

紫外光影响食用菌中VD₂含量的研究进展

李 丽¹, 蒋景龙²

(1. 陕西理工学院维生素D生理与应用研究所, 陕西 汉中 723001;

2. 陕西理工学院生物科学与工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘 要: 维生素D (vitamin D, VD) 对人体健康至关重要, 它主要由VD原经紫外光照射转化而来。VD家族中最重要的成员是VD₂、VD₃。食用菌中含有丰富的VD₂原——麦角固醇, 经紫外光照射可转化为VD₂。本文从VD₂的光合成机理出发, 介绍不同生长方式的食用菌中麦角固醇和VD₂的含量以及紫外光影响食用菌中麦角固醇向VD₂转化的主要因素, 包括食用菌种类、紫外光的波长、照射剂量和时间、食用菌的照射部位和生长期及食用菌的含水量和温度等, 以期为提高食用菌的VD₂产率提供一定参考。

关键词: VD₂; 食用菌; 紫外光照射; 麦角固醇

A Review of Factors Affecting Vitamin D₂ Contents in Edible Fungi Exposed to Ultraviolet

LI Li¹, JIANG Jinglong²

(1. Vitamin D Research Institute, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. School of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Vitamin D, an essential compound for humans, is derived from provitamin D by ultraviolet irradiation. The most important members of the vitamin D family are vitamin D₂ and vitamin D₃. Edible fungi contain a high amount of provitamin D₂ (ergosterol), which can be converted to vitamin D₂ by ultraviolet irradiation. The contents of ergosterol and vitamin D₂ in different growth ways of edible fungi are outlined in this paper, beginning with the mechanism of vitamin D₂ formation from ergosterol. The emphasis is placed on discussing some major factors influencing the conversion of ergosterol to vitamin D₂ in edible fungi subjected to ultraviolet irradiation, including edible fungi species, bands of ultraviolet, irradiation dose and time, and irradiated parts, growth stage and moisture content of edible fungi, as well as reaction temperature, in order to provide a reference to increase the yield of vitamin D₂ in edible fungi under ultraviolet irradiation.

Key words: VD₂; edible fungi; ultraviolet irradiation; ergosterol

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 01-0273-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201501052

VD是人体生长发育不可缺少的一种类固醇激素, 其作为细胞核类固醇家族成员, 具有调节人体钙和磷代谢的经典作用^[1-3]及影响细胞增殖分化等的非经典作用^[4-5]。以往的研究普遍认为VD缺乏会导致婴儿的佝偻病、成人的软骨病和老年人的骨质疏松症等骨代谢性疾病^[6-8], 近年来, 越来越多的流行病学和实验室证据表明VD缺乏还是罹患癌症、自发性免疫疾病、传染病、心血管疾病和精神疾病等常见多发疾患的危险因素^[9-12]。然而, 高钙血症效应限制了VD₃类似物的治疗作用, VD₂类似物由于没有高钙血症效应有可能取代VD₃类似物。据2002年的统计, 世界每年消耗的VD₂可达1 800 t, 其中有70%~80%用于饲料添加, 中国每年食用和药用的需求量大约为100 t, 且大部分都来源于进口^[13]。随着人们

生活水平的提高和生活方式的改变, VD₂的需求量更是逐年增长。因此, 研究VD₂可能对未来的临床应用具有重要的意义。

食用菌营养丰富、风味独特, 在很多国家都被誉为佳肴, 而且它富含的多糖、多酚等生物活性物质具有抗氧化和降血糖等保健功能^[14-15]。同时, 食用菌中含有丰富的VD₂原——麦角固醇^[16-17], 在紫外光的照射下可转化为VD₂, 然而, 不同的转化条件下VD₂的产率有显著差异。本文概述紫外光 (ultraviolet, UV) 照射下影响食用菌中麦角固醇向VD₂转化的几个因素, 旨在为最大程度地提高食用菌中VD₂的含量提供基础资料。

