

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响

俞映倞^{1,2}, 王悦满¹, 侯朋福¹, 杨林章¹, Alfred Oduor Odindo², 薛利红^{1*}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 夸祖鲁-纳塔尔大学, 农业、地球与环境科学学院, 南非斯科茨维尔 3209, 南非)

摘要: 建立连接富营养化水体养分与农田养分的枢纽是减少农田养分投入、缓解水体富营养化的难点。为探明生物炭材料负载氮还田的可行性, 开展了基于溶液氮及生物炭负载氮两种氮源添加方式的水稻根箱试验。结果表明, 生物炭负载氮添加方式分别较溶液氮添加方式降低了水稻地上部分生物量及氮累积 16% 及 14%, 提高了生物量根冠比 25% ~ 27%, 降低了氮利用效率。不定根的根长及体积是两种氮源添加方式在水稻地下部分差异的体现, 地下部分生物量及氮累积与土壤铵态氮含量呈正相关关系, 而地上部分氮累积与根尖数呈负相关关系。生物炭负载氮完全替代化学肥料施用农田会影响水稻生物量及氮素利用。但生物炭负载氮与普通化学肥料共同施用, 水稻并不会显现利用偏好。生物炭负载氮对水稻氮素利用无不良影响, 且能有效提高土壤矿质态氮固持量。因此, 生物炭可以作为载体实现水体到农田土壤的氮素迁移, 鉴于化肥氮替代比例对作物生长的影响, 适宜替代比例还需进一步研究确定。

关键词: 生物炭; 氮素负载; 氮还田; 根系形态; 氮素利用

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5170-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804034

Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency

YU Ying-liang^{1,2}, WANG Yue-man¹, HOU Peng-fu¹, YANG Lin-zhang¹, Alfred Oduor Odindo², XUE Li-hong^{1*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Environment of the Lower Reaches of the Yangtze River, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Agricultural, Earth & Environmental Sciences, University of KwaZulu-Natal, Scottsville 3209, South Africa)

Abstract: Building a nutrient channel between eutrophic water and agricultural fields could reduce nutrient input into fields and alleviate eutrophication by returning nitrogen. In order to determine the feasibility of returning nitrogen by biochar loading, a rhizobox experiment was conducted with two nitrogen applied methods, namely SN (applied nitrogen by nitrogen fertilizer solution) and BN (applied nitrogen by nitrogen-loaded biochar). The results showed that BN, in comparison with SN, decreased the biomass and nitrogen uptake of the aboveground paddy by 16% and 14%, respectively, increased biomass root-shoot ratios by 25% - 27%, and reduced nitrogen recovery use efficiency. Two nitrogen application methods affected the length and volume of paddy adventitious roots. Paddy underground biomass and nitrogen uptake were positively correlated with soil ammonium content, whereas paddy aboveground nitrogen uptake was negatively correlated with root tips. It was suggested that the paddy biomass and nitrogen uptake would be influenced when nitrogen was applied solely by nitrogen-loaded biochar. However, no affinity and no significance in nitrogen use efficiency were found for plant uptake between chemical nitrogen and biochar-loaded nitrogen. Additionally, biochar promoted soil mineral nitrogen content for further plant uptake. Therefore, biochar could be used as the carrier for returning nitrogen from waterbodies to fields. The replacement rate of chemical nitrogen fertilizer is the key to influencing plant growth and needs future study.

Key words: biochar; nitrogen loading; nitrogen returning; root morphology; nitrogen use efficiency

水体富营养化是中国湖泊河流面临的主要污染问题之一^[1,2]。根据2010年发布的“全国污染源普查公报”数据显示, 农业生产(含种植业、禽畜养殖业及水产养殖业)过程对水体氮的贡献率已高于50%, 超过工业生产与生活排放成为威胁水环境健康的主要来源^[3]。在我国人多地少的严峻土地利用情势下, 种植业的稳定输出是保障国家稳定及安全的重要物质基础, 因此种植业在农业生产中处于最

为重要且不可替代的地位^[4]。大量调研数据显示, 农田养分的过量投入是造成水体富营养化的主要原

收稿日期: 2018-04-04; 修订日期: 2018-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0801101); 公益性行业(农业)科研专项(201503106); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501320)

作者简介: 俞映倞(1986~), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为农田养分循环, 面源污染, E-mail: yu.colleen@gmail.com

* 通信作者, E-mail: njxuelihong@gmail.com

因之一^[2,5~7]。因此,解决水体富营养化问题离不开种植业的养分调控。如何建立连接富营养化水体养分与农田养分的枢纽,实现养分资源再利用,是减少农田养分投入并有效缓解水体富营养化的难点。

在诸多农业面源排放的污染物中,氮是最主要且最难以防治的污染物,也是目前水体富营养化问题控制的重点^[8]。水体环境中的氮素多以离子形态存在。以稻季为例,受降水或灌溉的影响,化肥氮多以铵态氮形态经由农田地表径流、农田排水和淋失等过程进入水体^[9~11],而铵态氮本身又是水稻生长所必须的氮素形态。将进入水体环境的铵态氮迁移并实现稻田回用需要适宜载体的介入。这个载体材料不仅要能够高效吸附水体铵离子,更要保证被吸附铵离子的生物有效性,且应具备环境友好性及易得性。生物炭来源于农业废弃物的裂解,其多孔的结构及表面的基团^[12,13]为离子的吸附提供了条件。已有研究证明,每 g 生物炭对氮的吸附量可以达到 0.85 ~ 44.24 mg^[14~16],且 Taghizadeh-Toosi 等^[17]发现植物可以再次利用生物炭吸附氨气,证明了生物炭固持氮的生物有效性。但是,作为一个具有较好吸附性且能稳定固持氮的材料,进入土壤中的生物炭是否会与作物产生氮素争夺,从而影响作物对氮的吸收利用;到底有多少生物炭固持的氮素是可以被作物利用的;如果将生物炭固持氮替代化肥施用农田,这种外源氮添加方式与传统化肥施用对作物生长是否有显著影响。关于这些涉及实际应用的疑问,仍然十分缺乏试验数据支撑,而这些疑问本身是对回答“生物炭能否成为合适载体实现氮素还田”以及“如何使用生物炭进行氮素再利用”的关键。

