

王伟兰,王喜之,刘 强,等. 日粮纤维的非淀粉多糖组成及其在成年公鸡体内的降解规律[J]. 江苏农业科学,2014,42(5):175-180.

日粮纤维的非淀粉多糖组成及其在成年公鸡体内的降解规律

王伟兰,王喜之,刘 强,张亚伟,高月琴,张永婧

(南京农业大学动物科技学院/农业部动物生理生化重点开放实验室,江苏南京 210095)

摘要:测定了由大豆皮、苜蓿草粉、西兰花茎叶粉、麸皮和米糠这 5 种典型高纤维原料作为唯一纤维来源的半纯合日粮在成年公鸡不同消化道内的 NDF、ADF 和 CF 总量及其单糖、半乳糖醛酸含量,并对各肠段单糖组成变化进行主成分分析,比较 3 种洗涤纤维成分在成年公鸡体内的生理性变化规律。结果表明,3 种洗涤纤维总量在不同消化位点含量各有差异,但总体变化趋势相似,表现为小肠前段明显下降,小肠后段略有上升,到达粪便再次明显下降;NDF、ADF 和 CF 的全消化道降解率范围分别为 14%~32%、4%~16%和 3%~13%。5 种纤维来源的非淀粉多糖中,最易消化的单糖残基为阿拉伯糖,成年公鸡对非淀粉多糖的主要消化部位在大肠。

关键词:成年公鸡;洗涤纤维;单糖组成;糖醛酸;消化率;消化部位

中图分类号: S831.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)05-0175-06

日粮纤维(dietary fiber,DF)虽然不能被人 and 单胃动物自身的消化酶降解,但因包括纤维素、半纤维素、果胶和木质素等多种成分,加之消化道微生物的作用,日粮纤维在饲料消化和营养代谢过程中并不是简单的惰性组分^[1],而且表现出多样化的活性^[2-3],长期受到学界关注。仅内涵鉴定和定量方法,就先后提出了粗纤维(crude fiber,CF)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)和日粮纤维(dietary fiber,DF)等多种评价体系。由于各种量化方法依据的理化原理的差

别,所得结果代表的化学内涵也不尽相同,导致相关研究结果可比性差,难以获得一致性认识。无论上述哪种体系,在众多的研究中积累了大量数据,通过揭示各种纤维的化学内涵,找出相互间关系,可以提供认识已有研究结果的新视角。

本试验选用 5 种不同植物种属的典型高纤维饲料原料,分别测定了 5 种原料为唯一纤维来源的半纯合日粮在成年公鸡不同消化位点的 NDF、ADF 和 CF 总量及其中的单糖组成和糖醛酸含量,揭示不同纤维分析指标中的多糖组成和结构差别,探明在不同生理条件下含量及组成的变化规律,以期从糖化学角度为正确认识各种纤维提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验选用的 5 种高纤维原料,分别为米糠、西兰花茎叶

低,可用于肥胖症犬猫的治疗。

参考文献:

- [1] Crane S W. Occurrence and management of obesity in companion animals[J]. Journal of Small Animal Practice, 1991, 32(6): 275-282.
- [2] Kealy R D, Lawler D F, Ballam J M, et al. Effects of diet restriction on life span and age-related changes in dogs[J]. Journal of the American Veterinary Medical Association, 2002, 220(9): 1315-1320.
- [3] Markwell P J, van Erk W, Parkin G D, et al. Obesity in the dog[J]. Journal of Small Animal Practice, 1990, 31: 533-537.
- [4] Ren C J, Patterson E, Gagner M. Early results of laparoscopic biliopancreatic diversion with duodenal Switch; a case series of 40 consecutive patients[J]. Obesity Surgery, 2000, 10(6): 514-523.
- [5] Han S M, Kim W W, Oh Hyun J. Results of laparoscopic sleeve gastrectomy(LSG) at 1 year in morbidly obese Korean patients[J]. Obesity Surgery, 2005, 15(10): 1469-1475.

收稿日期:2014-03-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:31172237)。

作者简介:王伟兰(1988—),女,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事饲料资源开发与利用研究。E-mail:2011105050@njau.edu.cn。

通信作者:刘 强。E-mail:liuayang@msn.com。

3 结论与讨论

袖状胃切除术是近几年研究的一种新的减肥手术。2000 年, Ren^[4]等首先用腹腔镜下袖状胃切除术作为高危超级肥胖患者第一阶段的治疗手术。随后由于袖状胃切除术的减重效果被越来越多的研究者推崇,2005 年韩国 MooHan^[5]等通过研究进一步肯定了袖状胃切除术独立作为减肥手术的可行性,同时指出该手术方式非常适合亚太地区的肥胖者,这也为肥胖症的宠物犬猫提供了一种新的治疗方法。

本试验首先建立肥胖症的模型,然后进行手术操作,手术成功率 100%。研究发现,袖状胃切除后可以显著降低犬的采食量和体质量,并且术后 4 周体质量降低较明显,术后 12 周体质量降低速度趋于缓和,表明该手术是一种中长期减肥方法。血脂指标测定结果表明,本手术能降低血液中 TG 和 Chol 的浓度,提高 HDL 的浓度,这可能是减肥的主要生理生化原因。今后将主要研究袖状胃切除后影响血脂代谢的机制。本试验证实了袖状胃切除术具有减肥作用,手术风险较

