及业环境计多学报 JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE

中文核心期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址: http://www.aes.org.cn

秸秆还田配施氮肥对水稻根际土酶活性的影响

陈佩, 罗佳琳, 黄丽颖, 王宁, 于建光, 薛利红

引用本文:

陈佩, 罗佳琳, 黄丽颖, 王宁, 于建光, 薛利红. 秸秆还田配施氮肥对水稻根际土酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2264-2273.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0899

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响

王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 李勇, 于建光

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 125-133 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0956

不同水稻品种甲烷排放与土壤酶的关系

周文涛, 戈家敏, 王勃然, 龙攀, 徐莹, 傅志强

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2675-2682 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0517

环丙沙星高低累积菜心根际土壤酶活性和微生物学特性差异研究

黄献培, 向垒, 尹倩, 赵海明, 喻乐意, 李彦文, 蔡全英, 莫测辉

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1102-1110 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0557

氟磺胺草醚及其降解菌对大豆生长及生物固氮的影响

周聪, 陈未, 高岩, 施曼, 李江叶, 刘丽珠, 陈金林

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2660-2668 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0264

清液肥对滴灌棉田NH。挥发和N2O排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354-2362 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈佩, 罗佳琳, 黄丽颖, 等. 秸秆还田配施氮肥对水稻根际土酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2264-2273.

CHEN P, LUO J L, HUANG L Y, et al. Impacts of straw return coupled with nitrogen fertilization on the enzyme activities of rice rhizosphere soils[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2023, 42(10): 2264–2273.

秸秆还田配施氮肥对水稻根际土酶活性的影响

陈佩1,2, 罗佳琳1, 黄丽颖1,4, 王宁1,3*, 于建光1,3, 薛利红1,3

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室,南京 210014; 2. 济南大学水利与环境学院,济南 250022; 3. 江苏大学环境与安全工程学院,江苏 镇江 212001; 4. 苏州农业职业技术学院,江苏 苏州 215000)

摘 要:为了明确水稻根际土壤酶活性对秸秆还田与氮肥配施的响应规律,本研究以江苏泰州高砂土和江苏常州黄泥土两种稻麦轮作土壤为研究对象,采用根际袋法,基于温室模拟盆栽试验研究了秸秆单独还田(S)、秸秆与常规氮肥配施(SN)、秸秆与高量氮肥配施(SHN)3种施肥模式对水稻成熟期根际与非根际土壤脱氢酶、蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、羟胺还原酶活性的影响。结果表明:与非根际区土壤相比,两种类型稻田根际区土壤脱氢酶、脲酶、羟胺还原酶活性分别提高了22.4%~48.7%、13.4%~70.9%、12.4%~23.0%,仅江苏常州 S 处理根际土壤脲酶活性增加效应不显著;同时,秸秆还田配施氮肥显著提高了江苏泰州根际土壤蛋白酶活性 34.2%~44.7% 和亚硝酸还原酶活性 49.6%~87.1%,以及江苏常州根际土壤硝酸还原酶活性 243.8%~270.5%。与秸秆单独还田相比,秸秆与氮肥配施显著提高了水稻根际和非根际区土壤中脱氢酶活性 14.2%~62.7%,脲酶活性 8.2%~54.4%,以及羟胺还原酶活性 3.8%~18.0%(江苏常州非根际土脲酶和江苏泰州 SN 处理羟胺还原酶除外);与以上 3 种酶不同,根际区土壤蛋白酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性对氮肥施用的响应与非根际区显著不同。基于主成分分析(PCoA)显示,土壤类型、根际效应、氮肥施用是影响土壤酶活性的重要因素,且氮肥施用显著改变了非根际/根际土壤酶活性;方差分解分析(VPA)表明,3种因素共解释土壤酶活性变异量的63.5%,其中根际效应与氮肥施用影响效应较大,其贡献率达32.8%和20.8%。

关键词:秸秆还田;根际土壤;非根际土壤;氮肥施用;酶活性

中图分类号:S511;S154.2 文献标志码:A 文章编号:

文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)10-2264-10

doi:10.11654/jaes.2022-0899

Impacts of straw return coupled with nitrogen fertilization on the enzyme activities of rice rhizosphere soils CHEN Pei^{1,2}, LUO Jialin¹, HUANG Liying^{1,4}, WANG Ning^{1,3*}, YU Jianguang^{1,3}, XUE Lihong^{1,3}

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences / Key Agricultural Environment Laboratory of the Lower Yangtze River Plain of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Nanjing 210014, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 3. School of the Environment and safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China; 4. Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215000, China)

Abstract: To explore the response mechanisms of enzyme activities of rhizosphere soils to straw return coupled with nitrogen fertilization, two types of paddy soils were collected, added to wheat straw, and used for rice seedling growth under greenhouse conditions. The specific objectives were to explore the effect of combination of straw return with nitrogen fertilizer addition on the activities of dehydrogenase, protease, urease, nitrate reductase, nitrite reductase, and hydroxylamine reductase in non-rhizosphere, as well as on the rhizosphere soils based on the rhizo-bags method. There were three treatments: straw return without nitrogen addition (S), straw return with conventional application ratio of nitrogen addition (SN), and straw return with higher application ratio of nitrogen addition (SN). Results revealed that,

