

玉米-水稻轮作和水稻连作土壤根际和非根际氮含量及酶活性

吴杨潇影, 姜振辉, 杨京平*, 林景东, 刘益珍
(浙江大学环境与资源学院, 浙江杭州 310058)

摘要: 【目的】以水稻连作为对照, 研究玉米-水稻水旱轮作模式对稻田作物根际和非根际土壤氮素含量及酶活性的影响, 为稻田系统玉米-水稻轮作对土壤氮素转化与稻田土壤质量的影响提供科学依据。【方法】利用根际袋盆栽试验进行水稻连作与玉米-水稻轮作, 在玉米喇叭口期、抽穗期及成熟期, 水稻分蘖期、孕穗期及成熟期分别采取根际与非根际土样, 测定土壤铵态氮、硝态氮、全氮含量与脲酶、硝酸还原酶活性变化。【结果】两种种植模式及作物生育期对土壤氮素含量和酶活性均有显著影响。不同种植模式下土壤酶活性变化趋势基本相同。与水稻连作相比, 玉米-水稻轮作土壤铵态氮减少了 24.7%; 土壤硝态氮含量增加了 153.4%, 主要表现在第一季。与水稻连作相比, 玉米-水稻轮作条件下两季作物成熟期土壤全氮含量降低, 土壤脲酶活性整体提高 24.3%, 土壤硝酸还原酶活性整体降低 34.6%。水旱轮作对各个指标的影响可持续到第二季。根际土壤铵态氮含量及脲酶活性整体低于非根际土壤, 玉米根际土壤硝态氮含量低于非根际, 水稻根际土壤硝态氮含量高于非根际土壤, 根际土壤硝酸还原酶活性高于非根际土壤。【结论】在本试验中, 轮作在第一季对土壤氮素及酶活性的影响可持续至第二季。与水稻连作相比, 玉米-水稻轮作可以提高作物根际与非根际土壤的脲酶活性及硝态氮含量, 有利于氮素有效性的提高。

关键词: 种植模式; 玉米-水稻轮作; 水稻连作; 根际; 非根际; 氮素; 土壤酶活性

Nitrogen content and enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere soils of paddy field under maize-rice rotation and rice continuous mono-cropping

WU Yang-xiao-ying, JIANG Zhen-hui, YANG Jing-ping*, LIN Jing-dong, LIU Yi-zhen
(College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: 【Objectives】 We investigated the effect of maize-rice rotation on soil nitrogen content and enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere using rice-rice as a control, to provide the scientific understanding of maize-rice rotation on the transformation of soil nitrogen and soil quality. 【Methods】 Rice-rice and maize-rice were performed using the root pocket pouch test. Soil samples were taken from the soil rhizosphere and non-rhizosphere at maize stages of trumpet, heading and maturity, and rice stages of tillering, booting and maturity to quantify ammonium, nitrate, total nitrogen, and urease, and nitrate reductase activities in the two rotations. 【Results】 The two different rotations and crop growth periods had significant effects on soil nitrogen content and enzyme activities. The changes in the enzyme activity under the two rotations were basically similar. Compared with the rice continuous mono-cropping, the ammonium nitrogen in the maize-rice rotation decreased by 24.7% and the soil nitrate nitrogen content increased by 153.4%, which mainly happened in the first season. The total nitrogen content was lower at the end of the rotation. Soil urease activity in the maize-rice rotation was 24.3% higher while soil nitrate reductase activity was 34.6% lower than those of the rice-rice rotation. In addition, the impacts of maize-rice rotation on other indicators could sustain to the next crop. Ammonium nitrogen content and urease activity in the rhizosphere soil were lower than those in the non-rhizosphere. Nitrate content in the

收稿日期: 2018-04-28 接受日期: 2018-06-14

基金项目: 国家科技部重大研发计划(2016YFD0300203-4)资助。

联系方式: 吴杨潇影 E-mail: xiaosaxiaoyinga@163.com; * 通信作者 杨京平 E-mail: jpyang@zju.edu.cn

maize rhizosphere was lower than that in the non-rhizosphere. In contrast, nitrate nitrogen content in the rice rhizosphere was higher than that in the non-rhizosphere. Nitrate reductase in the rhizosphere was higher than that in the non-rhizosphere. **[Conclusions]** The impacts of maize-rice rotation on soil nitrogen content and enzyme activities in the first season could sustain to the second season. Compared with the rice continuous mono-cropping, the nitrate nitrogen content and soil urease activity were higher in the maize-rice rotation, which could improve nitrogen availability.

Key words: cropping system; maize-rice rotation; rice continuous mono-cropping; rhizosphere; non-rhizosphere; nitrogen; soil enzyme activity

土壤中氮素是限制作物生长的首要因素^[1],也是土壤质量的重要指标,农业生产中常施用一定量的氮肥来保证作物产量。土壤中的酶是土壤养分转化吸收的重要载体^[2],与土壤微生物活动密切相关,直接影响土壤的生物学及肥力性质,是土壤质量变化的指示剂^[3],其中土壤脲酶与硝酸还原酶活性对土壤氮素循环有重要影响^[4]。

根际是作物与土壤联系比较紧密的位置,是土壤化学及生物学性质均比较活跃的场所^[5],了解根际土壤氮素转化循环可以更好地理解氮素有效性及作物与土壤氮素之间的相互影响^[6]。大量研究指出,根际与非根际土壤氮素含量及酶活性均存在差异^[5,7-8]。

