

余居华, 王利民, 丁洪, 等. 畜禽粪便施用对红壤铝胁迫下油菜幼苗生长及光合荧光特性的影响 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (2): 206–215.
YU J H, WANG L M, DING H, et al. Growth and Photosynthesis of *Brassica napus* Seedlings Affected by Organic Manure Application on Acid Red Soil under Aluminum Stress [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 39 (2): 206–215.

畜禽粪便施用对红壤铝胁迫下油菜幼苗生长及光合荧光特性的影响

余居华^{1,2,3}, 王利民¹, 丁洪¹, 王煌平¹, 郑祥洲¹, 张玉树¹, 张银龙³

(1. 福建省农业科学院资源环境与土壤肥料研究所/福建省植物营养与肥料重点实验室, 福建 福州 350013;

2. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601; 3. 南京林业大学南方现代

林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要:【目的】红壤铝毒是限制作物生长的主要因素, 畜禽粪便等有机物料作为改善土壤酸度和推动国家化肥零增长行动计划的重要途径之一, 其对铝毒胁迫下作物生长及光合荧光特性的影响及其机理研究具有重要意义。

【方法】利用盆栽试验, 探究不施畜禽粪便 (CK)、施用猪粪 10 g·kg⁻¹ (P10)、猪粪 30 g·kg⁻¹ (P30)、猪粪 50 g·kg⁻¹ (P50)、鸡粪 10 g·kg⁻¹ (C10)、鸡粪 30 g·kg⁻¹ (C30)、鸡粪 50 g·kg⁻¹ (C50)、鸡粪猪粪各 15 g·kg⁻¹ (PC15) 等 8 个处理对酸性土壤铝毒胁迫下油菜 (*Brassica napus* L.) 生物量、光合作用参数和叶绿素荧光特性的影响。

【结果】在土壤铝毒胁迫下, 不同畜禽粪便处理均促进了油菜幼苗地上部生物量、光合色素含量、光合作用和叶绿素荧光特性, 在第 80 天各处理均显著大于对照组 ($P < 0.05$), 表明畜禽粪便有效缓解红壤铝胁迫对油菜幼苗生长的毒害作用。施用等量鸡粪处理比猪粪更有利于促进油菜幼苗地上部生物量、光合色素含量, 但对光合作用参数、 F_v/F_m 值和 qP 的促进作用较弱, 而且鸡粪、猪粪混施处理光合色素含量、光合参数 T_r 、 G_s 、 C_i 、 qN 均大于单施处理 ($P < 0.05$), 说明高 pH 值的鸡粪更利于促进油菜生长, 而高养分含量的猪粪更利于促进油菜光合荧光特性。

【结论】猪粪施用量 50 g·kg⁻¹ 对油菜生长及光合荧光特性的铝毒胁迫缓解作用最佳, 而鸡粪最佳施用量为 30 g·kg⁻¹。就油菜幼苗生长和光合荧光特性而言, 畜禽粪便种类筛选、最佳用量确定并结合土壤酸度调控对缓解红壤铝毒至关重要。

关键词: 红壤; 畜禽粪便; 铝毒; 生长; 光合荧光; 油菜

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 02-0206-10

Growth and Photosynthesis of *Brassica napus* Seedlings Affected by Organic Manure Application on Acid Red Soil under Aluminum Stress

YU Juhua^{1,2,3}, WANG Limin¹, DING Hong¹, WANG Huangping¹, ZHENG Xiangzhou¹, ZHANG Yushu¹, ZHANG Yinlong³

(1. Institute of Resources, Environment and Soil Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences/Fujian Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Fuzhou, Fujian 350013, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China; 3. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China,

Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: 【Objectives】 Effects of applying organic manure on the growth and photosynthesis of plants cultivated on acid red soil contaminated by aluminum were studied. 【Methods】 In a pot experiment, aluminum-laden acid red soil was used as control (CK) or blended with either pig manure at the rate of 10 g·kg⁻¹ (P10), 30 g·kg⁻¹ (P30), or 50 g·kg⁻¹ (P50), chicken manure at 10 g·kg⁻¹ (C10), 30 g·kg⁻¹ (C30), or 50 g·kg⁻¹ (C50), or pig and chicken manures at 15 g·kg⁻¹ each (PC15). Biomass and photosynthetic properties including chlorophyll fluorescence indexes of *Brassica napus* L. seedlings grown in the pots were determined. 【Results】 Application of the organic manure in the soil significant improved the aboveground biomass,

收稿日期: 2023-04-17 修回日期: 2023-07-07

作者简介: 余居华 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生物源物质生物地球化学循环研究, E-mail: juhuayu1984@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51709183); 中国博士后科学基金项目 (2017M611862); 福建省科技计划公益类专项 (2020R1025001); 福建省农业科学院项目 (YC2019007、ZYTS2019016、ZYTS202218、CXPT202106、CXTD2021012-2、DEC2019-05、DWHZ-2022-11)

photosynthetic pigment content, and chlorophyll fluorescence indexes of the seedlings over CK ($P < 0.05$). In 80 d after the treatments, these indicators were higher than CK indicating the heavy metal toxicity in the soil had been gradually alleviated by chelation. At a same application rate, chicken manure rendered a greater effect than pig manure on the increases of aboveground biomass and photosynthetic pigment but less on the photosynthetic parameters, F_v/F_m and qP , while the combination of chicken and pig manures performed superior to either chicken or pig manure alone on the photosynthetic pigment content, T_r , G_s , C_i , and qN ($P < 0.05$). It appeared that the alkaline chicken manure benefited the growth more and that the nutrient-rich pig manure did the photosynthesis more for the seedlings. 【Conclusions】 To effectively mitigate the aluminum stress on *B. napus* L. seedlings grown in an acid red soil, an application of pig manure at $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and chicken manure at $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with appropriate adjustments according to the actual field conditions was recommended.

Key words: Acid red soil; organic manures; aluminum stress; growth; photosynthetic fluorescence; *Brassica napus* L.

