

陶思敏, 姜运生, 邢钰媛, 等. 夜间增温下施用生物炭和硅肥对稻田土壤养分含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(15): 198–206.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.15.037

夜间增温下施用生物炭和硅肥对稻田土壤养分含量的影响

陶思敏^{1,2}, 姜运生^{1,2}, 邢钰媛², 王 坤², 刘 健², 苏 磊³, 汤丽玲³

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044;

2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000)

摘要:夜间增温幅度大于白天是气候变暖的显著特征之一。为探明夜间增温下施用生物炭和硅肥对稻田土壤有机质、氮磷钾养分状况的影响, 进行田间模拟试验。田间模拟试验于 2019 年在南京信息工程大学农业气象试验站进行。供试土壤为潜育型水稻土, 供试水稻品种为南粳 5055。田间试验采用 3 因素 3 水平正交试验设计, 夜间增温设 3 个水平(常温对照、5 mm 铝箔膜覆盖、11 mm 铝箔膜覆盖), 生物炭设 3 个水平(不施加、施 7.5 t/hm²、施 17.5 t/hm²), 硅肥设 3 个水平(不施加、施 200 kg/hm² 钢渣粉、施 200 kg/hm² 矿粉)。结果表明, 夜间增温会降低稻田土壤平均有机质、速效钾含量及非根际土铵态氮含量, 提高土壤有效磷含量; 施生物炭和硅肥可整体上缓解夜间增温对土壤养分含量的不利影响, 有利于保持稻田土壤养分肥力和水稻可持续生产。

关键词:夜间增温; 生物炭; 硅肥; 土壤养分; 稻田

中图分类号: S511.06; S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2021)15-0198-09

气候变暖是全球气候变化的主要特征之一。过去 130 年, 全球地表平均温度已经上升了

0.85 ℃^[1]。气候变暖存在显著的昼夜不对称性, 即夜间增温幅度大于白天^[2]。增温对植物地上部的影响, 已有较多研究^[3]。夜间增温抑制水稻光合特性, 降低蒸腾速率和气孔导度, 显著降低叶片净光合速率。夜间增温导致低纬度地区水稻分蘖数减少, 生育期缩短, 有效穗数和穗粒数减少, 籽粒产量下降^[4-8]。但是, 有关增温对土壤养分变化有何影响关注较少。

生物炭具有多孔性、强吸附性和高度难降解性。生物炭可增加稻田土壤的比表面积^[9-10], 增强

收稿日期: 2020-11-21

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190305); 国家自然科学基金(编号: 41875177、41375159)。

作者简介: 陶思敏(1995—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事农业气象研究。E-mail: taosimin1212@163.com。

通信作者: 姜运生, 博士, 教授, 主要从事生态环境气象、全球变化生态学研究, E-mail: yunshlou@163.com; 苏 磊, 硕士, 工程师, 主要从事地球化学研究, E-mail: sulei@mail.cgs.gov.cn。

采摘路径规划[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 18–23.

[6] 慕军营, 陈 军, 孙高杰, 等. 基于机器视觉的猕猴桃特征参数提取[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 138–142.

[7] 蔡健荣, 周小军, 李玉良, 等. 基于机器视觉自然场景下成熟柑橘识别[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 175–178.

[8] 林志玮, 丁启禄, 涂伟豪, 等. 基于多元 HoG 及无人机航拍图像的植被类型识别[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(4): 444–450.

[9] Shin J S, Lee W S, Ehsani R. Postharvest citrus mass and size estimation using a logistic classification model and a watershed algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(1): 42–53.

[10] 黄小玉, 李光林, 马 驰, 等. 基于改进判别区域特征融合算法的近色背景绿色桃子识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 142–148.

[11] 陈礼鹏, 穆龙涛, 刘浩洲, 等. 基于猕猴桃果萼图像的多目标果

实识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1738–1744.

[12] 吕继东, 赵德安, 姬 伟. 苹果采摘机器人目标果实快速跟踪识别方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 65–72.

[13] Yu Y, Zhang K L, Yang L, et al. Fruit detection for strawberry harvesting robot in non-structural environment based on Mask-RCNN[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104846.

[14] Sun S S, Jiang M, He D J, et al. Recognition of green apples in an orchard environment by combining the GrabCut model and Neut algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 201–213.

[15] Lv J, Wang Y, Ni H, et al. Method for discriminating of the shape of overlapped apple fruit images[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 118–129.

持水保肥性^[11-12],改善土壤酸碱性^[13],促进养分吸收^[14],减少温室气体排放^[15],对水稻生长指标,如株高、有效分蘖数、叶面积指数、千粒质量等均有促进作用^[16-19]。

硅是地壳中含量最丰富的元素之一,也是对水稻生长发育有重要作用的元素^[20]。水稻是典型的喜硅作物,而土壤供给是水稻所需硅素的主要来源^[21-23]。研究表明,硅可以提高水稻茎秆抗倒伏能力^[24],增强水稻抗旱性^[25],促进水稻的生长发育^[26],增强水稻抗病虫害能力^[27]。施硅可以提高叶面积指数、穗数、结实率、千粒质量^[28]。施用硅肥可以提高有效磷和有效硅含量,促进土壤团粒结构的形成^[29]。施硅是保持土壤养分均衡、实现水稻高产的重要措施^[30]。

目前有关增温、生物炭或施硅单因素或双因素对土壤养分的影响已有相关研究^[31-33],但 3 个因素对稻田土壤养分的耦合影响,尚缺少研究。因此,本研究通过田间试验,探讨夜间增温下施加生物炭和硅肥对稻田土壤养分的影响,以期为应对气候变化背景下水稻可持续生产及稻田土壤养分肥力变化,为深入开展气候变化对农田地上、地下生态系统的影响研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N,118.8°E)进行,时间为 2019 年 5—10 月。该站地处亚热带湿润气候区,雨热同季,年均降水量>1 000 mm,年均气温为 15.6℃。供试土壤为潜育型水稻土,灰马肝土属,土壤质地为壤质黏土,全碳、全氮、黏粒含量分别为 19.40、1.45、26.10 g/kg,pH 值为 6.2,土水比为 1 g:1 mL。供试生物炭为稻壳生物炭(天津亚德尔生物物质科技股份有限公司),含碳量约为 50%,pH 值为 10.18,土水比为 1 g:10 mL。供试硅肥为钢渣粉、矿粉,钢渣粉 pH 值为 8.09,矿粉 pH 值为 9.22,土水比为 1 g:10 mL。供试水稻品种为南粳 5055,育苗时间为 2019 年 5 月 10 日,移栽时间为 2019 年 6 月 14 日。

