

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0130

何宏斌, 张钰薇, 程俊康, 张颖, 李俊年, 辛国荣. “多花黑麦草 → 水稻”轮作系统根茬养分释放规律. 草业科学, 2019, 36(7): 1852-1860.

HE H B, ZHANG Y W, CHENG J K, ZHANG Y, LI J N, XIN G R. Nutrient release regulation of stubble in the Italian ryegrass-rice rotation (IRR) system. Pratacultural Science, 2019, 36(7): 1852-1860.

“多花黑麦草 → 水稻”轮作系统 根茬养分释放规律

何宏斌¹, 张钰薇¹, 程俊康¹, 张颖², 李俊年², 辛国荣¹

(1. 广东省热带亚热带植物资源与利用重点实验室 / 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275;

2. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000)

摘要: 在“多花黑麦草 (*Lolium multiflorum*) → 水稻 (*Oryza sativa*)”轮作系统中, 通过研究水稻和黑麦草根茬的养分释放动态规律, 旨在探讨该轮作系统的土壤培肥机理。结果表明, 1-30 d 是水稻和黑麦草根茬降解最快的时期, 19.12% 的水稻根茬和 38.89% 的黑麦草根茬在这一时期降解。水稻根茬的降解率随气温的变化呈现先下降后增加的趋势, 而黑麦草根茬在夏季高温时降解率显著降低。“稻 → 草”轮作期间, 水稻和黑麦草根茬的营养元素释放率差异显著 ($P < 0.05$), 黑麦草中的氮、磷、钾必需营养元素的释放率显著高于水稻根茬 ($P < 0.05$), 而水稻根茬的钙、镁主要营养元素的释放率显著高于黑麦草 ($P < 0.05$)。对降解前后的土壤分析表明, 水稻降解后土壤全氮含量显著高于降解前 ($P < 0.05$), 而黑麦草降解后全氮含量最高, 显著高于水稻降解后 ($P < 0.05$); 土壤全磷含量随水稻、黑麦草的降解逐渐降低但未出现显著差异 ($P > 0.05$); 土壤全钾含量在水稻根茬降解后显著增加 ($P < 0.05$), 而在黑麦草根茬降解后则显著降低 ($P < 0.05$)。研究结果揭示了水稻和黑麦草轮作过程中两类根茬养分的释放规律以及对土壤的影响, 可为“黑麦草 → 水稻”轮作的系统培肥原理提供理论支持。

关键词: 水稻根茬; 黑麦草根茬; 养分释放动态; 缓释

中图分类号: S344.1⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)07-1852-09

Nutrient release regulation of stubble in the Italian ryegrass-rice rotation (IRR) system

HE Hongbin¹, ZHANG Yuwei¹, CHENG Junkang¹, ZHANG Ying², LI Junnian², XIN Guorong¹

(1. State Key Laboratory of Biocontrol and Guangdong Provincial Key Laboratory of Plant Resources /

School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

2. College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou 416000, Hunan, China)

Abstract: The dynamic release of nutrients from rice (*Oryza sativa*) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) stubble was studied to explore the soil fertilization mechanisms in the Italian ryegrass-rice rotation (IRR) system. The results showed that the fastest degradation of rice and Italian ryegrass stubble occurred during the first 30 days: 19.12% of rice stubble and 38.89% of Italian ryegrass stubble degraded during this period. The degradation rate of rice stubble showed a tendency of first decrease and then increase with the change in air temperature. The degradation rate of Italian ryegrass stubble decreased significantly at an increasing temperature in summer. The release rate of nitrogen, phosphorus, and potassium in Italian ryegrass was significantly faster than that of rice ($P < 0.05$) during the rotation period. The release rate of calcium and

收稿日期: 2019-03-11 接受日期: 2019-06-04

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费 (20150122-15); “扬帆计划”引进创新创业团队专项 (2015YT02H032)

第一作者: 何宏斌 (1993-), 男, 甘肃兰州人, 在读博士生, 研究方向为草地农业生态学。E-mail: hehb3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 辛国荣 (1968-), 男, 甘肃临洮人, 教授, 博士, 研究方向为草地农业与菌根生态学。E-mail: lssxgr@mail.sysu.edu.cn

magnesium in rice was significantly faster than that of Italian ryegrass ($P < 0.05$). Soil analysis before and after degradation showed that the total nitrogen content of rice degraded soil was significantly higher than that of the control soil (before degradation) ($P < 0.05$). The total nitrogen content of Italian ryegrass degraded soil was the highest, and significantly higher than after rice degradation ($P < 0.05$). Soil total phosphorus content decreased with the degradation of rice and Italian ryegrass stubble, but there was no significant difference with the pre-degradation content ($P > 0.05$). Soil total potassium content increased after the rice stubble degradation ($P < 0.05$) but decreased after the Italian ryegrass stubble degradation ($P < 0.05$). The results demonstrate the nutrient release mechanisms of two kinds of stubble and their effect on the soil nutrient content during rice and Italian ryegrass rotation. This study can provide theoretical support for fertilization methods in the Italian ryegrass-rice rotation system.