粉(南京禾嘉牧业有限公司提供),大豆皮、麸皮[中粮东海粮油工业(张家港)有限公司提供],苜蓿草粉(上海奶牛集团提供)。分别以上述 5 种原料作为唯一非淀粉多糖来源,配合适当的淀粉和复合维生素,配制成 5 种半纯合日粮,同时加入 0.3% Cr₂O₃ 作为外源指示剂制成颗粒饲料。日粮配方见表 1。

| 表 1 日粮配方 | | | | | |
|----------|--------------|----------|----------|----------|-----------|
| 原料 | 风干物质组成(g/kg) | | | | |
| | 大豆皮 日粮 | 麦麸 日粮 | 米糠 日粮 | 苜蓿 日粮 | 西兰花 日粮 |
| 大豆皮 | 746.5 | | | | |
| 麦麸 | | 996.5 | | | |
| 米糠 | | | 946.5 | | |
| 苜蓿草粉 | | | | 846.5 | |
| 西兰花茎叶粉 | | | | | 996.5 |
| 淀粉 | 250.0 | | 50.0 | 150.0 | |
| 维生素预混料 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 三氧化二铬 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |

选取日龄、体重相近的成年海兰蛋公鸡 40 羽,随机分为 5 组,每组 8 个重复,进行单笼饲养。每组随机饲喂 1 种上述日粮,参照 GB/T 26437—2010《畜禽饲料有效性与安全性评价 强饲法测定鸡饲料表观代谢能技术规程》,将试验分为预试和试验 2 个阶段,预试期 3 d,试验期 3 d。预试期结束后,排空禁食 48 h;试验期每天每羽鸡强饲 50 g 饲料,整个试验过程中保证试验鸡自由饮水。

1.2 样品采集与测定

试验期内每天收集 3 次粪便,放在 4 ℃ 冰箱暂存,合并同 1 羽鸡每天的粪样,分别称鲜粪重,然后在 65 ℃ 烘箱中减压烘干至恒重,取出返潮过夜、称重,合并同 1 羽鸡 3 d 的粪样,粉碎过 0.5 mm 筛,保存在塑料瓶中,在 4 ℃ 冰箱中保存。试验最后 1 d 强饲后 4 h,快速颈静脉放血宰杀所有试验鸡,分别收集小肠前段(十二指肠肌胃幽门端至卵黄囊憩室,以下简称前肠)、回肠(卵黄囊憩室至回盲结合处)食糜,每 2 羽鸡相同肠段食糜合并为 1 个样品,用与粪便样品相同的方法烘干、回潮、粉碎和保存。

粗纤维、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维均用 ANKOM A220 测定,具体方法参照 Crude Fiber Analysis in Feeds By Filter Bag Technique; Neutral Detergent Fiber in Feeds Filter Bag Technique; Acid Detergent Fiber in Feeds Filter Bag Technique。每个样品的每个指标均设 4 个重复,其中 2 个用于测定纤维含量,另 2 个洗涤剩余残渣作为非淀粉多糖分析样品。

非淀粉多糖含量测定参照 Theander 和 AOAC Official Method 994.13 的方法^[4],操作细节根据实验室条件有少量修改。其中 CF、NDF 和 ADF 残渣未进行淀粉酶和葡萄糖苷酶水解处理,直接进行酸水解,然后经还原和衍生,将其中糖残基转变为糖醇乙酸酯,以阿洛糖为内标,通过气相色谱定量(Agilent 7890A 气相色谱仪,7683B 液体自动进样器,毛细色谱柱:DB-225(30 m×0.25 mm×0.25 μm);糖醛酸含量测定参照 AOAC Official Method 994.13 法,以半乳糖醛酸为标准,根据 400 nm 和 450 nm 吸光度差值计算而得。铬含量测定参照 ISO 6869:2000 原子吸收(日立 Z-2000 原子吸收分

光光度计)法,测定其铬空心阴极灯波长 395.3 nm 处吸光度,依据标准曲线计算得到。

1.3 数据处理与分析

外源指示剂法计算消化率:

饲料养分消化率=100%-($\frac{\text{饲料中指示剂含量}}{\text{粪中指示剂含量}} \times \frac{\text{粪中养分含量}}{\text{饲料中养分含量}}$)×100%;

单糖各肠段含量改变量计算公式:各肠段单糖含量改变量=上一肠段单糖含量-单糖该肠段单糖含量;十二指肠改变量=饲料中单糖含量-十二指肠单糖含量;全消化道改变量=饲料中单糖含量-饲料中单糖含量。

数据采用 SPSS18.0 多因素方差分析进行分析处理,结果采用平均值±标准差表示,主成分分析结果用因子载荷矩阵和积累方差表示。

2 结果与分析

2.1 纤维含量及各区段消化率

从表 2 可以看出,3 种洗涤纤维的总量以 NDF 含量最高,5 种原料的 NDF 含量均值在 18.92%~40.49% 之间,CF 含量最低,仅为 7.34%~25.16%;大豆皮、米糠和苜蓿草粉 NDF 与 CF 含量差异显著,麦麸和西兰花的 3 种纤维含量差异显著;3 种洗涤纤维在不同消化位点消化率各有差异,但总体变化趋势相似,表现为小肠前段部分消化,小肠后段消化率下降,到达粪便则消化率明显上升;粪便样品测得的 NDF 全消化道消化率与其他各位点消化率均差异显著;大豆皮、米糠和西兰花的 ADF 全消化道表观消化率与其他位点差异显著,麦麸和苜蓿草粉则是回肠消化率与其他位点差异显著;各饲料在不同消化位点的 CF 消化率与 ADF 类似;可以通过 NDF 与 ADF 的差值计算得到各肠段半纤维素含量以及消化率,其中全消化道消化率为 46.4%。