稻田系统水稻生长期间长期的淹水条件会抑制稻田土壤微生物呼吸、减少微生物数量,从而降低土壤团聚体的分解速率等^[9],使土壤质量下降。水旱轮作可通过改变水稻连作土壤的通气性而影响土壤理化与生物学性质^[10],在此期间有氧和厌氧条件的转变会对土壤的氮素转化产生影响,例如有氧条件利于土壤有机氮的矿化从而促进氮素生物有效性的提高^[11]。目前研究较多的水旱轮作系统有小麦-水稻^[12-14]、油菜-水稻^[15-16]等。近年来,玉米-水稻轮作系统逐渐得到重视^[17],其在改善土壤环境、节约水资源的前提下可以满足牲畜对饲料日益增长的需要,因此在南亚地区的种植区域日渐普及^[11]。

目前,有关水旱轮作对土壤氮素迁移转化的研究较多,但玉米-水稻轮作体系对稻田土壤影响的研究还较少,且水旱轮作过程中根际与非根际土壤氮素含量及酶活性的动态变化尚不明确。因此,本研究以水稻连作为对照,利用根际袋盆栽试验研究玉米-水稻轮作对根际土壤氮素含量及酶活性的影响,明确水旱轮作条件下根际与非根际土壤氮素转化特点。本试验研究结果将为玉米-水稻轮作的生态功能提供相关过程及机理支撑,进一步为水旱轮作对稻田土壤质量的积极作用提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

供试土壤取自浙江省杭州市农业科学研究院试验基地稻田(30.13°N、120.16°E),该地区属亚热带季风气候,年平均气温 17℃,年平均降雨量约为 1400 mm,土壤质地为粉粘壤土。采集试验基地耕作层(0—20 cm)土壤风干后过 4 mm 筛备用。土壤基本理化性质如下:总有机碳为 10.5 g/kg, pH 为 6.71,全氮为 1.76 g/kg,碳氮比为 9.10,速效钾为 203 mg/kg,速效磷为 78.4 mg/kg。玉米供试品种为‘美玉(加甜糯)7号’,第一季与第二季的水稻供试品种分别为‘甬粳 115’及‘秀水 134’。

1.2 试验设计

试验在浙江大学网室内进行,采用底径 20 cm、上口直径 31 cm、高 27 cm 的塑料桶种植作物,在桶内放置 300 目(孔径 48 μm)的尼龙网(直径 8 cm、高 10 cm)作为根际袋,根际袋内为根际土,根际袋外为非根际土。每个桶内添加 7.50 kg 的土壤,并使根际袋内外土壤在同一高度。在第一季作物种植前,添加去离子水维持土壤含水量为田间持水量的 60%,然后预培养一周。每桶施加 1.81 g (225 kg/hm² 纯氮) 尿素、0.78 g (60 kg/hm² P₂O₅) 过磷酸钙及 0.47 g (75 kg/hm² K₂O) 氯化钾肥,磷肥与钾肥全部基施,玉米氮肥 1/3 基施,2/3 在喇叭口期追施,水稻氮肥分 3 次以基肥:分蘖肥:孕穗肥为 3:4:3 施用。第一季选取饱满种子浸种培养 2 天后种植在根际袋中,第二季进行水稻移栽,每桶种植两穴水稻或两株玉米,进行水稻连作和玉米-水稻轮作,整个生育期管理与大田相似。试验从 2017 年 4 月开始,至 11 月结束,其中 4~7 月种植第一季作物,7~11 月种植第二季作物,第一季作物收获后淹水培养准备移栽第二季水稻。

分别在玉米喇叭口期、抽穗期及成熟期取样,

水稻分蘖期、孕穗期及成熟期取土壤样品, 每次采取破坏性取样, 每个处理 3 次重复。根际与非根际土壤分开取样保存, 一部分风干过 0.15 mm 筛用于测定土壤全氮、C/N 及酶活性, 一部分保存在 4℃ 冰箱中用于测定土壤铵态氮及硝态氮含量。

1.3 测定方法

土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 及硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 采用 SKALAR SAN++ 连续流动分析仪测定, 土壤全氮及 C/N 采用元素分析仪 (Vario MAX) 测定。土样加入试剂后, 采用靛酚蓝比色法^[18]测定脲酶活性; 采用苯磺酸-醋酸- α -萘胺比色法^[19]测定异化型硝酸还原酶活性。测定酶活性的试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据计算, Origin 9 进行图

形制作, SPSS 18.0 进行方差分析 (ANOVA) 及数据的显著性检验 (LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 玉米-水稻轮作和连作土壤根际和非根际氮含量

2.1.1 土壤铵态氮含量 由不同作物生育期对根际土壤铵态氮含量的影响 (图 1) 可知, 根际土壤铵态氮在两季均表现出逐渐增加的趋势, 第二季土壤铵态氮含量低于第一季。除在第一季喇叭口期/分蘖期及抽穗期/孕穗期两个种植体系 (轮作和连作) 间存在显著性差异外, 其余时期差异不显著。非根际土壤铵态氮含量同时受种植模式与生育期的影响 (表 1), 种植模式对其影响可持续两季, 第一季含量变化较为平缓, 第二季先增加后降低, 其中第二季孕穗期