1.2 正交试验设计

采用 3 因素 3 水平正交试验设计,3 个因素为夜间增温(W)、施生物炭(B)、施硅(Si)。夜间增温设 3 水平,即 W₀(常温对照)、W₁(5 mm 铝箔膜覆盖)、W₂(11 mm 铝箔膜覆盖)。生物炭设 3 个水

平,即 B₀(不添加)、B₁(施入 7.5 t/hm²)、B₂(施入 17.5 t/hm²)。移栽前称取生物炭 3、7 kg 各 3 份,在翻耕农田时使生物炭与土壤均匀混合。硅肥设 3 个水平,即 Si₀(不施硅)、Si₁(施钢渣)和 Si₂(施矿粉),钢渣粉和矿粉施用量均为 200 kg/hm²。移栽前称取钢渣硅肥 634 g、矿粉硅肥 278 g 各 3 份,在翻耕农田时播撒。每个小区施高浓度复合肥(N、P₂O₅、K₂O 含量均为 15%)315 g 作为基肥。采用被动增温法模拟夜间增温,在小区四周架设不锈钢架,夜间(19:00 至翌日 06:00)将铝箔反光膜置于钢架上方,覆盖水稻冠层,根据水稻生长进程调整铝箔膜高度,使铝箔膜与水稻冠层间距始终保持在 0.3 m 左右。为防止铝箔膜覆盖影响降水接纳及增温设施被大风破坏,在雨雪天及风速大于 10 m/s 时不覆盖铝箔膜。小区面积为 2×2=4 m²,共 9 个小区。

采用根袋法区分水稻根际土和非根际土。在水稻移栽时每个小区选 4 株长势良好的水稻幼苗分别移入根袋植于田间,于水稻关键生育期(拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期)各采集 1 株根袋中的水稻,根袋内土样即为根际土,同时采集根袋外土样即为非根际土。将采集的土样装入塑料自封袋带回实验室,挑去植物根系残体、枯枝落叶和石块,之后将土样自然风干,磨碎过筛,置于塑料自封袋保存备用。

1.3 测定分析方法

土壤铵态氮含量采用靛酚蓝比色法测定;硝态氮含量采用紫外分光光度法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用醋酸铵提取-火焰光度法测定;有机质含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[34-36]。

1.4 数据处理

数据汇总和极差分析使用 Microsoft Excel 2019 软件,图表绘制使用 Origin 8.0 软件,单因素方差分析使用 SPSS 26.0 软件。

2 结果与分析

2.1 根际土养分变化

2.1.1 铵态氮含量变化 由图 1 可知,各处理根际土铵态氮含量全生育期变化趋势大体表现为上升趋势,其中,除 W₁B₁Si₂ 和 W₁B₂Si₀ 处理外,铵态氮含量均在灌浆期达最大值,各处理全生育期铵态氮含量平均值以 W₁B₂Si₀ 处理最低,W₀B₁Si₁ 处理最高。

2.1.2 硝态氮含量变化 由图 1 可知,各处理根际

土硝态氮含量的变化大体表现为升—降—升趋势,在开花期明显下降,灌浆期有略微回升。各处理根际土硝态氮平均含量在孕穗期达到最大值,约为 32.4 mg/kg;平均含量最小值出现在开花期,约为 24.8 mg/kg。全生育期硝态氮含量平均值呈现 $W_2B_0Si_2$ 处理平均值最低,而 $W_1B_2Si_0$ 处理平均值最高。

2.1.3 有效磷含量变化 由图 1 可知,各处理根际土有效磷含量全生育期变化趋势较平缓,灌浆期有下降趋势。 $W_2B_0Si_2$ 和 $W_0B_1Si_1$ 处理的根际土有效磷含量在拔节期达最大值, $W_0B_0Si_0$ 、 $W_1B_2Si_0$ 和 $W_2B_1Si_0$ 处理在孕穗期达到最大值,其他处理在开花期达最大值;各处理的有效磷平均含量在灌浆期

达最小值。全生育期有效磷含量平均值呈现 $W_0B_0Si_0$ 处理平均值最低, $W_2B_0Si_2$ 处理平均值最高。

2.1.4 速效钾含量变化 由图 1 可知,各处理根际土速效钾含量的变化表现为先升后降的趋势,在开花期明显上升,灌浆期下降。除 $W_0B_0Si_0$ 和 $W_2B_0Si_2$ 处理外,各处理速效钾含量在开花期达最大值,全生育期 $W_2B_2Si_1$ 处理速效钾含量平均值最低, $W_0B_1Si_1$ 处理平均值最高。

2.1.5 有机质含量变化 由图 1 可知,各处理根际土有机质含量变化表现为先升后降的趋势,在开花期明显上升,灌浆期有下降趋势。各处理有机质含量均在开花期达最大值;除 $W_0B_2Si_2$ 和 $W_1B_2Si_0$ 处

