



沼液还田对蒙古黄芪生长及质量的影响

陆国弟 侯嘉 杨扶德 杜

Effects of returning biogas slurry to fields on the growth and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*

LU Guodi, HOU Jia, YANG Fude, DU Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0619>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

补播乡土牧草对荒漠草地土壤持水性及植被生物量的影响

Effects of reseeded native forage species on soil water holding capacity and vegetation biomass in a desert steppe

草业科学. 2023, 40(9): 2247 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0890>

青海扁茎早熟禾形态特征与生物量对磷添加的响应

Effects of phosphorous application on the morphological characteristics and biomass yield of *Poa pratensis* var. *anceps* ‘Qinghai’

草业科学. 2022, 39(11): 2414 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0202>

10个毛苕子品种(品系)叶片的生理指标及生物量比较

Comparison analysis of leaf physiological indices and biomass among ten *Vicia villosa* varieties (strains)

草业科学. 2023, 40(6): 1600 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0435>

赣南稀土尾矿土壤不同施肥处理对饲料桑农艺性状、产量及品质的影响

Effects of different fertilization treatments on agronomic characters, yield, and quality of forage mulberry in the soil of rare earth tailings in southern Jiangxi

草业科学. 2024, 41(4): 942 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0176>

山豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响

Effects of *Lathyrus sativus* return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities

草业科学. 2024, 41(5): 1057 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0069>

施加生物炭基磷肥对西北针茅光合-荧光特性的影响

Effects of biochar-based phosphate fertilizer on photosynthetic and fluorescence characteristics of *Stipa krylovii*

草业科学. 2023, 40(10): 2493 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0845>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0619

陆国弟, 侯嘉, 杨扶德, 杜弢. 沼液还田对蒙古黄芪生长及质量的影响. 草业科学, 2025, 42(3): 719-732.

LU G D, HUO J, YANG F D, DU T. Effects of returning biogas slurry to fields on the growth and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*. Pratacultural Science, 2025, 42(3): 719-732.

沼液还田对蒙古黄芪生长及质量的影响

陆国弟, 侯 嘉, 杨扶德, 杜 弢

(甘肃中医药大学药学院, 甘肃 兰州 730101)

摘要: 沼液为厌氧发酵的优质有机肥, 可替代化肥或配施化肥施用于农田, 提高中草药产量及其品质。为探究沼液还田对蒙古黄芪 (*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*) 生长及质量的影响, 本研究以清水和化肥处理为对照, 研究不同施用方式下 (B₁: 喷洒, B₂: 追肥, B₃: 喷洒 + 追肥) 沼液浓度 (A₁: 100% 浓度沼液; A₂: 80% 浓度沼液; A₃: 50% 浓度沼液) 对整个生长期蒙古黄芪生理、生物量及有效成分含量的影响。结果显示: 1) 整个生长期 11 个处理的各指标基本呈先升后降趋势。2) 沼液单独喷洒, 以 80% 浓度沼液处理的各指标效果较佳, 且显著优于化肥处理 ($P < 0.05$)。3) 追肥后, 相比其他 10 个处理, 80% 浓度沼液追肥处理可显著增加成药期蒙古黄芪叶绿素含量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量, 增加地上和地下根的产量 ($P < 0.05$)。且蒙古黄芪根中有效成分毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷、毛蕊异黄酮、黄芪甲苷含量, 在 80% 浓度沼液追肥处理下分别显著高于化肥处理 87.09%、60.65%、52.17% 和 24.21%。综合评价得出 80% 浓度沼液追肥处理的效果较佳。上述研究表明: 适宜的沼液浓度及施用方式可增强黄芪抗逆性, 提高药材生物量, 改善黄芪质量。

关键词: 沼液; 蒙古黄芪; 生理指标; 生物量; 黄酮类成分; 皂苷类成分

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)03-0719-14

Effects of returning biogas slurry to fields on the growth and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*

LU Guodi, HOU Jia, YANG Fude, DU Tao

(School of Pharmacy, Gansu University of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou 730101, Gansu, China)

Abstract: A by-product of anaerobic fermentation, biogas slurry is a high-quality organic fertilizer that can be applied to farmland as a substitute for chemical fertilizers or in combination with chemical fertilizers to improve the yield and quality of crop plants. In this study, the effects of biogas slurry concentration (A₁: 100%, A₂: 80%, A₃: 50%) on the growth, physiological characteristics, yield, and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* were investigated by comparing the effects of BS at different application methods (B₁: spraying, B₂: topdressing, B₃: spraying + topdressing). Water and fertilizer treatments were used as controls. The results revealed that all assessed indicators of the *A. membranaceus* var. *mongholicus* plants subjected to the 11 different treatments showed differing trends, with most of the indices showing initial increases and subsequent declines during the entire growth cycle. In response to spraying biogas slurry alone, the 80% biogas slurry treatment was found to be the most effective, and was significantly superior to that of the chemical fertilizer treatment ($P < 0.05$). Following topdressing, compared with the other 10 treatments, the 80% biogas slurry

收稿日期: 2023-11-13 接受日期: 2024-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (8246075); 甘肃省科技厅自然科学基金项目 (22JR5RA592); 甘肃省教育厅青年博士基金项目 (2022QB-099); 国家中药材产业技术体系建设专项 (CARS-21)

第一作者: 陆国弟 (1985-), 女, 甘肃会宁人, 副教授, 博士, 研究方向为中药品质评价及中药材规范化栽培。E-mail: luguodi@126.com

通信作者: 杨扶德 (1972-), 男, 甘肃古浪人, 教授, 博士, 研究方向为中药品质评价及中药材规范化栽培。E-mail: gszfyd@163.com

topdressing treatment was found to promote significant increases in the chlorophyll contents, activities of antioxidant enzymes, and contents of osmoregulatory substances in *A. membranaceus* var. *mongholicus* seedlings when measured during the harvest period, as well as significant increases in the yields of the aboveground and belowground biomasses. Furthermore, in response to the 80% biogas slurry topdressing treatment, we detected significant increases of 87.09%, 60.65%, 52.17%, and 24.21% in the contents of calycosin-7-O- β -d-glycosides, ononin, calycosin, and astragaloside IV, respectively, compared with the fertilizer treatment ($P < 0.05$). The comprehensive evaluation concluded that 80% biogas slurry topdressing was more effective. These findings indicated that the appropriate concentration and application method can enhance the resistance of *A. membranaceus* var. *mongholicus*, promote increases in the biomass of medicinal components and improve the quality of *A. membranaceus* var. *mongholicus*.

Keywords: biogas slurry; *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*; physiological index; biomass; flavonoid component; saponin component

Corresponding author: YANG Fude E-mail: gszyfyd@163.com

中草药黄芪为豆科植物蒙古黄芪 (*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*) 或膜荚黄芪 (*A. membranaceus*) 的干燥根, 具有补气升阳、固表止汗、利水消肿等功效, 被广泛应用于医药、食品、保健等领域。目前商品主要为栽培的蒙古黄芪^[1], 但由于重茬连作现象突出, 导致土壤肥力不足, 若单纯过量施用化肥、农药, 会导致土壤酸化和硬化、病虫害滋生等问题, 严重影响黄芪品质^[2-5], 并造成各种环境问题, 影响中药材产业的可持续发展。用有机肥代替或减少化肥施用量是当前国家推进中药材产业可持续发展的战略需求。

沼液作为有机肥, 含多种促进植物生长的养分、生长激素及丰富的氨基酸。相比其他肥料, 其施用优势有: 可提供更多可利用的氮, 被作物直接吸收^[6], 促进其生长发育; 减少化肥投入, 降低用肥成本^[7], 并保护环境; 沼液资源丰富^[8], 使用简单方便, 成本低廉, 广泛应用于农作物及蔬菜种植方面。在中药材黄芪的相关研究中, 有学者对沼液施用效果进行了初探^[9-11], 但均未涉及品质方面的研究。对沼液施用影响黄芪产量和质量的盆栽试验进行初步探索发现, 适宜浓度的沼液能促进黄芪种子萌发, 提高种苗抗逆性, 促进其有效成分累积, 进而提高蒙古黄芪质量^[12]。为提高药材品质、减少化肥农药使用量, 本研究开展大田试验, 分析不同施肥方式下不同沼液浓度对蒙古黄芪苗的生长、抗逆生理指标及主要有效成分含量的影响, 以期为提高蒙古黄芪产量、改善质量, 推进沼液应用提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验种苗为甘肃省定西市渭源县莲峰镇杨家咀村药农自育一年生蒙古黄芪幼苗。沼液取自兰州市花庄镇的甘肃荷斯坦良种奶牛繁育中心以牛粪为发酵原料的正常产气的沼气池, pH 为 7.83, 有机质含量 $1.075 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 全氮含量 $1.036 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 全磷含量 $0.533 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 全钾含量 $1.186 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