收稿日期:2022-09-07 录用日期:2023-04-29

作者简介:陈佩(1999—),女,湖北黄冈人,硕士,主要从事微生物生态学研究。E-mail:chenpeiyayaya@163.com

^{*}通信作者:王宁 E-mail:wang.ning4113@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700801);国家自然科学基金项目(41601261);江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(21)2012];江苏省自然科学基金项目(BK20201240);江苏省重点研发项目(D21YFD17008)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700801); The National Natural Science Foundation of China (41601261); Jiangsu Agricultural Independent Innovation Program [CX(21)2012]; The Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (BK20201240); The Key Research and Development Program of Jiangsu Province, China (D21YFD17008)

compared to non-rhizosphere soil, the activities of dehydrogenase, urease, and hydroxylamine reductase in rhizosphere soils for all the treatments increased by 22.4%-48.7%, 13.4%-70.9%, and 12.4%-23.0%, respectively, and only the effect of S treatment on the increase of urease activity in the rhizosphere soil was not significant. Meanwhile, straw return combined with nitrogen fertilizer addition significantly increased the activities of protease for rhizosphere soil from Taizhou Jiangsu (TZ), nitrate reductase for rhizosphere soil from Changzhou Jiangsu (CZ), and nitrite reductase for TZ rhizosphere soil by 34.2%-44.7%, 243.8%-270.5%, and 49.6%-87.1%, respectively. Results also demonstrated that as nitrogen application rate increased, the activities of dehydrogenase, urease, and hydroxylamine reductase in rhizosphere and non-rhizosphere soils for all treatments increased by 14.2%-62.7%, 8.2%-54.4%, and 3.8%-18.0% (except urease in non-rhizosphere of CZ soil and hydroxylamine reductase of SN treatment in non-rhizosphere of TZ soil), respectively. In contrast from the above three soil enzyme types, the response of other types of soil enzyme to nitrogen fertilizer application varied between non-rhizosphere and rhizosphere. Principal component analysis revealed that soil type, rhizosphere, and nitrogen fertilizer application were important factors for influencing soil enzyme activities, and the application of nitrogen fertilizer significantly altered the enzyme activities of non-rhizosphere and rhizosphere soil. Variance partitioning analysis indicated that the three factors explained the variation in soil enzyme activities by 63.5%, and the roles of rhizosphere and nitrogen application were more important, explaining by 32.8% and 20.8% of the alteration in soil enzyme activities, respectively.

Keywords: straw return; rhizosphere; non-rhizosphere; nitrogen fertilizer application, enzyme activities

土壤酶在稻田生态系统的物质循环和能量转化 中起着非常重要的作用,它催化着土壤中的一切生物 化学反应,反映了土壤中各种生物化学过程的强度和 方向[1-4]。已有研究发现,脱氢酶属于胞内酶,能催化 有机物质脱氢,起氢的中间转化传递作用,因此脱氢 酶活性可以作为微生物氧化还原系统的指标,被认为 能很好地表征土壤中微生物的氧化能力同。而土壤 蛋白酶和脲酶与土壤供氮能力有密切关系,其酶活性 的高低在一定程度上能够表征土壤氮素的供应程 度[6-7]。此外,硝酸还原酶、亚硝酸还原酶以及羟胺还 原酶活性作为土壤反硝化过程中的关键酶,是影响土 壤反硝化过程及温室气体 N₂O 产出的重要因子之 一[8-9]。因此,稻田土壤酶活性大小是土壤肥力的重 要标志。

已有研究表明氮肥是影响土壤酶活性的重要因 素之一。夏雪等[10]研究发现,低量(60 kg·hm⁻²)和中 量(120 kg·hm⁻²)氮肥能够提高蔗糖酶和脲酶活性,而 中量(120 kg·hm⁻²)和高量(240 kg·hm⁻²)氮肥可以增 加碱性磷酸酶活性。由于土壤酶活性受到多种因素 影响,如土壤物理性质、土壤养分、土壤微生物、人为 因素以及植物根系等,目前关于氮肥施用对稻田土壤 酶活性影响的认识并无统一结论[11-12]。秸秆还田作 为秸秆利用的重要方式,可平衡土壤养分、改良土壤 结构并有效抑制土传病害的发生,对于优化农田生态 环境、促进作物增产及发展可持续农业具有重要意 义[13-14]。然而,秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质 素三大部分组成,C/N一般为60~80,大量的秸秆还田 会造成土壤较高的 C/N,降低土壤氮素有效性,抑制 土壤酶活性,使秸秆在土壤中难以被微生物分 解[15-16]。因此,秸秆还田条件下,如何合理施用氮肥 是保证土壤全期肥力的关键问题。已有研究表明,与 秸秆单独施用相比,秸秆还田配施化肥可显著提高稻 田土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶活性四。而水稻根 际是水稻-土壤-微生物相互作用的热点区域,土壤 酶是其关键的中间介质[10-18]。因受作物根系影响,与 非根际土壤相比,根际土壤生物化学活性通常更 高[19]。然而,目前关于水稻根际区土壤酶活性对秸秆 还田与氮肥配施的响应规律仍不够清晰。

因此,本试验拟选取两种典型稻麦轮作土壤作为 研究对象,基于盆栽试验,以单施秸秆为对照,结合根 际袋法,研究水稻根际和非根际区土壤酶活性对秸秆 还田与氮肥配施的响应,探讨其如何影响土壤酶活性 变化,从而为农田秸秆还田与氮肥配施提供必要的理 论基础。

材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤分别采自江苏省泰州市姜堰区(TZ)和 江苏省常州市金坛区(CZ)的稻麦轮作田,其中江苏 泰州土壤母质发育于河流沉积物,属于高砂土,而江 苏常州土壤是黄泥土,发育于湖泊沉积物。取表层 0~20 cm 土壤,室内风干、过筛后备用。供试土壤 TZ 和CZ的养分含量见表1。

供试秸秆为小麦秸秆,收集于江苏省农业科学院 小麦试验基地。麦秸含碳、氮量分别为475.0、4.9 g· kg⁻¹,其碳氮比为96.9。将已粉碎的小麦秸秆以质量比

表1 水稻土基本性质

Table 1 Soil properties for the used two types of paddy soils

水稻土 Paddy soil	总氮 TN/(g•kg ⁻¹)	速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)
TZ	0.55	12.00	206.8
CZ	0.88	12.47	220.7