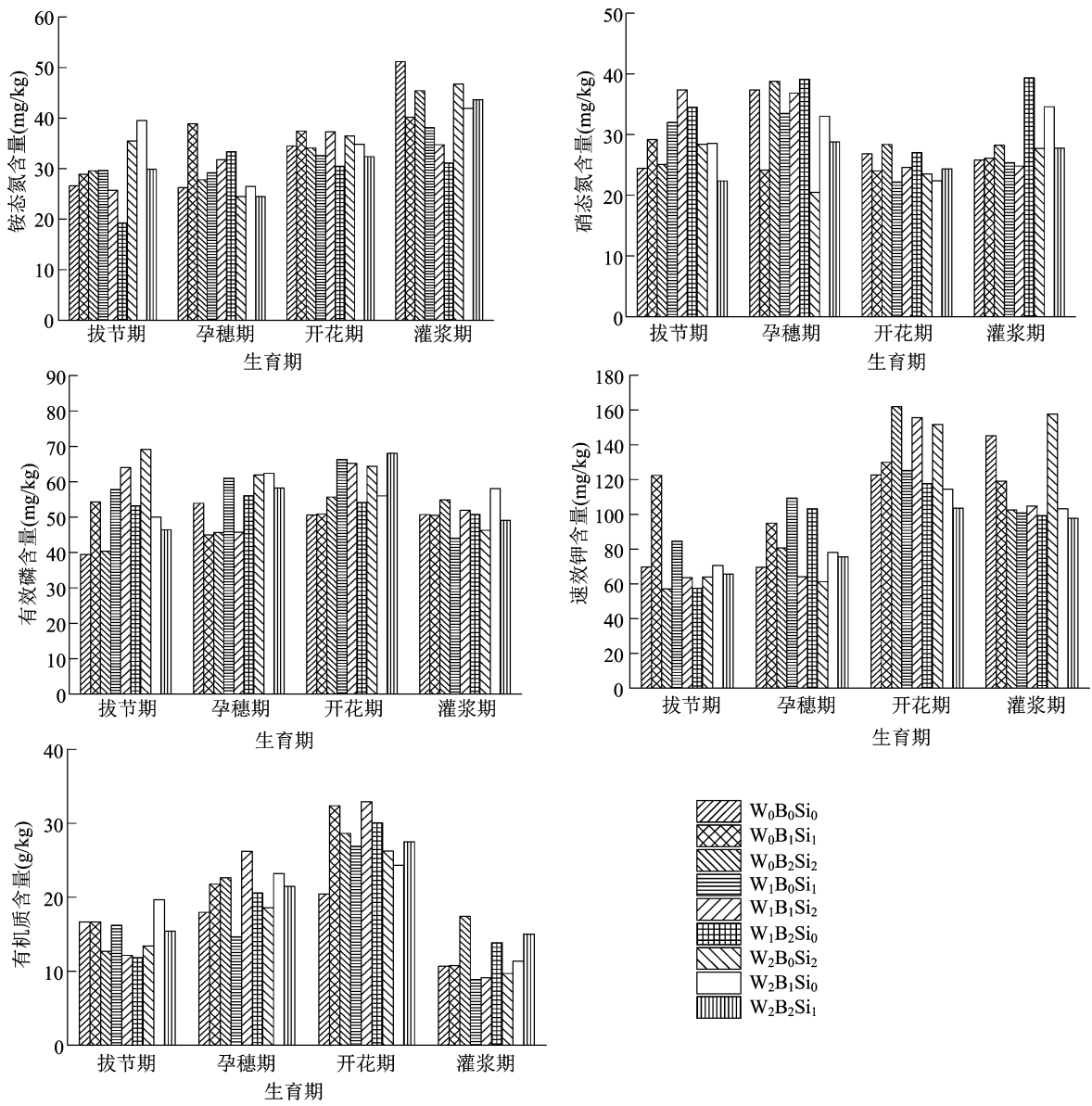


图1 不同处理对水稻各生育期根际土养分含量的影响

理外,各处理下有机质含量最小值均出现在灌浆期。全生育期平均值呈现 $W_0B_0Si_0$ 处理平均值最低, $W_0B_1Si_1$ 处理平均值最高。

2.2 非根际土养分变化

2.2.1 铵态氮含量变化 由图 2 可知,各处理非根际土铵态氮含量全生育期变化趋势表现为先降后升的趋势。其中 W_0 和 W_1 处理在灌浆期达最大值, W_2 处理在开花期达最大值。各处理在全生育期铵态氮含量平均值以 $W_0B_0Si_0$ 处理最低, $W_0B_2Si_2$ 处理最高。

2.2.2 硝态氮含量变化 由图 2 可知,各处理非根际土硝态氮含量变化表现为升—降—升趋势,在开花期明显下降,灌浆期略微回升。除 $W_0B_2Si_2$ 处理外,各处理非根际土硝态氮含量均在孕穗期达到最

大值。全生育期硝态氮含量平均值呈现 $W_2B_1Si_0$ 处理最低,而 $W_1B_1Si_2$ 处理最高。

2.2.3 有效磷含量变化 由图 2 可知,各处理非根际土有效磷含量全生育期变化趋势较平缓,开花期有轻微上升趋势。除 $W_0B_0Si_0$ 和 $W_2B_2Si_1$ 处理外,各处理非根际土有效磷含量在开花期达最大值。全生育期有效磷含量平均值呈现 $W_0B_2Si_2$ 处理最低, $W_2B_0Si_2$ 处理最高。

2.2.4 速效钾含量变化 由图 2 可知,各处理非根际土速效钾含量变化大体表现为先升后降趋势,在开花期明显上升,灌浆期下降。各处理非根际土速效钾含量均在发育后期(开花期和灌浆期)达最大值,最小值均出现在拔节期。全生育期平均值呈现 $W_2B_0Si_2$ 处理平均值最低, $W_0B_1Si_1$ 处理平均值最高。