Keywords: rice stubble; Italian ryegrass stubble; dynamic release of nutrient; slow release

Corresponding author: XIN Guorong E-mail: lssxgr@mail.sysu.edu.cn

长期以来,我国农田土壤过度种植,大量施用化肥,造成土壤肥力下降、结构破坏、微生物活力丧失、土壤酸化盐碱化等问题^[1-2]。轮作是解决这些问题的有效方式之一,一般地种植豆科或一些禾本科绿肥后,植物残茬覆压入田,各种养分缓慢释放,有利于提高土壤养分的含量和利用效率^[3]。不同的绿肥具有不同的降解特征,适宜的轮作模式有利于农田生态系统养分的稳定性和可持续性。

我国南方农区,多花黑麦草 (*Lolium multiflorum*) 已逐渐成为冬闲期间种植的主要牧草之一,由于它产量高、品质好等优势,在南方农区冬季畜禽养殖中扮演着重要角色,并在与水稻 (*Oryza sativa*) 构建的轮作 (“多花黑麦草→水稻”草田轮作, Italian ryegrass-rice rotation, 简称 IRR) 系统中发挥着积极的经济、生态和社会效应^[4]。水稻根茬覆压还田不仅能够促进大田固碳减排,还能够提高土壤氮、磷、钾等养分的含量。水稻根茬降解过程中自身多种营养元素的释放,使得土壤养分中如氮、磷、钾、钙、镁等必需元素增加,而且水稻根茬在降解过程中产生的小分子有机酸能够提高土壤中养分吸收的有效性^[5]。黑麦草地下部干物质质量能够达 $3\ 400\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 这些残留的植物有机体能够弥补农田常规耕作导致的土壤有机质的损失^[6], 有研究表明,连续轮作黑麦草使得土壤有机物质含量显著提高,有机质增量通常能超过 3%^[7-8], 而有机碳的增量通常能超过 20%^[9]。此外在先前的研究中发现,连续两年的轮作及根茬还田使土壤全氮、全磷、全钾含量分别增加了 4.83%~7.50%、13.85%~18.94% 和 16.9%~21.3%^[10]。由于黑麦草的根茬部分

具有较高的碳氮比(通常 32~48),因而在还田过程中有利于土壤有机质的持续提高,而且这一过程往往能够促进土壤氮的持续矿化^[11]。可见,无论是黑麦草根茬还是水稻根茬都可以在还田过程中为土壤提供大量养分。然而,在 IRR 系统中水稻和黑麦草两类根茬的营养元素如何缓释入土壤,在完整的轮作周期中土壤氮、磷、钾的变化规律尚不清楚。

两类根茬的降解是植物有机残体翻压还田的过程,植物残体中的氮、磷、钾、钙、镁等营养元素的释放势必会对后茬作物生长产生影响,以轮作系统角度研究 IRR 系统内两类根茬的释放规律、土壤养分的长期动态变化规律,对于理解该系统的土壤培肥机制、水稻根茬以及绿肥作物的科学合理利用具有重要意义。此外,由于两类根茬各自的养分含量以及降解时气候、土壤环境的差别,它们的翻压过程可能具有不同的腐解和养分释放特征。因此,探究两类根茬的还田特点和差异性,将有利于加深对 IRR 系统在养分利用方面更深层次的理解,对于提高稻田生态系统的资源利用效率、加强稻田养分管理具有积极作用。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况与试验设计

试验地位于湖南省湘西土家族苗族自治州吉首市花垣县,地理坐标为 $109^{\circ}43' E$, $28^{\circ}51' N$, 海拔 483.9 m, 年均降水量约 1 363 mm, 蒸发量 1 031 mm, 年均气温 $16.0\ ^{\circ}C$, 年均日照时数近 1 200 h, 试验期间每次取样时测量一次当日最高与最低气温,

计算最高温与最低温的平均值。试验前该样地用作单季水稻种植, 冬季空闲, 土壤肥力均匀, 其中土壤 pH 6.27, 全氮含量 $1.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效氮含量 $137.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全钾含量 $12.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效钾含量 $59.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全磷含量 $0.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2015年10月–2016年4月是黑麦草冬闲轮作期, 即水稻根茬降解期。黑麦草播种量 $22.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 稻底撒播, 种植期间刈割4次, 施用 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=15:15:15$ 复合肥, 总施肥量 $1200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 基肥 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其余每次刈割后均匀施入。2015年10月将水稻根茬洗净切碎装入尼龙网袋, 每袋 100 g , 分为3组, 每组7袋, 将3组根茬分别随机覆压于3个位点。黑麦草种植区面积 100 m^2 , 覆压深度 $20\text{--}30 \text{ cm}$, 各网袋相互未接触且覆压深度一致。试验采用随机采样, 每30 d 随机取样3袋(每位点1袋), 测量生物量和降解率, 持续到2016年4月最后一次取样, 即分为7个阶段取样: 2015年10月(1–30 d)、11月(31–60 d)和12月(61–90 d); 2016年1月(91–120 d)、2月(121–150 d)、3月(151–180 d)和4月(181–210 d), 共210 d。同时在水稻根茬降解前后采集土壤样品, 自然风干待测。

