

引用格式:

曹孟岩, 项瑶, 何宏斌, 张楚婷, 宋玉, 靳程, 何春桃, 李俊年, 辛国荣. 播种量和施肥量对湘西冬种黑麦草及后作水稻生产的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 640–644.

CAO M Y, XIANG Y, HE H B, ZHANG C T, SONG Y, JIN C, HE C T, LI J N, XIN G R. Effects of sowing rates and fertilizing amounts on the productions of winter ryegrass and post-cropping rice in west Hunan[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(6): 640–644.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



播种量和施肥量对湘西冬种黑麦草 及后作水稻生产的影响

曹孟岩¹, 项瑶¹, 何宏斌¹, 张楚婷¹, 宋玉¹, 靳程¹, 何春桃¹, 李俊年², 辛国荣^{1*}

(1.中山大学农学院, 广东 深圳 518107; 2.吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000)

摘要:以多花黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)为材料, 设置3种播种量18、24、30 kg/hm² (分别为S1、S2、S3)和2种施肥量780、960 kg/hm² (分别为F1、F2), 共6个处理(S1F1、S1F2、S2F1、S2F2、S3F1、S3F2), 探究不同播种量和施肥量对湘西冬种黑麦草及后作水稻生产的影响。结果表明: S3F2处理黑麦草的鲜产量最高(68 300 kg/hm²), 比最低的S1F1处理高31.09%($P<0.05$); 施肥量与播种量交互效应对黑麦草的干产量和单位面积总粗蛋白、总粗纤维、总钙、总磷含量影响显著($P<0.05$), 播种量对鲜产量、干产量和单位面积总粗纤维、总钙、总磷含量均影响显著($P<0.05$); 种草后, 所有处理土壤的pH和有效磷含量均显著高于种草前的($P<0.05$), S3F2处理土壤全氮和有效磷含量最高, 分别达2.31 g/kg、67.61 mg/kg, 比种草前分别高12.68%($P>0.05$)和148.11%($P<0.05$); S3F2处理后后作水稻实际产量、单株总粒数、单株实粒数和千粒质量均显著高于其他处理的($P<0.05$); 后作水稻产量受黑麦草播种量的影响显著($P<0.05$), 播种量和施肥量的交互效应对水稻产量影响不显著($P>0.05$)。综上所述, 黑麦草在播种量为30 kg/hm²、施肥量为960 kg/hm²的栽培条件下的培肥效果最佳, 并且对后作水稻具有良好的增产效应, 适宜在湘西地区推广应用。

关键词: 多花黑麦草; 水稻; 播种量; 施肥量; 交互效应; 土壤理化性质; 产量

中图分类号: S543.6; S511.06

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2023)06–0640–05

Effects of sowing rates and fertilizing amounts on the productions of winter ryegrass and post-cropping rice in west Hunan

CAO Mengyan¹, XIANG Yao¹, HE Hongbin¹, ZHANG Chuting¹, SONG Yu¹,

JIN Cheng¹, HE Chuntao¹, LI Junnian², XIN Guorong^{1*}

(1.School of Agriculture, Sun Yat-sen University, Shenzhen, Guangdong 518107, China; 2.College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: *Lolium multiflorum* L. was selected as the material to investigate the effect of different planting methods including sowing and fertilizing on the productions of winter ryegrass and post-cropping rice in west Hunan. Three sowing rates, S1, S2, S3(18, 24, 30 kg/hm², respectively) and two fertilizing amounts, F1, F2(780, 960 kg/hm², respectively) were set-up, a total of 6 treatments(S1F1, S1F2, S2F1, S2F2, S3F1, S3F2). The results showed that the fresh weight of ryegrass in S3F2 was the highest(68 300 kg/hm²), and 31.09% higher than that in S1F1($P<0.05$). The results of

收稿日期: 2023–04–05

修回日期: 2023–11–13

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171683); 公益性行业(农业)科研专项(201503122); 广东省自然科学基金项目(2020A1515010494); “扬帆计划”引进创新创业团队专项(2015YT02H032)

