网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.05.013

皮下埋植褪黑素对西门塔尔肉牛繁殖性能、血清激素、抗氧化和免疫指标的影响

赵乐愚[1,2],高志刚[1,2],谢占峰[3],吕世春[3],贾振伟[1,2]

(1 内蒙古民族大学 动物科技学院,内蒙古 通辽 028043;2 内蒙古自治区肉牛产业学院,内蒙古 通辽 028043;
3 内蒙古自治区 通辽市科尔沁区联蒙养殖专业合作社,内蒙古 通辽 028024)

[摘 要] 【目的】探究褪黑素(MT)埋植对西门塔尔肉牛繁殖性能、血清激素、抗氧化和免疫指标的影响。【方法】选择64头繁殖机能正常的母牛,随机分为4组,每组16头,采用CIDR+GnRH+PG+PG+GnRH方案进行同期排卵-定时授精处理,在各组母牛第1次注射GnRH的同时,分别颈部皮下埋植0(对照组)、60(1组)、120(2组)和180(3组)mg/头 MT,在第2次注射GnRH后8 h检测血清中MT、促卵泡素(FSH)、促黄体素(LH)、雌二醇(E_2)和抗氧化指标的水平,人工授精后14和30 d检测血清MT、干扰素-tau(IFNT)、孕酮(P_4)、抗氧化和免疫指标的水平,人工授精后45 d进行妊娠诊断,统计受胎率,母牛分娩后统计产犊率。【结果】①与对照组相比,皮下埋植MT未显著提高受胎率和产犊率($P>0.05$)。②与对照组相比,试验组母牛排卵前和妊娠早期血清生殖激素水平呈增加趋势,试验2组效果最好,其排卵前母牛血清MT、FSH、LH和E_2水平显著升高($P<0.05$),妊娠14和30 d试验2组母牛血清MT、P_4和IFNT水平显著升高($P<0.05$)。③与对照组相比,试验组母牛排卵前和妊娠早期血清抗氧化指标呈增加趋势,试验2组效果最好,其母牛血清总抗氧化能力(T-AOC)及超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化氢酶(CAT)活性显著升高($P<0.05$),而血清丙二醛(MDA)含量显著降低($P<0.05$)。④与对照组相比,试验组母牛妊娠早期血清免疫指标呈增加趋势,试验2组效果最好,其母牛血清免疫球蛋白G(IgG)、IgA和IgM水平显著升高($P<0.05$)。【结论】皮下埋植120 mg/头 MT能够提高西门塔尔肉牛母牛血清FSH、LH、E_2、P_4和IFNT含量,增强血清抗氧化和免疫功能,使受胎率升高25%。

[关键词] 褪黑素;西门塔尔肉牛;繁殖性能;血清激素

[中图分类号] S823.8+9 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0130-07

Effects of melatonin implantation on reproductive performance, serum hormone levels, antioxidative and immune indexes of Simmental cows

ZHAO Leyu[1,2], GAO Zhigang[1,2], XIE Zhanfeng[3], LÜ Shichun[3], JIA Zhenwei[1,2]

(1 *College of Animal Science and Technology, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia* 028043, *China*;
2 *Beef Cattle Industry School of Inner Mongolia Autonomous Region, Tongliao, Inner Mongolia* 028043, *China*;
3 *Inner Mongolia Autonomous Region Tongliao City Horqin District Lianmeng Breeding Professional Cooperatives, Tongliao, Inner Mongolia* 028024, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to explore the effects of melatonin (MT) implantation on the reproductive performance, serum hormones, and antioxidant indexes of Simmental cows. 【Method】 64 Simmental

[收稿日期] 2025-03-26 [修回日期] 2025-05-10
[基金项目] 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划(科技支撑东北振兴)项目(2022YFDZ0075);中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0080);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(GXKY23Z049)
[作者简介] 赵乐愚(1999—),男,内蒙古通辽人,在读硕士,主要从事家畜繁殖研究。E-mail:13171120925@163.com
[通信作者] 贾振伟(1974—),男,辽宁营口人,教授,博士,主要从事肉牛繁殖机能调控研究。E-mail:zhenwei1999@sina.com

