

膳食纤维与水的相互作用与其组分和颗粒结构的相关性研究

Correlation of the water-interacting property of dietary fiber powder with its composition and particle structure

陶建明¹ 颜才植¹ 赵国华^{1,2}

TAO Jian-ming¹ YAN Cai-zhi¹ ZHAO Guo-hua^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Special Food, Chongqing 400715, China)

摘要:以 40 种不同来源的膳食纤维粉体作为研究对象,在测定其水合性质(持水力、膨胀力)、吸湿性质(初始吸湿速率、吸湿平衡时间、最大吸湿率)、膳食纤维组分含量(总膳食纤维、水溶性膳食纤维与水不溶性膳食纤维)和颗粒结构(粒径、径距、比表面积、孔容、孔径)的基础上,利用相关性分析了膳食纤维和水的相互作用对组分和颗粒结构的依赖性。结果发现:① 膳食纤维粉的持水力与膨胀力呈显著正相关,但水合性质与吸湿性质之间的相关不显著。② 组成是影响膳食纤维粉水合性质的主要因素;而颗粒结构对水合性质的影响相对较弱,颗粒大小越均一,膳食纤维粉的持水力越高。③ 就吸湿性质而言,其与组成和颗粒结构的相关都不显著。

关键词:膳食纤维;水合性质;吸湿性质;组分含量;颗粒结构

Abstract: As one of the most important physicochemical properties of dietary fiber powders, the water-interacting property is closely related to their technological properties and physiological functions in the food system. However, systematic research is unavailable on the relationship between the water-interacting properties and the composition and particle structure of dietary fiber powders. Therefore, the water-interacting properties of dietary fiber powder and these dependence on composition and particle structure by correlation analysis were investigated, based

on the determinations of the hydration properties (water holding capacity, swelling capacity), hygroscopicities (initial absorption rate, absorption time, maximum absorption rate), dietary fiber contents (total dietary fiber, soluble dietary fiber and insoluble dietary fiber), and particle structure (particle size, span, specific surface area, pore volume, pore size) of 40 kinds of dietary fiber powders. The results showed that the water holding capacity of dietary fiber powder was positively correlated with its swelling capacity, while the correlation between its hydration property and hygroscopicity was not significant. In contrast, the hydration property was more depended on the fiber composition than the particle structure. The water holding capacity of the dietary fiber powder were consistent with the uniformity of the particle size. However, the hygroscopicity had no significant correlation with neither the composition or particle structure.

Keywords: dietary fiber; hydration properties; hygroscopicity; composition; particle structure

膳食纤维是食品中存在的一类不可在小肠内消化吸收,但可在大肠内适度发酵而利用的以非消化性碳水化合物为主体的食物成分,广泛存在于各类植物性食品中,具有预防结肠癌、控制血糖水平、降低心血管疾病发病率、预防和减轻肥胖等系列生理功能。自 1953 年 Hipsley^[1]提出膳食纤维的概念以来,膳食纤维对人体的不可或缺性被广泛证实。尤其在食品加工越来越精细的大背景下,膳食纤维的缺乏已被认为是人类代谢性慢性疾病发病的主要诱因。综合膳食纤维的功能发挥,其主要通过自身营养特性、物理作用、生物学 3 个机制实现。

与水的相互作用是膳食纤维通过物理吸附机制发挥其生物活性的主要基础。从理论上讲,膳食纤维与水相

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFD0400204-2);
重庆市基础科学与前沿技术研究项目(编号:
cstc2017jcyjAX0430)

作者简介:陶建明,男,西南大学在读硕士研究生。

通信作者:赵国华(1971—),男,西南大学教授,博士。

E-mail:zhaoguohua1971@163.com

收稿日期:2019-04-02

相互作用的强弱是由其化学组分(总膳食纤维、水溶性膳食纤维与水不溶性膳食纤维)和物理结构所共同决定的^[2-4]。化学组成决定了膳食纤维可结合水分基团的数量与种类,如羟基、羧基等;而膳食纤维颗粒的物理结构决定了上述基团的暴露程度以及利用微细空间对水分的毛细管持留作用^[5-6]。就测定方法而言,膳食纤维与水的相互作用可分为水合性质(与过量水直接接触)与吸湿性质(与有限的水蒸气接触)。水合性质一方面直接决定膳食纤维诸如防止便秘等功能^[7],另一方面还与膳食纤维的容积作用等功能性质密切相关,从而间接影响膳食纤维的其他生理功能^[8]。而吸湿性质决定膳食纤维在特定环境下吸潮而结块的特性^[8-9]。但目前有关膳食纤维与水相互作用的强度与其组分和颗粒结构关系的研究甚少,缺乏系统性并且极少考虑膳食纤维种类对其功能性质的影响。试验拟以 3 个类别(食用菌、粮谷、果蔬)下 40 种常见植物性食物来源的膳食纤维粉体为研究对象,探究膳食纤维粉体与水的相互作用与其组分和颗粒结构的关系,以期开发特性功能的膳食纤维食品配料提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

香菇、大麦、燕麦、玉米、小麦、白芸豆、胡萝卜、芹菜、甘薯、芦荟、海带、大蒜、甘蔗、西瓜皮、车前子、苹果皮、石榴皮和柑橘皮膳食纤维:陕西慈缘生物技术有限公司;

杏鲍菇、平菇、黑木耳、金针菇、荞麦、糯玉米、绿豆、黑芝麻、红豆、黑豆、荷叶、卷心菜、藕、生姜、四季豆、香芋、南瓜、葱皮、山楂、竹笋和辣椒膳食纤维:参照文献^[9]制备。

1.2 试剂与仪器

α -淀粉酶(A3306):酶活 3×10^4 U/mL,美国 Sigma 公司;

