

金梅娟,王海候,李冬梅,等.施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式生产效应及土壤肥力的影响[J].江苏农业学报,2025,41(11):2181-2191.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.11.011

施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式生产效应及土壤肥力的影响

金梅娟, 王海候, 李冬梅, 宋英, 董明辉

(江苏太湖地区农业科学研究所/国家土壤质量相城观测实验站,江苏 苏州 215106)

摘要: 施用生石灰是调控羊肚菌生产过程中土壤环境、保障羊肚菌稳产的重要措施,为明确稻-羊肚菌轮作模式中适宜生石灰施用量,本研究以六妹羊肚菌、南粳46水稻为试验对象,设置了4个处理[生石灰施用量 0 kg/hm^2 (C1)、 375 kg/hm^2 (C2)、 750 kg/hm^2 (C3)、 $1\ 125\text{ kg/hm}^2$ (C4)],分析了在羊肚菌播种前施用生石灰对羊肚菌产量、水稻产量及其构成、水稻含氮量及农田土壤肥力等指标的影响。结果表明,施用生石灰明显降低了羊肚菌受病原真菌感染的风险,C3处理的羊肚菌产量达 $3\ 385\text{ kg/hm}^2$,显著高于其他处理。与未施用生石灰处理相比(C1处理),施用生石灰对水稻产量无显著影响,但高生石灰施用量(C4处理)显著降低了水稻有效穗数,而适宜的生石灰施用量(C3处理)则显著提高了水稻每穗总粒数。土壤肥力指标分析结果显示,适宜的生石灰施用量提高了土壤pH值,但高生石灰施用量(C4处理)的土壤氮素供应能力显著下降,表现为对应的水稻秸秆含氮量及土壤碱解氮含量均显著降低;施用生石灰对水稻季土壤磷含量、钾含量无显著影响。综上,在试验区域首年开展稻-羊肚菌轮作时, 750 kg/hm^2 是兼顾六妹羊肚菌与南粳46水稻稳产效果的生石灰建议施用量。

关键词: 稻-羊肚菌轮作; 生石灰; 产量; 土壤肥力; 含氮量

中图分类号: S143.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)11-2181-11

Effects of quicklime application on production efficiency and soil fertility in the rice-*Morchella esculenta* rotation system

JIN Meijuan, WANG Haihou, LI Dongmei, SONG Ying, DONG Minghui

(*Jiangsu Taihu Lake Region Institute of Agricultural Sciences/National Soil Quality Observation and Experimental Station in Xiangcheng, Suzhou 215106, China*)

Abstract: The application of quicklime is a critical measure for regulating the soil environment and ensuring stable yields during *Morchella esculenta* cultivation. To determine the appropriate quicklime application rate in the rice-*Morchella esculenta* rotation system, this study used *Morchella sextelata* and the rice cultivar Nanjing 46 as test subjects. Four treatments were established based on quicklime application rates: 0 kg/hm^2 (C1), 375 kg/hm^2 (C2), 750 kg/hm^2 (C3) and $1\ 125\text{ kg/hm}^2$ (C4). The effects of pre-sowing quicklime application on *Morchella esculenta* yield, rice yield and its components, rice nitrogen content, and farmland soil fertility were analyzed. The results indicated that quicklime application significantly reduced the risk of pathogenic fungal infection in *Morchella esculenta*. The yield under the C3 treatment reached $3\ 385\text{ kg/hm}^2$, which was significantly higher than that of other treatments. Compared to the non-quicklime treatment (C1), the application of

收稿日期:2024-12-15

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(23)3009];江苏省亚夫科技服务项目[KF(23)1102];苏州市姑苏人才项目(24062)

作者简介:金梅娟(1989-),女,江苏常熟人,硕士,副研究员,主要从事生态循环农业模式及技术研究。(E-mail)jinmei1989@126.com

通讯作者:董明辉,(E-mail)mhdong@yzu.edu.cn

quicklime showed no significant impact on rice yield. A high application rate (C4 treatment) significantly reduced the number of productive panicles, whereas an appropriate rate (C3 treatment) notably increased the total grains per panicle. Analysis of soil fertility indicators revealed that an appropriate quicklime application rate increased soil pH, while the high application rate (C4 treatment) significantly reduced soil nitrogen supply capacity, as evidenced by markedly decreased nitrogen content in rice straw and soil alkaline hydrolysable nitrogen. Quicklime application showed no significant effects on soil phosphorus content and potassium content during the rice season. In conclusion, for the initial year of implementing the rice-*Morchella esculenta* rotation in the experimental area, an application rate of 750 kg/hm² is recommended as it effectively balances the stable yield outcomes for both *Morchella sextelata* and the rice cultivar Nanjing 46.

Key words: rice-*Morchella esculenta* rotation; quicklime; yield; soil fertility; nitrogen content

基于保障食物有效多样供给的战略需求,政府从优化农业资源配置与统筹国土资源利用的角度,提出了“大食物观”的全新理念,倡导食物由多元化体系生产和供给。随着多元化食物体系构建的推进,各地积极探索和创新种植制度与栽培模式,集成示范了一批绿色可持续发展的“水稻+”发展模式^[1-3]。其中,“稻-羊肚菌”轮作模式因其独特的生态优势和经济效益脱颖而出。该模式基于羊肚菌耐低温、生长周期短的特点,充分利用稻后冬闲田种植羊肚菌,显著提高了农田资源的利用效率^[4]。羊肚菌(*Morchella*)兼具较高的食用价值和药用价值,备受市场青睐,其种植效益显著优于传统作物^[5]。目前,羊肚菌市场仍处于供给量少于需求量的状态,而中国长江中下游地区传统的以粮食生产为主的多熟种植方式受粮食单产水平达到瓶颈、化肥施用强度较高及劳动力机会成本增加等因素影响,面临冬季土地资源利用率不足、农田复种指数下降及经济效益偏低等问题,这些问题制约了区域农业的高质量发展^[6]。因此,充分利用冬闲田发展羊肚菌种植,不仅能够有效提高土地资源利用效率和农田产出效益,还能拓展该地区羊肚菌产业的发展空间,促进构建多元化食物供给体系。

然而,羊肚菌生长对场地要求较高,对土壤质量条件尤为敏感^[7]。生产者需在羊肚菌种植前优化与改良土壤质量,以维持适宜羊肚菌生长的土壤生境。现有的常规改良措施主要为施用土壤调理剂,如辛硫磷、硫酸铜钙、四聚乙醛、生石灰等^[7-8]。其中生石灰因具有成本低、环境次生风险低、效果稳定等优点而倍受关注^[9],目前,围绕生石灰施用对羊肚菌生长的影响的研究已有较多报道,明确了适宜羊肚菌生长的生石灰施用量为375~3 000 kg/hm²,不同产地环境的羊肚菌农田生石灰施用量存在显著差异,同一产地环境不同生石灰施用量对应的羊肚菌