0 引言

【研究意义】为支撑国家粮食安全战略和满足人们不断增长的粮食需求,近30年我国氮磷化学肥料使用量分别增加了2.1倍和4.0倍^[1]。化学肥料大量施用一方面有力保障了粮食产量,同时也导致我国耕地土壤酸化问题进一步加剧^[2,3],降低了土壤肥力^[4],导致加速释放的土壤铝(Al^{3+})、锰(Mn^{2+})金属离子极大地影响作物生长并导致作物减产^[5,6]。提高土壤酸度是减少铝毒的关键切入点,多用有机肥、少施酸性化学肥料是重要举措^[7,8]。畜禽粪便中含有丰富的有机质、氮磷钾等植物所需的各种营养元素^[9],经过处理的畜禽粪便施用于土壤,可促进有机废弃物资源化利用并有效补充和完善我国肥料结构^[10],对全面深入推进化肥零增长行动计划的国家重大战略、农业生态环境保护和农业可持续发展具有重要的理论和现实意义。【前人研究进展】铝毒是酸性土壤中限制作物生长的主要因素^[11]。铝对作物的毒害作用主要表现为植物根系、茎部和叶片生长停止,功能受到损害^[12],其中过渡区或远端伸长区被认为是对铝胁迫最敏感的部位^[13]。当前,关于铝对作物毒害作用研究主要聚焦在植物形态和生理障碍响应^[14],较少关注铝毒对植物光合荧光特性的影响及其机理。由于根是吸收铝的主要器官,铝胁迫会抑制根尖分生组织的细胞分裂,从而表现为根主轴伸长受到抑制,根尖、侧根粗短而脆,呈褐色,根毛减少,根尖表皮细胞体积变小,表皮和外皮细胞受到破坏,根冠脱落,最终导致根系坏死^[15]。铝胁迫在植物茎和叶片上的毒害症状常表现为植物营养缺乏,叶片小而发育不良,幼叶沿边缘卷曲,叶片易黄化、坏死,进而导致叶片光合作用降低^[16]。铝毒使植物气孔保卫细胞活性降低,部分细胞死亡,破坏叶绿体膜结构,降低大豆叶片叶绿素含量,影响气孔导度、光合速率和蒸腾速率^[17]。【本研究切入点】在国家推动畜禽粪便替代化肥减量行

动背景下,目前多数研究关注重点是畜禽粪便施用对土壤肥力、土壤微生物群落结构、作物生长以及土壤-植物系统养分的影响^[18-20],往往忽略了畜禽粪便施用对铝胁迫下植物生理生化响应过程的影响研究,尤其对铝胁迫植物生长和叶片光合荧光特性研究。虽然有研究表明酸性铝毒土壤上施用畜禽粪便有机物料能降低土壤溶液中活性铝含量,提高作物产量^[21,22],但仅针对有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应,对畜禽粪便和铝毒胁迫对作物生长和光合荧光特性的交互作用效应仍知之甚少。油菜(*Brassica napus* L.)属于十字花科(Brassicaceae)芸薹属(*Brassica* L.),是我国重要的油料作物,在我国的种植面积和总产量均居世界之首^[23-24]。由于我国南方红壤区土壤铝含量高,pH普遍属于酸性,油菜产量仅为 $798 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而在非红壤区产量为 $2250 \sim 3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[25]。【拟解决的关键问题】本研究以油菜为受试植物,通过盆栽试验,探讨鸡粪、猪粪施用在缓解酸性土壤铝毒胁迫对油菜幼苗生长及光合荧光特性的影响方面的作用,以期明确最佳施用量和配比,为促进油菜种植管理及产业化可持续发展提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以我国亚热带地区典型第四纪红色黏土发育而来的红壤为供试土壤,采样地点为江西省吉安市青原区人为活动干扰较小的马尾松丘陵红壤地($27^{\circ}7'6''\text{N}$, $115^{\circ}2'27''\text{E}$)。在选定的马尾松林地预先划分3个 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的样方,移除样方表层覆盖的枯枝落叶及石块等杂质,挖取表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品。采集的土壤样品经自然风干后过 2 mm 筛,去除植物残体和杂质,充分混合,其中大部分用于盆栽试验,小部分土壤样品经研磨过 100 目筛用于土壤基本理化性质分析。用于本试验的鸡粪和猪粪来自江西省吉安东旺养殖场,畜禽粪便均已通过为期 35 d

的好氧堆肥腐熟处理。土壤和畜禽粪便样品基本理化性质见表 1。考虑到江西省是中国油菜产量排名第二位的生产大省，而南方红壤区油菜产量却普遍低

于我国其他非红壤区油菜产量^[24,25]，本试验受试油菜品种选用赣油杂 3 型，由江西省农业科学院提供。

表 1 供试样品基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of specimens

样品 Sample	pH值 pH value	有机质 Organic matter/%	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	水解氮 Hydrolyzable N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	活性铝 Reactive Al/ (mg·kg ⁻¹)
土样 Soil	4.50	2.98	44.5	123	4.65	0.284
鸡粪 Chicken manure	7.60	35.46	1235	2998	846	—
猪粪 Pig manure	7.20	46.82	2171	4186	1283	—

“—”代表未检出。
“—” denotes value not detected.

1.2 试验方法

采用盆栽试验，试验为期 80 d，重点关注油菜幼苗生长阶段^[26]。将上述过筛土样和化肥按一定比例混合，使土壤基肥含量最终达到 N 150 mg·kg⁻¹（尿素），P₂O₅ 183 mg·kg⁻¹（Na₂HPO₄·3H₂O），K₂O 120 mg·kg⁻¹（KCl）和纯硼含量 30 mg·kg⁻¹（硼砂）。试验共设置 8 个处理，分别为：（1）不施畜禽粪便对照（CK）；（2）猪粪 10 g·kg⁻¹（P10）；（3）猪粪 30 g·kg⁻¹（P30）；（4）猪粪 50 g·kg⁻¹（P50）；（5）鸡粪 10 g·kg⁻¹（C10）；（6）鸡粪 30 g·kg⁻¹（C30）；（7）鸡粪 50 g·kg⁻¹（C50）；（8）鸡粪猪粪各 15 g·kg⁻¹（PC15）。将混肥土壤装盆（直径 21.8 cm×高度 21.7 cm），每盆装土 3.0 kg，每个处理 8 次重复。各处理组土壤基肥和畜禽粪便一次性施用。研究表明，当土壤 pH 值小于 5.8、铝浓度大于 15 mg·kg⁻¹ 时油菜就会受到铝毒胁迫^[27]。本试验土壤铝胁迫浓度设置为 30 mg·kg⁻¹。调节并保持盆栽土壤含水量至田间正常持水量的 60%，放置 14 d 进行系统预平衡。预平衡试验结束后，选择江西省广泛种植的赣油杂 3 型油菜品种为受试作物，挑选健康饱满的种子，通过种子浸泡消毒、复苏、催芽、育苗等环节，挑选长势良好、大小一致的幼苗进行移栽，定苗后每盆保留 2 棵油菜。盆栽试验开始后，油菜生长期间不再施用其他肥料，按照田间常规方式进行管理。盆栽试验开始后的第 35 天和第 80 天进行采样，每次破坏性采集 4 个平行样品，着重分析油菜地上部生物量、叶片光合色素含量、光合作用参数和叶绿素荧光特性等指标。试验结束时，采集盆栽土壤，晾干研磨过 100 目筛，用于分析土壤 pH 和活性铝含量。