2016年6月–2016年12月是后作水稻栽培期, 即黑麦草根茬降解期。在上述轮作黑麦草稻田连续试验, 水稻种植前用旋耕机将黑麦草根茬与土壤混匀, 泡田10 d 后移栽水稻秧苗, 水稻株行距为 $30 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$, 施用 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=15:15:15$ 复合肥, 总施肥量 $675 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 基肥 $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分蘖期追肥 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2016年6月将黑麦草根茬洗净切碎装入尼龙网袋, 每袋 100 g , 分为3组, 每组7袋, 将3组根茬分别随机覆压于3个位点。分别埋置在冬闲轮作黑麦草的稻田, 覆压深度 $20\text{--}30 \text{ cm}$, 各网袋相互未接触且覆压深度一致。试验采用随机采样, 每30 d 随机取样3袋(每位点1袋), 测量生物量和降解率, 持续到2016年12月最后一次取样, 即分为7个阶段取样: 2016年6月(1–30 d)、7月(31–60 d)、8月(61–90 d)、9月(91–120 d)、10月(121–150 d)、11月(151–180 d)和12月(181–210 d), 共210 d。同时在黑麦草根茬降解后采集稻田土壤样品, 自然风干待测。

1.2 指标测定及方法

将待测根茬洗净表面泥土并擦拭干水分, 放入

烘箱 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 40 min , 在 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 连续烘干直至恒重, 称量干重。取一定量上述烘干根茬, 进行植物营养元素的测定: 氮(N)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ -靛酚蓝比色法, 磷(P)采用钼锑抗比色法, 钾(K)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ -火焰光度法, 钙(Ca)采用 EDTA--Na_2 络合滴定法, 镁(Mg)、铁(Fe)采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 消煮法。土壤养分含量的测定: 全氮(TN)采用开氏法, 有效氮(AN)采用 $10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠、 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H_2SO_4 溶液的扩散吸收法, 全钾(TK)采用 NaOH 熔融–原子分光光度计法, 有效钾(AK)采用 NH_4OAc 浸提–火焰光度法, 全磷(TP)采用 NaOH 熔融–钼锑抗比色法。测定方法见《土壤农业化学分析方法》^[12]。

1.3 数据分析

试验结果使用 Excel 2010 整理, 用平均值 \pm 标准误差表示测定结果; 利用 SPSS17.0 统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、平均数差异显著性分析(LSD test)、独立样本 *T* 检验(Student's *T* test), 用 Excel 2010 和 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 水稻和多花黑麦草根茬生物量降解率

在“稻→草”轮作期间, 水稻根茬在 1–30 d 的降解率(19.12%)显著高于随后月份的降解率($P<0.05$), 31–210 d 的降解率仅在 4.18%~12.79%(图 1)。水稻根茬的降解率随气温的变化呈先下降后增加的趋势, 其中 1–30 d、31–60 d 和 61–90 d 的降解率逐步递减, 而 91–210 d 的降解率随着气温的回升逐步增加。与水稻类似, 黑麦草 1–30 d 的降解率也显著($P<0.05$)高于随后阶段的降解率, 之后呈现下降趋势。与水稻不同的是, 黑麦草根茬的降解率在 1–30 d 达到了 36.62%, 1–60 d 的干物质累积降解率达到 46.62%, 之后 150 d 的降解率在 1.84%~12.48%(图 1), 由此可知黑麦草的干物质主要集中在 1–60 d 降解。两类根茬经过各自 210 d 的降解, 养分并未完全释放还田, 但水稻根茬和黑麦草的降解规律存在明显差异, 水稻根茬干物质的降解周期要长于黑麦草, 但由于水稻根茬降解时气温经历降温–升温过程, 而黑麦草根茬降解时气温经历升温–降温过程, 因而造成了两类根茬的不同降解趋势。

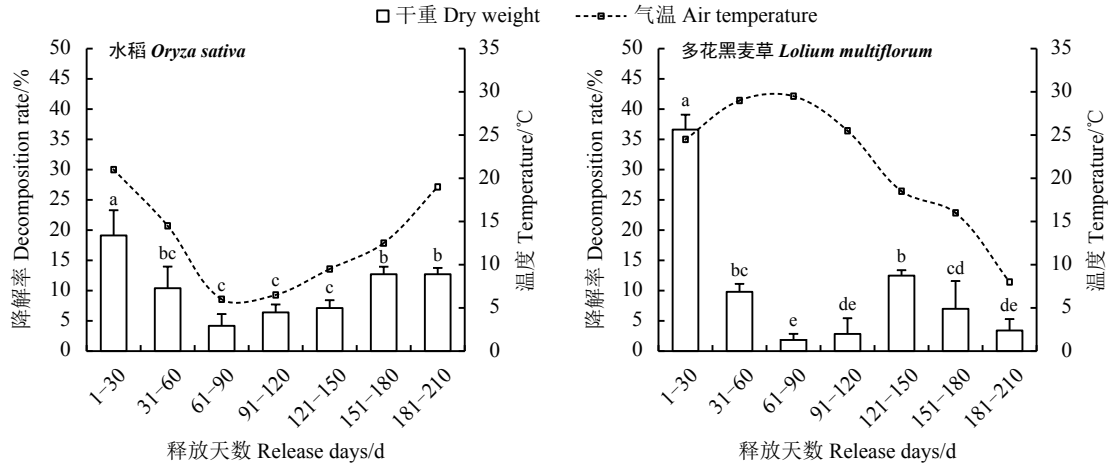


图 1 水稻和黑麦草根茬在“稻→草”轮作期间降解率及平均温度动态变化

Figure 1 Dynamic change of degradation rate and average temperature of rice and Italian ryegrass stubble during “rice-grass” rotation

不同小写字母表示不同释放天数之间降解率存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between different release days at the 0.05 level.