cows with normal reproductive function were randomly divided into 4 groups, with 16 cows in each group. The CIDR+GnRH+PG+PG+GnRH protocol was adopted for synchronized ovulation and fixed-time insemination. At the time of the first GnRH injection, cows in each group were subcutaneously implanted in the neck with 0 mg (the control group), 60 mg (Group 1), 120 mg (Group 2), and 180 mg (Group 3) of MT. The serum levels of MT, follicle stimulating hormone (FSH), luteinizing hormone (LH), estradiol (E_2), and antioxidant indexes were detected 8 hours after the second GnRH injection. 14 and 30 days after artificial insemination, the serum levels of interferon tau (IFNT), progesterone (P_4), and antioxidant indexes were measured. Pregnancy diagnose was carried out 45 days after artificial insemination and the conception rate of cows was calculated, and calving rate was calculated after calving.【Result】The results showed that: ① Compared with the control group, subcutaneous implantation of melatonin (MT) did not significantly increase the conception rate and calving rate ($P>0.05$), but there was an increasing trend in the conception rate, with the highest conception rate observed in group 2. ② Compared with the control group, there was an increasing trend in the serum reproductive hormone levels of trial group cows both before ovulation and during the early stage of pregnancy. Group 2 exhibited the most favorable results, with significant increases in serum melatonin (MT), follicle-stimulating hormone (FSH), luteinizing hormone (LH), and estradiol (E_2) levels before ovulation ($P<0.05$). 14 and 30 days after artificial insemination, the levels of serum MT, progesterone (P_4), and interferon-tau (IFNT) in cows from Group 2 were also significantly elevated ($P<0.05$). ③ Compared with the control group, there was an increasing trend in the serum antioxidant indexes of trial group cows both before ovulation and during the early stage of pregnancy. The best results were observed in Group 2, with significant elevations in the serum total antioxidant capacity (T-AOC) and the activities of superoxide dismutase (SOD), glutathione peroxidase (GSH-Px), and catalase (CAT) in cows ($P<0.05$), and significant decrease in the serum malondialdehyde (MDA) content ($P<0.05$). ④ Compared with the control group, there was an increasing trend in the serum immune indexes of the trial group cows during the early stage of pregnancy. The best results were observed in Group 2, with significant elevations in the levels of serum immunoglobulin G (IgG), IgA, and IgM ($P<0.05$).【Conclusion】In summary, subcutaneous implantation of 120 mg MT can improve serum FSH, LH, E_2, P_4 and IFNT levels of Simmental beef cow, enhance serum antioxidant and immune function of Simmental beef cow, and increase conception rate by 25%.

Key words: melatonin; simmental beef cattle; reproductive performance; serum hormone

牛繁殖力是影响肉牛产业经济效益的重要因素，其中受胎率是母牛繁殖力中最重要的指标。研究证明，肉牛人工授精后卵母细胞能够维持较高的受精率，但受精后出现早期胚胎死亡现象，是影响母牛受胎率的重要因素之一[1]。研究表明，母畜卵泡发育与排卵期间机体会产生大量的活性氧（reactive oxygen species，ROS），其会破坏细胞膜脂质、损伤DNA，并会诱导卵泡颗粒细胞和卵母细胞凋亡，进而降低卵母细胞质量[2]。另外，研究认为，母畜妊娠早期，随着胚胎的发育，母体代谢加快，自由基的产生增加，过量的ROS易引发机体氧化应激，不仅抑制胚胎滋养层细胞的活力，诱导细胞凋亡，而且降低卵巢黄体细胞产生孕激素，不利于附植前胚胎的发育和附植[3-4]。这些研究结果说明，通过缓解排卵前和早期胚胎发育期间机体的氧化应激，增强卵母细胞质量和胚胎发育能力可能是提高母牛繁殖力的重要手段。

在哺乳动物中，褪黑素（melatonin，MT）是主要由松果体分泌的生殖激素，具有调节动物的生物节律、抗氧化、提高免疫机能及调控繁殖性能等多种生理功能，其抗氧化功能尤为显著[5]。研究表明，MT能够调控雌性动物卵泡发育和卵母细胞成熟，促进卵巢颗粒细胞增值、抑制细胞凋亡，并促进黄体分泌孕激素[6-8]。研究发现，皮下注射MT不仅能够显著提高自然发情和同期排卵定时输精奶牛的妊娠率[9]，也能提高供体奶牛可用胚胎数、胚胎质量和胚胎移植妊娠率，从而提高供体奶牛超数排卵效果[10]。这些研究结果说明，MT参与调控雌性动物卵母细胞成熟和早期胚胎发育。但是，目前关于皮下埋植MT对肉母牛受胎、血清繁殖激素、抗氧化和

免疫功能影响的研究甚少。因此,本试验探究了皮下埋植MT对同期发情定时输精西门塔尔肉母牛受胎率和产犊率、血清繁殖激素及抗氧化与免疫指标的影响,以期为生产上合理应用MT提高肉牛繁殖性能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验动物及饲养管理