1.3 指标测定

油菜地上部生物量采用称重法测定。获取油菜

地上部构件，用去离子水将附着的土壤洗净，用吸水纸擦干后用电子天平下测定鲜重。采用 80% 丙酮提取分光光度计比色法测定叶绿素 a、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量，每个处理测定 4 次平行样。土壤 pH 分析按水土比 2.5:1（V/m）混合，用玻璃棒剧烈搅拌 1~2 min，静置 30 min，然后用 pH 计（Mettler Toledo-Fiveeasy Plus）测定。土壤有机质含量测定采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 油浴氧化 FeSO₄ 滴定法^[28]。土壤交换性铝用 1 mol·L⁻¹ KCl 静态浸提，液土比为 25:1（V/m），铝试剂比色法测定^[21]。土壤速效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法，有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法，水解氮测定采用碱解扩散法^[28]。

油菜光合作用参数测定选择在天气晴朗的上午 9:00—11:00 进行，统一选取植株顶部第 2 或第 3 片健康的叶片，平铺固定，使用 Li-6400 便携式光合分析仪（Li-Cor）进行测定。在饱和光强下完成 60 min 的光诱导后，控制光合有效辐射（PAR）为 1200 μmol·m⁻²·s⁻¹，CO₂ 浓度为 400 μmol·m⁻²·s⁻¹，利用光合分析仪红蓝光源来分析净光合速率（P_n）、蒸腾速率（T_r）、气孔导度（G_s）、胞间 CO₂ 浓度（C_i）等气体交换参数，并计算水分利用效率（WUE=P_n/T_r）。

油菜叶片叶绿素荧光参数测定部位均选取植株顶端向下第 3 片完全展开叶片的中部进行测定（此时叶片尚未下披）。测定时选择在天气晴朗的上午 9:00—11:00 进行，每组随机选择 3 个植株用水下叶绿素荧光仪 DVING-PAM 和数据采集软件 Win control（德国 WALZ 公司）进行测定，取平均值。叶片测定部位使用叶片夹遮光处理（暗适应）5 min 后，打开叶夹，开启测量光得到暗适应样品最小荧光（F₀），再开

启饱和脉冲（饱和脉冲光强度为 $4000\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{nm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，持续时间 0.8 s ）测定暗适应样品最大荧光（ F_m ）、暗适应光合作用可见光（ F_v ），得到光化学最大量子产量（ F_v/F_m ）。随后，逐渐开启光强度分别为 10 、 103 、 198 、 317 、 454 、 608 、 1344 、 1901 、 $2508\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光化光，每个强度的光化光照射 10 s 后，经检测光和饱和脉冲光测定瞬时荧光产量（ F_t ）、光适应样品最大荧光产量（ F_m' ），将 F_m' 减去 F_t 得到荧光产量变化量（ $\Delta F_v'$ ）。具体计算公式如下^[29-31]：

光化学最大量子产量 $F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_m$

光合电子传递速率（ Φ_{PSII} ）= $\Delta F_v' / F_m' \times PAR \times 0.84 \times 0.5$

光化学淬灭系数 $qP = (F_m' - F_t) / (F_m' - F_o)$

非光化学淬灭系数 $qN = (F_m - F_m') / (F_m - F_o)$

1.4 数据统计分析

借助 SPSS 26.0 软件和 Excel 2018 进行数据统计分析，利用 Origin 2022 绘制图。采用 SPSS 单因素方差（ANOVA）分析不同处理下油菜地上部生物量、油菜叶片光合色素含量、光合作用参数和叶绿素荧光参数变化的差异显著水平，Tukey 多重检验分析两个不同处理组间的显著性水平。利用重复测量单因素方差（RM-ANOVA）分析不同处理油菜叶片光合色素含量、光合作用参数和叶绿素荧光参数随时间

变化的差异显著水平。通过皮尔森相关分析检验油菜地上部生物量、光合色素含量、光合作用参数和叶绿素荧光参数间的相关性。

2 结果与分析

2.1 油菜生物量与土壤活性铝含量变化特征

不同畜禽粪便处理下，处理组油菜地上部生物量均大于对照组（表 2），其中第 80 天，不同畜禽粪便处理组油菜地上部生物量均显著大于对照组（ $P<0.05$ ）。施用等量鸡粪处理的油菜地上部生物量均大于猪粪处理，随鸡粪施用量增加而逐渐增加，分别是对照的 2.30 倍、2.71 倍和 2.74 倍；猪粪施用处理组中，用量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时油菜地上部生物量达到最大值，其次是施用量为 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，分别是对照的 2.41 倍和 2.16 倍。鸡粪、猪粪混施 PC15 处理油菜地上部生物量均大于对照，而且第 80 天油菜地上部生物量显著大于第 35 天（ $P<0.05$ ）。与对照相比，猪粪、鸡粪处理显著提高了土壤 pH（ $P<0.05$ ）；除 C10 处理外，其他畜禽粪便处理的土壤活性铝含量均显著低于对照（ $P<0.05$ ）。综上，C50 处理对油菜地上部生物量、土壤 pH 提升效果最好，而 C30 在降低土壤活性铝含量上效果最佳。

表 2 不同畜禽粪便处理对油菜地上部生物量、土壤 pH 和活性铝含量的影响
Table 2 Effects of manure applications on aboveground biomass and pH and reactive aluminium in soil

处理 Treatment	第35天生生物量 Biomass at 35 d/g	第80天生生物量 Biomass at 80 d/g	pH	活性铝 Reactive Al/（mg·kg ⁻¹ ）
CK	0.68±0.12 b	1.87±0.31 d	4.66±0.10 d	0.273±0.024 a
P10	0.91±0.28 a	3.59±0.56 c	5.27±0.07 bc	0.138±0.021 c
P30	0.92±0.17 a	4.50±0.34 b	5.57±0.23 b	0.137±0.014 c
P50	0.87±0.35 ab	4.05±0.62 bc	5.76±0.15 b	0.137±0.012 c
C10	0.89±0.19 ab	4.31±0.39 b	5.19 ±0.13 c	0.243±0.025 ab
C30	0.95±0.21 a	5.08±0.39 ab	5.58±0.17 b	0.127±0.016 cd
C50	1.08±0.32 a	5.13±0.54 a	6.23±0.06 a	0.135±0.018 c
PC15	0.88±0.26 ab	4.98±0.54 b	5.31±0.18 bc	0.214±0.026 bc

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。表3~5同。
Data with different lowercase letters on same column indicate significant differences at 0.05 level. Same for Tables 3-5.