2.2 水稻和多花黑麦草根茬中氮、磷、钾、钙、镁、铁的释放动态

黑麦草根茬中营养元素的释放主要集中在 1–30 d, 其中氮释放率最高, 达 67.19%, 其次是磷, 达 51.20%, 再次是钾, 达 49.35%, 而钙释放最低, 仅为 35.12%。水稻根茬在 1–30 d 释放率差异较大, 其中钙释放率最高, 达 60.76%, 铁释放率最低, 仅为 31.29%。降解的 1–60 d, 两类根茬的释放率差异显著, 其中黑麦草根茬中的氮释放率 (1–30 d: $P < 0.001$; 31–60 d: $P < 0.05$)、磷释放率 (31–60 d: $P < 0.001$)、钾释放率 (1–30 d: $P < 0.001$; 31–60: $P < 0.01$) 以及铁释放率 (1–30 d: $P < 0.01$; 31–60 d: $P < 0.01$) 均显著高于水稻根茬, 表明黑麦草根茬在降解初期主要营养元素的释放具有更高的效率 (图 2)。然而, 黑麦草根茬中的钙 (1–30 d: $P < 0.01$) 和镁 (31–60 d: $P < 0.05$) 的释放率却显著低于水稻根茬。

2.3 水稻和多花黑麦草根茬大田降解缓释过程对土壤氮、磷、钾含量的影响

土壤氮、磷、钾含量分别在降解前、水稻以及黑麦草根茬降解后的变化 (图 3) 显示, 土壤全氮含量在水稻根茬降解后、黑麦草根茬降解后均有所增加, 并呈现极显著差异 ($P < 0.01$)。两类根茬的降解使土壤有效氮含量略有增加, 但未呈现显著性差异 ($P > 0.05$)。土壤全钾含量在水稻根茬降解

后显著增加, 但整体看 420 d 的降解并未发现全钾含量呈现显著性差异 ($P > 0.05$)。黑麦草根茬的降解使土壤有效钾含量有所提高, 但降解前后差异不显著 ($P > 0.05$)。在整个降解周期中, 土壤全磷含量在水稻、黑麦草根茬降解后均有所降低, 但降解前后未出现显著性差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论与结论

Boyero 等^[13]发现低地溪流环境下, 温度解释了 40% 的微生物对落叶等有机物的分解作用, 这是由于通过温度的变化可以增加微生物生物量以及土壤酶活性。本研究也发现, 两类根茬的降解与环境温度密切相关, 结果表明水稻根茬的降解率呈现先下降后增加的趋势, 在降解的前 90 d, 气温短期内急剧下降, 与此同时水稻根茬的降解率也显著降低 ($P < 0.05$)。然而经过低温之后, 气温在降解 90 d 后快速回升, 此时水稻根茬的降解率逐渐提高。黑麦草根茬在 1–60 d 内累积降解率显著高于其他降解阶段 ($P < 0.05$), 造成了 60 d 后根茬与土壤接触的相对表面积较低, 减缓了黑麦草根茬的降解。此外, 由于黑麦草的降解起始于温度适宜的 6–7 月 (1–60 d), 而 60 d 后随着最高温度连续超过 36 °C, 许多土壤微生物和土壤酶活性被抑制, 影响黑麦草根茬在 61–90 d 的降解率显著降低 ($P < 0.05$), 由此推测气温会对根茬的降解产

