

丹麦舍饲散养自然通风奶牛舍的空气环境分析

李保明¹, 施正香¹, G Zhang², 王朝元¹,

H. B. Rom², S. Morsing², J. S. Strom²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2 Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark)

摘要: 近年来, 奶牛全舍饲散养工艺技术被欧美等国家越来越普遍地使用。全舍饲工艺中的舍内空气质量对奶牛的健康和生产性能影响很大, 为较深入了解该工艺中热环境与其它有害气体的相应关系, 通过对丹麦 7 个有代表性奶牛场进行温度、含湿量及几种主要有害气体的现场测试, 对该工艺下舍内空气环境条件进行分析研究。结果表明: 丹麦气候条件下全舍饲的自然通风牛舍, 其舍内热湿状况受舍外温湿度及牛体本身的影响, 在 0~25 范围内, 舍温一般比舍外高 1~3, 舍外温度每升高 1, 舍内温度上升 0.8, 含湿量约增加 1000 mg/m³; 舍内各环境因素之间具有显著的相关性, 温度、含湿量的高低对 NH₃、CO₂、CH₄ 浓度均有影响; 白天, 由于自然通风量较大, 这 3 种气体的平均浓度比夜间低 20% 左右。而 N₂O 在整个测量过程中并未发现显著变化。

关键词: 舍饲散养; 奶牛舍; 自然通风; 氨气

中图分类号: S502; S821.4; S817.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0231-06

0 引言

奶牛舍饲散养工艺 (Freestalls), 近年来在欧美等发达国家得到了快速的推广应用, 尤其是北欧国家, 近年新建的奶牛场基本上采用了这种新的饲养工艺模式。这种饲养模式的突出特点是: 采用无运动场体系的全舍饲饲养方式^[1], 舍内有采食区、躺卧休息区、挤奶间、清粪区等不同功能区, 奶牛可以在舍内自由走动, 自我管理。这种饲养工艺可以为奶牛提供清洁舒适的躺卧床面 (一般奶牛在这里休息 10~14 h/d); 清粪方式一般采用刮板清粪或漏缝地板; 采用 TMR 饲料搅拌车将青贮料和精料送到采食通道及食槽处; 挤奶间直接与牛舍相连。这种饲养工艺因其具有占地面积少、管理方便、奶牛的饲料转化率高等优点而得到了愈来愈多的牛场及生产管理人员的喜爱。但采用全舍饲饲养后, 舍内的空气状况对奶牛的影响很大。关于舍内的空气状况的研究也得到越来越多的重视。Kroodsma et al (1993) 曾对如何减少有漏缝地板的系统的氨气排放进行了一例研究。Braum et al (1997) 对一例有坡度固体地面的系统的氨气排放进行调查。Elzing and Monteny (1997a, 1997b) 就氨气的排放进行了模型试验。Demmers et al (1998; 2001) 就氨气排放及自然通风量的问题进行了探讨。尽管如此, 目前有关奶牛舍饲散养建筑中空气质量状况的系统调查研究的文献仍然缺少。特别是在热环境参数与废气含量及排放量的相关性方面。因此, 本文选取了丹麦的 7 个典型的自然通风奶牛舍, 对其温度、NH₃、CH₄、N₂O、水汽等分别进行了测试分析, 以了解舍饲散养奶牛舍自然通风条件下这些气体的释放和变化规律,

以便为该工艺模式下牛舍的管理和环境调控, 通风系统设置与管理等提供理论依据。

1 材料与方法

丹麦, 作为北欧地区比较典型的海岛国家, 气候温和, 比较适合畜牧业的发展。近年来新发展起来的奶牛场基本采用了舍饲散养工艺模式, 本试验选取其中的 7 个牛场作为试验测试场, 其试验材料与试验方法如下。