1%的比例加入到已准备的两种类型稻麦轮作土壤中, 混匀备用。

1.2 试验设计

称取 1.50 kg 含 1% 秸秆的风干土壤装入网孔直 径为30 μm 的根际袋(10 cm×30 cm)内,将根际袋置 于试验桶(直径25 cm、高30 cm的塑料圆桶)内,同时 根际袋外也装入1.50 kg含1%秸秆的风干土壤。供 试水稻 Oryza sativa 品种为"南梗 46",将人工气候室 内培育约1周的水稻幼苗移栽至根际袋中,每袋1株。 试验设置3个氮肥施用模式:①秸秆单独还田且不施 加氮肥(S,对照);②秸秆还田且施加常规氮肥(125 mg·kg⁻¹,以N计,相当于300 kg·hm⁻²)(SN);③秸秆还 田且施加高量氮肥(250 mg·kg⁻¹,以N计,相当于600 kg·hm⁻²)(SHN)。每个处理3个重复,2种类型土壤, 共18个处理。氮肥分基肥、蘖肥、穗肥3次施入,施用 比例为4:3:3,磷肥和钾肥作为基肥一次性施入,施 用量分别为 P₂O₅ 90 mg·kg⁻¹(相当于 216 kg·hm⁻²), K₂O 180 mg·kg⁻¹(相当于432 kg·hm⁻²)。水稻生长过 程中适时灌水保持淹水2cm 左右, 待水稻生长至成 熟期后,破坏性采样收集根际土和非根际土,其中根 际袋内的土壤混合均匀后作为根际土,根际袋外土壤 混合均匀后作为非根际土。采集的土壤风干、研磨、

过2mm筛后用于土壤酶活性的测定与分析。

1.3 土壤酶活性测定

脱氢酶活性采用2,3,5-氯化三苯基四氮唑 (TTC)还原法测定[20],以24 h后1g土壤中三苯基甲臢 (TPF)的质量(µg)表示脱氢酶活性;蛋白酶活性采用 酪蛋白酸钠分析法测定[20],以1g土壤中氨基酸的质 量(mg)表示蛋白酶活性;脲酶活性采用苯酚-次氯酸 钠比色法测定⁶¹,以1g土壤中水解生成NH3-N的质 量(mg)表示脲酶活性:硝酸还原酶活性采用酚二磺 酸比色法测定⁶¹,以24 h后1g土壤中被还原的NO3的 质量(µg)表示硝酸还原酶活性;亚硝酸还原酶活性 采用甲萘胺比色法测定[6],以24h后1g土壤中被还原 的NO2的质量(mg)表示亚硝酸还原酶活性;羟胺还原 酶活性参照关松荫间的方法测定,以1h后1g土壤中 被还原的羟胺的质量(mg)表示羟胺还原酶活性。

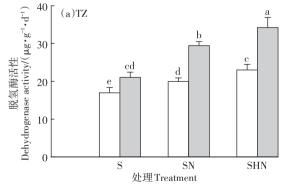
1.4 数据分析

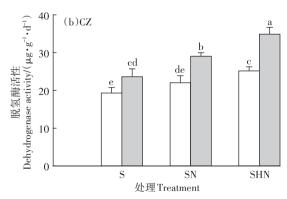
所有试验数据用 Excel 2008 录入和整理,采用 SPSS 22.0(IBM,美国)进行方差计算和相关性分析,采 用R(2.14.0)软件进行主成分分析和方差分解分析,采 用 Duncan 新复极差法进行处理间的多重比较和显著 性检验(P<0.05),图形绘制采用SigmaPlot 10.0。

结果与分析

2.1 水稻根际和非根际区土壤脱氢酶活性

不同处理下两种类型稻田根际和非根际区土壤 脱氢酶活性见图1。由图1可知,与非根际区土壤相 比,3种处理下两种类型稻田根际区脱氢酶活性显著 提高了22.4%~48.7%(P<0.05)。随着氮肥施用量的增





□非根际 ■ 根际

不同小写字母代表处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Different lowercase letters indicates significant differences among treatments (P<0.05). The same below. 图 1 秸秆还田配施氮肥对两种类型稻田非根际和根际区土壤脱氢酶活性的影响

Figure 1 Effects of straw return with different amounts of nitrogen fertilizer addition on the dehydrogenase activities in non-rhizosphere and rhizosphere of rice from both paddy soils

加,江苏泰州非根际区土壤脱氢酶活性从 17.0 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 逐渐增加到 20.0 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 和 23.0 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$,根际区土壤脱氢酶活性从 21.0 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 逐渐增加到 29.5 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 和 34.2 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ (P < 0.05)。对于江苏常州稻田,非根际区土壤脱氢酶活性从 19.3 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 逐渐增加到 22.0 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 和 25.2 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$,根际区土壤脱氢酶活性从 23.6 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 逐渐增加到 29.0 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 。以上研究结果表明,随着氮肥施用量的增加,两种类型稻田根际区和非根际区土壤脱氢酶活性逐渐增大,而且根际区土壤脱氢酶活性显著高于非根际区。

2.2 土壤蛋白酶和脲酶活性

土壤蛋白酶可以水解蛋白质为短肽,并将短肽进一步水解为氨基酸,这些水解产物是植物的氮源之一。不同处理下两种类型稻田根际和非根际区土壤蛋白酶活性见图2。由图2a可知,与非根际区土壤相比,SN和SHN处理下江苏泰州稻田土根际区蛋白酶活性分别显著提高了44.7%和34.2%(P<0.05),而S处理下根际区蛋白酶活性虽有所增加,但效应并不显著(P>0.05);而对于江苏常州稻田土,与非根际区土