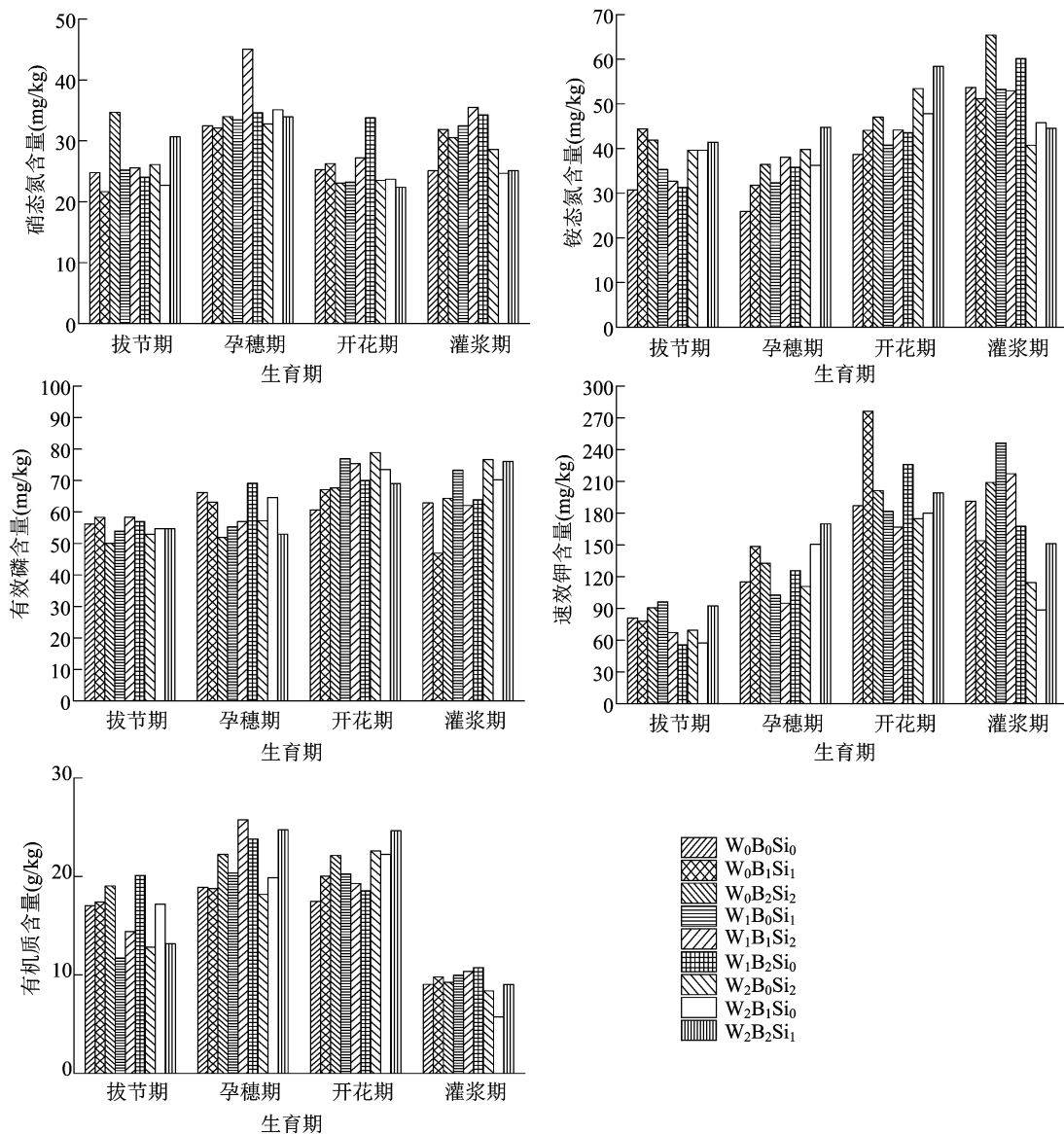


图2 不同处理对水稻各生育期非根际土养分含量的影响

2.2.5 有机质含量变化 由图 2 可知,各处理非根际土有机质含量变化表现为先升后降趋势,在灌浆期明显下降。有机质含量最小值出现在灌浆期。全生育期速效钾含量平均值呈现 $W_2B_0Si_2$ 处理最低, $W_1B_2Si_0$ 处理最高。

2.3 土壤养分含量极差和显著性分析

2.3.1 铵态氮含量分析 由表 1、图 3 可知,3 因素对铵态氮含量的影响程度不同。对于根际土,3 因素影响程度表现为夜间增温 > 生物炭 > 硅肥。其中 5 mm 铝箔膜覆盖 (W_1) 会降低根际土铵态氮含量;与 W_1 处理相比,11 mm 铝箔膜覆盖 (W_2) 会增加根际土铵态氮含量,但仍低于 W_0 处理下铵态氮含量;施入 7.5 t/hm^2 生物炭 (B_1) 会提高铵态氮含量,而施用 17.5 t/hm^2 生物炭 (B_2) 则有抑制作用;

随施硅增加,根际土铵态氮含量升高,不同水平的硅肥对根际土铵态氮含量均有提升作用。根际土铵态氮含量达到最高的最佳因素组合为 $W_0B_1Si_2$ 。由表 1 可知,夜间增温对根际土铵态氮含量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$),而施生物炭和硅肥均无显著影响 ($P > 0.05$)。对于非根际土,3 因素的影响程度表现为生物炭 > 硅肥 > 夜间增温。其中夜间增温会降低非根际土铵态氮的含量,具有抑制作用;提高生物炭和硅肥施用量,均对非根际土的铵态氮含量起促进作用。非根际土铵态氮含量达到最高的最佳因素组合为 $W_0B_2Si_2$ 。根据方差分析结果可知,夜间增温、施生物炭和硅肥对非根际土铵态氮均无显著影响 ($P > 0.05$)。

表 1 铵态氮含量方差分析结果

土壤类型	因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	P 值
根际土	W	28.669	2	14.334	23.233	0.041
	B	15.450	2	7.725	12.521	0.074
	Si	2.170	2	1.085	1.758	0.363
	误差	1.234	2	0.617		
非根际土	W	10.862	2	5.431	3.921	0.203
	B	47.161	2	23.581	17.026	0.055
	Si	20.968	2	10.484	7.570	0.117
	误差	2.770	2	1.385		

