动物营养学报 2020,32(6):2533-2542
Chinese Journal of Animal Nutrition

doi:10.3969/j.issn.1006-267x.2020.06.012

凹凸棒石的作用机制及其在动物生产中的应用

袁　勇[1,2]　文　伟[1,2]　冯智茂[1,2]　黄兴国[1,2*]

(1.湖南农业大学动物科学技术学院,长沙 410128;2.湖南省畜禽安全生产协同创新中心,长沙 410128)

摘　要: 凹凸棒石(APT)是一种天然的层链状晶质水合镁铝硅酸盐矿物,具有吸附霉菌毒素、重金属、致病微生物与毒性抗原以及保护消化道黏膜、抗炎、防治腹泻等功效;此外,改性 APT 还具有抗菌作用。作为功能性饲料原料,APT 能提升产品品质、改善机体免疫和抗氧化机能、促进肠道健康、提高饲粮养分利用率和动物生产性能。本文综述了 APT 的理化性质、常见改性方法、生物学功能及机制以及其应用于动物生产的国内外最新研究成果。

关键词: 凹凸棒石;改性;作用机制;动物生产;应用

中图分类号:S816　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1006-267X(2020)06-2533-10

饲料不仅可以维持畜禽生命需要,而且还是决定养殖业生产力的主要因素之一。但饲料中常常存在着各种不利因素,如霉菌毒素、重金属、致病微生物及毒性抗原等污染物,去除饲料中的污染物一直是全球性的难题[1]。随着规模化养殖业的发展,为了减少畜禽疾病发生率和死亡率,在养殖生产中出现了“泛用”“滥用”抗生素现象,由此引起抗生素大量残留在环境和畜禽产品中,严重威胁着畜禽和人类生命健康[2]。因此,开发环境友好型功能性饲料原料,以缓解饲料中污染物造成的食品安全隐患和对畜禽的危害成为畜牧业的迫切需要。

凹凸棒石(attapulgite,APT)又名坡缕石或坡缕缟石,是一种天然的层链状结构的晶质水合镁铝硅酸盐矿物,为 APT 黏土的主要组分,在矿物学上隶属于海泡石族,是一种稀有非金属矿物原料,有“千土之王”“万用之土”等美誉[3]。由于具有特殊的棒晶形貌及孔道结构,APT 具有比表面积大、吸附能力强、胶体性能好、离子交换性能强和耐盐碱等理化特性[3-4],能在动物肠道中吸附霉菌毒素、重金属、致病微生物及毒性抗原,可保护消化道黏膜、抗炎、防治腹泻等[5-7];此外,改性 APT 还具有抗菌作用[8]。由于 APT 的优良特征和功能,欧盟委员会在 2003 年将 APT 纳入饲料添加剂[9]。随着 APT 的开发利用,欧盟委员会[10](2011 年)和中国农业部[11](2013 年)又先后将其纳入饲料原料。研究表明,作为饲料原料,APT 及其改性产品能提升产品品质、改善机体免疫和抗氧化机能、促进肠道健康、提高饲粮养分利用率和动物生产性能[12-13]。本文将阐述 APT 的理化性质和常见改性方法,总结 APT 的生物学功能及机制,并综述 APT 在动物生产中的应用效果,以期为 APT 更好地应用于饲料行业提供参考。

1　APT 的理化性质

APT 呈棒晶状集合体,为 2∶1 型黏土矿物(也称为“多核糖体”[14]),即 2 层硅氧四面体,1 层铝氧八面体,各链层单元通过 Si—O—Si 键连接,并在四面体片中出现周期性的顶氧反转,这种反转发生在 Si 的每 4 个原子(2 个四面体链)上[15]。这种周期性反转的后果包括:1)八面体片的破坏,八面体阳离子完成了与水分子(配位水)的配位范

收稿日期:2019-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(31772617);湖南省科技计划重点研发项目(2017NK2310);长沙市科技计划重大专项(kq1804056)

作者简介:袁　勇(1994—),男,四川达州人,硕士研究生,从事动物营养与饲料资源开发利用研究。E-mail: y_yong1017@163.com

*通信作者:黄兴国,教授,博士生导师,E-mail: huangxi8379@aliyun.com

围;2)形成通道,即形成截面尺寸为 0.37 nm×0.64 nm的沸石状孔道[16-17]。由于具有特殊的棒晶形貌及孔道结构,APT 的比表面积大,因而有较大表面吸附能力[4,18]。APT 理论化学式为 $Mg_5Si_8O_{20}(OH)_2(OH_2)_4 \cdot 4H_2O$,其少量 Si^{4+}能被 Fe^{3+}或 Al^{3+}取代,少量 Mg^{2+}能被 Fe^{2+}、Fe^{3+}和 Al^{3+}取代,各种离子取代后 APT 带少量负电荷,因而具有胶体性能和静电吸附性能[3,19]。

2 APT 的改性方法及原理

国内外学者对 APT 进行了大量改性研究,以期进一步优化 APT 性能,使得 APT 可以在生产中得到更好的应用。常见的改性方法有:酸处理、热处理、盐交换和有机化处理等。

2.1 酸处理

酸处理是 APT 常用的改性方法之一,常见的酸处理剂有盐酸、磷酸、硫酸、硝酸等。酸改性是利用酸与 APT 晶体间或孔道内的碳酸盐类胶矿物发生化学反应,致使碳酸盐类被溶出,孔道得到疏通,增大了比表面积;此外,APT 层间金属阳离子被半径较小的 H^+置换,如 K^+、Na^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}等,使得孔有效容积被增大,吸附性能得到增强[20]。值得注意的是,当酸浓度较低时,APT 晶体结构中的八面体金属离子只有较少部分被溶解,不会破坏 APT 晶体结构,增大了有效孔容积和比表面积,提高了吸附性能;但当酸浓度过高时,APT 晶体结构中的八面体阳离子几乎完全溶解,导致 APT 晶体四面体结构失去支撑而引起结构塌陷,反而降低了 APT 的吸附性能[21-22]。酸改性 APT 能有效吸附盐酸四环素[20],还被用作去除饲粮中对肉鸡有毒害作用的黄曲霉毒素 B_1(AFB_1)的吸附剂[23]。