2.2 洗涤纤维单糖组成分析

5 种纤维性日粮的成年公鸡小肠前段食糜、小肠后段食糜和粪便样品中 NDF、ADF、CF 洗涤残渣中的单糖百分含量分别见表 3、表 4、表 5。从单糖组成来看,含量最高的单糖是葡萄糖,平均含量为 9.59%~13.22%,其次为木糖,NDF 中含量为(5.04±3.66)%;含量最低的单糖为岩藻糖,不足 0.02%。从各自在不同消化部位的变化规律来看,所有饲料 NDF 中的葡萄糖含量,除大豆皮以外的 4 种饲料的糖醛酸、木糖和甘露糖含量在前肠有小幅上升,到回肠所有单糖含量均明显上升,到粪便中有不同程度降低(西兰花除外),半乳糖在回肠段与饲料含量差异显著,与前肠含量差异显著,其余差异均不显著;与 NDF 类似,所有饲料 ADF 中的葡萄糖含量、除西兰花以外的 4 种饲料的糖醛酸和木糖含量在前肠有小幅上升,到回肠所有单糖含量均明显上升,到粪便中有不同程度降低(西兰花除外),其中鼠李糖、阿拉伯糖和半乳糖在回肠段与饲料含量均差异显著;而所有饲料 CF 中的葡萄糖和甘露糖含量、除苜蓿草粉以外的 4 种饲料的木糖含量在前肠有小幅上升,到回肠所有单糖含量均明显上升,到粪便中则相对稳定,西兰花甚至出现了较为明显的上升,其中 CF 中岩藻糖在粪便中的含量与前肠差异显著,阿拉伯糖在前肠与回肠段以及粪便与饲料中含量差异显著,粪便中与前肠含量差异显著。

表 2 日粮 NDF、ADF 和 CF 含量及其在成年海兰蛋公鸡不同消化位点的消化率

| 指标 | 纤维种类 | 消化位点 | 大豆皮 | 麦麸 | 米糠 | 苜蓿草粉 | 西兰花茎叶粉 |
|----------|--------|------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 纤维含量(%) | 中性洗涤纤维 | 饲料 | 40.49 ± 1.74a | 38.73 ± 0.60a | 18.92 ± 1.82b | 28.74 ± 2.203a | 30.91 ± 0.26a |
| | 酸性洗涤纤维 | 饲料 | 34.99 ± 0.90a | 12.78 ± 0.17b | 11.05 ± 0.00a | 23.01 ± 2.11ab | 24.00 ± 0.80b |
| | 粗纤维 | 饲料 | 25.16 ± 0.88b | 9.91 ± 0.00c | 7.34 ± 0.28a | 18.44 ± 0.22b | 17.60 ± 0.30c |
| 表观消化率(%) | 中性洗涤纤维 | 前肠 | 0.04 ± 0.01b | 0.07 ± 0.02b | 0.07 ± 0.01b | 0.04 ± 0.02a | 0.12 ± 0.010b |
| | | 回肠 | 0.01 ± 0.00b | 0.03 ± 0.01b | 0.05 ± 0.01b | -0.01 ± 0.00b | 0.10 ± 0.02b |
| | | 粪便 | 0.21 ± 0.05a | 0.14 ± 0.00a | 0.13 ± 0.02a | 0.18 ± 0.03c | 0.32 ± 0.07a |
| | | 标准误 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.04 |
| | | | | | | | |
| | 酸性洗涤纤维 | 前肠 | 0.04 ± 0.01b | 0.02 ± 0.01b | 0.02 ± 0.00b | 0.03 ± 0.01b | 0.07 ± 0.01a |
| | | 回肠 | 0.03 ± 0.04b | -0.05 ± 0.01a | 0.01 ± 0.04b | -0.04 ± 0.05a | 0.02 ± 0.00b |
| | | 粪便 | 0.16 ± 0.04a | 0.04 ± 0.02b | 0.12 ± 0.04a | 0.06 ± 0.010b | 0.15 ± 0.02c |
| | | 标准误 | 0.07 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.06 |
| | | | | | | | |
| | 粗纤维 | 前肠 | 0.04 ± 0.02ab | 0.01 ± 0.00b | 0.03 ± 0.02a | 0.01 ± 0.00a | 0.06 ± 0.01a |
| | | 回肠 | 0.00 ± 0.03b | -0.05 ± 0.01a | -0.03 ± 0.01b | -0.04 ± 0.02b | 0.02 ± 0.01b |
| | | 粪便 | 0.10 ± 0.05a | 0.03 ± 0.02b | 0.10 ± 0.02c | 0.05 ± 0.02c | 0.13 ± 0.00c |
| | | 标准误 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| | | | | | | | |