2.2 叶片光合色素变化规律

不同畜禽粪便处理油菜叶片叶绿素 a（Chl-a）、叶绿素 b（Chl-b）、总叶绿素含量（Chl-a+ Chl-b）均显著大于对照处理（ $P<0.05$ ，表 3），但叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值（Chl-a/Chl-b）变化差异未达到显

著水平。叶片总叶绿素含量主要由 Chl-a 组成。除 C30 处理外，施用等量鸡粪处理油菜叶片光合色素 Chl-a、Chl-b 和 Chl-a+Chl-b 含量均大于猪粪处理，但有些未达到显著水平。随着猪粪施用量增加，油菜叶片光合色素 Chl-a、Chl-b、Chl-a+Chl-b 含量和

Chl-a/Chl-b 大致呈现逐渐增加趋势，而鸡粪处理光合色素变化则呈先降低后升高的趋势。除 C30 处理外，鸡粪处理对于促进油菜叶片光合色素含量作用大于猪粪处理；与 PC15 处理对比，油菜叶片 Chl-a、

Chl-b、Chl-a+Chl-b 含量均大于施用等量的鸡粪和猪粪处理，而 Chl-a/Chl-b 比猪粪处理小，但比鸡粪处理大。值得注意的是，C50 处理油菜叶片光合色素 Chl-a、Chl-b 和 Chl-a+Chl-b 含量最大。

表 3 不同畜禽粪便处理油菜叶片光合色素变化规律
Table 3 Changes in photosynthetic pigment content of seedlings under varied treatments

处理 Treatment	叶绿素a Chl-a/(mg·g ⁻¹)		叶绿素b Chl-b/(mg·g ⁻¹)		叶绿素a+叶绿素b Chl-a+ Chl-b/(mg·g ⁻¹)		叶绿素a/叶绿素b Chl-a/ Chl-b	
	35天 Day 35	80天 Day 80	35天 Day 35	80天 Day 80	35天 Day 35	80天 Day 80	35天 Day 35	80天 Day 80
CK	3.59±0.77 d	5.11±1.10 cd	1.32±0.31 d	1.76±0.54 d	4.92±1.12 e	6.87±1.28 d	2.72±0.26 ab	2.91±0.27 a
P10	4.53±1.12 bc	6.45±1.27 bc	1.82±0.39 bc	2.42±0.68 c	6.34±1.32 c	8.87±1.51 c	2.48±0.23 bc	2.66±0.25 a
P30	4.58±1.21 bc	6.52±1.37 bc	1.73±0.39 bc	2.30±0.69 c	6.31±1.40 c	8.82±1.60 c	2.65±0.25 ab	2.83±0.27 a
P50	6.19±1.83 b	8.81±2.07 b	2.09±0.54 b	2.78±0.93 bc	8.29±2.06 b	11.59±2.35 b	2.96±0.28 a	3.17±0.30 a
C10	6.48±1.87 ab	9.23±2.11 ab	2.24±0.56 ab	2.97±0.97 bc	8.72±2.12 ab	12.21±2.42 ab	2.89±0.27 a	3.09±0.29 a
C30	3.86±0.95 c	5.49±1.07 c	1.56±0.34 cd	2.07±0.58 c	5.42±1.13 cd	7.57±1.28 c	2.47±0.23 bc	2.65±0.25 a
C50	8.28±2.17 a	11.79±2.46 a	3.15±0.72 a	4.19±1.25 a	11.43±2.52 a	15.98±2.88 a	2.63±0.25 ab	2.81±0.27 a
PC15	6.26±1.59 ab	8.91±1.79 b	2.47±0.54 ab	3.29±0.94 ab	8.73±1.85 ab	12.19±2.12 ab	2.53±0.23 b	2.71±0.26 a

2.3 光合参数变化规律

油菜光合作用参数分析结果表明（表 4），不同畜禽粪便处理油菜叶片净光合速率（ P_n ）、蒸腾速率（ T_r ）、气孔导度（ G_s ）和水分利用效率（ WUE ）均显著高于对照（ $P<0.05$ ），胞间 CO_2 浓度（ C_i ）显著低于对照。与鸡粪处理相比，不同猪粪处理油菜叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 和 WUE 均高于施用等量的鸡粪处理，而 C_i 表现出相反趋势。随着畜禽粪便施加量的递增，油菜叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 变化均大致表现出逐渐增加趋势，而 C_i 和 WUE 逐渐降低。PC15 处理下，油菜叶片 T_r 、 G_s 和 C_i 均大于单施相应施用量处理，叶片 WUE 和 P_n 则是小于对应单施处理。其中 P50 处理，油菜叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 值最大。

2.4 叶绿素荧光参数变化规律

油菜叶片叶绿素荧光参数特征分析表明，不同畜禽粪便处理油菜叶片最大光化学量子产量（ F_v/F_m ）、光合电子传递速率（ ϕ_{PSII} ）、光化学淬灭系数（ qP ）和非光化学淬灭系数（ qN ）显著大于对照处理（ $P<0.05$ ，表 5）。试验期间，不同猪粪处理油菜叶片 ϕ_{PSII} 大于鸡粪处理。在第 35 天，PC15 处理油菜叶片 F_v/F_m 、 ϕ_{PSII} 、 qP 、 qN 则分别是对照处理的 1.05 倍、1.38 倍、1.77 倍和 3.06 倍；在第 80 天分

别是对照的 1.05 倍、1.39 倍、2.00 倍和 3.16 倍。随着畜禽粪便施用量增加，当施用量为 $30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时对油菜叶绿素荧光参数促进作用最大，其次是施用 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 畜禽粪便处理，最后是施用 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 畜禽粪便处理。

2.5 相关性分析

Person 相关性分析表明（图 1），不同畜禽粪便处理油菜地上部生物量与 WUE 和 ϕ_{PSII} 变化呈现极显著正相关（ $P<0.01$ ），与 C_i 呈现极显著负相关（ $P<0.01$ ）；油菜叶片 Chl-a、Chl-b 和 Chl-a+Chl-b 大致变化趋势相一致，与油菜地上生物量呈现极显著相关（ $P<0.01$ ），其中 Chl-a 含量起主要决定作用；油菜净光合速率大小与光合气体交换参数及资源利效率密切相关，油菜 P_n 变化与 T_r 、 G_s 和 WUE 呈显著正相关关系（ $P<0.05$ ），但与 C_i 却呈现负相关关系。

3 讨论

铝是土壤中最丰富的金属元素，其平均含量约占地壳的 8%，土壤中的铝大部分以固定态铝形式存在，对植物和环境没有毒害作用，只有离子态铝才对环境产生影响^[32]。铝毒害与活性铝含量及其赋存

表 4 不同畜禽粪便处理油菜的光合特性
Table 4 Photosynthetic characteristics of seedlings under varied treatments