2.2 热处理

为了增加比表面积、活化吸附中心、增强吸附性能,常常通过热处理的方法改性 APT。其原理是通过加热焙烧脱去 APT 中的吸附水、沸石水、结晶水以及八面体中的结构水,从而使得 APT 变得疏松多孔[21]。但温度也不可过高,否则会引起 APT 中低熔点结构物熔化,导致结构塌陷,纤维束晶棒紧密烧结在一起,减少有效孔容积和比表面积,降低吸附性能[21]。孙文恺等[24]报道,置于 300 ℃马弗炉活化 3 h 后的改性 APT 对大肠杆菌、沙门氏菌和金黄色葡萄球菌均无抑制作用,而盐处理的载锌 APT 对 3 种菌均有较强抑制作用。Qiao 等[25]研究表明,经过 350 ℃活化 2 h 后的热改性 APT 对蛋鸡肠道形态改善和消化酶活性提高不及天然 APT,但与天然 APT 相比,热改性 APT 又表现出优异的理化性质。目前相关的研究报道较少,还不能做出合理解释,关于热改性 APT 是否能够应用于动物生产还需要进一步研究。

2.3 盐交换

在动物生产中常常通过盐交换来制备改性 APT,利用其多孔结构和良好的吸附性、离子交换性,在固相或液态反应条件下通过离子交换将无机盐中金属离子负载于 APT 表面或孔道中[8]。李晓晗等[26]报道,盐改性的 APT 对大肠杆菌有抑制作用,其固相载锌比液相载锌对锌的解吸率更高和抑菌作用更强。除此之外,盐改性 APT 在生产中可为畜禽提供矿物元素以及被用作吸附剂[27-28]。

2.4 有机化处理

APT 的有机改性一般采用有机表面活性剂作为改性剂,用大分子有机基团取代 APT 间存在的大量可交换阳离子,使层间距扩大,同时 APT 颗粒表面也能吸附部分无机阳离子,晶格内的部分结晶水、吸附水也可能被有机物取代,从而改善疏水性,增强 APT 吸附污染物的能力[29]。聚二甲基二烯丙基氯化铵、十六烷基三甲基溴化铵和溴代十六烷基吡啶等有机阳离子对天然 APT 进行改性后能大大提高对苯酚的吸附去除率[30-31]。Su 等[7]使用氯化缩水甘油基三甲基铵和壳寡糖反应制备季铵盐衍生物 N-(2-羟基)丙基-3-三甲基壳寡糖氯铵[quaternary ammonium derivative N-(2-hydroxy) propyl-3-trimethyl ammonium chito-oligosaccharide chloride,HTACO],然后用 HTACO 去改性 APT,该改性 APT 可以对蛋鸡的肠道免疫、氧化状态、肠道完整性和屏障功能产生有益的影响。

3 APT 的生物学功能及其机制

3.1 吸附霉菌毒素

APT 因其自身独特的棒晶结构,拥有较多孔道和巨大的比表面积,具有的吸附能力可以较好的吸附霉菌毒素,有效缓解霉菌毒素对机体产生的负面影响[32]。Bampidis 等[33]将饲粮添加 APT 可提高泌乳奶牛生产性能的原因归于 APT 吸附了存在于饲粮中的真菌毒素。夏枚生等[23]的试验表

明,在饲粮中添加改性 APT,可以利用其物理吸附性有效缓解 AFB_1 造成的肉鸡生长性能和免疫机能降低等毒害作用。Zhou 等[5]也证实了 APT 可以有效地吸附黄曲霉毒素(AF)。另外,罗丹等[34]报道,APT 对降低玉米赤霉烯酮(ZEA)在蛋黄中残留有一定效果。相较天然 APT,改性 APT 对 ZEA 的吸附效果更好,并且可以有效缓解受 ZEA 污染饲粮中 ZEA 对肝脏的氧化应激损伤,并减少肝脏中 ZEA 残留[35-36]。HTACO 改性 APT 能够消除存在于饲粮中低于农业部规定浓度的镰刀霉菌毒素所引起的免疫机能下降、氧化应激、肠道损伤等毒害作用[37]。APT 与同属于硅铝酸盐类矿物的蒙脱石一样,其表面带有亲水性的负电荷和层间大量可交换的阳离子,同质取代,对带有极性基团的霉菌毒素吸附效果更佳,例如,相对于极性较弱的呕吐毒素(DON)和 ZEA,APT 更易吸附 AF[38]。极性较弱的 DON 和 ZEA 则可用比表面积较大的活性炭吸附,且不受 pH 影响,但其选择吸附能力差,微孔结构易被饲料中的某些营养成分所填充而失去对霉菌毒素的吸附能力[38];或利用生物降解剂去除,如鼠李糖乳杆菌,其在小肠中通过细胞壁肽聚糖、多糖和磷壁酸与毒素发生作用,细胞壁氨基酸组成会直接影响其对低极性毒素(ZEA、DON)的去除效果[39]。但生物降解与物理吸附剂相比,其菌株不易获得且技术要求较高。表 1 列出了霉菌毒素物理吸附剂与生物降解剂的优缺点。

表 1　霉菌毒素物理吸附剂与生物降解剂优缺点比较

Table 1　Comparison of advantages and disadvantages of mycotoxin physical adsorbents and biological decomposers[38-40]

