

不同微生物菌剂对烤烟生长发育及生理特性的影响

喻奇伟¹, 李鹏志¹, 代园凤¹, 张铜津¹, 吴学巧¹, 李彩斌¹, 计钰星^{2*}

¹贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州 毕节

²河南农业大学烟草学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月9日

摘要

为了筛选出作用于烤烟的不同微生物菌剂及施用浓度, 本试验以云烟87为研究对象, 设置对照组(ck), 将光合细菌稀释500 (g1)、300 (g2)、100 (g3)倍, 小球藻稀释50 (x1)、100 (x2)、150 (x3)后喷施于烤烟叶片, 对不同处理下烤烟叶片的生理特性进行比较。结果表明: (1) 与对照组相比, g2处理的茎围有显著提高, 增幅为24.96%, g1、g2和g3处理的茎高有显著提高, 增幅分别为19.85%、24.26%、18.75%, x3处理的最大叶长有显著提高, 增幅为11.09%, x1、x2、x3处理的根系活力有显著提高, 增幅分别为4.00%、7.78%、9.54%。(2) 与对照组相比, 各处理的SOD活性均有显著性提高, 其中x1处理增幅最大, 为41.62%, x2处理的POD活性有显著提高, 增幅为23.25%, 各处理的CAT活性均有显著性提高, 其中x1、x2处理增幅较大, 分别为59.9%、63.09%。(3) 与对照组相比, g2、x2、x3处理的MDA含量有显著降低, 降幅分别为15.51%、20.77%、23.67%。(4) 与对照组相比, 各处理的可溶性蛋白和脯氨酸含量均有显著性提高。隶属函数综合分析结果表明, x3处理综合得分最高。

关键词

烤烟, 光合细菌, 小球藻, 生理特性

Effects of Different Microbial Agents on Growth and Physiological Characteristics of Flue-Cured Tobacco

Qiwei Yu¹, Pengzhi Li¹, Yuanfeng Dai¹, Tongjin Zhang¹, Xueqiao Wu¹, Caibin Li¹, Yuxing Ji^{2*}

¹Guizhou Tobacco Company Bijie Company, Bijie Guizhou

²College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan

Received: June 3, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 9, 2026

*通讯作者。

文章引用: 喻奇伟, 李鹏志, 代园凤, 张铜津, 吴学巧, 李彩斌, 计钰星. 不同微生物菌剂对烤烟生长发育及生理特性的影响[J]. 农业科学, 2026, 16(7): 997-1007. DOI: 10.12677/hjas.2026.167121

Abstract

In order to screen out the different microbial agents and application concentrations acting on flue-cured tobacco, Yunyan 87 was used as the research object in this experiment, and the control group (ck) was set up. Photosynthetic bacteria were diluted 500 (g1), 300 (g2), 100 (g3) times, and chlorella were diluted 50 (x1), 100 (x2), 150 (x3) and sprayed on flue-cured tobacco leaves to compare the physiological characteristics of flue-cured tobacco leaves under different treatments. The results showed that: (1) Compared with the control group, the stem circumference of g2 treatment was significantly increased by 24.96%, the stem height of g1, g2 and g3 treatments was significantly increased by 19.85%, 24.26% and 18.75% respectively, the maximum leaf length of x3 treatment was significantly increased by 11.09%, and the root activity of x1, x2 and x3 treatments was significantly increased by 4.00%, 7.78% and 9.54% respectively. (2) Compared with the control group, the SOD activity of each treatment was significantly increased, among which the x1 treatment increased the most, which was 41.62%, the POD activity of the x2 treatment was significantly increased, which was 23.25%, and the CAT activity of each treatment was significantly increased. Among them, the x1 and x2 treatments increased significantly, which were 59.9% and 63.09%, respectively. (3) Compared with the control group, the MDA content of g2, x2 and x3 treatments decreased significantly by 15.51%, 20.77% and 23.67%, respectively. (4) Compared with the control group, the soluble protein and proline content of each treatment were significantly increased. The comprehensive analysis results of membership function showed that the comprehensive score of g3 treatment was the highest.

Keywords

Flue-Cured Tobacco, Photosynthetic Bacteria, Chlorella Vulgaris, Physiological Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国烤烟生产中,肥料是烤烟产量形成、品质优劣、经济效益高低的核心物质基础,直接决定烟叶的产量、外观质量、内在化学成分协调性和工业可用性[1]。随着绿色农业与可持续烟草种植理念的深入推进,传统化学施肥模式带来的土壤板结、微生物群落失衡、农残积累及烟叶品质退化等问题日益突出,亟需开发环境友好、高效可持续的栽培调控技术[2]。光合细菌(photosynthetic bacteria)作为一类能在厌氧或微好氧条件下利用光能进行光合作用且不产氧的微生物[3],凭借其独特的生理代谢功能,凭借微生物菌肥的方式应用于农业上具有促进作物生长、提升土壤肥力、改善叶际、根际微生物环境等功能及绿色、无毒等优点,在作物绿色生产中展现出广阔的应用前景[4][5]。相关研究表明,光合细菌能与其它根瘤菌联合固氮,菌体分泌的胞外组分有益于微生物生长,对根瘤菌有刺激作用,促进放线菌和固氮菌大量繁殖,固氮菌增多有利于产生更多的生理活性物质,增强根系的固氮作用,增进土壤生物固氮,提升土壤肥力[6]。

