ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵
双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第4期
2017年4月15日

目 次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 …… 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖,潘月鹏,刘学军(1279)
兰州春夏季 PM_{10} 碳组分昼夜变化特征与来源分析 …… 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 …… 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)
2015年北京城区大气 $PM_{2.5}$ 中 NH_4^+、NO_3^-、SO_4^{2-} 及前体气体的污染特征 ……
…… 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常淼(1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 …… 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 …… 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张扬,庄国强(1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 …… 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)
过渡金属掺杂对镧锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 …… 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)
南水北调中线北京段水质状况分析 …… 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李淼,果钊(1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 …… 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 …… 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 …… 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元(1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 …… 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 …… 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 …… 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 …… 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 ……
…… 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 ……
…… 边博,周燕,张琴(1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 …… 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 ……
…… 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 …… 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 …… 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)
g-C_3N_4 协同光催化还原 Cr(Ⅵ)及氧化磺基水杨酸 …… 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 …… 范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意(1490)
3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 …… 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 …… 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 …… 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)
分散染料 neocron black(NB)的生物降解特性 …… 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 …… 南亚萍,周国标,袁林江(1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 …… 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 …… 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 …… 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)
矿化垃圾中Fe(Ⅲ)还原耦合 CH_4 厌氧去除特性 …… 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)
应用铅锶同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 ……
…… 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 …… 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 …… 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 …… 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕豳,汤蜜(1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 ……
…… 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 …… 陈珊,丁咸庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 ……
…… 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)
淹水水稻土消耗 N_2O 能力及机制 …… 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 …… 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响 …… 杨雨浛,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 ……
…… 迟荪琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 …… 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 …… 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 …… 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集汞的影响 …… 孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇(1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析 …… 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)
16S rRNA高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 …… 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 …… 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 …… 容跃(1726)
《环境科学》征稿简则(1505)　《环境科学》征订启事(1682)　信息(1339, 1459, 1612)

第38卷第4期
2017年4月

环 境 科 学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

Vol. 38, No. 4
Apr. , 2017

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响

陈珊[1,2], 丁咸庆[1,2], 祝贞科[2], 王娟[2], 彭佩钦[1*], 葛体达[2], 吴金水[2]

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 秸秆还田是农业生产上提高土壤肥力的重要措施, 而秸秆中较高的碳氮比, 使秸秆碳的利用率较低, 温室气体排放较高, 因此配施无机氮磷肥能够调控土壤中元素计量比, 增加微生物活性和元素利用率, 促进土壤肥力提升. 本研究选择在模拟秸秆还田条件下, 添加^{15}N标记的无机氮肥, 研究不同养分肥料添加对土壤中外源氮转化与分配的影响, 以及微生物响应特征. 结果表明, 秸秆添加增加了土壤和土壤溶液中铵态氮和总氮含量; 秸秆与无机氮肥配施条件下, 土壤中^{15}N-TN在100 d培养时期内基本保持在28 ~33 μg, ^{15}N-NH$_4^+$在前30 d培养时期内逐渐增加, 而后逐渐降低; 施P增加了土壤中^{15}N-TN和^{15}N-NH$_4^+$的含量, 却使土壤溶液中^{15}N量降低了28%. 无机氮肥在土壤中的分配表明, ^{15}N在土壤中的比例基本保持在52% ~61%, 磷肥的添加使^{15}N在土壤中的分配比例最大提高了16.5%, 而土壤溶液中^{15}N的比例由第5 d的36%降低至100 d时30%, 使外源^{15}N损失量减少了1.2倍. 秸秆添加促进了微生物活性, 显著提高了土壤MBN的量; 而无机肥料的添加进一步促进了土壤微生物的活性, 100 d培养实验后, 秸秆与无机氮、磷肥同时添加使MBN增加到对照处理的2.0和2.2倍. 磷肥添加促进了微生物对^{15}N的利用, 使^{15}N-微生物生物量氮(^{15}N-MBN)的量比添加秸秆和氮肥处理的提高了1.5倍. 对土壤氮转化酶活性(β-1,4-N-乙酰葡糖糖氨糖苷酶, NAG)的研究结果表明, 氮肥降低了土壤酶活性和底物亲和性, 而氮磷肥同时添加时, 酶活性较单加秸秆处理提高了48.1%. 本研究可为深入了解稻田土壤生态系统氮循环、实现农田土壤肥力提升和温室气体减排提供理论依据.

关键词: 氮素; 微生物; 转化; ^{15}N示踪; 酶活性

中图分类号: X171.1　**文献标识码**: A　**文章编号**: 0250-3301(2017)04-1613-09　**DOI**: 10.13227/j.hjkx.201609219

Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil

CHEN Shan[1,2], DING Xian-qing[1,2], ZHU Zhen-ke[2], WANG Juan[2], PENG Pei-qin[1*], GE Ti-da[2], WU Jin-shui[2]

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: Returning straw to the field provides an important source of fertilizer that can increase soil fertility. However, the rate of straw carbon utilization is low and large amounts of greenhouse gases are emitted due to the high carbon to nitrogen ratio of the straw mass. In this regard, the application of inorganic nitrogen and phosphate fertilizers can control the ratio of elements in the soil, increase the activity of microorganisms and their utilization of elements, and promote the improvement of soil fertility. In this study, straw application conditions were simulated, and inorganic nitrogen fertilizer labeled with ^{15}N was added to examine the effects of different nutrient fertilizer additions on the transformation and distribution of exogenous nitrogen in the soil, and also the characteristics of the microbial response. The results showed that application of straw increased the contents of ammonia nitrogen and total nitrogen in the soil and soil solution. When both straw and inorganic nitrogen fertilizer were applied, the ^{15}N-TN in the soil remained at 28 to 33 μg during the 100-day culture phase. In contrast, ^{15}N-NH$_4^+$ increased gradually during the initial 30 days of the culture phase, but subsequently decreased gradually. Application of phosphate increased the contents of ^{15}N-TN and ^{15}N-NH$_4^+$ in the soil, but decreased the content of ^{15}N in the soil solution by 28%. The distribution of inorganic nitrogen in the soil showed that the proportion of ^{15}N in the soil remained at 52%-61%. Addition of phosphate fertilizer increased the distribution ratio of ^{15}N in the soil by up to 16.5%, whereas the proportion of ^{15}N in the soil solution decreased from 36% on the fifth day to 30% on the 100th day, thereby the loss amount of ^{15}N reduced by 1.2-fold. Addition of straw promoted microbial activity and significantly increased the microbial biomass nitrogen (MBN) content of the soil. Addition of inorganic fertilizer further promoted the microbial activity of the soil. After the 100-day culture experiment, the addition of straw, inorganic nitrogen, and phosphate fertilizer increased MBN to between 2.0-fold and 2.2-fold that of the control treatments. Addition of phosphate fertilizer increased the utilization of ^{15}N by microorganisms, so that the amount of ^{15}N-MBN was 1.5-fold higher than that of treatments where only straw and nitrogen fertilizer were added. Examination of soil enzyme activity showed that