霉菌毒素脱毒剂 Mycotoxin detoxification	物理吸附剂 Physical adsorbent	生物降解剂 Biological decomposer
主要种类 Main types	活性炭;硅铝酸盐类:APT、蒙脱石、膨润土等;酵母细胞壁及提取物;植物纤维;高分子多聚物:消胆胺、聚乙烯吡咯烷酮、交联聚乙烯聚吡咯烷酮等	微生物;微生物酶
优点 Advantages	对黄曲霉毒素吸附效率高;材料易得、种类多,可选择范围广;体外评价简单,效果明显	降解效果稳定,重复性高;对各种霉菌毒素均有降解;不吸附饲料中的小分子营养物质;对环境无污染;动物试验效果显著
缺点 Disadvantages	吸附效果不稳定,容易出现解吸现象;对 ZEA、DON 等极性弱的毒素吸附效果差;吸附饲料中的营养物质,破坏饲料营养平衡	降解菌株不易获得,有些不适于在饲料中添加;纯酶提取工序复杂,技术要求高
添加量 Additive amount	0.5~3.0 kg/t	0.3~1.0 kg/t

3.2　吸附细菌、杀菌

APT 本身不具有杀菌能力,但其可通过物理吸附性能吸附细菌。属于硅酸盐矿物的 APT 因其特殊的多孔道结构和巨大的比表面积,而具有强大的表面张力和范德华力,可对细菌产生较强的吸附作用[41-43]。APT 经过盐改性后,不仅具有物理吸附性能,还使带负电荷的 APT 转变为带正电荷,从而通过静电作用吸附带负电荷的细菌,如大肠杆菌[44]。盐改性后的 APT 具有杀菌作用,如载铜 APT[8]、载锌 APT[26-28]等,其杀菌特性是盐改性后负载的金属离子所执行的[45]。改性 APT 中带正电荷的金属阳离子可以与带负电荷的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的细胞膜通过库仑引力牢固的吸附在一起,金属离子与细胞膜接触后,可提高细胞膜通透性,致使细胞壁破裂,导致细胞质外流,抑制细菌繁殖,从而导致细菌死亡,起到杀菌作用[45-47]。

3.3　吸附重金属

APT 因其良好的离子交换性和吸附性常被用作去除环境污染物重金属的吸附剂,如 Cd[48]、Pb[49]等。为了表现出对重金属污染物更好的吸附性能,在实际应用中常常使用改性 APT[50-52]。除此,APT 或改性 APT 还可应用于饲料中,吸附饲料中重金属离子,减少畜产品中重金属离子残留[7]。

3.4 抗炎

据报道,巨噬细胞通过吞噬作用或在酶和/或有毒生物化学物质分泌后破坏病原体[53]。此外,巨噬细胞还可以募集其他类型的炎症和免疫效应细胞,如嗜中性粒细胞[53],它们在皮肤之后构成了生物抵御病原体的主要保护屏障。实际上,人类各种疾病的特征大多是在结肠、胃、肺、泌尿道和皮肤的急性炎症反应过程中嗜中性粒细胞大量迁移[54]。Cervini-Silva 等[55]研究表明,APT 在小鼠耳部起到了消炎作用,对嗜中性粒细胞的水肿抑制和迁移均有促进作用。APT 在暴露后不久即抑制了水肿,这主要是由于多核糖体的裂解以及随后的硅烷醇基团的暴露,致使渗透速率升高[55]。此外,革兰氏阴性菌死亡或破裂后产生的脂多糖(lipopolysaccharide,LPS)是一种可引起机体发热、炎症反应等病理效应的内毒素[56],其可对动物机体产生极大负面影响[57]。有关研究报道,改性载锌 APT 可通过抑制大肠杆菌并吸附其产生的 LPS,来减少 LPS 对机体引起的炎症反应[27]。

3.5 防治腹泻

研究报道,APT 可以有效地结合有毒化合物,然后将它们从动物体内排出[58],可用作抗腹泻剂。Zhang 等[59]报道,添加 2 000 mg/kg APT 可显著降低断奶仔猪腹泻率。氧化锌具有控制大肠杆菌感染的作用,常常在猪饲粮中用作抗腹泻药物。然而,氧化锌的锌保留率低,饲粮中高浓度的氧化锌将导致猪对锌的过量积累和过量排泄。Tang 等[6]试验表明,饲粮添加 APT(1 800 mg/kg)对断奶仔猪的生长性能、营养物质消化率的提高和腹泻率的降低效果可达到与氧化锌同等的效应,但 APT 可显著减少锌的大量积累和排泄。这表明,APT 可以代替氧化锌作为一种环境友好的抗腹泻药物。APT 的止泻机制可能是,APT 进入肠道后,因拥有较大比表面积,其附着于肠道黏膜表面发挥物理屏障作用,吸附有害毒素并将其排出体外[58]。除此之外,载抑菌金属阳离子的 APT 还可以杀菌,减少肠道损伤诱发的腹泻[8]。

4 APT 在动物生产中的应用

4.1 提高动物生产性能

王坤等[60]报道,饲粮中添加 1% APT 可以改善摄入热处理豆粕肉鸡的生长性能,这是因为 APT 可以缓解热处理豆粕对肉鸡造成的氧化损伤。有研究报道,改性 APT 可同时作为锌源补充剂和抗生素类促生长剂替代品应用于饲粮中,改善肉鸡的生长性能和免疫机能[27]。Zhang 等[12]在肉鸡饲粮中添加 5、10、15、20 g/kg 4 个梯度的 APT,均能增加肉鸡的采食量,提高生长性能,其中添加 10 g/kg 时效果最佳,Chen 等[13]也得到了类似结果。研究报道,饲粮中添加 1% APT 可使蛋鸡产蛋率提高 2.6%[61]。但 Qiao 等[25]的研究结果显示饲粮中添加 2% 的 APT 对蛋鸡的产蛋性能和肉品质无显著影响。这可能是 APT 产地、结构性能、纯度、添加剂量或动物种类不同造成的。此外,随着 APT 添加量的增加,饲粮中的有机质、蛋白质和脂肪等营养成分被 APT 吸附,致使能够被动物机体吸收利用的营养养分逐渐减少[12]。Bampidis 等[33]在泌乳奶牛上的研究发现,饲粮中添加 10 g/kg 的 APT 可提高乳蛋白产量,降低乳菌落形成单位,从而改善生产性能。Tang 等[6]报道,饲粮中添加 1 800、2 400、3 000 mg/kg 3 个梯度的 APT,其中 1 800 mg/kg 添加组与空白组比较,可显著提高断奶仔猪的平均日增重。这可能是由于 APT 可以通过增加消化酶的分泌、增强营养物质的消化、促进肠道健康来改善生长性能[62]。相关研究报道,APT 能够增进胰腺发育,刺激胰腺消化酶的分泌[25,63-64],其具体潜在的分子机制尚不清楚。夏枚生等[23]试验表明,在饲粮中添加改性 APT 可以有效缓解 AFB_1 造成的肉鸡生长性能和免疫机能降低等毒害作用。罗丹等[34]报道,APT 对提高蛋鸡产蛋率和降低 ZEA 在蛋黄中残留均有一定效果。霉变饲料可以选择添加 APT,以此缓解饲粮中霉菌毒素对动物生产性能引起的不利影响[32]。由此可见,APT 可通过促进消化酶的分泌和缓解饲料中不利因素对畜禽的伤害来改善生产性能。