微藻(microalgae)是一类能够进行光合自养的微生物,因其富含生物活性物质、大量的氮磷元素及维生素、氨基酸等物质被广泛应用[7]-[10],同时,微藻可作为生物肥、土壤调节剂和生物刺激剂应用于农业生产[11],能够改善土壤水肥条件,直接提供植物生长发育所需的营养从而提升产量,还能提供植物激

素如生长素、细胞分裂素等促进植物生长发育[12]-[14],是发展可持续农业的重要生物资源。微生物菌剂作为一种新型肥料,通过微生物生命活动来改善烟株生长环境,在烤烟种植过程中具有巨大潜力[15][16]。目前关于利用光合细菌、微藻作为微生物菌肥来作用于促进烤烟生长发育和抗逆性提升的相关研究鲜有报道。本研究选取光合细菌和小球藻作为试验材料,采用单因素试验,研究不同浓度的光合细菌对烤烟生长发育和生理特性的影响,根据试验地烤烟生长情况筛选出适宜的微生物菌肥及施用浓度,以期促进烤烟的生长发育,提升抗逆性及烟叶品质,同时为相关研究提供理论基础和数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. 试验地概况

本试验于2025年在贵州省毕节市威宁县黑石头镇烟叶科技园进行,供试烟草品种为云烟87,于4月10日进行移栽,9月21日采收结束。试验田地势平坦,前茬作物为玉米,试验田有机质含量 $27.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $1.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷为 $0.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $14.38\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $55.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $36.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $121.57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,氯离子 $4.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 5.78。基肥为烟草专用肥N:P:K(9:13:24)42 kg/亩,提苗肥N:P:K(15:8:7)3 kg/亩,追肥为N:K(13:26)22 kg/亩。

2.2. 试验材料

供试烤烟品种为云烟87,由贵州省烟草公司毕节市公司提供。光合细菌菌剂购自盐城百诺生物科技有限公司,有效活菌数 $\geq 1\times 10^8\text{ cfu}/\text{mL}$ 。小球藻选用蛋白核小球藻,使用BG11培养基培养7 d。

2.3. 试验设计

本试验设7个处理,ck:喷施清水;g1:1:500喷施光合细菌;g2:1:300喷施光合细菌;g3:1:100喷施光合细菌;x1:1:50喷施小球藻;x2:1:100喷施小球藻;x3:1:150喷施小球藻,各处理仅调整叶面喷施菌肥及浓度,其他各指标均保持一致,试验设计见表1。试验为大田小区试验,区内行距1.2 m,株距0.6 m,小区采用随机区组排列,每小区60株烟。不同菌剂在烤烟移栽后第35 d、55 d进行喷施处理,以叶面均匀喷施且无溶液滴落为宜。期间按当地优质烤烟规范化栽培管理方式进行。于移栽后65 d取样测定。

Table 1. Experimental design

表 1. 试验设计

处理方法	方法
ck	清水
g1	光合细菌 1:500
g2	光合细菌 1:300
g3	光合细菌 1:100
x1	小球藻 1:50
x2	小球藻 1:100
x3	小球藻 1:150

2.4. 检测指标及方法

2.4.1. 农艺性状的测定

烤烟农艺性状的测定参考YC/T 142-2010《烟草农艺性状调查测量方法》[17]。

2.4.2. 叶片含水量的测定

烤烟叶片含水量的测定参考 YC/T 31-1996《烟草及烟草制品 试样的制备和水分的测定 - 烘箱法》[18]。

2.4.3. 根系活力测定

采用氯化三苯基四氮唑法测定根系活力[19]。

2.4.4. 抗氧化酶活性与丙二醛含量测定

采用北京索莱宝科技有限公司生产的检测试剂盒测定过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量。

2.5. 评价方法

选定农艺性状、叶片含水量、根系活力、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、MDA 含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量等用作隶属函数分析的指标, 计算出每种成分相关指标的隶属函数值[20], 然后计算出每种成分和综合质量的平均隶属函数值, 其数值越大说明该处理下烟叶的综合评分越好。不同处理下获得的烟叶相关生理指标进行综合评价的计算公式如下。

$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, X_i = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中: X_i 为某处理下烤后烟叶 i 指标的测定值; X_{\max} 为所有处理中烟叶 i 指标最大值; X_{\min} 为所有处理中烟叶指标 i 指标最小值。

2.6. 统计分析

采用 Excel 2021 进行数据处理、绘图, SPSS 27.0 进行显著性分析。

3. 结果与分析

3.1. 各处理对烤烟农艺性状的影响

由表 2 可知, 各处理茎围依次为 $g2 > x1 = x2 > x3 > g3 > g1 > ck$, 其中 $g2$ 处理与 ck 处理在茎围上存在显著差异, 且 $g2$ 处理相较于 ck 处理提升了 24.96%。各处理茎高依次为 $g2 > g1 > g3 > x2 > x1 > x3 > ck$, 其中 $g1$ 、 $g2$ 和 $g3$ 处理与 ck 处理存在显著差异, 且 $g1$ 、 $g2$ 和 $g3$ 处理相较于 ck 处理分别提升了 19.85%、24.26% 和 18.75%。各处理最大叶长依次为 $x3 > x2 > x1 > g2 > g1 > ck > g3$, 其中 $x3$ 处理与 ck 处理在最大叶长上存在显著差异, 且 $x3$ 处理相较于 ck 处理提升了 11.09%。各处理最大叶宽依次为 $g2 > x1 > x3 > x2 > g1 > g3 > ck$, 且各处理之间在最大叶宽上不存在显著差异。

