

第三章 小麦籽粒的形态与结构

第一节 小麦籽粒的形态特征

小麦籽粒为不带内外稃的颖果，粒形为卵圆或椭圆，顶端生有茸毛，背面隆起，背面基部有一尖起的胚；腹部较平，中间有一道凹陷的沟叫腹沟。籽粒横断面呈心脏形或三角形（图 3.1）。

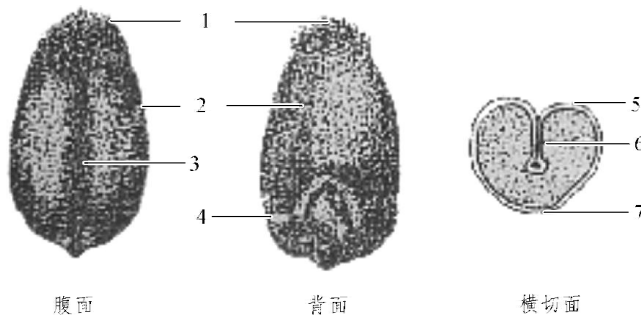


图 3.1 小麦形态结构

1—麦毛；2—胚乳；3—腹沟；4—胚；5—腹面 6—腹沟；7—背面

第二节 小麦籽粒的结构及化学组成

一、小麦籽粒的结构

小麦颖果或籽粒的纵横剖面如图 3.2 所示。

麦粒平均长约 8 mm，质量约 35 mg，麦粒大小随栽培品种及其在麦穗上的位置不同而呈现较大的差异。麦粒背面（有胚的一面）呈圆形，腹面（与胚相对的一面）有一条纵向腹沟，腹沟几乎和整个麦粒一样长，深度接近麦粒中心。两颊可能互相接触，这样就会掩盖腹沟的深度。腹沟不仅对制粉者从胚乳中分离麸皮以得到高的出粉率造成了困难，而且也为微生物和灰尘提供了潜藏的场所。

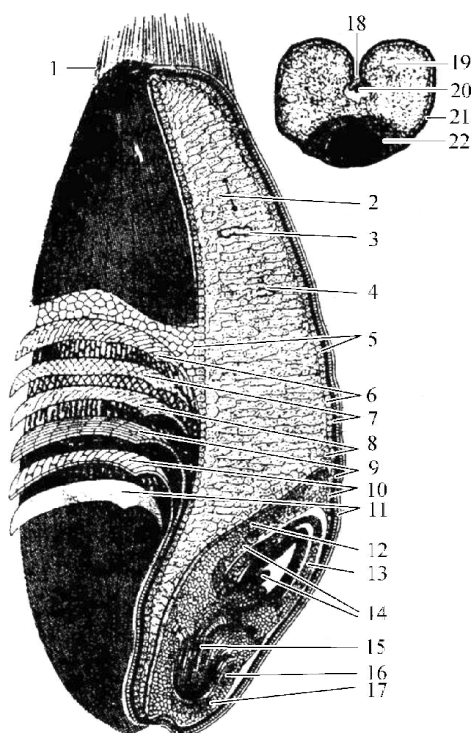


图 3.2 小麦籽粒的纵切面及横切面

1—茸毛；2—胚乳；3—淀粉细胞（淀粉粒填充于蛋白质间质之中）；4—细胞的纤维壁；
5—糊粉细胞层（属胚乳的一部分，与糠层分离）；6—珠心层；7—种皮；
8—管状细胞；9—横细胞；10—皮下组织；11—表皮层；12—盾片；
13—胚芽鞘；14—胚芽；15—初生根；16—胚根鞘；17—根冠；
18—腹沟；19—胚乳；20—色素束；21—皮层；22—胚

小麦籽粒的质地（硬度）和颜色差异很大。质地的差异与胚乳的黏合力相关。颜色一般为白色和红色（或紫红色），与种皮的色素相关。色素的类型和存在受遗传的制约，通过育种能控制遗传因子，以获得所要求的颜色。

1. 果 皮

果皮包住整个种子，有几层组织（图 3.3）。外果皮称为表皮，其最内层由薄壁细胞的残余所组成，由于它们缺乏连续的细胞结构，从而形成一个分割的自然面。当它们裂解的时候，表面即可脱掉，除去这几层，有利于水分进入果皮之内。