注:同列数据后不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

表 3 5 种高纤维日粮在成年公鸡不同消化位点 NDF 残渣的单糖组成

| 日粮 | 消化位点 | 单糖组成(%) | | | | | | | |
|--------|------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|
| | | 鼠李糖 | 岩藻糖 | 阿拉伯糖 | 木糖 | 甘露糖 | 半乳糖 | 葡萄糖 | 糖醛酸 |
| 大豆皮 | 饲料 | 0.32 ± 0.03 | 0.11 ± 0.01 | 1.85 ± 0.20 | 4.49 ± 0.46 | 1.27 ± 0.01 | 0.48 ± 0.01 | 20.51 ± 1.36 | 1.74 ± 0.04 |
| | 前肠 | 0.32 ± 0.04 | 0.09 ± 0.01 | 1.68 ± 0.04 | 4.26 ± 0.20 | 1.11 ± 0.14 | 0.43 ± 0.04 | 20.87 ± 0.43 | 1.55 ± 0.19 |
| | 回肠 | 0.39 ± 0.02 | 0.12 ± 0.01 | 1.95 ± 0.22 | 4.97 ± 0.63 | 1.45 ± 0.09 | 0.56 ± 0.04 | 25.38 ± 1.25 | 2.37 ± 0.38 |
| | 粪便 | 0.34 ± 0.01 | 0.11 ± 0.01 | 1.87 ± 0.23 | 5.06 ± 0.54 | 1.13 ± 0.04 | 0.49 ± 0.02 | 23.14 ± 0.61 | 1.66 ± 0.24 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.17 | 0.06 | 0.02 | 0.73 | 0.13 |
| 麦麸 | 饲料 | 0.07 ± 0.01 | 0.01 ± 0.01 | 6.04 ± 0.31 | 10.11 ± 0.49 | 0.26 ± 0.01 | 0.42 ± 0.01a | 7.56 ± 0.10 | 0.66 ± 0.02 |
| | 前肠 | 0.08 ± 0.01 | 0.02 ± 0.00 | 6.22 ± 0.06 | 11.48 ± 0.40 | 0.28 ± 0.04 | 0.44 ± 0.01a | 8.19 ± 0.04 | 0.88 ± 0.03 |
| | 回肠 | 0.12 ± 0.01 | 0.02 ± 0.01 | 9.39 ± 0.65 | 15.36 ± 0.52 | 0.49 ± 0.02 | 0.69 ± 0.06b | 12.11 ± 1.22 | 0.87 ± 0.11 |
| | 粪便 | 0.11 ± 0.01 | 0.01 ± 0.01 | 8.19 ± 0.11 | 13.65 ± 0.45 | 0.4 ± 0.04 | 0.62 ± 0.02ab | 11.13 ± 0.22 | 0.60 ± 0.01 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.54 | 0.77 | 0.04 | 0.04 | 0.74 | 0.05 |
| 米糠 | 饲料 | 0.07 ± 0.01 | 0.04 ± 0.00 | 2.53 ± 0.16 | 2.68 ± 0.20 | 0.26 ± 0.01 | 0.61 ± 0.01a | 4.39 ± 0.22 | 0.58 ± 0.01 |
| | 前肠 | 0.07 ± 0.01 | 0.04 ± 0.01 | 2.88 ± 0.23 | 3.13 ± 0.24 | 0.27 ± 0.02 | 0.75 ± 0.02a | 5.57 ± 0.23 | 0.68 ± 0.05 |
| | 回肠 | 0.12 ± 0.04 | 0.06 ± 0.03 | 4.38 ± 1.60 | 5.23 ± 0.63 | 0.37 ± 0.15 | 1.08 ± 0.39b | 8.29 ± 2.04 | 1.15 ± 0.28 |
| | 粪便 | 0.10 ± 0.03 | 0.07 ± 0.01 | 3.98 ± 0.72 | 4.39 ± 0.84 | 0.38 ± 0.05 | 1.05 ± 0.12ab | 7.78 ± 1.02 | 0.88 ± 0.14 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.01 | 0.36 | 0.37 | 0.03 | 0.09 | 0.61 | 0.09 |
| 苜蓿草粉 | 饲料 | 0.18 ± 0.01 | 0.08 ± 0.00 | 0.63 ± 0.00 | 3.03 ± 0.02 | 0.59 ± 0.02 | 0.54 ± 0.01a | 10.12 ± 0.50 | 0.77 ± 0.08 |
| | 前肠 | 0.17 ± 0.01 | 0.07 ± 0.02 | 0.60 ± 0.04 | 3.56 ± 0.04 | 0.64 ± 0.01 | 0.52 ± 0.02a | 11.28 ± 0.37 | 0.87 ± 0.06 |
| | 回肠 | 0.24 ± 0.01 | 0.11 ± 0.00 | 0.79 ± 0.03 | 4.23 ± 0.14 | 0.82 ± 0.04 | 0.69 ± 0.01b | 14.1 ± 0.78 | 0.68 ± 0.06 |
| | 粪便 | 0.21 ± 0.01 | 0.09 ± 0.00 | 0.59 ± 0.05 | 3.67 ± 0.08 | 0.70 ± 0.03 | 0.56 ± 0.04ab | 12.72 ± 0.43 | 0.47 ± 0.10 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.13 | 0.03 | 0.02 | 0.48 | 0.05 |
| 西兰花茎叶粉 | 饲料 | 0.13 ± 0.01 | 0.16 ± 0.01 | 0.62 ± 0.02 | 1.72 ± 0.10 | 0.48 ± 0.03 | 0.82 ± 0.01a | 6.99 ± 0.86 | 0.40 ± 0.01 |
| | 前肠 | 0.10 ± 0.00 | 0.14 ± 0.01 | 0.51 ± 0.00 | 1.76 ± 0.02 | 0.54 ± 0.04 | 0.69 ± 0.02a | 8.71 ± 0.89 | 0.45 ± 0.04 |
| | 回肠 | 0.13 ± 0.03 | 0.17 ± 0.04 | 0.64 ± 0.05 | 2.03 ± 0.23 | 0.58 ± 0.12 | 0.87 ± 0.10b | 9.28 ± 2.48 | 0.29 ± 0.04 |
| | 粪便 | 0.13 ± 0.01 | 0.18 ± 0.02 | 0.5 ± 0.03 | 2.13 ± 0.02 | 0.59 ± 0.03 | 0.79 ± 0.03ab | 9.50 ± 0.75 | 0.32 ± 0.11 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.07 | 0.02 | 0.03 | 0.51 | 0.03 |

2.3 各肠段洗涤纤维组成变化主成分分析

针对各洗涤纤维前肠、回肠、后肠与全消化道单糖含量改变得出的主成分分析结果(表 6)表明,所提取的各特征值累计贡献率都在 85% 以上,符合主成分提取原则。在 3 种纤维单糖组成变化的主成分因子中,阿拉伯糖、木糖、甘露糖、半乳糖、葡萄糖和糖醛酸这几种含量较高的单糖都有与之相关系数达到 0.90 的主成分因子存在,说明所提取的主成分能够较好解释引起各肠段单糖组成改变的主要因素。总体来看,3

种纤维单糖含量改变的主成分分析结果各有异同,但也存在相似规律。从各消化位点的主成分分布来看,3 种洗涤纤维的组成单糖在因子载荷图上的分布均有在前肠较为松散而回肠段靠拢,到粪便再次散开的趋势;各肠段的单糖组成改变均有某一个主成分因子同时与阿拉伯糖、木糖相关系数较大 3 种洗涤纤维的全消化道单糖组成改变均与半乳糖、葡萄糖和糖醛酸相关系数较高;岩藻糖与 CF 前肠及回肠单糖组成改变相关系数存在较大的负相关系数,而与 ADF 各肠段单糖组