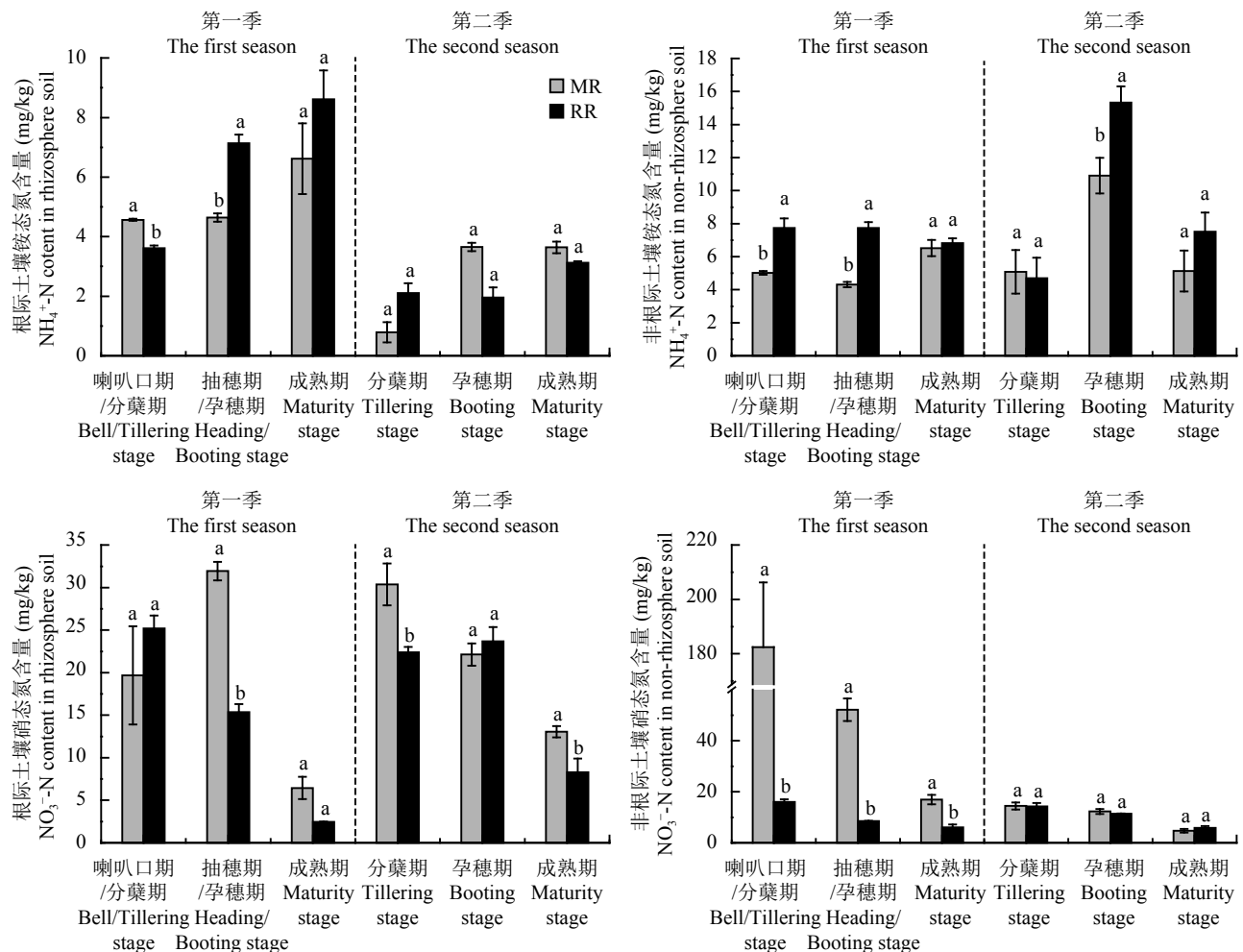


图 1 两种植植体系下不同生育期玉米、水稻根际与非根际土壤铵态氮及硝态氮含量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in rhizosphere and non-rhizosphere soils of maize and rice with different growth stages under two planting patterns

[注 (Note): MR—玉米-水稻轮作 Maize-rice rotation; RR—水稻连作 Rice continuous mono-cropping; 方柱上不同字母表示同一生育期内不同处理间在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars mean significant difference among treatments at the 0.05 level.]

表 1 种植模式及不同生育期对根际和非根际土壤氮含量及酶活性影响的方差分析 (*P*)

Table 1 Two-way ANOVA on the effects of cropping patterns and growth stages on nitrogen content and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils

土壤 Soil	变因 Variable	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase
根际 Rhizosphere	种植模式 Planting pattern (A)	0.164	<0.001	<0.001	<0.05
	生育期 Growth stage (B)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A × B	<0.01	<0.001	<0.001	0.578
非根际 Non-rhizosphere	种植模式 Planting pattern (A)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	生育期 Growth stage (B)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.01
	A × B	0.088	<0.001	<0.001	0.093

非根际土壤铵态氮含量最高。在第一季喇叭口期/分蘖期和抽穗期/孕穗期及第二季孕穗期水稻连作土壤非根际铵态氮显著高于轮作体系，而在其余时期两个种植体系间差异不显著。整体来说，玉米-水稻轮作处理下土壤铵态氮含量较水稻连作低 24.7%，其中根际土壤比水稻连作低 11.7%，非根际土壤比 RR 低 30.9%。水稻土壤铵态氮含量在第一季分蘖期与第二季孕穗期及成熟期表现为根际低于非根际，而玉米种植期间根际与非根际土壤的铵态氮含量差异并不显著 (表 2)。

2.1.2 土壤硝态氮含量 种植模式与生育期对根际和非根际土壤硝态氮含量均有显著影响 (表 1)。除玉米抽穗期根际土壤硝态氮含量增加之外，根际与非根际土壤硝态氮含量在两季均呈逐渐降低的趋势 (图 1)，第二季变化比第一季平缓。根际土壤硝态氮

含量在第一季抽穗期/孕穗期及第二季分蘖期与成熟期表现为 MR > RR，其余时期差异不显著。非根际土壤硝态氮在第一季表现为 MR > RR，第二季差异不显著。即种植模式对根际土壤硝态氮含量的影响可持续到第二季，非根际没有此特征。整体来说，玉米-水稻轮作处理下土壤硝态氮含量较水稻连作高 153.4%，其中根际土壤比水稻连作高 21.2%，非根际土壤比水稻连作高 370.6%，且在第一季尤为明显。水稻种植期间根际土壤硝态氮含量在第二季分蘖期及孕穗期高于非根际，而玉米在整个生长期根际土壤硝态氮含量均低于非根际，两种作物表现出了相反的特征 (表 2)。

