

# 利用芳香族化合物估测反刍动物采食量的潜力

龙瑞军<sup>1,2</sup>, 王元素<sup>2</sup>, 董世魁<sup>3</sup>, 丁玲玲<sup>2</sup>, J. PAGELLA<sup>4</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070;  
3 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875; 4 Universidad Nacional de La Pampa, Argentina)

**摘要:** 综述了芳香族化合物的发现过程、反刍动物饲草料、瘤胃和尿液中芳香族化合物的主要类型及存在形式。马尿酸是最早从家畜排泄物中发现的芳香族化合物。反刍动物的尿液中排出的苯甲酸几乎完全来源于日粮中的前体物。饲料日粮中芳香族化合物是酚酸、简单酚、香豆素、棉子酚、酚的生物碱、类黄酮、单宁酸和木质素。羟基肉桂酸和安息香酸是维管束植物中广泛存在的一类酚类化合物, 其在禾本科牧草中的含量远高于豆科牧草, 但禾谷类籽实中的含量却很低。瘤胃液和尿液中的芳香族代谢物主要是无酚的芳香酸、酚酸和苯酚, 环己烷羧酸是唯一发现的脂环族酸。饲喂不同的日粮饲草料, 反刍家畜以马尿酸形式排出的氮量大约占尿氮总量的 6%, 变化范围为 1% ~ 38%。测定尿中芳香族化合物特别是马尿酸对预测反刍家畜的采食量具有重要潜力和作用。

**关键词:** 反刍动物; 芳香族化合物; 饲草料; 存在形式和前体物; 瘤胃; 尿液

**中图分类号:** S823.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5759(2004)02-0013-10

\* 舍饲家畜采食量的较准确的预测方法已在文献[1]中叙述, 但这些方法对放牧家畜的采食量预测缺乏实用性。相对而言, 测定与饲草料采食水平有直接联系的家畜尿液、血液或粪便中代谢物水平, 能更好地预测放牧家畜的采食量。在尿液成分中, 尿囊素是反刍动物采食量的一个预测指标<sup>[2]</sup>, 尿嘌呤衍生物与反刍动物的采食水平呈正相关关系<sup>[3-6]</sup>, 而最具潜力的采食量预测指标为尿液芳香族化合物<sup>[7-9]</sup>。为了充分说明芳香族化合物在反刍动物采食量预测中的作用原理, 笔者综述了芳香族化合物的发现过程、反刍动物饲草料、瘤胃和尿液中芳香族及其相关化合物的主要类型及存在形式, 为尿液芳香族化合物在反刍动物采食量预测中的实际应用提供理论基础。

## 1 芳香族化合物的发现过程

对尿液芳香族化合物 (aromatic compounds) 的早期研究可追溯到 18 世纪下半叶。Smith 和 Williams 等人对此进行了回顾总结<sup>[10-13]</sup>: Rouelle 第 1 次从奶牛的尿液中分离出马尿酸 (hippuric acid), 即苯甲酸 (benzoic acid) 与甘氨酸 (glycine) 的缩合化合物, 但被误认为是苯甲酸而进行了报道; 几年后, Proust 观测到这种尿代谢物虽然与苯甲酸具有相似的化学性质, 但两者并不是同一物质; 到 1830 年, Liebig 也从马尿中分离出同样的化合物, 并命名为“马尿酸”(希腊语“hippuric”意为“马尿”), 将其描述为含苯甲酰基 (benzoyl group) 和氮的一种代谢物; 几乎与此同时, Ure 和 Keller 从研究中获得有力证据, 证明尿液中的马尿酸是苯甲酸与甘氨酸的缩合化合物, 这一发现树立了动物体内外源化合物代谢及生物合成过程研究的里程碑; 19 世纪中叶, Dessaignes 通过试验研究确定了马尿酸的含氮部分为甘氨酸, 并用苯甲酸和甘氨酸合成了马尿酸; 19 世纪下半叶, Jaffe 证明, 狗口服邻硝基甲苯 (o-nitrotoluene) 后, 从尿液中检测到葡萄糖醛酸 (glucuronic acid) 化合物, 而 Baumann 从尿液中分离苯基硫酸盐 (phenyl sulphate) 时发现了硫酸化合物; 20 世纪初, Magnus-Lévy 从饲喂苯甲酸的绵羊尿液中分离出了苯酰葡萄糖苷酸 (benzoyl glucuronide), 并发现葡萄糖醛酸与羧酸 (carboxylic acids) 能以缩合的形式存在; 通过化合反应第 1 次证明了异生物素 (xenobiotics) 的生物转化, 即在代谢终产物中发现了异生物素; 与此同时, Friedmann 给狗注射环己烷羧酸 (cyclohexanecarboxylic acid) 后, 发现了环己烷羧酸的芳构化; 1904 年, Knoop 在研究苯基脂肪酸 (phenyl fatty acids) 代谢时发现了脂肪酸的  $\beta$  氧化代谢途径。

Scott 等学者撰文指出<sup>[14-16]</sup>, 早在 19 世纪末, Tappeiner 从公牛的瘤胃内容物中检测到了 3-苯基丙酸 (3-phenylpropionic acid); 20 世纪初叶, 一系列的绝食代谢试验表明, 从反刍动物的尿液中排出的苯甲酸几乎完全

\* 收稿日期: 2003-07-11

基金项目: 中科院“百人计划”资助; 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助 (TRAPOYT)。

作者简介: 龙瑞军 (1964-), 男, 吉林农安人, 教授, 博士, 博士生导师。E-mail: lrj@public.lz.gs.cn

来源于日粮中的前体物。M aynard (1937) 发现, 草食动物日粮中马尿酸前体物的含量高于杂食动物 (omnivora) 的日粮; 木质素和经酒精萃取到的未知木质素前体物是形成尿液中马尿酸的前体物<sup>[17, 18]</sup>。Brigl 和 Pfahler (1929) 发现, 用碱化干草饲喂绵羊, 尿液中的马尿酸排量低于对照 (未处理干草)<sup>[19]</sup>。V asiliu 等 (1938) 发现, 给绵羊每天口服 52 mmol 的奎尼酸 (quinic acid), 约一半转化为尿液中的苯甲酸; 同时, 他们发现饲料中含有的奎尼酸, 只有一小部分能转化为尿液中的苯甲酸<sup>[5]</sup>。