作物对养分的吸收与利用很大程度取决于作物根系在土壤中的生长和形态,且作物根系形态与地上部分生物量及养分的累积有着紧密的关系^[18,19]。另一方面,根系形态等特征又是其对土壤环境中养分状况的响应结果^[20]。有研究表明,相比于其他营养元素,氮素对作物根系生长形态的影响最为显著,也较为复杂^[21~23]。较高氮素供应条件下,作物根系及地上部分的生物量均会有所增加,但根冠比会呈现降低趋势,且根系更为纤细^[24];较低氮素供应条件下,当仅达到轻微缺失时,根系长度显著增加,根冠比增加^[25];但是严重缺氮会使整个植株生长受到抑制。由此可见,在考察作物地上部分生长及养分累积的同时结合根系形态及根系部分的养分

累积情况开展研究,能够更好体现作物对土壤环境中氮素的响应,以此为前提评价添加外源氮后土壤供氮能力也会更加准确。

目前,基于生物炭添加对作物根系影响的研究屡见不鲜,多数研究给出了正面的研究结果,如增加根尖数、根系体积、面积及总长等^[26~28]。但是,对作物根系生长的促进作用或出现根冠比的增加,是否有可能源于生物炭添加而带来的对养分供应的限制,并未开展深入探讨^[29];有关生物炭添加对作物地上、地下部分养分供应关系的影响,也十分有限^[30];而将生物炭负载氮作为氮源供给作物生长,研究作物地上、地下部分对不同氮源添加方式的响应,还尚未见报道。

因此,本研究以水稻为目标作物,构建两种生境条件:即不同生境中两种氮源添加方式、同一生境中两种氮源添加方式,分别比较水稻地上、地下部分生长及氮素分配情况对两种氮源添加方式的响应,分析水稻对两种氮源添加方式的利用差异,通过对使用生物炭负载氮替代部分化肥投入进行初探,以期为基于生物炭负载的养分还田提供可行性数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试土壤、作物及生物炭材料

1.1.1 供试土壤

本研究供试土壤取自江苏宜兴市丁蜀镇漳滨村(N 31°18'24", E 119°54'41")。该地区位于长江三角洲太湖流域,属亚热带湿润季风气候,年均温 15.7℃,平均降水 1 100 mm。该区域水稻土多由湖底沉积物发育而成,耕作层深度 18 cm,经历过百年水稻耕作,耕作层土壤基本理化性质如下:有机质 24.80 g·kg⁻¹,总氮 1.79 g·kg⁻¹,总磷 1.62 g·kg⁻¹,硝态氮 17.10 mg·kg⁻¹,铵态氮 23.3 mg·kg⁻¹,Olsen 磷 48.90 mg·kg⁻¹,有效钾 108.8 mg·kg⁻¹,阳离子交换量 13.40 cmol·kg⁻¹,pH 6.65。

1.1.2 供试作物

本研究供试水稻品种为南粳 46 号。该品种由江苏省农业科学院粮食作物研究所杂交选育而成的晚粳,具有株型紧凑,分蘖力强,抗逆性强(耐旱、耐湿)等特点,是供试土壤采集地乃至太湖流域的主要水稻栽种植种之一。

1.1.3 供试生物炭材料

本研究供试生物炭由小麦秸秆 450℃ 厌氧煅烧

而成。煅烧后, 去除表面灰分, 使用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl, $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 轮流浸泡清洗, 再用去离子水清洗多次, 烘干 (80°C) 至恒重, 并过 40 目筛 (0.25 mm), 备用。生物炭材料理化属性如下: 总碳 $503.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、总氮 $12.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、铵态氮 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 $3.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 8.9、比表面积 (BET) $7.37 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.2 生物炭氮素的负载

本研究在前期工作基础上, 选定 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化铵溶液作为负载溶液。为更好确定生物炭负载氮在土壤中的去向, 负载溶液 ^{15}N 标记丰度为 10% 氯化铵药品配置而成。干燥生物炭按照 1 g 生物炭: 100 mL 溶液的配比投放, 搅拌 24 h 后过滤, 风干 48 h 。生物炭上氮素负载量 (以 N 计) 通过使用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液浸提而直接测的, 为 $(3.40 \pm 0.41) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.3 试验设计

本试验于 2017 年 6~8 月在江苏省农业科学院大棚开展。

依据水稻插秧行间距尺寸, 试验使用长 25 cm 、宽 20 cm 、高 20 cm 的 PVC 材质根箱 (用于一穴水稻种植), 且设置分区及不分区两种形式 (底端设有排水孔)。设置 4 个处理: 氮源以氯化铵溶液 (非 ^{15}N 标记氯化铵配制) 形式直接添加 (SN); 氮源以生物炭负载氮形式添加 (BN); 根箱两侧分别使用氯化铵溶液及生物炭负载氮作为氮源添加 (SN vs. BN, 其中 SN vs. BN SN 为使用氯化铵溶液侧, SN vs. BN BN 为使用生物炭负载氮侧); 无氮添加 (CK)。为避免根箱分区不同对试验结果产生差异, 本研究在 SN 及 BN 处理下分别设置分区及不分区两种根箱 (如图 1)。每种根箱及处理条件 3 个重复, 共计 18 个根箱。