壤相比,3种处理中仅有SN处理下水稻根际区蛋白 酶活性显著提高了49.3%(P<0.05),S和SHN处理则 并未显著增加根际区蛋白酶活性(图 2b)。研究还发 现,随着氮肥施用量的增加,江苏泰州稻田非根际区 蛋白酶活性从 5.87 mg·g⁻¹逐渐增加到 6.20 mg·g⁻¹和 7.11 mg·g⁻¹,但增加效应并不显著(P>0.05);根际区 蛋白酶活性SN和SHN处理较S处理分别显著增加了 36.1%和44.8%。对于江苏常州土壤,与S处理相比, SN处理显著降低了水稻非根际区蛋白酶活性27.0%, 但并未改变根际区蛋白酶活性:而SHN处理显著提 高了水稻非根际区和根际区蛋白酶活性83.9%~ 90.2%。以上研究结果表明,与非根际土壤相比,秸 秆还田配施氮肥显著提高了江苏泰州根际土壤蛋白 酶活性;对于江苏常州稻田,与非根际土壤相比,仅秸 秆还田与常规氮肥配施显著提高了水稻根际土壤蛋 白酶活性,而高量氮肥施用条件下根际和非根际区土 壤蛋白酶活性并无显著性差异。

土壤脲酶可以催化尿素释放氨以供作物吸收利用。由图2c和图2d可知,与非根际区土壤相比,3种处理下两种类型稻田根际区脲酶活性提高了13.4%~

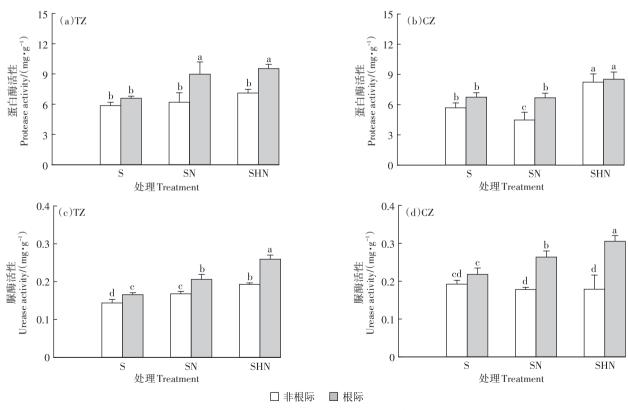


图 2 秸秆还田配施氮肥对两种类型稻田非根际和根际区土壤蛋白酶和脲酶活性的影响

Figure 2 Effects of straw return with different amounts of nitrogen fertilizer addition on the activities of protease and urease in non-rhizosphere and rhizosphere of rice from both paddy soils

2268 农业环境科学学报 第42卷第10期 MER

2.3 土壤反硝化酶活性

70.9%, 仅江苏常州S处理根际土壤脲酶活性增加效 应不显著。随着氮肥施用量的增加,江苏泰州非根际 区土壤脲酶活性从 0.14 mg·g⁻¹逐渐增加到 0.17 mg· g⁻¹和 0.19 mg·g⁻¹;根际土脲酶活性从 0.17 mg·g⁻¹逐渐 增加到 0.21 mg·g⁻¹和 0.26 mg·g⁻¹。对于江苏常州稻 田,随着氮肥施用量的增加,非根际土壤脲酶活性并 无显著性变化,约0.18~0.19 mg·g⁻¹,而根际土脲酶活 性从 0.22 mg·g⁻¹逐渐增加到 0.26 mg·g⁻¹和 0.31 mg· g-1。以上研究结果表明,随着氮肥施用量的增加,江 苏泰州根际区和非根际区以及江苏常州根际区土壤 脲酶活性均逐渐增大。此外,两种类型稻田根际区土 壤脲酶活性显著高于非根际土壤。

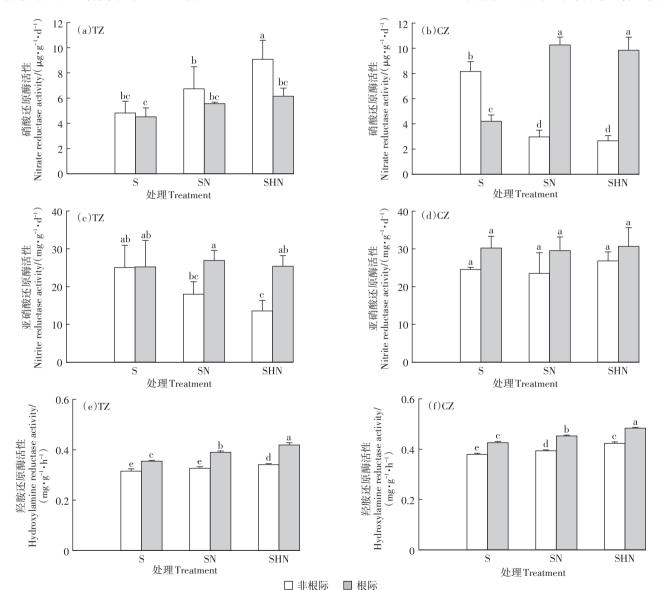


Figure 3 Effects of straw return with different amounts of nitrogen fertilizer addition on the activities of denitrifying enzyme in non-rhizosphere and rhizosphere of rice from both paddy soils

图 3 秸秆还田配施氮肥对两种类型稻田非根际和根际区土壤反硝化酶活性的影响

硝酸还原酶是硝酸盐次第还原过程第一步反应 的限速酶,通常在缺氧、厌氧环境中启动,催化硝酸盐 (NO3)还原为亚硝酸盐(NO2)。不同处理下两种类型 稻田根际和非根际区土壤硝酸还原酶活性见图 3a 和 图 3b。由图 3a 和 3b 可知,3 种处理下,与非根际区土 壤相比,S和SN处理下江苏泰州根际土壤硝酸还原 酶活性虽有所降低,但并不显著;而SHN处理下江苏 泰州根际土壤硝酸还原酶活性显著降低了32.3%。 类似地,S处理下江苏常州根际土壤硝酸还原酶活性 也显著低于非根际区,酶活性降低了48.5%,而SN和 SHN处理下根际土壤硝酸还原酶活性分别显著提高

