

## 链霉菌降解角蛋白的生化机制研究\*

黄 林 熊智强 蔡华静 郭美锦 涂国全\*\*

(江西农业大学生物工程系 南昌 330045)

**摘要:** 对弗氏链霉菌 S-221 变种降解角蛋白的生化机制进行了初步研究。该菌在角蛋白底物作用下诱导产生角蛋白酶。它是一种复合蛋白酶, 含有二硫键还原酶和多肽水解酶等多种酶活性组分。硫酸钠、亚硫酸钠和巯基乙醇对角蛋白酶具有强烈的激活作用, 其主要表现作用于角蛋白酶中的二硫键还原酶。亚硫酸钠在 0.01 mol/L 浓度下不仅作用于二硫键还原酶, 而且还作用于多肽水解酶。硫代硫酸钠对二硫键还原酶有强烈的抑制作用。角蛋白酶降解羽毛角蛋白首先是角蛋白酶中的二硫键还原酶使角蛋白中二硫键裂解产生变性角蛋白, 然后变性角蛋白在多肽水解酶的共同作用下逐步水解成多肽、寡肽和游离氨基酸, 使角蛋白彻底降解。在角蛋白降解过程中, 角蛋白中的硫也随之转化成巯基化合物,  $H_2S$  和硫酸盐 3 种含硫化合物存在于降解产物中。

**关键词:** 弗氏链霉菌, 角蛋白酶, 生化机制

**中图分类号:** Q93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-2654 (2006) 04-0036-07

## Study on the Biochemical Mechanism of Degrading Keratins by *Streptomyces fradiae*\*

HUANG Lin XIONG Zhi-Qiang CAI Hua-Jing GUO Mei-Jin TU Guo-Quan\*\*

(Department of Bioengineering, JAU, Nanchang 330045)

**Abstract:** The biochemical mechanism of degrading keratins by *S. fradiae* var S-221 was primarily studied. The compounds ( $Na_2SO_4$ ,  $Na_2SO_3$  and sulfhydryl alcohol), which respectively enhance specific activity of keratinase, activate keratinase intensively and mainly act on the disulfide bonds reductase in the keratinase,  $Na_2SO_3$  activates intensively both disulfide bonds reductase and polypeptide hydrolytase at 0.01 mol/L, whereas  $Na_2S_2O_3$ , which acts on the disulfide bonds reductase, inhibits keratinase. On the condition that substrate, keratins exists, *S. fradiae* var S-221 is induced to produce exo-keratinase, which is a multiproteinase, containing disulfide bonds reductase, which is a key enzyme degrading keratins, then, with polypeptidic, hydrolytase, gradually hydrolyzates denatured keratins into polypeptides, oligopeptides and free amino acids, so that keratins have been decomposed completely. Sulfur in the keratins was transferred into sulfhydryl compounds,  $H_2S$  and sulfates in the course of keratinolysine.

**Key words:** *Streptomyces fradiae*, Keratinase, Biochemical mechanism

角蛋白主要以各种动物的毛发、羽毛、蹄等作为主要存在形式, 是一种抗性很强的硬性蛋白。它的结构通过二硫键、氢键、盐键和其它交键作用使得非常稳定<sup>[1]</sup>。酪蛋白酶、胰蛋白酶等动物来源的蛋白酶完全不能降解角蛋白<sup>[2]</sup>。1963 年 Walter 等从弗氏链霉菌 (*Streptomyces fradiae*) 中分离得到一种能降解角蛋白的酶复合物, 称为角蛋白酶 (Keratinase), 并对角蛋白酶与胰蛋白酶对羊毛角蛋白底物进行了对比试验, 认为

\* 江西省自然科学基金项目 (No. 0230028)