20 世纪下半叶, 随着分析技术和试验方法的发展, 该领域的研究取得了重大突破。能量代谢研究表明, 马尿酸是尿液中能氮比 (J/g 氮) 的主要贡献因子; 绵羊试验表明, 增加采食量可以显著提高尿液能氮比, 因此采食量与尿液中马尿酸对应关系比尿液中能氮比的关系更受关注。Black (1971) 认为, 反刍动物尿液中的能氮比高于非反刍动物, 可能是因为反刍动物的尿液中大量的芳香族酸是以与甘氨酸缩合的形式排出的<sup>[20]</sup>; Schiemann 等 (1965) 从绵羊饲养试验研究中发现, 饲料的纤维素含量与尿液的芳香族酸含量关系密切<sup>[21]</sup>。与此同时, Martin 在英国汉纳 (Hannah) 研究所对反刍动物体内芳香化合物的代谢机理作了大量探索性研究<sup>[7-9]</sup>, 通过在绵羊体内研究由苯甲酸与甘氨酸参与合成三磷酸腺苷 (adenosine triphosphate, ATP) 的反应, 预测了合成 ATP 所需的能量消耗。通过对动物口服苯甲酸试验, 观测其合成途径, 几年后, Martin 提出了反刍动物尿液中芳香族酸的大量排出既是动物组织本身的代谢结果, 又是瘤胃微生物强烈发酵的产物<sup>[7]</sup>。Martin 结合他的其他研究, 提出了饲料日粮中的蛋白质、纤维素和木质素是苯甲酸合成的主要前体物这一假说; 同时证实饲料日粮中的奎尼酸、莽草酸 (shikimic acid) 和羟基肉桂酸 (hydroxycinnamic acid) 为尿液中苯甲酸的前体物<sup>[8, 9]</sup>。另外, 由于牧草衰老程度所引起的日粮变化也会影响绵羊尿液中苯甲酸的含量, 当给绵羊的瘤胃和皱胃注入酪蛋白 (casein) 时, 发现尿液中的苯乙酸 (phenylacetic acid) 主要是蛋白质在瘤胃内被微生物降解后的代谢产物<sup>[8]</sup>。而在此之前, 人们普遍认为苯乙酸是瘤胃微生物对苯基丙氨酸 (amino acid phenylalanine) 降解的主要代谢产物<sup>[14, 22]</sup>。

Martin (1973) 最早提出饲料中的羟基肉桂酸是尿液苯甲酸的前体物, 在瘤胃微生物的脱羟基作用下转化为 3-苯基丙酸<sup>[8]</sup>。Hungate 和 Stack (1982) 认为, 瘤胃中发现的 3-苯基丙酸部分来自于苯基丙二酸木质素单体物 (phenylpropanoid lignin monomeric units) 的厌氧性分解和还原<sup>[23]</sup>。Martin (1982) 通过绵羊瘤胃中灌注 3-苯基丙酸、肉桂酸 (cinnamic acid) 和环己烷羧酸的试验, 证实了尿液中的大部分苯甲酸是日粮饲料通过微生物代谢转化为 3-苯基丙酸, 并经肌体组织的  $\beta$  氧化反应产生的<sup>[9]</sup>。其后, 在绵羊瘤胃和皱胃中灌注羟基肉桂酸和羟基-3-苯基丙酸 (hydroxy-3-phenylpropionic acid) 时发现饲料中的羟基肉桂酸在瘤胃微生物代谢作用下容易转化为 3-苯基丙酸。同时, Martin 还证实了饲料的瘤胃微生物代谢羟基苯甲酸 (hydroxybenzoic acids) 时主要是脱羧反应 (decarboxylation), 并伴随着简单酚类的生成; 通过给绵羊瘤胃灌注酪蛋白, 证明了瘤胃中被降解的蛋白质是酚类化合物 (phenolic compounds) 的主要来源, 这一结果与他之前提出的酪氨酸 (amino acid tyrosine) 是酚类化合物前体物的假设相吻合<sup>[8, 9]</sup>。

## 2 反刍家畜饲料中的芳香族及其相关化合物

一般认为, 自然界中芳香族化合物的生物合成仅限于植物和微生物; 少数情况下, 动物也具有利用芳香族前体物合成芳香族化合物的能力, 例如从非芳香甾族 (non-aromatic steroids) 化合物合成雌激素 (oestrogens) 以及从环己烷羧酸合成苯甲酸<sup>[24]</sup>。动物也能合成少量具有重要代谢功能的芳香族化合物, 如儿茶酚胺 (catecholamine)、吲哚胺 (indolamine)、辅酶 Q (ubiquinones)、黑色素 (melanin pigments)、甲状腺素 (thyroid hormones)、甾族雌激素 (steroidal oestrogens) 以及酪氨酸 (tyrosine)<sup>[25]</sup>。动物通过采食饲草料获得维持生命所必需的芳香族氨基酸和具有芳香族化学结构的维生素 E, K, B<sub>2</sub>, B<sub>12</sub> 以及叶酸 (folic acid) 等。

植物饲料含有芳香族化合物, 如酚酸 (phenolic acids)、简单酚 (simple phenols)、香豆素 (coumarins)、棉子酚 (go ssypol)、酚类生物碱 (phenolic alkaloids)、类黄酮 (flavonoid)、单宁 (tannins) 和木质素 (lignin) 等, 因为它们在分子结构上至少含有一个羟基的芳香环, 所以从化学上被定义为酚类物质<sup>[26]</sup>。另外, 在植物体中常见的羟基环己烷羧酸 (hydroxycyclohexanecarboxylic acids) 类化合物, 如奎尼酸和莽草酸, 其生物基因与芳香族氨基酸及酚类物质相关。酚类化合物之所以被视为次生物质, 是因为它们在细胞水平上对植物的生命活动并非必不可少的<sup>[25]</sup>。酚类和羟基环己烷羧酸是植物饲料中无营养价值的化学成分, 即通常所说的异生物素, 也就是说与家畜的

正常能量代谢无关<sup>[11]</sup>。

羟基肉桂酸和羟基苯甲酸是维管束植物(vascular plants)中广泛存在的一类酚类化合物,其遗传机制基于莽草酸(shikimic acid)途径<sup>[26]</sup>。酚酸的生物合成可能发生在植物细胞的细胞质和叶绿体内<sup>[27]</sup>。最为熟知的植物酚酸有 2 类<sup>[28]</sup>,一类是羟基肉桂酸,包括对香豆酸(p-coumaric acid)、阿魏酸(ferulic acid)、咖啡酸(caffeic acid)和芥子酸(sinapic acid);另一类是安息香酸,包括对羟基苯甲酸(p-hydroxybenzoic acid)、香草酸(vanillic acid)、原儿茶酸(protocatechuic acid)和丁香酸(syringic acid)。研究表明这些酸以水溶性结合态存在于植物液泡中,而非

表 1 一些饲草料的主要羟基肉桂酸含量

Table 1 Content of main hydroxycinnamic acids(soluble+ alkali-labile insoluble) in some feedstuffs