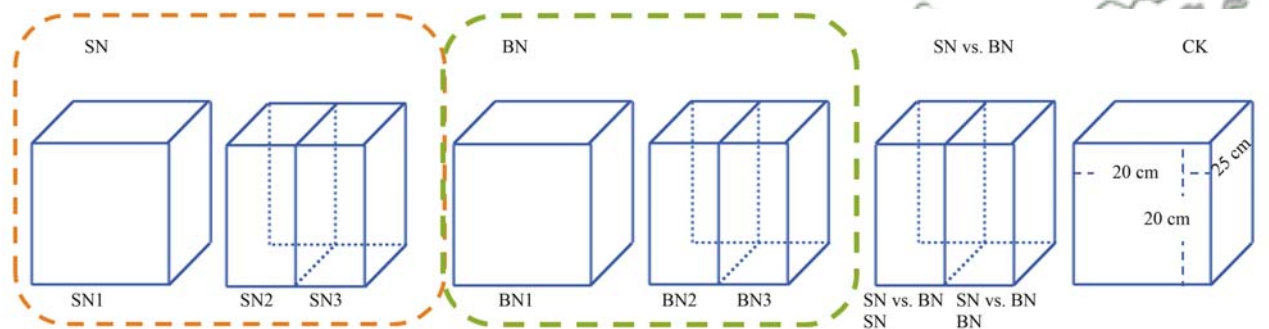


图 1 试验处理及根箱设置

Fig. 1 Design of study treatments and pots

于 2017 年 6 月 20 日向根箱中填放干土 $12 \text{ kg} \cdot \text{pot}^{-1}$ (即 $2400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 分区根箱则两侧各填放 6 kg 干土; 对于以生物炭负载氮形式添加氮源的处理 (或部分), 按照土壤重量 1% 拌入负载氮素的生物炭 (相当于添加氮素 $408 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, 即 $81.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); 对于以氯化铵溶液形式添加氮源的处理 (或部分) 直接添加等量氮素。此后, 多次加入去离子水待土壤完全浸润 (约 3 h), 淹水至距土层 5 cm 高度。填土淹水次日 (2017 年 6 月 21 日), 每个根箱中移栽 1 穴 (含 2~3 株, 偶数根尖数) 水稻幼苗, 用海绵侧向包裹固定。对于分区根箱, 移栽时用少量海绵将每穴根尖平均分之两侧, 侧向包裹固定同上。移栽后 $1 \sim 30 \text{ d}$ 及 $38 \sim 60 \text{ d}$, 每天加水保持水层高度, $31 \sim 37 \text{ d}$ 打开根箱底部排水孔自然落干。移栽 60 d 后 (2017 年 8 月 19 日) 收获。

1.4 样品采集, 测定及相关计算

1.4.1 作物, 土壤, 田面水样品的采集

移栽后第 60 d , 测量田面水高度并搅拌水层,

分别从各个根箱或分区根箱的两侧获取田面水样品。倒扣根箱以取出完整作物植株, 并将作物地上、地下部分分离。地上部分样品的获取以根箱为单位, 擦干捆扎后备用; 作物地下部分样品的获取以分区为单位, 即不分区根箱中的作物地下部分收集为 1 个样品, 分区根箱中作物地下部分按分区进行收集为 2 个样品。分离黏附在作物地下部分的大块土壤后, 将每个地下部分样品分别套在 100 目的筛网袋中, 浸泡 12 h , 冲洗至根系表面无可见土壤颗粒, 使用镊子将根系进行分离并浸泡在去离子水中备用。收集筛网袋中散落的土壤, 作为根系土壤样品; 同时收集根箱各分区的剩余土壤, 作为非根系土壤样品。

1.4.2 根系形态

使用扫描仪 (Epson1680) 及根系分析程序 (WinRhizo Pro 2012) 对洗净的根系样品进行扫描和分析后, 得到总根长, 根表面积, 根体积及平均直径等相关根系形态指标。在此基础上, 根据根直径

大小, 将总根长, 根表面积, 根体积的数据进行分类, 分为不定根 ($D > 0.3 \text{ mm}$)、粗分枝根 ($0.1 \text{ mm} < D \leq 0.3 \text{ mm}$)、细分枝根 ($D \leq 0.1 \text{ mm}$)。

1.4.3 作物生物量, 氮累积量及氮素利用率

作物地上部分及扫描过根系的地下部分样品, 在 105°C 的烘箱中放置 30 min 进行杀青, 然后转入 80°C 环境下烘干至恒重 (约 24 h)。作物地上、地下部分分别称重, 按照 $1 \text{ 穴} \cdot \text{pot}^{-1}$, $200\,000 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 折算后, 记作地上、地下部分干物质重 (DMA 和 DMU, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; CK 处理为 DMA_0 和 DMU_0 , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。研磨过 100 目筛后, 用凯氏定氮仪 (Foss Scino KT260, China) 分别测定其氮素含量 (CNA 和 CNU, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; CK 处理为 CNA_0 和 CNU_0 , $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)。氮施用量 (NAR, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 为 $81.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

作物地上部分氮累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$\text{PNA} = \text{DMA}(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{CNA}(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}) \quad (1)$$

CK 处理地上部分氮累积量为 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$\text{PNA}_0 = \text{DMA}_0(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{CNA}_0(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}) \quad (2)$$

作物地下部分氮累积量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$\text{PNU} = \text{DMU}(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{CNU}(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}) \quad (3)$$

CK 处理地下部分氮累积量为 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$\text{PNU}_0 = \text{DMU}_0(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{CNU}_0(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}) \quad (4)$$

$$\text{氮素利用率} = (\text{PNA} + \text{PNU} - \text{PNA}_0 - \text{PNU}_0) (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \div \text{NAR} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 100\% \quad (5)$$

1.4.4 根系土壤及非根系土壤矿质态氮及有机态氮含量

土壤样品按根系及非根系样品分类后, 按照溶液: 鲜土 ($10 \text{ mL} : 1 \text{ g}$) 比例 ($R, \text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$, $R = 10$) 使用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸泡, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 往复振荡 1 h , 静置后过滤。滤液经流动分析仪 (Skalar Corp., Netherlands) 测得其中矿质态氮含量 (CMN, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。鲜土风干, 测得含水率 ($M, \%$)。根系及非根系鲜土重量分别为 m 及 $(2\,400 - m)$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

$$\text{土壤矿质态氮量} (\text{MN}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{CMN} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times R (\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}) \times (1 - M) (\%) \times m (\text{或} 2\,400 - m) (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \div 1\,000\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (6)$$

KCl 浸提后的土壤使用去离子水浸泡冲洗多次, 晾干研磨过 100 目, 使用元素分析仪 (Flash EA 1112 series; Thermo Finnigan, USA) 测定其中有机态氮含量 (CON, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

$$\text{土壤有机态氮量} (\text{ON}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{CMN} (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) \times (1 - M) (\%) \times m (\text{或} 2\,400 - m) (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \div 1\,000\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (7)$$

1.4.5 田面水总氮量

田面水高度 (h, m), 田面水样品过滤后, 滤液经流动分析仪 (Skalar Corp., Netherlands) 测得其中田面水氮含量 (CWN, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

田面水总氮量 (WN, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) =

$$\text{CWN} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times 1\,000 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3} \times 10\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \times h \div 1\,000\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (8)$$

