

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.040

家禽规模养殖 LED 光环境调控技术进展与趋势分析*

泮进明¹ 王小双¹ 蒋劲松¹ 俞永华¹ 陈贤惠²

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 浙江光大种禽业有限公司, 嘉兴 314423)

摘要: 家禽视觉系统高度发达, LED 光源优点突出, 两者协同创新并正在迅速形成新的交叉领域。综述了具有代表性的家禽——鸡规模养殖 LED 光环境调控技术的研究现状。在肉鸡方面, 通过 LED 的光色、光照度与光周期等因子的调控, 可影响小肠黏膜结构来提高营养吸收和促进生长, 通过影响卫星细胞增殖及肌肉纤维发育提高屠宰性能与鸡肉品质, 同时影响行为和健康, 增强免疫力, 降低死亡率和疾病发生率等。在蛋鸡和种鸡方面, 通过对光环境进行调控, 可影响其饲料消耗, 并促进促黄体素和促卵泡素等激素的释放来影响性成熟、开产日龄、产蛋率等, 同时提高种鸡的受精孵化率, 改善鸡蛋品质情况, 有效降低啄癖现象。最后, 分析了家禽规模养殖 LED 光环境调控技术存在的问题, 并对发展趋势进行了展望。

关键词: 家禽养殖 光环境 LED

中图分类号: S831.4; X17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0225-11

Advancement and Trend of LED Light Environment Control Technology for Intensive Poultry Production

Pan Jinming¹ Wang Xiaoshuang¹ Jiang Jingsong¹ Yu Yonghua¹ Chen Xianhui²

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Zhejiang Guangda Breeding Poultry Corporation, Jiaxing 314423, China)

Abstract: An innovative area is forming rapidly with the application of LED (light emitting diode) light sources in the intensive production of poultry which has a highly developed visual system. Firstly, the article reviewed the advancement on LED light environment control technology for intensive poultry production. For broilers, the optimization of LED light color, intensity and photoperiod could improve the structure of small intestinal mucosal and consequently enhance the feed utilization and growth rate. The light environment could also affect the satellite cell proliferation, muscle fiber development and behavior activities to meliorate the carcass characteristic, meat quality and the health, which helped to strengthen the immunity, reduce the mortality and disease incidence. For laying hens and breeders, the light conditions could promote the sex maturity, age at first egg and lay rate by increasing the release of luteinizing hormone and follicle stimulating hormone. Besides, the egg quality, pecking, fertility and hatchability of breeders were improved by providing suitable lights. Finally, the development trends of LED light environment control for intensive poultry production were presented by the analysis of current status and issues.

Key words: Poultry production Light environment LED

收稿日期: 2013-05-10 修回日期: 2013-06-10

* 国家自然科学基金资助项目(21006091)、公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201303091)和杭州市农业科研攻关项目(20101032B51)

作者简介: 泮进明, 副教授, 博士生导师, 主要从事畜禽养殖光环境与空气质量控制技术研究, E-mail: panhouse@zju.edu.cn

通讯作者: 俞永华, 讲师, 博士, 主要从事畜禽养殖光环境与空气质量控制技术研究, E-mail: yhyu@zju.edu.cn

引言

禽类的视觉系统高度发达,光刺激可以通过刺激视网膜上的光受体产生光信号,也可以直接通过颅骨刺激视网膜外光受体产生神经冲动,刺激下丘脑分泌促性腺激素释放激素,作用于垂体前叶进而控制和调节禽类体内激素的分泌,从而影响它们的行为、节律,对禽类的生长、健康以及性成熟有重要的影响^[1~2]。人类可以感受到的可见光波长在400~730 nm,而禽类不仅在可见光区域有更多的敏感波段,而且还能够感受到人眼无法感知的紫外光(320~400 nm)^[1]。在短周期的家禽(如肉鸡)养殖中,光照的刺激作用被盲目放大,不科学地采用长时间连续光照,虽然在一定程度上可加速肉鸡生长,但也降低了肉鸡的体质健康和抗病能力,并与动物福利相违背。

随着畜禽养殖业的机械化、规模化、集约化程度越来越高,可控的人工光源已成为禽舍内光照的主要来源,其中白炽灯、荧光灯的应用最广泛。但是白炽灯的能耗高、发光效率极低,包括我国在内的多个国家已开始淘汰白炽灯,而节能灯使用寿命短、含有汞污染物,对环境保护存在巨大的隐患,二者均非理想的人工光源。LED(Light emitting diode)发光二极管作为一种新型光源,具有能耗低、光电转化效率高、使用寿命长、光照参数可调控、环境效益好等突出的优点,越来越受到国内外学者的关注。白炽灯、荧光灯与LED光源的性能比较见表1。近年来,LED在农业生产中的研究与应用也显著增加,家禽养殖LED光环境调控技术已成为研究热点之一,LED光源已成为家禽规模养殖人工照明最具潜力的新光源。

本文就LED及其他光源的光色、光周期与光照

表1 白炽灯、荧光灯与LED光源性能比较

Tab.1 Comparison between incandescent, fluorescent and LED light source

参数	白炽灯	荧光灯	LED光源
发光效率	低	中	高
能耗	高	中	低
使用寿命	短	短	很长
安全性	易碎 220伏	易碎 220伏 汞污染	不易碎 36伏 绿色环保
光色种类	单一	较多	很丰富
稳定性	防尘性差 易频闪	防尘性差 频闪严重	防尘性好 稳压无频闪
光强可控性	可控但调控影响寿命	不可控	有一定光衰 可控并胜任智能调控

度等光环境因子对肉鸡、蛋鸡和种鸡的生理、生长、行为、健康与品质等方面的影响研究进展进行归纳总结,阐述存在的主要问题和难点,并展望今后的发展趋势。

1 肉鸡LED光环境调控技术

家禽视觉系统高度发达,对光环境反应敏感,因此规模养殖普遍采用人工照明以促进家禽的生长。光源类型与光色、光周期、光照度等光环境因子的改变都能影响肉鸡的生理、生长、行为、健康与品质,合理地调控光环境因子能在不危害鸡只健康的基础上提高肉鸡的生产性能,并兼顾动物福利,获得最大的经济效益和社会效益。

1.1 光源种类对肉鸡生长的影响

在目前的畜禽养殖行业中应用的人工光源种类繁多,如白炽灯、荧光灯、卤素灯等。20世纪末期以来,研究人员已就不同光源影响商品肉鸡的生长发育进行了比较。1999年,Rozenboim等^[3]对比了白炽灯泡、暖白荧光灯管和暖白迷你荧光灯泡3种光源类型对肉鸡生长的影响,发现使用暖白迷你荧光灯泡的肉鸡生长效果较好。2006年,Kristensen等^[4]对比了生物光源和暖白荧光灯两种光源,结果发现两种光源对肉鸡的生产性能和腿部健康未造成不利影响。2007年,Kristensen等^[5]观察了生物光照、暖白荧光灯、白炽灯和光谱敏感匹配灯下肉鸡的行为状况,研究表明不考虑光照度的前提下,肉鸡更偏好于生物光照和暖白荧光灯,其中暖白荧光灯下肉鸡啄羽的行为发生较少。2009年,Ghuffar^[6]研究表明金属卤素灯对肉鸡生长的促进作用优于白炽灯、荧光灯和高压钠灯。随着LED光源研究与应用的开展,传统光源被作为对照进行比较。