作者简介: 曹孟岩(1998—), 男, 广东深圳人, 博士研究生, 主要从事草地生态学研究, caomy8@mail2.sysu.edu.cn; *通信作者, 辛国荣, 博士, 教授, 主要从事草地生态学研究, lssxgr@mail.sysu.edu.cn

two-way anova showed that the interaction effect of sowing and fertilizing amount had significant effects on the dry weight and the total crude protein, crude fiber, calcium and phosphorus content per unit area of ryegrass ($P < 0.05$). Sowing rate had significant effects on fresh weight, dry weight and total crude fiber, calcium and phosphorus content per unit area ($P < 0.05$). The results of soil nutrient content after winter ryegrass showed that the soil pH and available P in all treatments were significantly higher than those before winter ryegrass ($P < 0.05$). The contents of total N and available P in S3F2 were the highest (2.31 g/kg and 67.61 mg/kg), which were 12.68% ($P > 0.05$) and 148.11% ($P < 0.05$) higher than those before winter ryegrass. The actual yield, total grain of strain, solid grain of strain and 1000-grain weight of rice in S3F2 were significantly higher than other treatments ($P < 0.05$). The yield of post-cropping rice was only significantly affected by the sowing rate of ryegrass ($P < 0.05$), the interaction effect of sowing rate and fertilizing amount on rice yield was not significant ($P > 0.05$). In conclusion, under planting conditions of 30 kg/hm² sowing rates and 960 kg/hm² fertilizing amounts, the ryegrass had the best fertilizer effect and could promote the yield of the post-cropping rice. The optimal condition is recommend to apply and promote in west Hunan.

Keywords: ryegrass; rice; sowing rate; fertilizing amount; interaction effect ; soil physicochemical properties; yield

多花黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)属于禾本科黑麦草属,是禾本科牧草中的一种优质青饲料^[1]。20世纪90年代初,中国开始研究并构建“多花黑麦草-水稻”草田轮作系统(IRR),并在华南和西南地区大面积推广。多花黑麦草不仅可以缓解南方农区冬季畜牧业青饲料短缺的问题,还可通过腐解提高土壤肥力,改善土壤微生物群落结构,有助于增强南方稻田的生产能力^[2-3]。湘西是两季稻生产区,近年来由于生产结构的调整,大多一年只种一季水稻,冬闲田资源浪费严重。研究^[4]表明,在湘西两熟制地区引入 IRR 系统解决稻田冬闲问题是可行的,但目前还缺少合理的栽培模式。

本研究以多花黑麦草为研究对象,设置3种播种量和2种施肥量,测定黑麦草的产量、品质以及种草后土壤的理化性质,并对后作水稻进行考种,探究不同播种量和施肥量对冬种黑麦草生产、土壤性状和后作水稻生产的影响,以期为湘西冬季种植黑麦草提供合适的栽培管理方式,为 IRR 系统在湘西的推广提供技术支撑。

1 试验地基本概况

试验地位于湖南省怀化市麻阳兰村乡(109°82'E, 27°80'N),海拔高度约300 m;属亚热带季风气候,年均降水量约1600 mm。试验期间最高气温17.6℃,最低气温9.3℃,年均日照时数约1200 h。土壤类型为红壤,呈酸性,且养分缺乏^[5]。试验地土壤肥力均匀,种草前土壤pH为6.54,全氮、全磷、全钾含量分别为2.05、0.44、12.35 g/kg,有效氮、有效磷、有效钾含量分别为191.91、27.25、

77.39 mg/kg。

2 材料与方法

2.1 材料

试验选用“雷鸟”四倍体宽叶型多花黑麦草(*Lolium multiflorum* L. ‘Thunderbird’),试验前测定其发芽率为98%。供试水稻为株两优83,适宜在湖南稻瘟病轻发地区种植。