内果皮由中间细胞、横细胞和管状细胞组成，中间细胞和管状细胞都不完全覆盖整个籽粒。横细胞呈长柱形（约 $125\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ ），其长轴垂直于麦粒的长轴，横细胞之间很板结，胞间隙小或无。管状细胞的大小和形状与横细胞相同，但它们的长轴平行于麦粒的长轴，管状细胞之间不是板结相连，因此有较大胞间隙。据研究，整个果皮大约占籽粒的 5%，约含蛋白质 6%、灰分 2%、纤维素 20%、脂肪 0.5%，其余几乎全是戊聚糖。

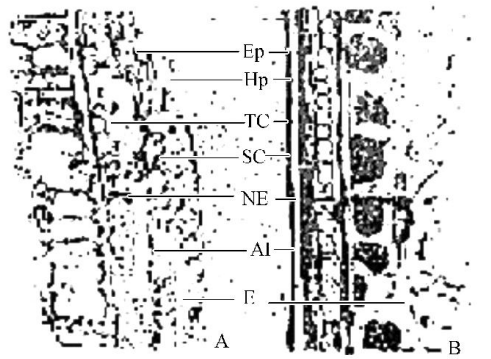


图 3.3 小麦籽粒的果皮及邻近组织剖面图

A—横切面；B—纵切面；EP—外表层；HP—下表皮；CC—横细胞；TC—管状细胞；
SC—种皮；NE—珠心层；Al—糊粉层；E—淀粉胚乳

2. 种皮和珠心层

种皮的外侧与管状细胞相连，而内侧则与珠心层相连。种皮由 3 层组成：较厚的外表皮、色素层（决定小麦颜色）、较薄的内表皮。白皮小麦的种皮只有两层压扁的纤维细胞层，含色素少或不含色素。种皮的厚度为 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 。珠心层（或称透明层）厚约 $7 \mu\text{m}$ ，紧夹在种皮和糊粉层之间。

3. 糊粉层

糊粉层一般只有一层细胞厚，完全包围着整个麦粒，既覆盖着淀粉质胚乳，又盖着胚芽。从植物学的观点看，糊粉层是胚乳的外层。然而，制粉时糊粉层随同珠心层、种皮和果皮一同被除去，即麸皮。糊粉细胞是厚壁细胞，基本上呈立方形，不含淀粉（图 3.4）。细胞的平均厚度约为 $50 \mu\text{m}$ ，细胞壁厚 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ ，细胞壁中含有大量的纤维质成分。糊粉细胞包括一个大核和大量的糊粉粒（图

3.4)。糊粉粒的结构和成分较复杂。糊粉层含有相当高的灰分、蛋白质、总磷、植酸盐磷、脂肪和烟酸，此外，糊粉层中的硫胺素和核黄素含量高于皮层的其他部分，酶活性也高。包住胚部的糊粉细胞有所变化，是薄壁细胞，可能不含糊粉粒。胚部糊粉层的厚度平均约 $13\ \mu\text{m}$ ，比其他部位糊粉层厚度约少 $1/3$ 。

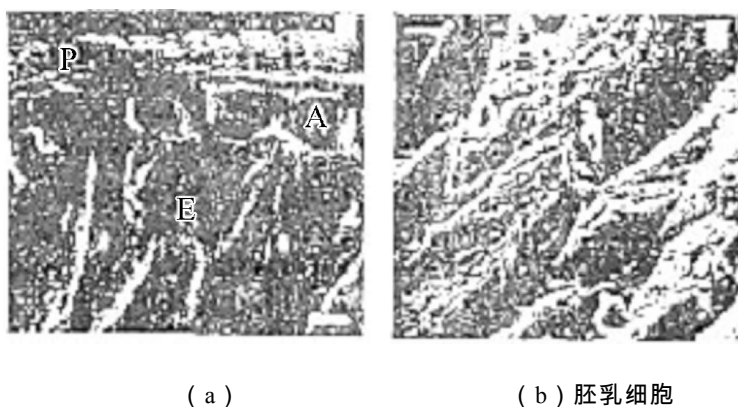


图 3.4 硬质冬小麦籽粒横切面扫描电子显微图 (每单位长为 $20\ \mu\text{m}$)