大田试验于甘肃省定西市渭源县莲峰镇杨家咀村农户自家田进行, 采用完全随机区组设计, 设置 2 个因素: A 沼液浓度 (A_1 : 100% 浓度; A_2 : 80% 浓度沼液; A_3 : 50% 浓度沼液), B 施用方式 (B_1 : 喷洒; B_2 : 追肥; B_3 : 喷洒 + 追肥), 1 个常规化肥施肥 (CF), 1 个对照 (CK), 共 11 个处理, 如表 1 所列。每个处理重复 3 次 (按小区计), 共计 33 个小区, 每小区 6 m^2 , 2019 年 3 月初育苗, 2020 年 3 月 25 日移栽, 株距为 15 cm, 行距为 25 cm。移栽前所有处理基施聚失三铵复合肥料 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$) $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 沼液施用量为喷洒 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 追肥 $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 试验期间设计 2 次喷洒, 1 次追肥, 分别于 2020 年 6 月 12 日、7 月 12 日叶面喷施 2 次, 2020 年 8 月 12 日土壤施肥 1 次, 常规处理分别于 2020 年 6 月 12 日追肥 1 次聚合氨基酸复合肥料 (金典三安)、8 月 12 日追肥 1 次磷酸二铵, 其用量按照药农经验施肥, 均为 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。整个生长周期分别于 2020 年 6 月 27 日、7 月 28 日、8 月 27 日、9 月 26 日、10 月 24 日采样 5 次, 收集

表 1 大田试验设计

Table 1 Specific scheme of the field experiments performed in this study

处理 Treatment		沼液施用方式(B) Method of biogas slurry application		
		喷洒 Spraying (B ₁)	追肥 Topdressing (B ₂)	喷洒 + 追肥 Spraying + topdressing (B ₃)
沼液浓度 Biogas slurry concentrations	100% (A ₁)	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂	A ₁ B ₃
	80% (A ₂)	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂	A ₂ B ₃
	50% (A ₃)	A ₃ B ₁	A ₃ B ₂	A ₃ B ₃
清水对照 Water control		CK		
常规化肥 Conventional fertilization		CF		

黄芪地上部分及地下部分, 进行各指标测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生物量测定

用卷尺测定其株长、根长, 游标卡尺测定其茎直径、根粗。每个小区测定 10 株, 即每个处理测定 30 株。根样品用自来水清洗干净, 晾干表面水分, 称重, 即为鲜重; 于 40 ℃ 下烘干至恒重, 用万分之一天平称其干重, 每个处理重复 3 次。

1.3.2 生理指标测定

采集黄芪叶片, 进行生理指标测定。叶绿素含量采用丙酮-乙醇研磨法^[12]测定; 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)分别采用硝基蓝四唑光还原法^[12]、愈创木酚比色法^[12]、过氧化氢法^[12]和紫外分光光度法^[13]进行检测; 游离脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)和可溶性蛋白(SP)含量分别采用酸性茚三酮法、蒽醌比色法和考马斯亮蓝 G-250 比色法^[12]进行测定; 相对电解质(REL)采用电导率法^[14]进行测定。

1.3.3 黄酮类和皂苷类成分含量测定

色谱条件: 使用安捷伦 1260 HPLC 分析(图 1)。采用 Agilent ZORBAX SB-C18 (150 mm × 4.6 mm, 5 μm) 色谱柱, 分离黄酮类成分流动相为 0.2% 的甲酸和乙腈。梯度洗脱程序如下: 20%~40% 乙腈, 0~20 min; 40% 乙腈, 20~30 min; 40% 乙腈 30 min, 平衡 3 min。流速 0.5 mL·min⁻¹, 柱温 30 ℃, 进样量 10 μL, 检测波长 260 nm。分离皂苷类成分由水和乙腈组成, 梯度洗脱程序如下: 5%~13% 乙腈, 0~5 min; 13%~21% 乙腈, 5~10 min; 21%~37% 乙腈, 10~23 min; 37%~53% 乙腈, 23~37 min; 53%~

69% 乙腈, 33~43 min; 69%~100% 乙腈, 43~45 min。平衡 3 min, 流速 1 mL·min⁻¹, 柱温 30 ℃, 进样量 10 μL, 雾化温度 30 ℃, 漂移管温度 105 ℃, 载气流速 2.5 L·min⁻¹。

对照品样品制备: 精密称取对照品毛蕊异黄酮葡萄糖苷(CG)、毛蕊异黄酮(CA)、芒柄花苷(ON)、芒柄花素(FOR)、黄芪甲苷(AS-IV)、黄芪皂苷Ⅲ(AS-Ⅲ)、黄芪皂苷Ⅱ(AS-Ⅱ)各 3.90、2.50、0.40、2.70、10.20、1.40、4.20 mg, 分别置于 2 mL 容量瓶, 加甲醇定容至刻度, 摇匀, 配制成 7 个对照品贮备液。4 ℃ 保存备用。

供试样品制备: 不同采收期的各处理蒙古黄芪药材, 粉碎过 0.25 mm 筛, 精密称定约 2.0 g, 置 250 mL 圆底烧瓶中, 加入 100% 甲醇 50 mL, 回流提取 60 min, 过滤, 滤渣再加入 100% 甲醇 50 mL, 回流提取 60 min, 过滤, 合并滤液, 减压回收, 残渣加 10 mL 水复溶, 水饱和正丁醇 40 mL 萃取两次, 合并正丁醇萃取液, 用氨水 40 mL 萃取正丁醇部位两次, 弃去氨水部位, 减压回收正丁醇部位, 残渣加色谱甲醇溶解, 并定容到 5 mL 容量瓶, 0.22 μm 滤膜滤过, 即得供试样品。

线性关系: 吸取配制好的一系列对照品溶液, 按照色谱条件进行测定, 分别记录对照溶液中对照品峰面积, 以峰面积对数值为纵坐标, 进样量对数值为横坐标, 进行线性回归, 得 7 种成分的回归方程、线性范围以及检测限和定量限(表 2)。7 种成分均在各自的浓度范围内线性良好。

方法学考察: 取 9 月 26 日采样的 A₂B₁ 样品, 考察方法的精密性、重复性、稳定性及加样回收是否良好, 制备供试品溶液, 根据色谱条件进样测定, 计

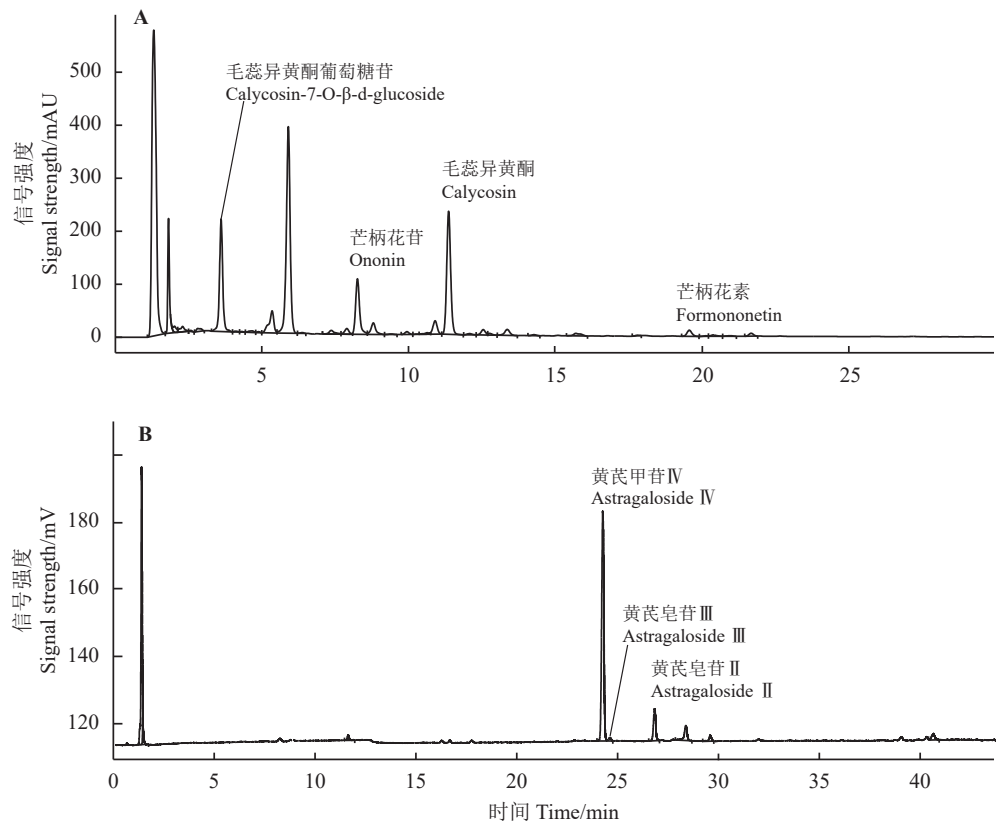


图 1 黄芪根中黄酮类 (A) 和三萜皂苷 (B) 成分色谱图

Figure 1 Typical chromatograms of triterpenoid saponins and flavonoids in the roots of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*

表 2 7 种成分线性方程

Table 2 Linearity correlations of seven analytes

成分 Constituent	线性方程 Regression equation	<i>r</i>	线性范围 Linear range/ μg	检测限(LOD) Limit of detection/ μg	定量限(LOQ) Limit of quantification/ μg
CG	$Y = 1\,730.9X + 41.727$	0.9996	0.005 85~5.850 00	0.001 95	0.005 85
CA	$Y = 4\,156X - 15.458$	1.0000	0.004 05~2.700 00	0.001 35	0.004 05
ON	$Y = 3\,165.6X + 4.070 7$	0.9999	0.006 25~3.750 00	0.002 70	0.006 25
FOR	$Y = 5\,991.2X - 0.146 4$	1.0000	0.004 00~0.600 00	0.002 00	0.004 00
AS-IV	$Y = 1.599 7X + 1.824 3$	0.999 5	0.510~51.000	0.255	0.510
AS-Ⅲ	$Y = 1.422 3X + 1.593 2$	0.999 6	0.175~7.000	0.140	0.175
AS-Ⅱ	$Y = 1.631 1X + 1.805 5$	0.999 5	0.420~21.000	0.315	0.420

CG, 黄酮葡萄糖苷; CA, 毛蕊异黄酮; ON, 芒柄花苷; FOR, 芒柄花素; AS-IV, 黄芪甲苷; AS-Ⅲ, 黄芪皂苷Ⅲ; AS-Ⅱ, 黄芪皂苷Ⅱ; 下同。
CG, calycosin-7-O-β-d-glucoside; CA, calycosin; ON, ononin; FOR, formononetin; AS-IV, astragaloside IV; AS-Ⅲ, astragaloside Ⅲ; AS-Ⅱ, astragaloside Ⅱ. This is applicable for the following figures and tables as well.