了243.8%和270.5%。随着氮肥施用量的增加,江苏 泰州稻田非根际区硝酸还原酶活性呈现增加的趋势, 其中SHN处理显著增加了88.2%,而根际区硝酸还原 酶活性并没有显著性变化:对于江苏常州稻田,SN和 SHN处理下非根际区硝酸还原酶活性显著降低了 63.4%和67.2%,而根际区硝酸还原酶活性显著增加 了145.0%和134.0%。以上研究结果表明,随着氮肥 施用量的增加,江苏泰州稻田非根际区土壤硝酸还原 酶活性逐渐增加,而根际区硝酸还原酶活性并无显著 性变化,因此,秸秆还田与高量氮肥配施条件下江苏 泰州稻田根际区土壤脲酶活性显著低于非根际区。 而对于江苏常州土壤,秸秆还田与氮肥配施下稻田根 际区土壤硝酸还原酶活性显著高于非根际区。

亚硝酸还原酶是土壤系统中将反硝化中间产物 NO2还原成一氧化氮(NO)的关键酶。不同处理下两 种类型稻田根际和非根际区土壤亚硝酸还原酶活性 见图3c和图3d。由图3c可知,与非根际土壤相比,S 处理并未显著改变江苏泰州稻田根际土壤亚硝酸还 原酶活性;随着氮肥施用量的增加,江苏泰州稻田非 根际区土壤亚硝酸还原酶活性从25.0 mg·g⁻¹·d⁻¹逐渐 降低到18.0 mg·g⁻¹·d⁻¹和13.6 mg·g⁻¹·d⁻¹,而根际区土 壤亚硝酸还原酶活性无显著变化,为25.2~26.9 mg· g-1·d-1。然而,对于江苏常州稻田,各处理条件下根 际与非根际区土壤亚硝酸还原酶活性之间均无显著 性差异,维持在23.5~30.6 mg·g⁻¹·d⁻¹;同时,随着氮肥 施用量的增加,根际/非根际区土壤亚硝酸还原酶活 性也无显著变化(图 3d)。以上研究结果表明,秸秆 还田条件下,无论氮肥施用与否,江苏常州稻田根际 区与非根际区亚硝酸还原酶活性之间并不显著性差 异。类似地,与非根际土壤相比,秸秆直接还田并未 改变江苏泰州稻田根际区土壤亚硝酸还原酶活性,而 秸秆与氮肥配施条件下,江苏泰州根际区土壤亚硝酸 还原酶活性显著高于非根际区。

羟胺还原酶是将土壤中氮代谢(NO3的异化反硝 化或者氨的氧化)过程中形成的中间产物羟胺还原成 氨的过程,因此,土壤羟胺还原酶活性的强弱影响到 土壤氮代谢过程中氮素的氨挥发损失以及温室气体 的排放。不同处理下两种类型稻田根际和非根际区 土壤羟胺还原酶活性见图 3e 和图 3f。由图 3e 可知, 与非根际区土壤相比,3种处理下两种类型稻田根际 区羟胺还原酶活性显著提高了12.4%~23.0%(P< 0.05);随着氮肥施用量的增加,江苏泰州非根际区土 壤羟胺还原酶活性逐渐增加,其中SHN处理显著增

加了8.3%;根际区土壤羟胺还原酶活性显著增加了 9.9%~18.0%(P<0.05)。对于江苏常州稻田,与S处理 相比,SN处理非根际区土壤羟胺还原酶活性显著增加 了4.0%,SHN处理显著增加了11.6%(P<0.05);根际区 土壤羟胺还原酶活性显著增加了6.3%~13.6%(P<0.05) (图 3f)。以上研究结果表明,随着氮肥施用量的增 加,两种类型稻田根际区/非根际区土壤羟胺还原酶 活性均逐渐增大,而且根际区土壤羟胺还原酶活性显 著高于非根际区。

2.4 土壤酶活性的变化

为了进一步表征土壤6种类型酶活性的变化,基 于主成分分析(PCoA)显示,土壤酶活性在两种类型 土壤之间、根际与非根际区土壤之间以及氮肥施用与 未施用处理之间都存在一定程度的差异性(图 4a~图 4c)。此外,氮肥施用也显著改变了非根际/根际区土 壤酶活性(图4d和图4e)。

方差分解分析(VPA)显示,土壤类型(TZ vs CZ)、 根际效应(根际区vs非根际区)以及施氮效应(氮肥施 用vs未施用)3种因素共解释了土壤酶活性变异量的 63.5%, 其分别单独解释了土壤酶活性变异量的 9.9%、32.8%、20.8%(图 5a)。同时,根际效应、施氮效 应与土壤酶活性的相关性分析显示,根际效应与土壤 脱氢酶、蛋白酶、脲酶、羟胺还原酶活性显著正相关, 而施氮效应除与以上酶活性呈显著正相关外,还与土 壤硝酸还原酶活性显著负相关(图5b)。