收稿日期: 2014-03-12

基金项目: 陕西理工学院科研基金项目 (SLGQD13-11; SLGQD13 (2) -25)

作者简介: 李丽 (1985—), 女, 助理实验师, 硕士, 主要从事天然产物、维生素D生理与应用研究。E-mail: lilisense@126.com

1 VD₂的光化学合成

麦角固醇经紫外光照射可以转化为VD₂。但在转化过程中，除生成有活性的VD₂前体和VD₂外，还会生成多种无效价的同分异构体，如光甾醇和速甾醇等副产物^[18-19]（图1）。VD₂前体在自发热重排后转化为VD₂，VD₂经过度照射还会生成超甾醇等物质^[20]。几乎所有的光化学产物在过度光照时都会吸收光辐射进一步发生次级光化学反应，生成更为复杂的副产物，在波长更长的光照下甚至可能产生毒甾醇等有害物质，给分离提纯带来很大的困难。紫外光是电磁波谱中波长100~400 nm辐射的总称，分为长波紫外光（UV-A，315~400 nm），中波紫外光（UV-B，280~315 nm）和短波紫外光（UV-C，200~280 nm）。不同照射波长对麦角固醇的光转化影响不同，在UV-B波长范围内有利于生成VD₂前体，283~296 nm波长范围是VD₂光化学合成的最佳区域，波长小于280 nm的光易于生成速甾醇，而波长大于315 nm的光易于生成光甾醇^[19-20]。副产物多也是限制VD₂高产率和工业化规模生产的主要因素。

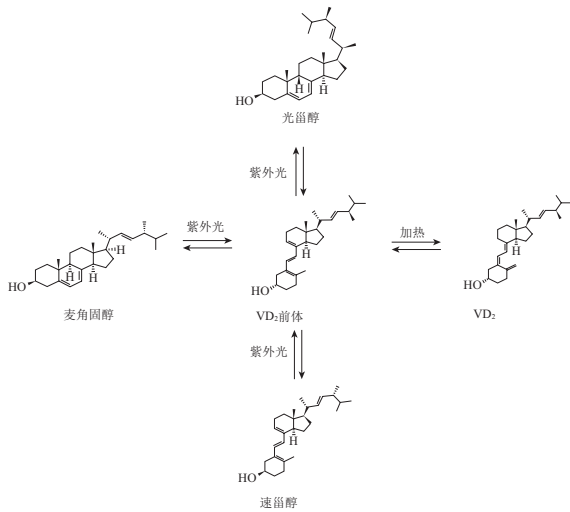


图1 麦角固醇紫外光转化示意图
Fig.1 Schematics of ultraviolet photolysis of ergosterol

2 食用菌中含有丰富的VD₂原——麦角固醇

VD₂仅存在于真菌界，植物界和动物界中几乎没有麦角固醇和VD₂。只有当植物发霉或者被酵母菌污染时才能发现很少量的麦角固醇和VD₂产生^[21-22]。早期研究表明，所有的甾醇都是在真菌中被发现的。在大多数食用菌中，麦角固醇的含量都很高^[23-27]。野生食用菌含天然VD₂，这也被大多数素食者接受。Mattila等^[28-30]研究发现，野生食用菌中有不同含量的VD₂（2.91~29.82 μg/100 g鲜样，4.7~194 μg/100 g

干样）（表1），而栽培食用菌中则基本不含VD₂（0.21 μg/100 g鲜样），这主要是由于栽培食用菌生长在黑暗环境中。同时该团队还采用气相色谱法（gas chromatography，GC）检测了几种栽培和野生食用菌中的甾醇含量，发现无论是栽培还是野生食用菌中麦角固醇的含量都很高，且栽培食用菌中麦角固醇的含量高于野生食用菌，麦角固醇是食用菌中含量最高的甾醇，含量最高达到食用菌干质量的0.6%~0.7%，是其他甾醇含量的10~40倍，占食用菌中所有甾醇含量的83%~89%。Phillips等^[31]分别用高效液相色谱（high performance liquid chromatography，HPLC）法和GC法检测了美国市售10种食用菌中VD₂和麦角固醇的含量（表1），发现这10种食用菌都含有丰富的麦角固醇（26.3~84.9 mg/100 g鲜样），而VD₂含量呈现不同的水平（0.06~28.1 mg/100 g鲜样），这可能与它们的生长环境（栽培或野生、是否受光照等）有关。可见，不管是野生还是栽培食用菌都富含麦角固醇，其经紫外光照射会发生一系列变化，转化为VD₂，是很好的VD₂来源。