产量亦存在较大的波动幅度^[9-11]。但上述研究主要集中于菜地与林地等环境,围绕水稻与羊肚菌轮作模式下羊肚菌生石灰适宜施用量尚缺乏针对性研究。

羊肚菌采收后残余的菌柄及营养袋等废弃物均含有丰富的养分,其还田对稻田增产及土壤培肥均具有正向作用^[12]。水稻生产是稻-羊肚菌轮作模式依存的先决条件,水稻稳产才能实现该模式可持续发展。生石灰是羊肚菌生产中常用的土壤调理剂,但是,在水稻与羊肚菌轮作时生石灰对羊肚菌后茬水稻的生产效应及土壤肥力等的影响则尚不清楚。因此,本研究拟将江苏省常熟市作为试验点,以六妹羊肚菌、南粳46水稻为试验对象,在稻-羊肚菌轮作模式下开展施用生石灰对羊肚菌产量、水稻产量及氮养分吸收利用效率和土壤肥力的影响试验,探讨该模式下羊肚菌与水稻稳产、水稻氮肥利用率较高的生石灰施用量,为稻-羊肚菌轮作模式的健康发展提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2020年-2021年在江苏省常熟市坞坵村(31°35'04"N, 120°52'22"E)开展,试验点2020年以前的种植模式为水稻与小麦轮作,自2020年起推行水稻与羊肚菌轮作,其中,2020年12月-2021年4月种植羊肚菌,2021年6月-11月种植水稻。试验点属北亚热带季风气候区,年平均降水量约1 100 mm,平均温度约15.7℃,年日照时数为2 000 h以上,年无霜期为230 d以上。试验点土壤为乌栅土,耕层(0~15 cm)土壤pH值为6.3、有机质含量为35.1 g/kg、全氮含量为1.8 g/kg、碱解氮含量为142.2 mg/kg、有效磷含量为23.6 mg/kg、速效钾含量为209.2 mg/kg。

1.2 供试材料

1.2.1 羊肚菌菌种、营养袋 供试羊肚菌菌种为六妹,营养袋原料为小麦、碎木屑及营养土,菌种与营养袋均购自苏茸生物科技发展(徐州)有限公司。

1.2.2 羊肚菌田间设施 拱棚长度为40.0 m,宽度为1.5 m、高度为0.8 m,拱棚上方依次铺设塑料薄膜与遮阳网,塑料薄膜厚度100 μm ,遮阳网遮光率为70%~80%。拱棚内设有畦床、畦沟,畦床宽度为1.2 m,畦沟宽度为0.3 m,深度为0.2 m。各畦面布设滴灌带2条,滴灌带直径为3.3 cm、壁厚为0.2~0.3 mm,滴孔直径为1.5 mm。

1.2.3 水稻品种 供试水稻品种为南粳46,属于中熟晚粳优质水稻,是江苏省主栽水稻品种。

1.2.4 供试肥料 供试肥料包括:尿素,氮含量46%;配方肥,N-P₂O₅-K₂O 比例为20:9:15(重量比);过磷酸钙,P₂O₅含量12%;氯化钾,K₂O含量60%。

1.3 试验设计

供试生石灰于羊肚菌播种前施用,共设置4个梯度的生石灰施用量,分别为0 kg/hm²、375 kg/hm²、750 kg/hm²、1 125 kg/hm²,分别记作C1、C2、C3、C4,每个处理重复3次,共12个小区,每个小区随机区组排列,各小区面积为37.5 m²(25.0 m×1.5 m)。各处理的菌种播量和营养袋投入量一致,菌种播量为2 250 kg/hm²,营养袋投入量为15 000 kg/hm²。于羊肚菌采收后,将产生的残余菌柄与废弃营养袋全量还田,然后种植水稻。

各处理水稻施氮量均为270.0 kg/hm²,基肥、分蘖肥与穗肥的施用比例为3:3:4(重量比),其中,基肥施用配方肥与尿素,分蘖肥、穗肥施用尿素。按N:P₂O₅:K₂O=1.0:0.5:1.0(重量比)施用磷肥与钾肥,磷肥全部基施,采用配方肥与过磷酸钙配合施用;钾肥分2次施用,基肥与穗肥的施用比例为1:1(重量比),其中基肥施用配方肥与氯化钾,穗肥施用氯化钾。

1.4 田间管理

首先,将水稻秸秆全部还田,然后施用生石灰,旋耕土壤,以田块为单位在田块四周布置排水沟,并沿田埂方向按1.2.2中的要求整理畦床、畦沟。羊肚菌于2020年12月17日播种,播种后覆盖黑色地膜。于羊肚菌播种后第10 d揭开地膜,在畦面摆放营养袋并布设滴灌带,然后覆盖黑色地膜并在地膜

上均匀打孔,最后在畦床上方搭建拱棚。于羊肚菌播种后第49 d,揭除黑色地膜,然后利用滴灌补水对羊肚菌催菇。羊肚菌催菇后,调节拱棚内部温湿度促进羊肚菌出菇,试验期拱棚内部平均气温为9.3℃,平均空气相对湿度为78.3%。当羊肚菌菌盖褶皱充分展开时采收羊肚菌,采收周期为2021年3月17日-4月26日。羊肚菌采收后,将其残余菌柄与营养袋等生产废弃物全量还田,利用旋耕机还入土壤后泡田,然后进行水稻移栽。水稻移栽时间为2021年6月21日,秧苗叶龄4.5~5.0叶,移栽行距、株距分别为30 cm、14 cm,水稻收割时间为2021年11月4日。水稻生产田间管理措施与常规大田生产相同^[13]。

1.5 测定指标

1.5.1 羊肚菌受病原真菌感染情况 以小区为单位,调查羊肚菌成熟期的青霉菌、链孢霉菌、毛霉菌、镰刀菌及白霉菌等真菌感染情况。感染率计算,以青霉菌为例,青霉菌感染率=各小区青霉菌感染面积(m²)/小区面积(m²)×100%。

1.5.2 羊肚菌产量及农艺性状 以小区为单位,选取1 m²调查羊肚菌子实体数量并测定子实体高度、子实体单重及累计产量。羊肚菌子实体采收方式为沿地面水平方向在菌柄近地面处呈45°斜向地面切割。