试验在内蒙古自治区通辽市科尔沁区联蒙养殖专业合作社进行。选择64头体质量(641.27±32.56) kg、胎次相近(2~3胎)、膘情适中、繁殖性能良好的空怀西门塔尔母牛作为试验对象。试验肉牛在牛舍内饲养,内有运动场和水槽,饲养管理条件一致,采用全混合日粮饲喂,日饲喂2次,自由饮水,保持舍内清洁、干燥、通风良好、温度适宜,并定期消毒和防疫。

1.2 主要试剂和仪器

褪黑素埋植剂,由中国农业科学院特产研究所提供;黄体酮阴道缓释剂(controlled internal drug release,CIDR),新西兰DEC国际有限公司产品;促性腺激素释放激素(gonadotropin-releasing hormone,GnRH)和氯前列醇钠(prostaglandin,PG),宁波三生生物科技股份有限公司产品;酶联免疫吸附(ELISA)试剂盒,上海优选生物科技有限公司产品;细管冷冻精液,通辽京缘种牛繁育有限责任公司产品。兽用皮下埋植注射器,江苏泰兴市医用器械厂生产;兽用B超仪,英国IMV兽医影像公司生产;酶标仪,瑞士TECAN公司产品;离心机,湖南湘仪公司产品;输精枪,南宁市蒋氏动物用品有限公司生产。

1.3 试验设计

试验采用单因素完全随机区组设计,将供试西门塔尔母牛随机分为4组,每组16个重复,每个重复1头牛,采用CIDR+GnRH+PG+PG+GnRH的同期排卵定时输精方案配种,主要步骤:在试验母牛发情的任意一天阴道埋植CIDR(埋植当天为0 d),同时肌肉注射GnRH 100 μg/头,第7天去除CIDR,第7和8天分别肌肉注射PG 0.2 mg/头,首次注射PG 56 h后再次肌肉注射GnRH 100 μg/头,16 h后进行人工授精。对照组及试验1,2,3组母牛分别在第1次肌注GnRH时颈部皮下埋植0,60,120和180 mg/头MT。

1.4 受胎率和产犊率测定

母牛人工授精后45 d利用兽用B超仪进行妊娠检查,判断其是否受胎,并统计受胎率。母牛分娩后统计产犊率。受胎率=妊娠诊断受胎母牛数/配种母牛数×100%,产犊率=产犊母牛数/受胎母牛数×100%。

1.5 血液样品采集与测定

在各处理母牛同期排卵定时输精过程中第2次肌肉注射GnRH 8 h后(排卵前)及人工授精后14和30 d,尾静脉采血10 mL,血液室温下静置30 min,3 500 r/min离心15 min分离血清,置于-80 ℃冰箱保存,用于检测血清激素水平、抗氧化和免疫指标。

血清激素水平测定:采用ELISA方法测定母牛第2次肌肉注射GnRH 8 h后血清的MT、促卵泡素(follicle-stimulating hormone,FSH)、促黄体素(luteinising hormone,LH)和雌二醇(estradiol,E_2)水平,并测定人工授精后14和30 d血清MT、孕酮(progesterone,P_4)和干扰素-tau(interferon-tau,IFNT)水平,试验操作参照试剂盒说明书进行。

血清抗氧化指标测定:采用ELISA方法测定母牛第2次肌肉注射GnRH 8 h后和人工授精14和30 d血清的总抗氧化能力(total antioxidant capacity,T-AOC),超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase,GSH-Px)和过氧化氢酶(catalase,CAT)活性以及丙二醛(malondialdehyde,MDA)水平。

血清免疫指标测定:采用ELISA方法测定母牛人工授精14和30 d血清免疫球蛋白A(IgA)、免疫球蛋白G(IgG)和免疫球蛋白M(IgM)水平。

1.6 数据统计与分析

采用SPSS 20.0软件对数据进行统计与分析,其中受胎率和产犊率进行卡方检验,其他指标数据进行单因素方差分析,并用Turkey法进行多重比较,结果以"平均值±标准误"表示,$P<0.05$表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 皮下埋植褪黑素对肉母牛繁殖性能的影响

由表1可知,与对照组相比,皮下埋植MT的1~3组母牛的受胎率和产犊率无显著提高($P>0.05$),但相对而言,其对受胎率的影响较大,其中试验2组效果最好,其受胎率较对照组提高了25%。

表 1　褪黑素对肉母牛繁殖性能的影响

Table 1　Effects of melatonin on reproductive performance of beef cows

组别 Groups	配种母牛/头 Number of breeding cows	受胎母牛/头 Number of cows conceived	产犊母牛/头 Number of calving cows	受胎率/% Conception rate	产犊率/% Calving rate
对照组 Control	16	7	6	43.75	85.71
1组 Group1	16	10	8	62.50	80.00
2组 Group2	16	11	9	68.75	81.82
3组 Group3	16	9	8	56.25	88.89