2.1.3 土壤全氮含量 表 3 显示，第二季结束后土壤全氮含量比第一季略有降低，C/N 略有升高。第一季水稻连作非根际土壤全氮含量最高，玉米-水稻

表 2 玉米-水稻轮作及水稻连作下各个指标根际与非根际之差 (根际-非根际)

Table 2 Difference between rhizosphere and non-rhizosphere (rhizosphere-non-rhizosphere) of each indicator under maize-rice rotation and rice continuous mono-cropping

处理 Treatment		第一季 The first season			第二季 The second season		
		喇叭口期/分蘖期 Trump/Tillering stage	抽穗期/孕穗期 Heading/Booting stage	成熟期 Maturity stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	成熟期 Maturity stage
		铵态氮 (mg/kg) NH ₄ ⁺ -N	MR	-0.45 ± 0.13	0.33 ± 0.25	-0.72 ± 0.36	-3.03 ± 0.58
	RR	-4.12 ± 0.48*	-0.60 ± 0.46	0.74 ± 0.27	-3.89 ± 0.23	-14.26 ± 0.42*	-4.38 ± 1.20*
硝态氮 (mg/kg) NO ₃ ⁻ -N	MR	-186.57 ± 6.59*	-20.20 ± 4.96*	-10.49 ± 1.06*	15.91 ± 2.01*	9.84 ± 1.87*	8.34 ± 1.23*
	RR	9.04 ± 1.63	6.87 ± 1.08	-3.38 ± 1.84	8.16 ± 1.41*	12.27 ± 1.62*	2.43 ± 0.90
脲酶 (U/g) Urease activity	MR	-1.60 ± 2.10	12.67 ± 2.19	-4.95 ± 1.14	-14.20 ± 1.53*	0.44 ± 0.44	-3.93 ± 0.00*
	RR	-6.56 ± 2.19	-8.74 ± 1.31	-4.52 ± 3.11	-1.31 ± 0.44	-7.00 ± 1.31*	3.28 ± 0.22
硝酸还原酶 Nitrate reductase activity [μmol/(g·d)]	MR	0.35 ± 0.30	1.20 ± 0.17*	1.38 ± 0.30	0.50 ± 0.17	0.71 ± 0.24	-0.95 ± 0.00*
	RR	0.43 ± 0.28	0.61 ± 0.49	0.92 ± 0.58	-0.61 ± 0.35	0.57 ± 0.06	-0.21 ± 0.64*

注 (Note): MR—玉米-水稻轮作 Maize-rice rotation; RR—水稻连作 Rice continuous mono-cropping; *代表各指标在根际与非根际间在 0.05 水平存在显著差异 Represents significant difference between the rhizosphere and non-rhizosphere soils at the 0.05 level.

表 3 不同种植模式下作物成熟期根际与非根际土壤全氮含量及碳氮比

Table 3 Total nitrogen content and C/N in rhizosphere and non-rhizosphere soils at maize or rice maturity stage under different cropping patterns

处理 Treatment	土壤 Soil	第一季 The first season		第二季 The second season	
		全氮 Total nitrogen (g/kg)	C/N	全氮 Total nitrogen (g/kg)	C/N
玉米-水稻轮作 MR	根际 Rhizosphere	1.47 ± 0.03 b	10.35 ± 0.11 a	1.41 ± 0.06 b	10.44 ± 0.03 a
	非根际 Non-rhizosphere	1.52 ± 0.02 b	9.99 ± 0.20 ab	1.47 ± 0.03 ab	10.07 ± 0.08 b
水稻-水稻连作 RR	根际 Rhizosphere	1.46 ± 0.03 b	10.14 ± 0.05 ab	1.55 ± 0.02 a	10.08 ± 0.05 b
	非根际 Non-rhizosphere	1.64 ± 0.05 a	9.90 ± 0.08 b	1.51 ± 0.03 ab	10.03 0.08 b

注 (Note): MR—玉米-水稻轮作 Maize-rice rotation; RR—水稻连作 Rice continuous mono-cropping; 表中的数值为平均值 ± 标准误 The values in the table are the mean ± standard error. 同列数据后不同小写字母表示差异在 0.05 水平达显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different at the 0.05 level.

轮作根际土壤最低, 两者差异达到显著水平; 第二季水稻连作根际土壤全氮含量最高, 玉米-水稻轮作根际土壤最低, 两者差异达到显著水平。两季均为玉米-水稻轮作根际土壤 C/N 最高, 水稻连作非根际土壤最低, 且两者差异达到显著水平。此外, 第一季成熟期水稻连作根际土壤全氮含量低于非根际, 第二季成熟期玉米-水稻轮作根际土壤 C/N 高于非根际。

2.2 玉米-水稻轮作和水稻连作土壤根际和非根际酶活性

2.2.1 土壤脲酶活性

脲酶可分解尿素, 对氮肥的转化和氮素的生物有效性有着重要影响。种植模式与生育期对根际与非根际土壤脲酶活性均有显著影响 (表 1)。根际与非根际土壤脲酶活性在第一季均表现为先增强后减弱, 在第二季较平稳 (图 2)。根际土壤脲酶活性在第一季抽穗期/孕穗期表现为 MR > RR, 第一季成熟期表现为 MR < RR, 第二季差异不显著。非根际土壤脲酶活性在第一季抽穗期/孕穗期和第二季分蘖期表现为 MR > RR, 在第一季成熟期表现为 MR < RR, 其余时期差异不显著。MR 处理下土壤脲酶活性较 RR 处理高 24.3%, 其中根际土壤比 RR 处理高 23.3%, 非根际土壤比 RR 高 24.9%。根际土壤脲酶活性在第二季显著低于非根际土壤 (表 2)。此外, 脲酶活性在第一季高于第二季 (图 2)。