1.2 光色对肉鸡生长的影响

家禽眼睛视网膜上有两种感受细胞:视杆细胞和视锥细胞,其中视锥细胞能够分辨不同颜色。人眼对3种颜色的光敏感:450 nm(蓝光)、550 nm(绿光)和700 nm(红光),但禽类的眼睛除了能感受上述3种波长的光色外,还能够感知到400 nm以下的光^[1]。因此,不能从人类对光的认知角度来考虑禽类的光需求,而应针对禽类的光敏感特性探索它们的光需求特性。不同波长的光将从生理、生产、行为、健康等多方面不同程度地影响肉鸡。

小肠是动物体内消化吸收的主要场所,不同波长的光能够改善小肠黏膜结构,影响肉鸡对营养物质的吸收能力,直接关乎肉鸡养殖过程中饲料的消耗情况。2009年,谢电等^[7]针对LED红、绿、蓝和白光对AA肉公鸡雏鸡的小肠黏膜形态结构影响研

究发现,在肉鸡生长早期(0~7 d)选用绿光照明,可不同程度地改善肉鸡小肠黏膜结构,提高小肠对营养物质的吸收能力,进而促进肉鸡的生长发育。2011年,Xie等^[8]进一步研究了单色光对AA肉公鸡肠黏膜结构和免疫屏障的影响,通过对比不同日龄肉公鸡的小肠绒毛高度、皱襞深度和小肠的上皮内淋巴细胞、杯状细胞和免疫球蛋白细胞的数量,发现生长早期使用绿光而生长后期使用蓝光能增强小肠黏膜结构和免疫屏障。

卫星细胞对肉鸡肌肉的生长及损伤修复具有至关重要的意义^[9],卫星细胞含量及肌纤维发育状况是评价肉鸡生长性能的重要指标。1998年,Halevy等^[10]以迷你白炽灯泡作对照,研究了不同波长的LED光对Anak公鸡生长性能的影响,结果表明LED绿光与LED蓝光下肉鸡胸肌卫星细胞含量以及总卫星细胞含量都显著高于LED红光和迷你白炽灯泡。2008年,刘文杰等^[11]检测了不同颜色LED光照下肉鸡肌肉的生长、肌纤维的发育和血清睾酮水平,证明LED蓝光和绿光比LED红光和白光更能有效促进肉鸡肌纤维发育以及血清睾酮的分泌。2008年,Cao等^[12]分时期研究了LED不同光色对AA公鸡生长的影响,发现LED绿光和LED蓝光分别在肉鸡生长前期(0~26 d)和后期(27~49 d)表现出优势,两者均能促进睾酮分泌和肌纤维生长,进而促进鸡只的生长发育。2009年,孟冬梅^[13]采用红光、蓝光和白炽灯全程调控AA肉鸡照明,在利用递减的光照制度提高肉鸡生长速度的基础上,发现红光和蓝光虽然降低了肉鸡早期的生长速度,但后期的补偿性快速生长使得最终的出栏重和饲料利用率等指标均优于传统自然光和白炽灯。

肉公鸡的性成熟情况直接决定其鸡冠、肉垂和羽毛色泽等外观特征,光色影响性器官睾丸的发育状况和性激素含量。1999年,Rozenboim等^[14]通过检测Anak公鸡的增重、饲料转化、血浆睾酮及相关屠宰性能等指标证明LED绿光和蓝光能促进肉公鸡的生长。2007年,曹静等^[15]以LED白光作对照发现肉鸡生长前期采用LED绿光或LED蓝光照射,生长后期采用LED蓝光照射,能显著促进AA肉公鸡的生长发育。2007年,曹静等^[16]进一步发现LED蓝光和LED绿光下AA肉公鸡的体重、睾丸重、睾丸体积、曲精细管面积和生精细胞百分数显著高于LED红光和LED白光,LED蓝光组的甲状腺激素和睾酮水平比其他组高14.36%~26.2%,并进而影响睾丸形态结构。

肉鸡免疫功能的强弱直接影响疾病的发病率,提高免疫力对降低死亡率与疾病发生率具有重要意

义,不同光色能在一定程度上增强家禽的免疫抵抗能力。2008年,Xie等^[17]研究了LED光色对初生AA肉公鸡的外周血T淋巴细胞的增殖反应,结果发现LED绿光和蓝光对提高免疫反应的效果优于红光,而且蓝光能缓解应激作用。2008年,谢电等^[18]研究了LED光色对AA雄性肉鸡免疫应激的影响,结果显示蓝光可提高细胞免疫和体液免疫功能,对免疫应激反应具有缓解作用。2011年,Sadrzadeh等^[19]研究了LED光色对接种传染性法氏囊和新城疫疫苗的Ross308肉鸡T淋巴细胞增殖反应与血清NO(一氧化氮)含量的影响,通过比较8、18、23、30、37日龄肉鸡的外周血T淋巴细胞增殖反应以及血清NO含量,发现绿光和白光对肉鸡的免疫(尤其养殖后期)具有较强的影响。

鸡肉品质的好坏直接影响肉鸡在消费市场的被认可度,不同光色下饲养的肉鸡鸡肉品质也存在差异。2009年,Karakaya等^[20]以迷你白炽灯作对比,研究了LED绿光和蓝光光色转换对Ross308肉母鸡鸡肉品质的影响,发现白炽灯组胸肌和腿肌肉的pH值和持水率较低,蒸煮损失较高,绿光与蓝绿组合组的肉质松软程度最高。2011年,Ke等^[21]研究了不同LED光色对AA公鸡肌肉生长、品质及抗氧化性能的影响,结果发现LED蓝光下体重和屠宰率显著大于红光、白光、绿光;绿光与蓝光下公鸡的胸肌和腿肌的pH值、持水率以及蛋白质含量较高,但蒸煮损失、色泽、切力以及脂肪含量较低;另外,相比红光、白光,蓝光能显著促进过氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶以及总抗氧化性能,并降低胸肌和腿肌中的丙二醛含量,说明LED蓝光能够通过提高抗氧化能力来显著提高AA肉鸡的肉品质,效果优于红光。

近年来,动物福利受到越来越多的关注,观察并获取肉鸡在不同光环境下进食、行走、睡眠、整羽等行为规律,遵从自主选择,让肉鸡生长在喜好的环境下,有助于肉鸡的健康生长。不同光色下肉鸡的活跃程度不同,行为表现呈现差异性。1995年,李西峰等^[22]采用红灯和日光灯对2周龄AA肉鸡照明,发现50 d后红灯组肉鸡平均体重极显著地大于红灯与日光灯混合组和日光灯组,啄癖发生率和死亡率也都最低。2011年,Senaratna等^[23]研究了红、白、绿和蓝4种光色白炽灯对不同日龄Cobb肉鸡的饮食行为、行走行为和夜间活动行为的影响,结果表明光色能够显著影响肉鸡的行为,红光照明至21日龄有助于肉鸡体重的增加。2012年,Senaratna等^[24]从14日龄开始观察了Cobb肉鸡在早上、傍晚、夜间对4种不同颜色的光色(红、白、绿、蓝)的

喜好,通过对各时段肉鸡停留的时间和饮食行为进行统计分析,发现肉鸡夜间更偏向于红色;21日龄后表现出对颜色的偏好,对红光和白光的喜好大于蓝光和绿光。

基于不同光色研究取得的进展,有研究人员尝试在不同生长时期采用不同光色照明,以期得到更有效的光色组合来促进肉鸡生长。2004年, Rozenboim等^[25]研究了LED绿光和蓝光及其组合对Anak肉公鸡生长的影响,发现先采用绿光照明,然后在10d或20d转换为蓝光能进一步促进肉鸡生长。2009年, Karakaya等^[20]探究了不同LED光色以及光色组合对Ross308肉母鸡生长及肉品质的影响,并最终认为采用绿光和蓝光的组合能够促进肉母鸡的生长和肉品质的提高。2012年, Cao等^[26]系统研究了多种LED光色组合对AA肉公鸡生长与生产性能的影响,前期使用白、红、绿、蓝4种LED,而在后期分别转化为其他3种光色,结果表明,绿-蓝和蓝-绿组合光色可以进一步提高肉鸡生长和生产性能。