2.2　皮下埋植褪黑素对肉母牛血清繁殖激素水平的影响

由表2可知，与对照组相比，母牛皮下埋植MT处理提高了排卵后母牛血清的繁殖激素水平，其中试验2组最为明显，其血清MT、LH、FSH和E_2水平显著升高（$P<0.05$）。

表 2　褪黑素对排卵前肉母牛血清繁殖激素水平的影响

Table 2　Effects of melatonin on serum reproductive hormone levels in preovulatory beef cows

组别 Groups	褪黑素/(ng·mL^{-1}) MT	促黄体素/(ng·mL^{-1}) LH	促卵泡/(ng·mL^{-1}) FSH	雌二醇/(pg·mL^{-1}) E_2
对照组 Control	3.95±0.11 c	27.32±4.11 b	17.97±2.36 b	44.63±2.88 b
1组 Group 1	6.53±0.34 ab	30.71±1.29 ab	31.89±1.84 a	48.80±1.33 ab
2组 Group 2	7.72±0.28 a	36.03±1.41 a	33.16±2.16 a	61.92±1.29 a
3组 Group 3	5.72±0.34 b	31.51±1.56 ab	22.84±1.77 b	51.73±1.56 ab

注：同列数据后标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下表同。

Note：Different lowercase letters after the same column indicate significant difference（$P<0.05$）. The same below.

从表3可以看出，与对照组相比，母牛皮下埋植MT处理提高了妊娠14和30 d血清繁殖激素水平，其中试验2组最为明显，其母牛血清MT、P_4和IFNT水平显著升高（$P<0.05$）。

表 3　褪黑素对妊娠肉母牛血清繁殖激素水平的影响

Table 3　Effects of melatonin on serum reproductive hormone levels in pregnant beef cows

组别 Groups	妊娠 14 d 14 d of gestation			妊娠 30 d 30 d of gestation		
	褪黑素 MT	孕酮 P_4	干扰素-Tau IFNT	褪黑素 MT	孕酮 P_4	干扰素-Tau IFNT
对照组 Control	4.84±0.32 b	7.83±0.39 c	4.95±0.25 c	6.18±0.09 c	11.52±0.27 c	4.42±0.31 d
1组 Group 1	6.33±0.45 b	12.47±0.52 b	7.08±0.21 ab	7.70±0.28 b	14.40±0.17 ab	7.09±0.16 b
2组 Group 2	8.14±0.11 a	16.70±0.83 a	7.85±0.30 a	9.11±0.17 a	15.70±0.47 a	8.87±0.20 a
3组 Group 3	6.18±0.41 b	12.58±0.35 b	6.46±0.26 b	6.59±0.37 bc	13.75±0.59 b	5.96±0.20 c

2.3　皮下埋植褪黑素对母牛血清抗氧化指标的影响

由表4和表5可知，与对照组相比，母牛皮下埋植MT处理提高了排卵前、妊娠14和30 d母牛血清抗氧化指标水平，其中试验2组效果最为明显，其血清T-AOC及SOD、GSH-Px和CAT活性显著升高（$P<0.05$），而血清MDA含量显著降低（$P<0.05$）。

表 4　褪黑素对排卵前肉母牛血清抗氧化指标的影响

Table 4　Effects of melatonin on serum antioxidant indices in preovulatory beef cows

组别 Groups	总抗氧化能力/(mmol·L^{-1}) T-AOC	超氧化物歧化酶/(U·mL^{-1}) SOD	谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL^{-1}) GSH-Px	过氧化氢酶/(U·mL^{-1}) CAT	丙二醛/(mmol·L^{-1}) MDA
对照组 Control	11.07±1.02 b	164.55±10.39 b	270.75±17.24 b	48.66±3.56 b	7.83±0.11 b
1组 Group 1	12.83±0.53 b	198.73±9.72 b	303.10±18.26 ab	53.41±1.73 b	5.53±0.16 a
2组 Group 2	18.43±1.43 a	271.5±15.94 a	368.75±16.38 a	65.50±1.17 a	5.44±0.37 a
3组 Group 3	12.22±1.34 b	206.03±17.55 b	310.52±16.71 ab	52.17±4.29 b	6.83±0.27 b

2.4　皮下埋植褪黑素对母牛血清免疫指标的影响

由表6可知，与对照组相比，母牛皮下埋植MT处理提高了母牛妊娠14和30 d血清免疫球蛋白水平，其中试验2组效果最为明显，其血清IgA、IgM和IgG水平显著升高（$P<0.05$）。