3 讨论

3.1 氮肥施用对稻田土壤酶活性的影响

氮素是作物生长和微生物繁殖必需的养分元素, 水稻-土壤系统中水稻与微生物对氮素具有竞争关 系,同时微生物也能够通过分泌碳氮转化相关的酶来 分解土壤有机质中的氮素,从而实现对氮素的反调 控,达到土壤微生态物质平衡,满足水稻、微生物生长 的计量学需求,因而氮肥施用是导致土壤酶活性变化 的重要因素[21-22]。本研究发现,氮肥施用对土壤酶活 性变异的解释量达到20.8%。氮肥施用显著改变了 根际和非根际区土壤酶活性,而且显著提高了两种类 型土壤非根际区和根际区脱氢酶和羟胺还原酶活性、 江苏泰州非根际区和根际区土壤脲酶活性,以及江苏 常州非根际区和根际区土壤蛋白酶活性(高量氮肥施 用条件下)。同时,氮肥效应与土壤脱氢酶、蛋白酶、 脲酶和羟胺还原酶活性呈显著的正相关性,这很可能 是由于氮肥施用可刺激土壤微生物生长,进而分泌更 **2270** 农业环境科学学报 第42卷第10期

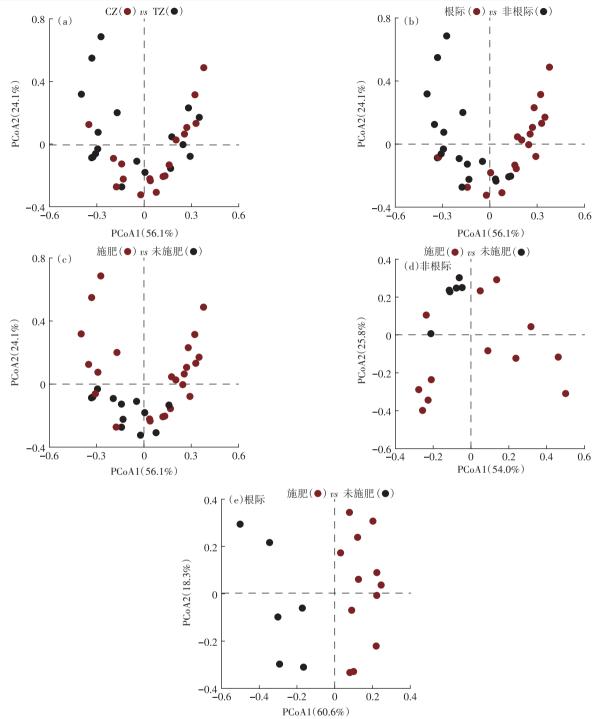


图 4 秸秆还田与不同量氮肥配施条件下两种类型稻田非根际和根际土壤酶活性的主成分分析

Figure 4 Principal Components Analysis (PCoA) in non-rhizosphere and rhizosphere of both paddy soils with the application of straw return and different amounts of nitrogen fertilizer

多的土壤酶,提高了土壤微生物活性[23]。

然而,非根际与根际区土壤酶活性对氮肥施用响应存在显著性差异。已有研究表明,非根际区土壤酶活性主要受到土壤微生物的影响,根际区土壤酶活性除了受土壤微生物的影响外,还与根系分泌物及作物

生长密切相关[24-25]。针对江苏泰州根际土壤,本研究发现,与未施用氮肥土壤相比,氮肥施用显著提高了根际土壤蛋白酶活性。这很可能是由于根际区氮需求比较高,氮肥施用条件下土壤蛋白酶分泌的增加,可促进分解土壤有机质中的氮素,满足根际区作物和

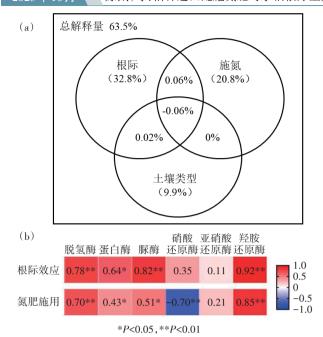


图 5 土壤类型、根际与施氮效应对土壤酶活性变异的解释量及根际效应、氮肥施用与土壤酶活性的相关性

Figure 5 Explaining proportion of soil type, rhizosphere and nitrogen fertilizer on the change of soil enzyme activity and correlation analysis among rhizosphere, nitrogen fertilizer and soil enzyme activities

微生物的需要。与根际土壤不同,非根际区需氮量较少,无需更多蛋白酶来提高土壤氮含量,因此,氮肥施用下江苏泰州非根际区土壤蛋白酶活性并无显著性变化。然而,根际区土壤氮素可能主要供水稻吸收利用,而对反硝化菌生长并无显著影响,因而,氮肥施用条件下,硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性在根际土壤中并无显著变化,而非根际区氮肥施用下脲酶活性的提高为土壤硝酸还原菌提供了氮源,进而提高了非根际区硝酸还原酶活性。

非根际与根际区土壤酶活性对氮肥施用响应的差异性也与土壤类型密切相关。与江苏泰州土壤不同,江苏常州土壤含氮量比较高,很可能满足了非根际区土壤微生物生长的需求。因此,氮肥施用下非根际土壤区中脲酶活性并无显著性变化。同时,江苏常州土壤较高的含氮量,不仅满足了根际区作物高氮需求,同时也可为土壤硝酸还原菌提供更多的硝态氮,进而提高了根际区硝酸酶活性。然而,非根际区土壤中硝酸还原酶活性显著降低很可能是由于氮肥施用并未影响非根际区脲酶活性,进而并不能增加其硝态氮含量,随着水稻根际区硝态氮的不断消耗,非根际区硝态氮含量也会有所降低,氮肥施用条件下非根际区硝态氮含量也会有所降低,氮肥施用条件下非根际

