

## 畜牧业肠道甲烷减排的技术措施研究<sup>1</sup>

Eli Saetnan<sup>1</sup>, Jamie Newbold<sup>1</sup>, Dali Nayak<sup>2</sup>, 成艳芬<sup>3</sup>, 朱伟云<sup>3</sup>, 王佳堃<sup>4</sup>, 刘建新<sup>4</sup>, Frank Koslowski<sup>5</sup>, Laura Cardenas<sup>6</sup>, Dominic Moran<sup>5</sup>, 潘根兴<sup>3</sup>, Pete Smith<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aberystwyth University, <sup>2</sup>University of Aberdeen, <sup>3</sup>南京农业大学, <sup>4</sup>浙江大学, <sup>5</sup>Scotland's Rural College, <sup>6</sup>Rothamsted Research

### 摘要:

- 调查了牲畜肠道甲烷的减排措施，其甲烷减排的程度各有不同。
- 中国的畜牧业生产过程中饲料品质低，因而改进放牧管理平均可以减少 11% 甲烷排放量，改进饲料品质平均可以明显减少 5% 甲烷排放量。
- 饲料添加剂可以更进一步减少甲烷的排放，例如添加单宁类和皂苷类物质可以平均减少 11% 的甲烷排放，增加脂类物质也能够减少 15% 的甲烷排放。
- 通过投饲瘤胃抑制剂能够最有效的减少甲烷排放，平均达到了 31% 的减排幅度。不过有些抑制剂可能存在潜在毒性，会产生健康和食物安全问题。

### 一、前言

整个亚洲地区畜牧业温室气体排放量一直在增加，主要是由于瘤胃动物饲养量增加。由于畜禽数量和人口的迅速增长，中国养殖业温室气体排放量的增加最为明显 (Yamaji et al. 2003)。近年来，农业温室气体排放量一直在不断增加，其中大部分的排放量都来自于不断增加的畜牧业生产，而同时期水稻温室气体排放量却呈下降趋势 (Fu & Yu, 2010)。因此畜牧业已经成为温室气体排放的一个重要来源，瘤胃动物肠道甲烷排放已经成为中国第三大甲烷排放源，预计很快将超过水稻生产的甲烷排放 (Dong et al. 2004)。

畜牧业温室气体排放有两大来源，瘤胃动物肠道微生物发酵的甲烷排放和粪便贮存过程中微生物发酵的温室气体排放。如果通过沼气池利用粪便发酵产生的甲烷，粪便发酵可能成为有意义的能源。生物能源（包括沼气）可替代农村能源消耗中 70% 以上的

---

<sup>1</sup>该简报基于中英合作项目“未来中国农业温室气体排放评价与减排措施”的研究结果。该项目由英国环境食品及乡村事务部 (Defra) 和中国农业部的资助。该项目为中英可持续农业创新协作网 (SAIN) 的一部分 (见 [www.sainonline.org](http://www.sainonline.org))

化石燃料 (Ma et al. 2009)。中国官方已出台相关政策增加可再生能源的使用，其中就包括沼气 (Ma et al. 2009)。粪便管理的重点是从少源排放到利用发酵排放。因此，这一政策报告将主要聚焦在肠道甲烷减排，它是农业中甲烷排放的最主要途径。

目前全球已有大量的养殖业肠道甲烷排放减排的方法和措施的研究建树，但针对中国畜牧业生产系统的数据却是寥寥可数。为评估针对中国养殖系统的减排潜力，文中采用多尺度交叉分析的方法对目前全球已有的多种减排措施进行了综合分析。本文不考虑单胃动物的肠道甲烷排放，只关注构成养殖业甲烷排放 90% 以上的反刍动物养殖业。

反刍动物的减排主要分为三大途径：动物调控、日粮调控和瘤胃调控 (Eckard et al. 2010)。本简报主要讨论这三大途径减排的技术潜力。减排的经济成本或实施的限制因素发表在《政策简报 No. 8》。

## 二、动物管理

### 2.1 育种

动物育种是改善养殖业生产效率和产品质量的关键因素。比较不同的动物种群或个体随着时间的变化，甲烷排放看起来不受遗传控制的 (Münger & Kreuzer 2008)。尽管以甲烷减排为目的的育种看起来不是一个有前途的方法，但是通过提高饲料效率的育种，例如改进秸秆饲料吸收，可同时减少单位质量产品 (Wall et al. 2010) 和每头动物 (Alford et al. 2006) 的排放。由于中国养殖系统的生产效率仍较低，提高饲料转化率或生产率的育种总体上有可能利于中国畜牧业进步的。不过，如图 1 所示，目前为止育种进步对甲烷排放 (按每头的排放强度计) 减排的贡献十分有限。