Table 2. Effects of different treatments on agronomic traits of flue-cured tobacco

表 2. 不同处理对烤烟农艺性状的影响

处理	茎围(cm)	茎高(cm)	最大叶长(cm)	最大叶宽(cm)
ck	6.33 ± 0.37b	84.87 ± 4.24b	60.88 ± 5.29bc	23.47 ± 2.45a
g1	6.44 ± 0.18b	101.72 ± 1.94a	60.92 ± 1.14bc	23.94 ± 0.65a
g2	7.91 ± 0.32a	105.46 ± 3.79a	63.42 ± 2.03abc	25.77 ± 0.96a
g3	6.75 ± 0.11b	100.78 ± 1.15a	59.00 ± 0.66c	23.68 ± 0.38a
x1	6.80 ± 1.24b	91.66 ± 2.40b	64.96 ± 1.36ab	25.31 ± 0.71a
x2	6.80 ± 0.80b	93.81 ± 4.38b	66.40 ± 1.38ab	24.50 ± 0.63a
x3	6.77 ± 0.74b	89.77 ± 1.64b	67.63 ± 1.45a	24.59 ± 1.14a

3.2. 各处理对烤烟叶片含水量的影响

由图 1 可知, x3 处理的叶片含水量最高, 为 89.67%, g1 处理的叶片含水量最低, 为 85.64%; 各处理叶片含水量依次为 $x3 > x2 > g2 > g3$ 、 $ck > x1 > g1$, 且各处理之间在叶片含水率上不存在显著差异。

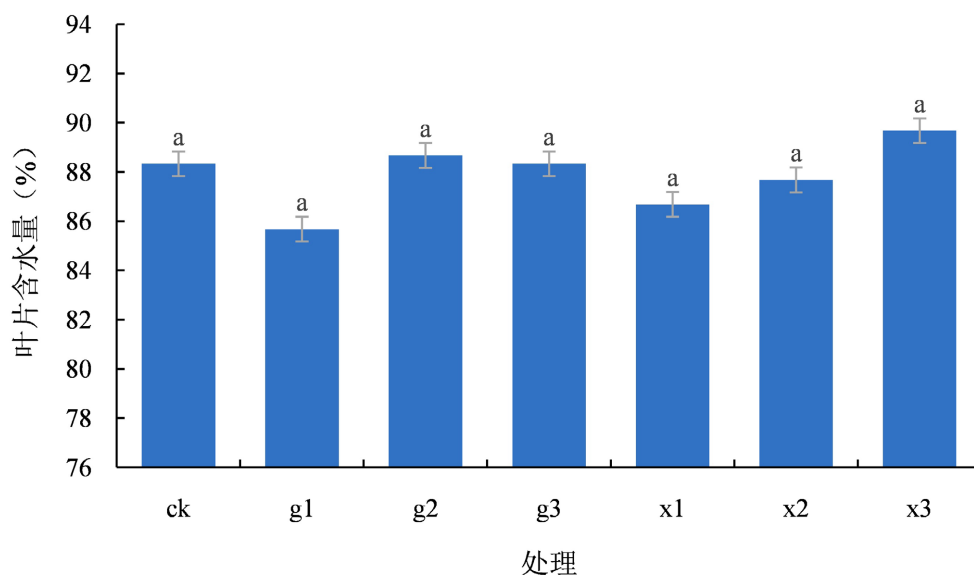


Figure 1. Effects of different treatments on water content of flue-cured tobacco leaves
图 1. 不同处理对烤烟叶片含水量的影响

3.3. 各处理对烤烟根系活力的影响

由图 2 可知, x3 处理的根系活力最高, 为 495.41 $\mu\text{g/g}$, 其次为 x2 处理, 为 487.75 $\mu\text{g/g}$; 各处理根系活力依次为 $x3 > x2 > x1 > g2 > g1 > g3 > ck$, 其中 x1、x2、x3 处理与 ck 处理在根系活力上存在显著差异, 且相较于 ck 处理分别提升了 4.00%、7.78%、9.54%。