胰酶(P7545):酶活 8 U/mg,美国 Sigma 公司;

胃蛋白酶(P7000):酶活 > 250 U/mg,美国 Sigma 公司;

其他试剂均为分析纯;

低温氮气物理吸附仪:ASAP2020 型,美国麦克仪器有限公司;

电子分析天平:BS223S 型,德国赛多利斯集团。

1.3 方法

1.3.1 膳食纤维粉体结构表征 参考 Foo 等^[10]的方法进行。

1.3.2 总膳食纤维(TDF)、水溶性膳食纤维(SDF)与水不溶性膳食纤维(IDF)的测定 采用酶—重量法测定样品中的 SDF 和 IDF^[11]。样品中的总膳食纤维(TDF)按照 $TDF = IDF + SDF$ 计算获得。

1.3.3 膳食纤维持水力的测定 参考 Zhang 等^[12]的方法修改如下:准确称取 10 g 干燥后的膳食纤维粉末放入 50 mL 离心管中,再加入 20 mL 蒸馏水,振荡均匀,在 60 °C 下水浴保育 30 min 后,自然冷却 20 min,以 4 000 r/min 离心 10 min,小心倾去上清液,计重管内沉淀量。按式(1)计算持水力。

$$WHC = \frac{M_2}{M_1}, \quad (1)$$

式中:

WHC——持水力,g/g;

M_1 ——吸水前粉末质量,g;

M_2 ——吸水后粉末质量,g。

1.3.4 膳食纤维膨胀力的测定 根据文献^[12]。

1.3.5 膳食纤维粉吸湿性的测定 采用静态称量法^[13]。将底部盛有 NaCl 过饱和溶液的玻璃干燥器放入恒温培养箱中 25 °C 恒温 24 h,此时干燥器内的相对湿度为 75%。在已恒重的称量瓶底部放入厚约 3 mm 已干燥恒重的膳食纤维粉体,准确称重后置于放入有 NaCl 过饱和溶液的干燥器中(将称量瓶盖揭开),于恒温培养箱中 25 °C 保存,每小时称量一次,直至吸湿平衡为止。按式(2)计算吸湿率。

$$MA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

MA——吸湿率,%;

W_1 ——吸湿前质量,g;

W_2 ——吸湿后质量,g。

参考杜若飞等^[14]与皮佳鑫等^[15]的方法得到膳食纤维粉的吸湿方程。以时间为横坐标,累积吸湿率为纵坐标,绘制吸湿性曲线。对各样品的吸湿曲线的数据进行二项式回归拟合,得到吸湿方程:

$$W = at^2 + bt + c, \quad (3)$$

式中:

W——吸湿率,%;

t——时间,h;

a、b、c——常数。

对吸湿方程进行一阶求导得到吸湿速度方程:

$$r = dw/dt = 2at + b, \quad (4)$$

式中:

r——t 时刻的吸湿速度,g/h;

a、b——常数。

开始时刻 $t=0$,此时对应为初始吸湿速度 $r(0)=b$ (g/h);达到吸湿平衡时,吸湿速度为 0,则达到吸湿平衡的时间为 $t' = -b/2a$ (h),此时,样品的最大平衡吸湿率(%)为 $w' = at'^2 + bt' + c$ 。

1.3.6 数据分析 所有试验重复测定 3 次。结果用(平

均值±标准误差)表示。相关性分析结果采用 Pearson 相关系数表示。Pearson 相关系数介于 1~−1, 正值为正相关, 负值为负相关, 当为 0 时表示不相关。在进行相关性分析之前, 所有数据采用 z-score 法进行标准化。即 $Z = (X_i - \bar{x})/S$ 。其中 Z 为标准化后的变量值(标准分), X_i 为实际变量值, $\bar{x}$ 为算数平均值, S 为标准差。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维粉的水合性质

表 1 给出了 40 种膳食纤维粉的持水力和膨胀力的测定结果。就持水力而言, 不同膳食纤维粉之间差异较大, 最高的为黄豆膳食纤维(11.78 g/g), 最低的为玉米膳食纤维(2.24 g/g)。从类别上来看, 食用菌膳食纤维(5.17 g/g)和果蔬膳食纤维(5.10 g/g)具有较高的持水力, 而粮谷类膳食纤维具有较低的持水力(4.28 g/g)。从同一类别中不同品种之间的相似度来看, 来自不同食用菌的膳食纤维的持水力较为接近, 其极差(2.32 g/g)仅为平均值 0.45 倍; 其次是果蔬膳食纤维, 其极差(6.19 g/g)为平均值的 1.21 倍; 品种差异最大的为粮谷类, 其极差

(9.54 g/g)为平均值的 2.23 倍。

就膨胀力而言, 不同膳食纤维粉之间差异也很大, 最高的为海带膳食纤维(9.23 mL/g), 最低的为黑芝麻膳食纤维(0.47 mL/g)。从类别上来看, 食用菌膳食纤维(3.28 mL/g)和果蔬膳食纤维(3.26 mL/g)具有较高的膨胀力, 而粮谷类膳食纤维具有较低的膨胀力(2.52 mL/g)。从同一类别不同品种之间的相似度来看, 来自不同食用菌的膳食纤维的膨胀力较为接近, 其极差(1.92 mL/g)仅为平均值 0.59 倍; 其次是果蔬膳食纤维, 其极差(8.04 mL/g)为平均值的 2.47 倍; 品种差异最大的为粮谷类, 其极差(7.42 mL/g)为平均值的 2.94 倍, 与 Tosh 等^[16]及 Gómez-Ordóñez 等^[17]的结果一致。