\*\* 通讯作者 Tel: 0791-3813466, E-mail: tuguoquan@263.net

收稿日期: 2005-10-09, 修回日期: 2006-01-15

角蛋白酶对角蛋白的降解作用主要是通过断裂二硫键进行的,但对角蛋白酶如何断裂二硫键的生化机制没有研究<sup>[3]</sup>。

作者从长年堆积羽毛腐烂的土壤中通过以羽毛角蛋白为唯一氮源,采用富集培养稀释分离技术,获得一株对羽毛角蛋白降解利用能力极强的链霉菌 S-221 菌株<sup>[4]</sup>。并对该菌株进行了初步鉴定为弗氏链霉菌 S-221 变种 (*Streptomyces fradiae* var.) S-221<sup>[5]</sup>。从 S-221 菌株的摇瓶发酵培养液中提取分离纯化角蛋白酶,利用提取纯度不同的角蛋白酶,分别进行羽毛角蛋白降解试验,通过探索角蛋白中含硫化合物变化规律和添加不同含硫化合物分别对纯度不同角蛋白酶的酶活力和酶解产物的影响等研究,初步探索到弗氏链霉菌 S-221 菌株降解角蛋白的生化机制。本文报道了这一研究结果。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 菌种:弗氏链霉菌 S-221 变种 (*Streptomyces fradiae* var.) S-221 本研究室砂土管保存。

1.1.2 培养基:①斜面和孢子瓶培养基:高氏一号培养基;②角蛋白的摇瓶发酵培养基:甘油 5g, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 5g, MgCl<sub>2</sub> 0.5g, FeCl<sub>3</sub> 0.01g, ZnCl<sub>2</sub> 0.01g, 脱脂角蛋白粉(猪毛、鸭毛、鸡毛) 10g, 定容至 1L, pH 灭菌前用 1mol/L NaOH 调到 pH9.0, 灭菌后 pH7.0 左右。

1.1.3 角蛋白酶粗酶:从弗氏链霉菌 S-221 变种发酵产物中分离初步纯化,主要含有二硫键还原酶和多肽水解酶两个活性组分。

1.1.4 精制角蛋白酶:从角蛋白酶粗酶中进一步纯化结晶,主要含有二硫键还原酶活性组分。

### 1.2 方法

1.2.1 羽毛角蛋白摇瓶发酵:试验采用 1,000mL 三角瓶分别盛含不同发酵培养基 200mL, 接种 S-221 菌株孢子悬液 10mL, 在 220r/min 旋转式摇瓶机 38℃ 培养 30~96h。同时以不接种孢子处理作为对照处理。

1.2.2 不同含硫化合物对角蛋白酶降解羽毛角蛋白催化反应试验:在 100mL 具塞三角瓶中准确称取脱脂羽毛粉 0.05g, 分别加入 pH8.5 Tris 缓冲液 18mL、含硫化合物稀释液 1mL 和角蛋白酶稀释液 1mL。40℃ 水浴 10h, 分别测定角蛋白酶活力和滤液中肽类物质的含量。

1.2.3 发酵液 pH 测定:采用精密 pH 试纸。

1.2.4 菌体生长量的测定:分别取 20mL 发酵液于离心管中, 3,000r/min 离心 10min, 用菌体湿重占发酵液重量百分含量来表示:

$$\text{菌丝生长量}(\%) = \left( \frac{W_2}{W_1} - \frac{W_2'}{W_1'} \right) \times 100\%$$

$W_2, W_2'$  分别为离心弃去上清液后, 试验处理滤渣重和对照处理滤渣重;

$W_1, W_1'$  分别为 20mL 试验处理液总重和对照处理液总重。

1.2.5 角蛋白酶活力测定:以脱脂羽毛粉为底物, 在 19mL pH 8.5 的 Tris 缓冲液中加 1mL 经适当稀释的角蛋白酶液, 40℃ 水浴中酶解 10h, 测定溶液中酪氨酸的含量。