表1 几种栽培和野生食用菌中麦角固醇和VD₂的含量^[27-31]
Table 1 Ergosterol and vitamin D₂ contents in several cultivated and wild edible fungi^[27-31]

生长方式	食用菌名称	拉丁学名	麦角固醇含量/ (mg/100 g干样)	麦角固醇含量/ (mg/100 g鲜样)	VD ₂ 含量/ (μg/100 g干样)	VD ₂ 含量/ (μg/100 g鲜样)
栽培型	双孢菇（白）	<i>Agaricus bisporus/white</i>	654	—	—	0.21
	双孢菇（褐）	<i>Agaricus bisporus/brown</i>	602	—	—	<0.02
	平菇	<i>Pleurotus ostreatus</i>	674	—	0.3	0.02
	香菇	<i>Lentinus edodes</i>	679	—	1	0.1
	鸡油菌	<i>Cantharellus cibarius</i>	304	—	84	12.8
野生型	管状鸡油菌	<i>Cantharellus tubaeformis</i>	377	—	194	29.82
	沼泽红菇	<i>Russula paludosa</i>	—	—	—	5.8
	牛肝菌	<i>Boletus edulis</i>	489	—	5	2.91
	乳菇	<i>Lactarius trivialis</i>	296	—	29	5.5
	双孢菇（白）	<i>Agaricus bisporus/white</i>	642	56.3	—	0.11
市售	金针菇	<i>Flammulina velutipes</i>	—	35.5	—	0.14
	香菇	<i>Lentinus edodes</i>	364	84.9	—	0.44
	灰树花	<i>Grifola frondosa</i>	—	79.2	—	28.1
	平菇	<i>Pleurotus ostreatus</i>	—	68.0	—	0.72
	双孢菇（棕）	<i>Agaricus bisporus/crimini</i>	—	61.4	—	0.06
	双孢菇（褐）	<i>Agaricus bisporus/portabella</i>	—	62.1	—	0.25
	鸡油菌	<i>Cantharellus cibarius</i>	23	46.3	—	5.30
	羊肚菌	<i>Morchella spp.</i>	—	26.3	—	5.15
	牛肝菌	<i>Boletus edulis</i>	400	—	—	—
	香菇口蘑	<i>Calocybe gambosa</i>	361	—	—	—

注：—，文献未报道。下同。

3 紫外光照射可提高食用菌中VD₂含量

近年来，有关紫外光照射提高食用菌VD₂含量的报道越来越多。Takamura等^[32]报道，经紫外光照射后，新鲜香菇中VD₂含量达到原来的2~3倍。日本《食品科学

工学会志》一篇文章报道称使用日本东芝制15 W杀菌灯（GL15，主波长254 nm），在照射高度为10 cm、室内温度为22~27 °C的条件下照射3 min，可使食用菌和酵母等VD₂的含量增加1 000 IU/g以上，照射10 min可使VD₂的量增加2 500 IU/g^[33]。日本研究人员发现，每朵香菇经紫外光照射后，其中VD的含量可达80 国际单位（IU），比未经照射时增加20 倍^[34]。可见，紫外光照射食用菌可增加VD₂的含量是毋庸置疑的，但同时也发现，转化条件不同，VD₂产率存在很大差别。