1.3 光周期对肉鸡生长的影响

光周期与动物的生物节律息息相关,连续式光照和间歇式光照是最为常用的两种照明模式,研究学者对此两种照明模式进行的大量研究表明,不同光照时长不仅能够影响肉鸡增重量、饲料消耗量等生长速率指标,也会对肉鸡发病率、死亡率等健康指标产生不同影响。1996年, Buyse等^[27]对比研究了连续光照模式和间歇光照模式下肉鸡的生长情况,结果表明,间歇式光照模式能提高饲料转化效率,降低腿病的发生率和减少应激,并能够改善眼部健康。2011年, Mahmud等^[28]对比了连续光照和两种间歇光照制度对肉鸡生产性能的影响,结果显示连续光照组肉鸡的平均增重显著低于两个间歇光照组($P < 0.05$),夜晚采用1L(开灯1h):3D(关灯3h)的间歇光照组的增重显著优于1L:2D的间歇光照组($P < 0.01$);与连续光照组对比,间歇光照组的饲料消耗较低,肉料比较高($P < 0.05$)。1999年, Rozenboim等^[3]以迷你荧光灯泡为光源,比较了23L:1D(1d开灯23h,关灯1h)、递增式16L:8D和间歇式16L:8D3种光照制度对肉鸡的影响,公母比例1:1,结果发现23L:1D组的鸡在42日龄时母鸡体重最大,而在49日龄公鸡体重最小,且死亡率最高。2010年, Lewis等^[29]针对23L(开灯23h)和18L连续光照以及两种间歇光照进行试验,发现前21d,18L组的饲料消耗和增重显著低于间歇光照组;间歇光照组的饲料转化效率显著高于23L光照组。2008年, Moraes等^[30]采用荧光灯为光源,研究了

23L光照、递增光照、16L光照以及自然光光照对Cobb肉公鸡的影响,发现递增光照组肉鸡的体重最大;自然光光照组肉鸡的存活率大于23L光照;23L光照组的胸肌重最大。2011年, Abreu等^[31~32]研究发现持续光照组Ross肉公鸡的猝死率比间歇光照组高1.48倍,总体死亡率高2.12倍;也发现间歇光照组下肉鸡的腿肌较重。2009年, Lewis等^[33]研究对比了暖白荧光灯2~21h连续光照模式下Cobb与Ross肉公鸡的生长情况,结果发现连续光照时间大于12h后,生长性能与连续光照时间呈负相关,且死亡率显著增大;连续光照时间小于6h的生长性能和耗料量显著降低;当连续光照时间小于10h时,猝死症的发病率与其负相关,大于10h时呈正相关。2012年, Schwean-Lardner等^[34]研究了白炽灯为光源下不同连续光照时间(14、17、20和23h)对Ross308与Ross708肉鸡生产性能的影响,发现在32日龄和39日龄20h光照下的鸡体重最大;在49日龄17h和20h光照下的鸡体重显著大于14h和23h;在39日龄和49日龄,20h下的饲料消耗量最大,死亡率随连续光照时间的增加而线性增长。2012年, Škrbić等^[35]研究了递减的光周期和递增的光周期对传统Hubbard与Ross308肉鸡生长性能和健康的影响,发现递增光周期减缓了肉鸡初期的生长,递减光周期能增加屠体重。

光周期是影响禽类生理与行为节律的重要因素,对肉鸡的行走、进食、站立、整羽等行为产生影响,影响胫骨发育并进而影响肉鸡的行走、站立等行为能力。2002年, Sanotra等^[36]研究了递减和骤减光照制度与持续24h光照制度的对照,对Ross208肉鸡行走能力、胫骨发育以及静止持续时间的影响,发现骤减光照减少了行走障碍,递减和骤减光照都降低了胫骨软骨病和静止持续时间,其中骤减光照降低胫骨软骨病的效果最好。2000年, Ingram等^[37]研究发现白炽灯12h连续光照比23h连续光照显著降低肉公鸡体重,却显著提高饲料转化率,另外胫骨长度随光照时间的减少显著减小。2005年, Petek等^[38]比较了24h连续光照和12L加3个1L:3D组合间歇光照对Ross肉公鸡生长特性以及胫骨发育不良(TD)的影响,结果发现间歇光照方式能增加肉鸡体重并提高饲料转化效率。

光周期不仅影响肉鸡的生长和生产性能,同时也会改变激素分泌和相关器官的健康。2000年, 杨琳等^[39]研究了自然光照、12L连续照明和间歇照明对石岐杂黄羽公鸡的蛋白质沉积和血浆甲状腺素、三碘甲状腺原氨酸的影响,结果表明,间歇光能促进蛋白质的沉积,降低血浆三碘甲状腺原氨酸浓度,提

高甲状腺素浓度。2013年, Schwan-Lardner等^[40]研究了连续光照时长对 Ross308 与 Ross708 肉鸡死亡率诱因、迁移性、脚部健康以及眼睛大小的影响, 结果发现死亡率随黑暗期时间的延长而增加, 传染病的发病率与光照时长的平方成正比, 20L 条件下达到最大, 平均脚部损伤分数随光照时长增加而增大, 23L 下眼睛重量最大。

1.4 光照度对肉鸡生长的影响

禽类眼睛视网膜上有视杆和视锥两种视觉感光细胞, 视杆细胞不能分辨颜色, 主要在光照度小于 0.4 lx 条件下起作用, 对不同强度的光照很敏感; 视锥细胞主要在亮光环境下发挥作用^[1]。

光照度能影响肉鸡的生长速率、饲料转化效率和死亡率等。2006年, Downs等^[41]对比研究了亮光、弱光、递减光照度下 Ross344 与 Ross508 肉鸡的生长情况, 发现递减的光照度(1~0.25 fc)促进了饲料消耗以及早期体重的增加, 弱光能刺激早期饲料消耗并促进生长, 但这种影响时间较短。2010年, Deep等^[42]研究了白炽灯不同光照度(1、10、20、40 lx)对 Ross308 肉鸡生产特性以及健康的影响, 结果表明光照度只影响屠宰特性, 1 lx 光照度对鸡的健康有不利影响。2011年, Ahmad等^[43]研究了不同光照度(5、10、20、30、40 lx)对肉鸡生产性能的影响, 结果显示, 光照度对体重和耗料量无显著影响, 5 lx 光照度组饲料转化效率最高, 40 lx 光照度组死亡率最大。

肉鸡行为受光照度影响明显, 研究人员通过观察肉鸡在光照期和黑暗期的进食、行走、站立、整羽等行为来研究不同光照度下行为的差异性。2006年, Kristensen等^[44]利用动力学数学模型来预测光照度与鸡的行为活动反应, 结果表明, 暖白荧光灯 100 lx 光照度下 Ross308 肉鸡的活动显著高于 5 lx, 光照度递增照明条件下鸡的反应速度显著大于光照度递减。2009年, Alvino等^[45-46]研究了不同光照度(5、50、200 lx)的白炽灯对 Cobb 肉鸡行为规律以及同步性的影响, 分别统计各光照度下光照期和黑暗期肉鸡的休息、觅食、行走、整羽行为, 结果发现 5 lx 下活动分布更均匀; 在 200 lx 下鸡只的整羽、进食、休息、觅食行为同步性最高。2012年, Deep等^[47]研究了不同光照度(1、10、20、40 lx)白炽灯对 Ross308 肉鸡行为和节律的影响, 结果显示所有的光强组肉鸡在 7 h 的黑暗期活动很少或甚至没有, 说明 1~40 lx 的光照度变化不影响褪黑素水平和行为节律, 但是 1 lx 下肉鸡休息行为最多, 整羽和觅食行为最少, 对动物福利有潜在危害。