角蛋白酶活力单位定义:在上述酶反应体系中以每分钟催化降解产生 1μg 酪氨酸

所需的酶量称为一个活力单位 (u)。

比活力：每毫克蛋白质具有的活力单位 (u/mg)。

1.2.6 游离半胱氨酸测定：采用日立 835 型氨基酸自动分析仪进行测定。

1.2.7 巯基化合物测定：采用 5, 5'-二硫代 2-硝基苯甲酸法测定<sup>[4]</sup>。

1.2.8 硫酸盐测定：采用 Chopra 比浊法<sup>[5]</sup>。

1.2.9 肽类物质测定：根据 Lowery 等方法<sup>[6]</sup>。

1.2.10 角蛋白降解率测定：采用干重法。

角蛋白的降解率 (%) =  $\frac{\text{加入羽毛粉干重} - \text{发酵滤后滤渣干重}}{\text{加入羽毛粉干重}} \times 100\%$

2 结果与分析

2.1 含硫化合物对角蛋白酶活力和酶解产物的影响

将 0.2mol/L 巯基乙醇、亚硫酸钠、硫酸钠和硫代硫酸钠 4 种含硫化合物溶液进行适当稀释，各吸 1mL 不同浓度的不同含硫化合物溶液分别于精制角蛋白酶和角蛋白酶粗酶两种酶促反应体系中，使不同含硫化合物最终作用浓度分别为  $1 \times 10^{-2}$ 、 $5 \times 10^{-3}$ 、 $2.5 \times 10^{-3}$  和  $1.25 \times 10^{-3}$  mol/L 4 种浓度。每种含硫化合物试验处理以不加含硫化合物为对照，40℃ 水浴 10h 后，分别测定其角蛋白酶活力和滤液中肽类物质的含量，其测定结果分别见表 1 和表 2。

表 1 不同含硫化合物对角蛋白酶活力的影响测定结果

含硫化合物	含硫化合物 浓度 (mol/L)	精制角蛋白酶		角蛋白酶粗酶		两种酶活力对应 百分比值 (%)	
		比活力 (u/mg)	比对照增 减百分率	比活力 (u/mg)	比对照增 减百分率	u <sub>1</sub> /u <sub>2</sub>	平均
		(u <sub>1</sub> )	(%)	(u <sub>2</sub> )	(%)		
巯基乙醇 CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> -SH	0 (对照)	42.3	0	17.0	0	248.8	2,156.2
	$1.25 \times 10^{-3}$	330.0	480.0	18.0	5.9	1,833.3	
	$2.5 \times 10^{-3}$	430.0	916.0	20.0	17.6	2,150.0	
	$5 \times 10^{-3}$	740.0	1,649.0	31.0	82.3	2,387.1	
	$1 \times 10^{-2}$	1,037.0	2,352.0	46.0	170.6	2,254.3	
亚硫酸钠 Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	0 (对照)	42.3	0	17.0	0	248.8	675.2
	$1.25 \times 10^{-3}$	146.0	245.0	18.0	5.9	811.1	
	$2.5 \times 10^{-3}$	189.0	346.0	25.0	47.1	756.0	
	$5 \times 10^{-3}$	325.0	668.0	33.0	94.1	984.8	
	$1 \times 10^{-2}$	366.0	765.0	246.0	1,347.0	148.8	
硫酸钠 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0 (对照)	42.3	0	17.0	0	248.8	560.3
	$1.25 \times 10^{-3}$	81.0	91.5	21.0	23.5	385.7	
	$2.5 \times 10^{-3}$	97.0	115.0	24.0	41.2	404.2	
	$5 \times 10^{-3}$	214.0	406.0	27.0	58.8	792.6	
	$1 \times 10^{-2}$	224.0	430.0	34.0	100.0	658.8	
硫代硫酸钠 Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 (对照)	42.3	0	17.0	0	248.8	261.8
	$1.25 \times 10^{-3}$	41.0	-3.0	17.0	0	241.2	
	$2.5 \times 10^{-3}$	32.3	-23.6	14.5	-14.7	222.8	
	$5 \times 10^{-3}$	19.4	-55.1	7.3	-57.1	265.8	
	$1 \times 10^{-2}$	10.8	-74.5	3.4	-80.0	317.6	