1.5.3 水稻籽粒产量及构成 水稻成熟后,调查各小区水稻的有效穗数、每穗总粒数、结实率和千粒重等产量构成因素,各小区采用人工实割单独测产^[13]。

1.5.4 水稻植株氮含量 将成熟期的水稻秸秆与籽粒样品粉碎并过筛,采用凯氏定氮法测定植株全氮含量,计算植株氮素积累量及籽粒氮素吸收利用效率^[14]。

1.5.5 土壤养分含量 在羊肚菌与水稻成熟期于各小区采集土壤样品(0~15 cm土层)。每个小区沿对角线采集3个点作为一个混合样品。采集的土壤样品自然风干,过2.0 mm筛后测定土壤pH值(采用土水重量比1.0:2.5浸提,使用pH计测定),过0.15 mm筛后采用重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机质含量,采用半微量凯式法测定全氮含量,采用硫酸-高氯酸消解法测定全磷含量,采用氢氟酸-高氯酸消解法测定全钾含量;过0.85 mm筛后采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量,采用碳酸氢钠浸

提-钼锑抗比色法测定有效磷含量,采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定速效钾含量^[15]。

1.6 数据处理

采用 Excel 进行数据整理与绘图,采用 SPSS 软件中 One-way ANOVA 方法进行方差分析,采用最小显著性差异法(LSD)检验处理间的差异显著性($P < 0.05$),采用 Origin 软件进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式中羊肚菌受真菌感染及产量、农艺性状的影响

2.1.1 施用生石灰对羊肚菌受真菌感染的影响

青霉菌、链孢霉菌、毛霉菌、镰刀菌及白霉菌为羊肚菌生长过程中易感染的真菌种类,施用生石灰可降低羊肚菌受其感染的概率。如表 1 所示,与未施用生石灰(C1 处理)相比,施用生石灰(C2 处理、C3 处理及 C4 处理)可显著降低羊肚菌的青霉菌感染率,各施用生石灰处理的青霉菌感染率无显著差异。随着生石灰施用量的增加,羊肚菌的链孢霉菌、镰刀菌与白霉菌感染率逐渐降低,链孢霉菌、镰刀菌与白霉菌的感染率均以 C3 处理与 C4 处理最低,且显著低于其他处理。各处理间的毛霉菌感染率无显著差异。

表 1 不同处理羊肚菌受病原真菌感染率

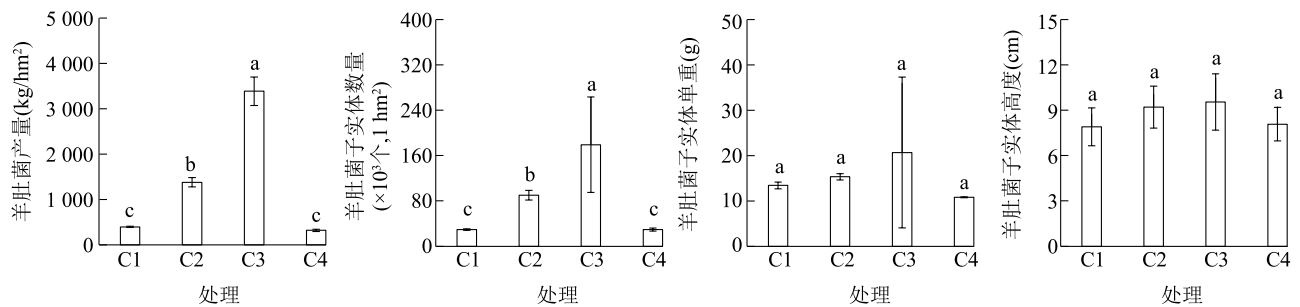
Table 1 Infection rates of *Morchella esculenta* with pathogenic fungi under different treatments

处理	青霉菌感染率 (%)	链孢霉菌感染率 (%)	毛霉菌感染率 (%)	镰刀菌感染率 (%)	白霉菌感染率 (%)
C1	0.1a	2.4a	0a	30.4a	3.4a
C2	0b	0.1b	0a	8.9b	2.4b
C3	0b	0c	0a	2.1c	0c
C4	0b	0c	0a	2.1c	0c

C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理分别表示施用生石灰 0 kg/hm²、375 kg/hm²、750 kg/hm²、1 125 kg/hm²。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 施用生石灰对羊肚菌产量及农艺性状的影响

稻-羊肚菌轮作模式下,施用生石灰的各处理间羊肚菌产量存在差异,羊肚菌产量表现为随生石灰施用量增加先升后降(图 1)。C3 处理(生石灰施用量 750 kg/hm²)的羊肚菌产量最高,达到 3 385 kg/hm²,相较于 C1 处理(施用生石灰 0 kg/hm²)、C2 处理(生石灰施用量 375 kg/hm²)及 C4 处理(生石灰施用量 1 125 kg/hm²),产量分别增加 2 990 kg/hm²、2 007 kg/hm²及 3 067 kg/hm²。各处理对应的羊肚菌子实体数量变化趋势与产量一致,处理间差异达显著水平(图 1)。羊肚菌子实体单重及子实体高度等农艺性状则在处理间无显著差异(图 1)。



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 各处理羊肚菌产量及农艺性状

Fig.1 Yield and agronomic traits of *Morchella esculenta* under different treatments

2.2 施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式下水稻产量及产量构成因素的影响

各处理的水稻产量随羊肚菌季生石灰施用量增加表现为先增后降,相较于 C1 处理,C2 处理的水稻产量提高,C3 处理、C4 处理的水稻产量降低,差异均未达到显著水平(表 2)。产量构成因素方面(表 2),各处理水稻的有效穗数随羊肚菌季生石灰施用

量的增加表现为逐渐降低,C2 处理、C3 处理、C4 处理的水稻有效穗数较 C1 处理分别降低 0.5%、17.5%、19.4%,其中,C4 处理与 C1 处理间差异达显著水平;C2 处理、C3 处理、C4 处理水稻的每穗总粒数分别较 C1 处理提高 10.8%、17.0%、13.3%,其中 C3 处理与 C1 处理间差异达显著水平;各处理间水稻结实率与千粒重均无显著差异。

2.3 施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式下土壤肥力的影响

2.3.1 施用生石灰对农田土壤 pH 值的影响 稻-羊肚菌轮作模式下各处理农田土壤 pH 值在羊肚菌季与水稻季均表现为存在显著差异(图 2)。在羊肚菌季,各处理农田土壤 pH 值随生石灰施用量增加逐渐增加,相较于 C1 处理,C2 处理、C3 处理及 C4