2.2 试验设计

试验采用双因素设计,依据何宏斌^[4]前期的试验,设置3个黑麦草播种量 S1(18 kg/hm²)、S2(24 kg/hm²)、S3(30 kg/hm²)和2个施肥量 F1(780 kg/hm²)、F2(960 kg/hm²)。试验于2017年10月至2018年5月进行。小区面积20 m²。随机区组设计,3次重复。黑麦草于2017年10月8日播种,播种前使用清水浸泡8 h,沥干后与细沙土混匀。肥料为复合肥(N、P₂O₅、K₂O的占比均为15%),基肥施用量为150 kg/hm²,追肥在每次刈割后3 d施用,F1、F2处理每次追肥施用量分别为210、270 kg/hm²。整个生长期刈割3次,分别在2017年12月中旬、2018年3月中旬、2018年5月中旬刈割。最后一次刈割后采用“S”形五点采样法用采土器采集距地表0~20 cm的土壤样品;捡出土壤样品中石砾、植物残根等杂物,带回实验室风干,过筛(孔径0.178 mm)后常温保存,用于种草后土壤理化性质的测定。取试验区距地表15 cm左右的土壤装入直径

40 cm、高 55 cm 的盆中, 每盆装土 20 kg, 每个小区装土 3 盆, 即每个处理种植 9 盆水稻, 每盆 2 株。装盆后注水淹过土壤, 模拟泡田过程, 搅拌均匀后移栽水稻秧苗; 水稻栽培期间共施用 675 kg/hm² 复合肥(N、P₂O₅、K₂O 的占比均为 15%), 其间基肥、追肥(分蘖期)的施用比例为 2 : 1。

2.3 黑麦草生长及品质指标的测定

株高的测定: 测量草层的绝对高度。总株高为每次刈割时株高的累加值。

地上部生物量的测定: 刈割留茬 5 cm, 刈割后称量黑麦草鲜质量; 取一定量鲜草带回实验室, 105 ℃杀青 40 min, 75 ℃烘干至恒重, 称量干质量。统计黑麦草 3 次刈割的总鲜产量和总干产量。

牧草品质指标的测定: 分别参照 GB/T 6432—1994、GB/T 6434—2006、GB/T 13885—2003、GB/T 6437—2002 测定粗蛋白、粗纤维、钙和总磷含量。取 3 次刈割时所测指标的平均值。参照曹丽霞等^[6]的方法计算单位面积总粗蛋白、总粗纤维、总钙和总磷含量。

2.4 土壤理化性质的测定

用 pH 计(PE-10, Sartorius)测定土壤的 pH 值, 风干土壤与纯水比为 1 : 2.5(g/mL)。参照鲁如坤^[7]的方法测定土壤氮、磷、钾等的含量。

2.5 水稻农艺性状的测定

于水稻成熟期进行收割, 统计每株水稻的株高、有效分蘖数、总粒数、实粒数和实际产量。脱粒后用小网袋单独晒干, 称量千粒质量, 计算结实率以及理论产量。

2.6 数据处理与分析

运用 Excel 2016 整理并统计数据; 采用 SPSS 23.0 进行方差分析及显著性检验。

3 结果与分析

3.1 播种量与施肥量对黑麦草生产性能的影响

如表 1 所示, S3F2 处理的总株高最高, 达 181.86

cm; S2F1 处理的总株高最低, 仅为 161.89 cm, 比 S3F2 低 10.98%。3 次刈割的总鲜产量统计结果显示, S3F2 处理的鲜产量最高, 为 68 300 kg/hm², 比鲜产量最低的 S1F1 处理高 31.09%($P < 0.05$); 施肥量相同的情况下, 鲜产量随播种量的增加呈上升趋势。总干产量统计结果显示, 最高的 S2F1 处理比最低的 S1F1 处理高 35.48%($P < 0.05$)。双因素方差分析结果(表 1)表明, 播种量对鲜产量和干产量均有显著性影响, 施肥量对鲜产量和干产量的影响均不显著; 施肥量与播种量交互效应对鲜产量的影响不显著, 但显著影响干产量。