区土壤中硝酸还原酶活性因而也有所降低。

3.2 根际效应对稻田土壤酶活性的影响

土壤-微生物-作物根系互作系统组成的根际微 环境,是土壤养分转化利用的热点区域,而土壤酶是 其关键的中间介质[26-27]。本研究通过对比根际与非 根际之间土壤酶活性的变化,发现根际效应对土壤酶 活性变化的解释率最高,达到了32.8%(图5a),两种 类型稻田根际区土壤脱氢酶活性、脲酶活性和羟胺还 原酶活性都显著高于非根际区(图1、图2c和图2d、图 3e和图3f), 且根际效应与土壤脱氢酶性、蛋白酶、脲 酶和羟胺还原酶活性呈现显著的正相关性(图 5b)。 根际能产生这种效应可能主要有以下两方面原因:一 方面,植物根系不断分泌各种代谢产物,包括有机酸、 糖类、氨基酸、黄酮、生长素、核苷酸、酚酸类、脂肪酸 和渊醇、酶类等,其可为微生物生长提供营养;另一方 面,根表组织陆续死亡和脱落,改良了周围土壤的物 理性质和化学性质,丰富了土壤有机质,从而为微生 物的大量增殖创造了条件,使植物根际具有很高的酶 活性[28]。

然而,根际区土壤酶活性并不都是显著高于非根际区。已有研究表明,水稻根际区是硝化-反硝化反应的重要热区。由于水稻根系分泌氧气有利于根际土壤硝化作用,从而产生更多硝酸根,为反硝化微生物提供更多的氮源,进而提高土壤反硝化酶的活性^[29-30]。然而,水稻在生长过程中不断吸收同化NH2和NO3,与非根际土壤相比,根际区土壤硝态氮含量逐渐降低,可能会导致硝酸还原酶活性的降低。类似地,我们也发现,秸秆还田与不同量氮肥配施条件下,与非根际土壤相比,江苏泰州稻田根际区土壤硝酸还原酶活性较低(图3)。与江苏泰州土壤类似,秸秆直接还田条件下,江苏常州稻田根际区土壤硝酸还原酶活性也显著低于非根际区(图3)。

研究还发现,不同类型土壤中根际区酶活性对根际效应的响应存在显著性差异。与江苏泰州土壤相比,秸秆还田与氮肥配施下江苏常州稻田根际区土壤硝酸还原酶活性显著高于非根际区,这很可能是由于与江苏泰州土壤相比,江苏常州稻田具有较高的脲酶活性,而且根际区脲酶活性显著高于非根际区(S处理除外),氮肥施用条件下,具有较高脲酶活性的根际土可产生较多的铵态氮,进而可为土壤硝酸还原酶提供更多的硝态氮。而秸秆与氮肥配施条件下,江苏泰州根际区土壤较高的亚硝酸还原酶活性很可能与根际区土壤NO;密切相关¹⁸¹。此外已有研究发现,由于

1日 2272 农业环境科学学报 第 42 卷第 10 期

根际效应,与非根际土壤相比,根际区蛋白酶活性更高。然而,本研究发现,秸秆还田且不施氮肥条件下水稻成熟期根际区与非根际区江苏泰州土壤蛋白酶活性并无显著性差异,这很可能与土壤氮含量相关。由于水稻生长后期需氮量并不高,且不施氮状况下土壤较低的氮含量进一步限制了蛋白酶活性。而秸秆还田配施氮肥增加了土壤氮含量,很可能刺激了土壤微生物生长,尤其是微生物活性较高的根际区,从而增加了土壤蛋白酶的来源,因此,江苏泰州根际土壤蛋白酶活性得到显著提高。而对于江苏常州稻田,土壤较高的含氮量很可能足够满足作物氮需求,无需根际土壤蛋白酶提供更多的氮源,因此,即使是在高量施用氮肥的条件下,根际与非根际两者之间土壤蛋白酶活性也并无显著差异。

4 结论

- (1)水稻根际区作为土壤酶活性的活跃区域,其脱氢酶、脲酶和羟胺还原酶活性显著高于非根际区,从而有利于提高土壤肥力。
- (2)与秸秆单独还田相比,秸秆还田与氮肥配施显著提高了两种类型土壤根际区脱氢酶和羟胺还原酶活性、江苏泰州根际区脲酶活性,以及江苏常州根际区蛋白酶活性(高量氮肥施用条件下)。因此,秸秆还田与氮肥配施可进一步提高根际土壤酶活性,维持土壤肥力,满足水稻生长的需求。
- (3)随着氮肥施用量的增大,土壤酶活性会显著提高,但同时也会造成严重的氮素损失,引起农业面源污染问题。因此,保证粮食产量前提下,秸秆还田如何减量配施氮肥仍需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 袁玲, 郑兰君. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4):300-306. YUAN L, ZHENG L J. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizen Science*, 1997, 3(4):300-306.
- [2] PUGLISI E, AAMD R E, RAO M A, et al. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(7):1673-1681.
- [3] DINESH R, SRINIVASAN V, HAMZA S, et al. Short-term effects of nutrient management regimes on biochemical and microbial properties in soils under rainfed ginger (*Zingiber officinale Rosc.*) [J]. *Geoderma*, 2012, 173/174:192-198.
- [4] ZAGAL E, MUÑOZ C, QUIROZ M, et al. Sensitivity of early indicators for evaluating quality changes in soil organic matter[J]. *Geoderma*,

2009, 151(3/4):191-198.