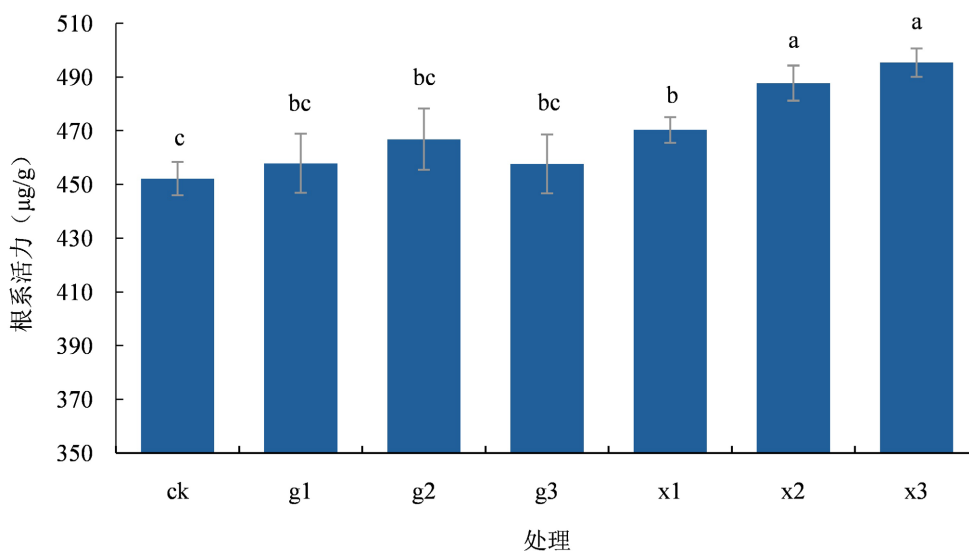


Figure 2. Effects of different treatments on root viability of flue-cured tobacco
图 2. 不同处理对烤烟根系活力的影响

3.4. 各处理对烤烟抗氧化酶活性的影响

由图3可知, x1处理的SOD活性最高, 为105.32 U/g, 其次为x2处理, 为101.32 U/g; 各处理SOD活性依次为x1 > x2 > g2 > g3 > g1 > x3 > ck, 各个处理的SOD活性较CK均有显著性提升, 其中x1处理的SOD活性较CK提升幅度最大, 提升了41.62%。由图4可知, x2处理的POD活性最高, 为2277.22 U/g, 其次为x3处理, 为2146.02 U/g; 各处理POD活性依次为x2 > x3 > g2 > x1 > g3 > g1 > ck, 其中x2处理与ck处理在POD活性上存在显著差异, 相较于ck处理提升了23.25%。由图5可知, x2处理的CAT活性最高, 为121 U/g, 其次为x1处理, 为118.63 U/g; 各处理CAT活性依次为x2 > x1 > x3 > g2 > g3 > g1 > ck, 各处理的CAT活性与CK相比均有显著差异, 其中x1、x2处理的CAT活性较ck处理提升幅度较大, 分别提升了59.9%、63.09%。

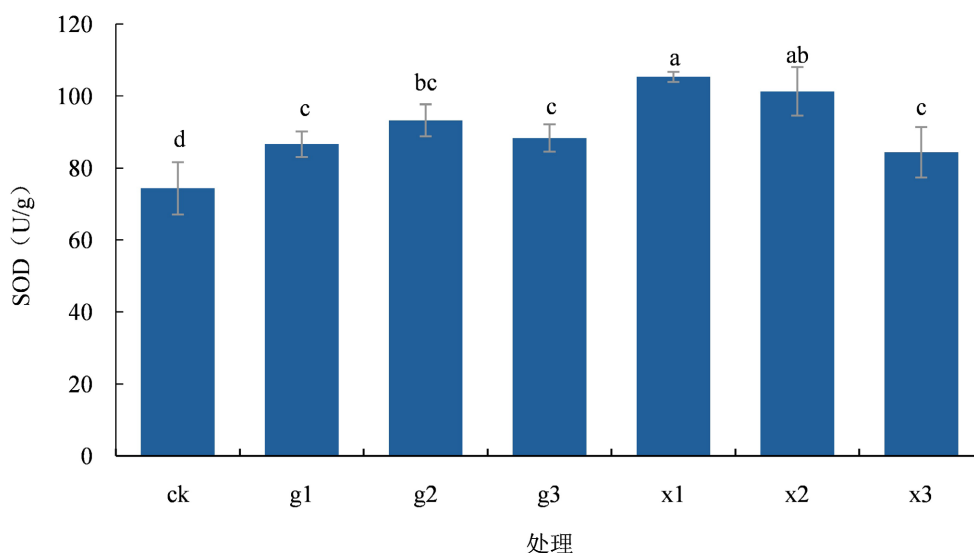


Figure 3. Effects of different treatments on SOD activity in flue-cured tobacco
图3. 不同处理对烤烟 SOD 活性的影响

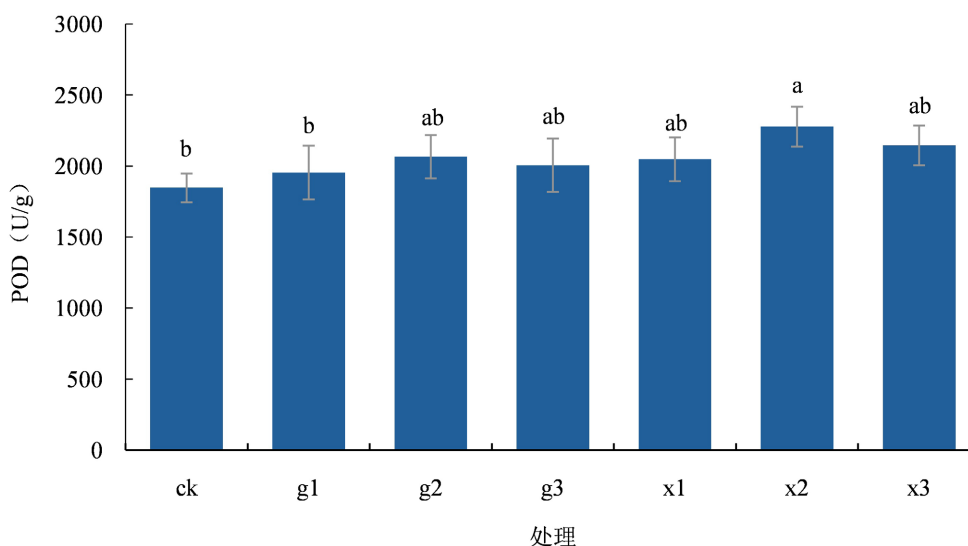


Figure 4. Effects of different treatments on POD activity of flue-cured tobacco
图4. 不同处理对烤烟 POD 活性的影响

