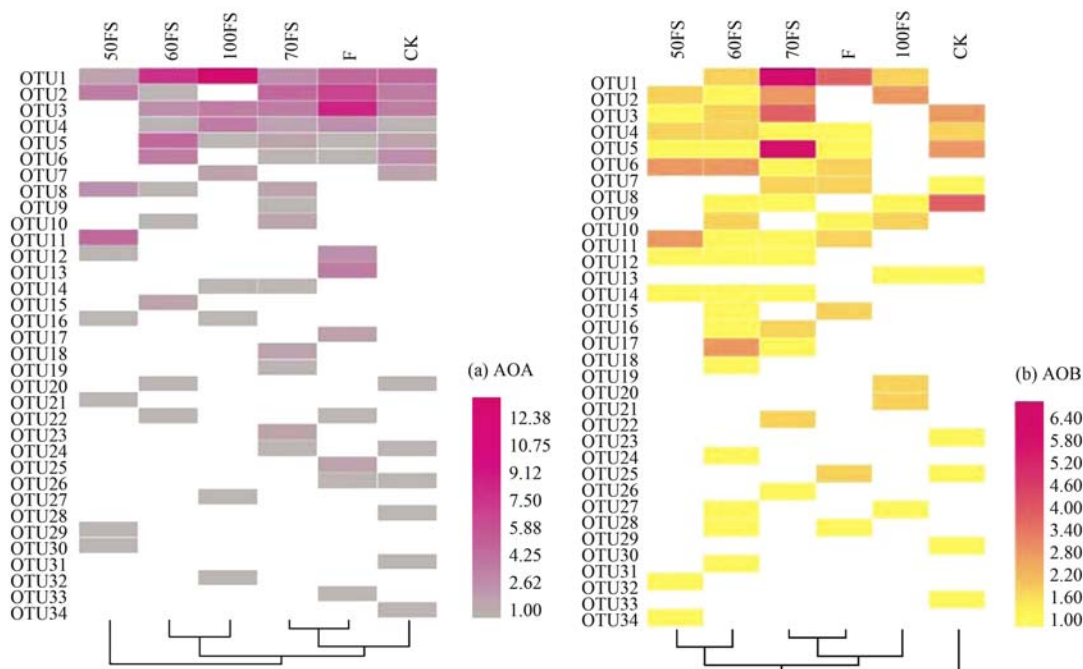


图 4 不同处理下土壤氨氧化微生物 (AOA 和 AOB) 热图

Fig. 4 Heatmap analysis of ammonia-oxidizing microorganism communities (AOA and AOB) in soil under different treatments

和 OTU1 菌群占优势.

### 2.5 秸秆与化肥减量配施下土壤氨氧化微生物与环境因子的 RDA 分析

基于微生物群落 OTU 的组成, 进行土壤氨氧化微生物 AOA、AOB 与环境因子冗余分析(RDA). 如图 5 所示, 第一轴和第二轴分别解释了 42.9% 和

27.0% AOA 群落结构变化, 40.7% 和 21.4% 的 AOB 群落结构变化. 土壤铵态氮、有机质和有效磷含量对 AOA 群落结构存在显著影响 ( $P < 0.05$ , 蒙特卡罗算法); 土壤可溶性有机氮、总氮、速效钾以及有效磷含量与 AOB 群落结构间具有显著的相关关系 ( $P < 0.05$ , 蒙特卡罗算法).