P—果皮；A—糊粉层；E—胚乳

4. 胚芽或胚胎

小麦胚芽占籽粒的 $2.5\% \sim 3.5\%$ 。胚芽由 2 个主要部分组成：胚轴 (不育根和茎) 和盾片。盾片的功能是作为贮备器官。胚芽含有相当高的蛋白质 (25%)、糖 (18%)、油脂 (胚轴含油 16%，盾片含油 32%) 和灰分 (5%)。胚芽不含淀粉，还含有较高的 B 族维生素和多种酶类；胚芽中含维生素 E (总生育酚) 很高，其值可达 $500\ \mu\text{g/g}$ ；糖类主要是蔗糖和棉籽糖。

5. 胚 乳

淀粉胚乳不包括糊粉层，由 3 类细胞组成：边缘细胞、棱柱形细胞和中心细胞。淀粉细胞的大小、形状及在籽粒中的位置各异。边缘细胞是糊粉层下面的第一层细胞，一般较小，各方向的直径相等，或者朝向籽粒中心稍稍伸长(图 3.4)。在边缘细胞下面有几层伸长的棱柱形细胞，它们向内延伸几乎接近籽粒中心，大小为 $150\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 。中心细胞在棱柱形细胞里面，它们的大小和形状都较其他细胞不规律得多。

胚乳细胞壁由戊聚糖、半纤维素和 β -葡聚糖组成，但没有纤维素，细胞壁的厚度因在籽粒中的位置不同而异，靠近糊粉层的细胞壁较厚，栽培品种不同及硬麦和软麦之间细胞壁的厚度也呈现出显著差异(图 3.5)。硬麦和软麦之间的不同可能导致一种可选择性，即需要高的吸水率可选择硬麦(制面包的小麦)，因为硬麦中的半纤维素能吸收大量的水分，所以，我们实际是在选择厚细胞壁。与此相反，我们不需要软麦去吸收大量的水分，因此，我们就要选择低吸水率的薄细胞壁。

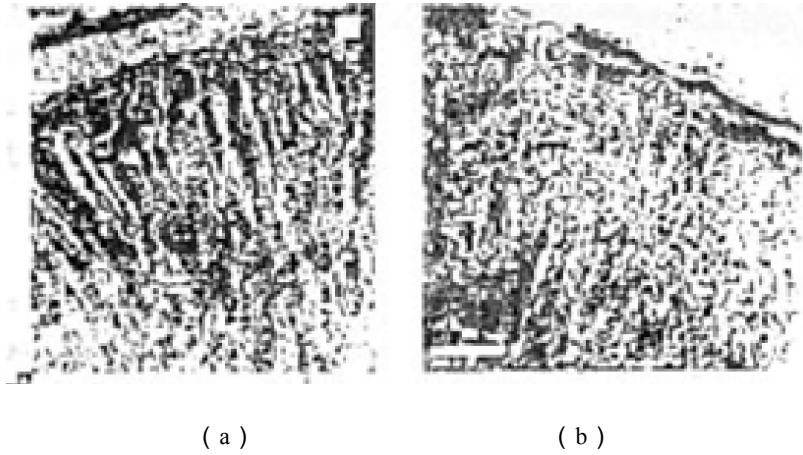


图 3.5 冬麦横切面扫描电子显微图 (低倍放大)
(每单位长为 100 μm)

硬麦和软麦的另一个不同点是籽粒破碎时破裂点的不同。硬麦的最先破裂点产生在细胞壁而不是通过细胞内含物，刚好处于糊粉层下面的细胞，这一特点十分明显；软麦的裂纹穿过细胞内含物。这一现象表明，在硬麦中，细胞内含物之间相互结合是很牢固的，从而使薄弱点在细胞壁。当然，如果将籽粒制成面粉，硬麦细胞内含物也就破裂了。