---

收稿日期: 2016-09-27; **修订日期**: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470629, 41501321); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ3132); 政府间国际科技创新合作重点专项(S2016G0053)

作者简介: 陈珊(1991 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态, E-mail: gtd@isa.ac.cn

* 通信作者, E-mail: pqpeng123@sina.com

nitrogen fertilizer reduced soil enzyme activity and substrate affinity. When both nitrogen and phosphate fertilizers were added, the enzyme activity was 48.1% higher than that when only straw was added. The findings of this study thus provide a theoretical basis for furthering our understanding on the nitrogen cycle of the paddy soil ecosystem, the improvement of soil fertility, and the reduction of greenhouse gas emissions.

Key words: nitrogen; microbe; transformations; ^{15}N tracing; enzyme activity

氮素是农业生产中重要的产量限制因子,施用氮肥是作物获得高产的重要措施. 我国稻田氮肥施用量占世界水稻氮肥总消耗量的37%[1],从1990～2010年,肥料的施用使我国稻田土壤中氮含量增加了约一倍[2],但是随着土壤氮素肥力水平和作物基础产量的不断提高,氮肥的增产效应和合理施用问题一直是关系到农业可持续发展的关键问题. 不同施肥处理或施肥种类对土壤肥力、土壤微生物量、土壤酶活性、土壤微生物多样性等均有着不同的影响[3～5],研究不同施肥条件对土壤氮素转化以及微生物的响应特征可以为制定合理施肥措施、土壤环境维护措施等方面提供理论依据,具有现实意义.

土壤氮素的转化和运输是陆地氮素循环的重要组成部分. 土壤氮素转化是微生物作用下的生物化学过程,是土壤氮素转运过程的源汇,包括矿化、固持等作用[1]. 有研究表明,尿素施肥处理下稻田土壤溶液中溶解性有机氮具有较好的微生物降解特性,降解后成为重要的植物吸收氮源[6]. 化学氮肥能够增加土壤的微生物碳(MBC)和微生物氮(MBN)含量[7,8]. 施用的化肥在稻田土壤中氮素淋失以铵态氮为主[9],施氮量与土壤淋失量呈正相关[10]. 亚热带稻田土壤中,秸秆还田作为重要的施肥措施,能够为土壤输入大量的氮源,研究表明秸秆还田能够增加水稻土中微生物活性[11],提高土壤微生物量氮含量[12]. 有研究发现,淹水条件下秸秆还田能提高土壤N的固定性和可利用性[13]. 单一的使用秸秆或是化学氮肥都难以保证N素的最大利用效率和累积率,因为土壤微生物对N素的利用受到生态化学计量学的调控,Hartman等[14]研究指出,N限制微生物生物量的增加,而P限制微生物的代谢过程,当N、P同时受限时,微生物的活性受到极大的抑制. 然而,土壤微生物也能够通过调控胞外酶活性来调控土壤中C或养分元素的释放,满足其生长的元素计量比需求[15].

外源氮施入土壤后发生着复杂的生物化学过程,难以区分变化量来源于外源氮还是土壤原有氮素,不能够明确地指出施入土壤的肥料氮素对各个形态氮的贡献,及其微生物的利用特征,而^{15}N示踪技术能很好地解释其转化过程与分配规律[16,17]. 因此,本研究采用^{15}N示踪技术来探讨秸秆还田条件下水稻土氮素分配以及运转特征,分析外源肥料氮素的去向,明确肥料氮向土壤ON、NH_4^+-N、MBN等氮库中转化,及其土壤N循环相关酶活性的响应特征,以期为揭示稻田土壤氮素转化过程和机制、培养稻田土壤肥力、减少土壤氮素淋失提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤选择亚热带地区第四纪红土母质发育的稻田土壤,采自中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农业生态试验站施肥制度长期定位试验田(111°26′26.8″～111°26′28.7″E,28°55′47.8″～28°55′48.3″N),该地区属亚热带湿润季风气候,年平均降雨量1 440 mm,年均气温16.5℃,日照时数1 520 h. 采集耕作层(0～20 cm)土壤,除去土壤中可见植物残体(如根、茎和叶)、石块及土壤动物等,运回实验室后,四分法均匀取土约1 kg,室内自然风干获得土壤风干样品,分别过2 mm和0.149 mm筛,用于测定土壤基本理化性质. 剩余土样风干后过2 mm筛作为土壤培养样品备用. 供试土壤基本理化性质见表1.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of the test soil

pH	阳离子交换量 (CEC) /cmol·kg^{-1}	黏粒含量 /%	土壤有机碳 (SOC) /g·kg^{-1}	全氮 (TN) /g·kg^{-1}	全磷 (TP) /g·kg^{-1}	速效磷 /mg·kg^{-1}
5.20±0.06	10.10±0.90	14.90±0.20	13.10±0.70	1.39±0.09	0.26±0.04	3.70±0.12

1.2 土壤培养实验

实验设计4个处理:①对照(CK),②土+水稻秸秆(Straw),③土+水稻秸秆+氮肥(Straw+N),④土+水稻秸秆+氮肥和磷肥(Straw+NP);同时,

作为^{15}N的自然丰度对照，设置了土 + 秸秆 + 未标记氮肥和土 + 秸秆 + 未标记氮肥 + 磷肥两个处理. 秸秆有机碳含量为 386.5 g·kg^{-1}，全氮含量为 9.17 g·kg^{-1}. 实验开始前，将过 2 mm 筛的土壤置于 50 L 塑料桶中，淹水 2～3 cm，25℃恒温预培养 14 d. 称取预培养后混匀的土壤 100 g（干土计）于 500 mL 聚乙烯培养瓶中，加入一定量的去离子水，使水面保持 2～3 cm. 秸秆添加量为 2.5 g·kg^{-1}，氮肥为^{15}N-$(NH_4)_2SO_4$，添加量为 90 mg·kg^{-1}，^{15}N的丰度是 2%（atom ^{15}N%），磷肥是 NaH_2PO_4，添加量为 30 mg·kg^{-1}. 每个处理 3 个平行，25℃恒温培养 5、15、30、60、100 d 时进行破坏性采样.

