

季金星. 独立通风笼具两种送风方式的解析 [J]. 中国比较医学杂志, 2019, 29(1): 95-100.
Ji JX. Analysis of two air supply modes for individually ventilated cage systems [J]. Chin J Comp Med, 2019, 29(1): 95-100.
doi: 10.3969/j.issn.1671-7856. 2019. 01. 017

独立通风笼具两种送风方式的解析

季金星

(上海得风建筑设计有限公司, 上海 200233)

【摘要】 目的 针对实验动物设施建设中主流应用的两种独立通风笼具(individually ventilated cage, IVC)系统送风方式的特点进行总结, 分析其不同的适用性。**方法** 根据典型案例, 从安全可靠、空间利用率、运行能耗、监控调节、初投资这五方面对两种送风方式的具体特点进行详细分析。**结果** 针对每一对比项, 比较得出了两种送风方式各自的优缺点。**结论** 两种送风方式各具优势。送风方式 A 适用于较小规模的设施, 适用于对笼盒参数需要分散、灵活调控的项目; 送风方式 B 适用于中大型的设施。

【关键词】 独立通风笼具; 送风方式; 换气次数; 微环境

【中图分类号】 R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856(2019) 01-0095-06

Analysis of two air supply modes for individually ventilated cage systems

Ji Jinxing

(Shanghai Defeng Architectural Design Co., Ltd, Shanghai 200233, China)

【Abstract】 Objective To summarize the characteristics of two main individually ventilated cage (IVC) air supply modes in the construction of laboratory animal facilities, and analyze their different uses. **Methods** According to typical cases, the specific characteristics of the two air supply modes were analyzed in detail by five aspects: safety and reliability, space utilization, operation energy consumption, monitoring and regulation and initial investment. **Results** For each comparison item, the advantages and disadvantages of the two air supply modes were compared. **Conclusions** The two method of air supply had their individual advantages. Air supply mode A is suitable for small-scale facilities and projects that require a decentralized and flexible control of cage parameters. Air supply mode B is suitable for medium-sized and large-scale facilities.

【Keywords】 individually ventilated cage(IVC); air supply mode; air change rate; microenvironment

伴随着国家“健康中国 2030 规划”以及“建设双一流大学战略”的全面深入实施, 作为生物医药行业科研实验和生命科学研究重要支撑条件之一的实验动物设施, 近些年迎来了一波建设热潮。独立通风笼具(individually ventilated cage, IVC)系统, 可为实验动物提供相对稳定且独立的微环境, 同时也能较好地控制动物之间及动物与人之间的交叉感染风险。该系统被广泛地应用在大量的实验动物设施中。在目前各大新建的设施中, IVC 笼具的空调送风主要存在如图 1 所示的两种方式。送风方式 A: IVC 自带主机, 主机从房间取风后, 再向笼具送风。送风方式 B: IVC 不带主机, 屏障设施设置集中专用的送风系统向各笼架送风。本文将从安全可靠、空间利用率、运行能耗、监控调节、初投资这五方面对上述两种送风方式的具体特点和适用性进行分析。

[作者简介] 季金星(1977—), 男, 高级工程师。E-mail: jakyji@126.com

1 安全可靠分析

1.1 送风方式 A

采用该方式,每台控制主机可对一组或多组笼架送风,其笼具送风由每台控制主机上的送风机直接从房间内抽取。笼具送风的来源为对房间空气集中进行冷热、过滤处理的净化空调箱,该空调箱设置必要的备用措施。

在发生故障或污染的情况下,该系统可能存在以下几种风险:

- (1)当房间的集中空调箱发生故障且备用机组也因故障无法有效投入使用时,由于房间的温湿度将失控,因此该空调箱所服务的所有房间、所有笼具内的微环境指标也将失控。
- (2)当房间内的单台控制主机发生故障时,由于控制主机本身没用备用设备,因此由该主机所控制的笼具将受影响,而由其它主机所控制的笼具仍可维持正常工作状态。虽然近年来随着 IVC 产品的生产及制作水平不断提高,大多数品牌的控制主机已经具有比较可靠稳定的运行性能,但市场上依然存在产品质量良莠不齐的现象。若在大型项目中应用送风方式 A,则往往需要设置几百台的 IVC 主机。大量主机均经受着常年不间断运行且无备用设备轮换的考验,无形中会成为大量的故障隐患。