1.4.6 ^{15}N 丰度、 ^{15}N 去向及回收率

土壤样品的 KCl 浸提液以及田面水经凯式定氮仪 (Foss Scino KT260, China) 消煮后, 过量滴酸至浅粉红色, 放置烘箱 70°C 蒸干至结晶, 收集晶体并研磨成粉末备用^[31]。使用同位素质谱计 (MAT-251, USA, with analytic error $\pm 0.02\%$) 分别测定粉末状液体结晶、浸提后土壤样品 (1.4.3 节) 及植株样品 (1.4.3 节) 的 ^{15}N 丰度, 记作 ^{15}N 在土壤矿质态氮, 土壤有机态氮, 田面水及植株 (地上、地下部分) 中的氮丰度 ($A_{\text{ms}}, A_{\text{os}}, A_{\text{w}}, A_{\text{pa}}, A_{\text{pu}}, \%$)。 ^{15}N 自然丰度取 0.368% , 负载用 ^{15}N 氯化铵丰度为 10% 。

$$\begin{aligned} \text{土壤 (矿质态及有机态)}^{15}\text{N} \text{ 量} (\text{S}^{15}\text{N}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \\ = \text{MN} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times (A_{\text{ms}} - 0.368\%) (\%) + \\ \text{ON} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times (A_{\text{os}} - 0.368\%) (\%) \div 10\% \quad (9) \\ \text{植株 (地上、地下部分)}^{15}\text{N} \text{ 量} (\text{P}^{15}\text{N}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \\ = \text{PNA} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times (A_{\text{pa}} - 0.368\%) (\%) + \\ \text{PNU} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times (A_{\text{pu}} - 0.368\%) (\%) \div 10\% \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{田面水}^{15}\text{N} \text{ 量} (\text{W}^{15}\text{N}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{WN} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times (A_{\text{w}} - 0.368\%) (\%) \div 10\% \quad (11)$$

$$\begin{aligned} ^{15}\text{N} \text{ 回收率} (R_e, \%) = [\text{S}^{15}\text{N} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) + \\ \text{P}^{15}\text{N} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) + \text{W}^{15}\text{N} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})] \div \\ 81.60 (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 100\% \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{损失 (即未找到)}^{15}\text{N} \text{ 量} (\text{L}^{15}\text{N}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \\ = 81.60 (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times (1 - R_e) (\%) \quad (13) \end{aligned}$$

1.5 数据处理

本研究中土壤, 植株及田面水数据均来源于移栽 60 d 后的采样, 数据统计以 hm^2 为计算单位。对分区根箱而言, 样品的相关氮量计算进行换算统一到完整根箱体系, 再按照 $1 \text{ 穴} \cdot \text{pot}^{-1}$, $200\,000 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 折算到 hm^2 。采用 SPSS (SPSS ver. 16.0 for Windows, SPSS Inc., USA) 中 Duncan 法对 SN, BN

及 CK 处理的数据进行差异显著性分析 (ANOVA, $P < 0.05$), T 检验对 SN vs. BN 处理的两侧样品进行比较分析 ($P < 0.05$), Pearson 法分析作物生物量及氮累积量与根系及土壤环境氮含量间的相关性; 采用 Microsoft Excel 软件对数据进行统计、制图。

2 结果与分析

2.1 两种根箱形式对作物地上、地下部分生物量及氮累积量的影响

分区根箱是本研究实现作物对同一生境中两种氮源添加方式利用偏好研究的必要手段, 若根箱分区带来了显著的系统差异则会造成两种生境

条件下结果的不可比。分别比较 SN 及 BN 在两种根箱(两种生境)条件下水稻生长情况, 结果显示(图 2): 根箱分区与否(SN1 vs. SN2/3 及 BN1 vs. BN2/3)对水稻地上部分生物量[图 2(a)]及氮累积量[图 2(c)]无显著影响; 分区后在两侧同样处理条件下, 两侧(SN2 vs. SN3 及 BN2 vs. BN3)水稻地下部分生物量[图 2(b)]及氮累积量[图 2(d)]无显著差异, 且是否分区对水稻地下部分生长情况无显著影响。因此, 本研究将使用两种根箱形式的 SN 及 BN 处理分别视为同一处理, 则 SN 及 BN 处理各 6 个重复, SN vs. BN 及 CK 处理各 3 个重复。

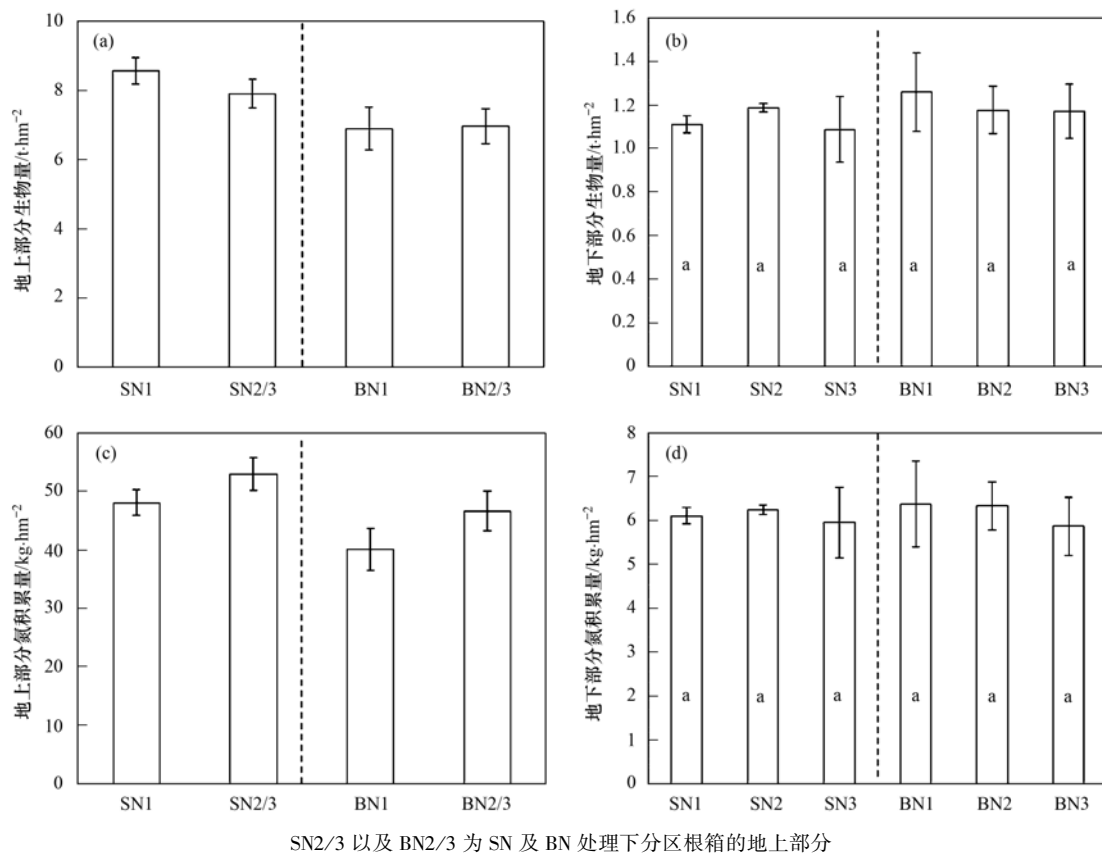


图 2 水稻在两个根箱条件下生物量及氮累积量

Fig. 2 Amount of paddy dry matter and nitrogen assimilation in partitioned and non-partitioned pot conditions