样品分为土壤溶液（土壤上层清液）和土壤两部分，首先经 0.45 μm 滤膜过滤后获得上层土壤溶液，立即测定溶液中NH_4^+-N和NO_3^--N含量，剩余部分 －20℃冷冻保存，用于后续^{15}N同位素测试. 然后将土壤搅匀分成两部分，取 15 g 风干保存，测定土壤^{15}N-TN 量，剩余土壤则置于 －4℃保存，用于测定NH_4^+-N、NO_3^--N 和 MBN 含量，以及土壤酶活性分析.

1.3　测定与分析方法

土壤 pH 采用 Mettler-toledo 320 pH 计（FE20K，瑞士）测定，土水比为 1∶2.5；土壤总氮（TN）采用 C/N 分析仪（Vario MAX C/N，德国）测定；MBN 采用氯仿熏蒸法，使用流动注射仪分析. 土壤有机氮（ON）、NH_4^+-N、NO_3^--N采用 0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4 溶液浸提. 土壤溶液中 TN、NH_4^+-N、NO_3^--N均用流动注射仪（Fiastar 5000，瑞典福斯）测定. 有机氮（ON）通过测定 TN 及NH_4^+-N、NO_3^--N的含量由差减法获得. 水样、土样^{15}N-NH_4^+ 采用扩散法测定[18]，^{15}N-NH_4^+ 和^{15}N-TN 中^{15}N丰度用 MAT253 同位素质谱仪（Thermo Fisher Scientific，Waltham，美国）测定. 土壤氮转化酶活性（β-1，4-N-乙酰葡糖氨糖苷酶，NAG）的测定采用 96 微孔酶标板荧光分析法[19].

1.4　数据处理

土壤和土壤溶液中^{15}N-NH_4^+、^{15}N-TN 及^{15}N-MBN 计算方法如下：

$$^{15}\mathrm{N} = \frac{(\mathrm{atom}\ ^{15}\mathrm{N}\%)_1 - (\mathrm{atom}\ ^{15}\mathrm{N}\%)_{\mathrm{nl}}}{100} \times \mathrm{TN} \qquad (1)$$

式中，$(\mathrm{atom}\ ^{15}\mathrm{N}\%)_1$和$(\mathrm{atom}\ ^{15}\mathrm{N}\%)_{\mathrm{nl}}$分别表示添加^{15}N标记氮肥样品和自然丰度对照组样品中^{15}N的丰度，TN 是指土壤或土壤溶液中NH_4^+-N、TN 和 MBN 的量（mg·kg^{-1}）.

^{15}N回收率（%），表示土壤或是土壤溶液中^{15}N的量与初始加入的总^{15}N量的比值，计算方法如下：

$$\text{回收率}(\%) = \frac{\text{样品中}^{15}\text{N 量}}{^{15}\text{N 添加量}} \times 100 \qquad (2)$$

^{15}N矿化损失率的计算方法如下：

$$^{15}\text{N 损失率} = 1 - \text{土壤}^{15}\text{N 回收率} - \text{土壤溶液}^{15}\text{N 回收率} \qquad (3)$$

所得数据采用 Origin 8.5 和 SPSS 16.0 软件进行处理与统计分析. 不同处理差异显著性用 One-way ANOVA（单因素方差分析）检验，多重比较采用 Duncan 法.

2　结果与分析

2.1　土壤中氮素的转化

不同施肥处理影响土壤中 TN、NH_4^+-N、ON 含量的变化（图 1）. 秸秆添加增加了土壤中总氮含量，而外源氮添加后土壤中总氮快速增加，在 30 d 时达到最大，而后逐渐降低；P 添加对于总氮的转化没有明显影响［图 1（a）］. 秸秆添加也增加了土壤中NH_4^+-N量，并随着培养时间而逐渐增加，无机氮肥添加后显著增加了土壤中NH_4^+-N的含量，培养 100 d 后，处理 Straw、Straw + N 和 Straw + NP 中NH_4^+-N量相对于 CK 分别提高了 1.0 倍、1.8 倍、2.2 倍［图 1（b）］. 然而，秸秆以及无机 NP 肥添加对于土壤有机氮没有明显影响. 由于本研究是在淹

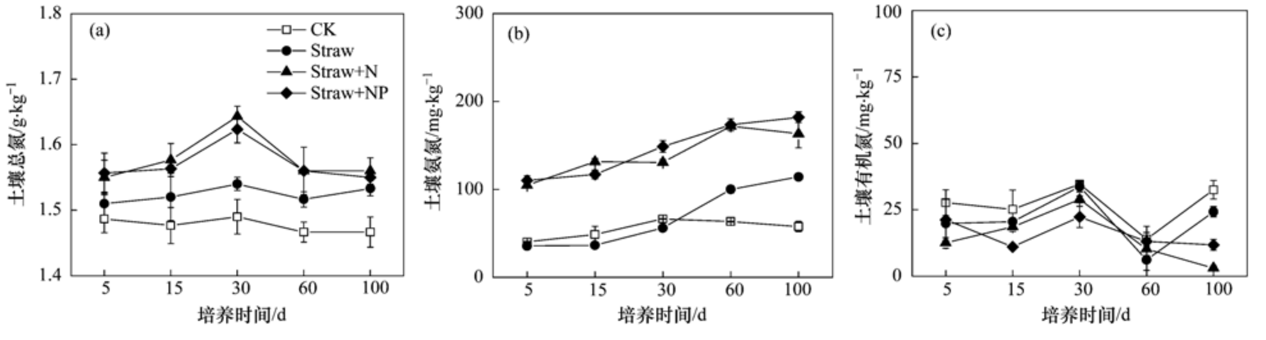

图 1　土壤中氮素转化动态

Fig. 1　Dynamics of soil nitrogen

水条件下进行，所以NO_3^--N的量很低，不同处理间也没有明显的差异（数据未展示）.

2.2　土壤溶液中氮素含量变化特征

土壤溶液总氮含量受秸秆中氮素溶出的影响，随时间逐渐增加，100 d 培养结束后添加秸秆处理的总氮含量是对照处理的 1.5 倍. Straw + N 和 Straw + NP 处理中虽然总氮比 CK 提高了 2.2 和 2.8 倍，但是整个培养时期内基本保持稳定[图 2(a)]. 土壤水溶液中NH_4^+-N在不同处理条件下差异较大，对照处理水溶液中的NH_4^+-N浓度呈缓慢下降的趋势，添加秸秆处理NH_4^+-N浓度逐渐增加. 而处理 Straw + N 和 Straw + NP 中水溶液的NH_4^+-N浓度先快速下降，15 d 时最低，随后逐渐增加并达到稳定；培养结束时，Straw + N 和 Straw + NP 处理水溶液中NH_4^+-N分别是 CK 处理的 9.0 倍和 10.6 倍[图 2(b)]. 水溶液中有机氮含量在各处理条件下没有明显差异，100 d 培养时期内总量比较稳定[图 2(c)].