(3)由于 IVC 主机是从房间取风的,因此一旦发生管理事故造成某房间内的空气被污染,则该房间的笼盒内的实验动物也将面临被污染的风险。此外,由于 IVC 笼盒通常被设定为相对房间保持一定正压,因此当某些笼盒内的动物被意外感染时,在正压作用下,通过房间空气这一媒介,各笼盒间也存在交叉感染的风险。在管理人员及时发现污染的情况下,可通过临时将污染笼盒调整为负压来控制交叉感染。当然,在 IVC 主机及笼盒的高效过滤网均不发生渗漏且定期更换的前提下,上述污染风险均在可控的范围内。

1.2 送风方式 B

采用该方式,房间送风与 IVC 笼具送风设置两套完全独立的空调机组,且各自设置相应的备用措施。实际工程中,可在房间送风管与笼具送风管之间设置备用旁通管,旁通管上设置电动定风量阀(见图 1)。该阀门平时常闭,当笼具送风空调箱发生故障且其备用设备也失灵时该阀门自动迅速开启,应急送风。根据《实验动物 环境及设施》(GB 14925-2010)的规定,屏障环境房间的洁净度级别为 7 级^[1],其送风同样须经过初、中、高三级过滤。房间空调送风应急旁通作为 IVC 笼具的送风,可在短时间内基本维持笼具内的微环境指标,包括洁净度指标。

在发生故障的情况下,该系统可能存在以下风

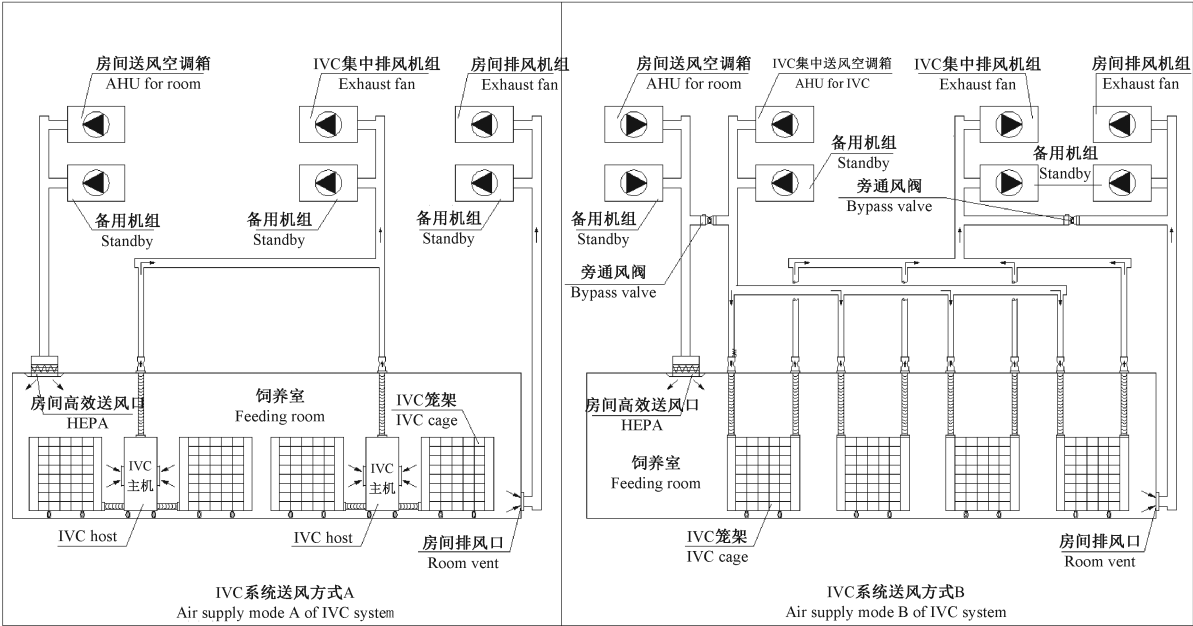


图 1 两种不同送风方式的系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the two different air supply systems

险:当房间送风空调箱及 IVC 笼具送风空调箱均发生故障且各自的备用设备均也因故障无法投入使用时,该空调箱所服务的所有房间内实验动物的微环境指标将失控。

1.3 对比分析

送风方式 B 配置了“房间送风”及“笼具送风”两套完全独立的送风系统,两者互不干扰、互不污染、互不依赖。由于各笼架均不带送风主机,该系统室内不存在大量点位的可能发生故障的风机动力部件及过滤器。通过设置紧急旁通风阀,“房间送风”可在“笼具送风”的备用设备失灵时作为第二备用风系统应急投入使用。送风方式 B 较之送风方式 A,可提供更安全可靠空调通风系统运行保障。