饲草饲料 Feedstuff	mmol/kg(DM)			
	p-香豆酸 p-coumaric acid	阿魏酸 Ferulic acid	咖啡酸 Caffeic acid	文献 Reference
苜蓿干草 <i>Medicago sativa</i> hay	3.5~3.8	5.0~5.4	未测出 n.d.	Jung et al, 1983 <sup>[31]</sup>
苜蓿鲜草 <i>M. sativa</i> fresh herbage	6.1	10.8	3.8	Huang et al, 1986 <sup>[32]</sup>
苜蓿茎秆 <i>M. sativa</i> stems	1.5	3.5	0.3	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
百脉根茎秆 <i>Louis corniculatus</i> stems	2.4	2.9	0.4	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
饲用甘蓝 <i>B. rassaica caulorapa</i> herbage	1.2	1.1	0.4	Huang et al, 1986 <sup>[32]</sup>
无芒雀麦干草 <i>B. inemis</i> hay	8.8	9.8	未测出 n.d.	Jung et al, 1983 <sup>[31]</sup>
无芒雀麦茎秆 <i>B. inemis</i> stems	35.5	12.6	0.2	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
草茎秆 <i>Phalaris arundinacea</i> stems	132.8	25.4	0.2	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
燕麦茎秆 <i>Avena sativa</i> stems	63.6	20.3	0	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
小麦茎秆 <i>Triticum aestivum</i> stems	33.2	22.9	0	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	69.3	25.0	0.1	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
苇状羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	11.2~18.4	9.0~12.3	未测出 n.d.	Jung et al, 1983 <sup>[31]</sup>
大麦秸秆 <i>Hordeum vulgare</i> straw	3.9~19.4	2.7~18.1	未测出 n.d.	Salmomsson et al, 1978 <sup>[33]</sup>
稻草 <i>Oryza sativa</i> straw	16.6	6.9	未测出 n.d.	Salmomsson et al, 1978 <sup>[33]</sup>
三芒草 <i>Aristida calycina</i>	24.4	10.3	0	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
孔颖草 <i>B. orthochloa</i> spp.	24.4	10.3	38.8	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
绿毛蒺藜草 <i>Cenchrus ciliaris</i>	194.9	0	0	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
虎尾草 <i>Chloris gayana</i>	18.3	10.3	0	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
画眉草 <i>Eragrostis parviflora</i>	42.6	41.2	0	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
扭黄茅 <i>Heteropogon</i> spp.	12.2~30.5	0~10.3	0~5.5	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
大稷 <i>Panicum maximum</i>	60.9	56.6	0	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
饲用高粱 <i>Sorghum</i> spp.	36.5	10.3	5.5	Lowry, 1990 <sup>[55]</sup>
高粱茎秆 <i>Sorghum</i> spp. stems	157.9	26.0	0.2	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
玉米茎秆 <i>Zea mays</i> stems	177.3	27.0	0.6	Cherney et al, 1989 <sup>[30]</sup>
玉米青贮料 <i>Z. mays</i> silage	60.0	14.6		Jung et al, 1983 <sup>[31]</sup>
扁豆荚 <i>Dolichos lablab</i> pods	0.1	0.1		So su lski, Dabrow ski, 1984 <sup>[34]</sup>
大豆荚 <i>Glycine max</i> pods	0	0.1		So su lski, Dabrow ski, 1984 <sup>[34]</sup>
羽扇豆荚 <i>Lupinus</i> pods	0	0.1		So su lski, Dabrow ski, 1984 <sup>[34]</sup>
去皮小麦 <i>T. aestivum</i> skinned grain	0	0.4	0	So su lski, Dabrow ski, 1984 <sup>[34]</sup>
去皮燕麦 <i>A. sativa</i> skinned grain	0	0.4	0	So su lski, Dabrow ski, 1984 <sup>[34]</sup>
玉米粒 <i>Z. mays</i> grain	0.1	1.6	0	So su lski, Dabrow ski, 1984 <sup>[34]</sup>

DM: 干物质 Dry matter; n.d.: Not determined

水溶性态与细胞壁成分结合或与植物表皮的脂类(lipids)结合;在自然状态下,羟基肉桂酸比其他植物酚酸更广泛地以结合态形式存在<sup>[26]</sup>。这些酸的功能逐渐从分解低等植物中积累的过量芳香类氨基酸的异化作用演化为合成维管植物的细胞结构成分木质素的同化作用<sup>[29]</sup>。从文献报道来看,反刍动物饲料中羟基肉桂酸含量的变化范围为0.1~204.9 mmol/kg(DM);香豆酸是禾本科牧草中最主要的羟基肉桂酸,而其他牧草中则为阿魏酸(表1)。据报道,暖季型禾草比冷季型禾草含有更多的羟基肉桂酸,禾本科牧草的羟基肉桂酸高于豆科牧草<sup>[30]</sup>。一般而言,禾谷类作物中酚酸的含量非常低<sup>[31]</sup>。

作为植物可溶性代谢物,羟基肉桂酸很少有游离态,通常以结合态形式出现<sup>[35]</sup>。酚酸同植物的其他天然成分结合增加了水溶性,因而可以存储于液泡中<sup>[26]</sup>。酯类结合物是植物体内羟基肉桂酸最常见的可溶性物质<sup>[35]</sup>。研究发现羟基肉桂酸以糖、奎尼酸、莽草酸、甲醇、乙醇、长链脂肪醇、丙三醇(glycerol)、异柠檬酸(isocitric acid)、苹果酸(malic acid)、酒石酸(tartaric acid)和萜类醇(terpenoid alcohols)的可溶性酯的形式存在<sup>[26,32]</sup>。植物体内羟基肉桂酸也有其他可溶性形式的氨基(amide)脂肪胺(aliphatic amines)类化合物:如腐胺(putrescine)、游离氨基酸和蛋白质氨基酸等,另外,还包括与糖结合形成的葡糖苷<sup>[26]</sup>。可溶性羟基肉桂酸的浓度随植物的成熟而下降<sup>[7]</sup>。

植物体中难溶于水的羟基肉桂酸通过酯键、醚键和碳碳键与细胞壁和表皮成分结合,细胞壁中的羟基肉桂酸,如香豆酸与阿魏酸,通过酯键与半纤维素、果胶和木质素结合<sup>[36]</sup>。在禾本科牧草中,香豆酸易与木质素结合,而阿魏酸易与半纤维素结合<sup>[37]</sup>。随着禾草成熟度的增加,植物酚酸中香豆酸与阿魏酸的比例升高<sup>[38]</sup>。细胞壁组成中,双子叶植物(dicots)比单子叶植物(monocots)含更多的酯化羟基肉桂酸<sup>[31]</sup>;禾本科牧草比豆科牧草含更多的酯化羟基肉桂酸<sup>[39]</sup>;豆科牧草中,大部分细胞壁酯化羟基肉桂酸可能与果胶结合<sup>[40]</sup>。从禾本科牧草中碱萃取的羟基肉桂酸主要倾向与细胞壁结合,而豆科牧草中则主要与细胞内容物结合<sup>[30]</sup>。植物表皮中的羟基肉桂酸通过酯键与长链羟基脂肪酸结合<sup>[41]</sup>。