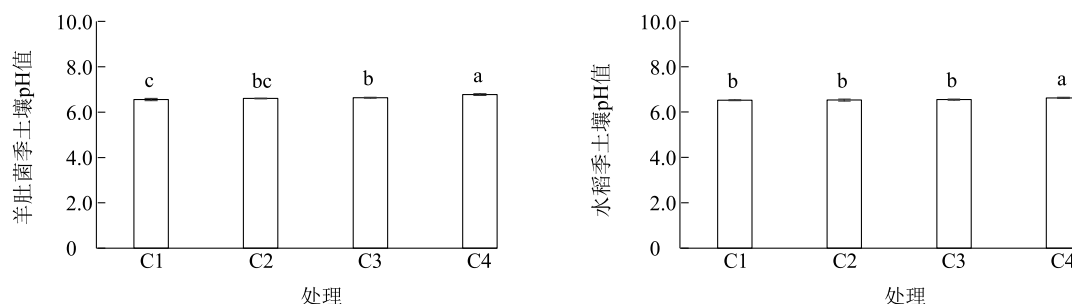
处理分别提高 0.7%、1.2% 及 3.2%,C3 处理、C4 处理与 C1 处理间差异达到显著水平;在水稻季,各处理农田土壤的 pH 值变化规律与羊肚菌季一致,农田土壤 pH 值在施用生石灰后的增幅较羊肚菌季有所降低,C2 处理、C3 处理及 C4 处理的土壤 pH 值分别较 C1 处理提高 0.2%、0.5%、1.6%,C4 处理与 C1 处理间差异达到显著水平(图 2)。

表 2 各处理水稻产量及产量构成因素

Table 2 Rice yield and its components under different treatments

处理	有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	每穗总粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
C1	400.2a	101.7b	92.2a	24.5a	9 060.0ab
C2	398.0a	112.7ab	92.3a	23.4a	9 477.0a
C3	330.2ab	119.0a	91.9a	24.1a	8 956.9b
C4	322.4b	115.2ab	93.3a	24.3a	8 220.0b

C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

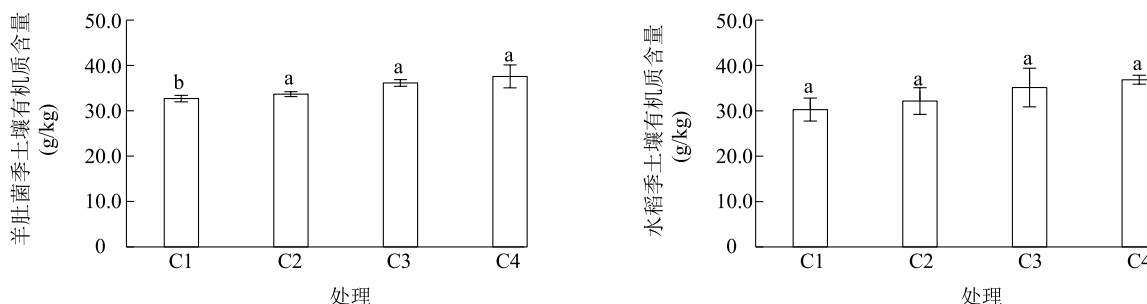
图 2 各处理农田土壤 pH 值

Fig.2 Soil pH values under different treatments

2.3.2 施用生石灰对农田土壤有机质含量的影响

稻-羊肚菌轮作模式下,施用生石灰对羊肚菌季农田土壤的有机质含量产生了显著影响,各处理土壤有机质含量表现为随生石灰施用量增加而增加(图 3),相较于 C1 处理,C2 处理、C3 处理、C4 处理的土

壤有机质含量分别显著提高 3.0%、10.6%、14.9%。在水稻季,施用生石灰的各处理土壤有机质含量较 C1 处理提高 6.2%~21.7%,但各处理间差异未达到显著水平(图 3)。



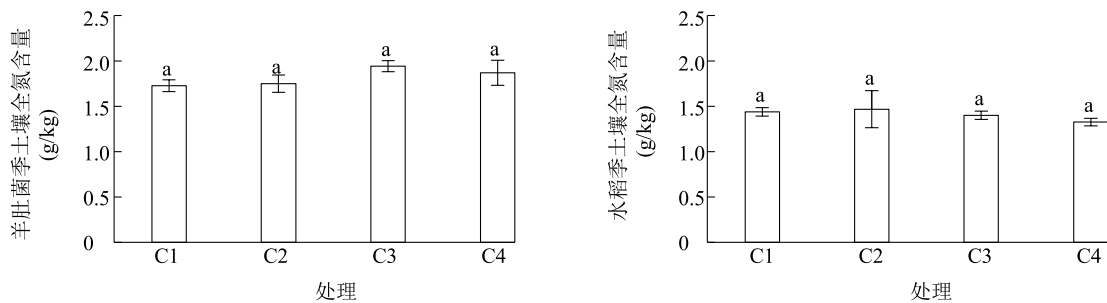
C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 各处理农田土壤有机质含量

Fig.3 Soil organic matter content under different treatments

2.3.3 施用生石灰对农田土壤氮含量的影响 稻-羊肚菌轮作模式下,羊肚菌季各处理土壤全氮含量与碱解氮含量均高于 C1 处理,增幅分别为 1.1%~12.3%与 0.1%~0.5%,但土壤全氮含量与碱解氮含量在各处理间差异均未达到显著水平(图 4、图 5)。在水稻季,各处理农田土壤全氮含量随羊肚菌季生石灰施用量的增加表现为先增后降,C2、C3、C4 处理的土壤全氮含量分别较 C1 处理提高 1.9%、降低

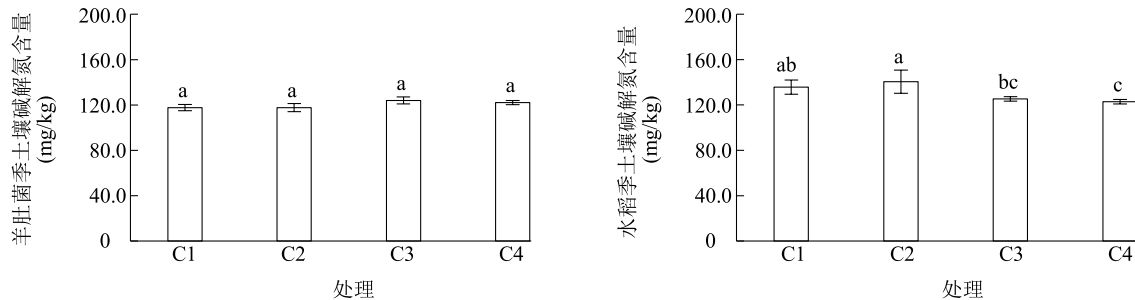
2.8%、降低 7.9%,但土壤全氮含量在各处理间差异未达到显著水平(图 4);施用生石灰对水稻季土壤碱解氮含量产生了显著的影响,土壤碱解氮含量随羊肚菌季生石灰施用量增加先增后降,C2 处理、C3 处理、C4 处理的土壤碱解氮含量分别较 C1 处理提高 3.5%、降低 7.7%、降低 9.5%,其中 C4 处理与 C1 处理间差异达显著水平(图 5)。