2 室内空间利用率分析

实验动物设施建设难度大、造价高,业主往往希望设施建成后能够尽量多地布置笼具。尤其对

于实验动物生产企业而言,空间的利用率对其产量及利润更是至关重要。下文以一个典型的小鼠饲养房间为例,计算对比采用上述两种送风方式时的室内空间利用率。

对比模型概述:该饲养房间面积为 70.8 m²。采用密集型单面、双面 IVC 笼架。单面笼架尺寸为 1720 mm × 540 mm × 2080 mm(长×宽×高),双面笼架尺寸为 1720 mm × 890 mm × 2090 mm(长×宽×高),IVC 主机尺寸为 470 mm × 660 mm × 2090 mm(长×宽×高)。每个笼盒内的小鼠数量均为 5 只。

采用上述两种不同的笼具送风方式,IVC 笼具的布置示意图 2;其对室内可布置笼盒数量及可饲养小鼠数量的影响见表 1。

由此可见:采用送风方式 B,室内无需设置控制主机,可节省相应的建筑空间,较之采用送风方式 A,其室内空间利用率更高。当然,无论采取那种方式,要想将空间利用率最大化,合理确定房间的尺寸、合理布局 IVC 笼具都是必不可少的。

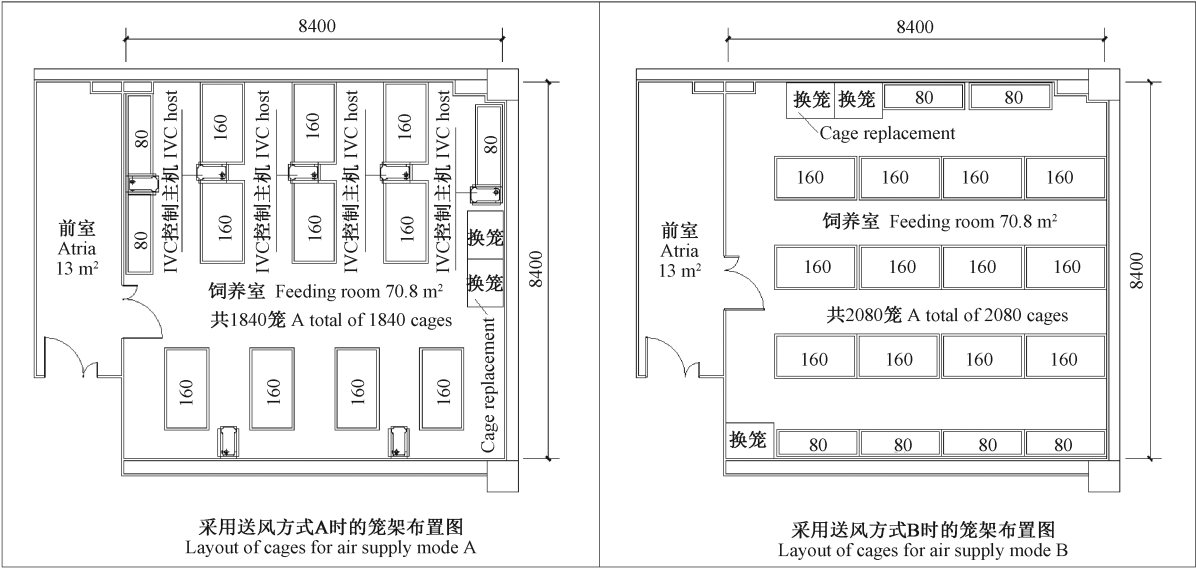


图 2 两种不同送风方式下的笼架布置图
Figure 2 Layouts of cages for the two different air supply modes

表 1 两种不同送风方式下的可布置笼盒数对比			
Table 1 Comparison of the number of cage boxes arranged for the two air supply modes			
对比项 Contrastive terms	送风方式 A Air supply mode A	送风方式 B Air supply mode B	方式 B 对比方式 A 的增量 Increment between mode B and A
可放置笼盒个数 Number of cage boxes	1840	2080	13%
可饲养小鼠总只数 Total number of mice	9200	10 400	13%