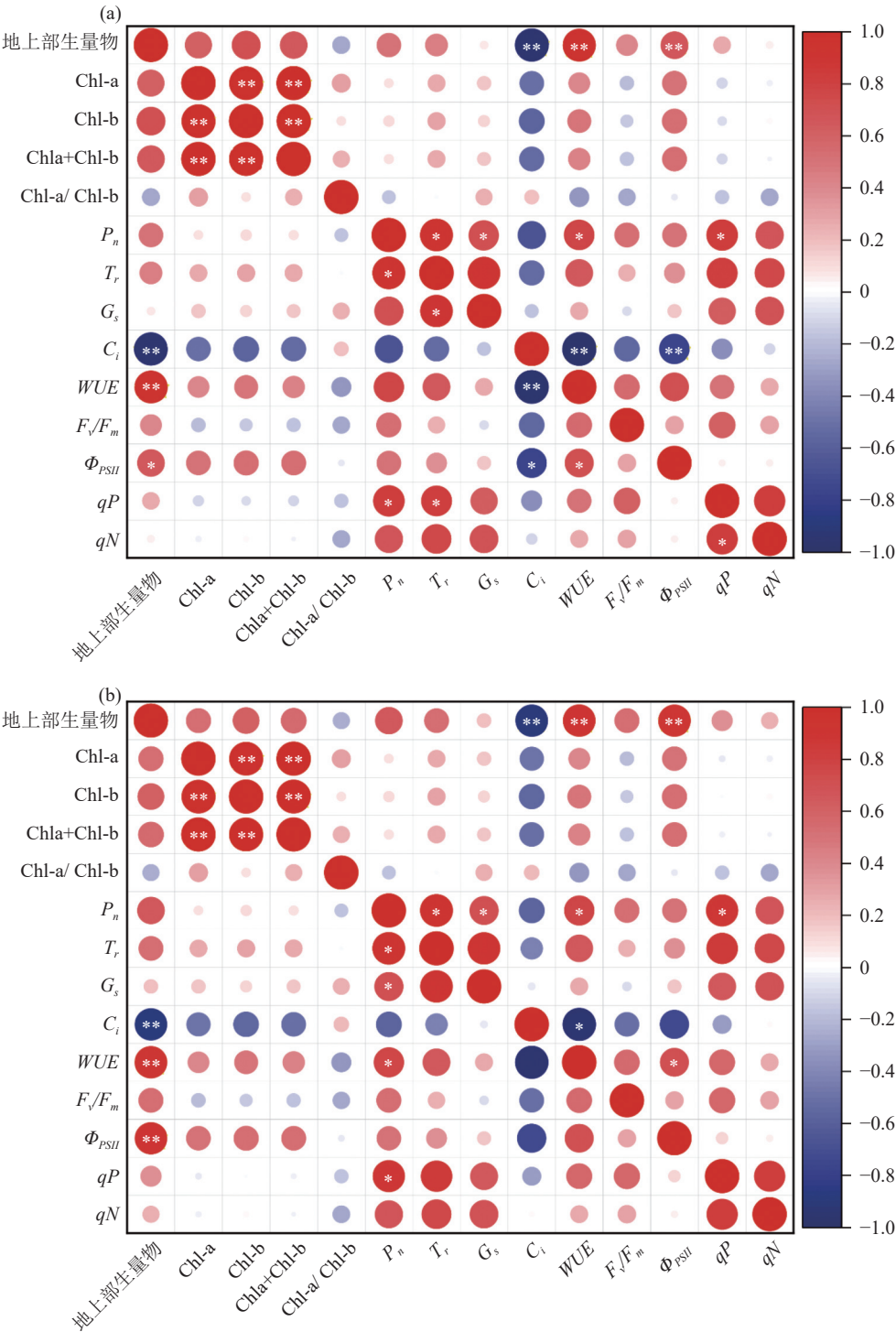
处理 Treatment		净光合速率 P_n / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间CO ₂ 浓度 C_i / ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	水分利用效率 WUE / ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
35天 Day 35	CK	3.32±0.15 d	1.35±0.37 d	128.00±4.38 d	319.03±3.17 a	1.08±0.21 d
	P10	11.27±0.91 ab	2.64±0.13 ab	178.33±11.05 b	254.67±10.71 b	4.31±0.41 b
	P30	11.76±0.35 a	2.73±0.13 a	177.67±10.40 b	240.33±7.45 bc	4.50±0.32 b
	P50	12.33±0.23 a	3.08±0.21 a	236.67±11.42 a	249.67±9.13 b	4.05±0.27 bc
	C10	7.93±0.68 c	1.89±0.15 c	134.67±7.33 cd	248.04±3.84 b	3.59±0.15 c
	C30	11.21±0.12 ab	2.20±0.01 bc	142.00±2.08 c	226.33±6.39 c	5.08±0.23 a
	C50	8.17±0.55 c	2.29±0.31 b	147.01±12.69 c	217.67±10.18 c	5.13±0.34 a
	PC15	10.60±0.57 b	2.67±0.03 ab	190.00±4.06 ab	257.02±11.08 b	3.98±0.25 bc
80天 Day 80	CK	4.22±0.29 e	2.03±0.75 d	177.28±37.23 e	367.84±68.05 a	1.43±0.45 e
	P10	14.34±1.79 ab	3.97±0.52 ab	246.99±50.63 b	319.10±20.74 b	5.72±0.88 bc
	P30	14.96±0.69 a	4.10±0.53 a	246.07±78.74 b	301.13±19.57 bc	5.97±0.69 b
	P50	15.69±0.45 a	4.63±0.97 a	327.79±88.50 a	312.84±32.85 b	5.34±0.58 bc
	C10	10.09±1.33 d	2.84±0.43 b	186.52±27.98 d	310.79±23.31 b	4.76±0.32 d
	C30	14.26±0.24 a	3.30±0.03 c	196.67±45.23 cd	283.59±1.42 c	6.74±0.49 ab
	C50	10.39±1.08 d	3.44±1.06 bc	203.61±69.23 c	272.75±42.27 c	6.81±0.74 a
	PC15	13.49±1.11 bc	4.01±0.12 a	263.15±65.78 b	322.04±4.83 b	5.28±0.54 c

表 5 不同畜禽粪便处理油菜光合荧光参数变化
Table 5 Changes in photosynthetic fluorescence indexes of seedlings under varied treatments