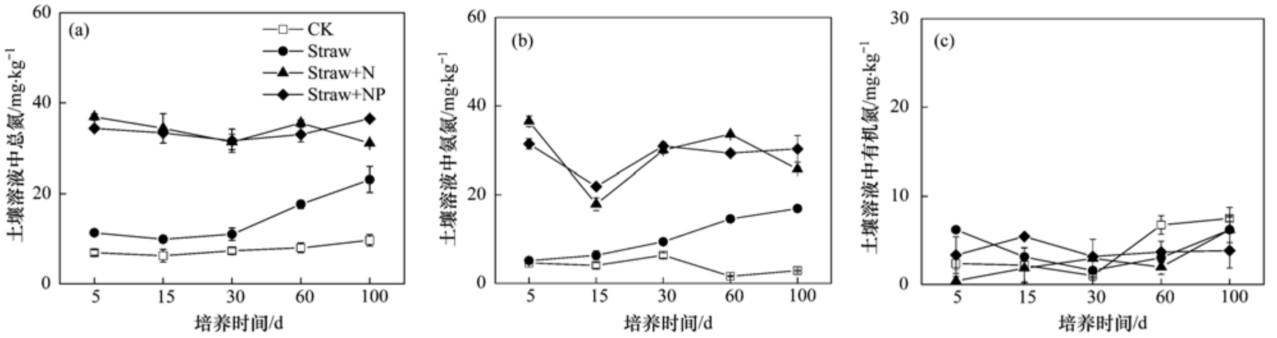

图 2　土壤溶液中氮素转化动态

Fig. 2　Dynamics of nitrogen in soil solution

2.3　^{15}N的分配与动态变化

无机氮肥中^{15}N主要以无机氮（NH_4^+-N）和有机氮（ON）形式分配在土壤和土壤溶液中（图 3）. 土壤中总^{15}N在 100 d 培养时期内基本保持在 28 ~ 33 μg，随时间增加略有降低，P 的加入增加了外源氮在土壤中的含量[图 3(a)]；^{15}N-NH_4^+ 在前 30 d 培养时期内逐渐增加，而后逐渐降低，施 P 增加了土壤中^{15}N-NH_4^+ 量[图 3(b)]；土壤中有机氮随时间逐渐下降，施 P 处理中有机氮的含量相对更高，但是降低的速率也更快[图 3(c)].

土壤溶液中总^{15}N量随时间逐渐降低，在实验起始阶段（5 d）施 P 降低了土壤溶液中^{15}N量，但是在

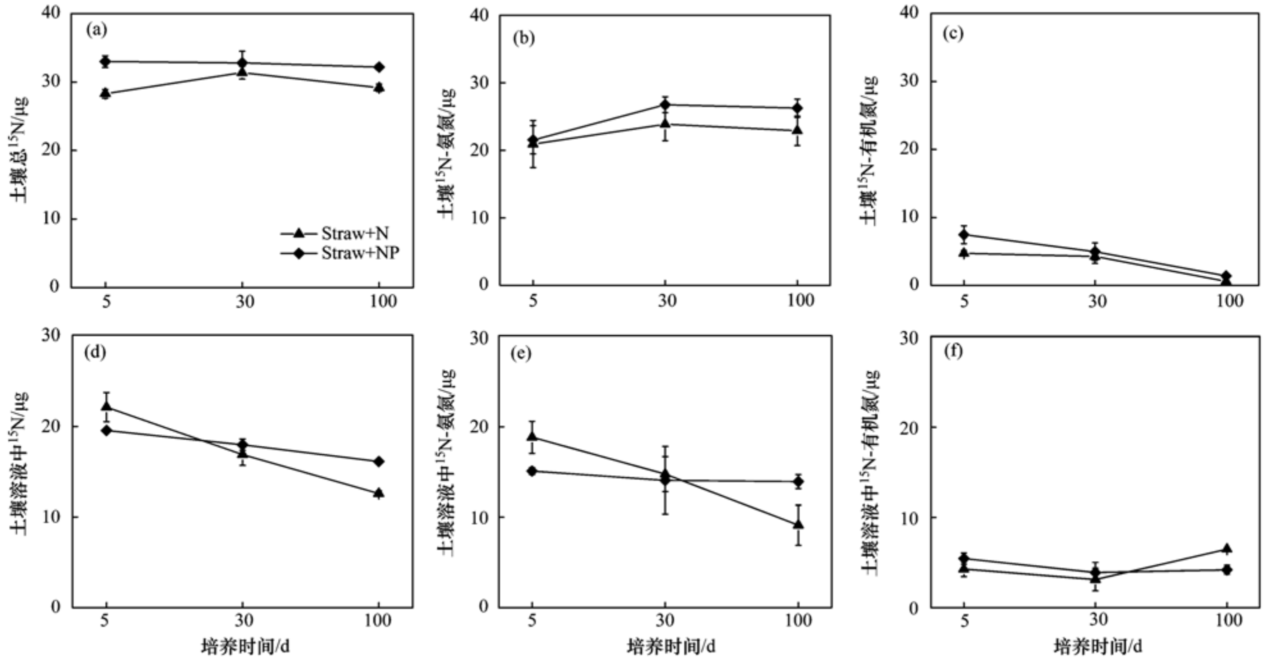

图 3　^{15}N在土壤中和土壤溶液中的分配与转化

Fig. 3　Distribution and transformation of ^{15}N in soil and soil solution

100 d 培养实验后，土壤溶液中^{15}N量却比不施 P 处理高了 28%［图 3(d)］. 同时，土壤溶液中^{15}N-NH_4^+的含量，在处理 Straw + NP 中基本保持稳定，处理 Straw + N 中^{15}N-NH_4^+ 由 5 d 时的 18.8 μg 降至 100 d 时的 9.1 μg［图 3(e)］. 土壤溶液中有机氮的含量相对较少，在整个培养实验周期内基本保持稳定，而在培养实验的前期，施 P 处理中有机氮含量相对较高［图 3(f)］.

2.4　^{15}N在土壤、土壤溶液和释放的氮库中的回收率

通过比较^{15}N在培养体系中各部分的分配比例（图4），可揭示在秸秆还田条件下，肥料 N 在稻田土壤的周转与分配特征. 在 100 d 培养后，无机氮肥中 N 在土壤中的分配比例基本保持在 52% ~61% 之间，而同时添加无机磷肥（Straw + NP）的处理中使^{15}N的在土壤中的分配比例最大提高了 16.5%. 土壤溶液中^{15}N 的比例随时间推移逐渐降低；在 5 d 时，处理 Straw + N 和 Straw + NP 中^{15}N的分配比例为 41% 和 36%，而在 100 d 时分别为 23% 和 30%. 外源^{15}N的损失量随时间逐渐增加，同时添加肥料 N 和 P，使^{15}N的损失量减少了约 1.2 倍.