算 7 种成分含量。分别进行 1 d 内连续进样 5 次的精密度实验、3 份样品的重复性实验,并在 1 d 内进行间隔进样 (0、1、4、8、12 h) 的稳定性实验及 7 种成分的加样回收实验。连续及重复进样的 7 种成分含量相对标准偏差 (RSD) 值均小于 2.87%; 在 1、4、8、12 h 内其含量 RSD 值均小于 2.88%; 7 种成分的加样回收率在 96.47%~99.52%, RSD 值均小于 1.29%, 表明所用仪器精密度良好, 测试样品重复性

较好, 供试品在 12 h 内稳定, 且建立的方法具良好的回收率。

含量测定: 精密吸取不同采收期各处理的蒙古黄芪样品供试品溶液 10 μ L, 注入液相色谱仪进行测定, 计算 7 种成分的含量。

1.4 数据处理

使用 Excel 2007 整理数据, 用 Origin 9.1 软件制图, 应用 SPSS 22.0 统计分析软件对各指标进行 Duncan 新复极差法进行显著性检验 ($P < 0.05$); 并对成药期所测指标数据进行主成分分析, 根据提取因子的方差累积贡献率 ($\geq 80\%$ 以上), 确定蒙古黄芪的生长性状及质量情况, 评价施用沼液的最佳浓度及配施方式。

2 结果与分析

2.1 沼液施用对蒙古黄芪生物量的影响

整个生长周期, 11 个处理组的蒙古黄芪株高和茎直径基本呈现先升后降趋势, 即 6 月—8 月呈上升趋势, 8 月—10 月呈下降趋势 (图 2)。各处理的根干重、根长和根粗均在 6 月—9 月迅速上升, 9 月—10 月趋于平缓 (图 3)。

沼液喷洒处理后, 7 月 28 日数据显示 (图 2、3), 80% 沼液处理显著 (A_2B_1) 促进了株高、茎直径和根长的增加, 分别显著高于 CF 处理 10.68%、10.92% 和 9.42% ($P < 0.05$), 高于 CK 处理 10.69%、8.27% 和 23.66% ($P < 0.05$)。100% 沼液处理 (A_1B_3) 的根干重和根粗分别高出 CF 处理 15.49% 和 12.34% ($P < 0.05$),

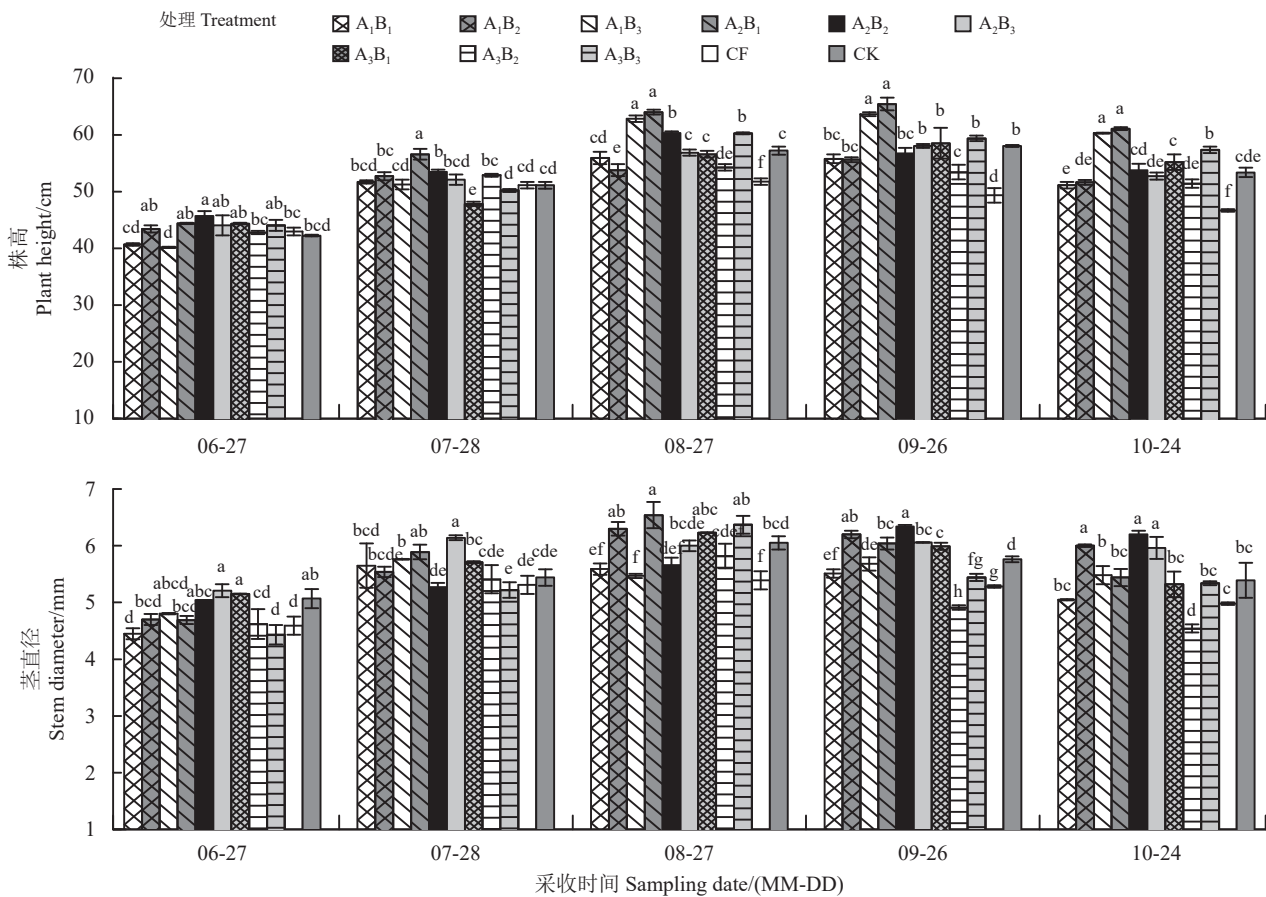


图 2 不同采收期各处理蒙古黄芪地上生物量

Figure 2 Comparison of the aboveground biomass in different treatment samples of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* during different periods of growth

A_1B_1 、 A_1B_2 、 A_1B_3 、 A_2B_2 、 A_2B_3 、 A_3B_1 、 A_3B_2 、 A_3B_3 、CF、CK 详细信息参考表 1; 不同小写字母表示同一采样时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

The code name details of A_1B_1 , A_1B_2 , A_1B_3 , A_2B_2 , A_2B_3 , A_3B_1 , A_3B_2 , A_3B_3 , CF, CK refer to Table 1. Different lowercase letters for the same sampling dates indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level. This is applicable for the following figures as well.