表 1 不同处理黑麦草的生产性能及双因素方差分析结果

处理	总株高/cm	总鲜产量/ (kg hm ⁻²)	总干产量/ (kg hm ⁻²)
S1F1	174.13 ± 2.58	(52 100 ± 3100)c	(6820 ± 380)d
S1F2	174.19 ± 3.73	(54 700 ± 3400)c	(8180 ± 450)b
S2F1	161.89 ± 2.90	(62 700 ± 4300)ab	(9240 ± 450)a
S2F2	173.15 ± 4.40	(61 700 ± 3000)b	(7650 ± 370)c
S3F1	177.72 ± 7.63	(64 500 ± 3100)ab	(8600 ± 340)ab
S3F2	181.86 ± 4.42	(68 300 ± 2900)a	(8020 ± 310)bc
播种量	1.382	3.801*	5.290*
施肥量	0.729	0.915	1.109
播种量 × 施肥量	0.294	0.642	8.947*

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$);

“*”表示影响显著($P < 0.05$)。

3.2 播种量与施肥量对黑麦草品质的影响

从表 2 可以看出, S2F1 处理黑麦草单位面积粗蛋白、粗纤维、钙和磷含量均最高, 分别为 1330.99、1212.19、43.51、26.28 kg/hm²; S3F2 处理黑麦草的粗蛋白、钙含量仅次于 S2F1 处理的; S1F1 处理的单位面积粗蛋白、粗纤维、钙和磷含量均最低, 各指标分别比 S2F1 处理低 23.62%、34.96%、40.11% 和 34.47%。双因素方差分析结果(表 2)表明, 播种量对单位面积粗纤维、钙和磷含量影响显著, 施肥量对单位面积粗蛋白、粗纤维、钙和磷含量均无显著影响, 黑麦草播种量和施肥量的交互效应对单位面积粗蛋白、粗纤维、钙和磷含量均影响显著。

表 2 不同处理黑麦草的单位面积总粗蛋白、总粗纤维、总钙和总磷含量及双因素方差分析结果

处理	总粗蛋白含量	总粗纤维含量	总钙含量	总磷含量
S1F1	(1016.56±22.80)c	(788.38±70.19)b	(26.06±1.56)c	(17.22±1.06)b
S1F2	(1228.93±154.49)ab	(1032.13±121.75)a	(32.60±3.94)b	(20.41±2.34)b
S2F1	(1330.99±189.47)a	(1212.19±71.75)a	(43.51±6.29)a	(26.28±3.63)a
S2F2	(1146.36±103.63)abc	(1050.81±81.25)a	(29.44±2.38)bc	(17.68±0.99)b
S3F1	(1049.18±48.46)bc	(1036.75±59.31)a	(30.39±3.34)bc	(18.93±2.30)b
S3F2	(1147.00±22.18)abc	(1137.31±68.30)a	(34.92±1.53)b	(18.95±0.72)b
播种量	2.771	5.663*	6.139*	4.200*
施肥量	0.646	1.153	0.360	3.165
播种量×施肥量	5.132*	4.363*	15.504*	12.168*

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$); “*”表示影响显著($P<0.05$)。

3.3 播种量与施肥量对土壤理化性质的影响

表 3 为不同处理下第 3 次刈割后的土壤养分含量。从表 3 可以看出, 种草后所有处理土壤 pH 均显著高于种草前的, 但种草处理间无显著差异。S3F2 处理土壤全氮和有效磷含量最高, 分别达 2.31 g/kg、67.61 mg/kg, 比种草前的含量分别高 12.68% ($P>0.05$) 和 148.11% ($P<0.05$), 比 S3F1 处理

分别高 25.54% ($P<0.05$) 和 4.97% ($P>0.05$)。S3F1 处理的全钾含量最高(13.13 g/kg), 分别比种草前和 S1F2 处理的高 6.32% 和 9.33% ($P>0.05$)。上述结果表明, S3 处理在全氮、有效磷含量上对土壤养分含量影响程度更高。双因素方差分析结果显示, 播种量、施肥量以及播种量与施肥量的交互效应对土壤不同养分含量均无显著影响。