2.5　土壤 MBN 和^{15}N-MBN 动态变化

秸秆的加入促进了微生物活性，显著提高了土壤 MBN 的量；100 d 培养实验后，无机氮肥和磷肥的添加使 MBN 增加到对照处理（CK）的 2.0 和 2.2 倍［图 5(a)］. 微生物对肥料 N 的利用随时间先增加后降低，并受外源 P 素添加的影响，外源 P 添加后增加了微生物对^{15}N利用，处理 Straw + NP 中^{15}N-MBN 是处理 Straw + N 的 1.4 ~1.5 倍［图 5(b)］.

2.6　土壤氮转化酶活性

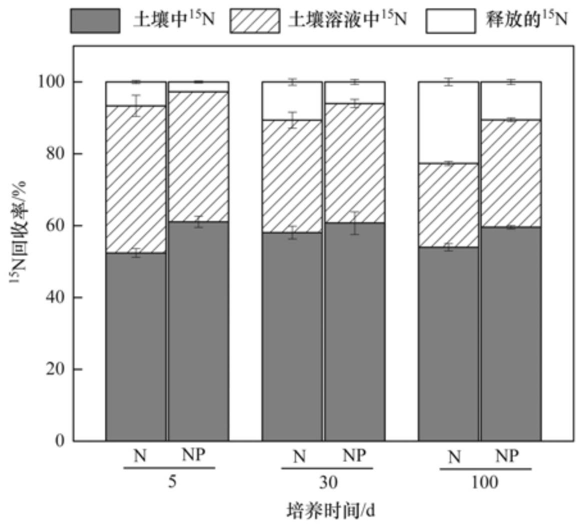

图 4　^{15}N在土壤，土壤溶液和释放的氮库中的回收率

Fig. 4　Recovery of ^{15}N in soil, soil solution and emission pool

秸秆及其肥料氮磷的添加显著提高了土壤氮转化酶活性［图 6(a)］，根据米氏方程拟合得到的土壤酶（NAG）的最大活性潜势（$V_{\max}$）分别为 38.4 nmol·(g·h)$^{-1}$（CK）< 43.9 nmol·(g·h)$^{-1}$（Straw + N）< 52.2 nmol·(g·h)$^{-1}$（Straw）< 77.3 nmol·(g·h)$^{-1}$（Straw + NP），在都有秸秆添加时，肥料 N 素的添加降低了 NAG 的活性，而肥料 NP 同时添加时，NAG 的活性较 Straw 处理提高了 48.1%［图 6(b)］. 然而，NAG 的底物亲和性（K_m）却随着外源氮的添加而显著降低［图 6(c)］，同时添加 NP 后 K_m 值是只添加秸秆处理的 1.4 倍，进一步降低了土壤酶的底物亲和力.

3　讨论

3.1　水稻土中秸秆与无机氮肥共施条件下氮素的转化与分配

秸秆还田是土壤养分的重要来源，能够为土壤微生物提供 C 源和 N、P 等营养元素，但秸秆中氮在土壤的转化和分配是一个渐进的过程[20,21]. 本研

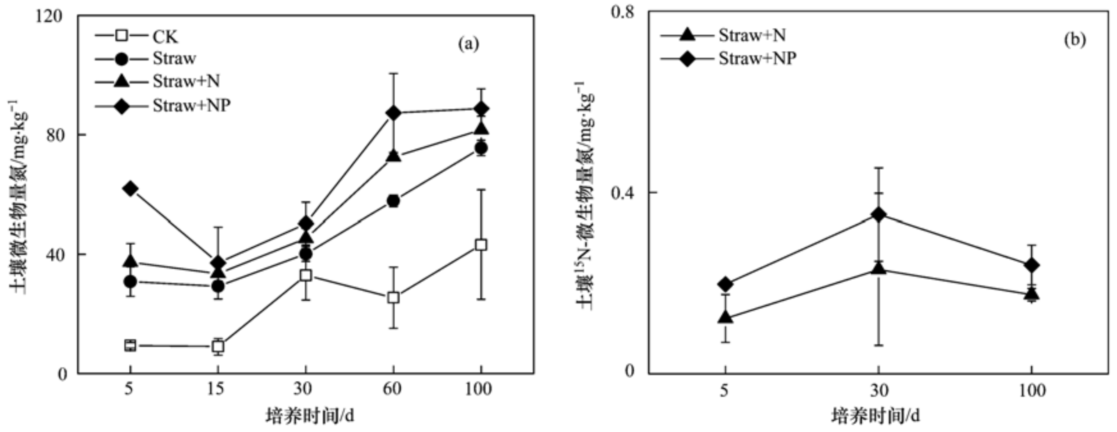

图 5　土壤 MBN 和^{15}N-MBN 的动态变化

Fig. 5　Dynamics of soil MBN and ^{15}N-MBN

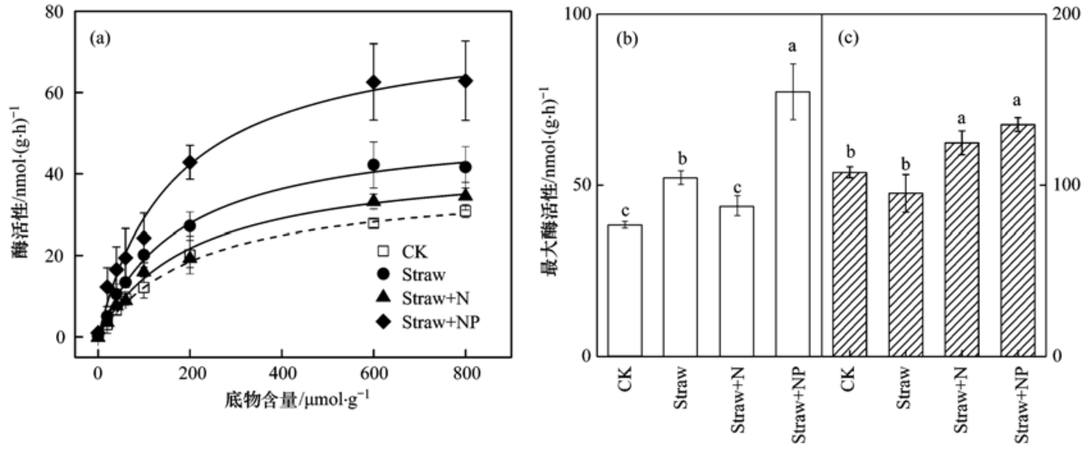

图 6　土壤酶活性动态变化及其最大活性潜势与底物亲和性

Fig. 6　Soil enzyme kinetics and its maximum enzyme activity potential（V_{max}）and substrate affinity（K_m）