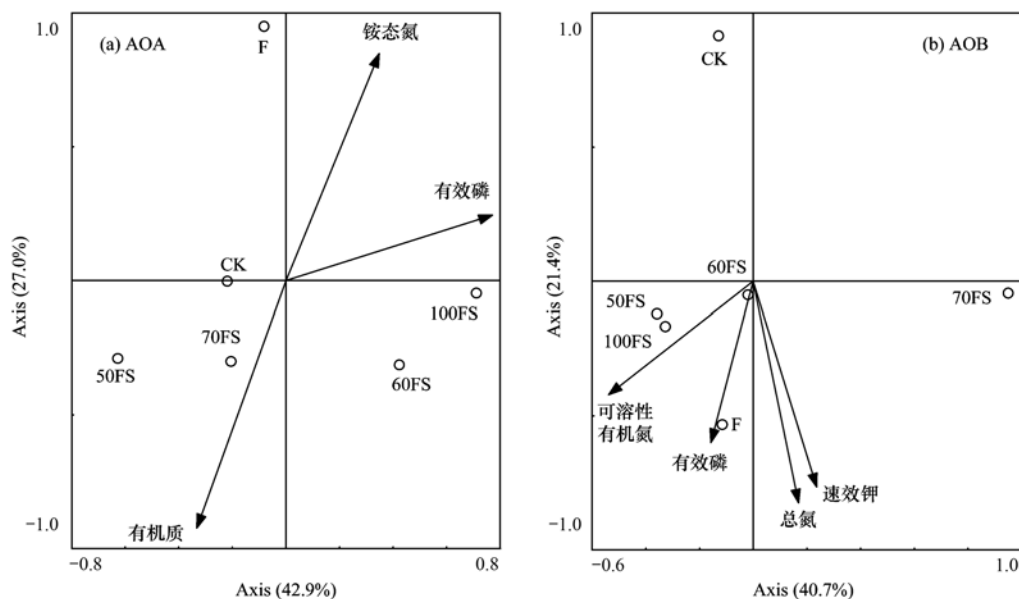


图 5 不同处理下土壤氨氧化微生物 (AOA 和 AOB) 与环境因子变化的 RDA 排序

Fig. 5 RDA ordination analysis of ammonia-oxidizing microorganism communities (AOA and AOB) in soil under different treatments

### 3 讨论

土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 是硝化和反硝化作用的产物,其中硝化作用是旱地土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的主要途径<sup>[7]</sup>. 反应底物(铵态氮)浓度和微生物活性是最直接和核心的控制因素,控制硝化作用的微生物(AOA 和 AOB)成为控制 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的重要因素<sup>[25]</sup>. 秸秆作为有机物料,施入土壤后会改变土壤养分组成、温度、水分等,从而影响硝化作用相关的土壤微生物活性<sup>[2]</sup>. 但是,关于秸秆还田对土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的研究结果仍存在争议,且不同来源的秸秆 C/N 比不同对土壤氮素固持转化影响各异. 有研究表明,小麦秸秆的施用在不影响作物产量的条件下,可以降低土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放<sup>[26]</sup>;而 Shan 等<sup>[27]</sup>的研究表明,由于秸秆还田可以为硝化和反硝化微生物提供良好的养分环境,从而引起水稻秸秆还田处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放显著增加了 42%. Liu 等<sup>[28]</sup>的研究也表明,在夏玉米季中进行小麦秸秆还田可以增加 58%  $\text{N}_2\text{O}$ 排放. 本研究中,与对照(CK)和常规施肥(F)相比,玉米秸秆与化肥配施均不同程度地增加了紫色土 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量和累积排放量,其中秸秆与全量化肥配施(100FS)处理的土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量和累积排放量最大,且随着化肥施用量的减少,土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量呈递减趋势. 这是因为玉米秸秆施入土壤后,一方面可以为微生物提供硝化作用的反应底物参与 $\text{N}_2\text{O}$ 产生;另一方面玉米秸秆还田后,会增加土壤碳素含量(表 3),为微生物参与下的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的硝化和反硝化过程提供充足的营养元素<sup>[29, 30]</sup>,因此与常规施肥处理相比,秸秆与化肥配施处理提高了土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量. 但是玉米秸秆还田会增加土壤 C/N 比,从而促进微生物对氮素的固持,减少 $\text{N}_2\text{O}$ 产生所需要的氮基质,最终抑制土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放<sup>[31]</sup>,所以相对于秸秆与全量化肥配施处理而言,玉米秸秆与化肥减量配施处理的施氮水平低,在不显著影响作物产量的情况下(表 3),秸秆与化肥减量配施处理在一定程度上可以降低土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放<sup>[2]</sup>.