表 2 含硫化合物对两种不同组分角蛋白酶催化产物的影响

含硫化合物	含硫化合物 浓度 (mol/L)	精制角蛋白酶		角蛋白酶粗酶		两种酶活力对应 百分比值 (%)	
		肽类物质 ( $\mu\text{g/mL}$ ) (P)	比对照 增减百 分率 (%)	肽类物质 ( $\mu\text{g/mL}$ ) (S)	比对照 增减百分率 (%)	P/S	平均
巯基乙醇 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-SH}$	0 (对照)	229	0	1, 153	0	19. 86	18. 65
	$1. 25 \times 10^{-3}$	235	2. 62	1, 131	13. 70	20. 78	
	$2. 5 \times 10^{-3}$	266	16. 16	1, 759	52. 56	15. 12	
	$5 \times 10^{-3}$	497	117. 03	2, 270	140. 24	17. 94	
	$1 \times 10^{-2}$	632	175. 98	3, 042	163. 83	20. 78	
亚硫酸钠 $\text{Na}_2\text{SO}_3$	0 (对照)	229	0	1, 153	0	19. 86	17. 61
	$1. 25 \times 10^{-3}$	274	19. 65	1, 506	30. 62	18. 19	
	$2. 5 \times 10^{-3}$	309	34. 93	1, 681	45. 79	18. 38	
	$5 \times 10^{-3}$	449	96. 07	2, 731	136. 86	16. 44	
	$1 \times 10^{-2}$	791	245. 41	4, 539	293. 67	17. 43	
硫酸钠 $\text{Na}_2\text{SO}_4$	0 (对照)	229	0	1, 153	0	19. 86	19. 58
	$1. 25 \times 10^{-3}$	233	1. 75	1, 147	25. 50	16. 10	
	$2. 5 \times 10^{-3}$	340	48. 47	1, 953	69. 38	17. 41	
	$5 \times 10^{-3}$	597	160. 70	2, 245	94. 71	26. 59	
	$1 \times 10^{-2}$	612	167. 25	3, 353	190. 8	118. 25	
硫代硫酸钠 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	0 (对照)	229	0	1, 153	0	19. 86	4. 24
	$1. 25 \times 10^{-3}$	76	-66. 81	1, 020	-11. 54	7. 45	
	$2. 5 \times 10^{-3}$	48	-79. 04	903	-21. 68	5. 31	
	$5 \times 10^{-3}$	10	-95. 85	436	-62. 19	2. 18	
	$1 \times 10^{-2}$	7	-96. 81	359	-68. 86	2. 03	

根据表 1 和表 2 的测定结果表明：巯基乙醇、亚硫酸钠、硫酸钠 3 种含硫化合物分别对供试的两种纯度不同角蛋白酶活力有强烈的激活作用，其激活程度在供试 4 种浓度范围内随着含硫化合物作用浓度的提高而活力剧增，相应酶解产物——肽类物质的含量也随之增加。而硫代硫酸钠对两种酶活力有强烈的抑制作用，其抑制程度随着硫代硫酸钠浓度的提高酶活力剧烈下降，相应酶解产物——肽类物质的含量也迅速减少。

2.2 不同含硫化合物对角蛋白酶作用机理

根据供试的两种纯度不同角蛋白酶在活性组分上存在差异和表 1，表 2 中不同含硫化合物对两种角蛋白酶活力的提高和抑制程度以及酶解产物——肽类物质含量的差异，表明：①巯基乙醇在供试 4 种浓度范围内，使精制角蛋白酶活力从 42.3u/mL 提高到 1,037u/mL，提高率达到 2,352%，远远超过其对角蛋白酶粗酶活力的提高，因而推断巯基乙醇主要作用于角蛋白酶中二硫键还原酶，使其产生激活作用。②亚硫酸钠在 0.00125 ~ 0.005mol/L 浓度范围内和硫酸钠在供试 4 种浓度范围内，使精制角蛋白酶活力的提高程度远比对角蛋白酶粗酶活力提高程度高很多，因此这两种含硫化合物在其相应浓度下主要作用于角蛋白酶中二硫键还原酶，使其产生激活作用，但是亚硫酸钠在 0.01mol/L 的浓度下使角蛋白酶粗酶活力提高程度是精制角蛋白酶活力提高的近 2 倍，且在该浓度下，角蛋白酶粗酶解产生的肽类物质含量是精制角蛋白酶催化产生的 5.7 倍，达到 4539 $\mu\text{g/mL}$ ，因此亚硫酸钠在 0.01mol/L 浓度下，不仅作用于角蛋白酶中二硫键还原酶，而且也作用于角蛋白酶中多肽水解酶。③硫代硫酸钠在供试的 4 种浓度范围内对两种纯度不同角蛋白酶活力的抑制程度可知，硫代硫酸钠主要作用于角蛋