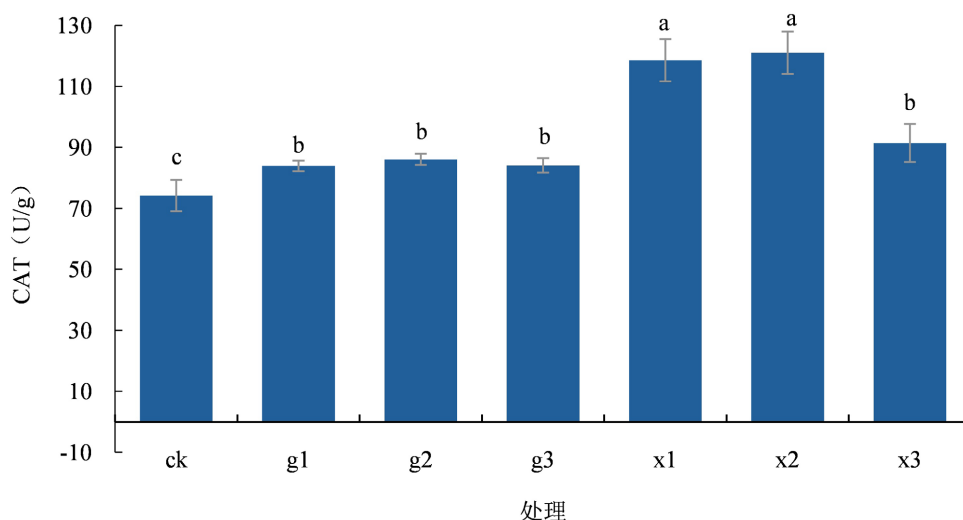


Figure 5. Effects of different treatments on CAT activity in flue-cured tobacco
图 5. 不同处理对烤烟 CAT 活性的影响

3.5. 各处理对烤烟 MDA 含量的影响

由图 6 可知, x3 处理的 MDA 含量最低, 为 19.44nmol/g, 其次为 x2 处理, 含量为 20.18 nmol/g; 各处理 MDA 含量依次为 ck > g1 > x1 > g3 > g2 > x2 > x3, 其中 x3 处理的 MDA 含量与 ck 处理的差异最为显著, 相较于 ck 处理降低了 23.67%。

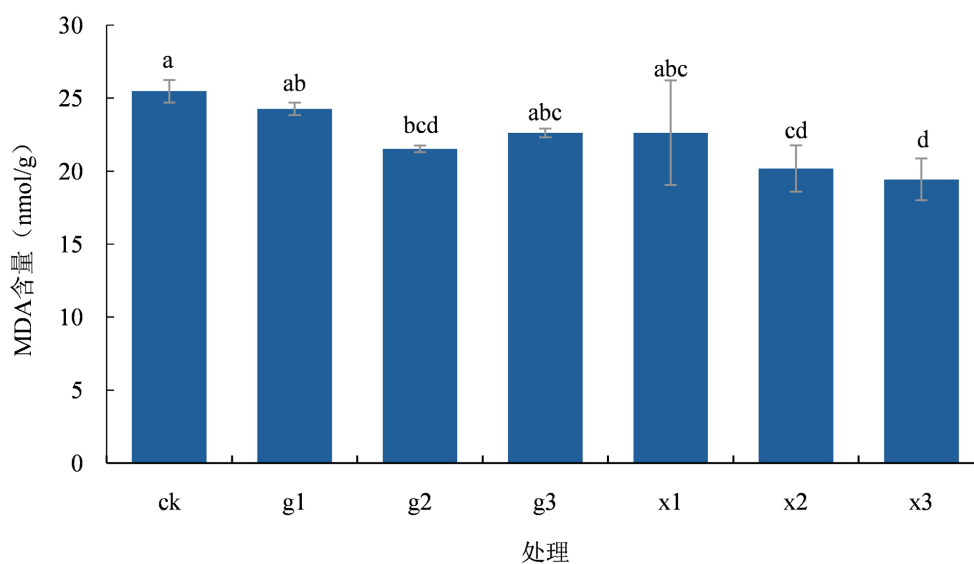


Figure 6. Effects of different treatments on MDA content in flue-cured tobacco
图 6. 不同处理对烤烟 MDA 含量的影响

3.6. 各处理对烤烟渗透调节物质的影响

由图 7 可知, x3 处理的可溶性蛋白含量最高, 为 20.26 $\mu\text{g/g}$, 其次为 g2 处理, 为 19.55 $\mu\text{g/g}$; 各处理可溶性蛋白含量依次为 x3 > g2 > g3 > x2 > g1 > x1 > ck, 各处理的可溶性蛋白含量较 CK 均有显著提升; 由图 8 可知, x3 处理的脯氨酸含量最高, 为 54.24 $\mu\text{g/g}$, 其次为 x2 处理, 为 49.79 $\mu\text{g/g}$; 各处理脯