土壤氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)进行的氨氧化反应是硝化作用的第一步,控制着硝化作用的速度<sup>[9]</sup>,同时也是影响 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的重要因素. 有研究表明,施肥(有机肥和无机肥)会增加土壤 $\text{NH}_3$ 的含量,促进了 AOB 的生长,但对 AOA 的影响较小,从而使得 AOA 和 AOB 对施肥表现出不同的响应模式<sup>[32]</sup>. 在本研究中,土壤 AOB *amoA* 基因拷贝数普遍比 AOA *amoA* 基因拷贝数高 1~2 个数量级,可见本试验环境更有利于 AOB 生长. 其中,常规施肥处理中 AOA *amoA* 基因拷贝数高于其

他处理,而 AOB *amoA* 基因拷贝数最低. Di 等<sup>[33]</sup>的研究表明 AOA 和 AOB 生长的土壤含氮量不同, AOA 倾向于营养贫瘠的低 N 环境,而 AOB 对高 N 环境较为适应;本试验中常规施肥处理的铵态氮和硝态氮含量高于其他处理,但高 N 的环境不利于 AOA 发挥作用<sup>[34]</sup>. 此外 Nicol 等<sup>[35]</sup>通过分析 AOA 和 AOB 种群延 pH 4.5~7.5 演替的规律,发现 AOA *amoA* 基因拷贝数与 pH 呈负相关关系, AOB 则呈正相关关系;曹彦强等<sup>[36]</sup>的研究表明,酸性紫色土不利于 AOB 在氨氧化过程中发挥作用. 因此,在本试验常规施肥处理的酸性紫色土中(pH = 4.7),即使高 N 的环境也不利于 AOB 在硝化过程中发挥作用,这可能是常规施肥处理的 AOB *amoA* 基因拷贝数低于其他处理的重要原因. 虽然酸性环境中起主导作用的氨氧化微生物是 AOA<sup>[36]</sup>,但高 N 的环境不利于 AOA 发挥作用,因此即使 F 处理 AOA *amoA* 基因拷贝数较高,但也有可能导致常规施肥处理因硝化作用产生的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量低于秸秆与化肥配施处理. 对于秸秆与全量化肥配施处理,土壤 AOA 多样性指数和 *amoA* 基因拷贝数均较低. 这可能是因为 100FS 处理的 AOA 优势菌群 OTU1 占比最大,占优势的 OTU1 菌群大量生长繁殖,会抑制其他非优势菌群的生长,从而出现了 AOA 多样性指数下降和均匀度减少的现象<sup>[37, 38]</sup>,同时降低了 AOA *amoA* 基因拷贝数. 100FS 处理的土壤酸性环境(pH = 4.7)同样也导致了 AOB *amoA* 基因拷贝数明显低于秸秆与化肥减量配施处理(pH 5.4~5.6),但由于秸秆的施用,会增加微生物的营养元素,因此 100FS 处理的 AOB *amoA* 基因拷贝数略高于 F 处理,但未达到显著水平,可见土壤 pH 对本试验土壤 AOB *amoA* 基因拷贝数的影响起到关键性作用. 已有研究表明, *amoA* 基因拷贝数并不与氨氧化微生物的活性有直接的联系,因此其无法真实反映氨氧化微生物的硝化活动<sup>[39, 40]</sup>. 虽然 100FS 处理的 AOA 和 AOB *amoA* 基因拷贝数均显著低于秸秆与化肥减量配施处理,但 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量显著高于其他处理. 一方面是因为在秸秆等量的还田下,秸秆与化肥减量配施处理的 C/N 比较高,促进微生物对氮素的固持,但在有限氮供应的条件下,较高的 C/N 比并不利于微生物对秸秆的降解释放氮素,因此秸秆与化肥配施处理减少了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的氮基质(图 2),从而在一定程度上抑制了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放;另一方面, AOA 可以通过将铵态氮转化为硝态氮,为反硝化微生物提供代谢底物来间接影响土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放,同时通过 Heatmap 分析发现,100FS 处理的 AOA 的优势菌群 OTU1 占比最高,该优势菌群可能

是硝化作用的主要驱动者, 间接促进了硝化作用中 $\text{N}_2\text{O}$ 的产生. 常规施肥处理的 AOA 优势菌群 OTU1 低于秸秆与化肥配施处理, 这也进一步说明了在 AOA *amoA* 基因拷贝数高的情况下, F 处理 $\text{N}_2\text{O}$ 排放较少的原因, 这表明氨氧化微生物中的优势菌群才是硝化作用的主要驱动者.