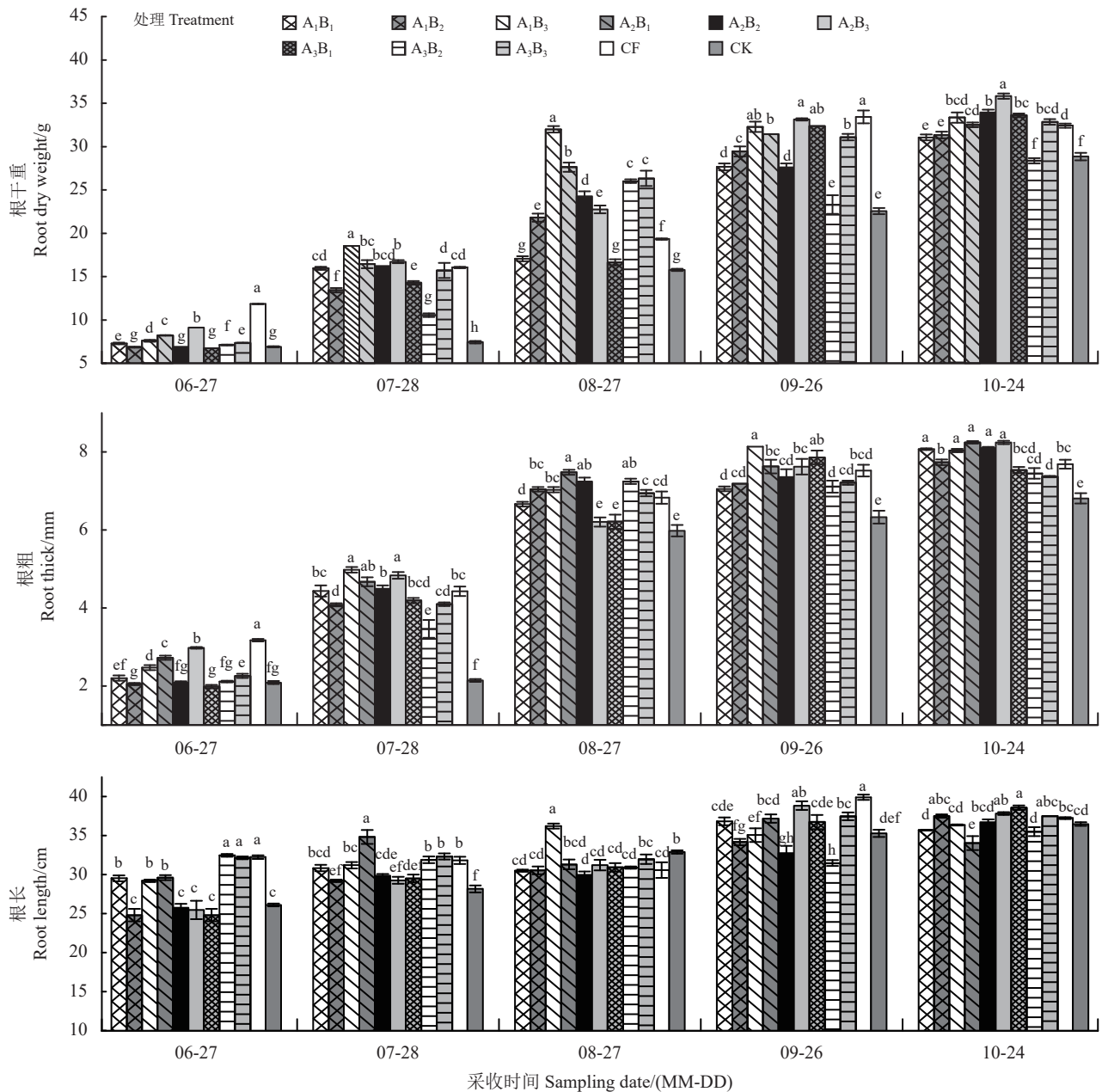


图 3 不同采收期各处理蒙古黄芪地下生物量

Figure 3 Comparison of the belowground biomass in different treatment samples of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* during different periods of growth

高出 CK 处理 149.11% 和 132.19% ($P < 0.05$)。

追肥处理后, 成药期数据显示 (10 月 24 日), 80% 沼液追肥处理 (A₂B₂) 可获得最高的茎直径 (6.20 mm), 显著高于 CF 处理 24.50%。80% 沼液配施处理 (A₂B₃) 获得最高的根粗和根干重, 分别为 8.25 mm、35.83 g, 其次为 A₂B₂ 处理, 分别为 8.10 mm、33.94 g。与 CF 处理相比, A₂B₃、A₂B₂ 处理的根粗分别显著升高 7.31%、5.41% ($P < 0.05$), 根干重分别显著升高 10.49%、4.66% ($P < 0.05$)。50% 沼液追

肥处理 (A₃B₂) 的茎直径、根干重值最低, 分别为 4.54 mm、28.37 g。

2.2 沼液施用对蒙古黄芪生理特性的影响

整个生长周期, 11 个处理组的蒙古黄芪叶绿素含量、抗氧化酶活性及渗透调节物质 SP、REL 含量基本呈现先升后降趋势, SS 呈一直上升趋势, Pro 呈先降后升趋势 (图 4、5、6)。

沼液喷洒处理后, 7 月 28 日数据显示, 80% 沼液处理 (A₂B₃) 的叶绿素含量 (Chla、Chlb、Chla +

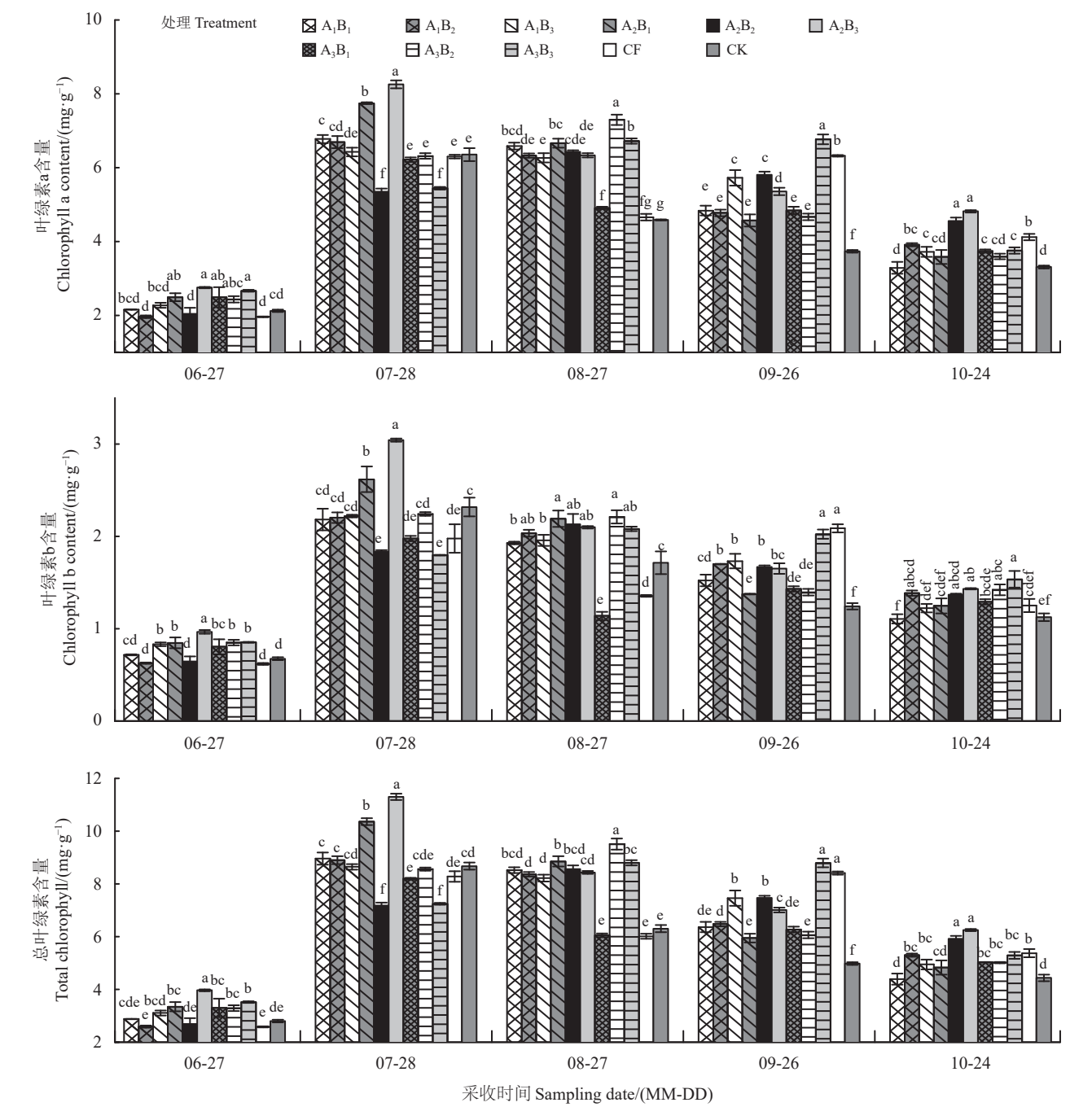


图 4 不同采收期各处理的叶绿素含量

Figure 4 Comparison of the chlorophyll contents in different treatment samples of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* during different periods of growth

Chlb)、抗氧化酶活性 (SOD、CAT、APX)、渗透调节物质 (Pro、SS) 含量及 A₂B₁ 处理的 SP 含量较高, 分别显著高于 CF 处理 30.98%、53.89%、36.45%、15.49%、61.18%、129.99%、9.37%、44.48%、51.92% ($P < 0.05$)。

追肥后, 成药期数据显示 (10 月 24 日), A₂B₂ 处理的 Chla、Chla + Chlb 含量、POD、CAT 活性以及 A₂B₃ 处理的 SS 含量均分别显著高于 CF 处理 10.53%、

10.28%、9.99%、562.98%、21.84% ($P < 0.05$)。A₂B₁ 处理的 SOD 活性、Pro 含量以及 A₃B₃ 处理的 Chlb、SP 含量、APX 活性均显著高于 CF、CK 处理 ($P < 0.05$)。REL 以 A₂B₂ 处理最低, 显著低于 CF 处理 14.88% ($P < 0.05$)。