1.1 试验牛舍建筑

牛舍建筑特点、建筑尺寸、饲养规模等见表 1 所示。所测试的 7 个奶牛场均采用舍饲散养工艺模式, 不设室外运动场。奶牛全天候在舍内采食、挤奶、休息等各种活动。典型奶牛场的平面布置图如图 1 所示。其中, 各奶牛场的清粪方式为: 第 1、2、5 场采用漏缝地板形式, 漏缝地板下设深粪沟, 每天用排污泵将粪水抽至贮粪池; 第 3、4、6、7 场采用混凝土地面的刮板清粪方式。

1.2 试验测试仪器及方法

气体测试仪器采用 1312 光声多点气体监测仪 (Innova Airtech Instruments); 温度测试采用自动数据采集装置; 其测试点选在奶牛舍长度方向有代表性的之间 20 m, 室内布置 5 个点, 其中分别沿两侧墙附近布置 4 个点, 在中间布置一个点; 室外布置一个点, 距牛舍约 8 m 处。温度每 2 min 记录一次, 气体为每 12 min 检测一次, 连续测试 3~4 d。为分析不同温度条件下的有害气体浓度的变化, 对一些牛场进行了 2 个阶段的测试。具体的测试时间见表 1。

1.3 数据处理

影响舍内气体成分的主要因素包括大气组分及舍内动物新陈代谢及有机物的分解。虽然大气气体组分比较复杂, 也有一定的季节性差异, 但因其含量低且相对稳定, 一般不会对生产造成影响。而动物本身以及有机物分解产生的气体数量多少, 主要取决于饲养动物的种类、数量、饲养密度、营养水平以及温度、通风状况、清粪方式等。尽管 7 个牛场采用相同的舍饲散养工艺, 但在

收稿日期: 2003-06-19 修订日期: 2004-06-25

基金项目: 教育部高等学校优秀青年教师资助项目; 中丹国际合作项目 (DAN DA) 资助 (AM 13: 23-NPP17)

作者简介: 李保明 (1961-), 博士, 教授, 博士生导师, 北京清华东路 17 号 中国农业大学水利与土木工程学院, 农业部设施农业生物环境工程重点开放实验室, 100083, Email: libm@cau.edu.cn

品种、饲养头数、牛个体、生产性能及清粪方式等方面存在一定差异。为消除品种、饲养头数、生产性能造成的差异,本文采用了丹麦学者常用的产热单位 HPU (Heat Production Unit) 作为参数对有关数据进行阐述与分析。1 个 HPU 即代表 1 kW 动物在环境温度为 20 时的产热量。本文中采用的总产热能力是根据以下模型^[12]计算得到的:

$$\text{总产热能力}(W) = \text{总头数} \times 5.2 \times m^{0.75} + \text{泌乳牛头数} \times 30 \times \text{日均泌乳量} \quad (1)$$

采用 HPU 表示,即

$$\text{总产热能力}(HPU) = [\text{总头数} \times 5.2 \times m^{0.75} + \text{泌乳牛头数} \times 30 \times \text{日均泌乳量}] / 1000 \quad (2)$$