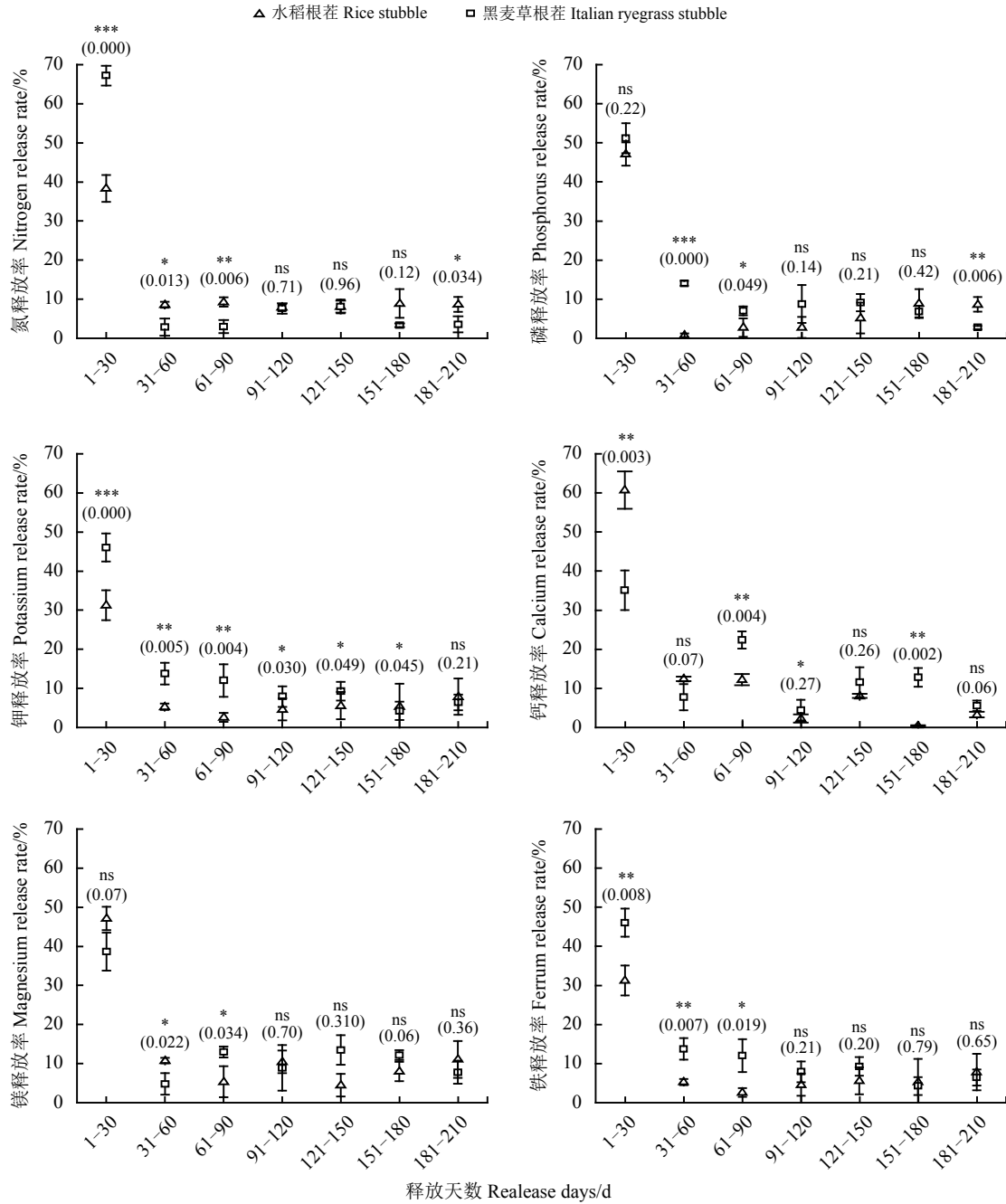


图2 水稻和多花黑麦草根茬中氮、磷、钾、钙、镁、铁释放动态

Figure 2 Difference analysis of the release rates of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and iron in rice and Italian ryegrass stubble

T检验用来分析相同降解时间下的黑麦草和水稻根茬的氮、磷、钾、钙、镁、铁释放率差异性, 显著性水平为0.05, *表示 $0.01 < P < 0.05$, **表示 $0.001 < P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$; 括号内数值表示黑麦草和水稻根茬之间差异性的P值。

Student's t-test is used to analyze the difference of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and iron release rates of rice and Italian ryegrass stubble at the same degradation time. The statistically significance level is set at $P < 0.05$, * indicates $0.01 < P < 0.05$, ** indicates $0.001 < P < 0.01$, *** indicates $P < 0.001$; The values in brackets represent the P value of the difference between rice and Italian ryegrass stubble.

生重要影响。大田环境下, 温度并非对腐解造成影响, 短期降水量和土壤湿度等同样会对两类根茬的腐解产生影响。水稻根茬的降解处于黑麦草的轮作期间, 此时土壤较为干

旱, 含水量较低, 水稻根茬的降解率也低于相同降解时间的黑麦草根茬; 而湘西的降水主要集中在每年的3-5月, 此时处于水稻根茬降解的151-210 d, 气温的回升和降水量的增加均会对降解率