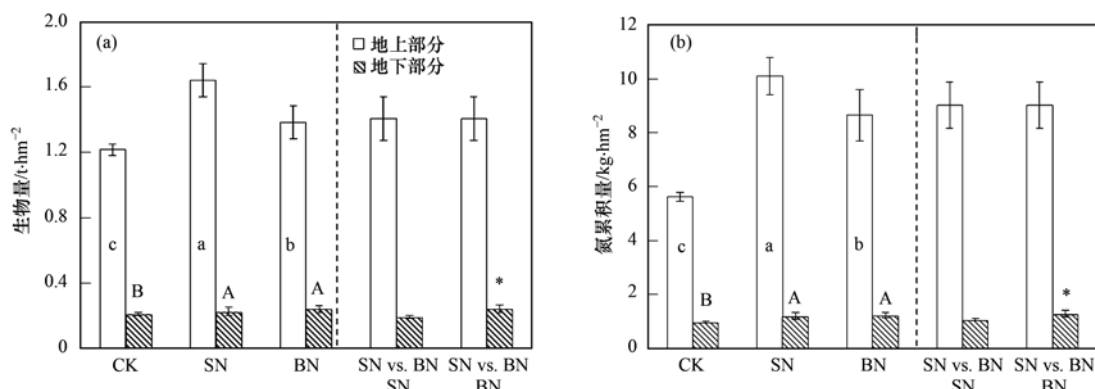
2.2 两种氮源添加方式对作物生物量及氮积累的影响

不同生境中, 生物炭负载氮添加(BN 处理)较溶液氮添加方式(SN 处理)显著降低了水稻地上部分生物量及氮累积 16% 及 14%, 而地下部分生物量却未因氮源添加方式不同而产生显著差异(图 3)。而在同一生境中, 地下部分的差异显著, 生物炭负载氮添加的一侧(SN vs. BN BN), 根系生物量及氮累积分别显著高于溶液氮添加的另一侧(SN

vs. BN SN) 的 27% 及 20%。

生物炭负载氮添加在两种生境条件下均增加水稻生物量的根冠比 25% ~ 27%, 达显著水平, 且生物炭负载氮添加条件下生物量的根冠比数值与不添加外源氮处理(CK 处理)相近(图 4)。但两种氮源添加方式并未对水稻氮累积量的根冠比产生显著影响。

生物炭负载氮添加方式降低了(BN 处理较 SN 处理)水稻对外源氮 36% 的利用效率(图 5), 但在两种氮源共存时(SN vs. BN 处理较 SN 处理)水稻



对 CK、SN 及 BN 处理的水稻地上及地下部分分别进行统计分析, 同一字母表示统计学差异不显著; 其中地上部分相关数据的统计结果由小写字母表示, 地下部分相关数据的统计结果由大写字母表示; 对 SN vs. BN 处理两侧的水稻地下部分相关数据采用 *T* 检验进行分析, 若存在显著差异则标注“*”, 下同

图 3 两种氮源添加方式下水稻生物量及氮素积累量

Fig. 3 Amount of paddy dry matter and nitrogen uptake in the two nitrogen application methods

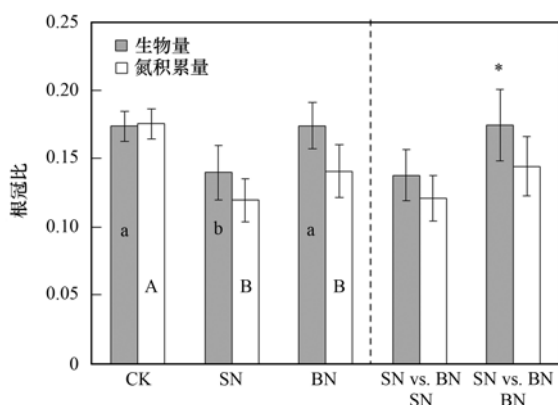


图 4 水稻生物量及氮素积累量的根冠比

Fig. 4 Root-shoot ratio in dry matter and the amount of nitrogen uptake in the paddy

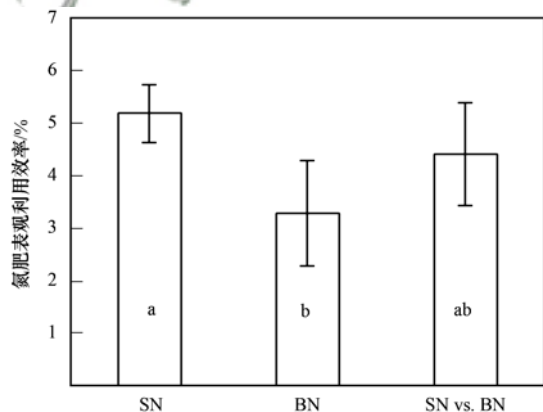


图 5 氮肥表观利用效率

Fig. 5 Nitrogen recovery use efficiency

氮利用效率并未受到显著影响。

2.3 两种氮源添加方式对作物根系形态及活力的影响

通过根系扫描及软件分析发现, 不同生境中, 氮源添加方式的改变影响了水稻的根长、根表面积

及体积; 而同一生境中, 氮源添加方式进一步影响了水稻根数 (表 1)。氮源添加方式对水稻根系的平均直径并无显著影响。参照顾东祥^[32] 等的方法 (不定根 $D > 0.3 \text{ mm}$ 、粗分枝根 $0.1 \text{ mm} < D \leq 0.3 \text{ mm}$ 、细分枝根 $D \leq 0.1 \text{ mm}$), 以水稻根直径的粗细对其进行分类及分析。数据显示, 生物炭负载氮添加在不同生境中显著提高了不定根的根系长度, 在同一生境中显著提高了细分枝根、粗分枝根及不定根的根系长度。生物炭负载氮添加方式对根表面积的影响在两种生境条件下均是通过提高不定根的根表面积而实现的。不同生境中, 生物炭负载氮添加方式显著增加了细分枝根及不定根的根体积; 而同一生境中, 仅显著增加了不定根的根体积。同一生境中, 生物炭负载氮添加方式显著增加了粗细分枝根的数目, 以此显著增加了整体根数。对根尖样品分析显示, 生物炭负载氮添加在两种生境条件下均显著提高了根系活力。