2.3 沼液施用对蒙古黄芪有效成分含量的影响

各处理的 CG、CA 和 ON 含量在整个生长阶段

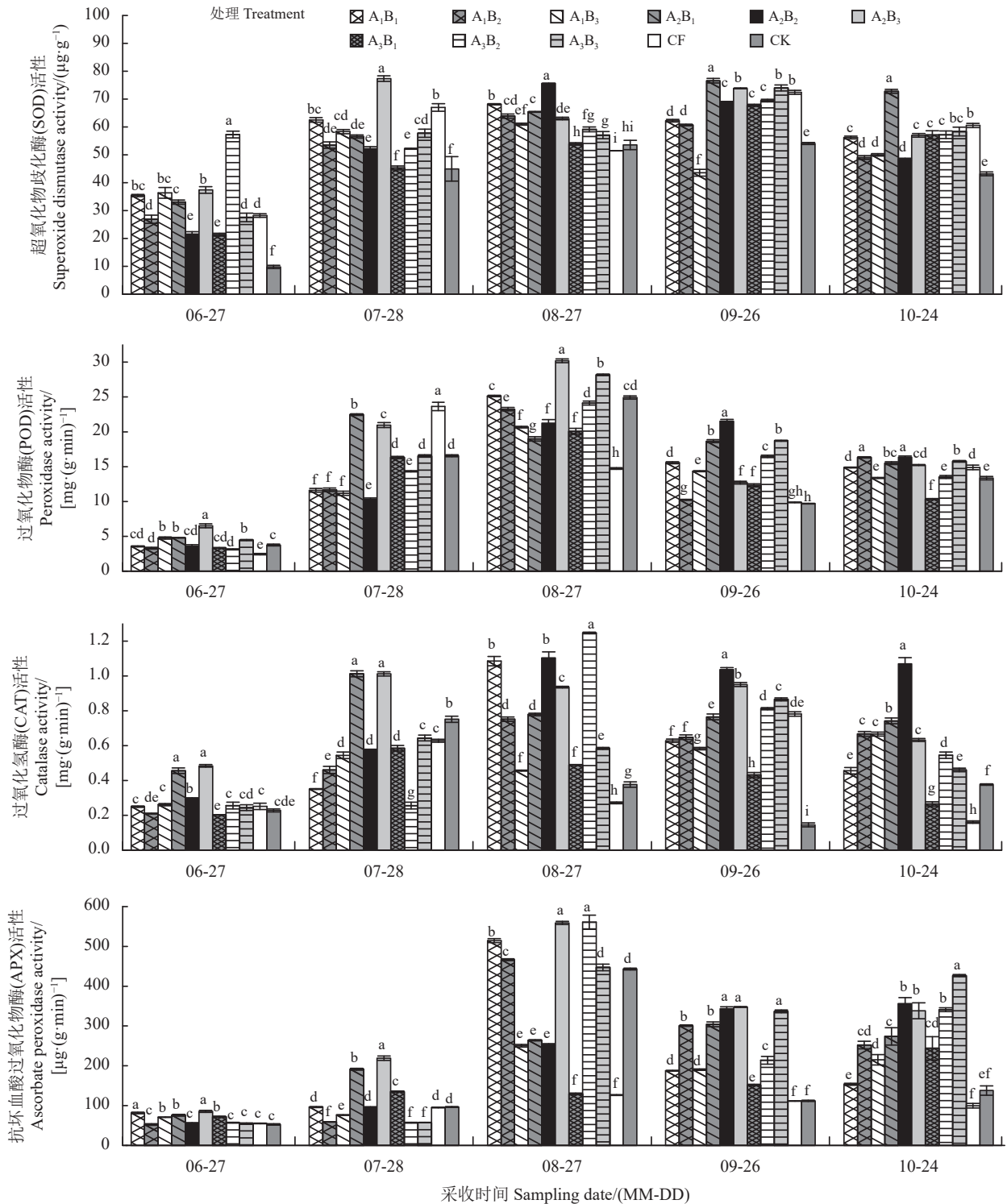


图 5 不同采收期各处理的蒙古黄芪抗氧化酶活性

Figure 5 Comparison of the activities of four antioxidant enzymes in the different treatment samples of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* during different periods of growth

均呈现先降(6月—8月)后升(8月—10月)的变化趋势。相反, FOR 含量呈先升(6月—8月)后降(8月—10月)趋势。11个处理的 AS-IV 含量变化大体分为3类:第1类,呈先降后升趋势,包括 A_1B_1 、

A_1B_3 和 CF 处理;第2类,呈先增后降再增趋势,包括 A_1B_2 、 A_3B_1 、 A_2B_2 和 A_2B_3 处理;第3类,7月—9月增加,9月—10月减少,包括 A_3B_3 、 A_2B_3 处理。大部分处理的 AS-Ⅱ和 AS-Ⅲ含量变化趋势相似,即

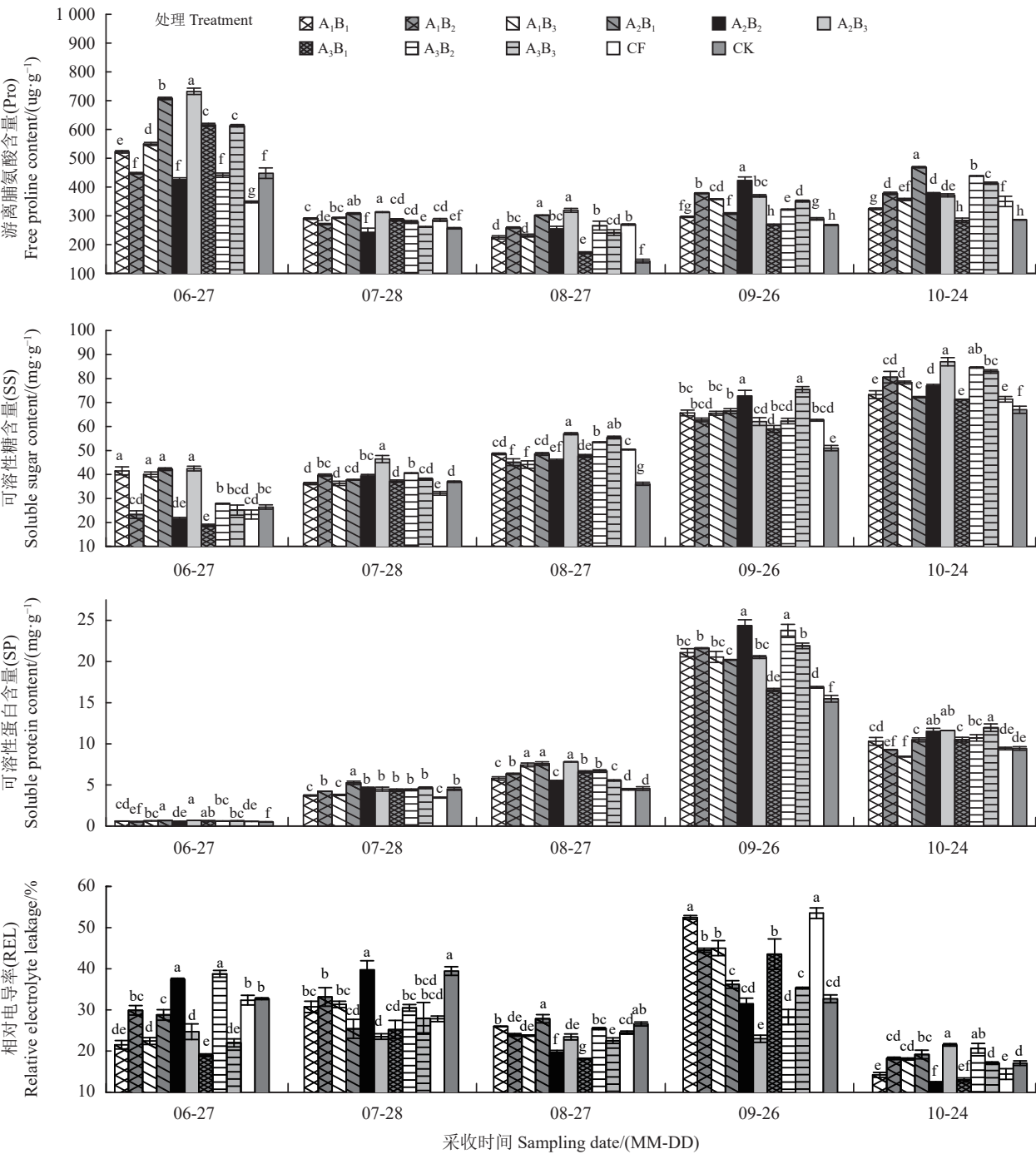


图 6 不同采收期各处理的蒙古黄芪渗透调节物质含量

Figure 6 Comparison of four osmoregulatory substances in the different treatment samples of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* during different periods of growth

为先降后升再降再升趋势。

沼液喷洒处理下 (7 月 28 日), CG、AS-IV、AS-Ⅲ 含量均以 80% 沼液处理 (A₂B₃) 较高, AS-Ⅱ 含量以 50% 沼液处理 (A₃B₃) 较高, 其中 80% 沼液处理 (A₂B₃) 的 CG、AS-IV、AS-Ⅲ 含量, 50% 沼液处理 (A₃B₃) 的 AS-Ⅱ 含量分别显著高出 CF 处理 19.15%、84.14%、63.41%、41.83% (表 3)。

追肥后, 成药期数据表明 (10 月 24 日), 沼液各处理的 4 种黄酮类成分含量与 CF 处理相比, 均明显升高 ($P < 0.05$)。A₂B₂、A₃B₃、A₁B₁ 处理的 AS-Ⅳ 含量较高, 均显著大于其他 8 个处理 ($P < 0.05$)。其中 A₂B₂ 处理的 CG、ON、CA、AS-Ⅳ 含量, A₁B₁ 处

表 3 不同采收期各处理蒙古黄芪黄酮类和皂苷类成分含量
Table 3 The contents of flavonoids and astragalus saponins in the different treatment samples of *Astragalus mongholicus* during different periods of growth