式中 m —— 动物质量的平均值, kg。

各牛场的情况和经计算得到的 HPU /头值见表 1。

表 1 测试奶牛场概况

Table 1 Details of the experimental dairy farms

牛场序号	牛舍建筑尺寸长×宽×侧墙高/m×m×m	奶牛数/头	饲养面积/m ² ·头 ⁻¹	奶牛走道地面形式	测试时间/月-日	HPU /头	备注
1	96×16×2.6	159	9.8	漏缝地板	08-15~19	1.49	
		170	9.0	下设深粪沟	10-24~29	1.40	
2	45.9×26.6×3.4	192	6.4	漏缝地板	09-19~24	1.21	
		192	6.4	漏缝地板	11-07~10	1.24	
				下设深粪沟	10-03~08	1.21	在粪沟中加酸
				12-12~16	1.24		
3	67.4×33.8×3.5	165	13.8	混凝土地面	08-22~27	1.51	
		181	12.6	刮板清粪方式	10-31~11-03	1.50	
4	84×27.3×3.6	129	17.8	混凝土地面	09-12~16	1.48	
		122	18.8	刮板清粪方式	11-23~24	1.54	
5	81.9×36.2×4.3	148	20	漏缝地板	08-29~09-02	1.52	
		147	20.2	下设深粪沟	11-14~18	1.37	
6	71×34.1×3.6	105	23.1	混凝土地面	09-26~10-01	1.36	
		115	21.1	刮板清粪方式	12-05~6	1.40	
7	56.2×36×3.0	170	11.9	混凝土地面	10-17~21	1.32	
		180	11.2	刮板清粪方式	12-02~03	1.36	

注: 所有牛舍的屋面坡度均为 20°。

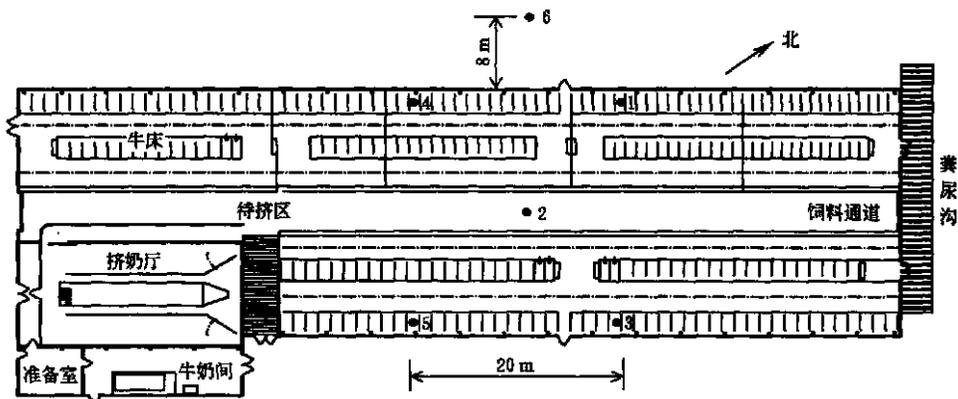


图 1 典型舍饲散养奶牛舍平面与测点布置图

Fig. 1 Schematic diagram of typical dairy freestall housing and the measurement point location

2 结果与分析

2.1 自然通风牛舍温度变化特性

自然通风条件下,舍内外温度变化的趋势基本一致,舍内最高温度出现的时间较舍外延迟 1~2 h。舍内温度主要受外界气温的影响,二者之间呈极显著的线性正相关。当外界温度在 2~26 范围内变化时,舍内外温度之间的关系为:

$$Y = 4.13 + 0.82X \quad (R = 0.955) \quad (3)$$

式中 Y —— 舍内温度; X —— 舍外气温。即气温每升高 1,舍温上升 0.82。由于牛舍的保温隔热作用以

及牛的自身产热,舍内平均温度一般比舍外高 1~3,但温度变化较舍外平缓。一天中,舍内气温日较差一般不超过 5,室外则为 5~10,有的甚至超过 15 (图 2、3)。

2.2 奶牛舍气体含量昼夜变化特性

测试期间,舍内 CO₂、CH₄、NH₃ 的含量均高于舍外,舍内平均含量分别约为舍外的 2 倍、3~6 倍(最大 40 倍)、2 倍,差异十分显著。除 1 场和 3 场外,虽然测定不在同期进行,但自然通风牛舍中,各气体含量比较接近,且呈现明显的昼夜变化(图 4)。虽然 8:00~16:00 是牛一天中活动最为频繁的阶段,但由于白天风力的作

用, 这 3 种气体很易随空气扩散, 因而其含量处于较低的水平; 相反, 18: 00 以后一直到次日 6: 00, 因夜间风力小, 舍内有害气体不易扩散, 因而其含量相对较高。根据连续 3~ 4 d 的测试结果, 白天舍内 3 种气体的浓度平均比夜间低 20% 左右。