水杨酸(salicylic acid)是一种羟基肉桂酸,大量存在于维管束植物如柳属(salix)和杨属(Populus)植物中。在其他维管束植物中虽然也比较普遍,但体组织中的含量通常很低。Jung和Fahey(1983)报道,豆科牧草、冷季禾草、暖季禾草、大豆秸秆、青贮玉米秸秆和稻草等水杨酸的含量低于2 mmol/kg(DM);在植物组织中,它仅存在于细胞腔(cell lumen)<sup>[31]</sup>,并主要以水溶性衍生物如甲基水杨酸盐(methyl salicylate)的形式存在<sup>[42]</sup>。

奎尼酸和莽草酸作为环己胺羧酸的羟基衍生物是植物酚类合成过程的中间产物<sup>[43]</sup>。葡萄糖是合成奎尼酸和莽草酸的前体物,它作为一系列反应的初始底物,参与磷酸烯醇丙酮酸(phosphoenolpyruvic acid)和四磷酸(erythrose-4-phosphate)生物合成的中间过程。莽草酸作为前体物,进一步合成苯基丙氨酸(phenylalanine)、羟基肉桂酸和羟基苯甲酸。植物细胞质和叶绿体中发生的这一系列反应被称为莽草酸途径;奎尼酸似乎是莽草酸途径的一个副产品,但作为脂环族单元(alicyclic units)的储备库可以进一步转化成莽草酸<sup>[44]</sup>。奎尼酸和莽草酸在细胞液泡中主要以水溶状态的酚酸酯(esters of phenolic acids)积累。表2显示,饲草中羟基环己烷羧酸总量的变化范围为0.1~93.0 mmol/kg(DM),其中奎尼酸约占75%。随着植物成熟度的增加,奎尼酸和莽草酸的含量减少<sup>[18]</sup>。就植物种类而言,木本植物如灌木中奎尼酸含量较高,而草本植物如禾本科牧草中奎尼酸含量较低<sup>[48]</sup>。

表2 一些饲草料作物中羟基环己烷羧酸含量

Table 2 Content of hydroxycyclohexanecarboxylic acids in some forages mg/kg(DM)

饲草料 Forage	莽草酸 Shikimic acid	奎尼酸 Quinic acid
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	0	0.2
甘蓝 <i>Brassica caulorapa</i>	0	1.7
多年生黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	2.9~14.4	5.2~78.6
鸡脚草 <i>Dactylis glan erata</i>	8.0~31.0	22.9~64.5
草地羊茅 <i>Festuca pratensis</i>	6.9~14.9	10.99~44.7
紫羊茅 <i>F. rubra</i>	4.6~12.6	10.3~13.8
新西兰翦股颖 <i>Agrostis NZ</i>	2.9~4.0	7.3
梯牧草 <i>Phleum pratense</i>	10.3~13.8	29.1~48.9
稻草 <i>Oryza sativa straw</i>	0.1	0.2
薏苡 <i>Coix lacryma-jobi</i>	0.3	0.4
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	0	0.1
十字马唐草 <i>Digitaria sanguinalis</i>	0.1	0.1

### 3 反刍动物瘤胃中的芳香族和脂环族化合物

在反刍动物瘤胃液中已发现许多芳香族代谢物,包括非酚芳香酸(non-phenolic aromatic acids)、酚酸以及苯酚(phenols)。3-苯基丙酸<sup>[43,44]</sup>、苯乙酸<sup>[9,14,44]</sup>、苯甲酸<sup>[9,14,45]</sup>和肉桂酸<sup>[8,46]</sup>属瘤胃液中的无酚芳香酸。研究发现,在瘤胃液中最丰富的芳香酸是 3-苯基丙酸,其比例占瘤胃总芳香酸含量的 0.60~0.90<sup>[53]</sup>。瘤胃液中 3-苯基丙酸的浓度一般为 0.20~0.90 mmol/L,家畜采食牧草 3~4 h 后达到峰值,随后下降<sup>[51]</sup>。表 3 显示,其他非酚芳香酸在瘤胃液中的浓度为:苯乙酸,0.01~0.65 mmol/L;苯甲酸,0~0.12 mmol/L;肉桂酸,0~0.06 mmol/L。除此之外,在山羊的瘤胃液中还发现苯丙酮酸(phenylpyruvic acid)和 3-苯基乳酸(3-phenyllactic acid)等其他非酚芳香酸<sup>[51]</sup>。

表 3 瘤胃液中主要芳香族酸的含量

Table 3 Content of main aromatic acids in rumen fluid

家畜种 Ruminant livestock species	饲草料种类 Feed	苯甲酸 BA (mmol/L)	苯乙酸 PA (mmol/L)	3-苯基丙酸 PPA (mmol/L)	肉桂酸 CA (mmol/L)	文献 Reference
牛 Cattle	未注明 Not stated	未测出 n d	0.30	0.90	未测出 n d	Patton, Kesler, 1967 <sup>[22]</sup>
牛 Cattle	苜蓿干草 <i>M. sativa</i> hay	未测出 n d	未测出 n d	0.66	未测出 n d	Hungate, Stack, 1982 <sup>[23]</sup>
牛 Cattle	干草 Hay	0	0.50	0.75	0	Marvin <i>et al.</i> , 1996 <sup>[50]</sup>
绵羊 Sheep	干草+ 精料 Hay+ Concentrate	0.05	0.04~0.40	0.30~0.70	0.06	Martin, 1973 <sup>[8]</sup>
绵羊 Sheep	混合粗料 Mixed roughage	未测出 n d	未测出 n d	0.40~0.80	0	Chesson <i>et al.</i> , 1982 <sup>[49]</sup>
绵羊 Sheep	干草+ 甜菜渣 Hay+ <i>Beta vulgaris</i> pulp	0.02	0.01~0.20	0.20~0.40	0	Martin, <i>et al.</i> , 1982 <sup>[9]</sup>
绵羊 Sheep	禾本科干草+ 精料 Grass hay+ Concentrate	0	未测出 n d	0.30~0.60	0	Crem <i>et al.</i> , 1995 <sup>[45]</sup>
山羊 Goat	苜蓿草块+ 精料 <i>M. sativa</i> cubes+ Concentrate	0.07~0.12	0.51~0.65	0.18~0.50	0	Amin <i>et al.</i> , 1995 <sup>[51]</sup>