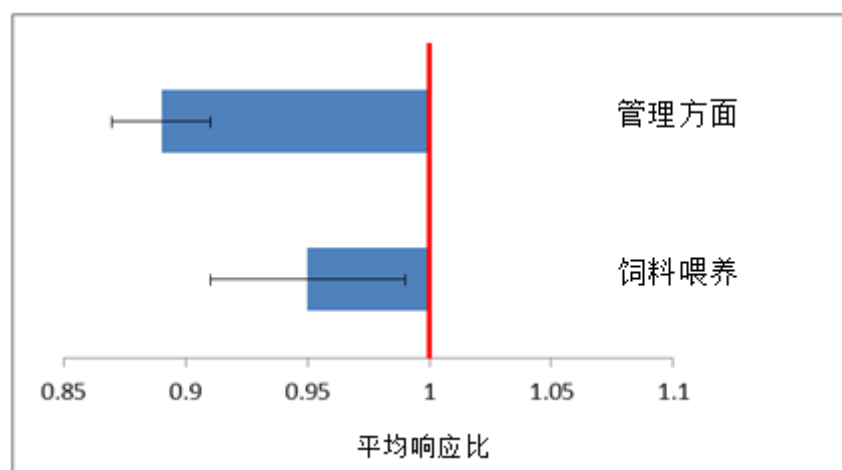


图 1: 图中数据为平均响应比 (处理组占对照组的比例)，基于大尺度现有数据对不同管理方式下抑制甲烷排放的整合分析。其中动物管理数据来源于 8 篇文献的 22 对数据，动物育种来源于 10 篇文献的 15 对数据。

### 2.2 饲养管理

饲草管理能显著提高单位质量产品的甲烷排放减少，这可以通过减少非生产性动物数量，或通过提高增重速率而提早达到屠宰体重而减生育期总排放 (Eckard et al. 2010)。从限制形式改为自由采食形式来提高总采食量和牲畜能量摄取，不仅可以做到更快生长，更可以有效地 (多达 11%) 减少单头牲畜的日甲烷排放量 (图 1)。

### 三、日粮调控

#### 3.1 饲料质量

提高牲畜日粮质量对反刍动物的甲烷排放有着重要的影响。瘤胃中发酵的底物影响着甲烷的生成速率，纤维素发酵速度最慢的会引起最大的单位消化饲料的最高甲烷排放速率。高品质的饲料具有较好的口感，可以提高采食速率。高效的采食率和快速的发酵速率可以减短食物在瘤胃里的滞留时间。从理论上而言，这反而会减少饲料发酵转化为甲烷的比例。同样地，添加浓缩饲料可以改善瘤胃发酵效率，同时减少丙酸的生成同时也就减少了甲烷产生所需要的  $H_2$  数量 (Patra 2012)。中国反刍动物的饲料属于典型的富含纤维素和半纤维素的低消化率类型。通过制成青饲料或其它办法来提高这种进食的可消化性的措施对于单位产品的甲烷排放没有明显的影响 (图 2)。然而减少日粮的粗饲料数量或用一些浓缩剂取代粗饲料对改善甲烷排放的影响是很重要的 (图 2)。

#### 3.2 饲料添加剂

目前已有大量的膳食补充剂可供使用，其中有些已经证实有减少甲烷排放作用，而另外一些还没有明确的减排效果。大部分脂质的添加剂在某种程度上是可以减少甲烷排放的，预计平均减少 15% 甲烷排放 (图 2)。当然，这些作用随添加浓度、添加的脂肪酸类型和日粮背景等因素而异 (Eugène et al. 2008)。添加酵母等益生菌也认为可以通过改变挥发性脂肪酸结构、减少原生动物的数量或者促进乙酸形成来减少甲烷的产生 (Iqbal et al. 2008)。事实上能益生菌甲烷减排效果的直接测定很少，不过益生菌添加剂似乎都不利于甲烷产生 (图 2)。日粮添加二羧酸的包括硝酸盐或延胡索酸盐，这些混合物促进了以甲烷为原料的丙酸合成，从而减少总体的甲烷排放 (Iqbal et al. 2008)。在图 2 所示，这些混合添加剂是反刍动物甲烷减排的最有效方法，不过在小型反刍动物中比牛的效率低。所有饲料管理策略最可能应用于集约化养殖系统中，不过这在中国畜牧业里比重并不大。虽然日粮添加剂在大多数情况下都是有效的，不过在中国的应用却不是很广泛，特别是中国的养殖系统的数据还不多。茶皂素的添加是一个例外，在中国研究界已受到大量的关注。中国是世界上的茶之大国，而且茶生产中的副产品茶粕是一种富含茶皂素的物质 (Wang et al. 2012)。一般来说，单宁酸也包括皂苷认为是可以通过对原生动物的特性来减少甲烷的产生 (Wange et al. 2012)，在图 2 中的所示，这在所有反刍动物中都表现出甲烷减排的有效性。