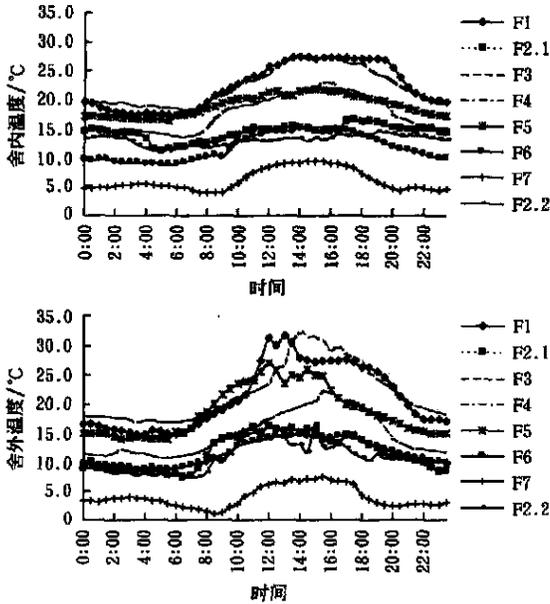


图 2 测试期间舍内外温度变化特性曲线
Fig 2 Temperature variations inside and outside the dairy-cow houses

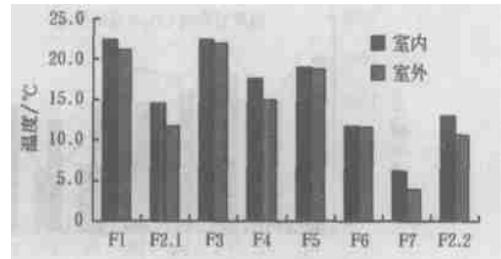


图 3 舍内外平均温度比较
Fig 3 Average temperature inside and outside the dairy-cow houses

N_2O 也是衡量空气质量的指标之一, 一般认为对奶牛生产有一定危害。在对 8 个牛场进行测试后发现, 舍内 N_2O 的含量较低, 一般在 $0.4 \sim 0.8 \text{ mg/m}^3$ 之间, 其浓度高低、昼夜变化与舍外空气基本一致。表明舍内 N_2O 完全由舍外空气所致, 即在自然通风散栏饲养的奶牛生产过程中基本不会对环境排放 N_2O 气体。

2.3 温度与舍内气体含量的关系

图 5 显示了 8 个牛场温度与舍内 NH_3 、 CO_2 浓度的关系。由于 1 场 3 场测试期间的平均舍内温度明显高于其它 6 个场, 超过 22°C , 其 NH_3 含量显著高于其它牛场 ($P < 0.01$)。可见, 高温可促进舍内 NH_3 的释放。当舍温在 20°C 以下时, NH_3 的释放量一般都很少, 约 $1 \sim 3 \text{ mg/m}^3$, 对奶牛生产的影响不大。此外, 舍内 NH_3 含量较高时, 因风力作用扩散至舍外的量也随之增加。试验中, 舍外测点距牛舍 $1 \sim 2 \text{ m}$, 此处空气中的 NH_3 浓度约为舍内 NH_3 浓度的一半 (表 3)。作为呼吸代谢产物, CO_2 释放量的多少主要取决于机体本身, 温度高低对其的影响较小。