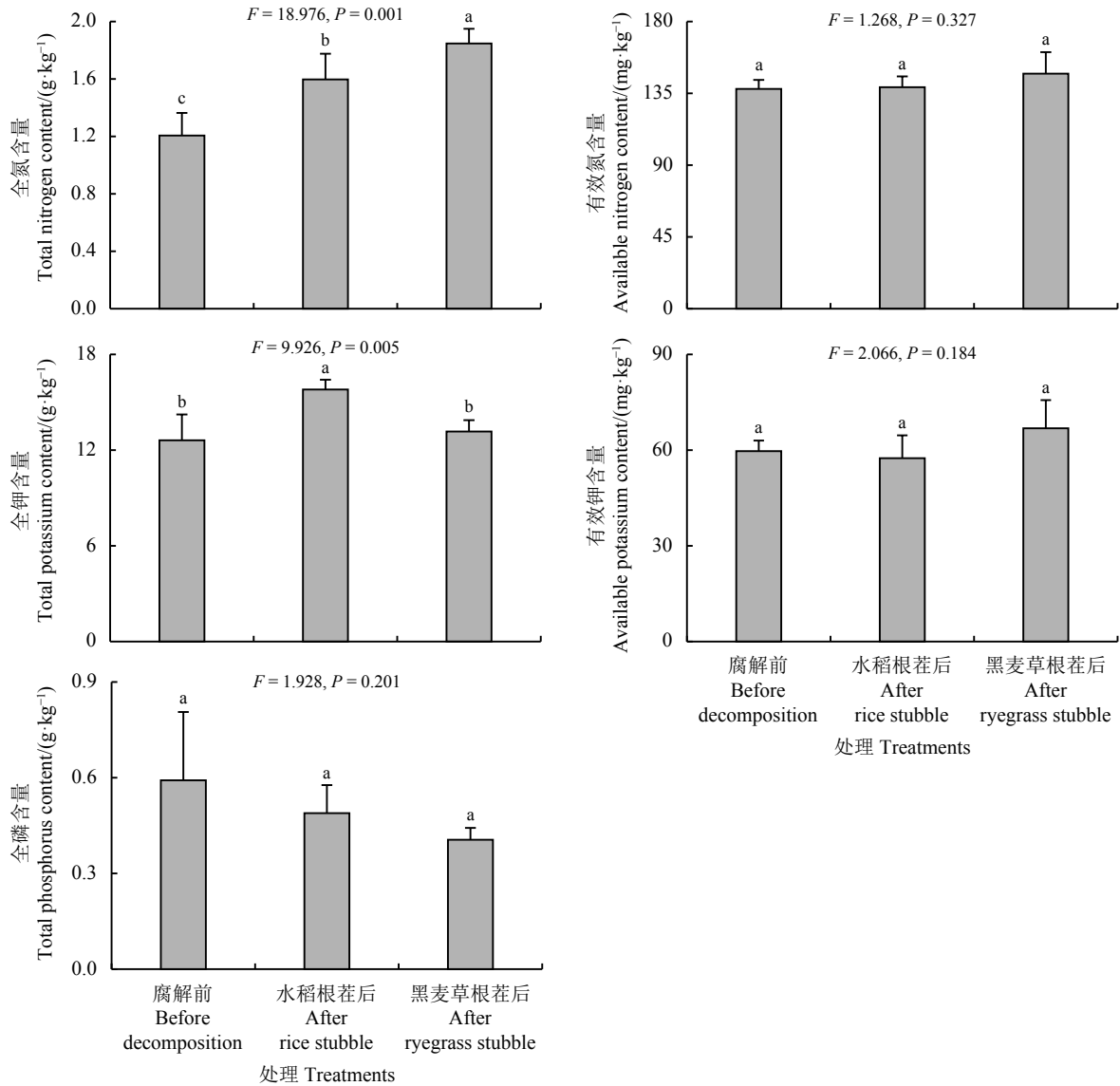


图 3 水稻和多花黑麦草根茬降解之后土壤氮、磷、钾含量变化

Figure 3 Soil nitrogen, phosphorus, and potassium contents after degradation of rice and Italian ryegrass stubble

的提高产生影响。在黑麦草根茬的降解中，由于稻田泡田的影响，此时土壤的含水量较高，这也可能是影响黑麦草根茬不同时期降解率差异的原因之一。

水稻根茬在 1-30 d 内的降解率低于黑麦草，正如李逢雨等^[14]发现油菜 (*Brassica napus*) 秆等作物残茬在降解过程中，在维管形成层、韧皮组织、表皮等组织结构完全脱落损伤后，植物残茬养分才能进入快速释放期，而水稻韧皮组织、表皮等组织结构与油菜相似，因此水稻根茬的降解周期更加漫长，养分释放也更加缓慢。此外，冬闲期间经过黑麦草的轮作，稻田土壤总孔隙度和

非毛细孔隙度显著提高，而土壤容重显著降低^[15]，降幅达 5.1% 以上^[16]，稻田土壤结构的改善使土壤变得更为透气、保温，因而促进了微生物的活动，提高了植物残茬降解率^[17]。因此，黑麦草轮作后的土壤也有利于有机残留物的降解。本研究发现水稻和黑麦草的营养元素释放率差异显著，黑麦草中的氮、磷、钾必需营养元素前 1-60 d 的释放率显著高于水稻根茬 ($P < 0.05$)，而水稻根茬的钙、镁主要营养元素的释放率显著高于黑麦草 ($P < 0.05$)，这可能是与降解前期生物量的降解速率有关，黑麦草在第 1 个月的氮、磷、钾释放率分别超过 70%、50% 和 40%，这对于后作水稻在分蘖期这一关键营

养期的生长至关重要。先前的研究表明钾的释放速率要高于氮、磷，这是由于钾在植物中的储存形式是以 K^+ 形态储存于植物组织内，能够在水浸提的作用下快速释放^[18]，但在本研究中钾的释放却存在一个更加缓慢的释放周期，而且降解率低于氮、磷，推测是由于钾元素在植物残体器官中的分布差异导致的。

作物根茬还田的一个重要优势在于它的固碳作用，通常将根茬还田能够显著提高土壤的固碳量^[19]。洪春来等^[20]的研究表明，连续两年水稻秸秆及根茬还田，使土壤有机质含量由试验前的 $42.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高至 $43.8\sim 45.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而且水稻根茬还田不仅能够增加土壤有机质，同时由于植物体丰富的养分含量能够弥补氮肥、磷肥、钾肥投入的不足^[21-22]，而且能够减少焚烧过程对大气环境的污染，变废为宝，具有良好的生态和社会效益^[23]。对多个水稻根茬还田的样点分析后发现，经过一年的腐熟，稻田土壤全氮、全磷、全钾含量均有增加^[23]，本研究与之结果类似，水稻根茬提高了土壤全氮、全钾含量，这是因为在土壤中添加水稻根茬后，植物根茬的降解能够为土壤微生物提供丰富的可利用矿质氮，如硝态氮和铵态氮等^[24]，并反过来加速了生物降解和养分释放，进而改变了土壤氮水平。同时本研究发现，添加黑麦草根茬后土壤全氮、有效氮、有效钾含量增加，这是因为黑麦草根茬中