采收期 Sampling period/ (MM-DD)	处理 Treatment	毛蕊异黄酮 葡萄糖苷 CG/ (mg·g ⁻¹)	毛蕊异黄酮 CA/ (mg·g ⁻¹)	黄芪甲苷 AS-IV/ (mg·g ⁻¹)	芒柄花苷 ON/ (μg·g ⁻¹)	芒柄花素 FOR/ (μg·g ⁻¹)	黄芪皂苷Ⅲ AS-Ⅲ/ (μg·g ⁻¹)	黄芪皂苷Ⅱ AS-Ⅱ/ (μg·g ⁻¹)
06-27	A ₁ B ₁	0.93 ± 0.00a	0.33 ± 0.00a	0.85 ± 0.02c	22.29 ± 0.20a	2.37 ± 0.04a	6.36 ± 0.10e	4.97 ± 0.01j
	A ₁ B ₂	0.73 ± 0.00g	0.26 ± 0.00d	0.88 ± 0.01b	15.68 ± 0.61fg	0.93 ± 0.03e	7.05 ± 0.10d	6.62 ± 0.03h
	A ₁ B ₃	0.92 ± 0.00ab	0.31 ± 0.00b	0.87 ± 0.01c	20.54 ± 0.30b	2.18 ± 0.03b	7.65 ± 0.20c	5.74 ± 0.09i
	A ₂ B ₁	0.83 ± 0.01d	0.24 ± 0.00e	0.98 ± 0.00a	14.61 ± 0.20g	1.05 ± 0.03cd	6.27 ± 0.10ef	7.74 ± 0.12f
	A ₂ B ₂	0.76 ± 0.01e	0.27 ± 0.00d	0.90 ± 0.01bc	17.95 ± 0.51cd	0.99 ± 0.04de	8.89 ± 0.20b	12.23 ± 0.23c
	A ₂ B ₃	0.88 ± 0.00c	0.33 ± 0.00a	1.01 ± 0.01a	20.91 ± 0.22b	1.09 ± 0.02c	7.89 ± 0.10c	3.76 ± 0.09k
	A ₃ B ₁	0.72 ± 0.01fg	0.20 ± 0.00g	0.72 ± 0.00e	15.39 ± 0.20fg	0.96 ± 0.02de	14.71 ± 0.00a	10.24 ± 0.02e
	A ₃ B ₂	0.76 ± 0.00ef	0.27 ± 0.00d	0.87 ± 0.00bc	16.89 ± 0.21de	0.84 ± 0.03f	7.88 ± 0.10c	16.41 ± 0.07a
	A ₃ B ₃	0.74 ± 0.01efg	0.23 ± 0.00f	0.68 ± 0.01f	16.06 ± 0.21ef	0.94 ± 0.03e	5.91 ± 0.10g	7.04 ± 0.06g
	CF	0.90 ± 0.00bc	0.29 ± 0.00c	0.94 ± 0.01b	18.35 ± 0.25c	0.96 ± 0.02de	5.32 ± 0.00h	11.22 ± 0.50d
	CK	0.73 ± 0.00g	0.17 ± 0.00h	0.82 ± 0.01d	12.15 ± 0.22h	0.59 ± 0.03g	5.96 ± 0.10fg	12.89 ± 0.22b
07-28	A ₁ B ₁	0.32 ± 0.00ef	0.14 ± 0.00e	0.58 ± 0.01g	7.62 ± 0.21f	1.22 ± 0.01e	4.23 ± 0.12i	6.69 ± 0.03e
	A ₁ B ₂	0.31 ± 0.00fg	0.15 ± 0.00d	0.95 ± 0.01c	8.82 ± 0.21e	1.52 ± 0.02d	7.85 ± 0.10e	5.71 ± 0.04g
	A ₁ B ₃	0.34 ± 0.00e	0.15 ± 0.00d	0.60 ± 0.02g	8.36 ± 0.23ef	1.08 ± 0.03f	5.82 ± 0.10g	8.43 ± 0.06c
	A ₂ B ₁	0.49 ± 0.00b	0.23 ± 0.00b	1.43 ± 0.01b	12.71 ± 0.22b	1.58 ± 0.02bc	10.84 ± 0.10b	3.61 ± 0.05j
	A ₂ B ₂	0.31 ± 0.00fg	0.13 ± 0.00e	0.96 ± 0.01c	11.31 ± 0.53c	1.60 ± 0.02b	8.80 ± 0.00c	4.59 ± 0.04i
	A ₂ B ₃	0.56 ± 0.00a	0.23 ± 0.00b	1.51 ± 0.00a	12.66 ± 0.20b	1.60 ± 0.02b	11.39 ± 0.10a	8.14 ± 0.03d
	A ₃ B ₁	0.40 ± 0.00d	0.18 ± 0.00c	0.79 ± 0.00f	10.14 ± 0.22d	1.72 ± 0.03a	8.58 ± 0.10cd	5.94 ± 0.07f
	A ₃ B ₂	0.30 ± 0.00g	0.13 ± 0.00e	0.88 ± 0.00d	9.82 ± 0.22d	1.52 ± 0.01cd	11.06 ± 0.11a	8.47 ± 0.06c
	A ₃ B ₃	0.42 ± 0.00c	0.18 ± 0.00c	0.79 ± 0.01f	10.56 ± 0.24cd	1.74 ± 0.03a	8.51 ± 0.10d	13.02 ± 0.04a
	CF	0.47 ± 0.01b	0.23 ± 0.00ab	0.82 ± 0.01e	12.78 ± 0.27b	1.72 ± 0.03a	6.97 ± 0.10f	9.18 ± 0.06b
	CK	0.47 ± 0.01b	0.24 ± 0.00a	0.77 ± 0.01f	13.69 ± 0.00a	1.22 ± 0.02e	5.17 ± 0.10h	4.81 ± 0.08h
08-27	A ₁ B ₁	0.46 ± 0.01a	0.27 ± 0.00a	1.07 ± 0.02b	14.29 ± 0.33a	2.02 ± 0.01c	17.57 ± 0.30a	5.47 ± 0.04k
	A ₁ B ₂	0.40 ± 0.00cd	0.21 ± 0.00b	0.86 ± 0.01gh	11.23 ± 0.00b	2.01 ± 0.02c	16.42 ± 0.30b	18.81 ± 0.11a
	A ₁ B ₃	0.26 ± 0.00f	0.13 ± 0.00e	0.92 ± 0.01ef	7.14 ± 0.11g	1.04 ± 0.01e	12.26 ± 0.21e	10.02 ± 0.03e
	A ₂ B ₁	0.30 ± 0.01e	0.17 ± 0.00d	0.96 ± 0.00d	8.65 ± 0.23f	1.99 ± 0.05c	13.06 ± 0.10d	8.67 ± 0.07f
	A ₂ B ₂	0.45 ± 0.02ab	0.21 ± 0.00b	0.84 ± 0.00h	9.10 ± 0.02e	2.66 ± 0.016a	8.01 ± 0.10g	12.43 ± 0.22d
	A ₂ B ₃	0.42 ± 0.02bc	0.22 ± 0.01b	1.35 ± 0.02a	9.27 ± 0.10de	2.71 ± 0.19a	15.91 ± 0.00c	7.61 ± 0.03h
	A ₃ B ₁	0.37 ± 0.01d	0.19 ± 0.00c	0.90 ± 0.01f	9.94 ± 0.20c	1.71 ± 0.02d	8.30 ± 0.10g	6.13 ± 0.03j
	A ₃ B ₂	0.33 ± 0.00e	0.14 ± 0.00e	0.96 ± 0.00de	6.79 ± 0.00g	1.77 ± 0.04cd	6.16 ± 0.10h	8.31 ± 0.08g
	A ₃ B ₃	0.33 ± 0.00e	0.22 ± 0.00b	0.94 ± 0.00de	10.84 ± 0.00b	2.01 ± 0.02c	15.73 ± 0.10c	12.93 ± 0.06c
	CF	0.33 ± 0.01e	0.18 ± 0.00d	0.89 ± 0.00fg	8.50 ± 0.00f	1.85 ± 0.02cd	11.86 ± 0.00e	13.49 ± 0.09b
	CK	0.39 ± 0.01cd	0.20 ± 0.01c	1.01 ± 0.01c	9.57 ± 0.12cd	2.29 ± 0.02b	10.44 ± 0.13f	7.09 ± 0.06i

续表 3
Table 3 (Continued)