表 4 5 种高纤维日粮在成年公鸡不同消化位点 ADF 残渣的单糖组成

| 日粮 | 消化位点 | 单糖组成(%) | | | | | | | |
|--------|------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|
| | | 鼠李糖 | 岩藻糖 | 阿拉伯糖 | 木糖 | 甘露糖 | 半乳糖 | 葡萄糖 | 糖醛酸 |
| 大豆皮 | 饲料 | 0.15±0.01a | 0.01±0.01 | 0.08±0.01a | 3.13±0.01 | 1.05±0.06 | 0.05±0.01a | 22.25±0.07 | 1.92±0.01 |
| | 前肠 | 0.15±0.03ab | ND | 0.09±0.03ab | 3.27±0.41 | 0.96±0.06 | 0.03±0.01ab | 23.18±0.52 | 2.07±0.22 |
| | 回肠 | 0.19±0.05b | 0.02±0.02 | 0.11±0.01b | 4.11±0.52 | 1.20±0.02 | 0.05±0.01b | 26.71±0.47 | 2.76±0.21 |
| | 粪便 | 0.17±0.01ab | 0.01±0.01 | 0.10±0.02ab | 3.66±0.07 | 1.00±0.02 | 0.04±0.01ab | 26.56±1.01 | 2.19±0.54 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.15 | 0.03 | 0.00 | 0.63 | 0.13 |
| 麦麸 | 饲料 | 0.04±0.01a | 0.01±0.01 | 0.04±0.01a | 0.90±0.11 | 0.21±0.01 | 0.01±0.01a | 7.03±0.66 | 0.17±0.01 |
| | 前肠 | 0.06±0.01ab | 0.03±0.01 | 0.04±0.01ab | 0.97±0.02 | 0.31±0.03 | 0.01±0.01ab | 7.60±0.62 | 0.20±0.02 |
| | 回肠 | 0.07±0.01b | 0.02±0.01 | 0.05±0.01b | 1.55±0.18 | 0.35±0.01 | 0.02±0.01b | 11.61±0.1 | 0.32±0.01 |
| | 粪便 | 0.06±0.01ab | ND | 0.04ab | 1.38±0.14 | 0.30±0.02 | 0.02±0.01ab | 11.35±0.44 | 0.33±0.01 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.02 | 0.00 | 0.78 | 0.03 |
| 米糠 | 饲料 | 0.05±0.01a | 0.01±0.01 | 0.03±0.00a | 0.31±0.01 | 0.16±0.01 | 0.01±0.00a | 5.58±0.45 | 0.17±0.01 |
| | 前肠 | 0.06±0.01ab | 0.01±0.01 | 0.03±0.01ab | 0.33±0.05 | 0.20±0.01 | 0.02±0.01ab | 6.75±0.20 | 0.28±0.02 |
| | 回肠 | 0.08±0.02b | 0.01±0.01 | 0.05±0.02b | 0.77±0.54 | 0.31±0.06 | 0.02±0.01b | 11.42±0.61 | 0.41±0.15 |
| | 粪便 | 0.06±0.01ab | 0.02±0.01 | 0.03±0.01ab | 0.44±0.06 | 0.25±0.02 | 0.02±0.00ab | 8.98±0.46 | 0.31±0.07 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.10 | 0.02 | 0.00 | 0.72 | 0.04 |
| 苜蓿草粉 | 饲料 | 0.03±0.04a | 0.01±0.01 | 0.02±0.02a | 0.64±0.90 | 0.28±0.40 | 0.03±0.04a | 5.34±7.54 | 0.88±0.03 |
| | 前肠 | 0.07±0.02ab | 0.02±0.01 | 0.04±0.01ab | 1.6±0.19 | 0.63±0.04 | 0.04±0.01ab | 12.93±1.03 | 1.27±0.17 |
| | 回肠 | 0.14±0.02b | ND | 0.07±0.01b | 2.01±0.19 | 0.78±0.03 | 0.06±0.01b | 14.94±0.70 | 2.01±0.14 |
| | 粪便 | 0.08±0.01ab | 0.01±0.01 | 0.03±0.01ab | 1.7±0.07 | 0.64±0.05 | 0.05±0.00ab | 13.21±0.95 | 1.18±0.22 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.17 | 0.07 | 0.01 | 1.29 | 0.14 |
| 西兰花茎叶粉 | 饲料 | 0.05±0.01 | 0.01±0.01 | 0.045±0.01 | 0.85±0.11 | 0.44±0.04 | 0.055±0.01 | 7.34±1.16 | 1.16±0.06 |
| | 前肠 | 0.05±0.01 | 0.02±0.01 | 0.033±0.01 | 0.76±0.09 | 0.46±0.12 | 0.040±0.01 | 8.31±2.36 | 1.04±0.31 |
| | 回肠 | 0.07±0.01 | 0.02±0.02 | 0.060±0.02 | 1.14±0.13 | 0.56±0.08 | 0.070±0.01 | 9.55±2.05 | 1.78±0.44 |
| | 粪便 | 0.08±0.02 | 0.01±0.01 | 0.050±0.01 | 1.23±0.26 | 0.66±0.13 | 0.060±0.02 | 12.28±2.74 | 1.81±0.11 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | 0.81 | 0.14 |