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 各处理土壤全氮含量

Fig.4 Soil total nitrogen content under different treatments



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 各处理土壤碱解氮含量

Fig.5 Soil alkali-hydrolyzed nitrogen content under different treatments

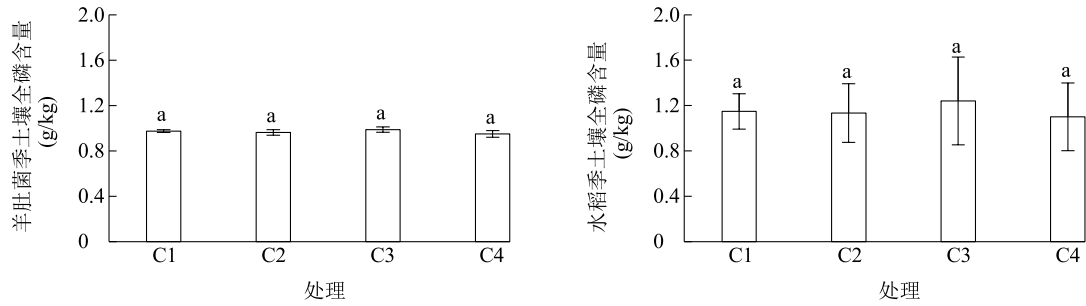
2.3.4 施用生石灰对农田土壤磷含量的影响 水稻与羊肚菌轮作时,在羊肚菌季施用生石灰未对土壤全磷含量与有效磷含量产生显著影响,土壤全磷含量与有效磷含量在处理间的差异均未达显著水平(图 6、图 7);在水稻季,土壤全磷含量与有效磷含量在处理间的差异同样未达显著水平(图 6、图 7)。

2.3.5 施用生石灰对农田土壤钾含量的影响 稻-羊肚菌轮作模式下,施用生石灰对羊肚菌季农田土壤全钾含量产生了显著的影响,各处理土壤全钾含量随生石灰施用量增加呈递减变化,其中,C4 处理的土壤全钾含量较 C1 处理显著降低(图 8);羊肚菌季各处理农田土壤速效钾含量差异未达到显著水平

(图 9)。施用生石灰未对水稻季农田土壤全钾含量及速效钾含量产生显著影响(图 8、图 9)。

2.4 稻-羊肚菌轮作模式下作物产量与农田土壤养分含量的相关性分析

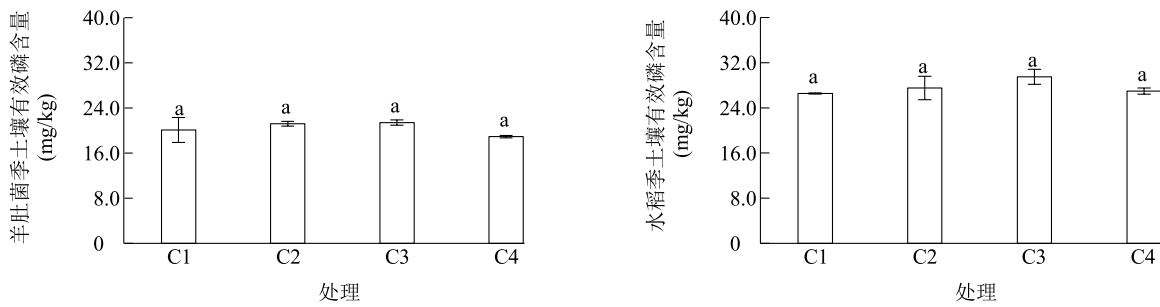
为探明生石灰施用对稻-羊肚菌轮作模式生产效应的影响,将羊肚菌产量、水稻产量与农田土壤各养分因子进行 Pearson 相关性分析。结果(表 3)表明,羊肚菌产量与土壤的碱解氮含量、有效磷含量间均呈显著正相关 ($P < 0.05$),而与土壤 pH 值等其他指标间的相关性均未达到显著水平 ($P > 0.05$);水稻产量与土壤的 pH 值呈显著负相关 ($P < 0.05$),与土壤碱解氮含量、速效钾含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 各处理土壤全磷含量

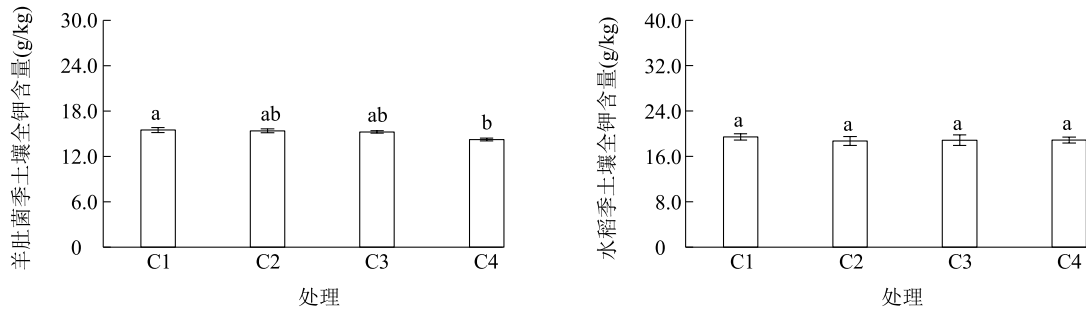
Fig.6 Soil total phosphorus content under different treatments



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 各处理土壤有效磷含量

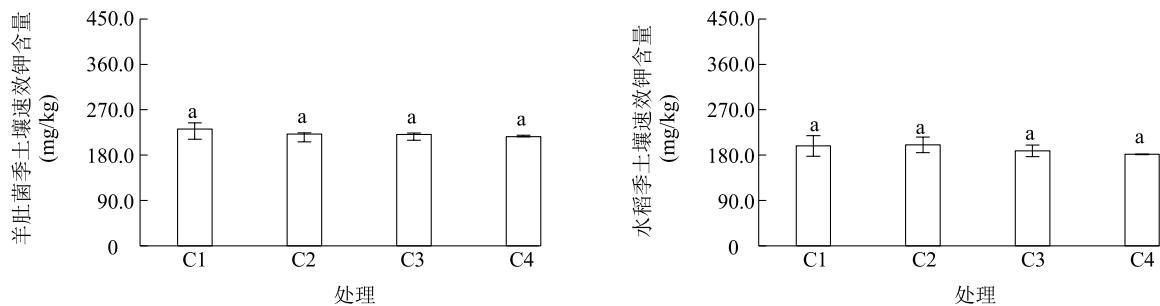
Fig.7 Soil available phosphorus content under different treatments