2.2.2 土壤硝酸还原酶活性

土壤中的硝酸还原酶可将硝酸盐还原为亚硝酸盐。根际与非根际土壤硝酸还原酶活性均同时受种植模式与生育期的影响 (表 1), 种植模式对其影响可持续至第二季。根际土壤硝酸还原酶活性在两季表现为先升高后降低 (图 2)。除第二季成熟期外, 根际土壤硝酸还原酶活性表现为 MR < RR。非根际土壤硝酸还原酶活性在第一季含量较稳定, 第二季表现为先降低后升高。与根际

土壤相同, 除第二季成熟期之外, 非根际土壤硝酸还原酶活性表现为 MR < RR。MR 处理下土壤硝酸还原酶活性较 RR 处理低 34.6%, 其中根际土壤比 RR 低 27.2%, 非根际土壤比 RR 低 42.6%。根际土壤硝酸还原酶活性较非根际高 11.5%, 但受生育期的影响, 其在第一季抽穗期表现为根际高于非根际, 而在第二季成熟期表现为根际低于非根际 (表 2)。整体上第一季土壤硝酸还原酶活性高于第二季 (图 2)。

3 讨论

3.1 玉米-水稻轮作对土壤氮素含量的影响

水旱轮作会通过改变稻田土壤长期的厌氧环境而促进硝化菌生长^[20], Cao 等^[21]在对小麦—水稻体系的研究中指出, 小麦季的好氧环境利于硝化作用发生, 从而在土壤中积累大量的硝态氮。本试验结果表明与水稻连作相比, MR 处理下第一季土壤铵态氮减少了 26.2%, 第二季减少了 25.4%; 土壤硝态氮含量第一季增加了 322.5%, 第二季增加了 13.0% (图 1), 即玉米种植期间土壤硝态氮含量远高于水稻土壤, 说明种植玉米时的土壤环境利于硝化作用发生, 且这种影响在第二季水稻种植期间也有所体现, 表明第一季好氧条件对氮素硝化作用的影响可延续到第二季。

Schmidt-Rohr 等^[22]指出长期种植水稻的土壤氮含量较高, Takakai 等^[23]指出与大豆相比, 水稻种植期间的氮损失较小。本试验结果也显示第一季与第二季结束后玉米-水稻轮作土壤全氮含量均低于水稻连作, 这可能是因为水稻连作土壤中酰胺氮与芳香烃结合造成的, 虽然降低了氮素流失的风险, 但也不利于作物对氮素的吸收利用^[22]。