持水力和膨胀力分别反映膳食纤维粉与过量水分相互作用产物的质量与体积的变化情况, 它们之间既有区别又有联系。统计分析发现膳食纤维粉的持水力和膨胀力之间存在着良好的相关关系, 达到了极显著水平($r=0.705$)(图 1)。图 1 中, 虽然所有膳食纤维的数据点都落在了 99% 置信度区间之内, 但不同膳食纤维的相关程度各有差异。相比较之下, 海带膳食纤维、黑豆膳食纤维

表 1 40 种膳食纤维粉的持水力和膨胀力[†]

Table 1 Water holding capacity and water swelling capacity of forty dietary fiber powders

样品来源	持水力/(g · g ⁻¹)	膨胀力/(mL · g ⁻¹)	样品来源	持水力/(g · g ⁻¹)	膨胀力/(mL · g ⁻¹)
香菇	4.50±0.02	2.81±0.11	胡萝卜	3.99±0.05	3.01±0.17
平菇	4.58±0.02	3.90±0.04	甘薯	6.75±0.01	4.18±0.08
杏鲍菇	4.35±0.06	3.51±0.05	生姜	7.86±0.02	5.78±0.53
金针菇	5.76±0.03	4.05±0.32	藕	4.63±0.36	2.08±0.03
黑木耳	6.67±0.58	2.13±0.24	香芋	3.80±0.01	2.23±0.01
玉米	2.24±0.04	1.48±0.05	芦荟	3.11±0.02	4.69±0.36
糯玉米	3.55±0.24	1.61±0.06	大蒜	2.63±0.06	1.66±0.26
黑芝麻	2.49±0.01	0.47±0.02	海带	8.82±0.08	9.23±0.21
燕麦	7.56±0.17	2.05±0.07	甘蔗	5.08±0.12	2.69±0.23
大麦	4.32±0.09	1.25±0.26	葱皮	5.78±0.30	3.66±0.34
小麦	3.21±0.04	2.04±0.01	竹笋	5.23±0.16	3.22±0.24
荞麦	3.79±0.19	1.15±0.06	四季豆	4.52±0.25	2.66±0.18
白芸豆	2.40±0.03	1.77±0.26	车前子	6.57±0.18	4.98±0.78
绿豆	2.80±0.04	2.36±0.04	南瓜	4.07±0.02	3.31±0.15
黄豆	11.78±0.35	7.89±0.54	山楂	4.54±0.06	2.57±0.03
黑豆	4.22±0.04	6.06±0.09	辣椒	4.56±0.13	2.11±0.20
红豆	2.97±0.01	2.17±0.12	西瓜皮	6.40±0.07	3.80±1.01
芹菜	4.31±0.039	1.45±0.01	苹果皮	4.57±0.08	2.99±0.27
卷心菜	6.06±0.10	3.27±0.21	柑橘皮	4.71±0.84	3.11±0.03
荷叶	5.23±0.013	1.20±0.20	石榴皮	4.09±0.13	1.19±0.03

[†] 食用菌、粮谷及果蔬持水力的极差/平均值分别为 2.32/5.17, 9.54/4.28, 6.19/5.10; 膨胀力的极差/平均值分别为 1.92/3.28, 7.42/2.52, 8.04/3.26。

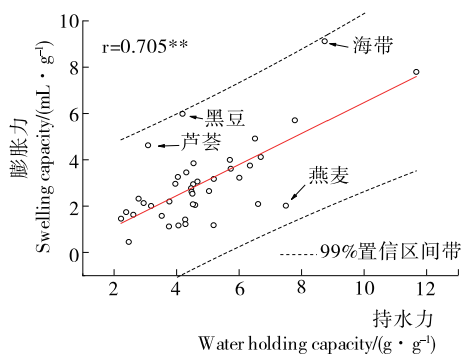


图 1 40 种膳食纤维粉持水力和膨胀力的相关性分析

Figure 1 Correlation analysis between the water holding capacity and water swelling capacity of forty dietary fiber powders

维、芦荟膳食纤维和燕麦膳食纤维处在置信度区间的边缘区域。表明膳食纤维粉持水力和膨胀力的相关性水平无明显的种类依赖性。而以前的报道^[4]发现 IDF/SDF 的比例越高的膳食纤维在吸水时发生体积膨胀的程度越小。可能是水不溶性膳食纤维中聚合物分子之间的作用力很强,水分的进入并不能使这些作用力明显弱化而使水不溶性膳食纤维颗粒的结构变得松散。当然,膳食纤维的制备方法^[18]、水合性质测量方法^[19]、原料来源属性^[20]等都会对其测定获得的水合性质有影响。综合本试验结果和以前的报道,影响膳食纤维水合性质的因素主要包括:① 颗粒表面的水结合位点(亲水基团的类型、数量、密度)分布情况^[2];② 颗粒的孔隙结构以及“蜂巢”结构对水分子的捕获和束缚能力^[21];③ 颗粒中 IDF 与 SDF 的含量和比例不同以及它们在颗粒中的分布状况^[22];④ 水合能力测定的试验方法和条件^[21,23]。

2.2 膳食纤维粉的吸湿性质

表 2 是在 25 ℃、相对湿度为 75% 的封闭环境中,各类膳食纤维粉颗粒和水蒸气相互作用,粉体逐渐吸收水分至饱和的情况。对比 40 个样品的累积吸湿曲线图,以

