

霍启光等编著

动物磷营养 与磷源

中国农业科学技术出版社

中国图书馆分类号

Q582
1039

霍启光等编著

动物磷营养 与磷源

中国农业科学技术出版社



图书在版编目(CIP)数据

动物磷营养与磷源 / 霍启光等编著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.4

ISBN 7-80119-866-2

I. 动… II. 霍… III. 动物-磷-基本知识 IV. Q582

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 55231 号

责任编辑	沈银书
责任校对	李 刚
出版发行	中国农业科学技术出版社 邮编: 100081 电话: (010) 68919708; 68975144 传真: (010) 62189014
经 销	新华书店北京发行所
印 刷	北京印刷学院实习工厂
开 本	880 mm × 1 230 mm 1/32 印张: 8.375
印 数	1~1 000 册 字数: 250 千字
版 次	2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷
定 价	45.00 元

编 委 会

主 编 霍启光

副主编 屠 焰

编 委 (以姓氏笔画为序)

王晓霞 齐广海 朱洪成

沈银书 苏晓鸥 李海贤

范先国 龚家竹 屠 焰

霍启光



前言

早在 100 多年前即已确认磷在动物营养中的必需性。磷不仅同钙一起参与骨骼、牙齿等结构物质的组成，作为高能磷酸键和磷酸肌酸的组分，还参与机体的能量代谢，以磷脂的方式参与脂类物质、脂溶性维生素的吸收和细胞膜的构成，并作为遗传物质 DNA、RNA 和一些酶的组成成分，参与机体的许多重要生命过程。和钙不足一样，磷严重不足表现为生产性能低下，幼年动物患佝偻病，成年动物患软化症（或称骨质疏松症）。作为动物必需的养分，磷在配合饲料中居举足轻重的地位。在通常情况下，1 g 磷酸氢钙磷的价格比同等重量的鱼粉蛋白质还贵。当以磷酸氢钙作为猪、肉仔鸡和产蛋鸡的磷源时，它在每吨配合饲料中的添加量约为 11 kg，其总价值（ $1.4 \text{ 元/kg} \times 11 \text{ kg} = 15.4 \text{ 元}$ ）与添加在每吨饲料中的复合多维的总价值相当（ $75 \text{ 元/kg} \times 0.2 \text{ kg} = 15.0 \text{ 元}$ ）。

尽人皆知，不同的饲料磷对动物而言，其营养价值是不同的。正因为如此，作为评定饲料磷的营养价值、表达动物对磷需要的指标——总磷在许多情况下是没有意义的，看似足够的磷却能引发磷不足症。为此，人们改称“非植酸磷”，总磷由植酸磷和非植酸磷构成，其真正的寓意是：植酸磷是单胃动物不可利用的磷，非植酸磷是动物可能利用的磷。亦有将非植酸磷（Non-Phytate P）称作可利用磷或有效磷（Available Phosphorus）的，其实译作“可能利用的磷”或“可能有效的磷”更为合适。NRC《家禽营养需要》第九版干脆把具同等含义的 Available Phosphorus 改成“Non-Phytate P”，这是不无道理的，其实，非植酸磷是一组化学存在形式不同的混合物，它包括在动物消化液



中溶解度不同的无机磷以及存在于天然饲料中的不溶或难溶的非植酸形态的有机磷,但并非都是可消化、都可以利用的磷。看来给总磷、非植酸磷赋予生物学含义是势所必然。

磷在动物营养中,作为一个常量元素,由于其独具的消化—吸收—代谢过程以及它在动物营养中的不可取代性及其在配合饲料中的重要经济地位,驱使人们在 100 多年来对它的研究从未间断过,至今磷还是人们关注的重要论题。动物体内的磷始终处在动态平衡状态之中,吸收/排出、沉积/降解,机体磷一方面不断地吸收利用,另一方面又不断地排入消化道(即所谓内源性代谢粪磷),这一固有的周转代谢特点使磷的表现消化率测值经常变得像饲料总磷一样毫无意义。至于饲料磷的利用率,在特定条件下是可以准确测定的,但它是特定条件下的测值,日粮中磷以外的其他成分以及动物的品种、年龄、性别、生理时期、生产阶段尤其是生产性能等,在很大程度上可左右测值的大小;影响该测值的因素以及影响的程度千差万别,实践中不可能测得包罗万象的因素组合,这使得单一饲料磷的利用率测值变得像表现可消化率一样没有实际意义。依我所见,只有以磷的真消化率(或称净吸收率)作为评价饲料磷的营养价值,表达动物对磷需要的指标,才是有意义的数据。真可消化磷的测定,需将粪(尿)中未被消化吸收的磷和由体组织分泌至肠道的内源性粪磷加以区别,饲料中真可消化磷的高低在很大程度上取决于磷的化学存在形式及日粮中其他成分和回肠末端前消化道的内环境等因素的影响,对一定种类动物而言,这些影响因素的变化是十分有限的,因此,其测值亦是相对稳定的。我以为,在不久的将来,随着研究工作的积累,真可消化磷这一指标很可能取代非植酸磷。当前,应确定磷真可消化试验的标准方法,进而按动物类别(猪、家禽)测定各种含磷矿物质饲料及其他饲料磷的真可消化率,并以真可消化磷为指