的多种植物必需营养元素能够通过缓释作用进入大田，并对土壤氮含量产生显著的影响。研究表明黑麦草根茬经过腐熟释放出的养分会更容易被后作水稻利用^[25]，这对提高作物养分利用效率具有极为重要的意义^[4]。此外，黑麦草根茬降解后的次生代谢产物会对后作水稻产生某种化感作用^[26]；黎国喜等^[27-28]在根茬降解物中分离出一些小分子有机物，能够促水稻器官发育，因而这些根茬降解中产生的潜在小分子有机物可能也是诱导土壤化学性质改善的关键。

综上所述，在 IRR 系统轮作中两类根茬由于各自的结构特点，具有不同的养分释放特征，水稻根茬的缓释效果明显，尤其对于钙、镁等营养元素的释放；而黑麦草根茬的释放优势主要体现在植物氮、磷、钾方面，并为水稻分蘖期的生长提供了大量必需营养元素。因此，黑麦草根茬的降解和养分释放在时间、空间上既是对水稻根茬缓释效果的补充，又有利于 IRR 系统冬季轮作后养分的持续供应，在 IRR 系统土壤培肥过程中尤其是土壤氮、钾含量的提高上发挥了极为重要的作用。此外，两类根茬的降解是通过影响微生物活动和土壤酶活性完成的，极端的水、温环境不利于微生物生长，所以针对两类根茬养分释放特点的研究，今后仍需要在不同含水量和温度条件下，对微生物群落参与降解的过程与机理开展进一步的研究。

参考文献 References:

- [1] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应. *土壤学报*, 2006(5): 843-850.
ZHANG T L, LI Z P, WANG X X. Soil degradation and its eco-environmental impact under highly-intensified agriculture. *Acta Pedologica Sinica*, 2006(5): 843-850.
- [2] 张英俊, 任继周, 王明利, 杨高文. 论牧草产业在我国农业产业结构中的地位和布局. *中国农业科技导报*, 2013, 15(4): 61-71.
ZHANG Y J, REN J Z, WANG M L, YANG G W. Discussion on the position and development distribution of forage industry in China's agricultural industry structure. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(4): 61-71.
- [3] ESPERSCHÜTZ J, GATTINGER A, MÄDER P, SCHLOTTER M, FLIESSBACH A. Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations. *Fems Microbiology Ecology*, 2007, 61(1): 26-37.
- [4] YANG Z Y, XIN G R, YUAN J G, FANG W, LI G X. Ecological fertilization: An example for paddy rice performed as a crop rotation system in southern China.//ELSWORTH L R, PALEY W O, Eds. *Fertilizers: Properties, Applications and Effects*. New York: Nova Science Publishers Inc., 2008: 1-28.
- [5] 莫淑勋, 钱菊芳. 稻草还田对补充水稻钾素养分的作用. *土壤通报*, 1981(1): 20-21.

- MO S X, QIAN J F. Effect of returning straw to field on the nutrient supplement of potassium in rice. *Chinese Journal of Soil Science*, 1981(1): 20-21.
- [6] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 罗尊长, 黄凤球, 张帆, 杨光立, 周孟辉. 冬季覆盖植物对南方稻田土壤养分和水稻生长的影响. *江西农业大学学报*, 2010, 32(1): 9-14.
- TANG H M, XIAO X P, TANG W G, LUO Z Z, HUANG F Q, ZHANG F, YANG G L, ZHOU M H. Effects of different winter cover crops on paddy soil nutrients and growth of rice in southern China. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(1): 9-14.
- [7] 裴鹏刚, 张均华, 朱练锋, 禹盛苗, 胡志华, 金千瑜. 秸秆还田对水稻固碳特性及产量形成的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2885-2891.
- PEI P G, ZHANG J H, ZHU L F, YU S M, HU Z H, JIN Q Y. Effects of straw incorporation on rice carbon sequestration characteristics and grain yield formation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 2885-2891.
- [8] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 林青, 徐宁. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1209-1216.
- YANG B J, HUANG G Q, WANG C, LIN Q, XU N. Effects of winter green manure cultivation on rice yield and soil fertility in paddy field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1209-1216.
- [9] 史文娟. 冬闲田种植牧草的产量、品质及对稻田生态功能的影响. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文, 2010.
- SHI W J. Study on the yield and quality of grass in winter fallow field and its influence on biologic function to paddy fields. Master Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- [10] 乔伟艳, 顾洪如, 沈益新. 稻茬种植多花黑麦草对土壤肥力和微生物组成的影响. *草业科学*, 2017, 34(2): 240-245.
- QIAO W Y, GU H R, SHEN Y X. Effects of planting Italian ryegrass in winter fallow field on fertility and microorganisms. *Pratacultural Science*, 2017, 34(2): 240-245.
- [11] ZEBARTH B J, ARSENAULT W J, MOOREHRAD S, KUNELIUS H T, SHARIFI M. Italian ryegrass management effects on nitrogen supply to a subsequent potato crop. *Agronomy Journal*, 2009, 101(6): 1573-1580.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- BAO S D. Soil Agrochemical Analysis. 3ed. Beijing: Agricultural Publishing House, 2001.
- [13] BOYERO L, PEARSON R G, GESSNER M O, BARMUTA L A, FERREIRA V, GRAÇA M A, DUDGEON D, BOULTON A J, CALLISTO M, CHAUVET E, HELSON J E, BRUDER A, ALBARIÑO R J, YULE C M, ARUNACHALAM M, DAVIES J N, FIGUEROA R, FLECKER A S, RAMÍREZ A, DEATH R G, IWATA T, MATHOOKO J M, MATHURIAU C, GONÇALVES J F Jr, MORETTI M S, JINGGUT T, LAMOTHE S, M'ERIMBA C, RATNARAJAH L, SCHINDLER M H, CASTELA J, BURIA L M, CORNEJO A, VILLANUEVA V D, WEST D C. A global experiment suggests climate warming will not accelerate litter decomposition in streams but might reduce carbon sequestration. *Ecology Letters*, 2011: 14289-14294.
- [14] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 秦鱼生, 王昌全, 涂仕华. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 374-380.
- LI F Y, SUN X F, FENG W Q, QIN Y S, WANG C Q, TU S H. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 374-380.
- [15] 王华, 黄宇, 阳柏苏, 黄璜, 张芬. 中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统稻田土壤质量评价. *生态学报*, 2005, 25(12): 3271-3281.
- WANG H, HUANG Y, YANG B S, HUANG H, ZHANG F. Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3271-3281.
- [16] 杨曾平. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土质量和生产力可持续性影响的研究. 长沙: 湖南农业大学博士学位论文, 2011.
- YANG Z P. Study on the effect of long-term winter planting green manure on the quality of reddish paddy soil and the sustainability of productivity. PhD Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.
- [17] 邵丽. 不同作物残体在不同土壤中的腐解和养分释放速率研究. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文, 2013: 10-11.
- SHAO L. Research on nutrient release speed of corp residues degradation in different kinds soil. Master Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [18] 吴珊眉, House G J, 韩纯儒. 免耕和常规耕作农田生态系统冬季覆盖作物残茬分解和养分变化. *土壤学报*, 1986, 23(3): 204-211.