处理 Treatment	光化学最大量子产量 F_v/F_m		光合电子传递速率 Φ_{PSII}		光化学淬灭系数 qP		光化学淬灭系数 qN	
	35天 Day 35	80天 Day 80	35天 Day 35	80天 Day 80	35天 Day 35	80天 Day 80	35天 Day 35	80天 Day 80
CK	0.69±0.02 b	0.84±0.01 c	0.45±0.02 c	0.61±0.11 c	0.22±0.13 c	0.34±0.10 c	0.32±0.11 d	0.24±0.05 d
P10	0.73±0.01 a	0.89±0.01 a	0.51±0.04 b	0.69±0.13 b	0.48±0.07 a	0.85±0.05 a	0.81±0.13 b	0.60±0.06 b
P30	0.78±0.01 a	0.95±0.02 a	0.53±0.03 ab	0.72±0.15 ab	0.51±0.09 a	0.85±0.06 a	0.86±0.15 ab	0.64±0.07 b
P50	0.71±0.01 a	0.86±0.01 b	0.59±0.04 a	0.80±0.08 a	0.41±0.13 a	0.72±0.08 a	0.67±0.08 b	0.50±0.04 b
C10	0.75±0.01 a	0.91±0.01 a	0.60±0.02 a	0.82±0.05 a	0.33±0.02 a	0.58±0.01 b	0.40±0.05 c	0.29±0.02 c
C30	0.76±0.01 a	0.92±0.01 a	0.64±0.03 a	0.87±0.12 a	0.34±0.01 b	0.60±0.01 b	0.42±0.12 c	0.31±0.06 c
C50	0.72±0.02 a	0.87±0.01 ab	0.60±0.04 a	0.82±0.13 a	0.29±0.11 bc	0.51±0.07 b	0.37±0.13 c	0.27±0.06 c
PC15	0.73±0.02 a	0.88±0.02 ab	0.62±0.01 a	0.84±0.21 a	0.39±0.05 ab	0.69±0.03 ab	0.98±0.21 a	0.73±0.09 a

形态密切有关，其中交换性铝代表了具有生物有效性的那部分铝，具有生物毒害性，其含量的高低决定了土壤铝毒对植物的胁迫程度^[22]。施用畜禽粪便、秸秆等有机物料可以提高酸性红壤的 pH 值，显著降低活性交换性铝的含量，明显提高土壤有机络合态铝的比例，从而减轻铝对作物的毒害、促进作物生长和产量^[21,22]。本研究结果表明，不同畜禽粪便处理油菜地上部生物量均大于对照组，第 80 天处理

组油菜地上部生物量显著大于对照组（ $P<0.05$ ），分析其原因：（1）有机物具有巨大的比表面及电荷，对土壤中的离子和分子具有吸附作用，特别是有机物结构上的羟基、羧基、酮基、硫醚基、氨基及亚氨基等配体对活性铝会产生强的螯合作用，形成可溶性络合物，降低交换性铝的浓度，从而减轻土壤铝对作物的毒害作用^[33]。（2）施用的畜禽粪便在分解过程中会释放出 NH_3 ，这能对土壤起到中和



a: 35 d, b: 80 d. **, *表示极显著相关 ($P < 0.01$) 及显著相关 ($P < 0.05$)。

a and b represent 35 d and 80 d incubation, respectively. ** and * mean extremely significant correlation at $P < 0.01$ and significant correlation at $P < 0.05$, respectively.

图 1 不同畜禽粪便处理油菜地上部生物量和光合荧光参数相关性分析

Fig. 1 Correlations between aboveground biomass and photosynthetic fluorescence indexes of seedlings under varied treatments

作用，使土壤微生物活动增强，使得油菜根际土壤多处于还原环境，土壤颗粒固相赋存的 Mn、Fe 等氧化物在还原环境下溶解产生 OH^- ，从而提高土壤酸度，强化了土壤中 Al、Fe 氢氧化物的形成^[21]。与对照相比，猪粪、鸡粪处理土壤 pH 分别提高了 13.1%~

23.6% 和 11.4%~33.7%，土壤活性铝含量分别降低了 49.4%~49.8% 和 11.0%~53.5%，这为畜禽粪便施用能有效提高土壤 pH、降低活性铝含量提供了直接证据，证实上述耦合过程使得酸性红壤中铝胁迫对油菜生长的毒害作用得到有效缓解。

在不同畜禽粪便处理条件下, 处理组油菜叶片净光合速率 (P_n) 均显著大于对照 ($P < 0.05$), 而油菜净光合速率是表征其对铝毒胁迫逆境条件下光合生理生态响应能力的一个至关重要的指标, 说明不同畜禽粪便施用处理能有效缓解油菜对土壤铝胁迫下的毒害效应。同理, 本试验从其他两个侧面进一步证实了前述观点: 一是, 随着畜禽粪便施加量的递增, 油菜叶片 P_n 呈逐渐递增的趋势; 二是, 随着油菜幼苗不断生长发育, 第 80 天油菜 P_n 均明显大于对照, 表明畜禽粪便施用对酸性红壤上油菜生长铝毒的缓解效应也需要一定的作用时间, 在为期 80 d 试验期内, 畜禽粪便施用对油菜铝毒胁迫的缓解作用仍在增强。不同畜禽粪便处理油菜净光合速率大小与光合气体交换参数及资源利效率密切相关, 油菜 P_n 变化与 T_r 、 G_s 和 WUE 呈显著线性正相关关系, 但与 C_i 却呈现线性负相关关系。不同畜禽粪便处理 T_r 、 G_s 和 WUE 显著大于对照, 而 C_i 却呈现相反趋势。在酸性红壤铝胁迫作用下, 施用畜禽粪便提高了油菜幼苗蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率, 一方面大开度的气孔使得油菜幼苗光合气体交换时间、面积和交换总量增加; 另一方面, 油菜幼苗在铝胁迫下通过加大叶片气孔导度、提高蒸腾速率、增强生理活性, 使水分利用效率提高, 保持或提高 CO_2 利用效率, 合成更多的光合产物以满足铝胁迫逆境下油菜幼苗生长所需, 为油菜幼苗净光合速率提高起到了关键作用。

叶绿素荧光参数中, F_v/F_m 反映光合结构 PS II 反应中心内禀光能转换效率或称最大 PS II 的光能转换效率, F_v/F_m 不受植物物种的影响, 在非胁迫条件下该参数的变化极小, 但当植物受到环境条件的胁迫时则会显著下降。一般高等植物的 F_v/F_m 为 0.70~0.85, 多数约为 0.83, 在 F_v/F_m 值低于 0.8 时, 表示外界胁迫可能对植物 PSII 反应中心造成一定损伤^[34]。研究表明, 不同畜禽粪便处理油菜幼苗 F_v/F_m 显著大于对照处理, 同时也观察到第 35 天对照和畜禽粪便处理油菜幼苗 F_v/F_m 值均低于 0.8, 但第 80 天不同处理油菜幼苗 F_v/F_m 才达到 0.80 以上。就油菜叶片最大光化学量子产量变化来看, 该结果表明畜禽粪便施用能有效缓解酸性红壤铝胁迫对油菜幼苗的毒害作用, 相对于对照而言, 畜禽粪便施用为油菜幼苗提供了生长发育所需的养分物质, 这为油菜幼苗抵抗铝胁迫提供了关键的物质基础。值得注意的是, 由于施用到土壤的畜禽粪便与土壤-油菜系统相互作用需要一定的时间, 因此观测到第 35 天即使施用畜禽粪便处理的油菜幼苗仍受到铝胁迫, 从而导致