综上所述,APT 可以概括为从以下几个方面来改善生产性能:1)APT 可以提供动物机体所需的矿物元素;2)APT 利用自身吸附能力,可以吸附有害毒素并将其排出体外;3)载金属阳离子的改性 APT 可以抑制细菌生长,减少对动物机体的危害;4)APT 可以促进消化酶的分泌,增强对营养物质的消化;5)APT 可以改善饲料品质,提高适口性,并增加饲粮在消化道保留时间;6)APT 可以增加肠道绒毛高度,增大肠道对营养物质吸收的面积;7)APT 可以保持肠道微生态平衡;8)APT 可

以提高机体免疫和抗氧化机能。

4.2　提高营养物质利用率

Tang 等[6]和 Zhou 等[62]分别发现 APT 可以显著提高断奶仔猪和肉鸡对饲粮中能量和粗蛋白质的表观消化率,推测是因为 APT 的离子交换使胃肠道液体的 pH 和离子组成发生改变,引起消化酶的分泌增加,从而提高动物机体对营养物质的利用率和饲料转化率[59,63,65]。除此之外,APT 还可以增加饲粮在消化道的保留时间,提高畜禽对营养物质的利用率[12]。这可能是由于黏土矿物质具有胶体性能,在肠道形成凝胶而增加黏度,从而减慢饲粮在消化道的通过速度,而增加饲粮的运输时间可以使内源酶与蛋白质、碳水化合物和脂肪在消化过程中更充分接触[66],从而提高营养物质的消化率和利用率。黏土工业利用超细研磨技术生产具有均匀粒度分布的黏土粉末,通过该方法处理的材料具有优异的性质,如有利的溶解性、分散性、吸附性、流动性和化学反应性[67-69]。APT 经超细研磨,使得粒径减小、表面积增大、黏度增加,得到更优的理化性质,利于改善动物机体对营养物质的消化吸收[64,70]。Du 等[64]使用 1%的超细粉碎 APT 添加于饲粮中,显著提高了肉鸡的饲料转化率、有机物和粗脂肪的表观消化率以及胰腺中淀粉酶的活性,对 APT 进行超细粉碎较传统粉碎能更好地对肉鸡增益。综上,APT 通过促进消化酶的分泌和延长饲粮在消化道保留时间来提高畜禽对营养物质的利用率。

4.3　提升产品品质

饲料的物理形式(颗粒和粉末)是肉鸡决定生长性能的关键因素,研究表明,与粉末饲料相比,颗粒饲料改善了肉鸡的生长性能[71]。颗粒饲料还具有减少成分分离、提高消化率、杀灭病原微生物、对淀粉和蛋白质进行热改性、提高适口性等优点[72]。APT 因具有优异的吸附和流变性能,而被用作颗粒黏合剂以改善饲料耐久性指数和硬度[73]。Zhang 等[73]在饲料中添加 2%的 APT,不仅降低了饲料在水中的溶失率,还显著提高了团头鲂肌肉组织中 Fe 和 Zn 的含量,同时显著降低了肌肉组织中 Cd 含量。已有研究表明,APT 可以降低蛋黄中 ZEA[34]的残留以及 Pb[7]的含量。杨伟丽[74]试验表明,饲粮中添加改性载锌 APT 可使肉鸡肌肉组织中 Zn、Mg、Fe 含量显著提高,Cr、Cu、Pb 等重金属沉积量显著减少,并可改善肌肉品质。此外,Bampidis 等[33]报道,在泌乳奶牛饲粮中添加 10 g/kg 的 APT,可提高乳蛋白产量,降低乳菌落形成单位,提升乳品质。这表明 APT 既能改善饲料品质,也能改善动物产品品质。

4.4　改善免疫和抗氧化机能

肝脏是重要的免疫器官,断奶仔猪在断奶时,出现的断奶应激可能会引起肝脏损害并增加血清中天冬氨酸转氨酶(AST)的活性,因此 AST 活性变化可反映肝脏受损伤状况和机体遭受应激情况。Lv 等[75]报道,在饲粮中添加 2 000 mg/kg APT,可以显著降低断奶仔猪血清 AST 活性。这可能是由于 APT 降低了血液中能导致肝损伤的 LPS 的含量[59]。这表明 APT 对断奶后仔猪肝脏有保护作用,提高了机体的免疫能力。活化 B 细胞产生的分泌型免疫球蛋白 A(sIgA)是黏膜免疫系统的主要效应因子,是保护肠道上皮免受病原微生物和有害化合物侵害的第 1 道防线[76]。此外,sIgA 通过将抗原和病原微生物包裹在黏液中,阻断它们与上皮受体的接触,并通过蠕动和黏液纤毛活动促进它们的清除,从而促进抗原和病原微生物从肠道腔内清除[77]。Chen 等[13]在肉鸡上的研究表明,APT 可显著提高空肠和回肠杯状细胞数量,回肠免疫球蛋白 M(IgM)、sIgA 含量均显著增加,免疫球蛋白 G(IgG)含量也有增加的趋势。有研究报道,改性载锌 APT 可以通过 Toll 样受体(TLRs)-核因子-κB(NF-κB)信号传导通路调节免疫机能,改善肉仔鸡肠道黏膜免疫[27]。除此之外,改性载锌 APT 还可通过抑制有害菌生长、促进有益菌增殖来提高机体的免疫性能[78]。