标研究动物对可消化磷的需要量。应该说，这是动物营养和饲料科学界一项亟待启动的工程。

《动物磷营养与磷源》一书是由多年来从事磷营养研究（霍启光、屠焰、齐广海、苏晓鸥、王晓霞、李海贤等）及磷化学工程（龚家竹、范先国）的专家们撰写的，其中不仅介绍了磷研究的最新资料，同时还注入了专家们自身的研究成果。本书由磷的研究史略、动物磷的生理功能与代谢、动物对磷的营养需要、饲料中磷的生物学效价、磷酸盐的相对生物学效价及其在猪鸡配合饲料中的应用、植酸酶及其在畜禽饲料中的应用、含磷矿物质饲料的制作、含磷矿物质饲料的质量控制等八部分构成，在附录部分还收入了有关磷产品质量评定的系列方法，真可谓“饲料磷的专著”，我们对阅读本书的读者们能有所裨益。

本书的出版得到了中国农业科学院科技专著出版基金的资助，在此表示真挚的谢意。特别要感谢四川龙蟒集团李家权总裁，多年来对我及我的学生们在进行磷酸盐生物学评价与应用方法的研究以及在出版本书的过程中，所给予的全方位的支持与帮助。

中国农业科学院饲料研究所
四川龙蟒集团北京矿物质饲料应用技术研究中心

2001年9月8日

北京



目 录

第一章 磷的研究史略

第一节	磷的研究史略	(1)
-----	--------	-------

第二节	磷元素的物理化学性质	(2)
-----	------------	-------

第二章 动物磷的生理功能与代谢

第一节	动物体中磷的存在形式及分布	(4)
-----	---------------	-------

第二节	磷的生理功能	(9)
-----	--------	-------

第三节	磷的代谢	(13)
-----	------	--------

第四节	磷的缺乏症及中毒症	(20)
-----	-----------	--------

第五节	磷与钙的关系	(23)
-----	--------	--------

第六节	磷与其他矿物元素的关系	(25)
-----	-------------	--------

第三章 动物对磷的营养需要

第一节	磷营养需要量的研究方法	(28)
-----	-------------	--------

第二节	影响磷需要量的因素	(33)
-----	-----------	--------

第三节	不同动物对磷的需要量	(37)
-----	------------	--------

第四章 饲料中磷的生物学效价

第一节	生物学效价的含义及其测定方法	(49)
-----	----------------	--------

第二节	动物性饲料中磷的生物学效价	(57)
-----	---------------	--------

第三节	植物性饲料中磷的生物学效价	(58)
-----	---------------	--------

第四节	矿物性饲料中磷的生物学效价	(62)
-----	---------------	--------

第五节	影响饲料中磷生物学效价的因素	(65)
-----	----------------	--------

第五章 磷酸盐的相对生物学效价及其在猪鸡配合饲料中的应用

第一节	概述	(72)
-----	----	--------

第二节	磷酸盐相对生物学效价的测定	(76)
-----	---------------	--------



第三节	磷酸盐在猪鸡配合饲料中的应用	(98)
-----	----------------	------

第六章 植酸酶及其在畜禽饲料中的应用

第一节	植酸及植酸磷	(112)
第二节	植酸酶的来源及生物学作用	(117)
第三节	植酸酶在猪饲料中的应用	(119)
第四节	植酸酶在肉仔鸡饲料中的应用	(123)
第五节	植酸酶在产蛋鸡饲料中的应用	(126)
第六节	影响植酸酶在饲料中添加效应的因素	(131)
第七节	植酸酶及磷酸盐在配合饲料中的地位	(135)

第七章 含磷矿物质饲料的制作

第一节	磷矿资源	(141)
第二节	国内外含磷矿物质饲料生产和消费概况	(145)
第三节	含磷矿物质饲料的生产工艺	(147)
第四节	含磷矿物质饲料的发展趋势	(161)