光照度除影响肉鸡的生长与行为外, 还影响视

觉器官和血液特性。2009年, Blatchford等^[48]研究了白炽灯不同光照度(5、50、200 lx)对 Cobb 肉鸡的影响, 5 lx 下肉鸡活动最少、昼夜活动变化最低、IgM(免疫球蛋白 M)反应最弱, 同时也发现 5 lx 下眼球重量最大。结果说明增加的日间光强对肉鸡健康影响不大, 但能增加明显的行为节律。2011年, Olanrewaju等^[49]研究了白炽灯多种较低光照度(25、10、5、2.5、0.2 lx)对 Ross308 肉鸡视觉器官、免疫性能、应激性以及腿部健康的影响, 各组间的眼球与总体重相对值、眼球评估、步态分数测试、刺激性保定反应无差异。2012年, Olanrewaju等^[50]进一步研究了递减的光照度(25~0.2 lx)对 Ross308 肉鸡血液酸碱平衡、新陈代谢、电解质的影响, 结果显示, 0.2 lx 显著提高了血液 pH 值和 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量, 但酸碱平衡的改变均在正常范围内。这些研究为通过降低光照度来减少家禽活动、啄癖行为以及能量损耗提供了更多的支持。

1.5 光照多参数对肉鸡生长的影响

在实际生产中, 上述光色、光周期、光照度等光环境因子共同作用并产生影响, 这就需要综合考虑它们之间的交互作用。

1997年, Prayitno等^[51]开展了钨丝灯 2 种光色(红光与蓝光)和 3 种光照度(高、中、低)下 Ross 肉鸡的行走、站立、饮水、攻击性以及展翅行为的比较研究, 结果发现红光下上述行为随光照度的增加而增加, 蓝光无显著差异; 进一步的试验研究表明前期用红光显著增加了行走、觅食、展翅行为, 并能促进生长, 但后期用红光会降低生长速度和骨骼强度; 全蓝光组的步态异常概率最高, 而光照度高的红光能增加肉鸡的活动, 使生长后期腿部畸形率降低, 建议生产中早期应采用具有刺激作用的亮红光。2006年, Kristensen等^[52]研究了两种光源(生物光与暖白光)和两种光照度(5、100 lx)对 Ross 肉鸡生长的影响, 结果表明这些光照条件下肉鸡的生长和腿部健康没有显著差异。

光照度与光周期的交互影响也是科研工作者关心的研究内容。2007年, Lien等^[53]研究了光照度(1、0.1 fc)和光周期(23L 与 18L)对 Ross708 肉鸡生长与屠宰性能的影响, 18L 或 0.1 fc 下的胸肌重量较小, 18L 和 0.1 fc 条件下较好, 光周期与光照度的改变并未引起鸡只的生理应激。2008年, Lien等^[54]继续研究了不同光照度在递增光周期条件下对 Ross508 肉公鸡生长的影响。通过比较饲料消耗量、胸肌重、腿重、翅重, 得出结论, 在递增的光周期下 0.1 fc 比 15 fc 的体重、饲料消耗量、主要部位屠宰重量大。2009年, Lien等^[55]再次研究了连续式

亮光和递增式弱光条件下 Ross 与 Cobb 肉公鸡的生长情况,比较了肉鸡在 2 种照明条件下的体重、胸肌重、腿重、翅膀重,表明递增式的光周期和弱光组合能促进肉鸡的生长,但会降低胸肌的产量。2012 年, Olanrewaju 等^[56]研究白炽灯 3 种光照度(10、5、0.5 lx)和 3 种光周期(连续长光照、固定的间歇光照与短期非间歇光)的相互作用对 Ross708 肉鸡生长性能和屠宰特性的影响,结果显示短期非间歇光组的体重最小,活体增重量、饲料消耗量、屠体重以及胸肌重大于连续长光照组,小于固定间歇光组;说明连续长光照和固定间歇光照都能提高肉鸡生长性能,光照度的影响不显著。

2 蛋鸡与种鸡 LED 光环境调控技术

禽类的视网膜光受体对绿光的刺激很敏感,能够抑制鸡的生殖行为,而视网膜外光受体对红光的敏感能够促进其生殖行为^[61]。因此,据研究,光照刺激产蛋的机理为:光照可刺激视神经、颅骨、松果体作用于下丘脑,下丘脑产生和分泌促性腺激素释放激素(GnRH),再通过垂体门脉系统传至脑下垂体前叶,引起促卵泡素(FSH)和排卵诱导素(OIH)的分泌,促使卵泡生长发育和排卵^[6]。

2.1 光色对蛋鸡与种鸡的影响

蛋鸡和种鸡的开产日龄及性成熟的早晚与不同光色的刺激直接相关,实际生产中,开产日龄和性成熟将会影响鸡群的整体产蛋情况。2007 年, Lewis 等^[57]采用绿色和白色的白炽灯管针对罗曼白母鸡研究发现,在第 6 周时绿光下母鸡的体重显著低于白光,白光比绿光提前一天开产,产蛋量没有显著差别。2011 年, Gongruttanun 等^[58]研究发现 LED 红光补光或全程 LED 红光处理下泰国本地蛋鸡开产日龄显著提前,促进了性发育,在产蛋前期显著增加了产蛋量。2012 年, Kim 等^[59]研究 LED 光色对海兰褐壳蛋鸡的影响,发现红光下母鸡开产日龄显著早于白炽灯和蓝光且产蛋量显著较高,蓝光则显著推迟了开产日龄,说明红光能够促进蛋鸡的性成熟并增加蛋产量。

产蛋性能作为种鸡和蛋鸡生产性能的重要指标参数,受光色的影响较为明显,其中,红光能够显著地增加蛋鸡的产蛋量,已被多项研究证明^[59~62]。鸡蛋品质受不同光色的影响而表现出差异。1987 年, Pyrzak 等^[60]研究了蓝光、绿光、红光、钨丝灯、冷白荧光灯以及模拟太阳光的荧光灯对家鸡生产性能的影响,通过比较总产蛋量、蛋壳质量、蛋黄比率和蛋形认为不同波长的光影响产蛋量、鸡蛋成分以及蛋壳质量。2007 年, 额尔敦木图等^[63]按照周龄进行

多次试验,研究了 LED 光色对海兰褐壳鸡蛋的品质的影响,发现蓝光使鸡蛋长径变小而红光使蛋短径变小,蓝光和红光组蛋重随年龄而增长的趋势小于白光和绿光,绿光组的蛋壳品质最好。2012 年, Kim 等^[59]研究发现 LED 红光下海兰褐壳蛋鸡产蛋的蛋壳厚度显著大于白炽灯和蓝光。