秸秆还田会影响土壤硝化作用相关微生物的种类、数量和活性<sup>[41]</sup>. 本研究中 AOA 的菌群 OTU1 在 6 个处理中均存在, 说明此类菌群适应环境范围较广, 生态位相对较宽, 对不同环境因子的耐受性强, 其中 100FS 处理的 OTU1 最多, 从而抑制其他 AOA 菌群的生长, 最终使得 100FS 处理的多样性最低, 分布最不均匀, 但在秸秆还田的基础上, 减施 30%~40% 的化肥, 可以有效提高 AOA 菌群的多样性, 这是因为 AOA 在低 N 的环境中也能生长<sup>[16]</sup>, 但是过低的氮量也不利于 AOA 菌群的生长. 这也进一步说明了, 虽然秸秆与化肥减量提高了 AOA 菌群的多样性, 但是优势菌群 OTU1 较少, 因此在 AOA 起氨氧化作用的酸性紫色土中, 相对于秸秆与全量化肥配施处理, 化肥减量处理降低了 $\text{N}_2\text{O}$ 排放. 对 AOB 群落结构而言, CK 处理的 AOB 群落结构明显不同于其他处理(图 4), 可见无机肥和秸秆的施用会明显改变 AOB 群落结构. 本试验中, 并没有 AOB 菌群 OTU 在 6 个处理中均存在, 说明 AOB 相较于 AOA 的生态位较小, 对不同环境因子的耐受性较弱. 在秸秆还田的基础上减少 30%~40% 化肥施用, 也可以提高 AOB 菌群的多样性, 这可能与该处理下的紫色土有机质含量较高有关, 因为土壤有机质含量对保持土壤微生物多样性具有重要作用<sup>[17, 42]</sup>, 有机质含量越高, 土壤颗粒中微生物群落结构越复杂, 多样性越高<sup>[43]</sup>. 通过冗余分析发现, 土壤有机质、铵态氮和有效磷显著影响 AOA 群落结构, 而显著影响 AOB 群落结构的因子较多, 这也进一步说明了 AOA 相较于 AOB 对不同环境因子的耐受性强. 由于本试验紫色土偏酸性, 促使磷生成难溶性物质, 不利于微生物利用<sup>[44]</sup>, 同时加上该研究区属亚热带季风气候, 多雨的环境易造成土壤中盐基离子(如  $\text{K}^+$ )被淋洗, 因此磷和钾元素成为抑制微生物群落结构发展的原因, 方宇等<sup>[37]</sup>的研究也表明 AOA 对土壤速效养分有很强的依赖性.

#### 4 结论

秸秆与化肥配施较常规处理降低了土壤铵态氮和硝态氮含量, 提高了土壤有机质含量、 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量和累积排放量. 秸秆与全量化肥配施处理的蔬菜产量较大,  $\text{N}_2\text{O}$ 排放量最大, AOA 和 AOB *amoA* 基

因丰度和多样性较低, 但土壤 AOA 优势菌群才是硝化作用的主要驱动者, 直接和间接地影响 $\text{N}_2\text{O}$ 排放. 土壤 AOB *amoA* 基因拷贝数远高于 AOA, 但其对不同环境因子的耐受性和生态位低于 AOA. 在秸秆还田的基础上, 化肥减量 30%~40% 对蔬菜产量没有显著影响, 且有效提高了紫色土 AOA 和 AOB *amoA* 基因多样性, 在一定程度上减缓了土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放.