表5 褪黑素对妊娠肉母牛血清抗氧化指标的影响

Table 5 Effects of melatonin on serum antioxidant indices in pregnant beef cows

组别 Groups	妊娠14 d 14 d of gestation 总抗氧化能力/(mmol·L^{-1}) T-AOC	超氧化物歧化酶/(U·mL^{-1}) SOD	谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL^{-1}) GSH-Px	过氧化氢酶/(U·mL^{-1}) CAT	丙二醛/(mmol·L^{-1}) MDA
对照组 Control	10.60±1.39 b	172.50±12.74 b	260.40±23.47 b	44.91±2.42 c	7.84±0.22 b
1组 Group 1	18.77±0.99 a	253.75±3.85 a	372.60±11.86 a	65.51±2.40 b	5.42±0.42 a
2组 Group 2	19.69±0.35 a	273.20±13.29 a	393.97±11.90 a	79.17±1.35 a	5.12±0.58 a
3组 Group 3	14.40±1.44 ab	186.25±7.56 b	369.98±13.54 a	61.88±2.45 b	6.26±0.39 ab
组别 Groups	妊娠30 d 30 d of gestation 总抗氧化能力/(mmol·L^{-1}) T-AOC	超氧化物歧化酶/(U·mL^{-1}) SOD	谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL^{-1}) GSH-Px	过氧化氢酶/(U·mL^{-1}) CAT	丙二醛/(mmol·L^{-1}) MDA
对照组 Control	9.76±1.50 b	184.14±12.74 c	302.10±10.26 b	50.28±2.06 b	7.19±0.61 b
1组 Group 1	19.98±0.82 a	256.18±14.86 ab	376.63±15.19 a	67.02±4.21 a	5.84±0.31 ab
2组 Group 2	20.89±1.17 a	279.15±11.58 a	421.58±17.30 a	72.80±3.57 a	5.04±0.30 a
3组 Group 3	13.92±0.61 b	215.98±11.48 b	345.82±19.62 ab	59.77±3.58 ab	5.86±0.47 ab

表6 褪黑素对妊娠肉母牛血清免疫指标的影响

Table 6 Effects of melatonin on serum immune indices in pregnant beef cows mg/mL

组别 Groups	妊娠14 d 14 d of gestation IgA	IgG	IgM	妊娠30 d 30 d of gestation IgA	IgG	IgM
对照组 Control	2.27±0.04 c	14.94±0.65 d	3.53±0.46 c	2.38±0.13 c	8.94±0.73 c	5.85±0.38 c
1组 Group 1	3.93±0.17 b	25.27±0.59 b	8.88±0.35 b	4.30±0.12 ab	22.19±0.71 b	8.83±0.16 ab
2组 Group 2	4.47±0.08 a	30.15±0.78 a	11.34±0.30 a	4.64±0.14 a	28.29±1.21 a	9.67±0.13 a
3组 Group 3	3.55±0.12 b	17.98±0.69 c	7.52±0.63 b	3.85±0.12 b	19.98±0.83 b	8.28±0.30 b