采收期 Sampling period/ (MM-DD)	处理 Treatment	毛蕊异黄酮 葡萄糖苷 CG/ (mg·g ⁻¹)	毛蕊异黄酮 CA/ (mg·g ⁻¹)	黄芪甲苷 AS-Ⅳ/ (mg·g ⁻¹)	芒柄花苷 ON/ (μg·g ⁻¹)	芒柄花素 FOR/ (μg·g ⁻¹)	黄芪皂苷Ⅲ AS-Ⅲ/ (μg·g ⁻¹)	黄芪皂苷Ⅱ AS-Ⅱ/ (μg·g ⁻¹)
09-26	A ₁ B ₁	0.43 ± 0.01d	0.25 ± 0.01c	1.05 ± 0.01d	13.29 ± 0.20de	1.29 ± 0.06bc	8.45 ± 0.11d	7.66 ± 0.09d
	A ₁ B ₂	0.42 ± 0.00d	0.25 ± 0.00cd	1.00 ± 0.01e	12.84 ± 0.00e	1.45 ± 0.03b	6.29 ± 0.11g	4.12 ± 0.06i
	A ₁ B ₃	0.37 ± 0.00e	0.22 ± 0.00de	0.88 ± 0.01f	10.70 ± 0.23f	1.03 ± 0.03d	8.29 ± 0.13d	4.65 ± 0.04h
	A ₂ B ₁	0.38 ± 0.00e	0.25 ± 0.00c	1.28 ± 0.01a	12.85 ± 0.10e	1.40 ± 0.02b	9.03 ± 0.00c	6.78 ± 0.09e
	A ₂ B ₂	0.48 ± 0.01c	0.29 ± 0.00b	1.11 ± 0.00c	16.21 ± 0.30b	1.31 ± 0.04bc	10.69 ± 0.00a	4.75 ± 0.12h
	A ₂ B ₃	0.49 ± 0.01c	0.22 ± 0.00e	1.00 ± 0.01e	11.62 ± 0.10f	0.94 ± 0.02d	7.23 ± 0.10e	9.07 ± 0.08c
	A ₃ B ₁	0.32 ± 0.01f	0.18 ± 0.01f	0.77 ± 0.02g	9.47 ± 0.41g	1.35 ± 0.08bc	6.59 ± 0.10f	5.13 ± 0.04g
	A ₃ B ₂	0.39 ± 0.01e	0.24 ± 0.01cd	1.00 ± 0.01e	12.73 ± 0.11e	1.46 ± 0.11b	8.22 ± 0.10d	10.92 ± 0.04b
	A ₃ B ₃	0.51 ± 0.01b	0.26 ± 0.01c	1.19 ± 0.03b	14.30 ± 0.00cd	1.44 ± 0.06b	9.62 ± 0.22b	13.66 ± 0.04a
	CF	0.60 ± 0.01a	0.36 ± 0.01a	0.89 ± 0.01f	17.65 ± 0.10a	1.21 ± 0.05c	7.24 ± 0.11e	5.90 ± 0.13f
10-24	CK	0.48 ± 0.01c	0.26 ± 0.01c	0.76 ± 0.00g	14.45 ± 0.11c	1.73 ± 0.06a	6.49 ± 0.13fg	4.36 ± 0.09i
	A ₁ B ₁	0.40 ± 0.01de	0.27 ± 0.00cd	1.18 ± 0.02a	14.26 ± 0.30c	0.61 ± 0.00a	12.20 ± 0.61a	9.67 ± 0.09d
	A ₁ B ₂	0.44 ± 0.02c	0.27 ± 0.05de	0.98 ± 0.00cd	12.49 ± 0.71e	0.46 ± 0.00f	7.21 ± 0.12f	5.35 ± 0.00i
	A ₁ B ₃	0.41 ± 0.00d	0.27 ± 0.04cd	0.83 ± 0.01e	14.09 ± 0.14cd	0.59 ± 0.01b	7.35 ± 0.00ef	7.68 ± 0.06f
	A ₂ B ₁	0.41 ± 0.01de	0.26 ± 0.00f	1.05 ± 0.00b	13.96 ± 0.32cd	0.56 ± 0.01cd	9.56 ± 0.10b	12.39 ± 0.06a
	A ₂ B ₂	0.58 ± 0.00a	0.35 ± 0.00a	1.18 ± 0.04a	18.54 ± 0.21a	0.58 ± 0.01bc	7.91 ± 0.10de	7.16 ± 0.07g
	A ₂ B ₃	0.50 ± 0.00b	0.28 ± 0.00c	0.86 ± 0.02e	14.14 ± 0.00cd	0.55 ± 0.01d	5.75 ± 0.00g	11.21 ± 0.03b
	A ₃ B ₁	0.38 ± 0.00ef	0.26 ± 0.00ef	0.86 ± 0.02e	13.31 ± 0.10d	0.49 ± 0.01e	8.10 ± 0.10d	10.28 ± 0.00c
	A ₃ B ₂	0.44 ± 0.01c	0.27 ± 0.00cde	1.03 ± 0.01bc	13.76 ± 0.20cd	0.56 ± 0.00cd	8.31 ± 0.10cd	9.83 ± 0.00d
	A ₃ B ₃	0.46 ± 0.00c	0.32 ± 0.01b	1.15 ± 0.01a	16.55 ± 0.10b	0.59 ± 0.00b	8.47 ± 0.10cd	5.88 ± 0.06h
	CF	0.31 ± 0.00g	0.23 ± 0.00g	0.95 ± 0.01d	11.54 ± 0.00f	0.44 ± 0.00g	8.69 ± 0.10c	8.70 ± 0.05e
	CK	0.38 ± 0.00f	0.23 ± 0.00g	1.01 ± 0.01cd	12.33 ± 0.10ef	0.44 ± 0.00fg	7.35 ± 0.00ef	4.32 ± 0.09j

理的 FOR、AS-Ⅲ 含量均分别显著高出 CF 处理 87.09%、60.65%、52.17%、24.21%、38.63%、40.39%。

同浓度沼液不同配比方式下(10月24日), 100%沼液喷洒、80%沼液追肥及50%沼液配施处理的综合指标均优于相应沼液浓度其他配施方式(表3)。

2.4 主成分分析

提取因子的单一成分和综合得分显示(表4), A₂B₂处理的综合得分最高,为2.80,其次为A₃B₃处理,得分2.39;CK处理得分最低,其次为CF处理。结果表明,80%沼液追肥或50%沼液喷洒+追肥可促进黄芪苗的生长及质量的提高,且显著优于CF

处理。

3 讨论

3.1 沼液施用对蒙古黄芪生物量的影响

沼液不同施用方式对蒙古黄芪生长所产生的影响不同,其生长形态能直观地反映这一结果。本研究表明,施用中等浓度的沼液(80%)喷洒或追肥均可促进黄芪植物茎的生长,并在收获期增加根的生物量,且效果优于常规化肥施肥处理。秦榕^[9]、刘国胜^[11]的研究结果也表明,中等浓度沼液叶面喷施可促进黄芪生长,提高药材产量。有机肥沼液相比化肥,能为植物提供更多可利用的氮和其他养分^[15]。

表 4 各主成分得分及综合得分
Table 4 Principal component and composite scores

处理 Treatment	主成分 Principal component			综合得分 Principal component
	1	2	3	
A ₁ B ₁	-0.11	-0.11	-1.49	-0.29
A ₁ B ₂	-1.82	1.40	0.01	-0.87
A ₁ B ₃	-2.19	0.92	0.40	-1.16
A ₂ B ₁	-0.66	0.90	-0.32	-0.27
A ₂ B ₂	3.45	2.59	-0.10	2.80
A ₂ B ₃	1.19	-0.09	2.22	1.04
A ₃ B ₁	-0.99	-0.68	1.01	-0.66
A ₃ B ₂	1.76	-1.68	-1.01	0.64
A ₃ B ₃	4.18	-1.35	-0.17	2.39
CF	-2.21	-1.89	0.56	-1.78
CK	-2.63	-0.01	-1.11	-1.85

植物吸收并利用这些元素,促进细胞伸长、分裂、光合化合物积累;同时刺激茎、根生长,增加根部养分积累,提高根部生物量。此外,沼液作为肥料的功效还可归因于碳的快速释放,可增加土壤中有机碳含量,改善土壤结构,促进植物生长^[16]。这一猜想还需要通过检测土壤质量指标来进一步验证。但试验中 50% 沼液喷洒或追肥对蒙古黄芪生长所产生的效果不佳,而配施效果较好,仅次于 80% 沼液追肥结果,说明沼液是一种速效肥,在植物不同生长阶段需及时补充适宜的营养,才能更好地促进植物生长,增加其产量,这与前期盆栽试验推测结果相一致^[12]。

3.2 沼液施用对蒙古黄芪生理特性的影响

蒙古黄芪对沼液施入产生了积极的响应。与清水对照相比,沼液处理显著提高了 SOD、CAT、POD 和 APX 的活性 ($P < 0.05$),这与前期盆栽研究结果相一致^[12]。本研究发现,追肥当月(8月),80% 沼液追肥处理显著提高了 SOD、POD、CAT 的活性,而 APX 活性较低,于 9 月 APX 活性达到最高。说明不同酶对相同浓度沼液表现出不同的敏感性,并在不同生长阶段被激活,通过整体协调发挥氧化还原平衡作用^[17]以保护植物,反过来又提高植物的抗逆性,促进植物生长,同时激活相关酶促进植物次生代谢产物的合成^[18],提升其质量。

Pro、SS 和 SP 是植物的重要渗透调节物质,有助于维持植物细胞的水合状态和生理活性^[19]。本研究表明,施用沼液可激活蒙古黄芪植物的渗透调节系统。蒙古黄芪生长中期(8月),相比 CK、CF 处理,80% 沼液配施处理基本上显著增加了 Pro、SS、SP 的含量 ($P < 0.05$),其 CAT、POD、SOD、APX 的活性及生物量也相应显著增加 ($P < 0.05$)。说明适宜的沼液施用模式可通过诱导渗透调节物质的积累来稳定细胞膜和蛋白质的结构,降低其细胞渗透势,增强植物的养分吸收、根系伸展和渗透势^[20],并与抗氧化酶系统起协同作用,增强植物对外部环境刺激的耐受性^[21],从而促进植物生长并增加根系生物量。