表 3 不同处理土壤养分含量及双因素方差分析结果

处理	pH	全氮含量/ (g kg ⁻¹)	有效氮含量/ (mg kg ⁻¹)	全磷含量/ (g kg ⁻¹)	有效磷含量/ (mg kg ⁻¹)	全钾含量/ (g kg ⁻¹)	有效钾含量/ (mg kg ⁻¹)
种草前	(6.54±0.12)b	(2.05±0.19)ab	191.91±5.63	0.44±0.04	(27.25±5.23)b	12.35±0.87	(77.39±6.45)a
S1F1	(7.73±0.17)a	(1.97±0.09)ab	184.32±8.95	0.38±0.03	(64.44±1.38)a	12.81±1.53	(47.99±7.72)b
S1F2	(7.80±0.13)a	(2.19±0.26)ab	184.33±18.77	0.37±0.02	(65.33±3.86)a	12.01±0.49	(50.54±8.64)b
S2F1	(7.86±0.17)a	(2.05±0.24)ab	187.32±11.56	0.37±0.03	(65.52±2.76)a	12.28±0.37	(46.12±5.16)b
S2F2	(7.59±0.18)a	(1.93±0.24)ab	184.32±15.89	0.38±0.03	(66.35±2.54)a	12.31±0.68	(41.81±2.89)b
S3F1	(7.83±0.13)a	(1.84±0.31)b	182.50±7.98	0.42±0.04	(64.41±3.14)a	13.13±0.97	(42.76±3.04)b
S3F2	(7.63±0.23)a	(2.31±0.43)a	182.64±12.89	0.40±0.05	(67.61±4.52)a	12.14±0.57	(49.38±5.43)b
播种量	0.096	0.197	0.094	1.986	0.235	0.251	1.256
施肥量	2.685	2.083	0.024	0.162	1.197	2.169	0.347
播种量×施肥量	1.622	1.687	0.028	0.284	0.269	0.618	1.345

同列数据不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.4 播种量与施肥量对后作水稻产量的影响

从表 4 可以看出, S1F1 处理后水稻株高显著高于其他处理, 比其他 5 个处理高 1.69% ~ 4.06%。在 S3F2 处理下后作水稻单株的实际产量最高, 达 122.01 g, 显著高于其他 5 个处理。S3F2 的理论产量最高, 达 9297.16 kg/hm², 比 S1F2、S1F2、S2F1、S2F2、S3F1 处理的分别高 84.51%、100.87%、107.38%、59.65% 和 54.68%。S3F2 处理后的水稻单

株总粒数、单株实粒数和千粒质量均最高, 分别为 5201.71、4154.07、28.88 g, 显著高于其他处理。当黑麦草播种量为 24、30 kg/hm² 时, 高施肥量处理(F2)下后作水稻理论产量高于低施肥量(F1)。双因素方差分析结果表明, 仅黑麦草播种量显著影响后作水稻理论产量, 施肥量及其与播种量的交互效应对后作水稻的理论产量无显著影响。