促黄体素(LH)和促卵泡激素(FSH)是禽类体内重要的性激素,不同波长的光能影响促性腺激素释放激素(GnRH)的分泌,进而刺激垂体释放促黄体素以及促卵泡激素,影响种鸡和蛋鸡的性器官发育及产蛋性能。2010 年, Mobarkey 等^[61]采用 LED 绿光和红光对 Cobb 肉种鸡的生产行为的影响进行研究,其中发现绿光降低了产蛋量、血浆卵巢类固醇浓度和促黄体素(LH)浓度,红光则提高了肉种鸡的产蛋量和促性腺激素释放激素-I(GnRH-I)浓度。2011 年, Reddy 等^[62]以 62~72 周龄罗曼白母鸡为研究对象,对比 450 nm 蓝光,发现 650 nm 红光能够提高母鸡体内的促性腺素释放激素(GnRH)、促黄体素(LH)、雌二醇(E2 beta)和孕酮(P4)浓度,降低停产现象发生率,从而提高蛋产量,产蛋后期增产效果尤其明显。2007 年, 额尔敦木图等^[64]分阶段检测并分析了不同 LED 光色下海兰褐壳蛋鸡的血清 LH 和 FSH 值上升维持时间、峰值出现的次数和时间,以及 24 h 昼夜过程中 LH 和 FSH 分泌的变化情况,发现 19~36 周龄,蓝光能够促进 LH 和 FSH 的分泌,37~53 周龄,白光和红光促进 LH 和 FSH 的分泌,24 h 昼夜间各光照组的 LH 和 FSH 峰值(除白光组 FSH 外)均出现在上午,该研究结果为阐明单色光对蛋鸡产蛋性能的作用机理提供了理论依据。2007 年, 额尔敦木图等^[65]研究发现 LED 蓝光促进了海兰褐壳蛋鸡体内 LH 和 FSH 的分泌,使输卵管的分泌功能在较长时间内保持良好状态,进而延长了产蛋高峰期,提高了产蛋性能。

光色同样能够影响蛋鸡的行为活动,2010 年, Mohammed 等^[80]比较了白炽灯泡、荧光灯、高频日光灯、蓝色荧光灯对蛋鸡休息、取食、啄羽、攻击等行为的影响,发现蓝色荧光灯下蛋鸡的活动性更强,啄羽和攻击行为的发生频率高于其他组,荧光灯下蛋鸡的休息时间更长。

2.2 光周期对蛋鸡与种鸡的影响

外界光环境的周期性变化能够刺激禽类生理节律的形成,稳定有效的生理节律将有助于蛋鸡和种鸡产蛋性能,在实际生产中为了获取最大的产蛋性能,各企业根据其生产经验,不同时期采用不同的光周期进行照明。可见,光周期对蛋鸡和种鸡生产性能具有很大的影响。

光照时长能影响家禽的采食、行为活动量,合适的光周期能有效的调控耗料量,获得最佳产蛋量和料蛋比。1999年,古少鹏等^[66]采用10 W白炽灯比较了14、15、16、17 h光照时间下46周龄京白904商品代蛋鸡的产蛋情况,发现17 h光照的产蛋率、蛋重和料蛋比均为最高。2004年,杨具田等^[67]对比了育成期8、10、12 h白炽灯光照对罗曼商品褐壳蛋鸡产蛋的影响,发现10和12 h光照可分别提前5 d和8 d开产,45周龄之前的产蛋量和产蛋数均高于8 h光照;但是72周龄时产蛋量、平均蛋重和饲料利用率均显著下降。

蛋鸡和种鸡不同生长阶段对光照时长的需求不同,育成期光照时间过长或过短都会影响性成熟的发育时间,并影响蛋的产量。2006年,Lewis和Gous^[68]研究了育成期白炽灯6、8、10、16 h持续光照及其对应间歇光照(光照期间每1 h暗45 min,亮15 min,如此循环)对Cobb肉种鸡性成熟及产蛋情况的影响。试验发现间歇光照在42 d时促进肉种鸡的增重,但是49~140 d期间体重更轻;8 h比6 h、10 h光周期下肉种鸡早成熟3~4 d,6~10 h光照比16 h早成熟15 d以上;6~10 h光照平均比16 h光照的产蛋数多13枚、总蛋质量多0.83 kg、单蛋质量小0.5 g。2007年,Lewis和Gous^[69]采用白炽灯,进一步扩大试验,针对Ross308、Ross788、Cobb500和Hybro 4个肉种鸡品种,比较了育成期8 h和14 h光照对肉种鸡的影响,发现14 h光照时长条件下,肉种鸡性成熟推迟了26 d,每只鸡至60周的累积产蛋量少7枚,平均蛋质量虽然增加2.5 g,但是饲料转化率低,且死亡率高。说明肉种鸡不应该在长光照时间条件下饲养。

蛋鸡和种鸡在由育成期进入产蛋期后,为了促进其产蛋,光照时间相应增加,在光周期增加的过程中,其转换模式以及具体的光周期时长都会影响蛋鸡和种鸡的性成熟与产蛋情况。1998年,Robinson等^[70]研究了Shaver Starbro种鸡进入产蛋期后,由8 L转变为15 L光周期分别采用递增或骤增模式,显著影响了黄卵巢内的大卵泡(LYF)的重量,递增模式下母鸡胴体蛋白质中的胴体脂肪含量和灰分含量相对高于骤增模式。2003年,Lewis等^[71]研究发现在荧光灯连续照明模式下,Ross肉种鸡接受11 L光照比8 L光照性成熟早3~8 d,比16 L光照早21 d。2007年,Lewis等^[72]采用白炽灯在69~175 d的不同时间点由8 h照明转变为16 h光周期,发现69、76、83、97 d转变光周期能够延迟肉种鸡的性成熟日龄,111和125 d转变则使性成熟提前。2008年,陈辉等^[73]研究发现产蛋期采用17 h和175 h的光周期

对海兰褐蛋鸡开产日龄具有显著差异($P < 0.05$)。2010年,Lewis等^[74]将21周龄的Ross308肉种鸡从暖白荧光灯8 h光照转换为14 h光照并保持一段时间后恢复8 h光照,14 h光周期分别保持5、10、15、20、25、32 d,分析对应条件下肉种鸡性成熟日龄的差别,认为28 d的短暂增加光照时长能够最大限度的促进肉种鸡的性发育。2010年,Lewis等^[75]将20周龄的Ross308肉种鸡分别养殖在暖白荧光灯的11、12、13、14 h光周期下测定其性成熟日龄,发现肉种鸡的性成熟日龄在11~13 h光照区间逐步提前,13和14 h一致;产蛋量与性成熟显著相关,13 h的产蛋峰值最高,14 h光照在48周龄后的产蛋率急剧下降,平均蛋重正相关于性成熟日龄,负相关于光周期。说明肉种鸡在20周龄时从8 h转变到13 h光周期能获得最大的产蛋性能。

基于多年的研究经验,2008年,Lewis等^[76]将白炽灯照明条件下,均重2.0 kg的20周龄Cobb500肉种鸡从8 h转变为9、9.5、10、10.5、11、11.5、12、12.5、13、14、18 h光照时长进行养殖,4 d后检测血浆促黄体激素(LH)浓度,并记录开产日龄,建立了肉种鸡LH的释放与光照时长的响应曲线,并与开产日龄和光照时长响应曲线对比,发现LH和开产日龄对光周期响应曲线类似,响应曲线在9.5 h骤增(临界时长)且渐近点为13 h(饱和时长),推测认为11~11.5 h光周期能显著改变LH浓度并使开产日龄显著提前。蛋品质是衡量蛋鸡产蛋性能的重要指标,相关指标包括蛋重、蛋壳厚度、哈氏单位等,不同光周期将影响蛋鸡所产鸡蛋的蛋品质。2007年,潘栋等^[77]以海兰褐商品蛋鸡为研究对象,从20周龄开始由8 L光照骤增或每周递增1 h,分别达到11、13、15、17 L的光照制度,发现不同的光增方式及光照时长对产蛋高峰期的蛋品质有一定影响,递增至15 h光照时长的鸡蛋具有最高的浓蛋白高度和哈氏单位,骤增至17 h光照时长的鸡蛋蛋壳厚度最低,光周期渐增模式的鸡蛋蛋壳重高于骤增模式。