脂质过氧化作用后的最终产物是丙二醛(MDA),因此 MDA 的含量通常用作氧化应激程度的生物标志物[79]。抗氧化酶在细胞抵抗氧化应激的防御过程中起着重要的作用,而过氧化氢酶(CAT)是最重要的抗氧化酶之一[80]。有研究报道,在蛋鸡饲粮中添加有机改性 APT 吸附剂能显著降低空肠和回肠中 MDA 的含量[7]。Zhou 等[62]在肉鸡饲粮中添加 1%沸石和 1%APT 组合,结果显示空肠黏膜 CAT 活性和 sIgA 含量显著提高,MDA 含量显著降低。这是由于 APT 通过表面介导来抑制脂质过氧化反应[17],可由羟基自由基物种的稳定作用来解释,羟自由基是高反应性氧化剂,代表最有效的反应性氧原子,用于提取氢并引发脂质过氧化的链反应[81]。一旦形成自由基,

脂质过氧化就会发展,因此,会形成几种次级的有毒氧化产物,包括甲醛、乙醛、MDA 和乙二醛[82]。因为 APT 拥有较高的高能位点频率,即四面体薄片中的顶氧反转[17]。可以说,这些位点的裂解导致在八面体阳离子的八面体球或相关配位球处产生吸附和反应位点[83],并与羟基结合,从而抑制脂质过氧化。这也证明了 APT 可以降低母猪的氧化应激反应[84]。此外,T-SOD 是机体清除自由基的主要抗氧化酶之一,研究发现 APT 可以显著提高肉鸡肝脏和血浆中 T-SOD 活性[60,85]。

由此可见,饲粮中添加 APT 能够提高抗氧化机能和改善肠道免疫。有关 APT 调节免疫器官、细胞及相关分泌物的具体机制还鲜有报道,有待于进一步深入研究。

4.5 改善肠道健康

作为功能性饲料原料,APT 可以有效地结合有毒化合物,然后将它们从动物体内排出[58]。研究表明,APT 作为饲料原料可以改善动物的生长性能、肠道完整性、营养利用率[6,59,75]。二胺氧化酶(DAO)通常以少量存在于循环中,当肠黏膜完整性受损时,DAO 被释放到血液中。因此,血浆 DAO 活性可作为肠黏膜损伤和完整性的标志[86]。Zhou 等[62]发现,饲粮中添加 APT 可以显著降低肉鸡血清 DAO 活性。类似的研究表明,添加 2 000 mg/kg APT 可以显著降低断奶仔猪血浆中 LPS 含量和 DAO 活性[59]。这表明,饲粮补充 APT 可以起到保护肠黏膜的作用。除此之外,肠道形态、肠道菌群、肠屏障相关的结构蛋白含量及其基因表达水平等都可以反映肠道健康状况。Chen 等[13]报道,饲粮中添加 APT 可显著提高肉鸡空肠和回肠的绒毛高度、绒毛高度/隐窝深度值,同时显著降低血清 DAO 活性以及盲肠沙门氏菌数量,罗有文[78]也得到了类似结果。有研究报道,添加 2% APT 能刺激蛋鸡消化酶分泌,改善肠道形态,促进肠道健康[25]。另外,改性 APT 可维持盲肠微生态平衡[27],并且 APT 还可使回肠黏蛋白 2(*MUC*2)和闭锁连接蛋白-1(*ZO*-1)的 mRNA 丰度显著增加,而使 Toll 样受体 4(*TLR*4)和干扰素-γ(*IFN*-γ)的 mRNA 丰度显著减少[13]。综上所述,APT 可以通过改善肠道形态、肠道菌群,提高肠屏障相关的结构蛋白含量及其基因表达水平等来共同促进肠道健康。

5 小 结

APT 因其独特的棒晶结构和理化特性,一方面可作为吸附剂吸附饲料中是毒素,另一方面可作为功能性饲料原料改善机体免疫功能和抗氧化能力、促进肠道健康,并通过这个 2 方面作用共同来提高动物生产性能和产品品质。在全球“无抗养殖”的大趋势下,APT 具有抗菌、抗炎、防治腹泻等功效,且不产生耐药性和二次污染,可作为环境友好型抗腹泻药物和抗生素类促生长剂替代品应用于饲料。但 APT 的开发利用还处于起步阶段,今后可以从以下几个方面进行系统的研究:1)与有关复合型添加剂联合应用,如益生菌、酶制剂或中草药等;2)探索新的改性技术或复合改性,优化 APT 性能;3)探究 APT 在不同动物饲粮中的替抗效果及机制;4)探究不同动物饲粮中 APT 的适宜添加量等,实现最大化改善畜禽机体健康和提高生产性能,以期在“无抗养殖”进程中充当更重要的角色。

参考文献:

[1] 陈继发,康克浪,曲湘勇.蒙脱石的作用机制及其在家禽生产中的应用[J].动物营养学报,2018,30(4):1217-1223.

[2] HU Y N,CHENG H F,TAO S.Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J].Environment International,2017,107:111-130.

[3] 王爱勤,王文波,郑易安,等.凹凸棒石棒晶束解离及其纳米功能复合材料[M].北京:科学出版社,2014.

[4] GALAN E.Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays[J].Clay Minerals,1996,31(4):443-453.

[5] ZHOU H T.Mixture of palygorskite and montmorillonite (Paly-Mont) and its adsorptive application for mycotoxins[J].Applied Clay Science,2016,131:140-143.