氨酸含量依次为 $x3 > x2 > x1 > g2 > g3 > g1 > ck$ ，且各处理的脯氨酸含量较 CK 均有显著提升，其中 $x3$ 处理表现最为突出，其脯氨酸含量相较于 ck 处理提升了 80.54%。

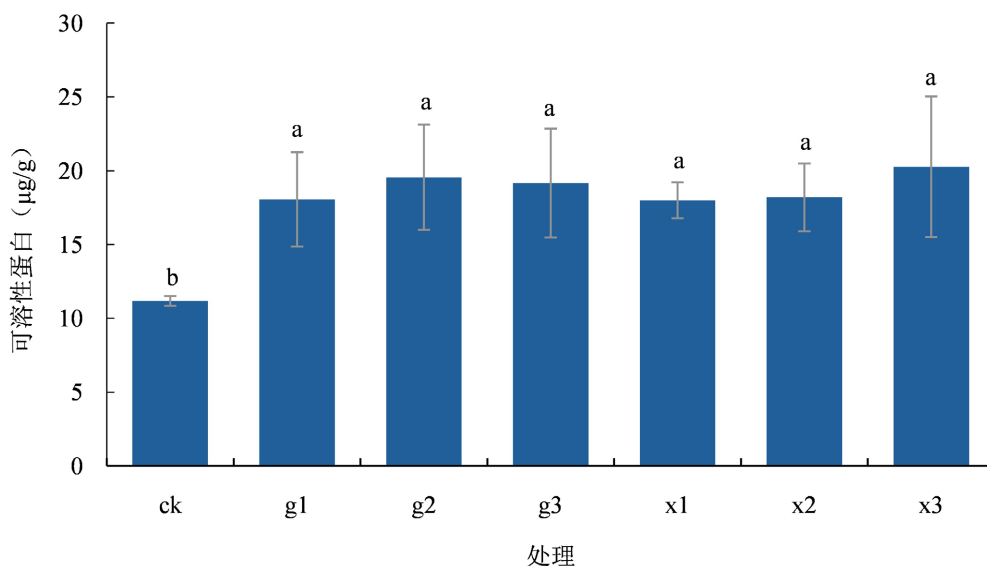


Figure 7. Effects of different treatments on soluble protein content in flue-cured tobacco

图 7. 不同处理对烤烟可溶性蛋白含量的影响

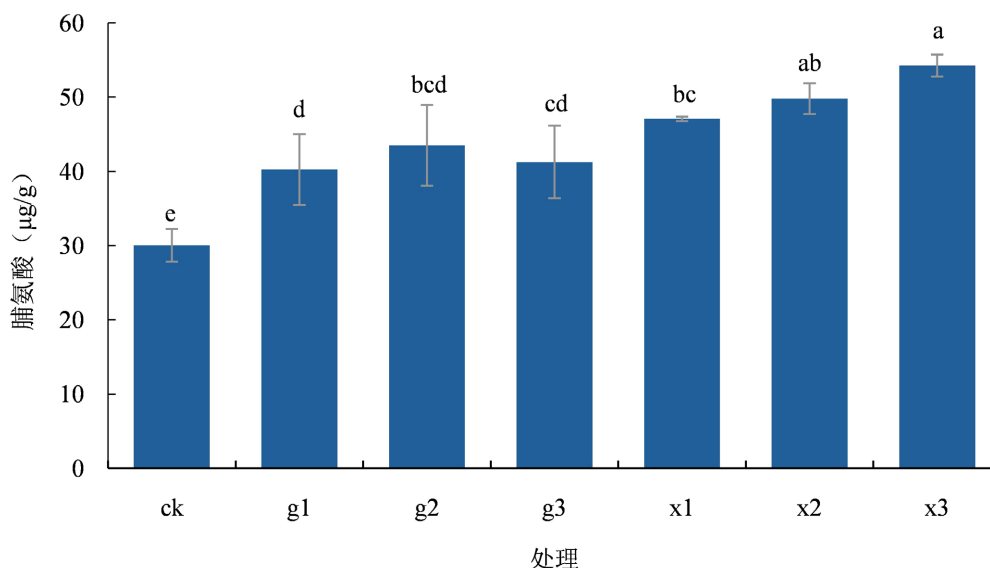


Figure 8. Effects of different treatments on proline content in flue-cured tobacco

图 8. 不同处理对烤烟脯氨酸含量的影响

3.7. 各处理对烤烟生理生化影响的隶属函数分析

对本试验中的 6 个处理的 12 个指标进行主成分分析，将累计方差贡献率 $\geq 80\%$ 且特征值 ≥ 1 作为判别依据，共提取了 3 个主成分，累计贡献率达 92.761%。运用公式进行隶属函数计算和综合评价排序。由表 3、表 4 可知，各处理的综合评价值排序为 $x3 > g2 > x2 > x1 > g3 > g1$ ，这表明小球藻 1:150 为本试验微生物菌剂叶面肥最佳选择。

Table 3. Principal component analysis of the effects of different treatments on various indexes of flue-cured tobacco
表 3. 不同处理对烤烟各指标影响的主成分分析