第八章 含磷矿物质饲料的质量控制

第一节	含磷矿物质饲料的种类	(163)
第二节	含磷矿物质饲料的质量标准	(166)
第三节	含磷矿物质饲料中的有毒有害物质	(168)

附 录

附录 1	饲料中总磷量的测定方法 (GB/T 6437-92)	(172)
附录 2	饲料中有毒有害物质的测定方法	(176)
附录 2-1	饲料中总砷的测定方法 (GB 13079-91)	(176)
附录 2-2	饲料中铅的测定方法 (GB 13080-91)	(181)
附录 2-3	饲料中汞的测定方法 (GB 13081-91)	(185)



附录2-4 饲料中镉的测定方法 (GB 13082-91)	(188)
附录2-5 饲料中氟的测定方法 (GB 13083-91)	(192)
附录3 饲料中植酸磷的测定方法	(196)
附录4 植酸酶活性的分析方法(推荐方法)	(200)
附录5 饲料级磷酸氢钙标准	(207)
附录5-1 中华人民共和国国家标准 (GB 8258-87)	(207)
附录5-2 中华人民共和国化工行业标准 (HG 2636-2000)	(218)
附录6 饲料级磷酸二氢钙标准 (HG 2861-1997)	(230)
附录7 饲料级磷酸氢钙和磷酸二氢钙产品与配合饲料 中共存组分在分析方法上的比较	(239)

主要参考文献



第 一 章 磷的研究史略

章 DONGWU LININGYANG YU LINSUO

磷是动物营养研究中不可忽视的矿物质元素之一。大多数脊椎动物体内约含有4%的矿物质,而其中的70%是钙和磷。虽然畜禽所必需的矿物质元素很多,但由于钙、磷饲料在配合饲料中添加的比例较大和价格昂贵而使钙、磷成为最重要的矿物质元素,因此人们非常注重对它们的研究。从磷营养研究的近况看,目前的研究主要集中于以下四个方面(Weremko *et al* 1997): (1) 测定畜禽对磷的精确需要量; (2) 确认影响磷生物学效价的主要因素; (3) 探索更好的测定磷生物学效价的方法; (4) 使用植酸酶以提高植物性饲料中磷的利用率。

第 一 节 磷的研究史略

节 DONGWU LININGYANG YU LINSUO

黄素封(1965)、Cordridge(1978)、Putnaw(1991)、McDowell(1992)等认为,化学史上第一个发现磷元素的人是德国汉堡的Hennig Brandt,他受炼金术士的诱惑,试图从人尿中找出点银成金的液体,结果1669年在一个奇特的实验中却发现了磷,它色白质软,能在黑暗中放出闪烁光亮。1694年,Boyle制得了磷酸。1748年,瑞典化学家Gahn证明了磷存在于动物骨骼中。1769年,Gahn证实了磷是骨骼中的必需成分。1770年左右,Scheele

和 Gahn 发现骨骼中含有磷酸钙盐。而到 1771 年, Gahn 从骨灰中提取出大量的磷。1779 年, 第一种含磷矿物质——磷氯铅矿($\text{ClPb}_3\text{P}_3\text{O}_{12}$)被 Gahn 鉴定出来。1803 年, 人们开始用石灰磷酸盐(Lime Phosphate)治疗儿童佝偻病, 并证实这类化合物对牙齿生长有益。到 1817 年, 骨的无机成分中大部分是磷酸钙盐这一事实已被广泛地接受。1841 年 Boussingalt 宣布: “正如我们所看到的, 骨骼中包含了大量的石灰(Lime)成分。这类盐中的元素是动物必需的, 因此应该在日粮中添加磷酸和石灰。” 1842 年, Lawes 及 Murray 用硫酸和骨骼制造出肥料, 与此同时, 人们命名了几种简单的无机磷化合物。1873 年, Nessler 发现易碎的牛骨比健康的牛骨壁薄、质软, 同时钙和磷的含量也少。1909 年研究者们以低磷日粮饲喂动物, 结果被饲动物发生了佝偻病。

Cordridge (1978) 认为, 第一个被确定的有机含磷化合物是在 1811 年由 Vanquelin 从脑脂肪中分离出来, 并由 Goble 于 1850 年命名为含磷脂(Phosphorus-containing Lipid)。1868 年, 另一种天然的有机含磷化合物——核素(Nuclein)被瑞典外科医生 Mischer 从外科绷带上的脓细胞胞核中分离出来。