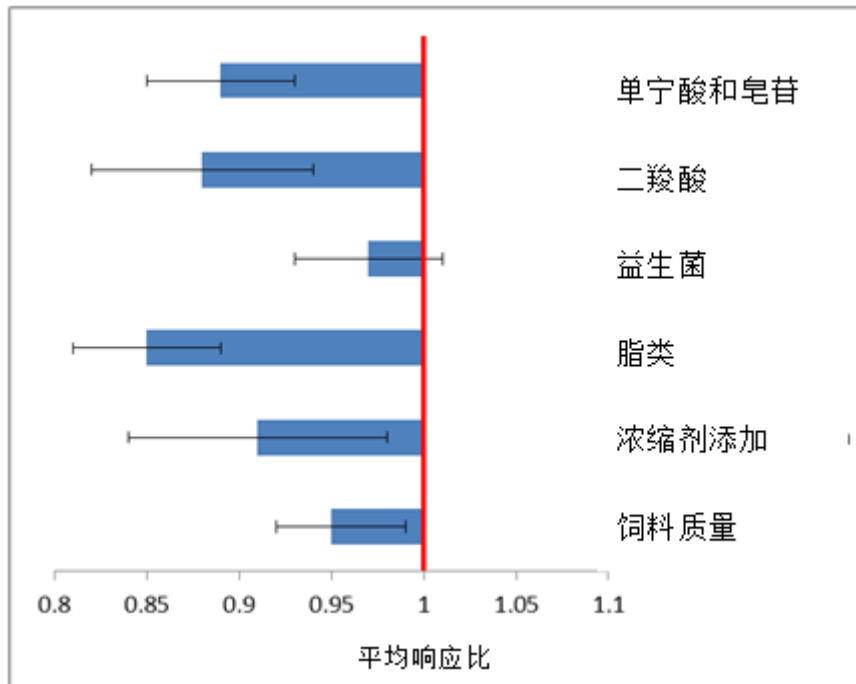


图 2: 图中数据为平均响应比 (处理组占对照组的比例), 基于大尺度现有数据对不同营养补充方法下抑制甲烷排放的整合分析。其中饲料质量数据来源于 24 篇文献的 55 对数据, 浓缩剂添加数据来源于 17 篇文献的 33 对数据, 脂类数据来源于 20 篇文献的 55 对数据, 益生菌数据来源于 5 篇文献的 11 对数据, 二羧酸数据来源于 11 篇文献的 17 对数据, 单宁酸和皂苷数据来源于 22 篇文献的 47 对数据。

## 四、瘤胃调控

### 4.1 化学抑制剂

溴氯甲烷和氯仿等卤代物能高效减少甲烷的产生, 尽管不同产甲烷微生物的反应不同 (McAllister & Newbold 2008)。如图 3 所示, 所有这些合成化合物减排都很有效, 不过它们的影响只是暂时的, 并没有长期减少甲烷产量的显著表现 (McAllister & Newbold 2008)。由于这些化学物质可能具有潜在毒性, 所以也不能认为可以用于食品生产活动中。

### 4.2 离子载体/亲离子基

离子载体是一类专门针对产生  $H_2$  和甲酸的细菌的抗生素化合物, 如莫能菌素。离子载体减少了产甲烷菌所需要的  $H_2$  数量, 从而减少发酵过程中的甲烷排放 (Russel & Strobel 1989)。图 3 可知, 离子载体虽然在短期内是有效的, 但它的平均效果却很小。随着养殖业抗生素过量使用问题日益严峻, 在世界其他地区已经禁用, 因此这些离子载体看起来不能作为中国畜牧业的甲烷减排技术选择。