#### 参考文献:

- [1] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1912-1920.  
Chen C, Xu X, Bi Z C, et al. Effects of biochar and organic manure on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1912-1920.
- [2] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4694-4704.  
Huang R, Gao M, Li J C, et al. Effect of straw residues in combination with reducing fertilization rate on greenhouse gas emission in vegetable field[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4694-4704.
- [3] Jettten M S M. The microbial nitrogen cycle[J]. Environmental Microbiology, 2008, **10**(11): 2903-2909.
- [4] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of  $\text{N}_2\text{O}$  from vegetable fields in China[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(38): 6923-6929.
- [5] Qu Z, Wang J G, Almøy T, et al. Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high  $\text{N}_2\text{O}/(\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2)$  product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils[J]. Global Change Biology, 2014, **20**(5): 1685-1698.
- [6] Frame C H, Casciotti K L. Biogeochemical controls and isotopic signatures of nitrous oxide production by a marine ammonia-oxidizing bacterium[J]. Biogeosciences, 2010, **7**(9): 2695-2709.
- [7] 毛新伟, 程敏, 徐秋芳, 等. 硝化抑制剂对毛竹林土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放和氨氧化微生物的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53**(6): 1528-1540.  
Mao X W, Cheng M, Xu Q F, et al. Effects of nitrification inhibitors on soil  $\text{N}_2\text{O}$  emission and community structure and abundance of ammonia oxidation microorganism in soil under extensively managed *Phyllostachys edulis* stands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(6): 1528-1540.
- [8] Philippot L, Andert J, Jones C M, et al. Importance of denitrifiers lacking the genes encoding the nitrous oxide reductase for  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from soil[J]. Global Change Biology, 2011, **17**(3): 1497-1504.
- [9] 周志成, 罗葵, 唐前君, 等. 不同施肥方式对红壤蔬菜田氨氧化细菌和氨氧化古菌群落的影响[J]. 中国蔬菜, 2015, (7): 33-39.  
Zhou Z C, Luo K, Tang Q J, et al. Effect of different fertilization on ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea in red soil vegetable field[J]. China Vegetables, 2015, (7): 33-39.
- [10] Zhong W H, Bian B Y, Gao N, et al. Nitrogen fertilization