BA: Benzoic acid; PA: Phenylacetic acid; PPA: 3-phenylpropionic acid; CA: Cinnamic acid; n d: Not determined

研究表明,瘤胃液中浓度低于 0.10 mmol/L 的酚酸包括羟基苯甲酸、羟基苯乙酸(hydroxyphenylacetic acid)、羟基-3-苯基丙酸和羟基肉桂酸。同时,对羟基苯甲酸、水杨酸、香草酸、原儿茶酸和丁香酸也能在瘤胃液中检测到<sup>[31,46]</sup>。对羟基苯乙酸(p-hydroxyphenylacetic acid)是在瘤胃液中发现的唯一的羟基苯乙酸类物质<sup>[50]</sup>。在瘤胃液中还存在 3-(对羟基苯)丙酸 [3-(p-hydroxyphenyl)propionic acid], 3-(间羟基苯)丙酸 [3-(m-hydroxyphenyl)propionic acid], 3-甲氧基-4-羟基苯丙酸 [3-(3-methoxy-4-hydroxyphenyl)propionic acid] 等羟基-3-苯丙酸类化合物<sup>[52]</sup>,同时,瘤胃液中发现的羟基肉桂酸属香豆酸、阿魏酸和 C-阿魏酸<sup>[44,46]</sup>。在瘤胃液中已经检测到了简单的酚类化合物,吲哚(indole)和粪臭素(skatole)<sup>[54]</sup>。环己烷羧酸是瘤胃液中唯一的脂环族酸<sup>[9,23]</sup>,在绵羊体内,环己烷羧酸的浓度高达 0.06 mmol/L<sup>[9]</sup>。

#### 4 反刍动物尿液中的芳香族和脂环族化合物

反刍动物尿液中的芳香族化合物分为非酚芳香酸、酚酸和苯酚。Martin (1969) 进行的研究表明<sup>[7]</sup>,反刍动物尿中芳香族酸(非酚芳香酸和酚酸)的日排泄量为 0.8~12.0 mmol/kg W<sup>0.75</sup>,而在非反刍动物尿液中的日排泄量非常低,仅为 0.1~0.9 mmol/kg W<sup>0.75</sup>。在反刍动物的尿液中约 45%~85% 的芳香酸为苯甲酸及其结合物<sup>[53]</sup>。马尿酸是反刍动物尿代谢物中苯甲酸的主要形式<sup>[56]</sup>。苯乙酸占反刍动物尿代谢物中芳香酸的 3%~40%<sup>[53]</sup>。马尿酸和苯乙尿酸(phenylacetyl glycine)作为甘氨酸与苯甲酸和苯乙酸的缩合形式,是反刍动物尿代谢物中非酚芳香酸的主要部分<sup>[56]</sup>。如表 4 所示,反刍动物尿液中马尿酸的日排泄量为 0.1~5.9 mmol/kg W<sup>0.75</sup>。

表 5 显示,对不同的日粮类型,反刍动物以马尿酸形式排出的氮量约占尿氮总量的 6% (变幅为 1%~32%),对于采食低氮日粮的反刍动物来说,比例会更高<sup>[57]</sup>。反刍动物的尿液中也有芳香酸类结合的葡糖醛酸和少量肉桂酸与甘氨酸缩合化合物排出<sup>[52,53]</sup>。在绵羊尿液所含苯甲酸的总量中,葡糖苷酸结合物(glucuronide conjugate)

表 4 反刍家畜采食不同日粮时尿液中马尿酸的日排量

Table 4 Daily urinary excretion of hippuric acid (HA) in ruminant livestock fed different feedstuffs

		mmol/(kg W <sup>0.75</sup> · d)	
家畜种类	日粮类型	马尿酸	文献
Ruminant livestock species	Dietary feed	HA	Reference
牛 Cattle	牧草 Herbage	1.4~1.7	Carpenter, 1927 <sup>[15]</sup>
牛 Cattle	干草+精料 Hay+Concentrate	1.0~1.7	Carpenter, 1927 <sup>[15]</sup>
牛 Cattle	秸秆 Straw	2.6~3.9	Warth, Das Gupta, 1928 <sup>[46]</sup>
牛 Cattle	干草 Hay	3.5~5.2	Warth, Das Gupta, 1928 <sup>[46]</sup>
绵羊 Sheep	三叶草干草 <i>Trifolium</i> spp. hay	0.7~5.9	Pazur, DeLong, 1948 <sup>[18]</sup>
绵羊 Sheep	禾本科干草 Grass hay	1.2	Martin, 1969 <sup>[7]</sup>
绵羊 Sheep	干草+混合精料 Hay+Concentrate mixture	0.1~0.2	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	苜蓿干草+无芒虎尾草干草 <i>M. sativa</i> hay+ <i>C. gayana</i> hay	0.1	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	草原干草 Veldt hay	0.1~0.3	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	秸秆+谷物精料 Straw+Cereal concentrate	0.8~1.2	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	秸秆+花生粉 Straw+Groundnut	1.4~1.8	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	干草 Hay	1.3~2.2	Martin, 1969 <sup>[7]</sup>
绵羊 Sheep	干草+谷物精料 Hay+Cereal concentrate	0.7~1.4	Martin, 1969 <sup>[7]</sup>
绵羊 Sheep	干草+花生粉 Hay+Groundnut	1.4~3.0	Martin, 1969 <sup>[7]</sup>
绵羊 Sheep	黑麦草 <i>L. perenne</i>	1.2~5.0	Martin, 1969 <sup>[7]</sup>
山羊 Goat	干草 Hay	1.7~2.2	Silanikove, Brosh, 1989 <sup>[56]</sup>
鹿 Deer	干草+谷物精料 Hay+Cereal concentrate	0.8~1.0	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
鹿 Deer	干草+花生粉 Hay+Groundnut	1.5~2.6	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
牦牛 Yak	燕麦干草 <i>A. sativa</i> hay	2.1~2.5	Long, unpublished material
牦牛 Yak	燕麦秸秆 <i>A. sativa</i> straw	1.7~2.4	Long, unpublished material
牦牛 Yak	燕麦秸秆+玉米 <i>A. sativa</i> straw+ <i>Z. mays</i>	1.7~2.0	Long, unpublished material
牦牛 Yak	燕麦秸秆+玉米+尿素 <i>A. sativa</i> straw+ <i>Z. mays</i> +Urea	1.8~3.1	Long, unpublished material