注:ND 表示未检测出。

表 5 5 种高纤维日粮在成年公鸡不同消化位点 CF 残渣的单糖组成

| 日粮 | 消化位点 | 单糖组成(%) | | | | | | | |
|--------|------|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| | | 鼠李糖 | 岩藻糖 | 阿拉伯糖 | 木糖 | 甘露糖 | 半乳糖 | 葡萄糖 | 糖醛酸 |
| 大豆皮 | 饲料 | 0.09±0.01 | 0.01±0.00 | 0.06±0.01ac | 1.32±0.03 | 0.2±0.02 | 0.03±0.00 | 15.83±0.26 | 0.13±0.01 |
| | 前肠 | 0.10±0.02 | 0.01±0.01 | 0.06±0.01a | 1.46±0.20 | 0.21±0.02 | 0.04±0.01 | 15.73±0.15 | 0.14±0.03 |
| | 回肠 | 0.12±0.02 | 0.02±0.01 | 0.08±0.01bc | 1.75±0.26 | 0.32±0.01 | 0.06±0.01 | 19.11±2.74 | 0.16±0.03 |
| | 粪便 | 0.12±0.01 | 0.02±0.01 | 0.09±0.01b | 1.92±0.06 | 0.25±0.05 | 0.04±0.01 | 21.23±0.98 | 0.16±0.00 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.20 | 0.03 | 0.01 | 2.17 | 0.01 |
| 麦麸 | 饲料 | 0.03±0.00 | ND | 0.04±0.00ac | 0.42±0.00 | 0.05±0.00 | 0.02±0.00 | 4.44±0.00 | 0.06±0.01 |
| | 前肠 | 0.05±0.01 | ND | 0.03±0.00a | 0.46±0.02 | 0.08±0.02 | 0.02±0.00 | 5.02±0.40 | 0.06±0.01 |
| | 回肠 | 0.05±0.00 | ND | 0.05±0.01bc | 0.76±0.01 | 0.08±0.00 | 0.03±0.01 | 9.30±0.10 | 0.09±0.00 |
| | 粪便 | 0.04±0.00 | ND | 0.05±0.00b | 0.73±0.00 | 0.07±0.00 | 0.03±0.00 | 8.59±0.00 | 0.09±0.01 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.01 | 0.00 | 1.28 | 0.01 |
| 米糠 | 饲料 | 0.03±0.01 | 0.01±0.01 | 0.03±0.01ac | 0.18±0.01 | 0.04±0.00 | 0.04±0.01 | 2.87±0.06 | 0.05±0.01 |
| | 前肠 | 0.03±0.01 | 0.01±0.00 | 0.03±0.00a | 0.26±0.02 | 0.06±0.00 | 0.04±0.01 | 4.28±0.27 | 0.06±0.01 |
| | 回肠 | 0.05±0.01 | 0.03±0.02 | 0.05±0.01bc | 0.53±0.21 | 0.09±0.01 | 0.06±0.00 | 7.32±2.02 | 0.09±0.03 |
| | 粪便 | 0.04±0.00 | 0.01±0.01 | 0.06±0.01b | 0.44±0.08 | 0.08±0.01 | 0.07±0.02 | 6.42±0.30 | 0.08±0.00 |
| | 标准误 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.66 | 0.01 |
| 苜蓿草粉 | 饲料 | 0.07±0.01 | 0.02±0.02 | 0.05±0.01ac | 1.36±0.06 | 0.12±0.01 | 0.1±0.01 | 6.72±0.18 | 0.35±0.07 |
| | 前肠 | 0.07±0.01 | 0.02±0.00 | 0.04±0.01a | 1.31±0.11 | 0.13±0.00 | 0.08±0.00 | 8.15±0.03 | 0.30±0.01 |
| | 回肠 | 0.09±0.00 | ND | 0.07±0.01bc | 2.04±0.07 | 0.19±0.01 | 0.12±0.01 | 13.66±0.45 | 0.39±0.05 |
| | 粪便 | 0.09±0.01 | ND | 0.08±0.01b | 2.05±0.04 | 0.18±0.01 | 0.15±0.01 | 10.49±0.71 | 0.42±0.02 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.01 | 0.01 | 1.01 | 0.02 |
| 西兰花茎叶粉 | 饲料 | 0.04±0.00 | 0.020±0.01 | 0.05±0.01ac | 0.79±0.02 | 0.12±0.01 | 0.14±0.01 | 5.47±0.21 | 0.17±0.01 |
| | 前肠 | 0.07±0.02 | 0.025±0.01 | 0.05±0.01a | 0.90±0.08 | 0.15±0.02 | 0.12±0.00 | 7.42±1.34 | 0.13±0.00 |
| | 回肠 | 0.05±0.01 | 0.010±0.01 | 0.06±0.01bc | 1.16±0.07 | 0.16±0.02 | 0.17±0.02 | 9.05±1.63 | 0.20±0.05 |
| | 粪便 | 0.08±0.01 | 0.010±0.01 | 0.09±0.01b | 1.51±0.28 | 0.23±0.04 | 0.22±0.01 | 12.76±2.40 | 0.26±0.04 |
| | 标准误 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 1.03 | 0.02 |