白酶中二硫键还原酶,使其产生抑制作用。

2.3 角蛋白降解过程含硫化合物消长变化及其与相关因素之间的关系

在分别以脱脂鸡毛和鸭毛角蛋白为唯一氮源的摇瓶发酵培养基中接种 S-221 菌株孢子进行摇瓶发酵培养,定时观察发酵瓶口上悬吊的红色石蕊试纸和醋酸铅试纸颜色变化和检测发酵液中角蛋白酶活力、半胱氨酸含量、巯基化合物含量、肽类物质的含量和羽毛角蛋白降解率,观察和检测结果见表 3。

表 3 角蛋白酶活力和酶解产物测定结果

测定项目	培养时间 (h)	pH	角蛋白酶活力 (μg/mL) X <sub>1</sub>	硫酸铵醋酸铅试纸和红色石蕊试剂反应*	半胱氨酸含量 (μg/mL) X <sub>2</sub>	巯基化合物含量 (μg/mL) X <sub>3</sub>	硫酸盐含量 (μg/mL) X <sub>4</sub>	肽类物质含量 (μg/mL) X <sub>5</sub>	角蛋白降解率 (%) X <sub>6</sub>
鸡毛	0	7.0	0	-	0	1.97	0	76.30	7.00
	12	6.5	2.08	+	1.50	2.02	50.60	842.65	10.00
	24	7.5	4.64	++	3.76	12.40	110.00	907.35	18.00
	36	8.0	12.50	+++	6.76	22.80	121.50	1201.80	56.50
	48	8.5	17.40	++++	41.50	27.80	130.50	1468.00	64.00
	60	8.5	19.00	++++	38.70	30.30	146.00	1690.40	71.00
鸭毛	0	7.0	0	-	0	1.60	0	83.20	6.80
	12	6.5	3.40	+	3.73	1.90	46.80	981.00	9.80
	24	7.5	6.20	++	6.78	10.50	104.00	1206.00	27.20
	36	8.0	11.15	+++	17.64	20.40	115.60	125.00	49.30
	48	8.0	16.69	++++	40.00	26.50	123.40	1384.00	60.60
	60	8.5	18.07	++++	39.70	23.40	130.50	1416.00	70.20

\*- 产 H<sub>2</sub>S 和 NH<sub>3</sub> 负反应, + 红色石蕊试纸和醋酸试纸下端变色, ++ 2 种试纸一半变色, +++ 2 种试纸 3/4 变色, ++++ 2 种试纸全变色

结果表明, S-221 菌株孢子分别接种在鸡毛和鸭毛角蛋白摇瓶发酵培养基中获得了非常相类似的试验结果,产生了角蛋白酶,环境逐渐变碱性,羽毛角蛋白不断降解,在形成肽类物质和游离氨基酸的同时,角蛋白中的硫也随之转化成硫化氢、巯基化合物和硫酸盐 3 种形式。根据表 3 的测定数据,通过两种羽毛角蛋白降解过程中角蛋白酶活力的变化分别与不同含硫化合物变化、肽类物质变化和角蛋白降解率变化之间进行动态相关性分析,各获得 5 个完全相类似的回归方程分别列于表 4。