Unpublished material: 未发表资料。

高达 1%<sup>[49]</sup>。在不同日粮饲喂条件下,反刍动物每消耗 1 kg 饲料,从尿液排出的非酚芳香酸分别为<sup>[8]</sup>:苯甲酸(自由+结合态),22~133 mmol;苯乙酸,2~23 mmol;苯基丙酸+肉桂酸,1 mmol。此外,有少量酚酸和环己烷羧酸通过反刍动物的尿液排出<sup>[48]</sup>。当尿液中环己烷羧酸不及芳香族酸总量的 1% 时,酚酸则可以占到芳香族酸总量的 5%~28%<sup>[8]</sup>。反刍动物尿液中的其他芳香族化合物属酚类物质,如酚化合物、对乙基苯酚(*p*-ethylphenol)、苯酚、儿茶酚(catechol)、邻甲氧基苯酚(*o*-methoxyphenol)、对苯二酚(quinol)、间苯二酚(resorcinol)和萘酚(naphthol)<sup>[8]</sup>,这些化合物通常以葡萄糖醛酸和复合硫酸盐的形式排出<sup>[50]</sup>。在绵羊的尿液中,简单酚类物质每天以 0.1~0.4 mmol/kg W<sup>0.75</sup> 的速率排出<sup>[8]</sup>。对于不同日粮,反刍动物每消耗 1 kg 饲料,尿液中排出的最主要的简单酚类物质为:酚化合物,6~16 mmol;儿茶酚,1~2 mmol;苯酚则低于 1 mmol<sup>[8]</sup>。

## 5 结语

反刍动物放牧采食量和采食种类的精确测定一直是困扰草地和畜牧工作者的难题。我国一些学者进行了高山草原放牧绵羊的采食量研究<sup>[59]</sup>,重点集中于草畜间粗蛋白和能量的供求平衡<sup>[60]</sup>。随着人们对草畜互作关系、放牧行为、放牧营养生态学等方面的深入了解和研究,以及相关分析仪器设备的不断改进,放牧采食量的测定方法亦由最初的差减法过渡为瘿管法和内外标记法等,进而发展为目前从植物芳香族化合物的代谢水平上进行探索和研究。芳香族化合物及其衍生物是一类种类繁多、主要以结合态广泛存在于植物体中的植物次生化合物(即异

表 5 反刍动物以马尿酸形式排出的氮比例

Table 5 Proportion of the total urinary nitrogen in hippuric acid (HA) in ruminants

家畜种类 Ruminant livestock species	日粮饲草料组合 Dietary feedstuff combination	马尿酸氮/尿氮 HA nitrogen: urinary nitrogen	文献 Reference
牛 cattle	牧草 Herbage	0.03~0.04	Carpenter, 1927 <sup>[15]</sup>
牛 Cattle	干草+ 精料 Hay+ Concentrate	0.06~0.27	Carpenter, 1927 <sup>[15]</sup>
牛 Cattle	秸秆 Straw	0.22~0.26	Warth, Das Gupta, 1928 <sup>[46]</sup>
牛 Cattle	干草 Hay	0.26~0.31	Warth, Das Gupta, 1928 <sup>[46]</sup>
牛 Cattle	完全营养饲草料 Ration complete in nutrients	0.01~0.07	Morris, Ray, 1939 <sup>[16]</sup>
牛 Cattle	黑麦草 <i>L. perenne</i>	0.03~0.07	Bristow <i>et al.</i> , 1992 <sup>[47]</sup>
牛 Cattle	青贮牧草+ 蛋白质精料 Grass silage+ Protein concentrate	0.04~0.08	Bristow <i>et al.</i> , 1992 <sup>[47]</sup>
绵羊 Sheep	干草+ 熟玉米 Hay+ Flaked maize	0.05	Martin, 1969 <sup>[7]</sup>
绵羊 Sheep	苜蓿+ 无芒虎尾草干草 <i>M. sativa</i> + <i>C. gayana</i> hay	0.06~0.07	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	草原干草 Veldt hay	0.22~0.32	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	秸秆+ 谷物精料 Straw+ Cereal concentrate	0.07~0.11	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
绵羊 Sheep	禾本科牧草 Grass herbage	0.03	Bristow <i>et al.</i> , 1992 <sup>[47]</sup>
绵羊 Sheep	黑麦草+ 白三叶 <i>L. perenne</i> + <i>T. repens</i>	0.03~0.07	Bristow <i>et al.</i> , 1992 <sup>[47]</sup>
山羊 Goat	全营养饲草料 Ration complete in nutrients	0.10~0.21	Morris, Ray, 1939 <sup>[16]</sup>
山羊 Goat	青贮牧草+ 蛋白质精料 Grass silage+ Protein concentrate	0.03~0.05	Bristow <i>et al.</i> , 1992 <sup>[47]</sup>
鹿 Deer	秸秆+ 谷物精料 Straw+ Cereal concentrate	0.08~0.18	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
鹿 Deer	秸秆+ 花生粉 Straw+ Groundnut	0.02~0.03	Topp, Elliott, 1965 <sup>[58]</sup>
牦牛 Yak	燕麦干草 <i>A. sativa</i> hay	0.10~0.12	Long, unpublished material
牦牛 Yak	燕麦秸秆 <i>A. sativa</i> straw	0.05~0.07	Long, unpublished material
牦牛 Yak	燕麦秸秆+ 玉米 <i>A. sativa</i> straw+ <i>Z. mays</i>	0.01~0.02	Long, unpublished material
牦牛 Yak	燕麦秸秆+ 玉米+ 尿素 <i>A. sativa</i> straw+ <i>Z. mays</i> + Urea	0.04~0.05	Long, unpublished material

U npublished material: 未发表资料。

生物素)。自动物尿液中发现马尿酸以来,人们就进行了各种试验研究以探寻排泄物(粪、尿)中芳香族代谢物与反刍动物采食量之间的量化关系。通过大量的体内、体外、半体外以及绝食等系统试验研究证实,瘤胃中驻留的各种芳香族代谢物以及尿液中排出的各类芳香族代谢物源于反刍动物采食的植物饲料中的芳香族前体物,且反刍动物尿液中某些芳香族代谢物如马尿酸等的含量与动物采食纤维性饲料的多少呈显著直线相关。因此,通过研究肠道及瘤胃微生物对饲料芳香族化合物的代谢机理和过程及其在家畜其他组织器官中的转化运输与排泄形式,进一步筛选和发掘具有预测采食量潜力的植物次生化合物,建立其与尿液中相应芳香族代谢物的对应关系模型,达到通过检测家畜尿液中的一种或几种芳香族代谢物的含量即可估测放牧家畜采食量和采食牧草种类的目的。对这些相关研究进展,将在以后的连载文章中分专题报道。

### 参考文献

- [1] 龙瑞军,董世魁,王元素,等.反刍家畜采食量的概念与研究方法[J].草业学报,2003,12(5):8-17.
- [2] Bird P R, Watson M J, Cayley J W D, *et al.* Some new approaches to the determination of pasture intake by cattle[A]. In: Baker S K, Gawthorne J M, Mackintosh J B, *et al.* Ruminant Physiology, Concepts and Consequences: A tribute to R. J. Moir[M]. Perth, Australia: University of Western Australia, 1984. 205-216.
- [3] Vercoe J E. Urinary allantoin excretion and digestible dry-matter intake in cattle and buffalo[J]. Journal of Agricultural Science, 1976, 86: 613-615.