注:ND 表示未检测出。

表 6 各纤维单糖组成在不同消化道区段的改变量主成分分析因子载荷矩阵及提取因子累计方差

| 洗涤纤维 | 消化位点 | 因子 | 因子载荷矩阵 | | | | | | | | | |
|--------|--------|------|--------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|
| | | | 方差(%) | 鼠李糖 | 岩藻糖 | 阿拉伯糖 | 木聚糖 | 甘露糖 | 半乳糖 | 葡萄糖 | 糖醛酸 | |
| 中性洗涤纤维 | 前肠 | 1 | 58.09 | 0.96 | 0.70 | | | 0.90 | 0.89 | 0.95 | 0.92 | |
| | | 2 | 34.66 | | | 0.78 | 0.83 | | | | | |
| | 回肠 | 1 | 55.55 | 0.95 | 0.97 | | | 0.88 | | 0.84 | 0.98 | |
| | | 2 | 39.14 | | | 1.00 | 0.97 | | 0.85 | | | |
| | 后肠 | 1 | 50.05 | | 0.77 | 0.94 | 0.92 | | 0.82 | | | |
| | | 2 | 41.86 | 0.95 | | | | 0.78 | | 0.76 | 0.92 | |
| | 全消化道 | 1 | 68.11 | 0.91 | | 0.97 | 0.93 | 0.91 | 0.99 | 0.87 | | |
| | | 2 | 23.82 | | 0.78 | | | | | | 0.97 | |
| | 酸性洗涤纤维 | 前肠 | 1 | 51.10 | 0.77 | | 0.98 | 0.86 | | | 0.86 | 0.83 |
| | | | 2 | 39.18 | | 0.94 | | | 0.91 | 0.94 | | |
| 回肠 | | 1 | 46.13 | | | 0.89 | 0.91 | | | 1.00 | 0.75 | |
| | | 2 | 41.71 | 0.79 | 0.99 | | | 0.87 | | | 0.63 | |
| 后肠 | | 1 | 41.94 | | | 0.86 | 0.90 | | | 0.96 | 0.73 | |
| | | 2 | 30.92 | 0.76 | 0.97 | | | | | | | |
| | | 3 | 21.27 | | | | | 0.79 | 0.9 | | | |
| 全消化道 | | 1.00 | 44.51 | | | 0.84 | 0.94 | | | 0.97 | 0.94 | |
| | | 2 | 32.61 | 0.83 | 0.94 | | | | | | | |
| | | 3 | 18.91 | | | | | 0.73 | 0.98 | | | |
| 粗纤维 | 前肠 | 1 | 34.59 | | -0.97 | 0.97 | 0.71 | | | | | |
| | | 2 | 30.59 | | | | | | 0.88 | -0.86 | 0.92 | |
| | | 3 | 29.11 | 0.96 | | | | 0.91 | | | | |
| | 回肠 | 1 | 49.08 | 1.00 | | 0.90 | 0.88 | 0.83 | | 0.91 | | |
| | | 2 | 29.15 | | | | | | 0.90 | | 0.82 | |
| | | 3 | 18.49 | | -0.98 | | | | | | | |
| | 后肠 | 1 | 60.66 | 0.94 | | 0.96 | 0.97 | 0.79 | | 0.97 | | |
| | | 2 | 28.00 | | | | | | 0.92 | | 0.86 | |
| | 全消化道 | 1 | 70.01 | 0.97 | | 0.91 | 0.86 | 0.97 | 0.87 | 0.95 | 0.89 | |
| | | 2 | 20.83 | | 0.97 | | | | | | | |

注:相关性系数 <0.7 的未显示。

成改变正相关系数较大;糖醛酸与 NDF 各肠段单糖组成改变因子相关性系数较其他 2 种纤维要高。

3 讨论

ADF、NDF 和 CF 都是描述饲料中非营养物质的量化指标,主要包括非淀粉多糖和木质素 2 部分,只是测定条件从最初粗 CF 的稀酸稀碱改进为 ADF 和 NDF 的洗涤剂。从木质素的测定方法可知,木质素在非碱性环境中化学性质非常稳定(常温下不溶于 72% 浓硫酸),导致测定结果差异主要来自于对非淀粉多糖的涵盖范围,本研究分析了各种纤维中非淀粉多糖的糖残基组成。

从数值角度观察,可明确看到 3 个纤维指标的总量在成年公鸡体内都是动态变化,不同的纤维来源以及不同洗涤纤维的含量虽各有不同,但整体的变化趋势存在一定的相似规律,具体表现为在小肠前段被部分消化,小肠后段消化率出现下降,再经过后肠微生物发酵到达粪便消化率又明显上升。已有研究证实,各纤维的部分消化主要是半纤维素以及半乳糖醛酸的水解引起^[5-6],Jamroz 等提出鸡对半纤维素的消化率为 28% ~ 52%^[7],与本试验测得的半纤维素平均消化率 46.4% 相符。NDF 在成年公鸡体内的消化率最大且多为正值,而 ADF 和 CF 的消化率相对较小,变化规律相似,部分消

化率出现了负值。类似研究结果也出现了家禽对纤维的消化率为负值的情况^[8-9],王庆等的结果表明,成年新扬州鸡公鸡对稻谷 ADF 仅有 3.46% 的消化率,而对豆粕和麦麸 ADF 的消化率为负值^[10]。该负值出现的原因,由于各自试验背景的不同,给出的解释也未能统一,Choet 等认为纤维总量在肠道内的增加是由于纤维的某些组分由于其特殊的物理性质(如阳离子交换性、多孔性等)吸附消化道中某些物质(包括矿物质离子),而这类物质在洗涤剂中难于溶解,存留在残渣中,增加了纤维残渣的质量^[11]。本试验由于食糜和粪便中 NDF、ADF、CF 在不同肠段的降解率是相对于指示剂含量换算而得到,因此指示剂的分布均匀与否、在肠道内的通行速度与其他被检成分是否一致都可能对试验结果造成影响^[12]。Almiral 等研究指出了日粮纤维组成,尤其是非淀粉多糖的总量与可溶性和非可溶性淀粉多糖的比例对常用固态指示剂在消化道中的通行速度有较大影响^[12],目前广泛采用的研究方法仍无法避免这一问题。而纤维总量在经过大肠微生物发酵后总量减少,与大量研究报道结论相似^[13-15],与反刍动物相比,禽类由于消化道相对简单且对纤维消化能力较弱,关于禽类的 NDF 在消化道内消失量的动力学研究还未见有报道。