3 讨 论

MT作为动物机体多功能的生殖激素,具有抗氧化、抗细胞凋亡和调节细胞自噬等功能,其在调控动物繁殖机能方面发挥着重要作用[11-14]。在牛上的研究发现,MT通过作用于受体MT1和MT2,能够促进卵泡内膜细胞合成雄激素和孕激素,抑制卵泡颗粒细胞凋亡,并促进卵泡发育[7,15]。目前已证明,雌性动物卵泡发育期间机体会产生大量的ROS,能够诱导卵泡凋亡,降低卵母细胞质量,并抑制排卵后卵巢黄体细胞产生孕激素[16-17]。研究发现,MT作为高效的抗氧化剂,不仅能够通过清除ROS缓解卵巢受到的氧化损伤,促进腔前卵泡发育,且可以降低排卵卵泡颗粒细胞黄体形成过程的氧化应激,进而增强排卵后黄体分泌孕激素,并阻止黄体发育不成熟而退化[18-19]。另有研究发现,随着动物卵泡的生长发育和卵母细胞的成熟,卵泡液MT水平逐渐增加,排卵前成熟卵泡MT水平高于其他生长阶段的卵泡[20]。诸多研究表明,牛卵母细胞体外成熟期间,培养液中补充MT能够提高卵母细胞成熟的质量,增强其受精后胚胎发育能力[21-23]。上述研究结果表明,MT可能参与调控卵泡发育和卵母细胞的成熟,这有利于提高母牛的受胎率。有研究发现,荷斯坦奶牛产后至配种阶段,其血清中MT水平峰值出现在配种时,且血清MT水平较高的奶牛配种后更易妊娠[24]。另有研究表明,绵羊、荷斯坦奶牛和肉牛同期发情后,配种前皮下注射MT显著提高了配种后的受胎率[9,25-26]。本研究发现,西门塔尔肉牛进行同期排卵-定时输精时,与对照组相比,在母牛同期发情时皮下埋植MT显著提高了配种前血清MT水平,但未显著提高母牛受胎率,其中埋植120 mg/头MT处理相对较好,较大幅度地提高了母牛的受胎率,该结果与配种前皮下注射MT可显著提高荷斯坦奶牛、肉牛和绵羊受胎率的研究结果[9]不同,这可能与本试验各组母牛样本数较少有关。此外,本研究也发现,皮下埋植180 mg/头MT组母牛受胎率低于皮下埋植60和120 mg/头MT组。另有研究发现,荷斯坦奶牛超数排卵期间,与对照相比,皮下埋植160 mg/头MT可显著提高母牛卵巢上有腔卵泡数、可用胚胎数以及胚胎移植后受胎率,且母牛胚胎移植后受胎率显著高于240 mg/头MT组[10]。这些研究结果进一步说明,皮下埋植或注射适宜剂量的外源MT有利于调节母牛卵巢功能,促进卵泡发育、卵母细胞成熟和排卵,并提高配种和胚胎移植后的受胎率,但过高水平的MT不能进一步有效提升母牛的繁殖性能。

SOD、GSH-Px和CAT是动物机体内主要的抗氧化酶。研究认为，MT不仅能够直接清除自由基，也能通过促进SOD、GSH-Px及CAT等抗氧化关键酶基因的表达，进而增强抗氧化酶的活性，最终实现其抗氧化功能[27]。本试验结果表明，在西门塔尔肉用母牛同期发情时皮下埋植MT，不仅显著提高了排卵前血清MT水平，而且显著提高了T-AOC、SOD、GSH-Px及CAT活性，同时显著降低了MDA含量，进而提升母牛机体抗氧化水平，有利于提高受胎率，这与高翔[28]和杨超群等[26]在肉牛同期发情配种前注射MT的研究结果相似。而且，目前研究已明确，MT不仅能够提高母畜机体抗氧化功能，也能调节生殖激素的分泌，进而促进卵泡发育、提高胚胎的质量[15]。本试验结果表明，皮下埋植MT显著提高了配种前母牛血清LH和E_2水平，E_2水平升高可促进卵泡发育和卵母细胞成熟，LH水平升高可促进排卵和黄体的形成，这与已报道的在荷斯坦奶牛[9]和绵羊[25]同期发情后配种前皮下注射MT可显著提高血清LH和E_2水平的研究结果相似。本试验中，同期发情时皮下埋植MT可能促进母牛卵泡发育，进而促进卵泡颗粒分泌E_2，E_2水平的升高不仅可促进卵泡的发育，还可能通过正反馈作用于下丘脑和垂体，进而促进LH合成与分泌，LH作用于卵巢可促进P_4合成，且可能通过缓解氧化应激而促进卵巢黄体细胞合成P_4。

有研究表明，过量的ROS不利于附植前胚胎的发育和胚胎附植，可抑制滋养层细胞的活力，并诱导细胞凋亡[4]；动物胎盘能够合成MT[29]，且与未妊娠的母牛相比，妊娠母牛血浆不仅含有高水平的MT，且氧化应激指标显著降低[30]，说明MT可能参与母牛妊娠识别和胚胎附植过程的调控。MT是较强的抗氧化剂，能够促进抗氧化基因表达，增强胚胎的抗氧化性，也能抑制促凋亡基因表达、促进抗凋亡基因表达，进而影响胚胎发育和胚胎附植[31]。本研究发现，皮下埋植MT显著提高妊娠母牛血清P_4和IFNT水平。吴昊等[9]研究发现，在同期发情的荷斯坦奶牛配种前皮下注射MT，不仅显著提高了配种前母牛血清P_4水平，也显著提高了妊娠35 d母牛血清P_4的水平，这与本试验的研究结果相似。不同的是，荷斯坦奶牛配种前皮下注射MT主要通过促进排卵后颗粒细胞黄体化而增强黄体的形成，而皮下埋植MT不仅能够促进排卵后颗粒细胞黄体化，也可能作用于妊娠黄体，增强其功能，进而促进妊娠期间黄体分泌孕激素。这些研究结果说明，MT可能通过增强排卵前和早期胚胎发育期间母牛的抗氧化功能影响血清生殖激素的水平，进而增强卵母细胞质量和胚胎发育能力，最终提高母牛的受胎率。