表 4 含硫化合物与角蛋白酶活力以及降解产物之间相关性分析结果

相关因素	鸡毛角蛋白		鸭毛角蛋白	
	$y = bx_i + a$	相关系数 $r_{ij}$	$y = bx_i + a$	相关系数 $r_{ij}$
$x_1$ 分别与 $x_2, x_3,$	$x_2 = 2.4425x_1 - 4.4906$	0.9017	$x_2 = 2.3827x_1 - 3.9259$	0.9765
	$x_3 = 1.2323x_1 + 3.1252$	0.9168	$x_3 = 1.3769x_1 + 1.9975$	0.9626
$x_4, x_5$ 和 $x_6$ 之间	$x_4 = 6.1072x_1 + 37.3193$	0.8756	$x_4 = 6.3342x_1 + 28.4951$	0.8958
	$x_5 = 58.5251x_1 + 455.4977$	0.9045	$x_5 = 55.5131x_1 + 543.7753$	0.8159
的回归方程	$x_6 = 3.542x_1 + 4.9959$	0.9905	$x_6 = 3.7306x_1 + 4.1311$	0.8671

结果表明:它们都是直线方程  $y = bx_i + a$  所表达的数学模型。相关性分析结果表明:①在角蛋白降解过程中不同含硫化合物的消长变化、肽类物质的消长变化和角蛋白降解率的消长变化均依赖于角蛋白酶活力的消长变化。因此,角蛋白酶是降解角蛋

白产生含硫化合物的关键因素。②巯基化合物、硫化氢 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 和硫酸盐是角蛋白降解过程中角蛋白中硫的主要转化形式。

### 2.4 角蛋白降解和角蛋白酶活性的消长变化

以脱脂羽毛角蛋白粉为唯一的氮源, 接种 S-221 菌株孢子进行摇瓶发酵, 定时取样测定其发酵液菌体生长量、羽毛角蛋白降解率和角蛋白酶活性, 根据其测定结果绘制的代谢曲线见图 1。

根据图 1 可知, 弗氏链霉菌 S-221 菌株在以羽毛角蛋白为唯一氮源的摇瓶发酵培养条件下, 能产生角蛋白酶使角蛋白不断降解。发酵时间与角蛋白降解率之间呈线性关系, 相关系数  $R$  值为 0.995。进一步分别通过羽毛角蛋白降解率与角蛋白酶活力之间; 角蛋白酶活力与菌体生长率之间进行直线回归统计分析表明, 它们之间呈正相关, 其相关系数分别 0.8236 和 0.8000, 说明羽毛角蛋白降解依赖于 S-221 菌株产生的角蛋白酶活力大小, 酶活力大小依赖于菌体生长量的大小。培养 24h 和 36h 菌体生长量和角蛋白酶活力分别达到最高值。随着角蛋白的不断降解, 培养液中 pH 逐渐升高, 72h pH 达到 9.0, 说明该菌产生的角蛋白酶具有碱性蛋白酶性质。

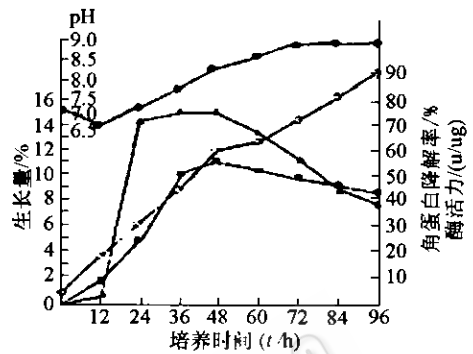


图 1 S-221 菌株分解角蛋白的代谢曲线

—▲— 菌丝生长量, —○— 角蛋白降解率,  
—■— 酶活力, —●— pH

### 2.5 不同角蛋白底物对角蛋白酶的诱导作用

在摇瓶培养基中分别添加等量的脱脂鸡毛、鸭毛和猪毛三种角蛋白作为底物, 以添加蛋白胨作对照, 接种 S-221 菌株孢子进行摇瓶培养, 定时取不同处理的摇瓶发酵液进行角蛋白酶活性测定, 测定结果见图 2。

根据图 2 可知, 在发酵培养基中分别添加猪毛、鸭毛和鸡毛角蛋白作氮源唯一底物, 对 S-221 菌株产生角蛋白酶均有强烈的诱导作用。说明 S-221 菌株降解利用角蛋白是由它产生特异的角蛋白酶的作用。