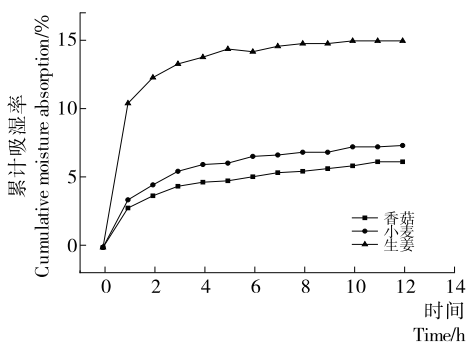


图 2 部分膳食纤维粉的累积吸湿曲线

Figure 2 The cumulative hygroscopic curve of some dietary fiber powders

香菇、小麦和生姜为例(图 2),可以看出所有吸湿曲线具有一致的规律,即随着时间的推移,累积吸湿率不断增大,最后趋于稳定;吸湿速率由大变小,最后趋于零。在此过程中,膳食纤维粉被蒸汽所包围,对水蒸气的吸附和脱附过程同时进行。初始阶段,粉体水分含量极低,对水蒸气吸附速率远大于脱附速率,粉体开始吸水增重;随着粉体水分含量的逐渐增加,吸附速率逐渐变小,脱附速率逐渐变大,两者间的速率差逐渐减小;最终,吸附速率与脱附速率相等,达到动态平衡,粉体水分含量不再增加,粉体处于近似恒重的状态。就平均初始吸湿速率来看,食用菌膳食纤维最高(0.026 3 g/h),而粮谷类(0.018 3 g/h)和果蔬类(0.018 4 g/h)膳食纤维相当;平均最大吸水率的大小顺序是食用菌类(0.140 0 g/g) > 果蔬类(0.111 4 g/g) > 粮谷类(0.099 8 g/g)。相关分析发现,初始吸湿速率与平衡时间($r = -0.274$)、初始吸湿速率与最大吸湿率($r = 0.067$)以及平衡时间与最大吸湿率($r = 0.025$)之间的相关都达不到显著水平。但很显然,膳食纤维的吸湿率比其持水力低很多,可能是膳食纤维的吸湿性主要依靠其能结合水的极性基团的数目,而持水力还与膳食纤维中的孔隙结构等密切相关。前者主要靠化学吸附,而后者还包括大量的物理吸附与持留^[5]。相关分析发现,持水力与初始吸湿速率($r = -0.088$)、平衡时间($r = -0.121$)以及最大吸湿率($r = -0.243$)之间的相关也不显著;同样膨胀力与初始吸湿速率($r = -0.183$)、平衡时间($r = 0.038$)以及最大吸湿率($r = -0.167$)之间的相关也不显著。

2.3 膳食纤维粉的组成

表 3 给出了 40 种膳食纤维粉 IDF、SDF 和 TDF 含量。就平均水平而言,粮谷类膳食纤维粉中 TDF 的含量最低(43.44 g/100 g),果蔬类膳食纤维粉的 TDF 居中(63.48 g/100 g),而食用菌类膳食纤维粉具有最高的 TDF(81.30 g/100 g)。就膳食纤维的组成情况来看,按平均 SDF 占比的情况三类原料的排序是粮谷类膳食纤维粉(37.0 g/100 g) > 果蔬类膳食纤维粉(29.2 g/100 g) > 食用菌膳食纤维粉(18.2 g/100 g)。这与陈龙等^[2]的报道一致,也就是食用菌膳食纤维中的 SDF 含量要远小于 IDF 含量。 β -葡聚糖是食用菌膳食纤维的主要成分^[24],但食用菌中的 β -葡聚糖基本为水不溶性^[25]。由表 3 可以看出,对绝大多数膳食纤维而言,其 IDF 的量远高于 SDF 的量。虽然有报道^[26]认为 SDF 比 IDF 水溶性更好,生物利用率更高,但也有人认为良好的膳食纤维应该是 IDF 和 SDF 的比例在一定范围内,膳食纤维中 SDF 含量高于 10%,并且 IDF 与 SDF 的比例在为 3:1 的膳食纤维是高品质的膳食纤维,过高或过低的 SDF 占比对其功能发挥都不利。

表 2 40 种膳食纤维粉的吸湿特性[†]
Table 2 Hygroscopic properties of forty dietary fiber powders