到了 20 世纪, 虽然欧洲仍然在磷科学上保持着领先的地位, 但一些重要的发现都出自美国和前苏联。目前磷化合物的应用领域包括动物饲料、肥料、农药、药物、食品添加剂、石油添加剂、色素、去垢剂、火柴、塑料、玻璃生产工艺、补牙材料、发光磷、电子材料、耐火材料、金属处理、制烟业、灭火剂、神经气体、表面活性剂、水处理及其他日用化工产品等。

第 磷元素的物理化学性质

节 DONGWU LIXING YANG YU LIXUAN

磷属于 N 族元素, 易于氧化, 原子量为 30.97, 原子序号为



15. 在自然界中没有发现游离状态的磷，它总是以磷酸盐形式出现。地壳中呈各种化合物形式存在的磷占地壳元素总量的0.12%。最重要的磷矿是纤核磷灰石 $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$ 和磷灰石 $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2 \text{ 或 } \text{CaCl}_2]$ 。

磷有三种同位素异构体：白磷、红磷和黑磷。白磷最不稳定，能自行缓慢转化为红磷；红磷不是磷的某一单独变体，而是一种复杂的高分子化合物——白磷的聚合物。将白磷在 $1.2 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 压力下加热到 200°C 就变成黑磷，在 $150 \sim 250 \text{ kg/cm}^2$ 压力下将红磷加热到 350°C ，则红磷变成黑磷。白磷在空气中迅速氧化，遇微热即自燃；红磷在空气中氧化很慢， 260°C 自燃；黑磷的化学活性小于红磷。

纯磷是白色蜡状有光泽的固体，由于日光作用常呈现黄色，故又称黄磷。黄磷有剧毒，不溶于水，极易溶于二硫化碳溶液中，比重为 $1.53 \sim 1.83$ ，随温度升高而降低。其熔点为 44.1°C ，沸点为 281°C ，自燃点为 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ ，在空气中易自燃，生成五氧化二磷和其他氧化物。五氧化二磷为白色固体物质，吸水性极强，与水化合生成偏磷酸和磷酸。我国磷酸生产中常使用黄磷。

(屠 焰 执笔)



第二章 动物磷的生理功能与代谢

第二章 DONGWU LIXINGYANGYU CUNYUAN

第一节 动物体中磷的存在形式及分布

第一节 DONGWU LIXINGYANGYU CUNYUAN

一、动物体中磷的存在形式

磷像钙一样在自然界中非常丰富，它在地壳中的含量为0.08%~0.12%。它是正磷酸盐矿物质钙氟磷灰石 $[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2]$ 和羟磷灰石 $[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2]$ 的成分，包含在磷灰石和磷灰岩矿中。天然磷是磷稳定的同位素 ^{31}P 。在6个人造磷放射性同位素中，只有一个即 ^{32}P 被用于生物学研究，半衰期为14.2天，其放射能为1.71MeV。

植物中的磷主要是以有机化合物的形式存在的，即植酸盐、磷脂、核酸及其他化合物，其中在谷类植物中的概略分布如下：可溶和不可溶植酸盐50%~70%，磷脂、磷蛋白、核酸20%~30%，矿物磷酸盐8%~12%。磷在谷类植物籽实中的含量比秸秆中的含量高3~4倍。谷物中的磷含量为0.35%~0.45%，牧草中的磷含量为0.25%~0.30%。如果把磷肥施入土壤，植物中磷浓度会增加，在生长后期磷的含量下降。

饲草青贮期间磷会损失，在多雨季节制作干草期间也损失磷，因为饲草中3/4以上的磷是水溶性的。油饼、油粕、麦麸以及动物性饲料磷的含量都相当丰富。



磷也是动物机体含量最多的元素之一，仅次于钙。体内的磷主要以羟磷灰石的形式存在于动物的骨骼与牙齿中，约占体内总磷量的80%，其余的磷存在于细胞内和体液中，主要是作为磷蛋白、核酸、磷脂以及含磷的酶类的构成成分而发挥极其重要的生理作用。

二、磷在动物体内的分布

(一) 体内磷的含量

成年动物体中含磷量按新鲜组织计算为0.60%~0.75%，按干组织计算为1.9%~2.5%，按灰分计算为16%~17%。体重600 kg奶牛、100 kg母猪、50 kg绵羊、20 kg狗和2 kg母鸡的总磷量分别平均为3 600 g、460 g、280 g、135 g和13 g。

不同种新生动物体内的磷含量存在较大的差异，牛和猪比兔和禽高(表2-1)，在骨骼强度矿物化期间含磷量相对增加。在同一类的成年动物，个体差异可能是不同脂肪沉积程度引起的。若按脱脂组织计算磷含量时，这种差异就很小。