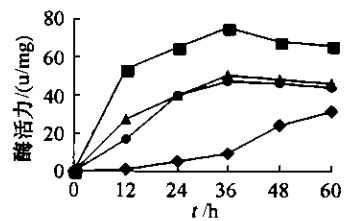


图 2 不同底物对角蛋白酶活力诱导作用曲线

—◆— 蛋白胨, —●— 猪毛粉,  
—▲— 鸭毛粉, —■— 鸡毛粉

### 2.6 弗氏链霉菌 S-221 变种降解角蛋白的生化机制

①根据在以角蛋白唯一氮源的摇瓶发酵结果, 该菌降解利用角蛋白主要依赖它产生的角蛋白酶。通过提取的角蛋白酶进行角蛋白酶解试验结果进一步证明了这一点。

②角蛋白酶是一种复合酶, 其中含有特异裂解二硫键的二硫键还原酶和使多肽水解的多肽水解酶。角蛋白酶中的二硫键还原酶首先作用于角蛋白分子结构二硫键, 使角蛋白高级结构解体形成变性角蛋白 (denatured keratin), 变性角蛋白在多肽水解酶的共同作用下逐渐水解成多肽、寡肽和游离氨基酸, 使角蛋白彻底降解。其中二硫键还原酶是角蛋白降解的关键酶。③根据在角蛋白降解过程中含硫化合物的

变化规律的初步探索表明,角蛋白酶使角蛋白不断降解的过程中,角蛋白中的硫也随之转化成巯基化合物,硫化氢( $H_2S$ )和硫酸盐 3 种含硫化合物形式存在于降解产物中。④通过进一步探索 3 种含硫化合物的形成过程表明,巯基化合物是由角蛋白酶中二硫键还原酶裂解角蛋白中的二硫键而形成的;硫化氢是由含巯基化合物或巯基氨基酸(半胱氨酸)在脱氢氧化酶作用下,脱氢、脱氨基而形成硫化氢( $H_2S$ );硫酸盐的形成分别是由  $H_2S$  或巯基化合物中的硫通过氧化酶逐步氧化的结果。综上所述,弗氏链霉菌 S-221 变种降解角蛋白的生化机制如图 3 所示。

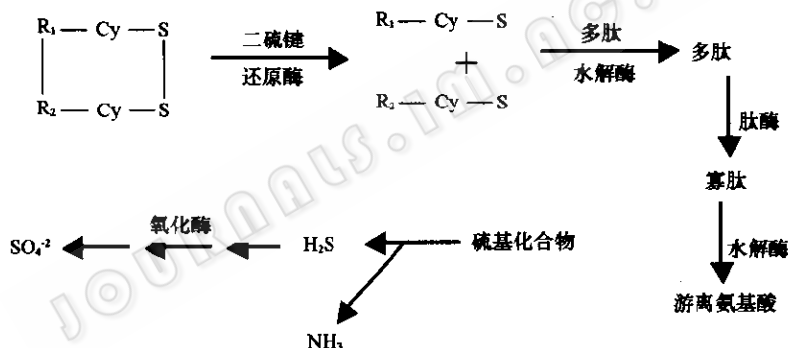


图 3 弗氏链霉菌 S-221 变种降解角蛋白的生化机制

### 参考文献

- [1] Shu W C, Haien M H. Biosci Biotech Biochem, 1995, 59 (12): 2239 ~ 2243.
- [2] Kunert J. Zeitschrift für Allg Microbiologic, 1973, 13 (6): 489 ~ 498.
- [3] Walter J, Nickson M. Biophys Acta, 1963, 77: 87 ~ 99.
- [4] 涂国全, 黎开金, 王睿勇, 等. 江西农业大学学报, 1994, 16 (1): 66 ~ 73.
- [5] 涂国全, 于 静. 江西农业大学学报, 1994, 16 (4): 399 ~ 403.
- [6] 沈 同. 生物化学. 北京: 高等教育出版社, 1981.