[6] TANG C H,WANG X Q,ZHANG J M.Effects of supplemental palygorskite instead of zinc oxide on growth performance,apparent nutrient digestibility and fecal zinc excretion in weaned piglets[J].Animal Science Journal,2014,85(4):435-439.

[7] SU Y,CHEN Y P,CHENG Y F,et al.Effects of modified palygorskite supplementation on egg quality and mineral element content,and intestinal integrity and

barrier function of laying hens[J]. Biological Trace Element Research,2018,186(2):529-537.
[8] 侯羽浓.载铜凹凸棒粘土对犬源致病性沙门氏菌抑菌性能的研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2014.
[9] EU COMMISSION. Regulation (EC) No.1831/2003 of the European Parliament and of the Council of 22 September 2003 on additives for use in animal nutrition[J]. Official Journal of the European Union, 2003,268:29-43.
[10] EU COMMISSION. Regulation (EU) No. 575/2011 of 16 June 2011 on the catalogue of feed materials [J]. Official Journal of the European Union, 2011, 159:25-65.
[11] 中国农业部.中华人民共和国农业部公告第 2038 号[J].中国饲料,2014(2):5-6.
[12] ZHANG L,YAN R,ZHANG R Q,et al.Effect of different levels of palygorskite inclusion on pellet quality, growth performance and nutrient utilization in broilers[J]. Animal Feed Science and Technology, 2017,223:73-81.
[13] CHEN Y P,CHENG Y F,LI X H,et al.Dietary palygorskite supplementation improves immunity, oxidative status, intestinal integrity, and barrier function of broilers at early age[J]. Animal Feed Science and Technology,2016,219:200-209.
[14] KREKELER M P S, GUGGENHEIM S. Defects in microstructure in palygorskite-sepiolite minerals: a transmission electron microscopy (TEM) study[J]. Applied Clay Science,2008,39(1/2):98-105.
[15] GARCÍA-ROMERO E, SUÁREZ M. On the chemical composition of sepiolite and palygorskite[J]. Clays and Clay Minerals,2010,58(1):1-20.
[16] WANG W B,WANG A Q.Recent progress in dispersion of palygorskite crystal bundles for nanocomposites[J].Applied Clay Science,2015,119:18-30.
[17] CERVINI-SILVA J, NIETO-CAMACHO A, GÓMEZ-VIDALES V. Oxidative stress inhibition and oxidant activity by fibrous clays[J].Colloids and Surfaces B:Biointerfaces,2015,133:32-35.
[18] MURRAY H H. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview [J].Applied Clay Science,2000,17(5/6):207-221.
[19] YANG R,LI D W,LI A M,et al. Adsorption properties and mechanisms of palygorskite for removal of various ionic dyes from water[J]. Applied Clay Science,2018,151:20-28.
[20] 黄昭先,黄健花,王兴国.盐酸活化对凹凸棒土吸附盐酸四环素的影响[J].水处理技术,2011,37(11):47-50.
[21] 张婧.凹凸棒土处理含铅废水与高氟水的吸附热力学及机理研究[D].硕士学位论文.北京:北京大学,2008.
[22] 张丽霞.改性凹凸棒土固载磷钨酸(盐)及其催化酯化研究[D].博士学位论文.无锡:江南大学,2010.
[23] 夏枚生,胡彩虹,许梓荣,等.酸活化坡缕石对肉鸡日粮中黄曲霉毒素 B_1 的去毒效果[J].中国兽医学报,2005,25(1):107-110.
[24] 孙文恺,刘强,刘洋,等.载锌凹凸棒石对 3 种猪常见致病菌的体外抑菌效果[J].安徽农业科学,2019,47(17):85-88.
[25] QIAO L H,CHEN Y P,WEN C,et al.Effects of natural and heat modified palygorskite supplementation on the laying performance, egg quality, intestinal morphology,digestive enzyme activity and pancreatic enzyme mRNA expression of laying hens[J]. Applied Clay Science,2015,104:303-308.
[26] 李晓晗,朱玉萍,温超,等.载锌凹凸棒石黏土中锌的解吸及抑菌作用研究[J].非金属矿,2015,38(3):9-12.
[27] 颜瑞.固相载锌凹凸棒石黏土对肉鸡锌生物利用率及免疫调节机制的研究[D].博士学位论文.南京:南京农业大学,2016.
[28] 曲恒漫,程业飞,周岩民.不同粒度凹凸棒石的载锌及抑菌效果研究[J].非金属矿,2018,41(3):84-86.
[29] 秦小宁,张书源,张絜青,等.凹凸棒土改性方法及水处理应用研究进展[J].江西化工,2019(2):5-9.
[30] 包军杰,余贵芬,蒋新,等.改性凹凸棒石对模拟含酚废水处理机制的研究[J].环境化学,2006,25(1):37-40.
[31] 王瑛,谢刚,赵霞.有机改性凹凸棒土吸附微污染水中苯酚的试验研究[J].兰州理工大学学报,2006,32(4):74-77.
[32] 许巧,程业飞,苏越,等.改性凹凸棒石对饲喂霉变玉米日粮肉鸡生产性能、血清生化指标及抗氧化能力的影响[J].畜牧与兽医,2018,50(5):21-27.
[33] BAMPIDIS V A,CHRISTODOULOU V,THEOPHILOU N, et al. Effect of dietary palygorskite on performance and blood parameters of lactating Holstein cows[J].Applied Clay Science,2014,91-92:25-29.
[34] 罗丹,廖祉亦,温超,等.凹凸棒石吸附剂对蛋鸡生产性能、血清生化指标、抗氧化功能及玉米赤霉烯酮残留的影响[J].中国家禽,2018,40(20):28-32.

[35] 陈凌杰.凹凸棒石玉米赤霉烯酮吸附剂在肉鸡饲料中的应用研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2017.

[36] 朱碧波.改性凹凸棒石黏土和维生素E缓解玉米赤霉烯酮对肉鸡毒性作用的研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2016.