表4 不同处理后作水稻的农艺性状及产量

Table 4 The agronomic characters and yield of post-cropping rice under different treatments				
处理	株高/cm	单株有效分蘖数	单株总粒数	单株实粒数
S1F1	(110.81±3.07)a	(18.73±2.51)ab	(3471.71±510.65)b	(2804.71±419.28)b
S1F2	(108.76±4.02)b	(17.37±1.55)b	(3403.34±715.29)b	(2589.72±567.27)b
S2F1	(108.97±4.28)b	(17.22±1.64)b	(3562.12±715.26)b	(2673.55±487.14)b
S2F2	(108.70±5.52)b	(17.71±3.28)ab	(3729.34±724.17)b	(2971.01±577.17)b
S3F1	(106.49±4.67)b	(20.06±1.09)a	(3872.09±710.14)b	(2601.29±454.80)b
S3F2	(107.40±1.03)b	(22.02±1.06)a	(5201.71±181.45)a	(4154.07±325.44)a
处理	结实率/%	千粒质量/g	单株实际产量/g	理论产量/(kg hm ⁻²)
S1F1	(81.01±2.15)a	(21.52±2.76)b	(76.36±5.25)cd	(5038.82±886.16)b
S1F2	(76.26±6.27)a	(19.83±3.17)b	(68.06±4.64)d	(4628.41±1449.49)b
S2F1	(73.52±5.83)a	(21.78±5.34)b	(78.36±7.45)cd	(4483.22±1382.74)b
S2F2	(80.24±1.28)a	(22.51±4.33)b	(82.04±5.77)bc	(5823.47±2189.68)b
S3F1	(67.53±3.22)b	(22.76±2.91)b	(89.06±3.75)b	(6010.72±1722.91)b
S3F2	(80.38±5.26)a	(28.88±1.90)a	(122.01±6.82)a	(9297.16±1282.15)a

同列数据不同字母表示不同处理间同一指标的差异有统计学意义($P<0.05$)。

4 结论与讨论

湘西地区稻田冬闲时间长,冬闲田面积大^[8],可在该地区冬种黑麦草解决稻田冬闲问题,但缺少合理的栽培管理方式。本研究从播种量和施肥量的角度探究冬种黑麦草的适宜栽培方式。播种量和施肥量均是影响作物产量和品质的重要因素。在不同的播种量下,植株之间由于空间、养分等的竞争,从而影响作物本身的产量和品质^[9]。本研究中,播种量对黑麦草的产量和单位面积粗纤维、钙和磷含量影响显著,而施肥量对其影响不显著。

湘西地区冬种黑麦草对稻田土壤养分具有一定的改良作用。冬种黑麦草后土壤 pH 均显著高于种草前的,这与何亮珍等^[10]和曹孟岩^[11]的研究结果一致,说明冬种黑麦草能够提高土壤 pH,缓解土壤酸化。本研究中,种植黑麦草后土壤有效磷含量显著升高,可能是冬种黑麦草促进了土壤相关解磷微生物的繁殖,从而促进难溶性无机磷的活化^[12],并通过分泌胞外磷酸酶等催化水解有机磷生成有效磷,被植物吸收利用^[13]。本研究中,在黑麦草播种量为 30 kg/hm²和施肥量 960 kg/hm²的条件下,土壤全氮和有效磷含量均最高,可能是该处理组植株根系发达,可为根际土壤微生物的生长繁殖提供充足的养分,改善根际土壤微生物区系和根际土壤酶活性,特别是脲酶和磷酸酶活性^[2,14],从而提高土壤全氮和有效磷的含量。

本研究中,冬种黑麦草对后作水稻具有一定的

增产效应,其中,在黑麦草播种量为 30 kg/hm²和施肥量 960 kg/hm²的条件下,后作水稻的理论产量、实际产量、单株总粒数、单株实粒数、千粒质量均最高。究其原因,可能是黑麦草在收割后根茬在水稻生长期腐解,释放养分,提高土壤的养分^[14],补充水稻生长期内的追肥量^[15-16];黑麦草根茬腐解物中可能还存在刺激水稻生长的活性物质^[17-18],从而有利于后作水稻穗部性状的改良和增产。

参考文献:

- [1] 杨中艺,辛国荣,岳朝阳,等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统应用效益初探(案例研究)[J]. 草业科学, 1997, 14(6): 35-39.
- [2] YANG Z Y, XIN G R, YUAN J G, et al. Ecological fertilization: an example for paddy rice performed as a crop rotation system in southern China[M]/ELSWORTH L R, PALEY W O. Fertilizers: properties, applications and effects. Nova Science Publishers Inc, New York, 2008.
- [3] TAO J M, LIU X D, LIANG Y L, et al. Maize growth responses to soil microbes and soil properties after fertilization with different green manures[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(3): 1289-1299.
- [4] 何宏斌. “黑麦草-水稻”草田轮作系统中土壤培肥和微生物作用研究[D]. 广州: 中山大学, 2019.
- [5] ZHANG X X, ZHANG R J, GAO J S, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 104: 208-217.