- WU S M, HOUSE G J, HAN C R. Variation of nutrient elements of winter cover crop residues in agroecosystems under no tillage and conventional tillage. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(3): 204-211.
- [19] 韩冰, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
HAN B, WANG X K, LU F, DUAN X N, OUYANG Z Y. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612-619.
- [20] 洪春来, 魏幼章, 黄锦法, 王润屹, 杨肖娥. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 26(6): 627-633.
HONG C L, WEI Y Z, HUANG J F, WANG R Q, YANG X E. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment. *Journal of Zhejiang University(Agric.&Life Sci.)*, 2003, 26(6): 627-633.
- [21] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 马永良, 王迎春. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究. *土壤肥料*, 2004(5): 12-16.
WANG L G, LI W J, QIU J J, MA Y L, WANG Y C. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield. *Soils and Fertilizers*, 2004(5): 12-16.
- [22] 刘国顺, 彭华伟. 生物有机肥对植烟土壤肥力及烤烟干物质积累的影响. *河南农业科学*, 2005(1): 46-49.
LIU G S, PENG H W. Effect of bio-organic fertilizer on soil fertility and the dry matter accumulation of flue-cured tobacco. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005(1): 46-49.
- [23] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响. *土壤通报*, 2001, 10(5): 209-213.
JIANG Y H, YU Z R, MA Y L. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 10(5): 209-213.
- [24] 严新平. 广西早稻秸秆还田应用及其对土壤肥力和晚稻产量的影响. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2013.
YAN X P. Application of straw returning of early rice in Guangxi and its effect on soil fertility and yield of late rice. Master Thesis. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [25] 辛国荣, 杨中艺. “黑麦草-水稻”草田轮作系统研究Ⅶ黑麦草残留物的田间分解及营养元素的释放动态. *草业学报*, 2004, 13(3): 80-84.
XIN G R, YANG Z Y. “Italian ryegrass- rice” rotation system Ⅶ degradation of ryegrass residue and the accompanying nutrient release in paddy fields. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(3): 80-84.
- [26] EMETERIO L S, ARROYO A, CANALS R M. Allelopathic potential of *Lolium rigidum* Gaud. on the early growth of three associated pasture species. *Grass and Forage Science*, 2004, 59(2): 107-112.
- [27] 黎国喜, 李厚金, 杨中艺, 辛国荣, 唐湘如, 袁剑刚. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的根际效应Ⅴ. 意大利黑麦草 (*Lolium multiflorum* L.) 根茬降解物中存在促水稻生长活性物质的证据. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(4): 88-93.
LI G X, LI H J, YANG Z Y, XIN G R, TANG X R, YUAN J G. The rhizosphere effects in “Italian ryegrass-rice” rotational system. Ⅴ. Evidences for the existence of rice stimulators in decaying products of Italian ryegrass residues. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(4): 88-93.
- [28] LI G X, ZENG R S, LI H J, YANG Z Y, XIN G R, YUAN J G, LUO Y. Allelopathic effects of decaying Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) residues on rice. *Allelopathy Journal*, 2008, 22(1): 15-23.

(责任编辑 王芳)