F_v/F_m 值均低于 0.8; 而第 80 天的不同畜禽粪便处理油菜幼苗 F_v/F_m 均大于 0.80, 这是由于随着油菜幼苗生长, 油菜对养分的吸收利用能力和机体抵抗铝胁迫的抵抗力稳定性均有所提升, 从而有效地缓解了铝胁迫对油菜幼苗的毒害作用。

光能被天线色素捕获后, 主要有 3 种相互竞争的出路: 光化学电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散。由于叶绿素荧光发射只消耗捕获光能的很少一部分, 能量主要通过光化学电子传递和热耗散途径消耗掉。光化学淬灭系数 (qP) 是光合结构 PS II 天线色素吸收光能用于光化学电子传递的份额, 较低的 qP 反映光合结构 PS II 中开放的反应中心比例和参与 CO_2 固定的电子减少。非光化学淬灭系数 (qN) 反映的是天线色素吸收的光能不能用于电子传递而以热的形式耗散掉的部分光能, 热耗散是植物保护光合结构 PS II 的重要机制。本研究中, 不同畜禽粪便处理下, 油菜幼苗 qP 、 qN 均显著大于对照处理, 表明畜禽粪便施用能有效提高油菜幼苗光合结构 PS II 天线色素吸收光能并用于光化学电子传递, 而本试验处理组光合电子传递速率均高于对照的直接证据更是从侧面作证了该结论。但难以解释的是, 不同畜禽粪便处理油菜幼苗 qN 均大于对照, 表明畜禽粪便处理油菜幼苗光合结构 PS II 可能受到破坏, 需要通过增加较高的热耗散来维持光合结构 PS II 保持正常, 目前研究虽难以给出造成上述结果的具体原因, 但这极可能是受畜禽粪便中高浓度的有机质含量的影响, 施用高有机质畜禽粪便使得土壤呼吸作用加快, 无疑加剧土壤还原状况, 而土壤中高浓度的铝锰、有机酸和其他有机物质 (甲烷, 乙烯, 苯酚和乙醇) 则会对油菜幼苗造成胁迫作用^[35,36]。另一方面, 由于 Chl-b 是捕光色素系统的主要构成, 因此 Chl-a/Chl-b 值的相对大小反映了捕光色素系统的相对大小^[34]。Chl-b 含量越大和 Chl-a/Chl-b 值越小, 表明植物光捕获能力越弱。不同畜禽粪便处理油菜幼苗叶片 Chl-b 含量均大于对照组, 而且第 80 天不同畜禽粪便处理 Chl-b 含量均进一步增大, 这表明畜禽粪便处理油菜幼苗叶片光合结构 PS II 已受到胁迫。

值得注意的是, 本研究发现猪粪、鸡粪对铝胁迫下油菜幼苗生长与光合荧光参数的影响具有明显功能分化作用, 即鸡粪对铝胁迫下油菜幼苗地上部生物量、叶片光合色素含量的缓解作用均大于相应的猪粪处理, 但对油菜幼苗光合作用参数、 F_v/F_m 值和 qP 的作用前者却小于后者。出现功能分化的主要原因有以下几点: 一是从油菜生长角度来看, 鸡粪

具有比猪粪更高的 pH 值,施用鸡粪对酸性红壤酸度的中和作用比施用猪粪更强,从而降低了红壤铝胁迫对油菜生长的毒害作用;二是,不同畜禽粪便处理下油菜幼苗光合作用和叶绿素荧光特性处于正常阈值,表明未受逆境胁迫,而猪粪的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均比鸡粪高,这些养分物质有利于油菜幼苗叶片光合作用和叶绿素荧光反应过程。从油菜幼苗生物量、光合荧光特性角度出发,当猪粪施用量为 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对油菜生长及光合荧光特性的缓解作用最佳,而鸡粪最佳施用量则为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此,在推动畜禽粪便等有机废物资源化利用进程中,当把经过处理的畜禽粪便作为肥料在酸性红壤农田使用过程时,应将畜禽粪便自身的养分特性和酸度条件和不同作物对生产实践需求有机结合起来,并综合运用土壤酸度调理手段来降低酸性红壤铝胁迫对作物的毒害作用,促进作物生长。

4 结论

通过为期 80 d 的盆栽培养试验,施用猪粪、鸡粪处理有效缓解了铝对油菜的胁迫作用。与对照相比,施用鸡粪更有利于促进油菜幼苗地上部生物量和叶片光合色素,而猪粪则对油菜幼苗光合荧光特性的缓解作用更大,说明鸡粪、猪粪施用对油菜缓解铝胁迫的生理生态响应过程不同。施用 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 猪粪量对铝胁迫下油菜生长及光合荧光特性的缓解作用最佳,而鸡粪最佳施用量则为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。上述结果为畜禽粪便在我国红壤油菜种植产业中的应用提供科学依据,在降低酸性红壤铝胁迫对作物的毒害作用具有重要的理论和现实意义。

参考文献:

- [1] ZHU Q C, DE VRIES W, LIU X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980-2010 [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1497-1505.
- [2] 周晓阳,徐明岗,周世伟,等.长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J].*植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1615-1621.
ZHOU X Y, XU M G, ZHOU S W, et al. Soil acidification characteristics in Southern China's croplands under long-term fertilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1615-1621. (in Chinese)
- [3] ZHU Q C, LIU X J, HAO T X, et al. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 1339-1348.
- [4] ZHU H H, CHEN C, XU C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99-106.
- [5] 孔繁翔,桑伟莲,蒋新,等.铝对植物毒害及植物抗铝作用机理[J].*生态学报*, 2000, 20(5): 855-862.
KONG F X, SANG W L, JIANG X, et al. Aluminum toxicity and tolerance in plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 855-862. (in Chinese)
- [6] MA J F, RYAN P R. Foreword: Understanding how plants cope with acid soils [J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(4): 3-6.
- [7] JIN S Q, ZHANG B, WU B, et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 48-55.
- [8] 谢光辉,包维卿,刘继军,等.中国畜禽粪便资源研究现状述评[J].*中国农业大学学报*, 2018, 23(4): 75-87.
XIE G H, BAO W Q, LIU J J, et al. An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4): 75-87. (in Chinese)
- [9] ZUBAIR M, WANG S Q, ZHANG P Y, et al. Biological nutrient removal and recovery from solid and liquid livestock manure: Recent advance and perspective [J]. *Bioresour Technol*, 2020, 301: 122823.
- [10] 李燕青,温延臣,林治安,等.不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1669-1678.
LI Y Q, WEN Y C, LIN Z A, et al. Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1669-1678. (in Chinese)
- [11] YAN L, RIAZ M, LIU J Y, et al. The aluminum tolerance and detoxification mechanisms in plants; recent advances and prospects [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(9): 1491-1527.
- [12] RIAZ M, YAN L, WU X W, et al. Boron alleviates the aluminum toxicity in trifoliate orange by regulating antioxidant defense system and reducing root cell injury [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 208: 149-158.
- [13] LI X W, LI Y L, MAI J W, et al. Boron alleviates aluminum toxicity by promoting root alkalization in transition zone via polar auxin transport [J]. *Plant Physiology*, 2018, 177(3): 1254-1266.
- [14] CHEN L S. Physiological responses and tolerance of plant shoot to aluminum toxicity [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(2): 143-155.
- [15] 应小芳,刘鹏,徐根娣.土壤中的铝及其植物效应的研究进展[J].*生态环境*, 2003, 12(2): 237-239.
YING X F, LIU P, XU G D. The advance in the research of aluminum in soil and its influence on plant [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(2): 237-239. (in Chinese)
- [16] 徐芬芬,程诗雨,田玉清.铝胁迫对花生根系生长和生理特性的影响[J].*河南农业科学*, 2014, 43(9): 52-55.
XU F F, CHENG S Y, TIAN Y Q. Effects of aluminum stress on growth and physiological characteristics in peanut root [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(9): 52-55. (in Chinese)
- [17] 应小芳,刘鹏.铝胁迫对大豆叶片光合特性的影响[J].*应用生态学报*, 2005, 16(1): 166-170.

- YING X F, LIU P. Effects of aluminum stress on photosynthetic characters of soybean [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 166–170. (in Chinese)
- [18] 付斌, 刘宏斌, 胡万里, 等. 施用牛粪对土壤-油菜系统氮素组分的影响 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (5): 1177–1183.
- FU B, LIU H B, HU W L, et al. Effects of cow manure application on nitrogen cycling in soil-rape systems [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(5): 1177–1183. (in Chinese)
- [19] 李可, 孙彤, 孙涛, 等. 施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 (10): 2316–2324.
- LI K, SUN T, SUN T, et al. Effects of applying organic fertilizer from chicken excrement on the microbial community structural diversity in soils planted with Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2316–2324. (in Chinese)
- [20] 王逗, 杨杰, 廖汝佳, 等. 化肥有机肥配施对油菜营养生长期根系分泌物的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021, (5): 95–102.
- WANG D, YANG J, LIAO R J, et al. Effects of chemical fertilizers combined with organic fertilizers on root exudates of rape during vegetative growth period [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5): 95–102. (in Chinese)
- [21] 陈梅, 陈亚华, 沈振国, 等. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (2): 173–176.
- CHEN M, CHEN Y H, SHEN Z G, et al. Amelioration of aluminum toxicity on wheat plants grown in acid red soil by pig manure [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 173–176. (in Chinese)
- [22] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立, 等. 有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (4): 637–641.
- LÜ H Z, WANG K R, XIE X L, et al. Alleviation of organic manure on aluminum toxicity in acid red soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 637–641. (in Chinese)
- [23] 易冬莲. 油菜生产现状及发展对策 [J]. 湖南农业科学, 1998, (5): 47–48.
- YI D L. Current situation and development countermeasures of rapeseed production [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 1998(5): 47–48. (in Chinese)
- [24] 国家统计局, 中国指数研究院. 中国房地产统计年鉴-2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [25] 闫磊, 姜存仓, Muhammad Riaz, 等. 不同形态硼对油菜幼苗铝毒的缓解效应及其 FTIR 特征分析 [J]. 作物学报, 2017, 43 (12): 1817–1826.
- YAN L, JIANG C C, RIAZ M, et al. Mitigative effect of different forms of boron on aluminum toxicity of rape seedlings and its FTIR characteristics [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(12): 1817–1826. (in Chinese)
- [26] 韩德鹏, 吕伟生, 陈明, 等. 缓释硼肥种肥用量对红壤油菜生长发育和产量的影响 [J]. 核农学报, 2021, 35 (10): 2394–2403.
- HAN D P, LYU W S, CHEN M, et al. Effects of the application rate of slow-release boric fertilizer on the growth and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) in red soil cultivated land under the simultaneous sowing of fertilizer and seeds [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(10): 2394–2403. (in Chinese)
- [27] LOFTON J, GODSEY C B, ZHANG H. Determining aluminum tolerance and critical soil pH for winter canola production for acidic soils in temperate regions [J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1): 327–332.
- [28] 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, 1999.
- [29] BILGER W, BJÖRKMAN O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis* [J]. *Photosynthesis Research*, 1990, 25(3): 173–185.
- [30] SCHREIBER U, GADEMANN R, RALPH P J, et al. Assessment of photosynthetic performance of *Prochloron* in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1997, 38(8): 945–951.
- [31] 余居华, 钟继承, 范成新, 等. 湖泊基质客土改良的环境效应: 对芦苇生长及光合荧光特性的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36 (12): 4444–4454.
- YU J H, ZHONG J C, FAN C X, et al. Environmental effect of substrate amelioration on lake: Effects on *Phragmites communis* growth and photosynthetic fluorescence characteristics [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4444–4454. (in Chinese)
- [32] DELHAIZE E, RYAN P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants [J]. *Plant Physiology*, 1995, 107(2): 315–321.
- [33] SAMAC D A, TESFAYE M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils—a review [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2003, 75(3): 189–207.
- [34] DAWSON S P, DENNISON W C. Effects of ultraviolet and photosynthetically active radiation on five seagrass species [J]. *Marine Biology*, 1996, 125(4): 629–638.
- [35] ROELOFS J G M, BROUWER E, BOBBINK R. Restoration of aquatic macrophyte vegetation in acidified and eutrophicated shallow soft water wetlands in the Netherlands[M]//NIENHUIS PH, GULATI RD. Ecological Restoration of Aquatic and Semi-Aquatic Ecosystems in the Netherlands (NW Europe). Dordrecht: Springer, 2002: 171–180.
- [36] CALLEJA M L, MARBÀ N, DUARTE C M. The relationship between seagrass (*Posidonia oceanica*) decline and sulfide porewater concentration in carbonate sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73(3/4): 583–588.

(责任编辑: 张梅)