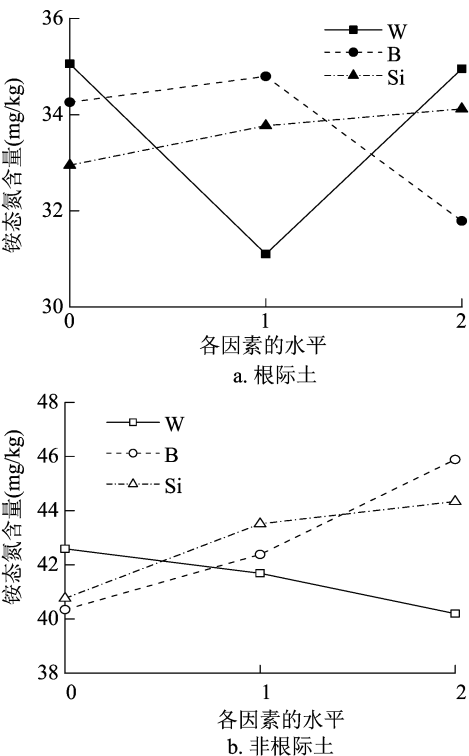


图3 不同处理下水稻全生育期土壤铵态氮含量平均值

2.3.2 硝态氮含量分析 由表 2、图 4 可知,3 因素对硝态氮含量的影响程度不同。对于根际土,3 因素的影响程度表现为夜间增温 > 硅肥 > 生物炭。其中 5 mm 铝箔膜覆盖 (W_1) 可以提升根际土硝态氮的含量,而 11 mm 铝箔膜覆盖 (W_2) 会降低根际土硝态氮含量;随着生物炭施加量的增加,根际土硝态氮含量不断升高,不同水平的生物炭对根际土硝态氮含量均有提升作用;对于硅肥,施入 200 kg/hm^2 钢渣粉 (Si_1) 会降低硝态氮含量;与 Si_1 处理相比,施入 200 kg/hm^2 矿粉 (Si_2) 则对根际土硝态氮含量有轻微提升作用,但仍低于 Si_0 处理。根际土硝态氮含量达到最高的最佳因素组合为 $W_1B_2Si_1$ 。根据方差分析结果可知,夜间增温和施硅肥对根际土硝态氮含量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$),而施生物炭则无显著影响 ($P > 0.05$)。

对于非根际土,3 因素的影响程度表现为夜间增温 > 硅肥 > 生物炭。其中 5 mm 铝箔膜覆盖 (W_1) 可以提升非根际土硝态氮的含量,然而,11 mm 铝箔膜覆盖 (W_2) 会降低非根际土硝态氮含

表 2 硝态氮含量方差分析结果

类型	因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	P 值
根际土	W	32.966	2	16.483	24.723	0.039
	B	13.666	2	6.833	10.249	0.089
	Si	29.494	2	14.747	22.120	0.043
	误差	1.333	2	0.667		
非根际土	W	22.622	2	11.311	20.128	0.047
	B	8.509	2	4.255	7.571	0.117
	Si	10.220	2	5.110	9.093	0.099
	误差	1.124	2	0.562		

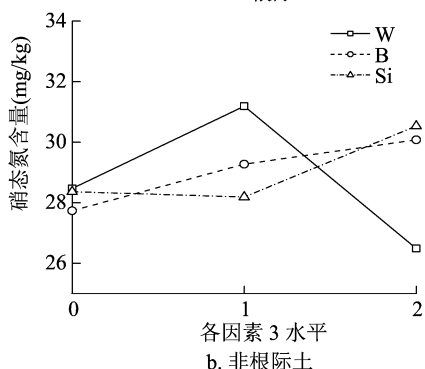
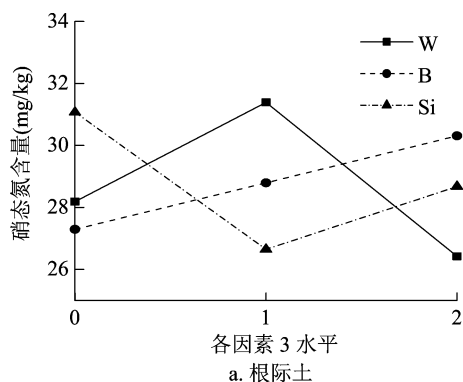


图4 不同处理下水稻全生育期土壤硝态氮含量平均值

量;随着生物炭施加量的增加,非根际土硝态氮含量不断升高,不同水平的生物炭对非根际土硝态氮含量均有提升作用;对于硅肥,施入 200 kg/hm^2 钢渣粉(Si_1)会略微降低硝态氮含量,而施入 200 kg/hm^2 矿粉(Si_2)则会提升非根际土硝态氮含量。非根际土硝态氮含量达到最高的最佳因素组合为 $\text{W}_1\text{B}_2\text{Si}_2$ 。根据方差分析结果可知,夜间增温对非根际土硝态氮含量的影响达到显著水平($P < 0.05$),而施生物炭和硅肥均无显著影响($P > 0.05$)。

2.3.3 有效磷含量分析 由表3、图5可知,3因素对有效磷含量的影响程度不同。对于根际土,3因素的影响程度表现为夜间增温 > 生物炭 > 硅肥。其中 5 mm 铝箔膜覆盖(W_1)可以提升根际土有效磷的含量,与 W_1 相比, 11 mm 铝箔膜覆盖(W_2)会降低

低根际土有效磷含量,但相较于 W_0 仍有很大提升;随着生物炭施用量的增加,对根际土有效磷含量的抑制作用逐渐增强;对于硅肥,施入 200 kg/hm^2 钢渣粉(Si_1)对根际土有效磷含量有提升作用,施用 200 kg/hm^2 矿粉(Si_2)较 Si_1 处理有进一步的提升效果。根际土有效磷含量达到最高的最佳因素组合为 $\text{W}_1\text{B}_0\text{Si}_2$ 。根据方差分析结果可知,夜间增温对根际土有效磷含量的影响达到显著水平($P < 0.05$),而施生物炭和硅肥均无显著影响($P > 0.05$)。

表 3 有效磷含量方差分析结果

土壤类型	因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	P 值
根际土	W	112.071	2	56.036	60.066	0.016
	B	11.689	2	5.844	6.265	0.138
	Si	9.291	2	4.645	4.980	0.167
	误差	1.866	2	0.933		
非根际土	W	53.199	2	26.599	54.248	0.018
	B	6.866	2	3.433	7.002	0.125
	Si	5.255	2	2.628	5.359	0.157
	误差	0.981	2	0.490		