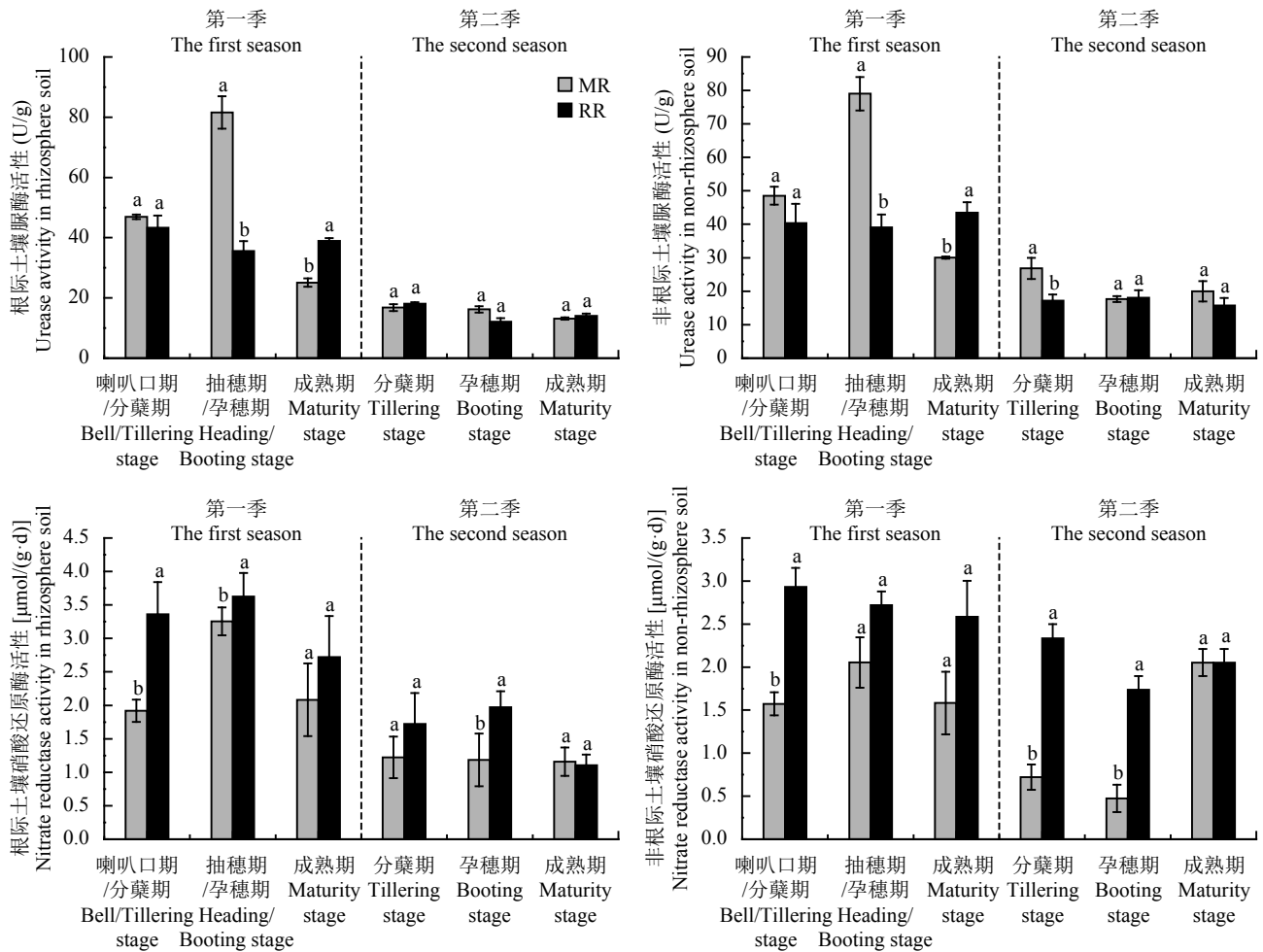


图 2 不同生育期玉米、水稻根际与非根际土壤脲酶和硝酸还原酶活性动态变化

Fig. 2 Dynamics of urease and nitrate reductase activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils of maize and rice with different growth stages

[注 (Note): MR—玉米-水稻轮作 Maize-rice rotation; RR—水稻连作 Rice continuous mono-cropping; 方柱上不同字母表示同一生育期内不同处理间在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars mean significant difference among treatments at the 0.05 level.]

3.2 玉米-水稻轮作对土壤酶活性的影响

脲酶参与尿素水解,是具有高度专一性的好氧酶^[24],对氮肥的有效性有重要影响,也有研究指出,土壤通气性可以改善作物根际环境,提高土壤脲酶活性^[25]。本试验结果表明,水旱轮作条件下土壤脲酶活性比水稻连作条件下高 24.3%(图 2)。除此之外,施用氮肥会提高土壤脲酶活性^[26],因此第一季作物种植期间也不应忽略玉米与水稻不同氮肥分配比例带来的影响,图 2 显示第一季成熟期连作脲酶活性高于轮作,可能是水稻最后一次施肥引起的。邢肖毅等^[27]研究指出土壤脲酶活性与铵态氮含量呈正相关,但本试验研究结果显示土壤铵态氮含量与脲酶相关性不显著,可能是因为土壤铵态氮含量也受土壤硝化作用与作物对氮素的吸收影响^[28]。谢泽宇等^[29]与王少先^[30]指出,土壤脲酶活性与土壤全氮含量及硝态氮含

量呈显著正相关,与本试验结果相似,说明脲酶在土壤氮循环中起着重要作用。赵鹏等^[31]研究指出土壤脲酶活性与作物需肥有相似规律,其在作物生长旺盛期活性增强利于作物养分的吸收,且肥力较高的土壤脲酶活性较强。图 2 显示,第一季抽穗期/孕穗期土壤脲酶活性最强,表明此时作物需肥较多,生长较旺盛。第二季土壤脲酶活性低于第一季,可能是因为本试验中第二季土壤肥力下降,导致脲酶活性降低。第二季非根际土壤孕穗期铵态氮含量较其他时期高,可能是土壤肥力降低导致作物对氮素的利用率下降及厌氧环境造成的。

土壤中的硝酸还原酶是反硝化过程中的重要催化剂^[32],玉米种植期间的好氧条件不利于反硝化作用的进行,而在稻田的厌氧条件下,反硝化作用得到加强,图 2 表明玉米-水稻轮作处理下硝酸还原酶活

性低于水稻连作处理, 其比连作低 34.6%。有研究指出厌氧条件下的反硝化作用是由底物控制的反应, 因此稻田土壤硝化作用大小是影响反硝化作用的重要因素^[33], 邢肖毅等^[27]也认为, 硝态氮浓度的增加会刺激反硝化过程的进行, 促进土壤硝酸还原酶活性的增强。本研究相关性分析结果也显示, 土壤硝态氮含量与硝酸还原酶活性呈显著正相关。土壤硝态氮含量与硝酸还原酶活性正相关, 但水稻连作土壤硝酸还原酶活性整体大于玉米-水稻轮作, 这种现象可能是玉米-水稻轮作情况下硝态氮对反硝化作用的促进与好氧条件对反硝化作用的抑制互相影响导致的。第二季土壤硝酸还原酶活性较第一季低, 可能与脲酶活性降低原因相同, 也是土壤肥力下降导致的。

3.3 根际与非根际土壤氮素含量及酶活性的比较

根际土壤铵态氮含量低于非根际, 这与董兆佳等^[34]的研究结果不同, 但与魏亮等^[35]的研究结果相似, 说明不同作物会对试验结果产生影响。出现这种现象的原因可能是作物与微生物之间存在养分竞争, 从而减少了铵态氮在根际土壤中的含量^[36]。玉米种植期间根际土壤硝态氮含量低于非根际的, 这与梁国鹏等^[9]的研究结果相似, 而水稻种植期间根际土壤硝态氮含量高于非根际的, 可能是因为玉米作为旱作物, 对硝态氮的吸收要比水稻更多。

根际土壤脲酶活性整体低于非根际, 这与邱权等^[37]的研究结果相似, 可能是由于土壤环境或作物对脲酶产生了抑制作用, 但缺乏明显证据, 需要进一步深入研究。根际土壤酶活性大多高于非根际土壤^[38-39], 本试验中根际土壤硝酸还原酶活性整体高于非根际, 这与大多数研究结果相似, 可能是因为根系分泌物为微生物提供了碳源, 促进了微生物的生长和酶活性的增强^[40]。