- [5] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 等. 长期培肥黑土脱氢酶活性动态变化及 其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(5):679-683. LI D P, WU Z J, CHEN L J, et al. Dynamics of dehydrogenase activity in a long-term fertilized black soil and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil* Science, 2005, 36(5):679-683.
- [6] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1983:291-297. GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1983:291-297.
- [7] GEISSELER D, HORWATH W R, JOERGENSEN R G, et al. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms: a review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 42(12):2058–2067.
- [8] 陈志刚, 陈蕾, 陈瀚翔, 等. 水稻根际土壤反硝化酶活性对水分调控的响应[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(5): 21-25. CHEN Z G, CHEN L, CHEN H X, et al. Denitrification enzyme activity in rice rhizosphere soil in response to water regulation[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(5): 21-25.
- [9] 史奕, 黄国宏. 土壤中反硝化酶活性变化与 N₂O 排放的关系[J]. 应 用生态学报, 1999, 10(3):329-331. SHI Y, HUANG G H. Relationship between soil denitrifying enzyme activities and N₂O emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(3):329-331.
- [10] 夏雪, 谷洁, 车升国, 等. 施氮水平对塿土微生物群落和酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8):1618-1627. XIA X, GU J, CHE S G, et al. Effects of nitrogen application rates on microbial community and enzyme activities in lou soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(8):1618-1627.
- [11] 孙锋, 赵灿灿, 李江涛, 等. 与碳氮循环相关的土壤酶活性对施用氮磷肥的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4):1016-1023. SUN F, ZHAO C C, LI J T, et al. Response of soil enzyme activities in soil carbon and nitrogen cycles to the application of nitrogen and phosphate fertilizer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(4):1016-1023.
- [12] RAZAVI B S, ZAREBANADKOUKI M, BLAGODATSKAYA E, et al. Rhizosphere shape of lentil and maize: Spatial distribution of enzyme activities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 96:229–237.
- [13] WANG N, LUO J L, JUHASZ A L, et al. Straw decreased N₂O emissions from flooded paddy soils via altering denitrifying bacterial community compositions and soil organic carbon fractions[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2020, 96(5):fiaa046.
- [14] 朱冰莹, 马娜娜, 余德贵. 稻麦两熟系统产量对秸秆还田的响应: 基于 Meta 分析[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 376-385. ZHU B Y, MA N N, YU D G. Variation in yield response to straw incorporation in rice-wheat rotation system: Meta-analysis[J]. *Journal* of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(3): 376-385.
- [15] 程励励, 文启孝, 李洪. 稻草还田对土壤氮素和水稻产量的影响 [J]. 土壤, 1992, 14(5):234-238. CHENG L L, WEN Q X, LI H. Effect of straw mulching on soil nitrogen and rice yield[J]. Soils, 1992, 14(5):234-238.
- [16] 陈冬林. 多熟复种稻田土壤耕作和秸秆还田的效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009: 22. CHEN D L. Studies on effect of soil tillage and straw returning to field in multi-cropping paddy field[D].

Changsha: Hunan Agricultural University, 2009:22.

- [17] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1):151-157. YANG B J, HUANG G Q, QIAN H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1):151-157.
- [18] 魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 等. 水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应[J]. 环境科学, 2017, 38(8):3489-3496. WEI L, TANG Z Z, ZHU Z K, et al. Responses of extracellular enzymes to nitrogen application in rice of various ages with rhizosphere and bulk soil[J]. Environmental Science, 2017, 38(8):3489-3496.
- [19] VALÉ M, NGUYEN C, DAMBRINE E, et al. Microbial activity in the rhizosphere soil of six herbaceous species cultivated in a greenhouse is correlated with shoot biomass and root C concentrations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(12):2329-2333.
- [20] 章家恩. 生态学常用试验研究方法与技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006:162-169. ZHANG J E. Common experimental research methods and techniques in ecology[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2006:162-169.
- [21] 李新悦, 王昌全, 李冰, 等. 控释掺混氮肥对稻麦土壤微生物及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 1:35-43. LI X Y, WANG C Q, LI B, et al. Effect of controlled release blend bulk urea on soil microorganism and enzyme activity in rice and wheat rotation[J]. China Soil and Ferilizer, 2019, 1:35-43.
- [22] 李威, 成永旭, 孙颖, 等. 秸秆还田配施氮肥对冬春季稻虾田水质、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7):1051-1060. LI W, CHENG Y X, SUN Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer and returning straw on aquaculture water, soil nutrients, and enzyme activity in rice-crayfish fields during winter and spring[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7):1051-1060.
- [23] 王倩倩, 尧水红, 张斌, 等. 秸秆配施氮肥还田对水稻土酶活性的 影响 [J]. 土壤, 2017, 49 (1): 19-26. WANG Q Q, RAO S H,

- ZHANG B, et al. Effects of rice straw returning timing combined with nitrogen fertilization on enzyme activities of paddy soil[J]. *Soil*, 2017, 49(1):19–26.
- [24] FALCHINI L, NAUMOVA N, KUIKMAN P J, et al. CO₂ evolution and denaturing gradient gel electrophoresis profiles of bacterial communities in soil following addition of low molecular weight substrates to simulate root exudation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35 (6):775-782.
- [25] LANDI L, VALORI F, ASCHER J, et al. Root exudate effects on the bacterial communities, CO₂ evolution, nitrogen transformations and ATP content of rhizosphere and bulk soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(3):509-516.
- [26] RICHARDSON A, BAREA J, MCNEILL A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. *Plant and Soil*, 2009:321(12):305-339.
- [27] 李欣, 陈小华, 顾海蓉, 等. 典型农田土壤酶活性分布特征及影响 因素分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1634-1641. LI X, CHEN X H, GU H R, et al. Distribution characteristics and influencing factors of enzyme activities in typical farmland soils[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2021, 30(8):1634-1641.
- [28] BAUDOIN E, BENIZRI E, GUCKERT A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(9):1183–1192.
- [29] ARMSTRON W. Radial oxygen losses from intact rice roots as affected by distance from the apex, respiration and waterlogging[J]. *Physiologia Plantarum*, 1971, 25(2):192–197.
- [30] SAVANT N, DE DATTA S. Nitrogen transformations in wetland rice soils[J]. Advances in Agronomy, 1982, 35:241–302.
- [31] 李振方, 杨燕秋, 谢冬凤, 等. 连作条件下地黄药用品质及土壤微生态特性分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2):217-224. LI Z F, YANG Y Q, XIE D F, et al. Effects of continuous cropping on the quality of *Rehmannia glutinosa* L. and soil micro-ecology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2):217-224.