此外，IgA、IgG和IgM是动物血清关键免疫球蛋白，其水平高低可直接反映动物机体免疫功能的强弱[32]。母牛体内适量的免疫球蛋白有助于调节机体的免疫反应，帮助其抵御外来病原体的入侵，降低感染疾病的风险，为胚胎的正常发育创造一个相对安全的体内环境，减少因疾病导致的胚胎附植失败或早期流产等情况的发生。本试验结果表明，与对照组相比，西门塔尔肉用母牛在同期发情时皮下埋植MT显著提高了妊娠早期血清IgA、IgG和IgM水平，说明MT能够提高妊娠母牛血清免疫球蛋白含量，增强机体的免疫功能。这些研究结果说明，皮下埋植MT可能通过提高妊娠早期肉用母牛血液MT水平而增强机体的免疫机能，创造一个有利于早期胚胎发育和胚胎附植的子宫环境，进而提高母牛的受胎率。

[参考文献]

[1] REESE S T, FRANCO G A, POOLE R K, et al. Pregnancy loss in beef cattle: a meta-analysis[J]. Animal Reproduction Science, 2020, 212: 106251.

[2] PRASAD S, TIWARI M, PANDEY A N, et al. Impact of stress on oocyte quality and reproductive outcome[J]. Journal of Biomedical Science, 2016, 23: 36.

[3] SUGINO N. Reactive oxygen species in ovarian physiology [J]. Reproductive Medicine and Biology, 2005, 4(1): 31-44.

[4] DELUAO J C, WINSTANLEY Y, ROBKER R L, et al. Oxidative stress and reproductive function: reactive oxygen species in the mammalian pre-implantation embryo[J]. Reproduction, 2022, 164(6): f95-f108.

[5] GAOQING X, YANGYUNYI D, ZHE W, et al. Melatonin attenuates oxidative stress-induced apoptosis of bovine ovarian granulosa cells by promoting mitophagy via sirt1/foxo1 signaling pathway[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(16): 12854.

[6] TALPUR H S, WORKU T, REHMAN Z U, et al. Knockdown of melatonin receptor 1 and induction of follicle-stimulating hormone on the regulation of mouse granulosa cell function [J]. Reproductive Biology and Endocrinology, 2017, 17(4): 380-388.

[7] WANG S, LIU W, PANG X, et al. The mechanism of melatonin and its receptor MT2 involved in the development of bovine granulosa cells[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(7): 2028.

[8] PAULINO L R F M, BARROSO P A A, SILVA B R, et al. Immunolocalization of melatonin receptors in bovine ovarian fol-

licles and *in vitro* effects of melatonin on growth, viability and gene expression in secondary follicles[J]. Domestic Animal Endocrinology, 2022, 81: 106750.

[9] 吴昊,姚松阳,宋玉坤,等. 褪黑素对荷斯坦奶牛妊娠率及生殖激素的影响[J]. 中国畜牧兽医,2021,48(7):2523-2529.
WU H, YAO S Y, SONG Y K, et al. Effects of melatonin on pregnancy rate and reproductive hormone in holstein Holstein dairy cows[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2021, 48(7): 2523-2529.

[10] 赵增元,吴昊,姚松阳,等. 皮下埋植褪黑素对奶牛超数排卵效果的影响[J]. 中国奶牛,2022(11):17-22.
ZHAO Z Y, WU H, YAO S Y, et al. Effects of implantation melatonin on superovulation results in dairy cows[J]. China Dairy Cattle, 2022(11): 17-22.

[11] TAO J L, ZHANG X, ZHOU J Q, et al. Melatonin alleviates hypoxia-induced apoptosis of granulosa cells by reducing ROS and activating MTNR1B-PKA-Caspase8/9 pathway[J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 184.

[12] XIE F F, ZHANG J H, ZHAI M X, et al. Melatonin ameliorates ovarian dysfunction by regulating autophagy in PCOS via the PI3K-Akt pathway[J]. Reproduction, 2021, 162(1): 73-82.

[13] ZHU T, YAN L, DENG S, et al. Mitochondria of porcine oocytes synthesize melatonin, which improves their *in vitro* maturation and embryonic development[J]. Antioxidants, 2024, 13(7): 814.

[14] ZHANG K Y, GUO J, WANG S M, et al. Melatonin protects bovine oocyte from βHB-induced oxidative stress through the Nrf2 pathway[J]. Theriogenology, 2025, 234: 64-72.