样品来源	拟合吸湿方程	一阶方程 (吸湿速率方程)	初始吸湿速率/ (g·h ⁻¹)	平衡时间/h	最大吸湿率/%
香菇	$y = -0.000\ 6x^2 + 0.012\ 5x + 0.000\ 6$	$y = -0.001\ 2x + 0.012\ 5$	0.012 5	10.42	0.065 7
平菇	$y = -0.001\ 4x^2 + 0.029\ 8x - 0.002\ 2$	$y = -0.002\ 8x + 0.029\ 8$	0.029 8	10.64	0.156 4
杏鲍菇	$y = -0.001\ 5x^2 + 0.031\ 0x + 0.000\ 3$	$y = -0.003\ 0x + 0.031\ 0$	0.031 0	10.33	0.160 5
金针菇	$y = -0.001\ 4x^2 + 0.029\ 9x - 0.002\ 3$	$y = -0.002\ 8x + 0.029\ 9$	0.029 9	10.68	0.157 3
黑木耳	$y = -0.001\ 2x^2 + 0.028\ 4x - 0.008\ 0$	$y = -0.002\ 4x + 0.028\ 4$	0.028 4	11.83	0.160 0
玉米	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.016\ 4x - 0.006\ 2$	$y = -0.001\ 4x + 0.016\ 4$	0.016 4	11.71	0.089 9
糯玉米	$y = -0.001\ 4x^2 + 0.028\ 4x - 0.004\ 2$	$y = -0.002\ 8x + 0.028\ 4$	0.028 4	10.14	0.139 8
黑芝麻	$y = -0.001\ 1x^2 + 0.020\ 5x + 0.019\ 3$	$y = -0.002\ 2x + 0.020\ 5$	0.020 5	9.32	0.114 8
燕麦	$y = -0.000\ 6x^2 + 0.010\ 8x + 0.004\ 6$	$y = -0.001\ 2x + 0.010\ 8$	0.010 8	9.00	0.053 2
大麦	$y = -0.001\ 0x^2 + 0.025\ 0x - 0.001\ 6$	$y = -0.002\ 0x + 0.025\ 0$	0.025 0	12.50	0.154 7
小麦	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.014\ 9x + 0.000\ 8$	$y = -0.001\ 4x + 0.014\ 9$	0.014 9	10.64	0.080 1
荞麦	$y = -0.000\ 2x^2 + 0.005\ 1x + 0.007\ 6$	$y = -0.000\ 4x + 0.005\ 1$	0.005 1	12.75	0.040 1
白芸豆	$y = -0.001\ 4x^2 + 0.026\ 0x + 0.025\ 5$	$y = -0.002\ 8x + 0.026\ 0$	0.026 0	9.29	0.146 2
绿豆	$y = -0.001\ 7x^2 + 0.032\ 7x + 0.008\ 2$	$y = -0.003\ 4x + 0.032\ 7$	0.032 7	9.62	0.165 4
黄豆	$y = -0.000\ 8x^2 + 0.015\ 3x + 0.006\ 1$	$y = -0.001\ 6x + 0.015\ 3$	0.015 3	9.56	0.079 3
黑豆	$y = -0.000\ 2x^2 + 0.005\ 2x + 0.004\ 7$	$y = -0.000\ 4x + 0.005\ 2$	0.005 2	13.00	0.038 5
红豆	$y = -0.001\ 0x^2 + 0.019\ 4x + 0.001\ 4$	$y = -0.002\ 0x + 0.019\ 4$	0.019 4	9.70	0.095 5
芹菜	$y = -0.000\ 9x^2 + 0.019\ 5x - 0.002\ 1$	$y = -0.001\ 8x + 0.019\ 5$	0.019 5	10.83	0.098 1
卷心菜	$y = -0.000\ 5x^2 + 0.013\ 5x - 0.000\ 6$	$y = -0.001\ 0x + 0.013\ 5$	0.013 5	13.50	0.090 5
荷叶	$y = -0.001\ 6x^2 + 0.029\ 3x + 0.013\ 6$	$y = -0.003\ 2x + 0.029\ 3$	0.029 3	9.16	0.147 7

续表 2

样品来源	拟合吸湿方程	一阶方程 (吸湿速率方程)	初始吸湿速率/ (g · h ⁻¹)	平衡时间/h	最大吸湿率/%
胡萝卜	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.019\ 3x - 0.007\ 5$	$y = -0.001\ 4x + 0.019\ 3$	0.019 3	13.79	0.125 5
甘薯	$y = -0.000\ 9x^2 + 0.019\ 5x - 0.001\ 2$	$y = -0.001\ 8x + 0.019\ 5$	0.019 5	10.83	0.104 4
生姜	$y = -0.001\ 7x^2 + 0.031\ 3x + 0.019\ 9$	$y = -0.003\ 4x + 0.031\ 3$	0.031 3	9.21	0.164 0
藕	$y = -0.000\ 6x^2 + 0.016\ 9x - 0.003\ 6$	$y = -0.001\ 2x + 0.016\ 9$	0.016 9	14.08	0.115 4
香芋	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.020\ 3x - 0.003\ 5$	$y = -0.001\ 4x + 0.020\ 3$	0.020 3	14.50	0.143 7
芦荟	$y = -0.000\ 5x^2 + 0.011\ 0x + 0.002\ 6$	$y = -0.001\ 0x + 0.011\ 0$	0.011 0	11.00	0.063 1
大蒜	$y = -0.000\ 6x^2 + 0.016\ 1x - 0.006\ 7$	$y = -0.001\ 2x + 0.016\ 1$	0.016 1	13.42	0.101 3
海带	$y = -0.000\ 4x^2 + 0.010\ 8x + 0.000\ 3$	$y = -0.000\ 8x + 0.010\ 8$	0.010 8	13.50	0.073 2
甘蔗	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.018\ 6x - 0.004\ 7$	$y = -0.001\ 4x + 0.018\ 6$	0.018 6	13.29	0.118 9
葱皮	$y = -0.001\ 4x^2 + 0.026\ 4x + 0.013\ 6$	$y = -0.002\ 8x + 0.026\ 4$	0.026 4	9.43	0.138 1
竹笋	$y = -0.000\ 5x^2 + 0.014\ 8x + 0.000\ 4$	$y = -0.001\ 0x + 0.014\ 8$	0.014 8	14.80	0.109 9
四季豆	$y = -0.000\ 4x^2 + 0.012\ 9x - 0.000\ 3$	$y = -0.000\ 8x + 0.012\ 9$	0.012 9	16.13	0.104 0
车前子	$y = -0.000\ 6x^2 + 0.012\ 3x + 0.001\ 1$	$y = -0.001\ 2x + 0.012\ 3$	0.012 3	10.25	0.064 1
南瓜	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.022\ 3x - 0.006\ 0$	$y = -0.001\ 4x + 0.022\ 3$	0.022 3	15.93	0.171 6
山楂	$y = -0.001\ 1x^2 + 0.025\ 5x - 0.003\ 6$	$y = -0.002\ 2x + 0.025\ 5$	0.025 5	11.59	0.144 2
辣椒	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.015\ 4x + 0.006\ 0$	$y = -0.001\ 4x + 0.015\ 4$	0.0154	11.00	0.090 7
西瓜皮	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.013\ 3x + 0.009\ 3$	$y = -0.001\ 4x + 0.013\ 3$	0.013 3	9.50	0.072 5
苹果皮	$y = -0.000\ 7x^2 + 0.014\ 5x - 0.001\ 3$	$y = -0.001\ 4x + 0.014\ 5$	0.014 5	10.36	0.073 8
柑橘皮	$y = -0.000\ 8x^2 + 0.023\ 8x - 0.008\ 6$	$y = -0.001\ 6x + 0.023\ 8$	0.023 8	14.88	0.168 4
石榴皮	$y = -0.000\ 8x^2 + 0.015\ 9x - 0.000\ 4$	$y = -0.001\ 6x + 0.015\ 9$	0.015 9	9.94	0.078 6