究表明,秸秆施加显著增加了土壤中 N 素含量,尤其是在培养后期(30 ~ 100 d),土壤以及土壤溶液中总氮和氨氮含量均迅速增加,说明施加到土壤中的秸秆需经过一定时间的分解,才能为淹水土壤中微生物提供大量能源和养分,促使微生物新陈代谢加快,从而使秸秆氮转化成矿质氮的速度也加快[22]. 然而秸秆氮素前期缓慢的释放,会增加土壤中氮等养分受限的程度. 无机氮肥添加后,促进了土壤中总氮的快速增加,表明无机氮肥增加了秸秆中氮素在土壤中的固持,而后期总氮的降低可能是因为随着土壤微生物活性的提高,加快了土壤中氮素的分解[23,24]. 水溶液中氨氮在初始阶段快速下降也表明,无机氮素被快速地消耗,通过生物或是非生物的作用,转移至土壤氮库中.

^{15}N同位素标记方法是有效反映氮素周转特征的有效手段. 外源^{15}N在土壤溶液中快速降低,表明无机氮肥能够快速参与土壤氮素周转过程,说明了氮素是促进秸秆中养分向土壤中转移的关键因子[25,26]. 同时,由于水稻中 P 是受限的养分元素[27],无机 P 肥的添加,缓解了微生物 P 受限程度,增加了微生物对 N 的利用,使土壤溶液中易利用态的^{15}N-NH$_4^+$ 含量比不加 P 处理降低更慢,增加了土壤中^{15}N的累积[28,29]. 无机氮素主要存在于土壤和土壤溶液中,同时也会在微生物作用下发生反硝化、氨氧化等过程,释放出去[30]. 本研究中无机 P 肥添加后,N 的释放率降低,而且在土壤中固持的比例增加,这可能是因为 P 添加后,有更多的 N 素通过微生物的作用转化为有机氮进而被土壤矿物吸附固定,最终形成土壤中有效肥力[31,32].

3.2　稻田土壤氮素的微生物转化过程

土壤微生物活动和土壤酶活性是土壤有机质和养分转化的关键因子,同时它们受施肥等因素的影响可以迅速发生变化. 微生物生物量和酶活性能灵敏地反映环境因子的变化,常被用于评价土壤质量生物学性状[33 ~ 35]. 研究土壤微生物生物量对了解土壤肥力、土壤养分的转化和循环以及环境变化具有重要意义[36]. 氮素的微生物固持可以减少其以气态形式损失,有利于保肥,随着微生物的死亡微生物体内的氮素会被重新矿化释放出来供作物吸收利用[37]. 培养实验初期,氮肥施入后很快发生固定,为微生物所同化,微生物先吸收利用氮肥来维持自身生长繁殖,随着氮肥的消耗,微生物繁殖生长受到限制[4,14]. 培养后期,秸秆被完全分解利用,秸秆中的 C、N 等养分为微生物提供了条件. 即 100 d 培养结束时 MBN 含量达最大值. 5 d 培养时,加 P 处理较其他处理显著提高了土壤 MBN 含量,说明土壤中 P 的增加易促进外源氮的周转及微生物对外源氮的固持,形成 MBN,减少 N 素的流失[29,38]. 由于磷素的缺乏广泛存在于亚热带土壤中[39],在没有施用磷肥的情况下,微生物的生长发育会受到影响. Chu 等[40]和 Zhong 等[41]的研究结果也表明了施用磷肥能够提高土壤微生物生物量,有机无机肥配施更显著地提高土壤微生物生物量、微生物氮周转速率和作物产量[42]. 刘德燕等[43]研究发现外源氮有效性影响微生物对有机质的分解. 秸秆还田后可以提高配施化肥的利用率,施入化肥后降低了秸秆的 C、N,使之有利于微生物分解并利用同化物质构建微生物体,使微生物自身生长繁殖加快,还可以加速秸秆的腐解速度使土壤有机质和养分增加,也使微生物量增加[44]. 李娟等[45]报道褐潮土玉米秸秆配合 NPK 较 NK 显著增加了土壤微生物氮的含量. 同时,淹水条件也有利于维持较高的有机质含量,并使

土壤微生物量增加[46]，淹水条件下红壤中添加水稻秸秆致使土壤中矿质^{15}N 含量下降[37]．本实验单施秸秆提高了土壤矿质氮含量，这可能与土壤类型或秸秆添加量有关，土壤微生物活动强弱影响了秸秆能源和养分的消耗．彭佩钦等[47]对洞庭湖湿地土壤氮的研究结果显示，土壤表层微生物氮是全氮的3.13%～6.42%．本实验100 d 培养结束后，秸秆氮肥配施土壤 MBN 占 TN 的5.72%，秸秆氮磷肥配施土壤 MBN 占 TN 的5.23%，与前人研究结论一致．

土壤酶活性是土壤生物学活性的总体现，它表征了土壤的综合肥力特征及其变化状况、土壤养分的转化进程，因此可以作为评价土壤肥力水平的指标，同时土壤酶的专一性和综合性特点使其有可能成为一个有潜力的土壤生物学指标[48,49]．土壤微生物对土壤有机质的分解，以及对 C、N、P 等养分元素的吸收利用受到环境中土壤胞外酶的调节，并通过微生物响应环境条件的变化而被表达、释放到土壤中[50]．这些胞外酶的活性与微生物代谢、养分的生物化学循环密切相关．环境中不同的养分浓度或者 C∶N、C∶P 和 N∶P 的比值直接影响微生物 C、N、P 养分资源需求状况，土壤微生物通过调节释放 N 或是 P 水解相关酶来增加 N 或 P 的溶出以及可利用率[15,29]．例如：N 有效性的降低可以促进 N 分解酶（如 NAG）的活性的升高，而 N 有效性的升高则将抑制 N 分解酶的活性，提高对其他养分元素分解酶的投入[4,50]．本研究中秸秆添加后显著提高了土壤酶活性，最大酶活性潜势（V_{max}）增加了1.5～2.0倍，表明秸秆添加后土壤中可利用性碳快速增加，刺激了微生物对 N 等养分的需求，进而刺激 N 分解相关酶的活性[4]．在相同的秸秆添加条件下，当有无机氮同时添加时，土壤 N 分解酶的 V_{max} 降低了16%，这可能是因为外源氮的添加，增加了土壤可利用态氮的量，降低了微生物对 N 的计量学需求；同时，N-乙酰葡糖氨糖苷酶的底物亲和性（K_m）却随着外源氮的添加而显著降低，也表明外源氮加入后降低了 N 水解酶的亲和力，使微生物更加容易利用土壤中的氮源[19]．然而，在无机 NP 肥料同时添加时，土壤 N 分解酶的 V_{max} 显著高于其他处理，达到最大的77.3 nmol·(g·h)$^{-1}$，这可能是无机 P 的添加，使得微生物解除了水稻土中 P 的限制，加大对 N 的需求，使得 N 分解酶的活性达到最大[4,50]．