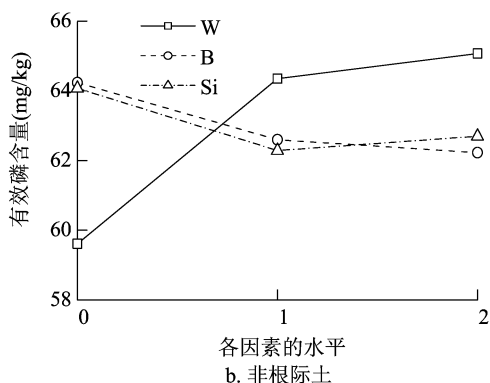
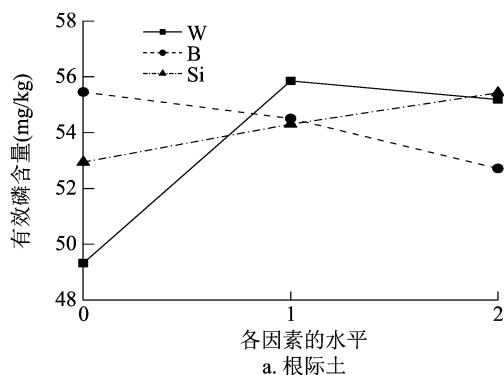


图5 不同处理下水稻全生育期土壤有效磷含量平均值

对于非根际土,3因素的影响程度表现为夜间增温 > 生物炭 > 硅肥。其中 5 mm 铝箔膜覆盖(W_1)和 11 mm 铝箔膜覆盖(W_2)均可以提升非根际土有效磷的含量;随着生物炭施加量的增加,非

根际土有效磷含量不断降低,不同水平的生物炭对非根际土有效磷含量均有抑制作用;对于硅肥,施入 200 kg/hm² 钢渣粉(Si₁)会降低有效磷含量,相比于 Si₁ 处理,施入 200 kg/hm² 矿粉(Si₂)对有效磷含量起到轻微提升作用,但仍低于 Si₀ 处理。非根际土有效磷含量达到最高的最佳因素组合为 W₂B₀Si₀。根据方差分析结果可知,夜间增温对非根际土有效磷含量的影响达到显著水平($P < 0.05$),而施生物炭和硅肥均无显著影响($P > 0.05$)。

2.3.4 速效钾含量分析 由表 4、图 6 可知,3 因素对速效钾含量的影响程度不同。对于根际土,3 因素的影响程度表现为生物炭 > 夜间增温 > 硅肥。其中 5 mm 铝箔膜覆盖(W₁)和 11 mm 铝箔膜覆盖(W₂)均可以抑制根际土速效钾的含量;对于生物炭,施入 7.5 (B₁)、17.5 t/hm² (B₂) 均会降低根际土速效钾含量;施入 200 kg/hm² 钢渣粉(Si₁)会提升速效钾含量,与 Si₁ 处理相比,施入 200 kg/hm² 矿粉(Si₂)则对根际土速效钾含量有轻微抑制作用,仍然高于 Si₀ 处理。根际土速效钾含量达到最高的最佳因素组合为 W₀B₀Si₁。根据方差分析结果可知,夜间增温、施生物炭和硅肥均对根际土速效钾含量无显著影响($P > 0.05$)。

表 4 速效钾含量方差分析结果

土壤类型	因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	P 值
根际土	W	189.407	2	94.704	0.894	0.528
	B	214.139	2	107.069	1.010	0.497
	Si	79.433	2	39.716	0.375	0.727
	误差	211.959	2	105.980		
非根际土	W	995.194	2	497.597	59.772	0.016
	B	299.932	2	149.966	18.014	0.053
	Si	936.987	2	468.494	56.276	0.017
	误差	16.650	2	8.325		

对于非根际土,3 因素的影响程度表现为夜间增温 > 硅肥 > 生物炭。其中夜间增温会降低非根际土速效钾的含量,具有抑制作用;随着生物炭施加量的增加,非根际土速效钾含量不断升高,不同水平的生物炭对速效钾含量均有提升作用;对于硅肥,施入 200 kg/hm² 钢渣粉(Si₁)会提升非根际土速效钾含量,与 Si₁ 处理相比,施入 200 kg/hm² 矿粉(Si₂)则对速效钾含量有明显抑制作用,但 Si₂ 处理仍略微高于 Si₀ 处理。非根际土速效钾含量达到最高的最佳因素组合为 W₀B₂Si₁。根据方差分析结果可知,夜间增温和施硅肥对非根际土速效钾含量的