2.3 光照度对蛋鸡与种鸡的影响

家禽对光照度高低的反应主要从其行为上进行判断,过高的光照度将强烈刺激家禽,诱发不健康的行为发生;过低的光照度迫使家禽趋向静态而缺乏活动不利于身体的发育。尽管笼养已成为蛋鸡和种鸡规模养殖最主要的养殖模式,光照度对其行为的影响同样明显,并且针对育成期和产蛋期光照度的变化产生相应的影响。2008年,Lewis等^[78]将20周龄的Ross肉种鸡从13、21、44 lx分别转移到23、55、71 lx的暖白荧光灯的环境中进行正交试验,发现在较大光照度条件下的肉种鸡性成熟率逐步提高,至

39周,累积产蛋数并不受转移前光照度的影响,后期光照度成正相关性,并与性成熟的年龄高度相关。2009年,Lewis等^[79]将20周龄的Ross肉种鸡从15、20、45 lx分别转移到25、55、70 lx的暖白荧光灯的环境进行正交试验,发现育成期和产蛋期光照度之间没有显著性交互影响,该试验条件下,产蛋期光照度的改变均能满足种鸡对产蛋的最大生物性需求。2010年,Mohammed等^[80]观察了5 lx和50 lx下蛋鸡行为,发现50 lx条件下蛋鸡的啄羽和攻击行为显著高于5 lx,说明蛋鸡舍应避免使用高光强进行照明。

2.4 光照多参数对蛋鸡与种鸡的影响

有学者综合考虑不同光色和光照度组合,探究其对蛋鸡生产性能以及行为特性的影响。2003年,戚成理等^[81]发现红光和蓝光能有效抑制京白商品蛋鸡的啄癖,且不受光照度增减的影响,大于5 lx的白炽光对鸡的啄癖有明显不良影响,鸡的啄死率与光照度的增加成明显的正相关,且当光照度达到30 lx时,蛋鸡在育成期和产蛋期的啄死率分别为10%和5%,5~10 lx的红光不仅能有效防止鸡的啄癖,产蛋量能够增加5%左右,每只鸡产蛋期的耗料下降4.79 kg,效益十分明显。2007年,Zupan等^[82]将海兰褐蛋鸡暴露在高、低两种光照度以及红、黄两者光色条件进行饲养,研究鸡在产蛋期对蛋巢颜色的选择行为,发现育成期在高光照度红光饲养下的母鸡产蛋时更倾向于选择黄色产蛋巢;低光照度和黄光下的母鸡未发现显著差异。

3 技术难点分析及前景展望

LED光源优点突出,其在农业生产中的应用价值已初步显现。随着深入研究和广泛应用,LED优越性逐渐体现出来,与此同时存在着一些技术难点

亟待解决:①家禽的生长既受光色、光照度与光周期等光环境因子的影响,所产生的影响力评判复杂,又随着家禽生长阶段及其他环境条件变化而变化。因此,针对家禽的不同生长阶段进行各种因素的交互作用和效果综合评判研究非常必要,目前仍是待解决的技术难点。②LED光源的基础特性对研究与应用产生较大影响,如其定向发光及发光效率随着工作时间与环境温度变化而产生波动的特性,都会对实验室研究走向产业化应用产生制约。因此,需要充分考虑家禽规模养殖现场应用集成调控难度的存在与解决方案。③对从速生型品种封闭式养殖模式下获取的技术,存在技术适用问题。针对我国优质原种鸡以及愈来愈受到欢迎的生态化与半生态化养殖模式,也迫切需要进行研究与应用。

从发展前景来看,主要朝着突破技术难点和拓展实际应用两方面发展,今后的研究重点主要集中于以下几点:①进一步探索光色、光照度与光周期等光环境因子尤其是多参数协同作用对家禽生长、生理、行为、健康与品质的影响,遵循家禽在不同生长阶段对光环境需求的共性特征与个性差异,实现个性化和福利化精准控光,将具有很大的研究价值和发展空间。②依托快速发展的LED新兴产业,针对家禽规模养殖环境特点进一步丰富光源光谱与提高产品适用性,重点突破LED光源二次光学设计、LED光环境表征与快速设计、规模应用集成调控等技术,实现LED产业与家禽养殖产业的协同创新。③面向我国家禽规模养殖产业特点,以我国优质原种鸡为研究对象,重点围绕其在不同地域及气候条件下生态化与半生态化规模养殖的LED光环境调控技术,促进传统优质品种的保护与繁衍。

参 考 文 献

- Lewis P D, Morris T R. Poultry and coloured light[J]. *Worlds Poultry Science Journal*, 2000, 56(3): 189~207.
- 刘文奎. 鸡的光照管理技术[J]. *猪与禽*, 1985(1): 18~23.
- Rozenboim I, Robinson B, Rosenstrauch A. Effect of light source and regimen on growing broilers[J]. *British Poultry Science*, 1999, 40(4): 452~457.
- Kristensen H H, Perry G C, Prescott N B, et al. Leg health and performance of broiler chickens reared in different light environments[J]. *British Poultry Science*, 2006, 47(3): 257~263.
- Kristensen H H, Prescott N B, Perry G C, et al. The behaviour of broiler chickens in different light sources and illuminances[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2007, 103(1~2): 75~89.
- Ghuffar A, Khalil-ur-Rahman, Siddique M, et al. Impact of various lighting source (incandescent, fluorescent, metal halide and high pressure sodium) on the production performance of chicken broilers[J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 46(1): 40~45.
- 谢电, 陈耀星, 王子旭, 等. 单色光对肉雏鸡小肠黏膜形态结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 1084~1090. Xie Dian, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effects of monochromatic light on structure of small intestinal mucosa in broilers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 1084~1090. (in Chinese)
- Xie D, Li J, Wang Z X, et al. Effects of monochromatic light on mucosal mechanical and immunological barriers in the small intestine of broilers[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(12): 2697~2704.