2.4 两种氮源添加方式对土壤矿质态氮含量的影响

水稻为喜铵作物, 且耕作条件长期淹水厌氧, 土壤矿质态氮以铵态氮为主要形态。根系土中硝态氮含量显著高于非根系土壤, 而铵态氮含量在添加外源氮条件下与之相反 (图 6)。

对根系土而言, 溶液氮添加方式较生物炭负载氮添加显著提高了土壤硝态氮含量 55% ~ 58%, 但非根系土壤硝态氮含量差异不显著 [图 6(a)]。而生物炭负载氮添加方式较溶液氮添加显著提高土壤 (根系土以及非根系土) 铵态氮含量 48% ~ 53%。氮源添加方式对土壤矿质态氮含量的影响在两种生境条件下结果一致。

表 1 水稻根系形态及根系活力¹⁾

Table 1 Root morphology and root activity in the paddy						
项目	类别	CK	SN	BC	SN vs. BN SN	SN vs. BN BN
根长 × 10 ⁶ /m·hm ⁻²	总和	12.44a	9.00b	13.00a	8.61	13.91 *
	细分枝根	5.61a	4.81a	5.63a	3.67	5.67 *
	粗分枝根	1.87a	1.44a	1.85a	1.58	3.36 *
	不定根	4.97a	2.75b	5.52a	3.37	4.88 *
表面积/hm ² ·hm ⁻²	总和	0.60a	0.43b	0.61a	0.43	0.68 *
	细分枝根	0.05a	0.05a	0.04a	0.03	0.05
	粗分枝根	0.06a	0.07a	0.06a	0.05	0.10
	不定根	0.49a	0.31b	0.51a	0.35	0.53 *
体积/m ³ ·hm ⁻²	总和	0.48ab	0.35b	0.70a	0.23	0.53 *
	细分枝根	0.01a	0.00b	0.01a	0.00	0.00
	粗分枝根	0.02a	0.02a	0.03a	0.01	0.02
	不定根	0.45a	0.33b	0.66a	0.22	0.51 *
根尖数 × 10 ⁹ /hm ²	总和	1.24a	1.08a	1.06a	0.90	1.29 *
	细分枝根	5.93a	5.06b	4.87ab	4.20	5.98 *
	粗分枝根	0.04a	0.04a	0.05a	0.04	0.06 *
	不定根	0.01a	0.01a	0.02a	0.01	0.02
平均直径/mm		0.31a	0.31a	0.32a	0.32	0.31
根系活力/μg·(g·h) ⁻¹		261.79a	127.19b	241.84a	170.17	243.70 *

1) 对 CK、SN 及 BN 处理的各项根系指标进行统计分析,小写字母表示横向各处理间的统计学分析结果,同一字母表示统计学差异不显著;对 SN vs. BN 处理两侧的水稻地下部分相关数据采用 T 检验进行分析,若存在显著差异则标注“*”

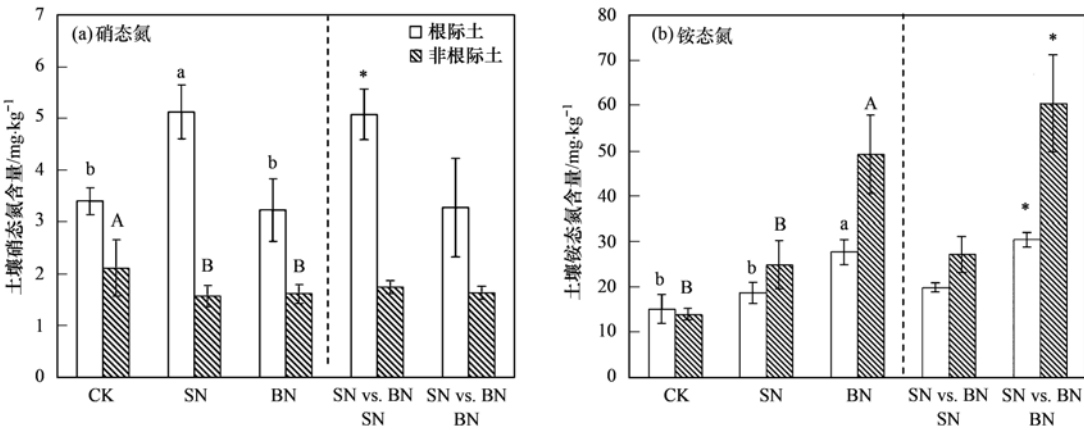


图 6 土壤硝态氮及铵态氮含量

Fig. 6 Soil nitrate and ammonium nitrogen content

2.5 生物炭负载氮的回收

以生物炭负载添加氮素的 57% ~ 62% 在移栽 60 d 后仍然留在土壤中,作物仅吸收了不足 10% 的量,少于 1% 留存在田面水中,其余 31% ~ 35% 未在盆栽系统中寻回. 本试验盆栽放置在大棚环境,不受降雨影响且无径流产生,因此未找到¹⁵N 部分

被认为以渗漏或者气态形式发生了损失. 比较两种生境条件下从土壤、作物及田面水找回的¹⁵N 量(表 2),发现单侧生物炭负载氮添加方式(SN vs. BN BN)较单一生物炭负载氮添加方式(BN)有提高土壤留存¹⁵N 量及降低物吸收量的趋势,但未达到显著水平.