- induced changes in ammonia oxidation are attributable mostly to bacteria rather than archaea in greenhouse-based high N input vegetable soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 150-159.
- [11] Maeda K, Spor A, Edel-Hermann V, *et al.* N<sub>2</sub>O production, a widespread trait in fungi [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9697.
- [12] Attard E, Recous S, Chabbi A, *et al.* Soil environmental conditions rather than denitrifier abundance and diversity drive potential denitrification after changes in land uses [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(5): 1975-1989.
- [13] Huang R, Lan M L, Liu J, *et al.* Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(36): 27942-27952.
- [14] 王沛譔, 徐焱, 宋亚娜. 转基因水稻秸秆还田对土壤硝化反硝化微生物群落的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, **26**(1): 8-15.
- Wang P X, Xu Y, Song Y N. Effect of transgenic rice straw return to soil on nitrification and denitrification microbial community [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, **26**(1): 8-15.
- [15] 陈春兰, 陈哲, 朱亦君, 等. 水稻土细菌硝化作用基因 (*amoA* 和 *hao*) 多样性组成与长期稻草还田的关系研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1624-1632.
- Chen C L, Chen Z, Zhu Y J, *et al.* Effects of rice straw on the diversity of nitrifying genes (*amoA* and *hao*) in paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1624-1632.
- [16] Chen X, Zhang L M, Shen J P, *et al.* Abundance and community structure of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in an acid paddy soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(3): 323-331.
- [17] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆深翻还田土壤氨氧化细菌 *amoA* 基因多样性分析[J]. *玉米科学*, 2015, **23**(3): 107-111.
- Sa L L, Gao J L, Yu X F, *et al.* Analysis of the diversity of ammonia oxidizing bacteria with *amoA* gene in deep returning maize straw soils [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, **23**(3): 107-111.
- [18] 赵伟辉, 王智慧, 曹彦强, 等. 石灰性紫色土硝化作用及硝化微生物对不同氮源的响应[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(2): 479-489.
- Zhao W Y, Wang Z H, Cao Y Q, *et al.* Response of nitrification and nitrifiers to different nitrogen sources in an alkaline purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(2): 479-489.
- [19] 张福锁, 陈新平, 陈青. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- [20] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [22] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- [23] Kvålseth T O. Note on biological diversity, evenness, and homogeneity measures [J]. *Oikos*, 1991, **62**(1): 123-127.
- [24] Magurran A E. *Ecological diversity and its measurement* [M]. Cambridge: Princeton University Press, 1988. 7-47.
- [25] Cui P Y, Fan F L, Yin C, *et al.* Urea-and nitrapyrin-affected N<sub>2</sub>O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria growth in microcosms of three typical Chinese arable soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **66**: 214-221.
- [26] Htun Y M, Tong Y A, Gao P C, *et al.* Coupled effects of straw and nitrogen management on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions of rainfed agriculture in Northwest China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **157**: 156-166.
- [27] Shan J, Yan X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 170-175.
- [28] 刘琳, 吴彦, 何奕忻, 等. 季节性雪被对高山生态系统土壤氮转化的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(8): 2193-2200.
- Liu L, Wu Y, He Y X, *et al.* Effects of seasonal snow cover on soil nitrogen transformation in alpine ecosystem: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(8): 2193-2200.
- [29] Zhu T B, Zhang J B, Yang W Y, *et al.* Effects of organic material amendment and water content on NO, N<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub> emissions in a nitrate-rich vegetable soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(2): 153-163.
- [30] Yang H S, Xu M M, Koide R T, *et al.* Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, **96**(4): 1141-1149.
- [31] 宋贺, 王成雨, 陈清, 等. 长期秸秆还田对设施菜田土壤反硝化特征和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2014, **35**(6): 628-634.
- Song H, Wang C Y, Chen Q, *et al.* Effects of long-term amendment of residue on denitrification characteristics and N<sub>2</sub>O emissions in greenhouse soil [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, **35**(6): 628-634.
- [32] Prosser J I, Nicol G W. Archaeal and bacterial ammonia-oxidisers in soil: the quest for niche specialisation and differentiation [J]. *Trends in Microbiology*, 2012, **20**(11): 523-531.
- [33] Di H J, Cameron K C, Shen J P, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria and archaea grow under contrasting soil nitrogen conditions [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **72**(3): 386-394.
- [34] Jia Z J, Conrad R. Bacteria rather than Archaea dominate microbial ammonia oxidation in an agricultural soil [J]. *Environmental Microbiology*, 2009, **11**(7): 1658-1671.
- [35] Nicol G W, Schleper C. Ammonia-oxidising crenarchaeota: important players in the nitrogen cycle? [J]. *Trends in Microbiology*, 2006, **14**(5): 207-212.
- [36] 曹彦强, 闫小娟, 罗红燕, 等. 不同酸碱性紫色土的硝化活性及微生物群落组成[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(1): 194-202.
- Cao Y Q, Yan X J, Luo H Y, *et al.* Nitrification activity and microbial community structure in purple soils with different pH [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(1): 194-202.
- [37] 方宇, 景晓明, 王飞, 等. 长期施肥对氨氧化古菌丰度及群落结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(6): 1607-1614.
- Fang Y, Jing X M, Wang F, *et al.* Effect of long-term fertilization on abundance and community structure of ammonia-oxidizing archaea in paddy soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(6): 1607-1614.
- [38] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y G, *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam [J].

- Environmental Microbiology, 2008, **10**(6): 1601-1611.
- [39] Leininger S, Urich T, Schlöter M. Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils[J]. Nature, 2006, **442**(7104): 806-809.
- [40] Hatzenpichler R. Diversity, physiology, and niche differentiation of ammonia-oxidizing archaea[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(21): 7501-7510.
- [41] 白雪, 夏宗伟, 郭彦玲, 等. 硝化抑制剂对不同旱地农田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(9): 2319-2329.
- Bai X, Xia Z W, Guo Y L, *et al.* Effects of nitrification inhibitors on  $\text{N}_2\text{O}$  emission from different upland agricultural soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(9): 2319-2329.
- [42] Yang Y H, Yao J, Hu S, *et al.* Effects of agricultural chemicals on DNA sequence diversity of soil microbial community: a study with RAPD marker[J]. Microbial Ecology, 2000, **39**(1): 72-79.
- [43] Sessitsch A, Weilharter A, Gerzabek M H. Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67**(9): 4215-4224.
- [44] 胡红青, 贺纪正, 李学垣, 等. 有机酸对酸性土壤吸附磷的影响[J]. 华中农业大学学报, 1997, **16**(1): 37-42.
- Hu H Q, He J Z, Li X Y, *et al.* Effect of organic acids on phosphate adsorption by acid soil [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1997, **16**(1): 37-42.