3 运行能耗分析

3.1 送风方式 A

采用该方式,空调送风只设置一套系统,其空气处理量为根据房间换气次数要求计算得出的风量。为确保笼盒内的温湿度达标,系统设计时不得不依据笼盒内小鼠的散热及散湿量来计算确定笼盒的进风参数(即房间的温湿度参数)。由于笼盒内小鼠聚集,其单位空间体积的散热散湿量远大于房间,因此以笼盒内的热湿条件来确定房间的空气参数,对于房间而言,空调系统存在过度处理、不节能的情况。

《实验动物 环境及设施》(GB 14925-2010)规定:非工作时间内,出于降低能耗的考虑,房间的最小换气次数可降低到 10 次/h^[1]。然而,当采用送风方式 A 时,则不建议采用降低送风换气次数的做法。IVC 主机进风从房间空气中抽取,该风量在房间总送风量中占较大比例,且通常在非人员工作时段也需保持恒定。若房间换气次数大幅降低而 IVC 进风量不变,为维持房间压力稳定,势必要将房间四周的排风口风量调得很低。此时,房间气流组织的均匀性将受到影响并发生改变,进而会对房间的微环境指标产生不利影响。

3.2 送风方式 B

采用该方式,将房间送风与笼盒送风完全独立开来。房间送风的风量可按扣除笼盒体积后的房间体积乘以规范要求的换气次数计算得出。笼盒的送风量一般以笼盒换气次数 40~60 次/h^[2]为宜。依据上述方法计算得出的整体空调送风量大于采用方式 A 的系统。

采用送风方式 B,笼盒的送风处理参数按照小鼠的散热散湿量来计算确定;而房间的送风参数则可从房间的实际负荷出发,结合人员的热舒适要求

按需配置。其空调系统不存在过度处理的情况。采用这种方式,由于房间与 IVC 笼盒的微环境相对独立,因此在非人员工作时间,可在确保笼盒内换气次数及微环境指标保持不变的前提下,大幅降低房间的送风量从而降低运行能耗。

3.3 对比分析

下文针对上海地区同一典型屏障环境的小鼠饲养室,按照采用上述两种送风方式进行空调送风,分别对其空调处理工况进行计算并分析对比。

3.3.1 对比模型基础数据

(1)饲养条件:房间面积:62 m²,室内净高 2.6 m;笼盒数量:1656 只,每笼小鼠数量:5 只;每只小鼠产热量及散湿量:全热=0.49 W,显热=0.33 W,潜热=0.16 W,散湿量=0.168 g/h^[3]。

(2)笼盒参数:单个笼盒外部尺寸:391 mm × 199 mm × 160 mm,体积:0.0124 m³。

(3)换气次数:房间换气次数取 18 次/h;笼盒换气次数取 40~60 次/h;空调通风采用全新风系统。

(4)笼盒内参数:IVC 笼盒内温湿度设定:23℃,50%,焓值 45.63 kJ/kg,含湿量 8.81 g/kg。

3.3.2 夏季空调冷热量需求

根据上述基础数据,在焓湿图上按照各状态点进行计算后,所得出的夏季空调冷热量需求见表 2~3。

(1)表 2 列出了不同笼盒换气次数设定条件下,采用方式 A 时,计算得出的空调制冷量与再热量。由表中数据可见,随着笼盒换气次数的减少,空调总冷热量下降的趋势并不明显。

(2)由表 2 可见:采用方式 A,为实现笼盒内相对湿度达到 50%,房间内的空气相对湿度必须控制得更低,才能以干燥的空气带走笼盒内动物的散湿量。随着笼盒换气次数的逐级取低,房间空气必须处理得越来越干燥,才能保障笼盒内的相对湿度。

表 2 不同笼盒换气次数下,方式 A 的空调总冷热量需求表

Table 2 Total heat and cold demands of mode A when using different cage air change rates

笼盒换气 次数(次/h) Cage air change rate (times/h)	笼盒风量 (m ³ /h) Cage air volume	房间温度(℃) Room temperature	房间湿度(%) Room humidity	房间风量 (m ³ /h) Room air volume	空调制冷量 (kW) Cooling capacity	空调再热量 (kW) Reheating capacity	总冷热量(kW) Total heat and cold demand
60	1232	23	45	2902	56.22	3.3	59.52
55	1129	23	44.5	2902	56.22	3.1	59.32
50	1027	23	44	2902	56.23	2.9	59.13
45	924	23	43	2902	56.24	2.6	58.84
40	821	23	42	2902	56.26	2.2	58.46

注:在上述计算中,笼盒内温度取 23℃,笼盒内相对湿度取 50%,房间整体换气次数取 18 次/h。
Note. In the above calculation, the temperature in the cage was 23℃, with a relative humidity of 50%, and air change rate of the room of 18 times/h.