† 食用菌、粮谷及果蔬的初始吸湿速度分别为(0.026 3±0.007 8)^a, (0.018 3±0.008 8)^b, (0.018 4±0.005 8)^b g/h; 平衡时间分别为(10.78±0.61)^a, (10.6±1.48)^a, (12.21±2.27)^a h; 最大吸湿率分别为(0.140 0±0.041 6)%^a, (0.099 8±0.044 4)%^b, (0.111 4±0.033 9)%^{ab}; 同一指标上标字母不同表示具有显著性差异(P<0.05)。

表 3 40 种膳食纤维粉的 IDF、SDF 和 TDF 含量[†]
Table 3 IDF, SDF and TDF contents of forty dietary fiber powders g/100 g Dry Weight

样品来源	IDF	SDF	TDF	样品来源	IDF	SDF	TDF
香菇	71.79±2.17	7.00±0.63	78.78±2.13	胡萝卜	37.41±4.27	29.11±0.34	66.52±3.26
平菇	69.00±1.85	17.87±1.02	86.87±2.49	甘薯	40.53±1.32	20.44±0.54	60.97±1.24
杏鲍菇	59.92±0.04	2.78±0.04	62.70±0.09	生姜	44.72±0.21	2.83±0.53	47.55±0.50
金针菇	60.55±0.83	25.56±0.66	86.11±1.34	藕	25.10±0.57	5.86±0.15	30.96±0.53
黑木耳	71.35±1.02	20.67±0.89	92.02±1.58	香芋	23.97±0.48	13.36±0.10	37.33±0.45
玉米	50.53±4.25	2.81±0.62	53.33±3.43	芦荟	39.22±0.10	27.69±0.44	66.91±0.43
糯玉米	2.95±2.22	10.03±1.54	12.98±2.01	大蒜	14.53±2.23	10.50±3.22	25.03±3.87
黑芝麻	35.48±1.73	29.42±1.73	64.9±2.33	海带	46.17±0.61	28.26±0.10	74.43±0.10
燕麦	28.16±2.27	23.25±0.05	51.41±2.11	甘蔗	39.49±2.94	24.80±0.53	64.29±3.45
大麦	39.93±0.29	7.83±0.06	47.76±0.13	葱皮	83.49±2.43	11.54±0.25	95.03±2.64
小麦	38.33±4.06	4.45±0.13	42.78±3.83	竹笋	52.11±0.33	9.83±2.86	61.93±3.10
荞麦	11.54±0.37	19.59±5.74	31.13±4.45	四季豆	53.22±0.56	13.80±0.02	67.02±0.78
白芸豆	10.20±0.24	19.73±0.32	29.93±0.47	车前子	42.42±3.46	27.19±0.24	69.61±3.68
绿豆	10.44±0.03	13.85±0.16	24.29±0.56	南瓜	35.57±0.45	11.79±0.24	47.36±0.77
黄豆	43.37±0.05	31.55±0.63	74.91±0.47	山楂	30.82±0.67	45.92±0.78	76.74±1.43
黑豆	39.87±3.45	14.78±1.00	54.65±3.21	辣椒	65.25±3.25	20.91±2.50	86.16±3.84
红豆	17.63±1.37	15.55±1.51	33.18±2.11	西瓜皮	59.08±1.67	23.23±0.09	82.31±1.43
芹菜	41.50±3.49	15.71±0.64	57.20±2.41	苹果皮	58.13±1.41	10.69±2.46	68.82±2.12
卷心菜	57.09±2.73	16.48±0.09	73.57±1.54	柑橘皮	38.44±0.43	19.20±0.21	57.63±0.39
荷叶	69.36±0.43	19.55±0.43	88.91±0.45	石榴皮	36.74±0.72	16.99±0.55	53.72±1.02

[†] 食用菌、粮谷及果蔬 IDF 的极差/平均值分别为 11.87/66.52,47.58/27.37,78.96/44.97;SDF 的极差/平均值分别为 22.78/14.78, 28.74/16.07,43.09/18.51;TDF 的极差/平均值分别为 29.32/81.30,61.93/43.44,70.00/63.48。

2.4 膳食纤维颗粒的颗粒结构

粒度大小、比表面积、孔体积和孔径是反映膳食纤维颗粒结构的几个重要参数。40 种膳食纤维粉的颗粒结构的具体参数见文献[9]。从比表面积来看,不同来源的膳食纤维粉按类别分,呈现“果蔬类(平均值 1.09 m²/g)>粮谷类(平均值 0.84 m²/g)>食用菌类(平均值 0.46 m²/g)”的规律,但膳食纤维粉的孔体积和平均孔径与其种类来源无明显的关系。研究^[27-28]发现不同膳食纤维粉的平均粒径大小是有差异的,可能与原料来源、生产方法、IDF/SDF 比例、产品纯度等一系列因素相关。除此之外,膳食纤维粉的表面不是平整的,存在着诸多的裂缝、凹槽或沟壑,且这些孔道的结构和大小是存在差异的。这些结构上的差异就导致不同膳食纤维粉具有不同的流动性。研究^[9]发现粒径与膳食纤维粉的休止角之间显著负相关,而比较面积和孔体积与膳食纤维粉的休止角之间显著正相关。