[15] 白欣洁,刘莎莎,王功民,等. 褪黑素在雌性动物繁殖中的调控作用[J]. 中国兽医科学, 2020, 50(7): 908-914.
BAI X J, LIU S S, WANG G M, et al. The regulation of melatonin on female reproduction[J]. Chinese Veterinary Science, 2020, 50(7): 908-914.

[16] TIMÓTEO-FERREIRA F, ABREU D, MENDES S, et al. Redox imbalance in age-related ovarian dysfunction and perspectives for its prevention[J]. Ageing Research Reviews, 2021, 68: 101345.

[17] LIU S H, JIA Y B, MENG S R, et al. Mechanisms of and potential medications for oxidative stress in ovarian granulosa cells: a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(11): 9205.

[18] XU H T, MU X Y, DING Y B, et al. Melatonin alleviates benzo(a)*pyrene*-induced ovarian corpus luteum dysfunction by suppressing excessive oxidative stress and apoptosis[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207: 111561.

[19] SILVA B R, COSTA F C, DE LIMA NETO M F, et al. Melatonin acts through different mechanisms to control oxidative stress and primordial follicle activation and survival during *in vitro* culture of bovine ovarian tissue[J]. Domestic Animal Endocrinology, 2024, 86: 106824.

[20] BASINI G, GRASSELLI F. Role of melatonin in ovarian function[J]. Animals, 2024, 14(4): 644.

[21] PANG Y, ZHAO S, SUN Y, et al. Protective effects of melatonin on the *in vitro* developmental competence of bovine oocytes[J]. Animal Science Journal, 2018, 89(4): 648-660.

[22] GUTIÉRREZ-AÑEZ J C, LUCAS-HAHN A, HADELER K G, et al. Melatonin enhances *in vitro* developmental competence of cumulus-oocyte complexes collected by ovum pick-up in prepubertal and adult dairy cattle[J]. Theriogenology, 2021, 161: 285-293.

[23] HAO T, XU X, HAO H S, et al. Melatonin improves the maturation and developmental ability of bovine oocytes by up-regulating GJA4 to enhance gap junction intercellular communication[J]. Reproduction Fertility and Development, 2021, 33(14): 760-771.

[24] HE C J, MA T, SHI J M, et al. Melatonin and its receptor MT1 are involved in the downstream reaction to luteinizing hormone and participate in the regulation of luteinization in different species[J]. Journal of Pineal Research, 2016, 61(3): 279-290.

[25] SONG Y K, WU H, WANG X G, et al. Melatonin improves the efficiency of super-ovulation and timed artificial insemination in sheep[J]. Peer J, 2019, 7: e6750.

[26] 杨超群,贾鸿儒,谭建兵,等. 褪黑素对肉牛同期发情和情期受胎率的影响[J]. 家畜生态学报,2024,45(3):39-45.
YANG C Q, JIA H R, TAN J B, et al. Effects of melatonin on estrus synchronization and conception rate in beef cattle[J]. Journal of Domestic Animal Ecology. 2024, 45(3): 39-45.

[27] MONIRUZZAMAN M, GHOSAL I, DAS D, et al. Melatonin ameliorates H_2O_2-induced oxidative stress through modulation of Erk/Akt/NFkB Pathway[J]. Biological Research, 2018, 51(1): 17.

[28] 高翔. 褪黑素对青年母牛同期排卵定时输精效果的影响[D]. 吉林:吉林农业大学,2019.
GAO X. Effects of melatonin on synchronous ovulation and timed insemination artificial in heifers[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2019.

[29] JOSEPH T T, SCHUCH V, HOSSACK D J, et al. Melatonin: the Placental antioxidant and anti-inflammatory[J]. Frontiers in Immunology, 2024, 15: 1339304.

[30] DIRANDEH E, ANSARI-PIRSARAEI Z, THATCHER W. Melatonin as a smart protector of pregnancy in dairy cows[J]. Antioxidants, 2022, 11(2): 292.

[31] IVANOV D, MAZZOCCOLI G, ANDERSON G, et al. Melatonin, its beneficial effects on embryogenesis from mitigating oxidative stress to regulating gene expression[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(11): 5885.

[32] 于晓梦,田雨晴,林笑乾,等. 万寿菊黄酮对热应激肉牛生长性能、营养物质表观消化率及血清抗氧化和免疫指标的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(9): 5736-5747.
YU X M, TIAN Y Q, LIN X Q, et al. Effects of marigold flavonoids on growth performance, nutrient apparent digestibility, serum antioxidant and immune indices of heat stressed beef cattle[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(9): 5736-5747

(责任编辑:马秋明)