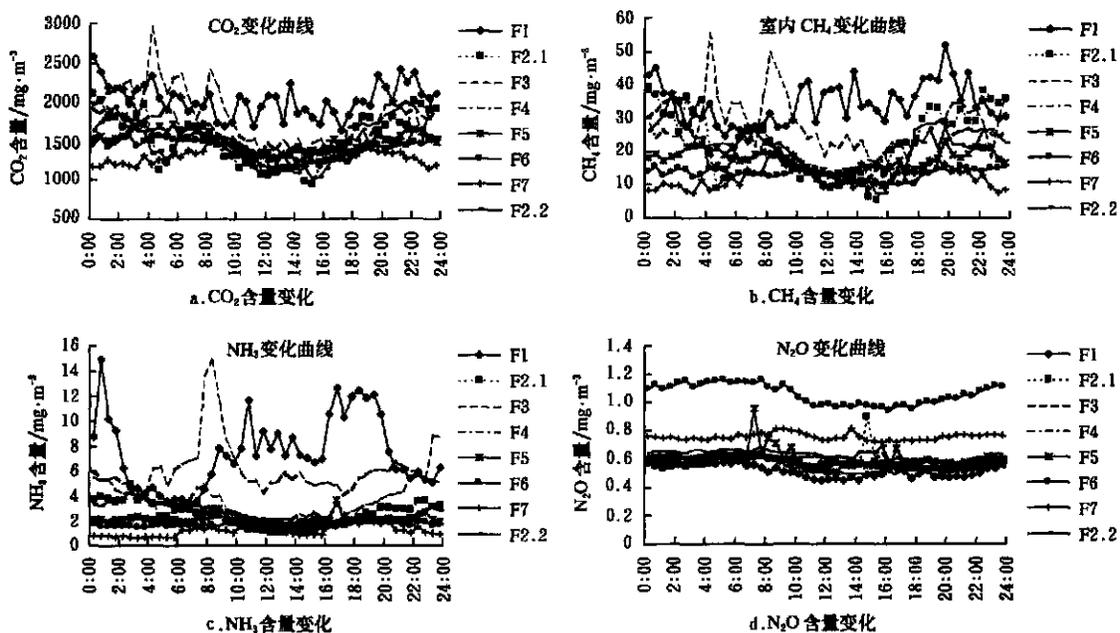


图 4 自然通风牛舍气体浓度的昼夜变化

Fig 4 Contaminant gas concentration changes in the natural ventilation dairy-cow houses during day and night

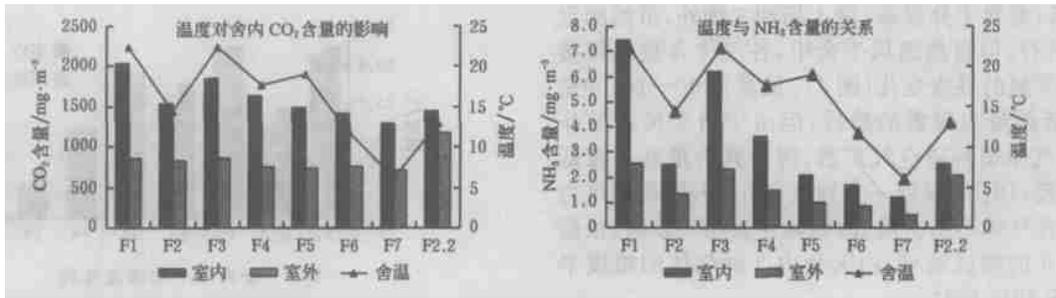


图 5 温度与舍内气体的关系

Fig 5 Relationship between temperature and contaminant gas concentrations inside the dairy-cow houses

温度高低对 CH₄ 气体浓度的变化有很大影响。由图 6 知,随着舍内温度升高,舍内 CH₄ 的排放量亦随之增加,两则之间呈现极显著的线性正相关关系,其相关系数为 0.82 ($r_{0.01(1,8)} = 0.765$)。