- 9 Ciciliot S, Schiaffino S. Regeneration of mammalian skeletal muscle: basic mechanisms and clinical implications [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2010, 16(8): 906 ~ 914.
- 10 Halevy O, Biran I, Rozenboim I. Various light source treatments affect body and skeletal muscle growth by affecting skeletal muscle satellite cell proliferation in broilers [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 1998, 120(2): 317 ~ 323.
- 11 刘文杰, 陈耀星, 王子旭, 等. 单色光对肉鸡肌肉生长、肌纤维发育及血清睾酮水平的影响 [J]. *畜牧兽医学报*, 2008, 39(12): 1759 ~ 1764.
- Liu Wenjie, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effect of monochromatic light on the muscle growth and muscle fiber development and testosterone secretion in broilers [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2008, 39(12): 1759 ~ 1764. (in Chinese)
- 12 Cao J, Liu W, Wang Z, et al. Green and blue monochromatic lights promote growth and development of broilers via stimulating testosterone secretion and myofiber growth [J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2008, 17(2): 211 ~ 218.
- 13 孟冬梅. 不同光色在先减后增的光照制度下对肉仔鸡生产性能的影响 [J]. *国外畜牧学—猪与禽*, 2009, 29(5): 74 ~ 75.
- 14 Rozenboim I, Biran I, Uni Z, et al. The effect of monochromatic light on broiler growth and development [J]. *Poultry Science*, 1999, 78(1): 135 ~ 138.
- 15 曹静, 陈耀星, 王子旭, 等. 2007 单色光对肉鸡生长发育的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2350 ~ 2354.
- Cao Jing, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effect of monochromatic light on broiler growth [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2350 ~ 2354. (in Chinese)
- 16 曹静, 陈耀星, 王子旭, 等. 单色光对肉鸡睾丸形态结构的影响 [J]. *畜牧兽医学报*, 2007, 38(9): 972 ~ 976.
- Cao Jing, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effect of monochromatic light on morphology of testis in broilers [J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2007, 38(9): 972 ~ 976. (in Chinese)
- 17 Xie D, Wang Z X, Dong Y L, et al. Effects of monochromatic light on immune response of broilers [J]. *Poultry Science*, 2008, 87(8): 1535 ~ 1539.
- 18 谢电, 陈耀星, 王子旭, 等. 蓝光对肉鸡免疫应激的缓解作用 [J]. *中国兽医学报*, 2008, 28(3): 325 ~ 332.
- Xie Dian, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Alleviating action of blue light on immune stress in broilers [J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2008, 87(8): 1535 ~ 1539. (in Chinese)
- 19 Sadrzadeh A, Brujeni G N, Livi M, et al. Cellular immune response of infectious bursal disease and Newcastle disease vaccinations in broilers exposed to monochromatic lights [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(46): 9528 ~ 9532.
- 20 Karakaya M, Parlat S S, Yilmaz M T, et al. Growth performance and quality properties of meat from broiler chickens reared under different monochromatic light sources [J]. *British Poultry Science*, 2009, 50(1): 76 ~ 82.
- 21 Ke Y Y, Liu W J, Wang Z X, et al. Effects of monochromatic light on quality properties and antioxidation of meat in broilers [J]. *Poultry Science*, 2011, 90(11): 2632 ~ 2637.
- 22 李西峰, 孟兆宏. 不同光色对肉鸡生产性能的影响 [J]. *山东农业科学*, 1995(3): 50.
- 23 Senaratna D, Samarakone T S, Madusanka A A P, et al. Performance, behaviour and welfare aspects of broilers as affected by different colours of artificial light [J]. *Tropical Agricultural Research and Extension*, 2011, 14(2): 38 ~ 44.
- 24 Senaratna D, Samarakone T S, Madusanka A A P, et al. Preference of broiler chicken for different light colors in relation to age, session of the day and behavior [J]. *Tropical Agricultural Research*, 2012, 23(3): 193 ~ 203.
- 25 Rozenboim I, Biran I, Chaiseha Y, et al. The effect of a green and blue monochromatic light combination on broiler growth and development [J]. *Poultry Science*, 2004, 83(5): 842 ~ 845.
- 26 Cao J, Wang Z, Dong Y, et al. Effect of combinations of monochromatic lights on growth and productive performance of broilers [J]. *Poultry Science*, 2012, 91(12): 3013 ~ 3018.
- 27 Buyse J, Simons P C M, Boshouwers F M G, et al. Effect of intermittent lighting, light intensity and source on the performance and welfare of broilers [J]. *World's Poultry Science Journal*, 1996, 52(2): 121 ~ 130.
- 28 Mahmud A, Saima, Rafiullah, et al. Effect of different light regimens on performance of broilers [J]. *Journal of Animal and Plant Science*, 2011, 21(1): 104 ~ 106.
- 29 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Welfare-compliant lighting regimens for broilers [J]. *Archiv fur Geflugelkunde*, 2010, 74(4): 265 ~ 268.
- 30 Moraes D T, Lara L J C, Baião N C, et al. Effect of lighting programs on performance, carcass yield, and immunological response of broiler chickens [J]. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 2008, 60(1): 201 ~ 208.
- 31 Abreu V M N, Abreu P G, Coldebella A, et al. Curtain color and lighting program in broiler production I—general performance [J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2011, 40(9): 2026 ~ 2034.
- 32 Abreu V M N, Abreu P G, Coldebella A, et al. Curtain color and lighting program in broiler production II—carcass and parts yield and abdominal fat deposition [J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2011, 40(9): 2035 ~ 2038.
- 33 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Photoperiodic responses of broilers. I. Growth, feeding behaviour, breast meat yield, and testicular growth [J]. *British Poultry Science*, 2009, 50(6): 657 ~ 666.
- 34 Schwean-Lardner K, Fancher B I, Classen H L. Impact of daylength on the productivity of two commercial broiler strains [J]. *British Poultry Science*, 2012, 53(1): 7 ~ 18.

- 35 Škrbić Z, Pavlovski Z, Lukić M, et al. The effect of lighting program and type of litter on production and carcass performance of two broiler genotypes[J]. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 2012, 28(4): 807 ~ 816.
- 36 Sanotra G S, Damkjer J L, Vestergaard K S. Influence of light-dark schedules and stocking density on behaviour, risk of leg problems and occurrence of chronic fear in broilers[J]. *British Poultry Science*, 2002, 43(3): 344 ~ 354.
- 37 Ingram D R, Hatten L F, McPherson B N. Effects of light restriction on broiler performance and specific body structure measurements[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2000, 9(4): 501 ~ 504.
- 38 Petek M, Sonmez G, Yildiz H, et al. Effects of different management factors on broiler performance and incidence of tibial dyschondroplasia[J]. *British Poultry Science*, 2005, 46(1): 16 ~ 21.
- 39 杨琳, Minaingar M, 傅伟龙, 等. 不同光照制度对黄羽肉鸡蛋白质沉积及血浆中甲状腺激素浓度的影响[J]. *动物营养学报*, 2000, 12(4): 57 ~ 61.
- Yang Lin, Minaingar M, Fu Weilong, et al. The influence of different lighting regimen on dietary protein retention and plasma T3, T4 concentration in the Shiqiza male broilers[J]. *Acta Zoonutrimenta Sinica*, 2000, 12(4): 57 ~ 61. (in Chinese)
- 40 Schwan-Lardner K, Fancher B I, Gomis S, et al. Effect of day length on cause of mortality, leg health, and ocular health in broilers[J]. *Poultry Science*, 2013, 92(1): 1 ~ 11.
- 41 Downs K M, Lien R J, Hess J B, et al. The effects of photoperiod length, light intensity, and feed energy on growth responses and meat yield of broilers[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2006, 15(3): 406 ~ 416.
- 42 Deep A, Lardner K S, Crowe T G, et al. Effect of light intensity on broiler production, processing characteristics and welfare [J]. *Poultry Science*, 2010, 89(11): 2 326 ~ 2 333.
- 43 Ahmad F, Haq A U, Ashraf M, et al. Effect of different light intensities on the production performance of broiler chickens[J]. *Pakistan Veterinary Journal*, 2011, 31(3): 203 ~ 206.
- 44 Kristensen H H, Aerts J M, Leroy T, et al. Modelling the dynamic activity of broiler chickens in response to step-wise changes in light intensity[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2006, 101(1 ~ 2): 125 ~ 143.
- 45 Alvino G M, Archer G S, Mench J A. Behavioural time budgets of broiler chickens reared in varying light intensities[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2009, 118(1 ~ 2): 54 ~ 61.
- 46 Alvino G M, Blathford R A, Archer G S, et al. Light intensity during rearing affects the behavioural synchrony and resting patterns of broiler chickens[J]. *British Poultry Science*, 2009, 50(3): 275 ~ 283.
- 47 Deep A, Schwan-Lardner K, Crowe T G, et al. Effect of light intensity on broiler behaviour and diurnal rhythms[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2012, 136(1): 50 ~ 56.
- 48 Blathford R A, Klasing K C, Shivaprasad H L, et al. The effect of light intensity on the behavior, eye and leg health, and immune function of broiler chickens[J]. *Poultry Science*, 2009, 88(1): 20 ~ 28.
- 49 Olanrewaju H A, Miller W W, Maslin W R, et al. Effect of varying light intensity on welfare indices of broiler chickens grown to heavy weights[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2011, 10(8): 590 ~ 596.
- 50 Olanrewaju H A, Purswell J L, Collier S D, et al. Effect of varying light intensity on blood physiological reactions of broiler chickens grown to heavy weights[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2012, 11(2): 81 ~ 87.
- 51 Prayitno D S, Phillips C J C, Stokes D K. The effects of color and intensity of light on behavior and leg disorders in broiler chickens[J]. *Poultry Science*, 1997, 76(12): 1 674 ~ 1 681.
- 52 Kristensen H H, Perry G C, Prescott N B, et al. Leg health and performance of broiler chickens reared in different light environments[J]. *British Poultry Science*, 2006, 47(3): 257 ~ 263.
- 53 Lien R J, Hess J B, McKee S R, et al. Effect of light intensity and photoperiod on live performance, heterophil-to-lymphocyte ratio, and processing yields of broilers[J]. *Poultry Science*, 2007, 86(7): 1 287 ~ 1 293.
- 54 Lien R J, Hess J B, McKee S R, et al. Effect of light intensity on live performance and processing characteristics of broilers[J]. *Poultry Science*, 2008, 87(5): 853 ~ 857.
- 55 Lien R J, Hooie L B, Hess J B. Influence of long-bright and increasing-dim photoperiods on live and processing performance of two broiler strains[J]. *Poultry Science*, 2009, 88(5): 896 ~ 903.
- 56 Olanrewaju H A, Purswell J L, Collier S D, et al. Influence of photoperiod, light intensity and their interaction on growth performance and carcass characteristics of broilers grown to heavy weights[J]. *International Journal of Poultry Science*, 2012, 11(12): 739 ~ 746.
- 57 Lewis P D, Caston L, Leeson S. Green light during rearing does not significantly affect the performance of egg-type pullets in the laying phase[J]. *Poultry Science*, 2007, 86(4): 739 ~ 743.
- 58 Gongruttanun N. Influence of red light on reproductive performance, eggshell ultrastructure, and eye morphology in Thai-native hens[J]. *Poultry Science*, 2011, 90(12): 2 855 ~ 2 863.
- 59 Kim M J, Salim H M, Akter N, et al. Effect of monochromatic light on sexual maturity, production performance and egg quality of laying hens[J]. *Avian Biology Research*, 2012, 5(2): 69 ~ 74.
- 60 Pyrzak R, Snapir N, Goodman G, et al. The effect of light wavelength on the production and quality of eggs of the domestic hen [J]. *Theriogenology*, 1987, 28(6): 947 ~ 960.
- 61 Mobarkey N, Avital N, Heiblum R, et al. The role of retinal and extra-retinal photostimulation in reproductive activity in broiler