2.5 膳食纤维粉体与水分的相互作用与其组分和颗粒结构的相关关系

表 4 给出了膳食纤维粉与水分的相互作用与其组分

(IDF、SDF、TDF)和颗粒结构(粒径、径距、比表面积、孔隙、孔径)之间的相关关系。

在水合性质(持水力、膨胀力)中,就粉体的组成而言,膳食纤维的持水力与其 IDF($r=0.353$)和 SDF($r=0.300$)的含量呈显著正相关,与其 TDF 含量($r=0.458$)呈极显著正相关;膨胀力与 IDF 和 SDF 呈正相关,但相关不显著,与 TDF 呈显著正相关($r=0.324$)。从相关系数的大小得出,IDF 对膳食纤维持水力的影响大于 SDF。这与前人^[4]的报道结果一致。但 Cadden 等^[20]的研究认为瓜儿果胶(主要为 SDF)的水合性质优于小麦麸 DF(主要为 IDF)。结果显示膨胀力与 IDF 和 SDF 呈正相关但不显著,与 TDF 呈显著正相关。这与 López-Vargas 等^[23]的研究不一致,他们发现膳食纤维的膨胀力与 TDF 和 SDF 含量呈高度正相关。Navarro-González 等^[22]的研究也发现膨胀力与 SDF 密切相关,即 SDF 含量高,其膨胀力值越高,可能与提取膳食纤维粉体的工艺有关。就颗粒的结构而言,只有持水力与径距呈显著负相关($r=-0.315^*$),与 Ma 等^[29]的试验结果一致,而持水力和膨

表 4 膳食纤维粉体与水分的相互作用与其组分和颗粒结构的相关性[†]

Table 4 Correlations between hydration properties and components/structure of dietary fiber powders

指标	皮尔逊相关系数				
	持水力	膨胀力	初始吸湿速率	吸湿平衡时间	最大吸湿率
IDF 含量	0.353 *	0.236	0.081	-0.093	0.075
SDF 含量	0.300 *	0.240	-0.115	-0.095	-0.274
TDF 含量	0.458 * *	0.324 *	0.023	-0.128	-0.052
粒径	0.278	0.076	0.086	-0.044	-0.137
径距	-0.315 *	-0.123	0.130	0.242	-0.113
比表面	0.238	0.095	-0.074	-0.138	-0.078
孔容	0.284	0.271	-0.066	0.046	-0.127
孔径	0.064	0.043	-0.071	0.292	-0.116

† * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。样本数:40。

胀力与其他结构参数之间的关系都不显著。这可能是大小均一的膳食纤维颗粒可以形成较为连续一致的堆积结构,有利于水的持留。而大小不一的颗粒的堆积结构在外力作用下(如压力、离心等)容易发生改变而会将持留在颗粒之间的水释放出来,使持水力下降。易甜等^[30]、郭增旺等^[31]以及 Lan 等^[6]的研究表明,低堆积密度、低粒径尺寸、高比表面积对膳食纤维粉的膨胀力有利。而 Ma 等^[29]、张丽媛等^[32]和李璐等^[33]的研究认为随膳食纤维粉粒径的逐渐减小,其膨胀力的变化趋势是先升后降,可能是膳食纤维分子长链在降低粉粒时被剪切为短链结构的同时减小了膳食纤维对水分的束缚,从而引起膨胀力的降低。

在吸湿特性中,膳食纤维的吸湿特性(初始吸湿速率、吸湿平衡时间、最大吸湿率)与其组成和颗粒结构参数之间的关系都不显著。由图 2 可见,吸湿速率在吸湿过程中不断减小,初始吸湿速率即是吸湿过程中的速率最大值,且各样品的最大吸湿率不同,利用皮尔逊相关系数分析出未呈现显著性的关系。值得关注的是,SDF 与最大吸湿率的皮尔逊相关系数为-0.274,虽然未能产生显著性影响,但说明 SDF 可能会对粉体吸湿率造成负面影响,这是由于 SDF 的水可溶性和黏着性使得其与水蒸气作用后在颗粒表面形成一层潮湿的包裹层,形成隔离效应,延缓后续水蒸气的进入,与郑慧萍等^[34]的结论一致。吸湿性与粉体结构相关性不显著,但国内外对此的研究报道较少,其作用机制还需进一步探索。

3 结论

不同来源的膳食纤维粉的持水力和膨胀力的差异很大,且无品种依赖性。但膳食纤维粉的持水力与膨胀力之间高度正相关。膳食纤维粉的吸湿能力明显低于其水合能力,且不在同一数量级上。虽然都是反映膳食纤维与水分的相互作用,但膳食纤维的水合性质与其吸湿性

质之间无相关性。大多数膳食纤维的 IDF 含量远高于其 SDF 含量。相关分析发现膳食纤维粉的水合性质与其组成之间关系密切,尤其是持水力。至于颗粒结构的影响,只有径距与膳食纤维的持水力呈负相关,其他结构参数与水合性质的关系都不显著。膳食纤维的吸湿性反映膳食纤维从外界争取水分的能力,但该能力与膳食纤维的组成与颗粒结构的关系都不显著。由于试验条件和时间有限,研究中还存在很多不完善之处,需要进一步改进,比如增加样本容量,覆盖的膳食纤维种类越多,使得分析结果更符合统计学一般性规律;其次,反映膳食纤维组分和颗粒结构的指标还可以深入和增加,采用更先进的分析手段,对膳食纤维粉的描述会更加具体、准确。

参考文献

[1] DEVRIES J W, PROSKY L, LI Ben, et al. A historical perspective on defining dietary fiber[J]. Cereal Foods World, 1999, 44(5): 367-369.

[2] 陈龙, 郭晓晖, 李富华, 等. 食用菌膳食纤维功能特性及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 303-307.

[3] WUTTIPALAKORN P, SRICHUMPUANG W, CHIEWCHAN N. Effects of pretreatment and drying on composition and bitterness of high-dietary-fiber powder from lime residues[J]. Drying Technology, 2009, 27(1): 133-142.