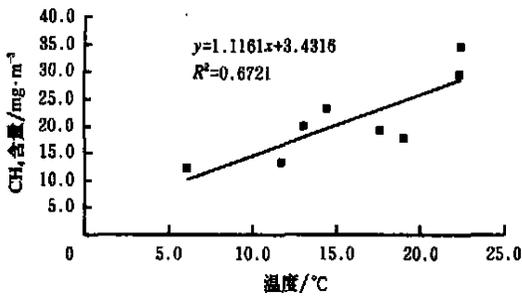


图 6 温度与 CH₄ 的关系

Fig 6 Relationship between temperature and CH₄ concentration

2.4 空气含湿量的变化特性

通常,牛舍内的湿气由舍外空气引入以及牛呼吸道、皮肤及舍内水分蒸发产生。由图 7、8 知,自然通风牛舍中,舍外含湿量对舍内含湿量有较大的影响,但舍内含湿量均高于舍外,且温度每升高 5℃,含湿量约增加 3000~5000 mg/m³。即随着温度升高,牛需要进一步加强机体的潜热散热来维持体温恒定,加之温度升高也会促进舍内水分蒸发,从而使舍内的含湿量更高。

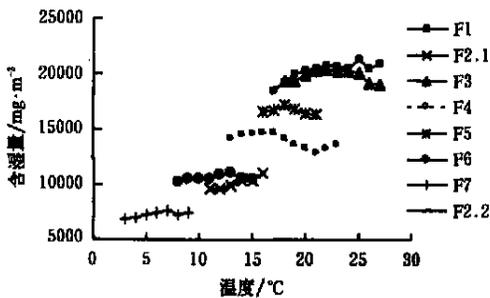


图 7 温度对舍内含湿量的影响

Fig 7 Effect of temperature on moisture content inside and outside the dairy-cow houses

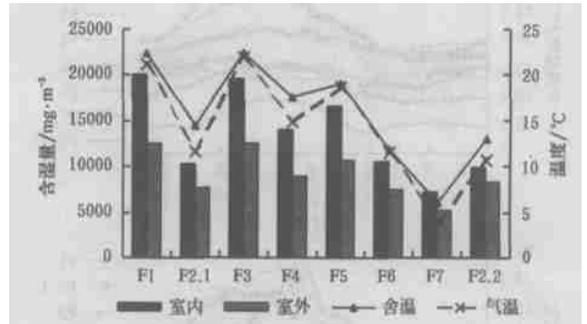


图 8 舍内外含湿量与温度

Fig 8 Moisture and temperature inside and outside the dairy-cow houses

消化代谢越旺盛,CH₄ 产生越多,粪便排泄量越多,因而舍内二种气体的含量亦随之增加。

CO₂、CH₄ 同为代谢产物,且均含有碳,根据营养学原理,二者之间具有一定的相关性。测试结果表明,二者之间存在着如下关系:

$$Y = 0.029X - 28.2 + 0.19T \quad (4)$$

式中 Y—CH₄ 含量,mg/m³; X—CO₂ 含量,mg/m³; T—舍温。即当舍温不变,舍内 CO₂ 每增加 100 mg/m³,CH₄ 浓度升高 2.9 mg/m³;当 CO₂ 含量不变时,舍温每升高 1℃,CH₄ 的浓度提高则 0.19 mg/m³。

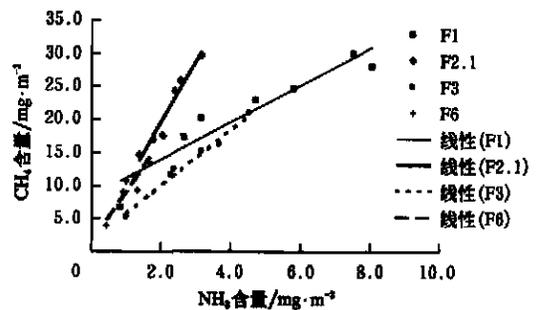


图 9 0~25℃ 下 NH₃ 与 CH₄ 之间的相互关系

Fig 9 Correlation of NH₃ and CH₄ concentration inside the dairy-cow houses at 0~25℃