- breeder hens[J]. *Domestic Animal Endocrinology*, 2010, 38(4): 235~243.
- 62 Reddy I J, David C G, Kiran G R, et al. Pulsatile secretion of luteinizing hormone and GnRH and its relation to pause days and egg production in hens exposed to different wavelengths of light[J]. *Indian Journal of Animal Science*, 2011, 81(9): 919~923.
- 63 额尔敦木图, 陈耀星, 王子旭, 等. 单色光对产蛋鸡蛋品质的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2007, 43(5): 48~51.
- Erdemtu, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effect of monochromatic light on egg quality of laying hens[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2007, 43(5): 48~51. (in Chinese)
- 64 额尔敦木图, 陈耀星, 王子旭, 等. 单色光对产蛋鸡血清中 LH 和 FSH 含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 2 079~2 083.
- Erdemtu, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effect of monochromatic light on the concentration of LH and FSH in the serum of laying hens[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 2 079~2 083. (in Chinese)
- 65 额尔敦木图, 陈耀星, 王子旭, 等. 单色光对蛋鸡产蛋高峰期的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2007, 12(1): 56~60.
- Erdemtu, Chen Yaoxing, Wang Zixu, et al. Effect and mechanism of monochromatic light on the peak period of laying hens[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2007, 12(1): 56~60. (in Chinese)
- 66 古少鹏, 吴丽珍, 景利芳, 等. 不同光照时间对蛋鸡生产性能的影响[J]. *山西农业大学学报*, 1999, 19(1): 39~41.
- 67 杨具田, 赵四喜, 蔡应奎, 等. 光照制度对蛋鸡开产日龄和生产性能的影响研究[J]. *中兽医医药杂志*, 2004(2): 16~18.
- Yang Jutian, Zhao Sixi, Cai Yingkui, et al. Effect of light regimen on age of producing first egg and performance of egg-laying poultry[J]. *Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine*, 2004(2): 16~18. (in Chinese)
- 68 Lewis P D, Gous R M. Various photoperiods and *Biomittent*TM lighting during rearing for broiler breeders subsequently transferred to open-sided housing at 20 weeks[J]. *British Poultry Science*, 2006, 47(1): 24~29.
- 69 Lewis P D, Gous R M. Broiler breeders should not be reared on long photoperiods[J]. *South African Journal of Animal Science*, 2007, 37(4): 215~220.
- 70 Robinson F E, Renema R A, Bouvier L, et al. Effects of photostimulatory lighting and feed allocation in female broiler breeders. 1. Reproductive development[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 1998, 78(4): 603~613.
- 71 Lewis P D, Ciacciariello M, Gous R M. Photorefractoriness in broiler breeders: sexual maturity and egg production evidence[J]. *British Poultry Science*, 2003, 44(4): 634~642.
- 72 Lewis P D, Ciacciariello M, Backhouse D, et al. Effect of age and body weight at photostimulation on the sexual maturation of broiler breeder pullets transferred from 8L:16D to 16L:8D[J]. *British Poultry Science*, 2007, 48(5): 601~608.
- 73 陈辉, 邸科前, 张竞乾, 等. 光照周期对蛋鸡性成熟性状的影响[J]. *畜牧与兽医*, 2008, 40(8): 39~41.
- 74 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Temporary exposure of prepubertal, somatically-mature broiler breeder females to stimulatory photoperiods[J]. *British Poultry Science*, 2010, 51(1): 142~145.
- 75 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Photoperiods for broiler breeder females during the laying period[J]. *Poultry Science*, 2010, 89(1): 108~114.
- 76 Lewis P D, Tyler N C, Gous R M, et al. Photoperiodic response curves for plasma LH concentrations and age at first egg in female broiler breeders[J]. *Animal Reproduction Science*, 2008, 109(1~4): 274~286.
- 77 潘栋, 陈辉, 邸科前, 等. 光照周期对蛋鸡高峰期蛋品质的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2007(7): 95~96.
- 78 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Illuminance, sexual maturation, and early egg production in female broiler breeders[J]. *British Poultry Science*, 2008, 49(6): 649~653.
- 79 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Illuminance and egg production in broiler breeders[J]. *British Poultry Science*, 2009, 50(2): 171~174.
- 80 Mohammed H H, Grashorn M A, Bessei W. The effects of lighting conditions on the behaviour of laying hens[J]. *Archiv fur Geflugelkunde*, 2010, 74(3): 197~202.
- 81 戚咸理, 黄兴国. 不同光色及光照强度对蛋鸡啄癖及生产性能影响的研究[J]. *畜禽业*, 2003(1): 4~5.
- 82 Zupan M, Kruschwitz A, Huber-Eicher B. The influence of light intensity during early exposure to colours on the choice of nest colours by laying hens[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2007, 105(1~3): 154~164.