[37] CHENG Y F,XU Q,CHEN Y P,et al.Modified palygorskite improves immunity,antioxidant ability,intestinal morphology,and barrier function in broiler chickens fed naturally contaminated diet with permitted feed concentrations of *Fusarium* mycotoxins[J].Toxins,2018,10(11):482,doi:10.3390/toxins10110482.

[38] 徐子伟,万晶.饲料霉菌毒素吸附剂研究进展[J].动物营养学报,2019,31(12):5391-5398.

[39] KABAK B,DOBSON A D W,VAR I.Strategies to prevent mycotoxin contamination of food and animal feed:a review[J].Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2006,46(8):593-619.

[40] 戎晓平.霉菌毒素生物降解技术与传统吸附剂区别[J].广东饲料,2017,26(12):15-17.

[41] KUBOTA M,NAKABAYASHI T,MATSUMOTO Y,et al.Selective adsorption of bacterial cells onto zeolites[J].Colloids and Surfaces B:Biointerfaces,2008,64(1):88-97.

[42] ZHAO W Q,XING L,HUANG Q Y,et al.Interactions of pathogens *Escherichia coli* and *Streptococcus suis* with clay minerals[J].Applied Clay Science,2012,69:37-42.

[43] CAO Y Y,WEI X,CAI P,et al.Preferential adsorption of extracellular polymeric substances from bacteria on clay minerals and iron oxide[J].Colloids and Surfaces B:Biointerfaces,2011,83(1):122-127.

[44] MA Y L,YANG B,XIE L.Adsorptive property of Cu^{2+}-ZnO/cetylpyridinium-montmorillonite complexes for pathogenic bacterium *in vitro*[J].Colloids and Surfaces B:Biointerfaces,2010,79(2):390-396.

[45] 王晓岚.金属离子的抗菌性能及其抗菌机理研究[D].硕士学位论文.广州:华南理工大学,2015.

[46] BREEN P B,COMPADRE C M,FIFER E K,et al.Quaternary ammonium compounds inhibit and reduce the attachment of viable *Salmonella typhimurium* to poultry tissues[J].Journal of Food Science,2010,60(6):1191-1196.

[47] GUO T,CAO S J,SU R,et al.Adsorptive property of Cu^{2+}-loaded montmorillonite clays for *Escherichia coli* K_{88} *in vitro*[J].Journal of Environmental Sciences,2011,23(11):1808-1815.

[48] 王荐.凹凸棒石对重金属镉的吸附和毒性缓解效应研究[D].硕士学位论文.南京:南京信息工程大学,2016.

[49] 俞腾飞.凹凸棒土/活性炭复合吸附剂的制备及其在废水处理中的应用研究[D].硕士学位论文.北京:北京化工大学,2018.

[50] WANG Y Q,FENG Y,ZHANG X F,et al.Alginate-based attapulgite foams as efficient and recyclable adsorbents for the removal of heavy metals[J].Journal of Colloid and Interface Science,2017,514:190-198.

[51] SALEH T A,TUZEN M,SARI A.Polyamide magnetic palygorskite for the simultaneous removal of Hg(Ⅱ) and methyl mercury;with factorial design analysis[J].Journal of Environmental Management,2018,211:323-333.

[52] ZOU M F,CHEN X Y,LIN X J,et al.Fabrication of magnetic carboxyl-functionalized attapulgite/calcium alginate beads for lead ion removal from aqueous solutions[J].International Journal of Biological Macromolecules,2018,120:789-800.

[53] HUNNINGHAKE G W,GADEK J E,FALES H M,et al.Human alveolar macrophage-derived chemotactic factor for neutrophils:stimuli and partial characterization[J].Journal of Clinical Investigation,1980,66(3):473-483.

[54] CHIN A C,PARKOS C A.Pathobiology of neutrophil transepithelial migration:implications in mediating epithelial injury[J].Annual Review of Pathology:Mechanisms of Disease,2007,2(1):111-143.

[55] CERVINI-SILVA J,NIETO-CAMACHO A,RAMÍREZ-APAN M T,et al.Anti-inflammatory,antibacterial,and cytotoxic activity of fibrous clays[J].Colloids and Surfaces B:Biointerfaces,2015,129:1-6.

[56] ALEXANDER C,RIETSCHEL E T.Invited review:bacterial lipopolysaccharides and innate immunity[J].Journal of Endotoxin Research,2001,7(3):167-202.

[57] MILLER S I,ERNST R K,BADER M W.LPS,TLR4 and infectious disease diversity[J].Nature Reviews Microbiology,2005,3(1):36-46.

[58] PHILLIPS T D.Dietary clay in the chemoprevention of aflatoxin-induced disease[J].Toxicological Sciences,1999,52(Suppl.2):118-126.

[59] ZHANG J M,LV Y F,TANG C H,et al.Effects of dietary supplementation with palygorskite on intestinal integrity in weaned piglets[J].Applied Clay Science,2013,86:185-189.

[60] 王坤,裴付伟,程业飞,等.凹凸棒石缓解热处理豆粕对肉鸡氧化应激的研究[J].中国粮油学报,2019,34(1):69-74.

[61] CHALVATZI S, ARSENOS G, TSERVENI-GOUSSI A, et al. Tolerance and efficacy study of palygorskite incorporation in the diet of laying hens[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 643-647.

[62] ZHOU P, TAN Y Q, ZHANG L, et al. Effects of dietary supplementation with the combination of zeolite and attapulgite on growth performance, nutrient digestibility, secretion of digestive enzymes and intestinal health in broiler chickens[J]. Asian-Australasian Journal Animal Science, 2014, 27(9): 1311-1318.

[63] CHEN Y P, CHENG Y F, YANG W L, et al. An evaluation of palygorskite inclusion on the growth performance and digestive function of broilers[J]. Applied Clay Science, 2016, 129: 1-6.