胚乳细胞的内含物和细胞壁构成面粉。这些细胞中挤满了充填在蛋白质间质中的淀粉粒。小麦蛋白质的绝大部分是贮藏蛋白质——面筋。小麦成熟时，在蛋白质体中合成面筋。但是，随着麦粒的成熟，蛋白质体被压在一起而成为一种像泥浆或黏土状的间质，蛋白质体不再能辨别得出。淀粉粒有大小两种，大的淀粉颗粒呈小扁豆状，扁平面的直径可达 40 μm ，小的颗粒球形淀粉粒，

直径为 2~8 μm 。实际上，人们还发现尺寸和形状介于这两种之间的各种淀粉粒，不过，前两种尺寸和形状占优势。

图 3.6 是硬质小麦，可看出蛋白质和淀粉的紧密黏附情况。蛋白质好像湿外套，很好地黏附在淀粉表面，这是硬质小麦的特点。蛋白质不仅使淀粉良好地湿润，而且使两者结合紧密。结合强度高的证据是硬质小麦若有破损发生在细胞壁，而不是通过细胞内含物，破损处穿过某些淀粉粒，而不是在淀粉与蛋白质的分界面。

在一个相似的软质小麦的显微图中，表现出很大的不同，淀粉和蛋白质在外观上是相似的，但是，蛋白质不湿润淀粉表面。由于蛋白质和淀粉之间的结合很容易破裂，说明它们之间的结合是不牢固的，故没有破损的淀粉粒。

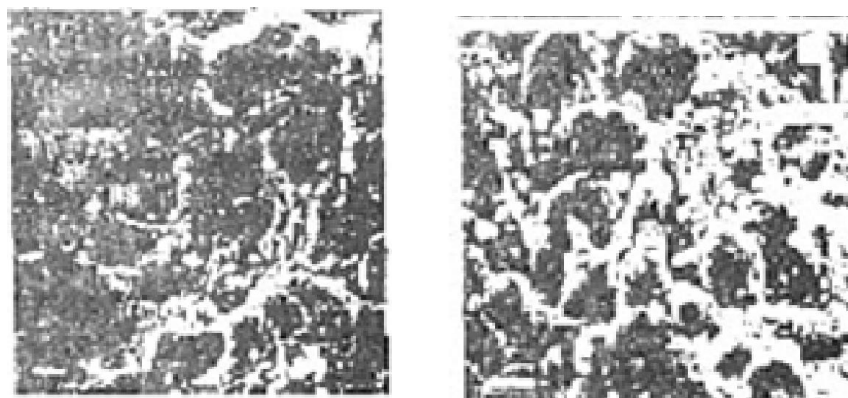


图 3.6 示出内含物的胚乳细胞扫描电子显微图

(每单位长为 10 μm)

杜伦小麦比普通硬质小麦硬得多。因此，当麦粒破碎时，会产生大量的破损淀粉粒(图 3.7)。当向一个细胞施加足够的力时，淀粉粒破碎而不是淀粉与蛋白质的结合面破裂。蛋白质与淀粉结合的强度可以说明籽粒的硬度。在软质小麦中，蛋白质与淀粉的结合容易破裂，因此，籽粒用较小的力即可粉碎。在较硬的小麦中，蛋白质与淀粉的结合也相应增强。



图 3.7 杜伦小麦籽粒的扫描电子显微图示出胚乳细胞

淀粉与蛋白质结合的性质目前还不清楚，但是，用水处理面粉之后，蛋白质和淀粉能很容易相互分离这一事实表明，其结合可因水而破裂或削弱。采用免疫荧光技术已证实硬质小麦在蛋白质与面粉的分界处含有一种特殊的水溶性蛋白质，而软质小麦不含有这种特殊的蛋白质。除硬度的区别之外，

小麦胚乳的另一个重要特点是其外观的不同。某些小麦具有玻璃质、角质或半透明的外观，而另一些小麦则是不透明或粉质的。一般认为透明度与硬度和高蛋白含量相关联，不透明度与软度和低蛋白含量相关联。但是，透明度和硬度并不是同一根本因素造成的，有时可能硬质小麦不透明而软质小麦却是玻璃质的。