[4] CHAU Chi-fai, WANG Yi-ting, WEN Yu-ling. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre[J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1 402-1 408.

[5] LAN Gao-shuang, CHEN Hai-xia, CHEN Shu-han, et al. Chemical composition and physicochemical properties of dietary fiber from polygonatum odoratum as affected by different processing methods[J]. Food Research International, 2012, 49(1): 406-410.

[6] LÓPEZ G, ROS G, RINCÓN F, et al. Relationship between

- physical and hydration properties of soluble and insoluble fiber of artichoke [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(9): 2 773-2 778.
- [7] YANG Jing, WANG Hai-Peng, ZHOU Li, et al. Effect of dietary fiber on constipation: A meta analysis [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2012, 18(48): 7 378-7 383.
- [8] 王大为, 吴丽娟, 孙丽琴. 玉米膳食纤维的粉体特性 [J]. *食品科学*, 2011, 32(17): 65-68.
- [9] 王阳, 颜才植, 叶发银, 等. 膳食纤维粉体流动性与其颗粒结构的关系 [J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 84-88.
- [10] FOO K Y, HAMEED B H. Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon via microwave induced K_2CO_3 activation [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 104: 679-686.
- [11] ZHAO Xiao-yan, YANG Zai-bin, GAI Guo-sheng, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 217-222.
- [12] ZHANG Zi-pei, SONG Hui-ge, PENG Zhen, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(3): 406-413.
- [13] 陈绪龙, 赵国巍, 廖正根, 等. 当归超微粉体和普通粉体的粉体学性质比较 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2010, 16(18): 1-5.
- [14] 杜若飞, 冯怡, 刘怡, 等. 中药提取物吸湿特性的数据分析与表征 [J]. *中成药*, 2008, 30(12): 1 767-1 771.
- [15] 皮佳鑫, 高旭, 于悦, 等. 赤芍提取物的吸湿性及不同提取工艺和辅料对其吸湿性的影响 [J]. *天津中医药大学学报*, 2012, 31(4): 221-224.
- [16] TOSH S M, YADA S. Dietary fibres in pulse seeds and fractions: Characterization, functional attributes, and applications [J]. *Food Research International*, 2010, 43 (2): 450-460.
- [17] GÓMEZ-ORDÓÑEZ E, JIMÉNEZ-ESCRIG A, RUPÉREZ P. Dietary fibre and physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast [J]. *Food Research International*, 2010, 43(9): 2 289-2 294.
- [18] RASPER V F. Effect of preparative procedure on the evaluation of in vitro indigestible residue (dietary fiber) [J]. *Food Carbohydrates*, 1982, 333-355.
- [19] ROBERTSON J A, EASTWOOD M A. A method to measure the water-holding properties of dietary fibre using suction pressure [J]. *British Journal of Nutrition*, 1981, 46 (2): 247-255.
- [20] CADDEN A NN. Comparative effects of particle size reduction on physical structure and water binding properties of several plant fibers [J]. *Journal of Food Science*, 1987, 52 (6): 1 595-1 599.
- [21] YALEGAMA L, KARUNARATNE D N, SIVAKANESAN R, et al. Chemical and functional properties of fibre concentrates obtained from by-products of coconut kernel [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 124-130.
- [22] NAVARRO -GONZÁLEZ I, GARCÍA-VALVERDE V, GARCÍA-ALONSO J, et al. Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fiber [J]. *Food Research International*, 2011, 44(5): 1 528-1 535.
- [23] LÓPEZ-VARGAS J H, FERNÁNDEZ-LÓPEZ J, PÉREZ-ÁLVAREZ J A, et al. Chemical, physico-chemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) co-products [J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 756-763.
- [24] MANZI P, GAMBELLI L, MARCONI S, et al. Nutrients in edible mushrooms: An inter-species comparative study [J]. *Food Chemistry*, 1999, 65(4): 477-482.
- [25] GUILLAMÓN E, GARCÍA-LAFUENTE A, LOZANO M, et al. Edible mushrooms: Role in the prevention of cardiovascular diseases [J]. *Fitoterapia*, 2010, 81(7): 715-723.
- [26] 郑刚, 何李, 赵国华. 高压蒸煮对豆渣膳食纤维理化特性及发酵性能影响 [J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(4): 12-15.
- [27] 陶姝颖, 郭晓晖, 令博, 等. 改性葡萄皮渣膳食纤维的理化特性和结构 [J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 171-177.
- [28] 康芳芳. 蒸汽爆破处理对豆渣理化特性的影响及在饼干中的应用研究 [D]. 新乡: 河南科技学院, 2017: 31.
- [29] MA Meng-mei, MU Tai-hua. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physico-chemical, and functional properties of dietary fiber from de-oiled cumin [J]. *Food Chemistry*, 2016, 194(1): 237-246.
- [30] 易甜, 崔文文, 王明锐, 等. 锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性研究 [J/OL]. *食品科学*. (2018-01-13) [2019-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20181029.1711.056.html>.
- [31] 郭增旺, 马萍, 刁静静, 等. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性 [J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 106-112.
- [32] 张丽媛, 陈如, 吴昊, 等. 超微粉碎对苹果膳食纤维理化性质及羟自由基清除能力的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39 (15): 139-144.
- [33] 李璐, 黄亮, 苏玉, 等. 超微化雷竹笋膳食纤维的结构表征及其功能性研究 [J/OL]. *食品科学*. (2018-06-21) [2019-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20180622.1100.100.html>.
- [34] 郑慧萍, 李世伟, 王慧. 膳食纤维—洋车前子壳粉的改性及其表征 [J]. *饮食保健*, 2017, 4(24): 385-386.