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
茎围	0.129	0.466	0.871
茎高	-0.746	0.363	0.428
最大叶长	0.943	-0.121	0.048
最大叶宽	0.387	0.018	0.853
叶片含水量	0.582	0.753	0.026
SOD	0.282	-0.767	0.522
POD	0.87	-0.14	0.015
CAT	0.571	-0.79	0.153
根系活力	0.966	0.046	-0.201
MDA	-0.931	-0.308	0.029
可溶性蛋白	0.351	0.921	-0.05
脯氨酸	0.967	0.015	-0.2
特征值	5.971	3.107	2.053
贡献率/%	49.759	25.891	17.111
累计贡献率/%	49.759	75.65	92.761

Table 4. Membership function analysis of the effects of different treatments on flue-cured tobacco indicators
表 4. 不同处理对烤烟各指标影响的隶属函数分析

处理	X1	X2	X3	U1	U2	U2	D	排序
g1	-1.314	-0.358	-0.671	0.000	-1.219	-0.171	0.372	6
g2	-0.136	1.006	1.722	-1.262	-2.975	-1.523	1.788	2
g3	-0.897	0.552	-0.572	-0.446	-2.391	-0.227	0.948	5
x1	0.161	-1.305	0.555	-1.580	0.000	-0.864	1.007	4
x2	0.960	-0.908	-0.060	-2.436	-0.511	-0.516	1.544	3
x3	1.226	1.014	-0.973	-2.722	-2.985	0.000	2.292	1
权重				W1 = 0.536	W2 = 0.279	W3 = 0.185		

4. 讨论

本研究旨在筛选适用于烤烟生产的微生物菌剂及其最佳施用浓度。研究以烤烟品种“云烟 87”为对象, 通过大田试验, 比较了 3 种不同稀释倍数的光合细菌(g1: 1:500, g2: 1:300, g3: 1:100)和 3 种不同稀释倍数的小球藻(x1:1:50, x2: 1:100, x3: 1:150)叶面喷施后对烤烟农艺性状、根系活力、叶片抗氧化系统(SOD, POD, CAT 活性及 MDA 含量)以及渗透调节物质(可溶性蛋白、脯氨酸)的影响, 并采用隶属函数分析法对各处理的综合效果进行了评价。

农艺性状是衡量烤烟营养生长状况和潜在产量的直观指标。本研究中, 光合细菌在促进茎围和茎高方面表现优于小球藻, 以 g2 (1:300)处理最为显著。这表明适宜浓度的光合细菌能够有效促进烟株的营养生长。光合细菌促进生长的机制可能与其固氮、解磷、释钾及分泌维生素、辅酶 Q 等生理活性物质的能

力有关, 这些物质可直接或间接调控烟株内源激素(如 IAA、GA)的合成与运输, 促进细胞伸长与分裂。根系是吸收水分和养分的重要器官, 根系活力直接反映烟株对养分吸收能力的强弱[21]。本研究中, 小球藻在最大叶长和根系活力方面更具优势, 尤其以 x3 (1:150)处理最为突出。这可能是因为小球藻富含多种植物激素(如 IAA、ABA、CTK)及信号分子(如多胺、一氧化氮前体), 这些物质通过叶面吸收后经韧皮部运输至根系, 激活根尖分生组织活性, 进而促进根系伸长与吸收功能。此外, 微藻分泌的胞外多糖也可能改善根际微环境, 间接增强根系活力。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物体内清除活性氧(ROS)的关键酶, 其活性高低反映了植物应对逆境胁迫的能力; 丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物, 其含量高低表征了细胞膜受损伤的程度[22][23]。本研究中, 所有菌剂处理均显著提升了 SOD 活性, 其中 x1 (小球藻 1:50)处理增幅最大, 为 41.62%, 但其对应的 MDA 含量却高于 g2 和 x3 处理。高浓度小球藻(1:50)虽然强烈诱导了 SOD 活性, 但仍未完全抑制 MDA 的积累, 可能原因包括: (1) 高浓度菌剂本身可能形成轻度胁迫(如渗透压、代谢负荷或酚类物质积累), 导致 ROS 生成速率超过清除能力[24]; (2) 高浓度菌剂可能诱导了程序性细胞死亡相关途径, 而非单纯的抗氧化响应[25]。这一现象表明, 微生物菌剂的促生效应并非浓度越高越好, 过度胁迫可能会导致代谢紊乱, 导致效果降低甚至产生负面影响。

可溶性蛋白和脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质, 它们不仅能维持细胞膨压, 还能直接参与清除 ROS 和稳定酶分子结构[26][27]。本研究中, 各处理的可溶性蛋白和脯氨酸含量较对照均有显著提升。脯氨酸的显著积累可能源于菌剂代谢产物(如硝酸盐、氨基酸衍生物、腐胺等)被叶片感知后, 通过 ABA 依赖或非依赖途径上调了脯氨酸合成关键酶的基因表达, 并抑制其降解酶活性[28]。在可溶性蛋白方面, 小球藻 1:150 处理达到最大值。这表明小球藻能够诱导烤烟积累渗透调节物质, 增强细胞的渗透调节能力。这种强烈的诱导效应可能源于小球藻代谢产物中的某些信号分子(如硝酸盐、氨基酸衍生物)被烟株叶片感知后, 触发了 ABA 依赖或非依赖的信号转导途径, 而上调了脯氨酸合成酶的基因表达。同时, 可溶性蛋白的积累也可能与菌剂促进了氮素同化过程有关。