- [4] Chen X B, Chen Y K, Franklin M F, *et al*. The effect of feed intake and body weight on purine derivative excretion and microbial protein supply in sheep [J]. *Journal of Animal Science*, 1992, 70: 1534-1542
- [5] Vasiliu H, Timosencu A, Zaimov C, *et al*. The non-nitric mother substances of hippuric acid. The behavior of quinic acid and of other substances in the animal organism [J]. *Chemical Abstracts*, 1938, 32: 8514
- [6] Long R J, Dong S K, Chen X B, *et al*. Preliminary studies on urinary excretion of purine derivatives and creatinine in yaks (*Bos grunniens*) [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1999, (133): 427-431.
- [7] Martin A K. Urinary excretion of aromatic acids by sheep given diets containing different amounts of protein and roughage [J]. *British Journal of Nutrition*, 1969, 23: 389-399
- [8] Martin A K. The urinary aromatic acids excreted by sheep given S24 perennial ryegrass cut at six stages of maturity [J]. *British Journal of Nutrition*, 1973, 24: 943-959
- [9] Martin A K, Milne J A, Moberly P. The origin of urinary aromatic compounds excreted by ruminants. IV: The potential use of urine aromatic acid and phenol outputs as a measure of voluntary food intake [J]. *British Journal of Nutrition*, 1982, 49: 87-99
- [10] Smith R L, Williams R T. History of the discovery of the conjugation mechanisms [A]. In: Fishman W H. *Metabolic Conjugation and Metabolic Hydrolysis (Volume 1)* [M]. New York, USA: Academic Press, 1970: 1-19
- [11] Caldwell J. Conjugation mechanisms of xenobiotic metabolism: mammalian aspects [A]. In: Paulson G D, Caldwell J, Hutson D H, *et al*. *Xenobiotic Conjugation Chemistry* [M]. Washington, D C, USA: American Chemical Society, 1986: 2-28
- [12] Hutt J H, Caldwell J. Amino acid conjugation [A]. In: Mulder G J. *Conjugation Reactions in Drug Metabolism: An Integrated Approach* [M]. London, UK: Taylor and Francis, 1990: 273-305
- [13] Williams R T. *Detoxication Mechanisms. The Metabolism and Detoxication of Drugs, Toxic Substances and Other Organic Compounds (Second Edition)* [M]. London, UK: Chapman and Hall, 1959
- [14] Scott T W, Ward P F V, Dawson R M C. The formation and metabolism of phenyl-substituted fatty acids in the ruminant [J]. *Biochemical Journal*, 1964, 90: 12-24
- [15] Carpenter T M. The composition of the urine of steers as affected by fasting [J]. *American Journal of Physiology*, 1927, 81: 519-551
- [16] Morris S, Ray S C. The fasting metabolism of ruminants [J]. *Biochemical Journal*, 1939, 33: 1217-1230
- [17] Maynard L A. *Animal Nutrition (First Edition)* [M]. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1937
- [18] Pazur J H, DeLong W A. Effect of lignin content and stage of maturity of dry clover forage on the urinary excretion of aromatic acids by sheep [J]. *Scientific Agriculture*, 1948, 28: 39-46
- [19] Brigl P, Pfähler A. Zur Herkunft der Hippursäure im Harn des Pflanzenfressers [J]. *Tierernährung*, 1929, 1: 30-36
- [20] Black J L. A theoretical consideration of the effect of preventing rumen fermentation on the efficiency of utilization of dietary energy and protein in lambs [J]. *British Journal of Nutrition*, 1971, 25: 31-55
- [21] Schiemann R, Zelck U, Nehring K. Über die Zusammensetzung des Harns an organischen Inhaltsstoffen bei Rindern, Schafen und Schweinen. 3. Der Einfluß hoher Kohlenhydratzulagen (Saccharose, Cellulose) auf die Ausscheidung an den einzelnen organischen Harninhaltsstoffen bei Rinder und Schafen [J]. *Archiv für Tierernährung*, 1965, 15: 81-91
- [22] Patton S, Kesler E M. Presence and significance of phenyl-substituted fatty acids in bovine rumen contents [J]. *Journal of Dairy Science*, 1967, 50: 1505-1508
- [23] Hungate R E, Stack R J. Phenylpropanoic acid: Growth factor for *Rum inococcus albus* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 52: 209-210
- [24] Weiss U, Edwards J M. *The Biosynthesis of Aromatic Compounds* [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1980
- [25] Singleton V L, Kratzer F H. Toxicity and related physiological activity of phenolic substances of plant origin [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1969, 17: 497-512
- [26] Harborne J B. General procedures and measurement of total phenolics [A]. In: Harborne J B. *Plant Phenolics, Methods in Plant Biochemistry (Volume 1)* [M]. London, UK: Academic Press, 1989: 1-28
- [27] Hrazdina G, Wagner G J. Compartmentation of plant phenolic compounds; sites of synthesis and accumulation [A]. In: Van