[64] DU M F, CHEN Y P, CHENG Y F, et al. A comparison study on the effects of dietary conventional and ultra-fine ground palygorskite supplementation on the growth performance and digestive function of broiler chickens[J]. Applied Clay Science, 2019, 181: 105211.

[65] WU Q J, ZHOU Y M, WU Y N, et al. Intestinal development and function of broiler chickens on diets supplemented with clinoptilolite[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2013, 26(7): 987-994.

[66] OUHIDA I, PEREZ J F, GASA J, et al. Enzymes (β-glucanase and arabinoxylanase) and/or sepiolite supplementation and the nutritive value of maize-barley-wheat based diets for broiler chickens[J]. British Poultry Science, 2000, 41(5): 617-624.

[67] LIU D X, SHI X F, ZHONG X, et al. Properties and plugging behaviors of smectite-superfine cement dispersion using as water shutoff in heavy oil reservoir[J]. Applied Clay Science, 2017, 147: 160-167.

[68] XU X Y, XU Y, WANG N F, et al. Effects of superfine grinding of bran on the properties of dough and qualities of steamed bread[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 81: 76-82.

[69] ZHAO X Y, AO Q, YANG L W, et al. Application of superfine pulverization technology in biomaterial industry[J]. Journal of the *Taiwan* Institute of Chemical Engineers, 2009, 40(3): 337-343.

[70] OUYANG J, GU W, ZHANG Y, et al. CO_2 capturing performances of millimeter scale beads made by tetraethylenepentamine loaded ultra-fine palygorskite powders from jet pulverization[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 341: 432-440.

[71] NADERINEJAD S, ZAEFARIAN F, ABDOLLAHI M R, et al. Influence of feed form and particle size on performance, nutrient utilisation, and gastrointestinal tract development and morphometry in broiler starters fed maize-based diets[J]. Animal Feed Science and Technology, 2016, 215: 92-104.

[72] ABDOLLAHI M R, RAVINDRAN V, SVIHUS B. Pelleting of broiler diets: an overview with emphasis on pellet quality and nutritional value[J]. Animal Feed Science and Technology, 2013, 179(1/2/3/4): 1-23.

[73] ZHANG R Q, YANG X, CHEN Y P, et al. Effects of feed palygorskite inclusion on pelleting technological characteristics, growth performance and tissue trace elements content of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. Applied Clay Science, 2015, 114: 197-201.

[74] 杨伟丽.载锌凹凸棒石对肉鸡肌肉品质、组织金属元素沉积及抗氧化功能的影响[D].硕士论文.南京:南京农业大学,2017.

[75] LV Y F, TANG C H, WANG X Q, et al. Effects of dietary supplementation with palygorskite on nutrient utilization in weaned piglets[J]. Livestock Science, 2015, 174: 82-86.

[76] CORTHÉSY B. Role of secretory IgA in infection and maintenance of homeostasis[J]. Autoimmunity Reviews, 2013, 12(6): 661-665.

[77] MANTIS N J, ROL N, CORTHÉSY B. Secretory IgA's complex roles in immunity and mucosal homeostasis in the gut[J]. Mucosal Immunology, 2011, 4(6): 603-611.

[78] 罗有文.载 Zn^{2+} 凹凸棒石黏土对肉鸡的抗菌性和免疫功能的调节作用及相关机理研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2007.

[79] NIELSEN F, MIKKELSEN B B, NIELSEN J B, et al. Plasma malondialdehyde as biomarker for oxidative stress: reference interval and effects of life-style factors[J]. Clinical Chemistry, 1997, 43(7): 1209-1214.

[80] YUAN Y Y, KE X, CHEN F J, et al. Decrease in catalase activity of *Folsomia candida* fed a Bt rice diet[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3714-3720.

[81] WHEATLEY R A. Some recent trends in the analytical chemistry of lipid peroxidation[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2000, 19(10): 617-628.

[82] DOTAN Y, LICHTENBERG D, PINCHUK I. Lipid

peroxidation cannot be used as a universal criterion of oxidative stress[J].Progress in Lipid Research,2004,43(3):200-227.

[83] SINGER A,HUANG P M.Adsorption of humic acid by palygorskite and sepiolite[J].Clay Minerals,1989,24(3):561-564.

[84] PAPADOPOULOS G A,KANOULAS V,ARSENOS G,et al.Effects of palygorskite dietary supplementation on back fat mobilization,leptin levels and oxidative stress parameters in sows[J].Applied Clay Science,2016,132/133:535-541.

[85] 罗有文,王龙昌,周岩民,等.沸石、凹凸棒石黏土对肉鸡抗氧化性能和组织胆固醇的影响[J].粮食与饲料工业,2006(12):37-39.

[86] WOLVEKAMP M C J,DE BRUIN R W F.Diamine oxidase:an overview of historical,biochemical and functional aspects[J].Digestive Diseases,1994,12(1):2-14.

Mechanism of Attapulgite and Its Application in Animal Production

YUAN Yong[1,2] WEN Wei[1,2] FENG Zhimao[1,2] HUANG Xingguo[1,2*]

(1. *College of Animal Science and Technology*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*; 2. *Hunan Co-Innovation Center of Animal Production Safety*, *Changsha* 410128, *China*)

Abstract: Attapulgite (APT) is natural layer chain crystalline hydrated magnesium-aluminosilicate mineral, which can absorb mycotoxins, heavy metals, pathogenic microorganisms and toxic antigens, protect gastrointestinal mucosa, resist inflammation and prevent diarrhea. In addition, modified APT also has the antibacterial effect. As functional feed additive, APT can improve product quality, immune and antioxidant functions, intestinal health, nutrient utilization and animal performance. This paper reviewed the physical and chemical properties, common modification methods, biological functions and mechanisms of APT, as well as the latest research results of its application in animal production at home and abroad. [***Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(6):2533-2542**]

Key words: attapulgite; modification; mechanism; animal production; application

* Corresponding author, professor, E-mail: huangxi8379@aliyun.com

(责任编辑 管景颖)