4　结论

（1）秸秆添加增加了土壤和土壤溶液中氨氮和总氮含量；秸秆与氮磷肥共施条件下进一步促进了土壤氮素的累积．

（2）无机氮肥在土壤中分配受元素计量比的影响，氮磷共施显著提高了土壤 MBN 的量，提高了土壤氮水解酶活性，增加了外源氮在土壤中的分配比例，降低其在土壤溶液和损失量的比例．

（3）秸秆还田配施无机肥能为微生物的生长提供充足的碳源和营养元素，促进微生物的生长繁殖，提高土壤氮固定能力．

参考文献：

[1] 彭少兵，黄见良，钟旭华，等．提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]．中国农业科学，2002，**35**(9)：1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, *et al.* Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, **35**(9): 1095-1103.

[2] 巨晓棠 谷保静．我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]．植物营养与肥料学报，2014，**20**(4)：783-795.
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(4): 783-795.

[3] Zhong Y Q W, Yan W M, Shangguan Z P. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **91**: 151-159.

[4] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, *et al.* Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories [J]. Global Change Biology, 2014, **20**(7): 2356-2367.

[5] Zhang P, Chen X L, Wei T, *et al.* Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, **160**: 65-72.

[6] 张翰林，赵峥，陆贻通，等．稻田土壤溶液中溶解性有机氮、碳的空间分布及其微生物降解特性[J]．环境污染与防治，2014，**36**(10)：7-12.
Zhang H L, Zhao Z, Lu Y T, *et al.* Spatial distribution and microbial degradation characteristics of dissolved organic nitrogen and carbon in paddy soil solution[J]. Environmental Pollution and Control, 2014, **36**(10): 7-12.

[7] 李贵桐，张宝贵，李保国．秸秆预处理对土壤微生物量及呼吸活性的影响[J]．应用生态学报，2003，**14**(12)：2225-2228.
Li G T, Zhang B G, Li B G. Effect of straw pretreatment on soil microbial biomass and respiration activity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(12): 2225-2228.

[8] 马晓霞，王莲莲，黎青慧，等．长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]．生态学报，2012，**32**(17)：5502-5511.
Ma X X, Wang L L, Li Q H, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(17): 5502-5511.

[9] 刘希玉，邹敬东，徐丽丽，等．不同肥料种类对稻田红壤碳

氮淋失的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3083-3090.

Liu X Y, Zou J D, Xu L L, *et al.* Effects of different fertilizer species on carbon and nitrogen leaching in a reddish paddy soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 3083-3090.

[10] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 等. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. 土壤, 2011, **43**(1): 19-25.

Hu Y T, Liao Q J H, Wang S W, *et al.* Statistical analysis and estimation of N leaching from agricultural fields in China[J]. Soils, 2011, **43**(1): 19-25.

[11] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1908-1914.

Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1908-1914.

[12] 郭成藏, 李鲁华, 黄金花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(3): 296-304.

Guo C Z, Li L H, Huang J H, *et al.* Effects of cotton straw incorporation on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in long-term continuous cropping cotton field[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, **32**(3): 296-304.

[13] Said-Pullicino D, Cucu M A, Sodano M, *et al.* Nitrogen immobilization in paddy soils as affected by redox conditions and rice straw incorporation[J]. Geoderma, 2014, **228-229**: 44-53.

[14] Hartman W H, Richardson C J. Differential nutrient limitation of soil microbial biomass and metabolic quotients (qCO$_2$): is there a biological stoichiometry of soil microbes? [J]. PLoS One, 2013, **8**(3): e57127.

[15] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change[J]. New Phytologist, 2012, **196**(1): 68-78.

[16] 袁红朝, 葛体达, 陈晓娟, 等. 稳定同位素质谱技术在生态系统氮素循环中的应用[J]. 质谱学报, 2015, **36**(1): 91-96.

Yuan H Z, Ge T D, Chen X J, *et al.* Application of stable isotope mass spectrometry in the ecology of nitrogen cycle[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2015, **36**(1): 91-96.

[17] zu Schweinsberg-Mickan M S, Joergensen R G, Müller T. Fate of ^{13}C-and ^{15}N-labelled rhizodeposition of *Lolium perenne* as function of the distance to the root surface[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(6): 910-918.

[18] 孙建飞, 白娥, 戴崴巍, 等. ^{15}N标记土壤连续培养过程中扩散法测定无机氮同位素方法改进[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(9): 2574-2580.

Sun J F, Bai E, Dai W W, *et al.* Improvements of the diffusion method to measure inorganic nitrogen isotope of ^{15}N labeled soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(9): 2574-2580.

[19] Loeppmann S, Blagodatskaya E, Pausch J, *et al.* Substrate quality affects kinetics and catalytic efficiency of exo-enzymes in rhizosphere and detritusphere [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **92**: 111-118.

[20] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, *et al.* Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **72**: 145-151.

[21] Zhang G B, Yu H Y, Fan X F, *et al.* Effect of rice straw application on stable carbon isotopes, methanogenic pathway, and fraction of CH$_4$ oxidized in a continuously flooded rice field in winter season[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **84**: 75-82.

[22] Wichern F, Mayer J, Joergensen R G, *et al.* Release of C and N from roots of peas and oats and their availability to soil microorganisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(11): 2829-2839.

[23] Bird J A, Kleber M, Torn M S. ^{13}C and ^{15}N stabilization dynamics in soil organic matter fractions during needle and fine root decomposition[J]. Organic Geochemistry, 2008, **39**(4): 465-477.

[24] Coyle J S, Dijkstra P, Doucett R R, *et al.* Relationships between C and N availability, substrate age, and natural abundance ^{13}C and ^{15}N signatures of soil microbial biomass in a semiarid climate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(8): 1605-1611.

[25] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(12): 1683-1692.

[26] Rains K C, Bledsoe C S. Rapid uptake of ^{15}N-ammonium and glycine-^{13}C, ^{15}N by arbuscular and ericoid mycorrhizal plants native to a Northern California coastal pygmy forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(5): 1078-1086.

[27] Li Y, Wu J S, Liu S L, *et al.* Is the C:N:P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, **26**(4): GB4002.