籽粒中有空气间隙时，由于衍射和漫射光线呈现为不透明或粉质。籽粒充填紧密时，没有空气间隙，光线在空气和麦粒界面衍射并穿过麦粒，没有反复的衍射作用，形成半透明的或玻璃质的籽粒。谷物中空气间隙的存在形成不透明的籽粒，密度小。空气间隙是在谷物干燥期间形成的。由于谷物失去水分，蛋白质皱缩、破裂并留下空气间隙。玻璃质的籽粒在蛋白质皱缩时仍保持完整，从而成为密度较大的籽粒。如果收获的谷物籽粒未成熟，并采用冷冻干燥，籽粒将变得完全不透明。这说明玻璃质的特性是在田间的最终干燥过程中产生的。玻璃质籽粒在田间或实验室受潮和干燥，将失去其透明度。

总之，小麦胚乳的质地（硬质）和外观（透明度）是有差异的。一般来说，高蛋白的硬质小麦往往是玻璃质的，低蛋白的软质小麦往往是不透明的。然而，硬度和透明度的产生原因是不同的，两者并不总是相关联。硬度是由胚乳细胞中蛋白质基质和淀粉之间的结合强度产生的，这种结合强度凭借遗传控制；而

玻璃质则是籽粒中缺乏空气间隙造成的，控制机理还不清楚，很显然与样品中蛋白质的量有关。例如，高蛋白的软质小麦比低蛋白的软质小麦更透明，低蛋白的硬质小麦比高蛋白的硬质小麦更不透明。

二、麦粒各部分的组成

麦粒各组成部分的相对含量见表 3.1。

表 3.1 麦粒各组成部分 (干物质) 质量分数

单位：%

粮种	麦皮				胚乳	胚
	果皮	种皮	糊粉层	合计		
小麦	3.5~4.4	1.1~2.0	6.0~8.9	10.6~15.3	77.0~85.0	1.4~3.8

小麦因品种、生长条件等的不同，其籽粒各部分相对含量也有较大差别。例如，红春麦的胚乳比红冬麦的含量略少，而胚的含量略高；硬麦和软麦胚乳含量的平均值差别不大，但硬麦的麦皮含量较少，而胚较多。

影响胚乳含量的主要因素是麦粒的饱满程度和大小。一般正常麦粒的平均胚乳含量比秕麦高。

三、麦粒各组成部分化学成分分布特点

麦粒中含有对面粉营养价值具有重要意义的蛋白质、淀粉、脂类化合物等，它们在麦粒各组成成分中的分布是极不均匀的，其相对分布见表 3.2。

表 3.2 麦粒各组成部分化学成分的相对分布 (质量分数)

组成部分	各组成部分	占整个麦粒含量 (%)	灰分含量 (%)
------	-------	-------------	----------

	的平均含量 (%)	淀粉	蛋白质	纤维素	脂类化合物	
麦皮	15.0	0.0	20.0	88.0	30.0	8.0 ~ 15.0
胚乳	82.5	100.0	72.0	8.0	50.0	0.35 ~ 0.50
胚	2.5	0.0	8.0	4.0	20.0	5.0 ~ 7.0

1. 淀粉

淀粉是小麦化学成分中最主要的物质，占小麦碳水化合物的 90%左右。淀粉全部集中在胚乳内，麦皮和胚完全不含淀粉。

2. 蛋白质

麦粒中蛋白质主要集中在胚乳中的糊粉层里。但是，糊粉层中的蛋白质被坚固的细胞所包围，不易被人体消化吸收，必须进行特殊的处理。而胚乳中的蛋白质则不同，它主要是麦谷蛋白和麦胶蛋白，二者能以接近 1:1 的比例结合成一种经吸水后即富有黏结力和弹性的软胶——面筋。面筋的这种性质决定了小麦粉具有良好的食用品质。