从单糖残基组成并结合各单糖在不同肠段组成改变来看,半纤维素最主要的组成单糖为木糖和阿拉伯糖^[16],纤维

素多糖以葡萄糖为主,Weende 概略分析体系所得 CF 中包含的是不溶于稀酸稀碱的非淀粉多糖,主要是纤维素和部分半纤维素;洗涤剂体系所得 NDF 为植物细胞壁多糖和木质素总和,ADF 则主要为纤维素和木质素,两者之差额可代表不可溶半纤维素的量。本试验各饲料 NDF 残渣木糖和阿拉伯糖无论是含量还是经过换算得到相对于指示剂的绝对含量均明显高于 ADF 和 CF,葡萄糖含量则比较接近,与上述不同纤维指标所涵盖的化学内涵相符。3 种纤维的葡萄糖含量在前肠、回肠持续上升后到粪便中保持稳定或略有降低,多数糖醛酸、木糖和甘露糖含量在小肠段上升后到粪便中含量有较为明显的降低,说明公鸡几乎不消化纤维素,也验证了前文半纤维素水解的结论,证明了公鸡对糖醛酸和半纤维素的主要消化位置在大肠。主成分分析结果显示,3 种纤维尤其是 NDF,单糖组分及糖醛酸改变量在因子载荷图上的分布趋势为前肠较为松散而回肠段靠拢,到粪便再次散开,同时各肠段的单糖组成改变均有某一个主成分因子同时与阿拉伯糖、木糖相关系数较大,说明公鸡对半纤维素的主要消化位点在回肠之后。本试验就洗涤纤维而言,西兰花与其他 4 种饲料相比表现出较为明显的特殊性,主要表现在主要单糖含量在经过后肠发酵后非但没有降低反而出现了上升趋势,目前尚未发现类似报道,Jung 等研究了用洗涤纤维数据是否可以准确预测可用 Uppsala 方法检测到的西兰花茎的细胞壁特征,结果发现与 Uppsala 方法相比,洗涤纤维测定的细胞壁木质素含量相对偏低,而半纤维素和纤维素含量则偏高;并通过相关性分析发现,除了纤维素含量可以被比较准确预测以外,其他的由 Uppsala 方法检测的细胞壁特征值并不能很准确地由洗涤纤维数据来准确预测^[17]。本试验中 3 种纤维的其他差别则需要与其他因素综合进一步考虑才可得出相对合理的结论。

4 结论

描述饲料纤维化程度的 CF、ADF 和 NDF 在非淀粉多糖的含量和单糖组成方面的差异对正确认识各指标间的关系提供了基础信息,也为相关研究结果的整合提供了参考。5 种高纤维日粮的 NDF、ADF 和 CF 含量在成年公鸡消化道不同区段呈动态变化特点,并有相似的变化规律,表现为小肠前段含量明显下降,小肠后段略有微上升,到达粪便再次明显下降;NDF、ADF 和 CF 的全消化道降解率范围分别为 14% ~ 32%、4% ~ 16% 和 3% ~ 13%。5 种纤维来源的非淀粉多糖中,最易消化的单糖残基为阿拉伯糖,成年公鸡对非淀粉多糖的主要消化部位在大肠。

参考文献:

- [1] Michord J. 日粮纤维在家禽中的营养价值[J]. 高业雷,刘一鸣,译. 中国家禽,2012,34(7):45-46.
- [2] Eastwood M A, Morris E R. Physical properties of dietary fiber that influence physiological function: a model for polymers along the gastrointestinal tract[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1992,55(2):436-442.
- [3] Guillon F C M. Physical properties of dietary fibres and consequences of processing on human physiology[J]. Food Research International, 2000,33(3):233-245.
- [4] Theander O, Westerlund E A. Studies on dietary fiber. 3. Improved procedures for analysis of dietary fiber[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1986,34(2):330-336.
- [5] Udén P, Robinson P, Wiseman J. Use of detergent system terminology and criteria for submission of manuscripts on new, or revised, analytical methods as well as descriptive information on feed analysis and/or variability[J]. Animal Feed Science and Technology, 2005,118(3):181-186.
- [6] Wenk C. The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig[J]. Animal Feed Science and Technology, 2001,90(1):21-33.
- [7] Jamroz D, Jakobsen K, Orda J, et al. Development of the gastrointestinal tract and digestibility of dietary fibre and amino acids in young chickens, ducks and geese fed diets with high amounts of barley[J]. Comparative Biochemistry and Physiology: Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2001,130(4):643-652.
- [8] Ferreira E M, Pires A V, Susin I, et al. Apparent digestibility, nitrogen balance, and ruminal constituents in ram lambs fed high-concentrate diets containing soybean hulls[J]. Journal of Animal Science, 2011,89(12):4127-4133.
- [9] Ibrahim S A, Omer H, Ali F, et al. Broccoli by-products as a partial replacement of lucerne hay in rabbit diets containing different levels of protein[J]. American - Eurasian J Agric & Environ Sci, 2011,11(5):685-696.
- [10] 王庆,王志跃,杨海明,等. 鹅鸡对几种常规饲料纤维消化率的比较研究[J]. 饲料研究,2012(7):81-82.
- [11] Annison G, Choct M. Anti-nutritive activities of cereal non-starch polysaccharides in broiler diets and strategies minimizing their effects[J]. World's Poultry Science Journal, 1991,47(3):232-242.
- [12] Almirall M, Esteve-Garcia E. Rate of passage of barley diets with chromium oxide: influence of age and poultry strain and effect of beta-glucanase supplementation[J]. Poultry Science, 1994,73(9):1433-1440.
- [13] Jamroz D, Jakobsen K, Bach Knudsen K E, et al. Digestibility and energy value of non-starch polysaccharides in young chickens, ducks and geese, fed diets containing high amounts of barley[J]. Comparative Biochemistry and Physiology: Part A, Molecular & Integrative Physiology, 2002,131(3):657-668.
- [14] le Goff G, Noblet J, Cherbut C. Intrinsic ability of the faecal microbial flora to ferment dietary fibre at different growth stages of pigs[J]. Livestock Production Science, 2003,81(1):75-87.
- [15] 邵彩梅, 韩正康. 鹅盲肠对纤维类成分消化的研究[J]. 南京农业大学学报, 1992,15(4):86-89.
- [16] Atsushi K, Azuma J I, Koshijima T. Lignin-carbohydrate complexes and phenolic acids in bagasse[J]. Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 1984,38(3):141-149.
- [17] Jung H J, Lamb J F. Prediction of cell wall polysaccharide and lignin concentrations of alfalfa stems from detergent fiber analysis[J]. Biomass and Bioenergy, 2004,27(4):365-373.