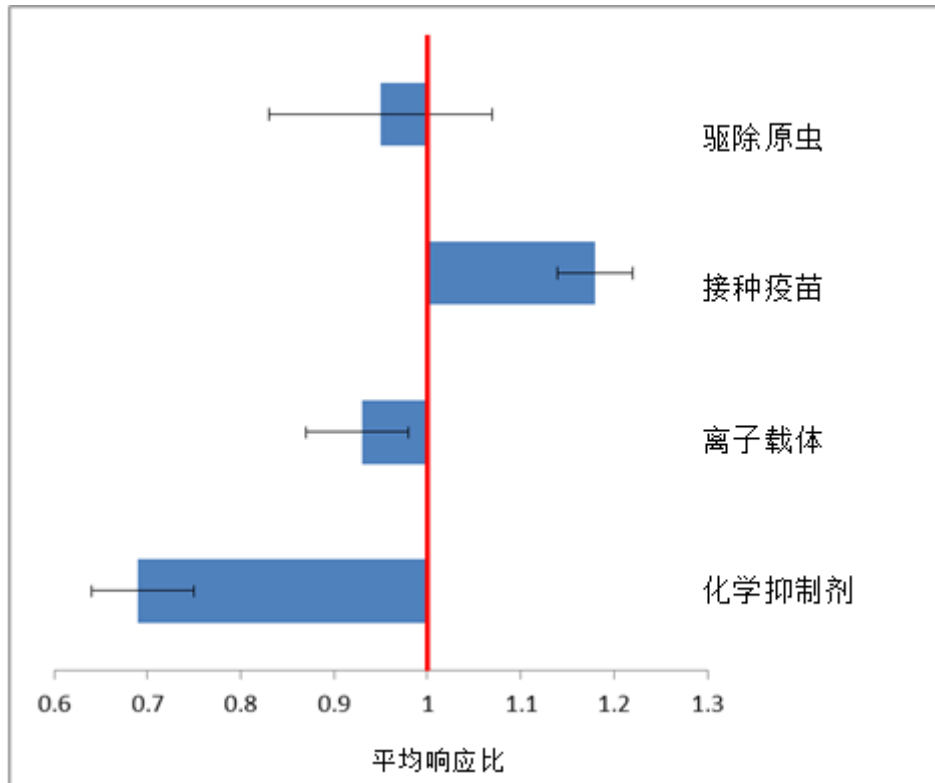


图 3: 图中数据为平均响应比 (处理组占对照组的比例), 基于大尺度现有数据对瘤胃的不同操作方式下抑制甲烷排放的整合分析。其中化学抑制剂数据来源于 4 篇文献的 6 对数据, 离子载体数据来源于 10 篇文献的 16 对数据, 疫苗接种数据来源于 10 篇文献的 16 对数据, 驱除原虫数据来源于 3 篇文献的 6 对数据。

### 4.3 驱除原虫或接种

瘤胃接种 (即从瘤胃生态系统中除去纤毛虫原生动动物) 被认为能显著改变发酵模式和提高养分利用 (Eugène et al. 2004)。进而这被期望能降低发酵时甲烷生产。研究现已开始进入到疫苗对瘤胃产甲烷菌的潜在影响, 目的是降低发酵过程中的甲烷产生

(Williams et al. 2009)。研发永久性的驱虫生物或开发一种抗产甲烷菌的疫苗工程仍在初期的研究阶段, 且目前研究只能从羊进行。迄今为止, 这些策略并还没有被证明是很成功的 (图 3)。

## 五、结论

目前有许多可利用的减排策略已证明能有效的降低反刍动物肠道的甲烷排放量。通过改善育种减少甲烷产量可能没有太大效果, 不过完善饲养管理或改善日粮食等适当的饲养管理的确是有一定效率的。中国畜牧业的饲喂物往往是低质量的饲料, 高纤维且低营养。提高饲料质量对甲烷减排和生产力都具有积极影响。大多数的饲料添加剂或瘤胃调控技术已经评估过其甲烷减排潜力, 尽管效果不同。某离子载体和化学抑制剂等化合物添加, 尽管有效却存在相应的安全隐患, 因此不可能作为普遍采用的技术法。除此之外, 茶皂素补充在中国生产系统中是最有前途的, 因为这些化合物易获取并具有良好的效果食品工业副产品。