- [28] 段亚萍, 赵冰, 付丽童, 等. 铅、锌污染下蜀葵的生长生理响应和富集转运特性研究[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 418–425.
- [29] 王建秋, 曹子林, 王晓丽, 等. 铅胁迫对滇白前生长、光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2422–2427.
- [30] 赵发法, 罗准, 彭小列, 等. 锰胁迫对芦竹生理生化特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 212–218.
- [31] YU X Z, GU J D, HUANG S Z. Hexavalent chromium induced stress and metabolic responses in hybrid willows[J]. Ecotoxicology, 2007, 16(3): 299–309.
- [32] FANG W C, KAO C H. Enhanced peroxidase activity in rice leaves in response to excess iron, copper and zinc[J]. Plant Science, 2000, 158(1/2): 71–76.
- [33] DAS D K. Assessment of heavy metal accumulation in medicinal plants and possible remedial measures[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 15(3): 63.
- [34] MISHRA P, BHOOMIKA K, DUBEY R S. Differential responses of antioxidative defense system to prolonged salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive Indica rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Protoplasma, 2013, 250(1): 3–19.
- [35] 蒋严波, 凌忠, 韦献东, 等. 基于主成分分析法的枫香耐铅性及土壤修复潜力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 369–376.
- [36] DAHMANI-MULLER H, VAN OORT F, GÉLIE B, et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter[J]. Environmental Pollution, 2000, 109(2): 231–238.
- [37] STOLTZ E, GREGER M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 47(3): 271–280.
- [38] 王思元, 王仁才, 石浩, 等. 镉胁迫下猕猴桃对镉的吸收及转运[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 698–705.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正

(上接第 644 页)

- [6] 曹丽霞, 侯龙鱼, 赵世锋, 等. 20个燕麦品种饲草产量和品质比较分析[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 335–341.
- [7] 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.
- [8] 赵胜. 气候变化背景下中国耕地现实熟制与潜在熟制差异的时空格局研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [9] 柳茜, 陶雅, 卢寰宗, 等. 播种量和品种对冬闲田燕麦生产性能的影响[J]. 草学, 2021(2): 40–44.
- [10] 何亮珍, 郭嘉, 付爱斌, 等. 双季稻冬闲田种植绿肥对土壤理化性质的影响[J]. 作物研究, 2017, 31(4): 405–407.
- [11] 曹孟岩. 稻田冬种土壤 AMF 群落特征及其对后作水稻的促生效应研究[D]. 广州: 中山大学, 2022.
- [12] BÜNEMANN E K, OBERSON A, LIEBISCH F, et al. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 84–95.
- [13] RICHARDSON A E, HOCKING P J, SIMPSON R J, et al. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus[J]. Crop and Pasture Science, 2009, 60(2): 124.
- [14] HE H B, LI W X, ZHANG Y W, et al. Effects of Italian ryegrass residues as green manure on soil properties and bacterial communities under an Italian ryegrass(*Lolium multiflorum* L.)-rice(*Oryza sativa* L.) rotation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104487.
- [15] 王建红, 曹凯, 张贤, 等. 绿肥还田对水稻生长期土壤有机质动态变化的影响[J]. 浙江农业科学, 2010, 51(3): 614–616.
- [16] 何宏斌, 张钰薇, 程俊康, 等. “多花黑麦草→水稻”轮作系统根茬养分释放规律[J]. 草业科学, 2019, 36(7): 1852–1860.
- [17] 黎国喜, 李厚金, 杨中艺, 等. “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*)根茬腐解物中存在促水稻生长活性物质的证据[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 88–93.
- [18] 王琳, 管永祥, 陈震, 等. 不同种类绿肥养分积累比较及其对水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1139–1143.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正