表 2 生物炭负载¹⁵N 的去向¹⁾

Table 2 Fate of ¹⁵ N adsorbed by biochar					未找到 ¹⁵ N ²⁾
项目	找到 ¹⁵ N			回收率	
	土壤中 /mg·pot ⁻¹	作物中 /mg·pot ⁻¹	田面水中 /mg·pot ⁻¹	/%	损失 /mg·pot ⁻¹
BN	46.35	5.74	0.64	64.62	28.87
SN vs. BN BN	50.60	5.30	0.56	69.20	25.14

1) BN, n = 6; SN vs. BN BN, n = 3; 2) 未在土壤-作物及田面水中找到的¹⁵N 被认定为损失,即进入外环境

3 讨论

考虑氮添加量仅为 $81.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，并不足以供给水稻完成其整个生育期的生长。以整个生育期 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量计算，氮添加量仅为整个生长期氮投入量的 40% 左右。此外，已有研究发现水稻拔节期根系形状与产量及氮利用率显著相关，且相关性高于收获期^[32, 33]。为避免因氮素缺乏而带来水稻生长的误差，更真实反映水稻正常生长时两种氮源添加方式产生的影响，本试验将水稻的生长终止在移栽后 60 d。

3.1 土壤矿质态氮含量及作物地下部分生长对作物地上部分生长的影响

水稻根系是作物汲取养分的主要器官，其形态与环境尤其是土壤环境中养分的含量息息相关^[21, 22]。相关性分析发现(表 3)，本研究中土壤(根际土及非根际土)矿质态氮含量与水稻地下部分生物量 ($0.57 \sim 0.58$, $P < 0.05$) 及氮累积量 ($0.62 \sim 0.63$, $P < 0.05$) 呈显著正相关，而与地上部分生长并不显著。

作物地下部分在供给地上部分养分的同时，也因为自身生长与地上部分发生养分分配。若环境养

分存在欠缺(程度较轻)，作物为更多汲取环境中的养分会增加地下与地上部分生物量的比例；而养分充足时，地上及地下部分会出现同步增长^[20, 23]。本研究中，地上部分氮累积量与地下部分氮累积量呈显著正相关关系 (0.54 , $P < 0.05$)，说明本研究养分供应是相对充足的。

另一方面，地下部分生物量主要由根系的体积 (0.67 , $P < 0.01$) 及根长 (0.57 , $P < 0.05$) 决定，与根尖数、根表面积及平均直径无显著相关性；而地上部分氮累积量与根尖数呈显著负相关 (0.51 , $P < 0.05$)。有研究发现，富余养分供应条件下，地上部分生长促进的同时，作物根系会出现根尖数量增加且根系偏细的现象^[24, 25]。而本研究中根尖数量与地上部分氮累积量负相关，而根系直径与地上部分生长未发现显著相关，说明试验条件下的养分供应未达到过剩水平。

相比于土壤矿质态氮含量正相关的水稻地下部分，本研究中水稻地上部分的生长对土壤矿质态氮含量的变化未有显著响应，这一现象说明，水稻根系对土壤中氮素敏感性更高，且本试验条件对作物的氮供应处于适当范围，各处理均未对水稻地上部分生长产生明显影响。

表 3 作物地上地下部分生长、根系形态及土壤氮含量的相关性分析¹⁾
Table 3 Correlation analysis among the conditions of paddy growth (aboveground and underground parts), root morphology and soil mineral nitrogen content

	地上部分生物量	地上部分氮累积量	地下部分生物量	地下部分氮累积量
地下部分生物量	-0.01	0.13	—	—
地下部分氮累积量	0.33	0.54 *	0.86 **	—
根长	-0.31	-0.26	0.57 *	0.25
根表面积	-0.34	-0.32	0.46	0.22
根体积	-0.09	-0.19	0.67 **	0.35
根尖数	-0.20	-0.51 *	0.33	0.06
根平均直径	0.04	-0.10	-0.01	0.02
非根际土矿质态氮含量	0.17	0.45	0.58 *	0.63 *
根际土矿质态氮含量	0.31	0.48	0.57 *	0.62 *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.2 生物炭负载氮添加对作物生长及氮利用的影响

生物炭负载氮添加方式(两种生境条件下, BN 以及 SN vs. BN BN)在氮施用及水稻移栽 60 d 后仍然保持了土壤(根系土及非根系土)较高的铵态氮含量(图 6)，却减少了作物(图 3，尤其是地上部分)的生物量及氮累积，甚至在不同生境中显著降低了作物氮利用率(图 5, BN 处理)，不难推测，生物炭负载氮进入土壤环境后，确实发生了因生物炭较强吸附作用而一定程度限制作物对氮吸收利用的现象。同一生境中，图 6 生物炭负载氮添加的一侧

根长、根表面积、根体积及根尖数的显著增加(表 1)，与此前比较生物炭添加对作物根系影响的研究结果基本一致^[27, 29]。本研究中根系生长及形态差异可视作水稻根系为获取更多养分，因外源氮添加方式不同而作出的响应。由此可见，将生物炭负载氮完全替代化学肥料施用农田中，会一定程度影响作物对氮的吸收利用。

同一生境中生物炭负载氮添加的一侧水稻地下部分生物量及氮累积量同步增加(图 2)，且两侧不同氮添加方式处理(SN vs. BN 处理)的水稻地上部

分氮累积量[图 1(b)]及氮利用效率(图 5)未与溶液氮添加方式(SN 处理)有显著差异,说明在生物炭负载氮及溶液氮共存的情况下,作物氮利用并不会受到显著影响。此外,本研究对比两种生境条件下作物对负载氮(^{15}N)的吸收量,也未发现显著差异(表 2)。这意味着,即使在一侧根系处于溶液氮添加条件时(SN vs. BN SN),作物也并未减弱对另一侧(SN vs. BN SN)生物炭负载氮的吸收利用,生物炭负载的氮生物有效性并不低;同时,超过一半原本生物炭负载的氮发现留存在土壤中可成为下一季作物生长的养分来源,确实达到了养分迁移存储的目的。

因此,利用生物炭作为氮素载体、构建富营养水体及农田养分回用枢纽具可行性,但生物炭负载氮素不可全量替代化学肥料作为外源氮投入,寻找适宜添加比例可以在实现养分回用同时减少氮素流失风险,双向削减农田系统的面源污染。

4 结论

(1)通过在两种生境条件下比较两种氮源添加方式对水稻生长的影响,发现溶液氮添加方式更有利于水稻地上部分生物量及氮累积;生物炭负载氮的添加方式显著增加了水稻根冠生物量比值。

(2)将生物炭负载氮完全替代化学肥料施用农田中,会因生物炭对氮的吸附作用而影响水稻生物量及氮累积,但是在两种添加方式共存的情况下,水稻并不会对某种氮呈现吸收利用偏好,且氮利用率未受到显著影响。