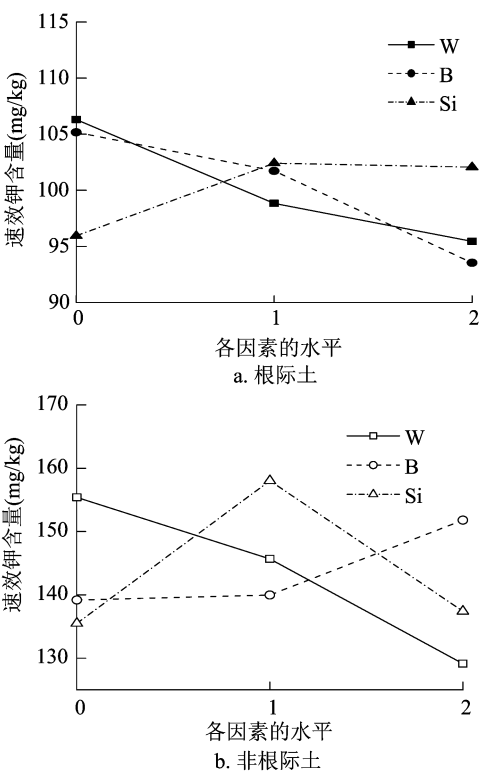


图6 不同处理下水稻全生育期土壤速效钾含量平均值

影响达到显著水平($P < 0.05$),而施生物炭则无显著影响($P > 0.05$)。

2.3.5 有机质含量分析 由表 5、图 7 可知,3 因素对有机质含量的影响程度不同。对于根际土,3 因素的影响程度表现为生物炭 > 硅肥 > 夜间增温。其中 5 mm 铝箔膜覆盖(W₁)和 11 mm 铝箔膜覆盖(W₂)均可以抑制根际土有机质的含量;对于生物炭,施入 7.5 t/hm² (B₁)会提升有机质含量,与 B₁ 处理相比,施入 17.5 t/hm² (B₂)对根际土有机质含量有轻微抑制作用,但仍远高于 B₀ 处理;对于硅肥,施入 200 kg/hm² 钢渣粉(Si₁)和 200 kg/hm² 矿粉(Si₂)均会提升根际土有机质含量。根际土有机质含量达到最高的最佳因素组合为 W₀B₁Si₂。根据方差分析结果可知,夜间增温、施生物炭和硅肥对根际土有机质含量的影响均达到显著水平($P < 0.05$),其中施生物炭达到极显著水平($P < 0.01$)。

对于非根际土,3 因素的影响程度表现为生物炭 > 夜间增温 > 硅肥。其中 5 mm 铝箔膜覆盖(W₁)可以提升非根际土有机质的含量,然而,11 mm 铝箔膜覆盖(W₂)会降低非根际土有机质含量;对于生物炭,随着施用量的增加,均对非根际土的有机质含量起促进作用;对于硅肥,与 Si₀ 处理相比, Si₁ 处理会略微抑制非根际土有机质含量,而与

表 5 有机质含量方差分析结果

土壤类型	因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	P 值
根际土	W	0.288	2	0.144	25.790	0.037
	B	20.683	2	10.3411	850.709	0.001
	Si	0.940	2	0.470	84.080	0.012
	误差	0.011	2	0.006		
非根际土	W	0.479	2	0.240	3.016	0.249
	B	9.887	2	4.944	62.211	0.016
	Si	0.244	2	0.122	1.537	0.394
	误差	0.159	2	0.079		

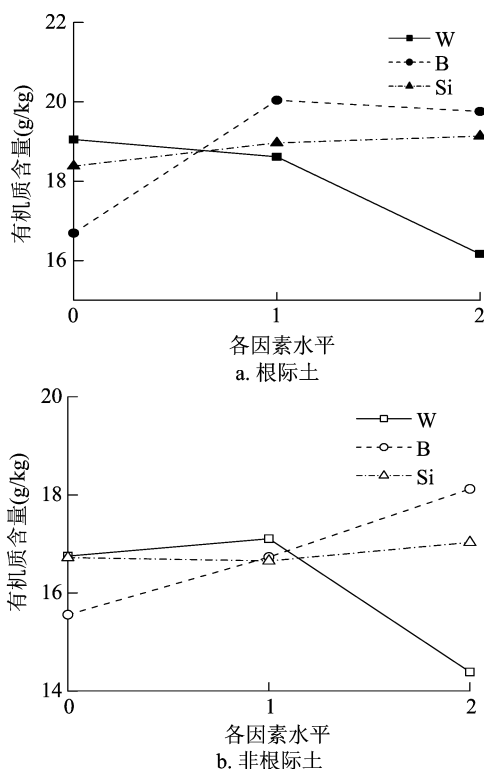


图7 不同处理下水稻全生育期土壤有机质含量平均值

Si₁ 处理相比, Si₂ 处理会对有机质含量起提升作用, 且 Si₂ 处理高于 Si₀ 处理。非根际土有机质含量达到最高的最佳因素组合为 W₁B₂Si₂。根据方差分析结果可知, 夜间增温和施硅肥对非根际土有机质含量均无显著影响 ($P > 0.05$), 施生物炭对非根际土有机质含量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

土壤养分含量是表征土壤理化性质的关键指标^[37-38]。夜间增温、施生物炭和施硅肥直接或间接影响土壤养分含量, 进而影响水稻生长发育和产量形成。土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾和有机质含量是表征土壤养分的典型参数, 可反映土壤养

分含量状况^[39]。

土壤养分对温度变化较为敏感。水稻表现为喜铵性, 在 5 mm 铝箔膜覆盖增温下, 可以促进植物对铵态氮的吸收, 从而降低土壤铵态氮含量; 而在 11 mm 铝箔膜覆盖情况下, 水稻根系对根际土铵态氮的吸收可能受抑制, 根际土铵态氮含量较高。5 mm 铝箔膜覆盖增温可能有利于土壤氮转化, 促进硝化作用, 硝态氮含量增加; 硝态氮不易被土壤胶体吸附, 随夜间增温作用增强 (11 mm 铝箔膜覆盖), 在土壤中的移动性增强造成流失, 高温下发生一定程度的分解, 因此, 随夜间增温水平提高, 硝态氮含量呈先升后降趋势。对于有效磷, 夜间增温导致土壤磷的矿化速率升高, 生成更多有效磷, 然后磷的矿化速率趋于平稳, 有效磷的含量呈现先增长后基本稳定的趋势。夜间增温可能增强土壤微生物活性, 促进有机质分解, 11 mm 铝箔膜覆盖下有机质含量明显降低。

施用生物炭 B₁ 处理可不同程度地提高土壤铵态氮、硝态氮和有机质含量。原因可能在于, 生物炭对 NH₃ 和 NH₄⁺ 具有较强吸附作用, 减少氨挥发等氮损失。生物炭可提高土壤原有机碳的稳定性, 减少土壤有机碳矿化量, 使土壤有机碳含量增加。施用生物炭降低土壤有效磷含量, 可能在于施加生物炭可调节土壤酸碱度, 对土壤磷吸附性增强, 使有效磷含量降低。生物炭孔隙结构为土壤微生物提供了良好的栖息环境, 增加了养分有效性, 促进水稻对磷的吸收, 土壤有效磷含量呈下降或先下降后基本稳定的趋势。