到目前为止, 上述结果只讨论了不同缓解方法的技术潜力。这些技术的潜在成本和减排障碍的数据分析发表在《政策简报 No. 8》。

## 参考文献:

- Alford, A. R., Hegarty, R. S., Parnell, P. F., Cacho, O. J., Herd, R. M. & Griffith, G. R. (2006) The impact of breeding to reduce residual feed intake on enteric methane emissions from the Australian beef industry. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **46**, 813-820
- Dong, H., Tao, X., Xin, H. & He, Q. (2004) Comparison of enteric methane emissions in China for different IPCC estimation methods and production schemes. *Transactions of the ASAE*, **47**, 2051-2057
- Eckard, R. J., Grainger, C. & de Klein, C. A. M. (2010) Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science*, **130**, 47-56
- Eugène, M., Archimède, H. & Sauvant, D. (2004) Quantitative meta-analysis on the effects of defaunation of the rumen on growth, intake and digestion in ruminants. *Livestock Production Science*, **85**, 81-97
- Eugène, M., Massé, D., Chiquette, J. & Benchaar, C. (2008) Meta-analysis on the effects of lipid supplementation on methane production in lactating dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science*, **88**, 331-334
- Fu, C. & Yu, G. (2010) Estimation and spatiotemporal analysis of methane emissions from agriculture in China. *Environmental Management*, **46**, 618-632
- Iqbal, M. F., Cheng, Y.-F., Zhu, W.-Y. & Zeshan, B. (2008) Mitigation of ruminant methane production: current strategies, constraints and future options. *World Journal of Microbiological Biotechnology*, **24**, 2747-2755
- Ma, H., Oxley, L. & Gibson, J. (2009) China's energy situation in the new millennium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 1781-1799
- McAllister, T. & Newbold, C. J. (2008) Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **48**, 7-13
- Münger, A. & Kreuzer, M. (2008) Absence of persistent methane emission differences in three breeds of dairy cows. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **48**, 77-82
- Patra, A. (2012) Enteric methane mitigation technologies for ruminant livestock: a synthesis of current research and future directions. *Environmental Monitoring and Assessment*, **184**, 1929-1952
- Russel, J. & Strobel, H. (1989) Effect of ionophores on ruminal fermentation. *Applied Environmental Microbiology*, **55**, 1-6
- Wall, E., Simm, G. & Moran, D. (2010) Developing breeding schemes to assist mitigation of greenhouse gas emissions. *Animal*, **4**, 366-376
- Wang, J.-K., Ye, J.-A. & Liu, J.-X. (2012) Effects of tea saponins on rumen microbiota, rumen fermentation, methane production and growth performance – a review. *Tropical Animal Health and Production*, **44**, 697-706
- Williams, Y. J., Popovski, S., Rea, S. M., Skillman, L. C., Toovey, A. F., Northwood, K. S. & Wright, A.-D. G. (2009) A vaccine against rumen methanogens can alter the composition of archaeal populations. *Applied and Environmental Microbiology*, **75**, 1860-1866

Yamaji, K., Ohara, T. & Akimoto, H. (2003) A country-specific, high-resolution emission inventory for methane from livestock in Asia in 2000. *Atmospheric Environment*, **37**, 4393-4406

附录 1: 表中显示了每种减排方法的平均减排潜力, 单位是 t CO<sub>2</sub>-eq yr<sup>-1</sup>。减排评估结果是基于统计分析全球发布的甲烷减排研究数据而得。减排的总量计算是基于 IPCC 反刍家畜排放因子和 2010 年牲畜普查数据, 假设上述减排策略应用于所有的反刍家畜。

减排方案		% CH <sub>4</sub> 排放减少			最大减排量 (tCO <sub>2</sub> -eq/year)		
		平均值	< 95%	> 95%	平均值	< 95%	>95%
家畜管理							
	育种	5	9	1	680	1224	136
	饲养管理	11	13	8	1495	1767	1088
日粮调控							
	饲料质量	5	9	2	680	1224	272
	浓度增加	9	16	2	1224	2175	272
	脂类补充剂	15	19	11	2039	2583	1495
	益生菌	3	7	-1	408	952	-136
	二羧酸	12	18	6	1631	2447	816
	丹宁鞣和皂苷	11	15	7	1495	2039	952
瘤胃调控							
	化学抑制剂	31	36	25	4214	4894	3399
	离子载体	7	13	2	952	1767	272
	接种疫苗	-18	-14	-22	-2447	-1903	-2991
	驱除原虫	5	17	-7	680	2311	-952