(3)综上所述,生物炭可以作为载体实现水体到农田的氮素迁移,以适宜比例与普通化学肥料共同施用并不会对作物氮素利用产生不良影响并可增加土壤矿质态氮固持量。

参考文献:

- [1] Le C, Zha Y, Li Y, *et al.* Eutrophication of lake waters in China: cost, causes, and control [J]. *Environmental Management*, 2010, **45**(4): 662-668.
- [2] 朱兆良, Norse D, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
Zhu Z L, Norse D, Sun B. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qgtjgb/qgqtjgb/201002/t20100211_30641.html, 2010-02-11.
- [4] Chen J. Rapid urbanization in China: a real challenge to soil protection and food security[J]. *Catena*, 2007, **69**(1): 1-15.
- [5] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. *水资源保护*, 2010, **26**(3): 87-90.
Zhang H J, Chen F. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(3): 87-90.
- [6] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. *中国水利*, 2004, (20): 29-30.
Yang L Z, Wang D J, Xia L Z. Features and ways of control of non-point agricultural pollution in Taihu Area[J]. *China Water Resources*, 2004, (20): 29-30.
- [7] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(1): 1-8.
Yang L Z, Shi W M, Xue L H, *et al.* Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: general countermeasures and technologies [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(1): 1-8.
- [8] 薛利红, 何世颖, 段婧婧, 等. 基于养分回用-化肥替代的农业面源污染氮负荷削减策略及技术[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(7): 1226-1231.
Xue L H, He S Y, Duan J J, *et al.* Agricultural non-point source pollution nitrogen load reduction strategy and technology of nutrient reusing in agricultural fields to replace fertilizer [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, **36**(7): 1226-1231.
- [9] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田氮素损失特征及环境效应分析[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(6): 1149-1154.
Zhao D, Yan T M, Qiao J, *et al.* Characteristics of N loss and environmental effect of paddy field in Taihu area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(6): 1149-1154.
- [10] Wang X Z, Zhu J G, Gao R, *et al.* Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotations with coated urea and urea in the Taihu Lake region[J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(1): 62-69.
- [11] 薛利红, 俞映倬, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1133-1138.
Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1133-1138.
- [12] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. *Plant and Soil*, 2010, **337**(1-2): 1-18.
- [13] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science and technology[M]. London: Science and Technology, 2009.
- [14] Yao Y, Gao B, Zhang M, *et al.* Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1467-1471.
- [15] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, *et al.* Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **213**(1-4): 47-55.
- [16] Hale S E, Alling V, Martinsen V, *et al.* The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(11): 1612-1619.

- [17] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, *et al.* Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. *Plant and Soil*, 2012, **350** (1-2): 57-69.
- [18] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系[J]. *华南农业大学学报*, 2005, **26**(2): 1-4.
Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between root system of rice and aboveground characteristics and yield[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2005, **26**(2): 1-4.
- [19] 魏海燕, 张洪程, 张胜飞, 等. 不同氮利用效率水稻基因型的根系形态与生理指标的研究[J]. *作物学报*, 2008, **34** (3): 429-436.
Wei H Y, Zhang H C, Zhang S F, *et al.* Root morphological and physiological characteristics in rice genotypes with different n use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, **34**(3): 429-436.
- [20] 凌启鸿, 张国平, 朱庆森, 等. 水稻根系对水分和养分的反应[J]. *江苏农学院学报*, 1990, **11**(1): 23-28.
Ling Q H, Zhang G P, Zhu Q X, *et al.* Responses of root system of rice to water and nutrients[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural college*, 1990, **11**(1): 23-28.
- [21] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, **47**(1): 1255-1263.
- [22] Wang Y, Mi G H, Chen F J, *et al.* Response of Root Morphology to Nitrate supply and its contribution to nitrogen accumulation in Maize[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, **27** (12): 2189-2202.
- [23] 樊剑波, 张亚丽, 万小羽, 等. 水稻根系与氮素吸收利用之研究进展[J]. *中国农学通报*, 2007, **23**(2): 236-240.
Fan J B, Zhang Y L, Wan X Y, *et al.* Progress in research of rice root related to nitrogen uptake and utilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, **23**(2): 236-240.
- [24] 张亚洁, 华晶晶, 黄银琪, 等. 旱、水稻根系生长对水氮响应的研究[J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(11): 55-59.
Zhang Y J, Hua J J, Huang Y Q, *et al.* Study on response of root growth of upland rice and paddy rice to water and nitrogen[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(11): 55-59.
- [25] 孙虎威, 王文亮, 刘尚俊, 等. 低氮胁迫下水稻根系的发生及生长素的响应[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(5): 1096-1102.
Sun H W, Wang W L, Liu S J, *et al.* Formation of rice root regulated by nitrogen deficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(5): 1096-1102.
- [26] Prendergast M T, Duvall M, Sohi S P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 173-185.
- [27] 张伟明, 孟军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, **39**(8): 1445-1451.
Zhang W M, Meng J, Wang J Y, *et al.* Effect of biochar on root morphological and physiological characteristics and yield in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, **39**(8): 1445-1451.
- [28] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(12): 119-124.
Li Z Y, Qi X B, Fan X Y, *et al.* Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(12): 119-124.
- [29] Yang L, Liao F, Huang M, *et al.* Biochar improves sugarcane seedling root and soil properties under a pot experiment[J]. *Sugar Tech*, 2015, **17**(1): 36-40.
- [30] Wang H F, Zheng H, Jiang Z X, *et al.* Efficacies of biochar and biochar-based amendment on vegetable yield and nitrogen utilization in four consecutive planting seasons[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **593-594**: 124-133.
- [31] Zhang J B, Cai Z C, Cheng Y, *et al.* Denitrification and total nitrogen gas production from forest soils of Eastern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(12): 2551-2557.
- [32] 顾东祥, 汤亮, 徐其军, 等. 水氮处理下不同品种水稻根系生长分布特征[J]. *植物生态学报*, 2011, **35**(5): 558-566.
Gu D X, Tang L, Xu Q J, *et al.* Root growth and distribution in rice cultivars as affected by nitrogen and water supply[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(5): 558-566.
- [33] 李娜, 杨志远, 代邹, 等. 水氮管理对不同氮效率水稻根系性状、氮素吸收利用及产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2017, **31**(5): 500-512.
Li N, Yang Z Y, Dai Z, *et al.* Effects of water-nitrogen management on root traits, nitrogen accumulation and utilization and grain yield in rice with different nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, **31**(5): 500-512.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)