本试验属于盆栽试验, 与田间作物的生长环境不同。例如有研究表明风干土壤加水培养后会促进土壤微生物的生长, 但硝化菌在经历了风干后很难恢复到新鲜土水平, 因此试验中土壤的矿化率与硝化率会与在大田存在差异^[41]。未来可以在大田试验条件下研究水旱轮作对根际土壤氮素与酶活性的动态影响, 从而更好地阐明水旱轮作对土壤性质的影响机理。

4 结论

种植模式与作物生育期对土壤氮素含量与酶活性均有显著影响。与水稻连作相比, 玉米-水稻水旱轮作系统中作物根际与非根际土壤铵态氮含量降低了 24.7%, 硝态氮含量提高了 153.4%, 两季作物成

熟期全氮含量较低; 脲酶活性增强 24.3%, 硝酸还原酶活性降低 34.6%。根际铵态氮含量整体低于非根际, 玉米根际土壤硝态氮含量高于非根际, 水稻根际土壤硝态氮含量低于非根际, 根际土壤脲酶活性低于非根际, 根际土壤硝酸还原酶活性高于非根际。土壤硝态氮含量、全氮含量、脲酶活性与硝酸还原酶活性呈显著正相关。

参 考 文 献:

- [1] 刘建涛, 许靖, 孙志梅, 等. 氮素调控剂对不同类型土壤氮素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2901-2906.
Liu J T, Xu J, Sun Z M, *et al.* Effects of different nitrogen regulators on nitrogen transformation in different soil types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2901-2906.
- [2] 许超, 陈旭磊, 陈倩婷, 等. 水稻根际酶活性对土壤重金属污染的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 28-33.
Xu C, Chen X L, Chen Q T, *et al.* Response of enzymatic activities in the rhizosphere of rice (*Oryza sativa* L.) to heavy metal contamination[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 28-33.
- [3] 闫钟清, 齐玉春, 彭琴, 等. 降水和氮沉降增加对草地土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3019-3027.
Yan Z Q, Qi Y C, Peng Q, *et al.* Effects of increased precipitation and nitrogen deposition on soil enzyme activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3019-3027.
- [4] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 陈小容. 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3227-3235.
Yong T W, Yang W Y, Xiang D B, Chen X R. Effects of different planting modes on soil nitrogen transformation and related enzyme activities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3227-3235.
- [5] 梁国鹏, Albert H A, 吴会军, 等. 施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1917-1924.
Liang G P, Albert H A, Wu H J, *et al.* Soil nitrogen content and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere of summer maize under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1917-1924.
- [6] Hester E R, Harpenslager S F, van Diggelen J M H. Linking nitrogen load to the structure and function of wetland soil and rhizosphere microbial communities[J]. mSystems, 2018, 3(1): 1-14.
- [7] 张青青, 陈志强, 陈志彪, 马秀丽. 南方稀土矿区植物根际与非根际土壤碳氮含量与pH值变化[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 102-106.
Zhang Q Q, Chen Z Q, Chen Z B, Ma X L. Variations of carbon, nitrogen and pH value in rhizosphere and non- rhizosphere soil in rare earth mining area in southern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 102-106.
- [8] 詹媛媛, 薛梓瑜, 任伟, 周志宇. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 59-66.
Zhan Y Y, Xue Z Y, Ren W, Zhou Z Y. Characteristics of nitrogen