表 3 不同笼盒及房间换气次数下,方式 B 的空调总冷热量需求表

Table 3 Total heat and cold demands of mode B when using different cage and room air change rates

笼盒参数		房间换气次数取 18 次/h 时				房间换气次数取 10 次/h 时			
Cage parameters		When room air change rate is 18 times/h				When room air change rate is 10 times/h			
换气次数	风量	房间风量	空调制冷量	空调再热量	总冷热量	房间风量	空调制冷量	空调再热量	总冷热量
(次/h)	(m ³ /h)	(m ³ /h)	(kW)	(kW)	(kW)	(m ³ /h)	(kW)	(kW)	(kW)
Air change rate	Air volume	Room air volume	Cooling capacity	Reheating capacity	Total heat and cold demand	Room air volume	Cooling capacity	Reheating capacity	Total heat and cold demand
(times/h)	volume	volume	capacity	capacity		volume	capacity	capacity	
60	1232	2532	63.9	6.9	70.8	1612	46.4	4.0	50.5
55	1129	2532	62.1	6.5	68.6	1612	44.6	3.7	48.3
50	1027	2532	60.3	6.2	66.5	1612	42.8	3.4	46.2
45	924	2532	58.4	5.8	64.2	1612	40.9	3.0	43.9
40	821	2532	56.6	5.5	62.1	1612	39.1	2.7	41.8

注:在上述计算中,笼盒内温度取 23℃,笼盒内相对湿度取 50%,房间温度取 23℃,房间相对湿度取 60%。
Note. In the above calculation, the temperature in cage was 23°C, with a relative humidity of 50%, room temperature of 23°C, and a relative room humidity of 60%.

(3)表 3 列出了不同笼盒换气次数及房间换气次数设定条件下,采用方式 B 时,计算得出的空调制冷量与再热量。从表中数据可见,随着笼盒换气次数的减少,空调总冷热量下降的趋势较为明显。

(4)采用方式 B,房间的湿度设定无需考虑笼盒的湿度控制需求,两套系统互不制约。

(5)将上述计算数据汇总到图 3,进行对比分析后可知:当房间换气次数均设定为 18 次/h 时,采用方式 B 所消耗的空调冷热量大于方式 A。随着笼盒换气次数逐渐取小,两者的数据差值逐渐缩小。采用方式 B,非工作时间当房间换气次数降低到 10 次/h 时,空调总冷热量需求与采用方式 A(房间换气次数 18 次/h)相比有明显降低,节能效果显著。

4 监控调节手段分析

4.1 送风方式 A

IVC 主机自带可编程逻辑控制器,可实现对笼盒参数的监视、调控。市场上的主流产品通常可实现以下功能:

- (1)对笼盒的温湿度、压差、换气次数进行监视,异常时报警。
- (2)可实现笼盒正负压状态的切换。
- (3)通过监控通讯接口,可实现远程集中监控、远程报警。
- (4)可实现笼盒换气次数的灵活调节。同一饲养室内由不同主机所控制的笼盒可设置不同的换气次数并可随时按需调节。
- (5)当笼架上有部分笼盒未使用时,IVC 主机可根据实际使用笼盒的风量需求来降低主机内风机的运行频率、减少笼架的总送风量,以实现节能运行。

4.2 送风方式 B

IVC 集中送风的系统,通过在各送排风管道上设置温湿度、风量传感器、笼架恒风量阀等,可实现对笼盒温湿度、风量的监控和对笼盒压力的控制。该系统在室内无智能控制器,其可实现的监控功能及调节功能不如送风方式 A 丰富。