[28] Creamer C A, Jones D L, Baldock J A, *et al.* Stoichiometric controls upon low molecular weight carbon decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **79**: 50-56.

[29] Heuck C, Weig A, Spohn M. Soil microbial biomass C:N:P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **85**: 119-129.

[30] Nie S A, Li H, Yang X R, *et al.* Nitrogen loss by anaerobic oxidation of ammonium in rice rhizosphere [J]. The ISME journal, 2015, **9**(9): 2059-2067.

[31] Wichern F, Mayer J, Joergensen R G, *et al.* Rhizodeposition of C and N in peas and oats after ^{13}C-^{15}N double labelling under field conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(10): 2527-2537.

[32] Clode P L, Kilburn M R, Jones D L, *et al.* In situ mapping of nutrient uptake in the rhizosphere using nanoscale secondary ion mass spectrometry[J]. Plant Physiology, 2009, **151**(4): 1751-1757.

[33] Blagodatsky S, Blagodatskaya E, Yuyukina T, *et al.* Model of apparent and real priming effects: linking microbial activity with soil organic matter decomposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(8): 1275-1283.

[34] Dorodnikov M, Kuzyakov Y, Fangmeier A, *et al.* C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric CO$_2$: turnover vs. stabilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(3): 579-589.

[35] Kautz T, Amelung W, Ewert F, *et al.* Nutrient acquisition from

arable subsoils in temperate climates: a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **57**: 1003-1022.

[36] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 676-684.
Luo K, Hu R G, Zhang W J, *et al.* Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 676-684.

[37] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 淹水土壤中秸秆氮素的转化[J]. 江苏农业学报, 2001, **17**(4): 236-240.
Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, *et al.* Transformation of straw ^{15}N in the submerged soil[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2001, **17**(4): 236-240.

[38] Manzoni S, Trofymow J A, Jackson R B, *et al.* Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter[J]. Ecological Monographs, 2010, **80**(1): 89-106.

[39] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 64-71.
Liu X Z, Zhou G Y, Zhang D Q, *et al.* N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(1): 64-71.

[40] Chu H Y, Lin X G, Fujii T, *et al.* Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(11): 2971-2976.

[41] Zhong W H, Cai Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay[J]. Applied Soil Ecology, 2007, **36**(2-3): 84-91.

[42] 吕美蓉, 李忠佩, 刘明, 等. 长期不同施肥处理对红壤水稻土微生物量氮周转的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(2): 275-282.
Lü M R, Li Z P, Liu M, *et al.* Soil microbial biomass N turnover after long-term fertilization in paddy field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, **45**(2): 275-282.

[43] 刘德燕, 宋长春, 王丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3525-3530.
Liu D Y, Song C C, Wang L, *et al.* Exogenous nitrogen enrichment impact on the carbon mineralization and DOC of the freshwater marsh soil[J]. Environmental Science, 2008, **29**(12): 3525-3530.

[44] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 240-246.
Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, *et al.* Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(1): 240-246.

[45] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(1): 144-152.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, **41**(1): 144-152.

[46] 陈娟, 马忠明, 刘莉莉, 等. 不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(3): 667-675.
Chen J, Ma Z M, Liu L L, *et al.* Effect of tillage system on soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, **22**(3): 667-675.

[47] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(10): 1872-1878.
Peng P Q, Zhang W J, Tong C L, *et al.* Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake floodplain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(10): 1872-1878.

[48] 赵军, 耿增超, 尚杰, 等. 生物炭及炭基硝酸铵对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(8): 2355-2362.
Zhao J, Geng Z C, Shang J, *et al.* Effects of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(8): 2355-2362.

[49] Adamczyk B, Kilpeläinen P, Kitunen V, *et al.* Potential activities of enzymes involved in N, C, P and S cycling in boreal forest soil under different tree species[J]. Pedobiologia, 2014, **57**(2): 97-102.

[50] Sinsabaugh R L, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2012, **43**(1): 313-343.

HUANJING KEXUE Vol. 38 No. 4

Environmental Science (monthly) Apr. 15, 2017

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City …… XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, *et al.* (1279)

Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM_{10} During Spring and Summer of Lanzhou …… MA Li, YU Ye, WANG Bo, *et al.* (1289)

Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan …… WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, *et al.* (1298)

Pollution Characteristics of NH_4^+, NO_3^-, SO_4^{2-} in $PM_{2.5}$ and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing …… DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, *et al.* (1307)

Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing …… QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, *et al.* (1317)

Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles($PM_{2.5}$) of Beijing and Baoding …… HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, *et al.* (1327)

Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data …… LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, *et al.* (1340)

Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals …… LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, *et al.* (1348)

Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project …… XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, *et al.* (1357)

Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir …… YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)

Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares …… LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, *et al.* (1376)

Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer …… WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, *et al.* (1384)

Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors …… YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, *et al.* (1393)

Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohe River Through High-throughput Sequencing …… WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, *et al.* (1403)

Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay …… DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, *et al.* (1414)

Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface …… JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, *et al.* (1423)

Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland …… DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, *et al.* (1431)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake …… BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)

Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China …… ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, *et al.* (1451)

Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water …… YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, *et al.* (1460)

Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate …… LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, *et al.* (1467)

Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO_3^{2-} …… HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)

Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(Ⅵ) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride …… LI Li-li, CHEN Cui-bai, LAN Hua-chun, *et al.* (1483)

Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water …… FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, *et al.* (1490)

Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes …… ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, *et al.* (1497)

Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes …… ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, *et al.* (1506)

Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater …… LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, *et al.* (1513)

Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment …… YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, *et al.* (1520)

Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process …… NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)

Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor …… FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, *et al.* (1536)

Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor …… CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, *et al.* (1544)

Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills …… HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, *et al.* (1551)

Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(Ⅲ) Reduction in Aged Refuse …… WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, *et al.* (1558)

Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou …… SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, *et al.* (1566)

Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure …… HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, *et al.* (1576)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong …… GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, *et al.* (1587)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jianghan Plain …… WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, *et al.* (1597)

Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil …… CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, *et al.* (1606)

Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil …… CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, *et al.* (1613)

Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil …… ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, *et al.* (1622)

N_2O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism …… WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, *et al.* (1633)

Non-CO_2 Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes …… LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, *et al.* (1640)

Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil …… YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, *et al.* (1647)

Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels …… CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, *et al.* (1654)

Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism …… PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, *et al.* (1667)

Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedings …… LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, *et al.* (1675)

Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize …… JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, *et al.* (1683)

Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area …… SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, *et al.* (1689)

Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing …… HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, *et al.* (1697)

Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing …… YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, *et al.* (1704)

Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Dopped Graphene Anode …… HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, *et al.* (1717)

Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States …… RONG Yue (1726)