小麦的粒质不同，面筋在胚乳中的分布也不同，试验证明，粉质麦粒中，面筋主要集中在胚乳的外层；而在角质麦粒中，面筋的分布比较均匀(图 3.8)。

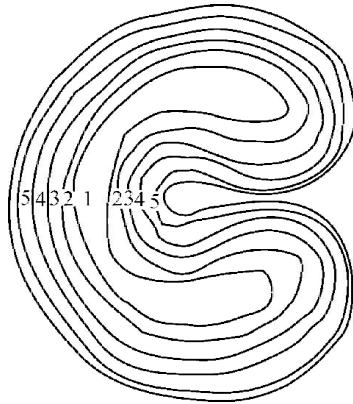


图 3.8 面筋质在小麦胚乳中的分布

3. 纤维素

纤维素是人体不能消化的碳水化合物。小麦中所含的纤维素主要分布在皮层中，其含量占整个麦粒纤维素的 75%，糊粉层占 15%，胚乳中的含量极少，纯胚乳含纤维 0.15%。因此，小麦的颗粒越大、越饱满，其纤维的含量越低，而秕麦的纤维素含量最高。

4. 脂 肪

脂肪主要分布在胚和糊粉层中，尤以胚部最多，约 14%。胚乳内含脂肪很少，约为 0.6%。

5. 灰分（矿物质）

小麦及其加工产品经过充分的燃烧，其中有机物质被燃烧而完全挥发，而矿物质残存，成为灰白色的灰烬，称为灰分。灰分在小麦各组成部分中分布极

不均匀，在皮层中较多，其中糊粉层的灰分高达 10%，胚乳中含量较低，如表 3.3 所列。

表 3.3 小麦各组成部分的灰分含量 (质量分数)

名称	皮层 (包括糊粉层)	胚乳	胚
灰分含量 (%) (干基)	7.3 ~ 10.8	0.35 ~ 0.55	5 ~ 6.7
灰分质量占麦粒质量 (%)	14.5 ~ 18.5	78 ~ 84	2 ~ 3.9

6. 维生素

在小麦籽粒中还含有少量的维生素，主要有维生素 B 族、维生素 E 和维生素 A 等。各种维生素主要分布在胚和糊粉层中，其大致分布情况见表 3.4。

表 3.4 小麦及其各组成部分中的维生素含量

单位：μg/g

名称	维生素 B ₁	维生素 B ₂	烟酸	吡哆酸	泛酸	维生素 E
全粒	3.75	1.8	59.3	4.3	7.8	9.1
素皮	0.6	1.0	25.7	6.0	7.8	57.7
糊粉层	16.5	10.0	74.1	36.0	45.1	
胚乳	0.13	0.7	8.5	0.3	3.9	0.3
胚	8.4	13.8	38.5	21.0	17.1	15.4
内子叶	156.0	12.7	38.2	23.2	14.1	

7. 水分

小麦籽粒具有吸湿性，它随麦粒各组成部分的结构和化学成分不同而异。胚含糖分较多，是经常湿润的部分，吸收水分最快；皮层含有大量粗纤维，吸

水较快；胚乳含有大量淀粉，吸水较慢。因此，水分在麦粒各组成部分的分布也是不均匀的，一般总是胚中所含水分最高，皮层次之，胚乳最低。

第三节 小麦粉的营养价值

小麦是世界主要粮食作物中最重要的一种，加工成小麦粉可制成各种食品，虽然各国食用面粉的消费量不甚相同，但它仍是人类生活中价廉而重要的食物。

小麦籽粒由胚、胚乳和麦皮组成，各部分的比例随品种不同有较大的差异，大体为：胚 3%、麦皮 15%、胚乳 82%。小麦含有大量的淀粉，并含有营养价值高的蛋白质、维生素（特别是维生素 B 族）和常被人们所忽视的矿物质。小麦中含有多种氨基酸，以谷氨酸和脯氨酸最多，赖氨酸较少，这是值得注意的，胚和糊粉层中所含蛋白质的生物学价值高于胚乳，因为在这两部分组织中，赖氨酸的含量胚为胚乳的 2~2.5 倍。

小麦含有丰富的维生素 B 族，在胚的子叶中含维生素 B₁ 最丰富，糊粉层中烟酸最多。维生素 B 和泛酸的分布很不均匀，维生素 B₂ 集中在糊粉层和胚中，胚乳中含量很少。