表 2-1 新生动物体内的磷含量(g/kg, 脱脂组织)

元素	牛	猪	狗	兔	鸡
钙 (g)	12	10	4.9	4.8	4.0
磷 (g)	7	5.8	3.9	3.6	3.3

动物体的钙、磷比取决于它们出生时的生物学成熟程度。新生牛犊的钙、磷比接近于最适值(1.7~1.8:1)，而鸡只有在90天后才能达到此水平，大鼠和兔更晚。这些动物在出生后生长发育期间体内磷的积累比钙的积累速度慢，数量少。

(二) 磷在器官和组织中的分布

平均而言，成年动物体内83%的磷以羟基磷灰石形式存在于骨组织中。

表 2-2 说明了动物骨骼中骨磷沉积的年龄变化。从表中可以看到骨骼钙、磷比在很大程度上随年龄增长而稍有增加的倾向。研究发现,其他动物骨骼的钙、磷比也有类似的规律性(表 2-3)。一般骨灰中磷的含量是相当恒定的(18%~19%)。骨骼贮备有易变化的磷,通过 ^{32}P 放射性同位素实验已证实了这一点。

表 2-2 雏鸡胫骨中钙、磷的含量(%)

雏鸡日龄	钙	磷	Ca : P
1	8.13	4.0	2.03
30	17.25	8.25	2.09
60	17.51	8.37	2.09
90	19.60	9.13	2.15
120	20.35	9.30	2.18
150	22.41	10.10	2.21

表 2-3 育肥猪骨骼中钙、磷含量及其比率

指标	活体重 (kg)		
	20	50	100
骨重 (占体重的百分比)	8.4	7.5	6.0
骨骼中 Ca 的含量 (g)	166	385	680
骨骼中 P 的含量 (g)	82.0	189	330
Ca : P 比率	2.02	2.03	2.06

成年动物体内 15%~25% 的磷分布在各种软组织和体液中,其中大多是有机形式的,也有部分是矿物形式的(表 2-4 和表 2-5)。

表 2-4 哺乳动物组织内总磷的浓度(mg/g, 鲜组织)

组织	浓度	组织	浓度
骨骼肌	1.50~2.50	脾	3.50~4.00
皮肤	0.40~0.85	肺	1.15~1.30
肾	1.00~1.60	肝	1.80~2.60
脑	2.40~4.30	肠	1.20~2.00
心	1.50~2.70	软骨	0.20~0.30

表 2-5 哺乳动物组织内无机磷的浓度(mg/g, 鲜组织)

组织	浓度	组织	浓度
骨肉	0.18~0.30	脑	0.07~0.10
肝	0.18~0.30	软骨	0.09~0.10

有机磷化合物包括磷蛋白、核酸、己糖磷酸脂、高能磷酸脂(ATP、ADP、肌酸磷酸脂)等。总磷、酸溶解磷和 ATP 磷在所有组织中都随年龄增长而增加,而磷脂磷水平则趋于降低。磷脂浓度在肝脏中是最高的,而 ATP 浓度在肌肉中最高(见表 2-6)。

表 2-6 在两种不同日龄肉鸡的各种组织中磷的含量(mg/g, 鲜组织)

组织或器官	日龄	总磷	酸溶解磷*	ATP 磷	磷脂磷	核酸磷
臀肌	1	1.083	0.324	0.035	0.428	0.273
	50	1.141	0.521	0.129	0.301	0.321
胸肌	1	1.518	0.943	0.086	0.231	0.164
	50	2.589	2.153	0.231	0.230	0.108
肌胃	1	2.188	1.550	0.094	0.213	0.147
	50	2.981	1.649	0.414	0.163	0.112
肝	1	2.606	0.827	0.036	0.832	0.808
	50	3.070	1.249	0.097	0.644	0.981

* 无蛋白滤液中的全部磷含量减 ATP 磷

血液含有的磷也是以有机化合物和无机化合物形式存在的,两者间的比率在反刍动物中为 3~4:1,在禽类中为 10:1。无机磷是在血浆中发现的,几乎全部可超滤并被离子化。在哺乳动物血液中,无机磷被红血细胞磷所稳定,而在红细胞内主要以有机磷酸脂的形式存在。各种动物血液总磷和无机磷含量的变动范围(mg/L)是:血浆中 110~130 和 40~70,红血细胞中 450~600 和痕量(表 2-7)。血浆中的无机磷主要以 HPO_4^{2-} 和