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 8 各处理土壤全钾含量

Fig.8 Soil total potassium content under different treatments



C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 9 各处理土壤速效钾含量

Fig.9 Soil available potassium content under different treatments

表 3 羊肚菌产量、水稻产量与农田土壤养分含量间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between *Morchella esculenta* yield, rice yield and farmland soil nutrient content

指标	pH 值	有机质含量	全氮含量	碱解氮含量	全磷含量	有效磷含量	全钾含量	速效钾含量
羊肚菌产量	-0.139	0.157	0.499	0.756 *	0.465	0.577 *	-0.011	-0.176
水稻产量	-0.817 *	-0.381	0.493	0.633 *	-0.051	0.293	0.022	0.672 *

* 表示显著相关 ($P < 0.05$)。

2.5 施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式下水稻对氮吸收利用的影响

羊肚菌季施用生石灰各处理与未施用生石灰处理相比,水稻籽粒含氮量无显著差异,水稻秸秆含氮量显著降低,与 C1 处理相比,C2 处理、C3 处理和 C4 处理分别降低 11.9%、20.8% 和 26.1% (图 10)。

水稻氮素积累量方面,C2 处理与 C1 处理间差异未达到显著水平,C3 处理与 C4 处理分别较 C1 处理显著降低 16.7% 与 22.0% (图 11)。羊肚菌季施用生石灰各处理水稻氮素籽粒生产效率均高于 C1 处理,提高幅度为 6.6%~15.5%,其中 C3 处理、C4 处理与 C1 处理间差异达到显著水平 (图 11)。

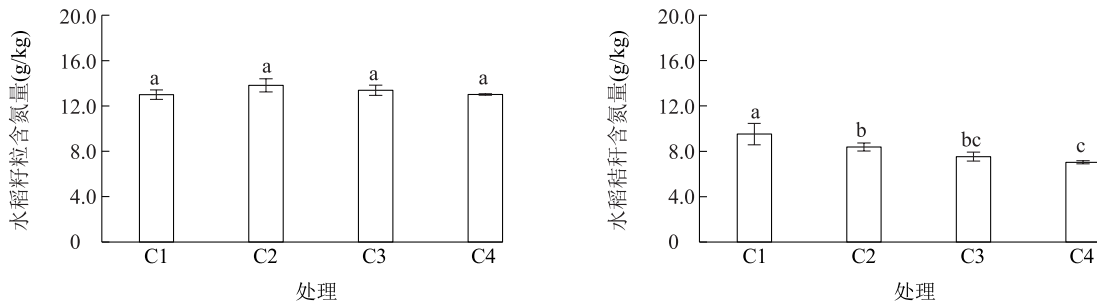
C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 10 各处理水稻籽粒含氮量和秸秆含氮量

Fig.10 Nitrogen content in rice grain and straw under different treatments

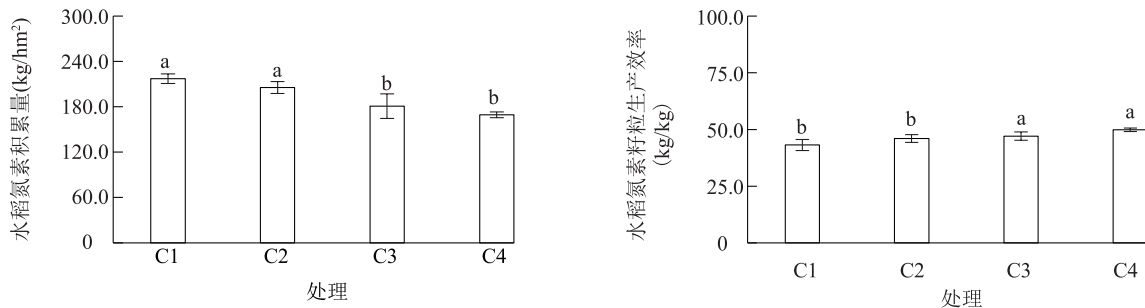
C1 处理、C2 处理、C3 处理、C4 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 11 各处理水稻氮素积累量与氮素籽粒生产效率

Fig.11 Rice nitrogen accumulation and nitrogen grain production efficiency under different treatments

3 讨论

3.1 施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式生产效应的影响

土壤处理剂可直接影响羊肚菌菌丝生长及产量形成,施用生石灰可协同营造适宜土壤环境,保障羊肚菌的优质稳产^[16-17]。羊肚菌对土壤 pH 值较为敏

感,羊肚菌在土壤 pH 值 6.0~8.0 范围内均可生长^[18],施用生石灰提高了本研究中土壤的 pH 值,但羊肚菌产量与土壤 pH 值无显著相关性,这可能与施用生石灰的各处理的土壤 pH 值(6.6~6.8)处于羊肚菌的适宜生长范围有关。羊肚菌生长易受青霉菌及链孢霉菌等真菌性病原菌危害而发生大面积减产或绝收^[19-20],本研究中施用生石灰的各处理

在羊肚菌成熟期的真菌感染率较 C1 处理明显降低,这归因于生石灰对土壤病原菌的消杀作用,这与刘鑫等^[21]在连续施用石灰 3 年后土壤微生物类群磷脂脂肪酸含量平均降低 30% 的研究结果一致。施用生石灰还通过调节土壤肥力因子影响羊肚菌生长,表现为羊肚菌产量与土壤碱解氮含量、有效磷含量呈显著正相关,C2 处理、C3 处理的羊肚菌产量较 C1 处理显著增加,C4 处理的羊肚菌产量则与 C1 处理差异不显著,推测过量施用生石灰可能导致土壤中脲酶活性、土壤孔隙度及微生物群落活性显著下降^[21],从而不利于羊肚菌生长。总之,本研究结果表明,生石灰施用量为 750 kg/hm² 时羊肚菌产量显著高于其他处理,这与何琳华等^[22]的研究结果一致。