施硅可使土壤中铵态氮含量和有机质含量基本不变或逐步上升, 原因可能是硅肥有效保留了土壤中的氮元素, 可以缓解土壤氮流失现象; 施硅会直接为土壤引入有机碳源, 一定程度上直接增加了土壤的有机质含量。施硅 Si₁ 处理会降低非根际土有效磷含量, 原因可能在于, 施硅促进了植物对磷的吸收利用, 提高了土壤磷有效性, 土壤有效磷含量下降。随硅肥的施用, 土壤中速效钾含量呈先升后降的趋势, 其中下降的原因可能是硅肥直接为土壤引入了活性有机物质, 可以作为土壤微生物的养分, 增加土壤微生物数量, 加速水稻对钾的吸收进程, 导致土壤中速效钾含量降低。

夜间增温会降低水稻关键生育期土壤速效钾、有机质含量及非根际土铵态氮的平均含量, 提高非根际土有效磷含量, 11 mm 铝箔膜覆盖下硝态氮含

量明显降低。夜间增温对铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾和有机质含量影响均达显著水平。施生物炭和硅肥可改善土壤养分状况,缓解夜间增温对土壤养分含量的不利影响。未来可进一步探讨夜间增温下施生物炭和硅肥对水稻土中各类酶活性、微生物多样性的影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [2] 江晓东, 苏海报, 王晓梅, 等. 昼夜不对称增温对麦田土壤水分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4): 283–286.
- [3] 岳天祥. 典型陆地生态系统对气候变化响应的定量研究[J]. 科学通报, 2014, 59(3): 217–231.
- [4] 张玮玮, 娄运生, 朱怀卫, 等. 夜间增温对水稻生长、生理特性及产量构成的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(2): 88–95.
- [5] 孙 诚. 白天增温和夜间增温对水稻氮素积累及利用效率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [6] 肇思迪, 娄运生, 张玮玮, 等. UV-B 增强下施硅对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其增温潜力的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4715–4724.
- [7] 刘 璐, 申双和, 谢晓金. 夜温升高对水稻光合生理特性及产量构成的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 86–89.
- [8] 张 鑫, 陈 金, 江 瑜, 等. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1349–1356.
- [9] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 1–449.
- [10] 荣飞龙, 蔡正午, 覃莎莎, 等. 酸性稻田添加生物炭对水稻生长发育及产量的影响——基于 5 年大田试验[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4413–4424.
- [11] 雷 蕾, 于敏荣, 高 军, 等. 基于生物炭添加的控制灌排对水稻抗倒伏能力及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020(5): 21–27.
- [12] 熊丽萍, 蔡佳佩, 朱 坚, 等. 硅肥对水稻-田面水-土壤氮磷含量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1127–1134.
- [13] 蔡立群, 牛 怡, 罗珠珠, 等. 秸秆腐质还田土壤养分及微生物量的动态变化[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1047–1056.
- [14] Mukherjee A, Lal R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions[J]. Agronomy, 2013, 3(2): 313–339.
- [15] 董 成, 陈智勇, 谢迎新, 等. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 4024–4034.
- [16] 王德胜, 胡芸莎, 曹 琦, 等. 棉秆生物炭对南疆地区水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 52–55.
- [17] 刘 磊, 廖 萍, 王海媛, 等. 生物炭对双季水稻产量、养分吸收和土壤性状的残留效应[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 63–66.
- [18] Ameloot N, de Neve S, Jegajeevagan K, et al. Short-term CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57: 401–410.
- [19] 庄 硕, 陈鸿洋, 张 明, 等. 生物质炭施加对新成水稻土碳组分及其分解的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 1010–1018.
- [20] 张万洋, 李小坤. 水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 231–239.
- [21] 蔡德龙. 国内外硅肥研究与应用进展[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(1): 37–39.
- [22] Vulavala V K, Elbaum R, Yermiyahu U, et al. Silicon fertilization of potato: expression of putative transporters and tuber skin quality [J]. Planta, 2016, 243(1): 217–229.
- [23] 胡克伟, 关连珠, 颜 丽, 等. 施硅对水稻土磷素吸附与解吸特性的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 214–218.
- [24] 彭 华, 田发祥, 魏 维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1027–1033.
- [25] 王茂辉, 聂金泉, 任 勇, 等. 不同硅肥用量对水稻生长的影响研究[J]. 广东农业科学, 2020, 47(2): 61–67.
- [26] 任 海, 付立东, 王 宇, 等. 硅肥与基本苗配置对水稻生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 108–116.
- [27] 张 舒, 胡时友, 郑在武, 等. 不同硅肥施用量对水稻纹枯病发生及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2019, 31(10): 99–101.
- [28] 任 海, 付立东, 王 宇, 等. 不同硅肥施入模式对水稻产量及品质的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 13–18, 58.
- [29] Wang B H, Chu C B, Wei H W, et al. Ameliorative effects of silicon fertilizer on soil bacterial community and pakchoi (*Brassica chinensis* L.) grown on soil contaminated with multiple heavy metals [J]. Environmental Pollution, 2020, 267(3): 115411.
- [30] 王飞军, 林亚芬, 庄亚其, 等. 硅肥用量对水稻生长发育及产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2014(4): 469–471.
- [31] 汪亚会, 覃雨虹, 马彦蓉, 等. 生物炭配施微肥对菜园土壤有效态重金属含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(5): 18–24.
- [32] 蒋 容, 余 一, 唐玉蓉, 等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1): 72–77, 85.
- [33] 王秀康, 邢英英, 李占斌. 覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3944–3957.
- [34] 唐伟杰, 官春云. 追施不同形态氮肥对油菜生长、生理与产量影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(5): 878–884.
- [35] 冯 波, 孔令安, 张 宾, 等. 施氮量对垄作小麦氮肥利用率和土壤硝态氮含量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1107–1114.
- [36] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [37] Liu X M, Li X Y, Yuan Y, et al. Review of soil nutrients of forest nature reserve [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(6): 1412–1421.
- [38] 厉 波, 曹当阳. 不同种植方式对黔东南水稻土壤养分及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 64–67.
- [39] 孙爱华, 华 信, 朱士江. 生物炭对土壤养分及水分的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(8): 64–66, 91.