- Sumere C F, Lea P J. The Biochemistry of Plant Phenolics[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1985. 119-133
- [28] Walker J R L. The Biology of Plant Phenolics[M]. London, UK: Edward Arnold, 1975
- [29] Swain T. Phenolics in the environment[J]. Recent Advances in Phytochemistry, 1977, 12: 617-640
- [30] Cherney J H, Anliker K S, Albrecht K A, *et al*. Soluble phenolic monomers in forage crops[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1989, 37: 345-350
- [31] Jung H G, Fahey G C Jr. Nutritional implications of phenolic monomers and lignin: A review [J]. Journal of Animal Science, 1983, 57: 206-219
- [32] Huang H M, Johanning G L, Odell B L. Phenolic acid content of food plants and possible nutritional implications[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1986, 34: 48-51.
- [33] Salomonsson A C, Theander O, Åman P. Quantitative determination by GLC of phenolic acids as ethyl derivatives in cereal straws[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1978, 26: 830-835
- [34] Sosulski F W, Dabrowski K J. Composition of free and hydrolyzable phenolic acids in the flours and hulls of ten legume species[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1984, 32: 131-133
- [35] Ibrahim R, Barron D. Phenylpropanoids[A]. In: Harborne J B. Plant Phenolics, Methods in Plant Biochemistry (Volume 1)[M]. London, UK: Academic Press, 1989. 75-111.
- [36] Mueller-Harvey I, Hartley R D, Harris P J, *et al*. Linkage of p-coumaroyl and feruloyl groups to cell-wall polysaccharides of barley straw [J]. Carbohydrate Research, 1986, 148: 71-85
- [37] Azuma J, Nomura T, Koshijima T. Lignin-carbohydrate complexes containing phenolic acids isolated from the culms of bamboo[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1985, 49: 2661-2669
- [38] Akin D E, Chesson A. Lignification as the major factor limiting forage feeding value especially in warm conditions[A]. In: Proceedings of the 16th International Grassland Congress Nice, France 1989. 1753-1760
- [39] Hartley R D, Keene A S. Aromatic aldehyde constituents of gramineous cell walls[J]. Phytochemistry, 1972, 23: 1305-1307.
- [40] Bohn P J, Fales S L. Effect of two pre-treatments on phenolic acid yield in three forage species[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1991, 54: 347-354
- [41] Kolattukudy P E, Espelie K E, Soliday C L. Hydrophobic layers attached to cell walls: Cutin, suberin and associated waxes [A]. In: Tanner W, Loewus F A. Extracellular Carbohydrates, Plant Carbohydrates (Volume 2)[M]. Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 1981. 225-254
- [42] Rainsford K D. Aspirin and the Salicylates[M]. London, UK: Butterworth, 1984
- [43] Haslam E. The Shikimate Pathway[M]. New York, USA: John Wiley and Sons, 1974
- [44] Boudet A M, Graciana A, Ranjeva R. Recent advances in the regulation of the prearomatic pathway[A]. In: Van Sumere C F, Lea P J. The Biochemistry of Plant Phenolics, Annual Proceedings of the Phytochemical Society of Europe[C]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1985. 135-159
- [45] Crenin J D Jr, McLeod K R, Hamon D L, *et al*. Portal and hepatic fluxes in sheep and concentrations in cattle ruminal fluid of 3-(4-hydroxyphenyl)propionic, benzoic, 3-phenylpropionic, and trans-cinnamic acids[J]. Journal of Animal Science, 1995, 73: 1766-1775
- [46] Warth F J, Das Gupta N C. A modified method for the determination of hippuric acid and free benzoic acid in the urine of cattle[J]. Biochemical Journal, 1928, 22: 621-627.
- [47] Bristow A W, Whitehead D C, Cockburn J E. Nitrogenous constituents in the urine of cattle, sheep and goats[J]. Journal of Science in Food and Agriculture, 1992, 59: 387-394
- [48] Yoshida S, Tazaki K, Minamikawa T. Occurrence of shikimic and quinic acids in angiosperms[J]. Phytochemistry, 1975, 14: 195-197.
- [49] Chesson A, Stewart C S, Wallace R J. Influence of plant phenolic acids on growth and cellulolytic activity of rumen bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1982, 44: 597-603
- [50] Marvin H J P, Krechting C F, Van Loo E N, *et al*. Relationship between phenolic acids formed during rumen degradation of

- maize samples and *in vitro* digestibility[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1996, 71: 111-118
- [51] Amin M R, Tomita Y, Onodera R. Rapid determination of phenylalanine and its related compounds in rumen fluid by high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Chromatography, Series B: Biomedical Sciences and Applications, 1995, 663: 201-207.
- [52] Daolio S, Bonsembiante M, Bittante G, *et al*. Rumenal organic acid analysis by gas chromatography/mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1989, 37: 970-974
- [53] Hannah Research Institute. Dietary precursors of urinary benzoic acid[A]. In: Report 1975[C]. Ayr, UK: Hannah Research Institute and University of Glasgow, 1975: 35
- [54] Yokoyama M T, Carlson J R. Production of skatole and para-cresol by a rumen *Lactobacillus* sp. from the bovine rumen[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1981, 41: 71-76
- [55] Lowry J B. Metabolic and nutritional significance of the cell-wall phenolic acid fraction[A]. In: Akin D E, Jungdah L G, Wilson J R. Microbial and Plant Opportunities to Improve Lignocellulose Utilization by Ruminants[M]. New York, USA: Elsevier, 1990: 119-126
- [56] Silanikove N, Brosh A. Lignocellulose degradation and subsequent metabolism of lignin fermentation products by the desert black Bedouin goat fed on wheat straw as a single-component diet[J]. British Journal of Nutrition, 1989, 62: 509-520
- [57] Bergner H. N-Stoffwechsel und seine Regelmechanismen[J]. Archiv für Tierernährung, 1989, 39: 377-392
- [58] Topps J H, Elliott R C. Relationships between concentrations of ruminal nucleic acid and excretion of purine derivatives by sheep[J]. Nature, 1965, 205: 498-499
- [59] 刘金祥, 胡自治, 任继周, 等. 高山草原绵羊放牧生态及消化代谢研究 IV 采食量和消化代谢季节动态[J]. 草业学报, 2001, 10(3): 65-71.
- [60] 郭正刚, 张自和, 高淑兰. 河西绿洲草畜粗蛋白质和能量供求关系及其调控措施[J]. 草业学报, 2002, 11(3): 22-28

### Potential use of aromatic compounds to estimate the intake of ruminants

LONG Rui-jun<sup>1,2</sup>, WANG Yuan-su<sup>1</sup>, DONG Shi-kui<sup>3</sup>, DING Ling-ling<sup>1</sup>, J. PAGELLA<sup>4</sup>

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. Grassland Science College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

3. Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. Universidad Nacional de La Pampa, Argentina)

**Abstract:** This paper summarizes the discovery of aromatic compounds and different types and existing forms in ruminant feedstuffs, rumens and urine. Hippuric acid was the earliest aromatic compound found in ruminant urine. Most benzoic acid in ruminant urine is from precursors in feedstuffs. Aromatic compounds contained in plant feeds include phenolic acids, simple phenols, coumarin, gossypol, phenolic alkaloids, flavonoids, tannins and lignin. Hydroxycinnamic and benzoic acids are phenolic compounds commonly occurring in vascular plants, and are found in much higher contents in gramineous herbage than in leguminous herbage, but the content in cereal grains is very low. The main aromatic metabolites in rumen fluid and urine are non-phenolic aromatic acids, phenolic acids and phenols, and the only alicyclic acid that has been found is cyclohexanecarboxylic acid. With feeding different feedstuffs to ruminant livestock, hippuric acid excreted in the urine accounts for about 6% of total urinary nitrogen, and ranges from 1% - 38%. Measuring aromatic compounds in urine, especially hippuric acid, has an important role in predicting feed intake of ruminant livestock.

**Key words:** ruminants; aromatic compounds; feedstuff; existing form and precursor; rumen; urine