本研究测定、分析了烤烟的农艺性状、根系活力、丙二醛含量及抗氧化酶活性等指标, 能够为相关研究提供理论基础, 但未进一步对烤烟品质指标(如烟碱、总糖、钾含量等)进行讨论, 这也是本研究的局限之处。

5. 结论

隶属函数分析结果表明, x3 处理(小球藻 1:150)综合得分最高, 说明较低浓度的小球藻在促进烤烟整体生理功能方面更具优势。

基金项目

贵州省烟草公司毕节市公司科技项目“基于肥料工艺优化的水肥耦合抗春旱技术研究与应用”(2024520500240067)。

参考文献

- [1] 刘光辉, 李迪秦, 陈一凡, 等. 烤烟生长发育特性及产质量对施肥技术的响应[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 2032-2038.
- [2] 赵玉芬, 尹应武. 我国肥料使用中存在的问题及对策[J]. 科学通报, 2015, 60(36): 3527-3534.
- [3] 王记祥, 姚孙晨. 光合细菌特性及其应用研究进展[J]. 南方农业, 2025, 19(17): 146-150+162.
- [4] 吴向华, 杨启银, 刘五星, 等. 光合细菌的研究进展及其应用[J]. 中国农业科技导报, 2004, 6(2): 35-38.
- [5] 韦梦洋, 罗贞宝, 贺帅, 等. 光合细菌与留叶数互作对烤烟生理代谢、化学品质及产量和质量的影响[J]. 作物杂

- 志, 2025(3): 210-217.
- [6] 王慧娟, 付小兰, 刘祥丽. 光合细菌在农业生产上的应用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(4): 26-27+42.
- [7] 邹声浩, 喻奇伟, 贺帅, 等. 外源小球藻对干旱胁迫下烤烟幼苗生理特性的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(6): 64-71.
- [8] 郝俊光, 潘喜芳, 莫维, 等. 小球藻作为食品利用的国外报道研究进展[J]. 中国酿造, 2022, 41(10): 18-24.
- [9] 元文霞, 毕影东, 樊超, 等. 我国生物肥料的发展现状与应用[J]. 农业科技通讯, 2022(12): 4-9.
- [10] 任超杰, 钟丹妮, 周民. 微藻在生物医学领域的研究进展[J]. 浙江大学学报(医学版), 2021, 50(2): 261-266.
- [11] 郭宇双, 邓文超, 许亚东, 等. 小球藻提高小麦磺胺甲恶唑抗性[J]. 应用生态学报, 2026, 37(4): 1269-1278.
- [12] 边建文, 崔岩, 杨宋琪, 等. 微藻生物肥料的农业应用研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 1-9.
- [13] Hussain, H.I., Kasinadhuni, N. and Arioli, T. (2021) The Effect of Seaweed Extract on Tomato Plant Growth, Productivity and Soil. *Journal of Applied Phycology*, **33**, 1305-1314. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02387-2>
- [14] Lu, Y. and Xu, J. (2015) Phytohormones in Microalgae: A New Opportunity for Microalgal Biotechnology? *Trends in Plant Science*, **20**, 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.01.006>
- [15] 杨丽平, 徐赛, 张锦韬, 等. 不同功能微生物菌剂对马龙烟区植烟土壤化学性质及烟叶品质的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(10): 64-70.
- [16] 陈大江, 杨青云, 朱宏强, 等. 不同肥料运筹模式对烤烟生长及产质量的影响[J]. 山西农业科学, 2024, 52(5): 107-113.
- [17] 国家烟草专卖局. YC/T 142-2010《烟草农艺性状调查测量方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [18] 国家烟草专卖局. YC/T 31-1996《烟草及烟草制品试样的制备和水分的测定-烘箱法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [19] 蒋伟峰, 金佳威, 常剑波, 等. 根施 γ -聚谷氨酸对烤烟根系活力及烟叶产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 56-64.
- [20] 陈明俊, 罗小波, 曹贞菊, 等. 基于主成分分析和隶属函数法对不同马铃薯酶促褐变评价[J]. 中国蔬菜, 2024(4): 85-92.
- [21] 张欢欢. 长汀县植烟土壤养分状况及不同培肥措施效应的研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [22] 杨春婷, 张永清, 董璐, 等. 不同基因型苦荞幼苗对低磷胁迫的响应[J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 859-867.
- [23] 熊格生. 营养液漂浮育苗移栽棉高产与高效栽培的生物学特性分析[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [24] Mittler, R. (2017) ROS Are Good. *Trends in Plant Science*, **22**, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- [25] Van Breusegem, F. and Dat, J.F. (2006) Reactive Oxygen Species in Plant Cell Death. *Plant Physiology*, **141**, 384-390. <https://doi.org/10.1104/pp.106.078295>
- [26] 陈观秀, 周鸿凯, 王盼盼, 等. 幼苗期不同水稻材料应答盐胁迫的生理差异分析[J]. 广西植物, 2023, 43(12): 2328-2337.
- [27] 易家宁. 干旱及盐胁迫对紫苏光合特性、生理及品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [28] Szabados, L. and Savouré, A. (2010) Proline: A Multifunctional Amino Acid. *Trends in Plant Science*, **15**, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>