2.5 各因素间的相关性

牛舍中的 CO₂、CH₄、NH₃ 以及含湿量的多少与动物机体本身密切相关。CH₄ 与 NH₃ 二种气体均为奶牛消化代谢的直接或间接产物。通常,奶牛的采食量越多,

图 9 分析了 4 个场 NH₃ 与 CH₄ 之间的一一对应关系,可以看出,自然通风条件下,二者之间呈现明显的线性正相关关系。回归分析表明,若舍内 NH₃ 含量较少(如不超过 3 mg/m³),则 NH₃ 与 CH₄ 之间存在以下关

系:

$$Y = 3.79 + 5.77X \quad (r = 0.83) \quad (5)$$

即舍内每增加 $1 \text{ mg/m}^3 \text{ NH}_3$, CH_4 的含量约增加 5.77 mg/m^3 。当 NH_3 的浓度超过 4 mg/m^3 时, 则二者之间的回归方程为:

$$Y = 12.49 + 1.90X \quad (r = 0.88) \quad (6)$$

式中 Y —— CH_4 含量, mg/m^3 ; X —— NH_3 含量, mg/m^3 。即舍内 NH_3 含量每增加 1 mg/m^3 , CH_4 的含量约增加 1.90 mg/m^3 。

由于 NH_3 易溶于 H_2O , 同时很易从 H_2O 中重新分解并释放。因此, 舍内含湿量的变化, 在某种程度上对舍内 NH_3 含量产生一定影响。根据实测结果, 可以得出舍内含湿量与 NH_3 含量有如下关系:

$$Y = 0.002X - 1.1 \sim 1.2T \quad (7)$$

式中 Y ——舍内 NH_3 含量, mg/m^3 ; X ——舍内含湿量, mg/m^3 ; T ——舍温, $^\circ\text{C}$ 。即在一定温度下, 舍内含湿量每增加 1000 mg/m^3 , 舍内 NH_3 的浓度升高 2 mg/m^3 。

3 结论

1) 全舍饲饲养工艺的自然通风牛舍, 其舍内热湿状况主要受舍外温、湿度的影响。回归分析表明, 在 $0 \sim 25$ 范围内, 舍外温度每升高 1 , 舍内温度上升 0.8 。由于牛体自身散热作用, 舍内平均温度一般比舍外高 $1 \sim 3$; 舍温每升高 5 , 其含湿量约增加 $3000 \sim 5000 \text{ mg/m}^3$ 。

2) 舍内 CO_2 , NH_3 , CH_4 等 3 种气体呈现明显的昼夜变化, 白天的气体浓度平均比夜间低 20% 左右。

3) 尽管 N_2O 也是空气质量好坏的衡量指标之一, 但舍内该气体的浓度、昼夜变化情况与舍外基本一致, 在整个测量过程中并未发现显著变化。

4) 温度高低对舍内 CH_4 气体的含量有很大影响, 二者之间有着极其显著的相关性。此外, 当舍温超过 20 时, 舍内 NH_3 , CO_2 的释放量有所增加, 但对舍内环境影响不大。

5) 舍内温度、含湿量及 CO_2 , CH_4 , NH_3 等气体的含量多与牛的代谢密切相关, 各因素间有一定的相关性。舍内含湿量的变化, 在某种程度上对舍内 NH_3 含量产生一定影响, 含湿量每增加 1000 mg/m^3 , 舍内 NH_3 的浓度升高 2 mg/m^3 。在一定舍温下, 舍内 CO_2 每增加 100 mg/m^3 , CH_4 浓度升高 2.9 mg/m^3 ; 当 CO_2 含量不变时, 舍温每升高 1 , CH_4 的浓度提高则 0.19 mg/m^3 。此外, 舍内 NH_3 与 CH_4 之间亦具有明显的线性正相关关系。舍内每增加 $1 \text{ mg/m}^3 \text{ NH}_3$, CH_4 的含量约增加 $1.90 \sim 5.77 \text{ mg/m}^3$ 。