小麦含矿物质约 1.8%，胚乳内矿物质含量很少，仅 0.35%~0.5%。

矿物质中 95%是钾、镁、钙化合的磷酸盐和硫酸盐，主要的微量元素是锰、锌。

现代的制粉技术，还不能把胚乳和麦皮、麦胚完全分离。在小麦逐道研磨的制粉过程中，出粉率越低的面粉，含胚乳越多。通常，在低出粉率（72%）的精制白面粉中，它含有极少量的麦皮，面粉灰分接近胚乳的灰分为 0.4%~0.5%。

小麦加工时，按面粉的质量要求，可生产不同出粉率的面粉。由于麦粒中各组成部分的化学成分不同，因此，面粉中所含的营养成分（除碳水化合物和氮）随出粉率的增加而增加，但两者并不成正相关，而各种营养成分的特性曲线的斜率并不一致。蛋白质含量在胚乳中心部位最低，向外逐渐增多，并以糊粉层和麦胚最多，因此，出粉率 85%的面粉含蛋白质较高；出粉率低的面粉，含蛋白质较少。出粉率为 75%~78%，面粉中含麦胚显著增多，故面粉中含维生素 B₁、B₂ 较多；出粉率为 85%~100%，面粉中含大量麦皮，故烟酸和纤维素含量显著增加。对于矿物质来说，在出粉率 72%的面粉中所含的镁、磷、铁、钙大大减少，分别为小麦原有含量的 18%、26%、42%和 50%，表 3.5、表 3.6 列出不同出粉率面粉的营养成分和营养价值，表明出粉率低的面粉，所含营养成分的量下降，而面粉中淀粉含量会增多，能量值增加了。

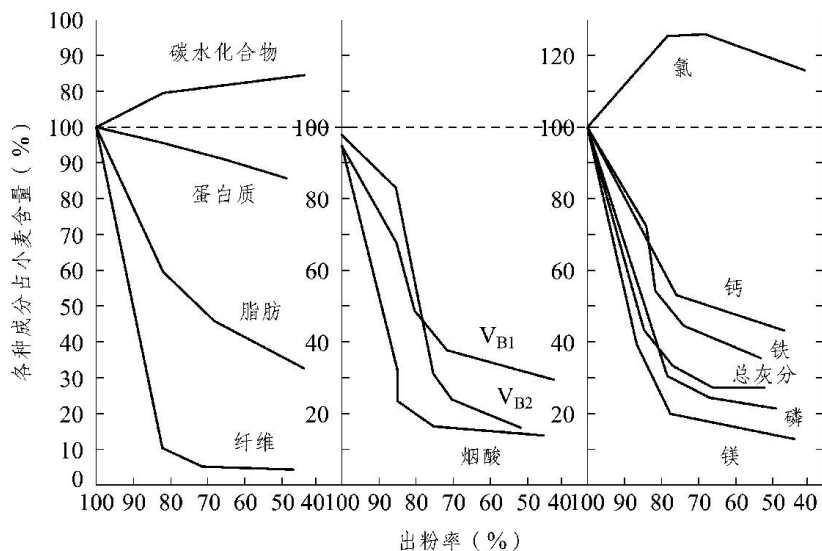


图 3.9 不同出粉率面粉的营养成分与整粒小麦含量的关系

表 3.5 不同出粉率的营养价值

出粉率 (%)	蛋白质含量 (%)	脂肪含量 (%)	有用碳水化合物含量 (%)	热量 (kJ/100 g)
100	8.9	2.2	73.4	1392
85	8.6	1.5	79.1	1446
80	8.2	1.3	80.8	1454
75	8.0	1.1	81.5	1458

表 3.6 100 g 面粉的营养价值

名称	75%出粉率	全麦粉
热量 (kJ)	1 463	1 400
蛋白质含量 (g)	11	12
钙含量 (mg)	20	30
铁含量 (mg)	1.8	4.0
维生素 B ₁ 含量 (mg)	0.1	0.4
维生素 B ₂ 含量 (mg)	0.04	0.1

烟 酸 含 量 (mg)	1.5	5.0
----------------	-----	-----

综上所述，小麦出粉率越低，面粉的硬度越高，但营养价值越低，高出粉率（85%以上）面粉含有较多的营养成分，但因纤维含量增多，人们食用后消化率降低。