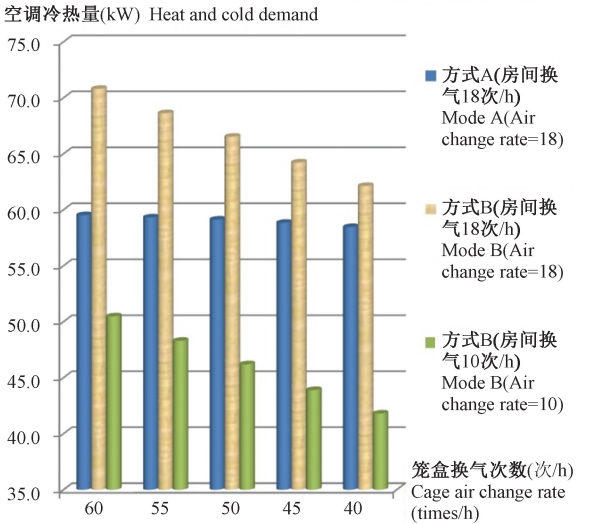


图 3 改变笼盒换气次数时两种方式的空调需求对比

Figure 3 Comparison of air conditioning requirements for the two air supply modes when changing cage ventilation times

5 初投资分析

采用方式 A,项目初投资中增加了 IVC 主机的费用;采用方式 B 则增加了空调箱、管路、风阀等的费用。IVC 主机集成了多项智能化监控与调节功能,其售价不菲,进口品牌尤为突出。下面以一个典型项目为例,对比 A、B 两种方式空调送风系统的初投资,详见表 4。该项目建筑面积约 600 m²,设置大鼠笼位数 490 个,小鼠笼位数 3520 个。

表 4 两种送风方式的空调送风系统初投资对比

Table 4 Comparison of initial investment of air supply systems for the two air supply modes

IVC 主机品牌档次 Brand grade of IVC controller	送风方式 Air supply mode	分项初投资(元) Initial investment in sub item (yuan)					空调送风系统初 投资合计(元) Total initial investment of air supply system (yuan)	初投资 增加率 Increase rate of investment
		空调热泵及附件 Heat pump & accessory	空调箱 Air handling unit	风管 Duct	风口及风阀 HEPA & damper	IVC 主机 IVC controller		
某进口品牌 Imported	方式 A Mode A	612 391	112 000	68 817	55 661	1612 492	2461 361	151%
某国产品牌 Home-made	方式 A Mode A	612 391	112 000	68 817	55 661	608 000	1456 869	48%
/	方式 B Mode B	612 391	162 000	99 134	108 590	0	982 114	/

由表 4 可见,采用送风方式 A 较之方式 B,空调送风系统的初投资明显增加。

6 结论

综上所述,IVC 笼具的这两种空调送风方式各有优缺点:方式 A 在数字化监控调节手段上具有优势;方式 B 则在安全可靠、空间利用率、节能性和初投资合理性上更胜一筹。基于这些特质,上述两种送风方式分别适用于不同类型的项目。

6.1 送风方式 A 适用于较小规模的设施,适用于对笼盒参数需要分散、灵活调控的项目

在较小规模的设施中,往往很难找到足够的空间用以设置多台大尺寸的空调箱。采用方式 A 可减少空调箱及送风管路的设置,可通过在房间内设置多台 IVC 主机将送风设备化整为零。IVC 主机也可灵活且智能化地实现笼盒环境的监控与调节。在小型设施中应用该方式所需设置的 IVC 主机数量不至于过多,其潜在的故障风险点位数及对初投资的影响也相对可控。

6.2 送风方式 B 适用于中大型的设施

一方面,中大型的设施整体能耗基数较大,其

节能潜力更大。采用 IVC 集中送风的系统,在非工作时段可大幅降低空调通风能耗,带来可观的经济效益。另一方面,中大型的设施一旦发生系统故障或污染事故往往会造成重大损失。采用方式 B,风系统具有多重冗余备份且交叉污染的风险更低,具有更高的安全性。

总而言之,只有根据项目的具体特点选择适合的送风方式,方可最大程度地发挥系统优势、创造价值收益。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 14925-2010, 实验动物 环境及设施 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 4.

[2] 赵维波, 闵凡贵, 刘香梅, 等. 外环境湿度和换气次数对独立通风笼盒微环境湿度和氨浓度的影响 [J]. 中国比较医学杂志, 2014, 24(8): 36-40.

[3] 吴美玲, 刘燕敏. 实验动物房开放式笼具系统与独立通风笼具系统的空调能耗分析 [J]. 空调暖通技术, 2014(4): 17-22.

[收稿日期]2018-11-16