总之, 采用全舍饲散养工艺进行奶牛生产时, 舍内各环境因素相互之间有着非常密切的关系。在适宜的饲养密度和温度 ($0 \sim 25$) 下, 利用自然通风, 基本可以获

得较好的环境条件, 以满足奶牛生产需要。

[参 考 文 献]

- [1] Braam C R, Smits M C J, Gunnink H, et al. Ammonia emission from a double-sloped solid floor in a cubicle house for dairy cows [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 68(4): 375- 386
- [2] Demmers T G M, Burgess L R, Short J L, et al. First experiences with methods to measure ammonia emissions from naturally ventilated cattle buildings in the U. K [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(3): 285- 293
- [3] Demmers T G M, Phillips V R, Short L S, et al. Validation of ventilation rate measurement methods and ammonia emission from naturally ventilated dairy and beef buildings in the United Kingdom [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 79(1): 107- 116
- [4] Elzing A, Monteny G J. Ammonia emission in a scale model of a dairy-cow house [J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40: 713- 720
- [5] Elzing A, Monteny G J. Modeling and experimental determination of ammonia emissions rates from a scale model dairy-cow house [J]. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40: 721- 726
- [6] Kroodsma W, Huis J W H, in 't Veld J W H, et al. Ammonia emission and its reduction from cubicle houses by flushing [J]. *Livestock Production Science*, 1993, 35: 293 - 302
- [7] McFarland D F. Freestall Design: Cow recommended refinements [A]. In: Ed. Kevin Janni, *Fifth International Dairy Housing Proceedings of the 29- 31 January 2003* [C]. Fort Worth, Texas USA, P. 131- 138
- [8] Pedersen S, Takai H, Johnsen J O, et al. A comparison of three balance methods for calculating ventilation flow rates in livestock buildings [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(1): 25- 37
- [9] Smits M C J, Valk H, Elzing A, et al. Effect of protein nutrition on ammonia emission from a cubicle house for dairy cattle [J]. *Livestock Production Science*, 1995, 44: 147- 156
- [10] Swierstra D, Braam C R. Grooved floor system for cattle housing: Ammonia emission reduction and good slip resistance [J]. *ASAE Paper*, No. 994012, 1999
- [11] Stefanowska J, Swierstra D, Braam C R, et al. Cow behaviour on a new grooved floor in comparison with a slatted floor, taking claw health and floor properties into account [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2001, 71: 87 - 103
- [12] Strom J S. Heat loss from cattle, swine and poultry as basis for design of environmental control system in livestock buildings [J]. English translation of SB Flandbrugsbyggeri 55, Danish Building Research Institute. 1978

Contaminant gas survey of naturally ventilated dairy-cow freestall houses in Denmark

Li Baoming¹, Shi Zhengxiang¹, G Zhang², Wang Chaoyuan¹, H B. Rom², S. Morsing², J. S. Strom²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Danish Institute of Agricultural Sciences, Hørsholm, Denmark)

Abstract: Dairy freestall housing systems are becoming more and more popular in the United States and Europe. In order to investigate the correlations between the thermal environments and gas emission in this type of buildings, seven typical freestall dairy farms in Denmark were surveyed for temperature, moisture and contaminant gas, in addition to the aerial conditions of the buildings. The results indicated that the temperature and humidity in the naturally ventilated dairy cow buildings were affected by the outside thermal conditions and the livestock in the buildings. When the outside temperature is between 0~25 °C, the inside temperature is usually 1~3 °C higher than outside temperature. The inside temperature and moisture content were found to increase approximately 0.8 °C and 1000 mg/m³, respectively for every 1 °C increase in outside temperature. The NH₃, CO₂, and CH₄ concentrations were affected by temperature and moisture content. During the day hours, the concentrations of NH₃, CO₂, and CH₄ were about 20% lower because of greater natural ventilation. There was no correlation found between N₂O and indoor thermal condition during the measurements.

Key words: freestall breeding; dairy cow house; natural ventilation; ammonia emission