C2 处理、C3 处理及 C4 处理的水稻有效穗数均低于 C1 处理,其中 C4 处理与 C1 处理间差异达显著水平,C2 处理、C3 处理及 C4 处理的水稻秸秆含氮量较 C1 处理显著降低,表明羊肚菌季施用生石灰可能会影响后茬水稻前期生长所需的氮素养分供应,并且此种氮素胁迫随羊肚菌季石灰用量的提高而加剧。C2 处理、C3 处理及 C4 处理每穗总粒数均高于 C1 处理且处理间籽粒含氮量无显著差异,表明因水稻生长前期的氮素供应不足受到的产量限制在水稻生长中后期通过增加每穗总粒数得以补偿,C2 处理、C3 处理、C4 处理的籽粒产量与 C1 处理无显著差异。上述发现与相关研究认为适量施用石灰能够提高水稻产量的观点有所不同^[23-24],这可能与水稻轮作模式及相应土壤的基础地力条件尤其是土壤 pH 值不同有关。

3.2 施用生石灰对稻-羊肚菌轮作模式农田土壤肥力的影响

本研究中,施用生石灰显著增加了土壤的 pH 值,这与已有研究结果相一致,认为秸秆还田联合施用生石灰可提高土壤 pH 值^[25]。氮素是羊肚菌生长需求的重要营养元素,目前关于羊肚菌氮素营养运输与利用机制的研究尚未有定论,罗祥英等^[26]认为羊肚菌内氮素营养是由营养袋通过土壤中菌丝网络运输供应,Tan 等^[27]的研究结果则表明羊肚菌生长过程中获取的氮素主要来源于土壤,本研究中,羊肚菌季各处理的土壤全氮含量与碱解氮含量无显著差异,推测与适宜石灰用量有利于维持羊肚菌适宜土壤环境从而促进菌丝生长并运输营养袋内氮素养

分有关^[27]。

在水稻季,C3 处理与 C4 处理的土壤碱解氮含量均较 C1 处理降低,且 C4 处理与 C1 处理间差异达显著水平,这可能因为羊肚菌季投入的石灰类型为氧化钙,水稻生产淹水-湿润的特殊管理方式下氧化钙与土壤内部氨水充分接触,并反应后促使氮素以氨形态挥发,从而降低土壤碱解氮,这与朱坚等^[28]的研究结果相一致,认为生石灰施用会增加酸性稻田氨挥发损失,并且氨挥发量随石灰用量的增加而增加。本研究结果表明,C1 处理、C2 处理、C3 处理及 C4 处理土壤有效磷含量在羊肚菌季与水稻季均无显著差异,这与已有研究认为施用生石灰会通过提高钙结合态磷含量从而增加土壤有效磷含量的研究结果不一致^[29-30],推测这种差异可能与本研究中施用的生石灰量不同有关。本研究结果还表明 C2 处理、C3 处理及 C4 处理的土壤全钾含量在羊肚菌季较 C1 处理降低,其中 C4 与 C1 处理间差异达显著水平,这与陈竹君等^[31]的研究结果一致,认为生石灰施用后土壤吸附位点对 Ca²⁺ 的亲合力较 K⁺ 强,生石灰施用后会提高土壤溶液 K⁺ 活性,从而导致钾素流失;稻田土壤中的钾含量在处理间未表现出显著差异,这可能与试验点水稻秸秆全量还田并腐解后补充了部分钾素有关。

3.3 稻-羊肚菌轮作模式的生产效应与农田土壤肥力因子的相关性

适宜的土壤环境对于提高、维持作物产量具有重要意义^[32-40]。羊肚菌产量与土壤碳、氮、磷、钾等元素的有效态含量间往往兼具同速增长或异速增长关系,这主要取决于羊肚菌的生长环境^[41]。本研究结果显示,羊肚菌产量主要与土壤碱解氮含量、有效磷含量呈显著正相关,推测主要与试验点稻茬农田偏酸性的土壤环境限制了土壤碱解氮活性有关^[42],而适宜的生石灰施用量兼具提高土壤碱解氮活性与保障羊肚菌适宜生境以促进外源氮养分输送的双重作用。

本研究结果表明,水稻产量与土壤 pH 值、碱解氮含量间分别呈显著负相关、显著正相关,表明羊肚菌季施用生石灰通过改变土壤 pH 值与碱解氮含量影响了水稻产量。为此,本研究进一步比较了各处理在水稻成熟期秸秆与籽粒的含氮量,结果表明,C2 处理、C3 处理及 C4 处理对应的秸秆含氮量均显著低于 C1 处理,但籽粒含氮量与 C1 处理无显著差

异,表明在羊肚菌季施用生石灰会影响土壤对水稻生长的氮素供应,并且此种影响主要体现在生长前期,这可能与水稻生产管理中淹水方式主要集中于水稻生长前期有关,也可能与还田营养袋腐解后在生长后期释放养分供应水稻生长有关,尚需对水稻与羊肚菌轮作过程的土壤氮养分变化规律开展进一步研究。另外,本研究结果还显示,水稻产量与土壤速效钾含量呈显著正相关,与已有研究结果相一致,这由水稻高需钾量的生长特性决定^[43],值得注意的是,本研究仅开展 1 年,各处理间的土壤钾含量在当季稻田的差异未达到显著水平,但在羊肚菌季表现为 C4 处理的土壤全钾含量显著低于 C1 处理,考虑到土壤吸附位点对 Ca^{2+} 的亲合力强于 K^{+} ^[31],水稻与羊肚菌连续轮作下的稻田土壤钾含量变化规律及其相应的水稻稳产施肥策略尚待进一步研究。

4 结论

施用生石灰可显著降低羊肚菌受病原真菌感染的风险,在羊肚菌播种前施用 $750 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 生石灰,能显著提升羊肚菌产量。与未施用生石灰处理相比,羊肚菌季施用生石灰对水稻产量无显著影响,适宜的生石灰施用量 ($750 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 有利于提高水稻每穗总粒数,高生石灰施用量 ($1\ 125 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 则会降低水稻有效穗数,这可能与高生石灰施用量导致土壤氮素供应能力显著下降有关。此外,适宜施用量的生石灰有利于提高土壤 pH 值,但高生石灰施用量 ($1\ 125 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 降低水稻季土壤中碱解氮含量。为此,在试验区首年开展稻-羊肚菌轮作时,维持六妹羊肚菌与南粳 46 水稻稳产效果的适宜生石灰施用量为 $750 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。在实际生产中应结合轮作模式的种植年限、土壤肥力及管理模式等因素综合考虑生石灰施用量,为该轮作模式的可持续发展提供科学依据。

参考文献:

- [1] 胡启良,杨滨娟,黄国勤. 紫云英与油菜混播对水稻产量、土壤活性有机碳及其组分的影响[J]. 生态科学,2024,43(3):161-168.
- [2] 王守红,张诚信,马林杰,等. 稻虾共作模式下利于水稻产量稻米品质协同的适宜栽插密度[J]. 江苏农业学报,2023,39(8):1668-1679.
- [3] 王 昂,戴丹超,马旭洲,等. 稻蟹共作模式对土壤微生物量氮和酶活性的影响[J]. 江苏农业学报,2019,35(1):76-84.
- [4] 陈 华,姜建新,徐代贵,等. “稻-稻-菌”轮作技术及其示范成效[J]. 食用菌,2023,45(5):58-59,61.
- [5] 罗喜秀. 稻菌(菇)模式生态足迹和经济效益评估[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
- [6] 郝心怡,张 江,白 瑞,等. 长江中下游地区耕地复种指数时空特征及驱动机制研究[J]. 国土资源科技管理,2021,38(4):15-27.
- [7] 彭 博,边银丙,龚钰华,等. 大田栽培羊肚菌的病害及其综合防控技术[J]. 食药菌,2024,32(2):129-135.
- [8] 赵 琪. 我国羊肚菌产业发展现状、前景及建议[J]. 食药菌,2018,26(3):148-151,156.
- [9] 张 勇,李 青,李云霞,等. 暖棚栽培羊肚菌的营养及土壤环境分析[J]. 中国食用菌,2023,42(6):74-79.
- [10] 贺新生,伍永华,王光礼,等. 羊肚菌生产大面积绝收的原因分析与对策[J]. 食用菌,2021,43(6):5-8.
- [11] 苏干光,邹晓霞,徐肖平,等. 浙西地区羊肚菌菌种制作及大田设施高产栽培技术[J]. 食药菌,2024,32(1):72-76.
- [12] 金梅娟,王海候,顾俊荣,等. “稻-羊肚菌”轮作下稻田消纳羊肚菌废弃物的减氮效应研究[J]. 中国农学通报,2024,40(20):92-98.
- [13] 刘红江,郭 智,张岳芳,等. 不同类型有机肥对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(4):645-651.
- [14] 刘梦竹,王 锐,冯 源,等. 控释尿素释放周期对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(5):827-834.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [16] 李银双,李 倩,杨 梅,等. 栽培羊肚菌土壤及其消毒方式比较试验[J]. 食用菌,2022,44(4):55-57,69.
- [17] 李汉燕,王日新,李海涛,等. 设施大棚土壤改良对羊肚菌产量及效益的影响[J]. 农业科技通讯,2023(2):102-105.
- [18] 董明辉,谢春芹,金梅娟,等. 水稻-羊肚菌轮作模式与技术[M]. 苏州:苏州大学出版社,2023:38-39.
- [19] 刘 力,刘跃鹏. 桑枝粉屑栽培羊肚菌技术[J]. 蚕桑茶叶通讯,2024(5):8-10.
- [20] 王浩东,赵 锐,吴亮亮,等. 羊肚菌生物学特性及栽培技术研究进展[J]. 中国野生植物资源,2024,43(2):91-95.
- [21] 刘 鑫,尹泽润,盛 浩,等. 水稻土微生物群落、酶活性及理化性质对有机肥、石灰连续施用的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(1):63-73.
- [22] 何琳华,徐 蕊,嵇伟彬,等. 苏南地区不同羊肚菌菌株稻田栽培试验[J]. 中国食用菌,2018,37(4):30-33,39.
- [23] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):160-167.
- [24] HOLLAND J E, BENNETT A E, NEWTON A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review[J]. Science of the Total Environment,2018,610:316-332.
- [25] 刘 磊,廖 萍,邵 华,等. 施石灰和秸秆还田对双季稻田土壤钾素表现平衡的互作效应[J]. 作物学报,2022,48(1):226-237.
- [26] 罗祥英,李文芝,李 健,等. 羊肚菌人工栽培过程中外援氮素

- 营养的运输机制[J]. 食用菌学报,2022,29(3):28-31.
- [27] TAN H, KOHLER A, MIAO R Y, et al. Multi-omic analyses of exogenous nutrient bag decomposition by the black morel *Morchella importuna* reveal sustained carbon acquisition and transferring[J]. *Environmental Microbiology*,2019,21(10):3909-3926.
- [28] 朱 坚,彭 华,李尝君,等. 生石灰施用增加了酸性双季稻田氮素氨挥发损失[J]. 湖南农业科学,2017(7):32-36.
- [29] 沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 2版.北京:高等教育出版社,2021:196-201.
- [30] 牛帅帅,郭大勇,杜 鹏,等. 磷肥种类及施磷水平对冬小麦生长发育和土壤磷库的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(8):1048-1055.
- [31] 陈竹君,王益权,周建斌,等. 日光温室栽培土壤供钾状况及 K-Ca 吸附交换特性研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1078-1084.
- [32] 李 帅,刘 昆,李思宇,等. 直播方式对水稻根系形态生理和产量影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2024,52(24):11-16.
- [33] 赵文举,曹 伟,吴克倩,等. 盐碱地水肥耦合对基质栽培番茄生长与产量品质的影响[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(6):619-626.
- [34] 刘香凝,脱云飞,王昭仪,等. 水肥耦合对土壤碳氮储量、理化性质及三七产量和皂苷含量的影响[J]. 南方农业学报,2023,54(10):2888-2900.
- [35] 周振鹏,叶含春,王振华,等. 降解膜覆盖下磁化水滴灌对加工番茄产量和水分利用效率的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(12):1268-1275.
- [36] 王文鹏,叶昌焕,黄振懿,等. 不同种植方式对土壤细菌群落结构及魔芋生长的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(11):3255-3264.
- [37] 张健利,王振华,刘茹华,等. 水肥互作对滴灌红枣耗水及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(6):597-604,613.
- [38] 依文莲,李秀芳,吴世清,等. 咸水灌溉下生物炭对玉米光合特性及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(6):605-613.
- [39] 杨梦乐,彭嘉宇,桂意云,等. 不同蔗叶生物炭施用量对甘蔗产量及养分吸收利用的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(3):803-811.
- [40] 赵 坤. 羊肚菌栽培土壤及营养需求分析[D]. 南充:西华师范大学,2023.
- [41] 宋金枝,于剑瑞,夏广清,等. 长白山区野生羊肚菌与其土壤成分的相关性分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):258-260.
- [42] 张龙辉,李源环,邓小华,等. 施用石灰和绿肥及生物有机肥后的酸性土壤 pH 和理化性状动态变化[J]. 中国烟草学报,2019,25(3):60-66.
- [43] 柳开楼,韩天富,黄 晶,等. 中国稻作区土壤速效钾和钾肥偏生产力时空变化[J]. 土壤学报,2021,58(1):202-212.

(责任编辑:陈海霞)