- content between rhizosphere and bulk soil under seven shrubs in arid desert area of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 59–66.
- [9] Chen Z, Ti J S, Chen F. Soil aggregates response to tillage and residue management in a double paddy rice soil of the Southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 109(2): 103–114.
- [10] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 等. 稻田轮作系统的生态学分析[J]. 土壤学报, 2006, 26(4): 1159–1164.
Huang G Q, Xiong Y M, Qian H Y, *et al.* Ecological analysis of crop rotation systems in paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 26(4): 1159–1164.
- [11] Yao H, Lehndorff E, Amelung W, *et al.* Drainage and leaching losses of nitrogen and dissolved organic carbon after introducing maize into a continuous paddy-rice crop rotation[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 249: 91–100.
- [12] 胡安永, 刘勤, 孙星, 张亚楠. 太湖地区不同轮作模式下的稻田氮素平衡研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 509–515.
Hu A Y, Liu Q, Sun X, Zhang Y N. Nitrogen balance in paddy fields under different rotation systems in the Taihu Lake Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(5): 509–515.
- [13] Korai P K, Xia X, Liu X, *et al.* Extractable pool of biochar controls on crop productivity rather than greenhouse gas emission from a rice paddy under rice-wheat rotation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1–9.
- [14] Zhou W, Lin S, Wu L, *et al.* Substantial N₂O emission during the initial period of the wheat season due to the conversion of winter-flooded paddy to rice-wheat rotation[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 269–278.
- [15] 张维乐, 戴志刚, 任涛, 等. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(7): 1254–1266.
Zhang W L, Dai Z G, Ren T, *et al.* Effects of nitrogen fertilization managements with residues incorporation on crops yield and nutrients uptake under different paddy-upland rotation systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(7): 1254–1266.
- [16] Han S, Luo X, Liao H, *et al.* Nitrospira are more sensitive than Nitrobacter to land management in acid, fertilized soils of a rapeseed-rice rotation field trial[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 135–144.
- [17] Breidenbach B, Brenzinger K, Brandt F B, *et al.* The effect of crop rotation between wetland rice and upland maize on the microbial communities associated with roots[J]. *Plant & Soil*, 2017, 419: 435–445.
- [18] 张雯, 何绪生, 耿增超, 等. 新型生物炭基氮肥对土壤—冬小麦系统氮素累积及相关生物活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1394–1401.
Zhang W, He X S, Geng Z C, *et al.* Effects of different biochar-based nitrogen fertilizers on nitrogen accumulation and biological activities in soil-winter wheat system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1394–1401.
- [19] 熊莉, 徐振锋, 吴福忠, 等. 雪被斑块对川西亚高山冷杉林土壤氮转化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1293–1299.
Xiong L, Xu Z F, Wu F Z, *et al.* Effects of snow pack on soil nitrogen transformation enzyme activities in a subalpine *Abies faxioniana* forest of western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(5): 1293–1299.
- [20] Wang B, Zhao J, Guo Z, *et al.* Differential contributions of ammonia oxidizers and nitrite oxidizers to nitrification in four paddy soils[J]. *Isme Journal*, 2015, 9(5): 1062–1075.
- [21] Cao Y, Tian Y, Yin B, Zhu Z. Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 195: 61–67.
- [22] Schmidt-Rohr K, Mao J D, Olk D C. Nitrogen-bonded aromatics in soil organic matter and their implications for a yield decline in intensive rice cropping[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(17): 6351–6354.
- [23] Takakai F, Takeda M, Kon K, *et al.* Effects of preceding compost application on the nitrogen budget in an upland soybean field converted from a rice paddy field on gray lowland soil in Akita, Japan[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 56(5): 760–772.
- [24] 马欣, 周连仁, 王晓巍, 等. 秸秆对根区土壤酶活性、无机氮及呼吸量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (4): 27–33.
Ma X, Zhou L R, Wang X W, *et al.* Effect of straw on enzyme activity, inorganic nitrogen and CO₂ respiration of root zone soil[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2012, (4): 27–33.
- [25] Li Y, Niu W, Wang J, *et al.* Effects of artificial soil aeration volume and frequency on soil enzyme activity and microbial abundance when cultivating greenhouse tomato[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1208–1221.
- [26] Lei T, Gu Q Q, Guo X H, *et al.* Urease activity and urea hydrolysis rate under coupling effects of moisture content, temperature, and nitrogen application rate[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(2): 132–138.
- [27] 邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等. 黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1403–1411.
Xing X Y, Huang Y M, Huang H B, *et al.* Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziuling mountain in the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 1403–1411.
- [28] Lei T, Guo X, Sun X, *et al.* Prediction of soil urea conversion and quantification of the importance degrees of influencing factors through a new combinatorial model based on cluster method and artificial neural network[J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 676–683.
- [29] 谢泽宇, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 黄土高原不同粮草种植模式土壤碳氮及土壤酶活性[J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2191–2199.
Xie Z Y, Luo Z Z, Li L L, *et al.* Soil carbon and nitrogen and soil enzyme activities of different forage planting models on the Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(11): 2191–2199.
- [30] 王少先. 施肥对稻田湿地土壤碳氮磷库及其相关酶活变化的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2011.
Wang S X. Effects of fertilization on soil C, N & P pools and its involved enzyme activity in paddy wetland ecosystems[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2011.
- [31] 赵鹏, 陈阜, 李莉. 秸秆还田对冬小麦农田土壤无机氮和土壤脲酶的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 165–169.
Zhao P, Chen F, Li L. Effects of straw mulching on inorganic nitrogen and soil urease in winter wheat field[J]. *Acta Agriculturae*

- Boreali-Sinica, 2010, 25(3): 165–169.
- [32] Fu M H, Tabatabai M A. Nitrate reductase activity in soils: effects of trace elements[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21(7): 943–946.
- [33] Yang Y, Meng T, Qian X, *et al.* Evidence for nitrification ability controlling nitrogen use efficiency and N losses via denitrification in paddy soils[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2017, 53(3): 349–356.
- [34] 董兆佳, 孟磊. 海南蕉园根际与非根际土壤氮素含量特征[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(6): 309–312.
- Dong Z J, Meng L. Characteristics of nitrogen content between rhizosphere and bulk soil of banana plantation in Hainan province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(6): 309–312.
- [35] 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.
- [36] Ma W N, Yang J P, Wang H. Ecological effect of rice rhizosphere microbes under water regimes and nitrogen fertilizer with split application in paddy field[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 33(2): 184–189.
- [37] 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 西宁南山4种灌木根际和非根际土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7411–7420.
- Qiu Q, Li J Y, Wang J H, *et al.* Microbes, enzyme activities and nutrient characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils under four shrubs in Xining Nanshan Prefecture, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(24): 7411–7420.
- [38] 孟令军, 耿增超, 王海涛, 等. 秦岭太白山区鹿蹄草根际与非根际土壤养分及酶活性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(5): 157–165.
- Meng L J, Geng Z C, Wang H T, *et al.* Soil nutrients and enzyme activities of *Pyrola* in rhizosphere and non-rhizosphere on Mt. Taibai, Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2012, 40(5): 157–165.
- [39] 张千和, 周立香, 郭荻. 中药材根际和非根际土壤酶和微生物特征[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(12): 189–196.
- Zhang Q H, Zhou L X, Guo D. Research on soil enzymes and microflora in rhizosphere and non-rhizosphere of traditional Chinese medicinal herbs[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(12): 189–196.
- [40] Chen J Z, Tian Y H, Zhang Y, *et al.* Effects of root organic exudates on rhizosphere microbes and nutrient removal in the constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 243–250.
- [41] 林江辉, 李辉信, 胡锋, 赵海燕. 干土效应对土壤生物组成及矿化与硝化作用的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(6): 924–930.
- Lin J H, Li H X, Hu F, Zhao H Y. Effects of rewetting on soil biota structure and nitrogen mineralization, nitrification in air-dried red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 924–930.