环境科学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Cause and Effect Evaluation of PM <sub>2.5</sub> During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016 .....                                                                                                                              | LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> ( 1 )                           |
| Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Yangtze River Delta .....                                                                                                                   | YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> ( 11 )                   |
| Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai .....                                                                                                                                                    | DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> ( 24 )                      |
| Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM <sub>2.5</sub> Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing .....                                        | CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> ( 33 )                          |
| Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                                                                                                   | WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> ( 44 )             |
| Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong .....                                                                                                                                                               | ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> ( 55 )                          |
| Transport Characteristics of PAN and O <sub>3</sub> in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer .....                                                                                                             | YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> ( 67 )                  |
| Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Chemical Components in Chengdu in Winter .....                                                                                                                    | WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> ( 76 )                       |
| Transport Pathways and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Zhengzhou .....                                                                                                                                       | DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> ( 86 )            |
| Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> During Spring in Changzhou .....                                                                                                               | LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> ( 94 )             |
| Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel .....                                                                                                                                | SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> ( 104 )                   |
| Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles .....                                                                                                                       | MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> ( 114 )          |
| Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP .....                                                                                                                                      | YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> ( 121 )                 |
| Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant .....                                                                                                                                                   | RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> ( 126 )          |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing .....                                                                                                                          | ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> ( 135 )               |
| Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment ..... | REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> ( 143 )                   |
| Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin .....                                                                                                        | GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> ( 149 )                    |
| Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer .....                                                                                                                                                       | CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 157 )                |
| Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary .....                                                                      | ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> ( 164 )                    |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs .....                                  | ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 172 )         |
| Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir .....                                                                                                                           | LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 185 )             |
| Water-Air Interface CO <sub>2</sub> Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors .....                                                                                    | LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue ( 192 )                               |
| Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application .....                                                                                                                | LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> ( 200 )                   |
| Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin .....                                                                                         | LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> ( 211 )        |
| Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu .....                                                                                                                        | DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> ( 219 )                   |
| Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section) .....                                                                                      | LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> ( 228 )               |
| Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City .....                                                                                                           | MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan ( 239 )                        |
| Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin .....                                                                                   | ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> ( 248 )            |
| Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing .....                                                                                               | FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> ( 256 )                  |
| Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics .....                                                                                       | QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> ( 263 )                 |
| Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water .....                                                                                                                                                                             | LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> ( 273 )                 |
| Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS <sub>2</sub> /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities .....                                                                              | ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> ( 281 )         |
| Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water .....                                                                                                                               | NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 293 )       |
| Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings .....                                                                                                                                                   | ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> ( 300 )       |
| Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water .....                                                                                                    | XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> ( 310 )           |
| Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese .....                                                                                                                                      | TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> ( 318 )               |
| Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage .....                                                                                                                      | HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 327 )           |
| Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode .....                                                                                                                        | CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> ( 336 )           |
| Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System .....                                                                                                                                      | ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 343 )        |
| Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System .....                                                                                                              | WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> ( 352 )             |
| Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process .....                                                                                                           | GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> ( 360 )         |
| Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules .....                                                                                                                                | LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> ( 369 )                 |
| Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature .....                                                                                                                                                         | LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> ( 376 )                 |
| Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest .....                                                                                                               | YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> ( 383 )                   |
| Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields .....                                                                                                                                                         | FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> ( 392 )           |
| Response of the Soil N <sub>2</sub> O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil .....                                                                     | HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> ( 401 )                |
| Community Structure of CO <sub>2</sub> -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas .....                                                                                                                          | ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> ( 412 ) |
| Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China .....                                                                                  | SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> ( 421 )                      |
| Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria .....                                                                                                                                             | JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> ( 430 )                 |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter .....                                                                                                      | WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> ( 437 )       |
| Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang .....                                                                                                                       | YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping ( 445 )                         |
| Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin .....                                                                                                                             | LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 453 )           |
| Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake .....                                                                                                                                         | XU Yi-yuan, HE Tian-rong ( 461 )                                          |
| Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i> .....                                                                                                                     | GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> ( 470 )               |
| Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress .....                                                                                                          | WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> ( 480 )                   |
| Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region .....                                                                                              | WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> ( 488 )          |
| Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity .....                                                                                                 | ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> ( 496 )                 |
| Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation .....                                                                                                         | FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> ( 504 )                |