3.3 沼液施用对蒙古黄芪有效成分含量的影响

皂苷和黄酮类成分均是蒙古黄芪的质控指标^[22]。与清水对照、常规化肥施肥相比,所有沼液处理组均显著增加了成药期蒙古黄芪根中 4 种黄酮类成分含量。其中 80% 沼液追肥处理的 CG、CA、ON 含量以及 CAT、POD 和 APX 活性最高。CG 是黄芪中的抗氧化分子^[23],说明施用沼液引起蒙古黄芪植物的氧化应激反应,增加植物的 ROS 水平,过量产生的 ROS 会刺激植物合成黄酮类化合物以应对氧化胁迫,这与 Lyu 等^[24]的研究结果相一致。

皂苷是植物抵御外部压力的防御性化合物^[25]。在外部环境刺激下,皂苷的合成和积累会在植物各个细胞间隙中增加^[26]。本研究发现,沼液的施用会刺激蒙古黄芪根中皂苷成分的积累。与施用常规化肥相比,50% 沼液配施、80% 沼液追肥和 100% 沼液喷洒处理组均会增加成药期蒙古黄芪根中 AS-IV 的含量,其 CAT、APX 活性也增加。皂苷具有抗氧化潜力^[27],推测蒙古黄芪植物中皂苷成分的积累可能与施用沼液引发的氧化应激有关。

4 结论

综上所述,适宜的沼液浓度及施用方式应用于黄芪大田种植,在提高产量和品质方面,优于药农经验施肥(化肥),其最佳施肥方案是:低浓度沼液(50%)应在黄芪茎叶生长期多次喷洒,根生长期追肥;中浓度沼液(80%)应追肥。其中以 80% 沼液追肥效果较好,其次为 50% 喷洒 + 追施处理。该研究结果可为沼液应用于黄芪大田实践提供理论指导。

参考文献 References:

- [1] 杜国军, 秦雪梅, 李震宇, 何盼, 高凡茸, 李科, 周然. 蒙古黄芪主产区2种不同种植模式黄芪药材的质量比较. 中草药, 2013, 44(23): 3386-3393.
DU G J, QIN X M, LI Z Y, HE P, GAO F R, LI K, ZHOU R. Comparative study on quality of *Astragali* radix by two different planting patterns in major producing areas. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2013, 44(23): 3386-3393.
- [2] YAO R Y, HEINRICH M, WANG Z G, WECKERLE C S. Quality control of goji (fruits of *Lycium barbarum* L. and *L. chinense* Mill.): A value chain analysis perspective. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 224: 349-358.
- [3] HEINRICH M. Quality and safety of herbal medical products: Regulation and the need for quality assurance along the value chains. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 2015, 80(1): 62-66.
- [4] 叶迎, 王瑞海, 苗青, 许京, 吴东苑, 刘丽梅. 甘肃产1~2年生红芪和黄芪皂苷、多糖、黄酮类成分含量差异研究. 中草药, 2023, 54(14): 4649-4661.
YE Y, WANG R H, MIAO Q, XU J, WU D Y, LIU L M. Comparative study on statistical differences of saponins, polysaccharides and flavonoids contents of Gansu 1~2 years old *Hedysari* radix and *Astragali* radix. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(14): 4649-4661.
- [5] BI Y Q, BAO H Y, ZHANG C H, YAO R Y, LI M H. Quality control of radix *Astragali* (the root of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*) along its value chains. *Frontiers in Pharmacology*, 2020, 11: 562376.
- [6] GROSS T, BREITENMOSER L, KUMAR S, EHRENSPERGER A, WINTGENS T, HUGI C. Anaerobic digestion of biowaste in Indian municipalities: Effects on energy, fertilizers, water and the local environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 170: 105569.
- [7] TANG J, YIN J Z, DAVY A J, PAN F F, HAN X, HUANG S N, WU D F. Biogas slurry as an alternative to chemical fertilizer: Changes in soil properties and microbial communities of fluvo-aquic soil in the north China plain. *Sustainability*, 2022, 14(22): 15099.
- [8] 国家发展和改革委员会. 关于促进生物天然气产业化发展的指导意见. (2019-12-19)[2021-01-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201912/t20191219_1213770.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. A guidelines on promoting the industrial development of biological natural gas. (2019-12-19) [2021-01-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201912/t20191219_1213770.html?code=&state=123.
- [9] 秦榕. 黄芪喷施沼液增产效果试验. 现代农村科技, 2020, 11: 73.
QIN R. Experiment on the effect of spraying biogas slurry on the yield of *Astragalus membranaceus*. *Modern Rural Technology*, 2020, 11: 73.
- [10] 王艳霞, 刘国胜, 王永生, 戴红平. 沼液在黄芪上的喷施效果试验初报. 中国沼气, 2014, 32(2): 56-57.
WANG Y X, LIU G S, WANG Y S, DAI H P. Preliminary report of the effect of biogas slurry spraying on *Astragalus membranaceus*. *China Biogas*, 2014, 32(2): 56-57.
- [11] 刘国胜. 沼液对黄芪施用增产效果试验. 中国沼气, 2009, 27(5): 29-30.
LIU G S. Experiment on the effect of biogas slurry application on the increase of *Astragalus membranaceus* production. *China Biogas*, 2009, 27(5): 29-30.
- [12] 陆国弟, 杨扶德, 郑健, 王惠珍, 陈红刚, 杜弢. 沼液对蒙古黄芪抗逆生理指标及药用活性成分含量的影响. 西北植物学报, 2019, 39(12): 2235-2243.
LU G D, YANG F D, ZHENG J, WANG H Z, CHEN H G, DU T. Effect of applying biogas slurry on physiological characteristics and active component content of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(12): 2235-2243.
- [13] BEYER W F, FRIDOVICH I. Assaying for superoxide dismutase activity: Some large consequences of minor changes in conditions. *Analytical Biochemistry*, 1987, 161(2): 559-566.
- [14] 刘文静, 杨志青, 李钰莹, 高守舆, 张新荣. 盐胁迫对‘太行’白羊草生长与生理特性的影响. 草业科学, 2023, 40(10): 2651-2658.
LIU W J, YANG Z Q, LI Y Y, GAO S Y, ZHANG X R. Effects of salt stress on the growth of *Bothriochloa ischaemum* and its

- physiological response. *Pratacultural Science*, 2023, 40(10): 2651-2658.
- [15] MÖLLER K, MÜLLER T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 2012, 12(3): 242-257.
- [16] TERHOEVEN-URSELMANS T, SCHELLER E, RAUBUCH M, LUDWIG B, JOERGENSEN R G. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(3): 297-302.
- [17] NWUGO C C, HUERTA A J. The effect of silicon on the leaf proteome of rice (*Oryza sativa* L.) plants under cadmium stress. *Journal of Proteome Research*, 2011, 10(2): 518-528.
- [18] EL-BELTAGI H S, MOHAMED H I, SOFY M R. Role of ascorbic acid, glutathione and proline applied as singly or in sequence combination in improving chickpea plant through physiological change and antioxidant defense under different levels of irrigation intervals. *Molecules*, 2020, 25(7): 1702.
- [19] RU C, HU X T, CHEN D Y, WANG W, ZHEN J B. Photosynthetic, antioxidant activities, and osmoregulatory responses in winter wheat differ during the stress and recovery periods under heat, drought, and combined stress. *Plant Science*, 2022, 327: 111557.
- [20] KHEIRIZADEH AROUGH Y, RAOUF SEYED SHARIFI R, SEYED SHARIFI R. Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of *Triticale* under water-limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, 2016, 11(1): 167-177.
- [21] AHMED C B, ROUINA B B, SENSOY S, BOUKHRIS M, ABDALLAH F B. Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(2): 345-352.
- [22] LI M, HAN B, ZHAO H, XU C Y, XU D K, SIENIAWSKA E, LIN X M, KAI G Y. Biological active ingredients of *Astragali Radix* and its mechanisms in treating cardiovascular and cerebrovascular diseases. *Phytomedicine*, 2022, 98: 153918.
- [23] PAN H Y, LI X B, CHENG X W, WANG X Q, FANG C M, ZHOU T S, CHEN J K. Evidence of calycosin-7-O- β -D-glucoside's role as a major antioxidant molecule of *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao plants under freezing stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 109: 1-11.
- [24] LYU L J, CHEN X Y, LI H, HUANG J N, LIU Y P J, ZHAO A. Different adaptive patterns of wheat with different drought tolerance under drought stresses and rehydration revealed by integrated metabolomic and transcriptomic analysis. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1008624.
- [25] PAPADOPOULOU K, MELTON R E, LEGGETT M, DANIELS M J, OSBOURN A E. Compromised disease resistance in saponin-deficient plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(22): 12923-12928.
- [26] SZAKIEL A, PĄCZKOWSKI C, HENRY M. Influence of environmental abiotic factors on the content of saponins in plants. *Phytochemistry Reviews*, 2011, 10: 471-491.
- [27] WANG G Z, WANG J L, LIU W, NISAR M F, EL-ESAWI M A, WAN C P. Biological activities and chemistry of triterpene saponins from *Medicago* species: An update review. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 2021: 6617916.

(责任编辑 王芳)