3.1 食用菌种类对VD₂产率的影响

Mau等^[35]报道，将新鲜的双孢菇、香菇和草菇用UV-B在12 °C环境中照射2 h后，双孢菇中VD₂含量从2.20 μg/g干样增加到12.48 μg/g干样，香菇和草菇中VD₂的含量都不及双孢菇中高。Sapozhnikova等^[36]用UV-B照射香菇、平菇和双孢菇后，发现其中VD₂含量最高的是双孢菇。Jasinghe等^[37]检测了紫外光照射后香菇、平菇、双孢菇和鲍鱼菇中VD₂的含量，结果发现平菇中含量最高，达到184 μg/g干样，双孢菇中含量最低（56.5 μg/g干样）。从以上数据可以看出，不同种类食用菌经紫外光照射后，其中VD₂含量明显不同，主要原因可能是不同食用菌中麦角固醇的含量不同，经紫外光照射后合成的VD₂含量也随之有多有少。由图1可知，选择麦角固醇含量高的香菇和双孢菇等VD₂产率应该会比较低。此外，食用菌中VD₂的产率并不是和其麦角固醇的含量成正比（图1），双孢菇中麦角固醇的含量最高（780 mg/100 g干样），其菌褶面向紫外光UV-A照射2 h后，VD₂含量却最低（12.5 μg/100 g干样）^[38]（表2）。由此可见，紫外光照射食用菌麦角固醇向VD₂转化受其他因素的影响很大。

表2 不同食用菌经紫外光照射前麦角固醇含量和照射后VD₂含量^[35,37-38]
Table 2 Ergosterol contents before UV irradiation and vitamin D₂ contents after exposed to UV of different edible fungi^[35,37-38]

食用菌名称	拉丁学名	麦角固醇含量/ (mg/100 g干样)	VD ₂ 含量/ (μg/100 g干样)
香菇	<i>Lentinus edodes</i>	—	53.9
平菇	<i>Pleurotus ostreatus</i>	—	184
鲍鱼菇	<i>Pleurotus abalonus</i>	—	80
双孢菇	<i>Agaricus bisporus</i>	—	57
双孢菇	<i>Agaricus bisporus</i>	780	13
金针菇	<i>Flammulina velutipes</i>	68	19
平菇	<i>Pleurotus ostreatus</i>	440	45
鲍鱼菇	<i>Pleurotus abalonus</i>	435	23
香菇	<i>Lentinus edodes</i>	605	23

3.2 紫外光波长对食用菌VD₂产率的影响

Mau等^[35]报道，将新鲜的双孢菇分别用UV-B和UV-C照射1 h后发现，双孢菇中VD₂含量均显著增加，且UV-B照射下的含量（8.51 μg/g）高于UV-C照射（6.00 μg/g）。Jasinghe等^[38]将新鲜的香菇、平菇、双孢

菇和鲍鱼菇分别用UV-A、UV-B和UV-C照射，结果发现，在不同波长紫外光的照射下，4 种蘑菇VD₂含量最高的都是在UV-B的照射下，UV-C次之，UV-A照射后，VD₂含量最低。可见，UV-B更有利于食用菌中麦角固醇向VD₂转化，这与VD₂的紫外光合成原理相符。

3.3 照射剂量对食用菌中VD₂产率的影响

2008年，Ko等^[39]对香菇和双孢菇的研究发现在同样条件下，蘑菇经不同剂量的紫外光照射后VD₂含量存在较大差异。紫外光照射剂量大，则蘑菇中VD₂含量高，反之亦然。而且随着UV剂量的增加，蘑菇中合成的VD₂的量也随之增加。研究同时发现，将蘑菇切成片后进行照射，在同样时间内VD₂的产量较照射整个蘑菇显著增加。原因是后者的紫外光照射只是在表面进行，而将蘑菇切成片后照射面积增加，麦角固醇向VD₂的转化就更充分。

3.4 照射时间对食用菌中VD₂产率的影响

表3 UV照射不同时间几种食用菌VD₂和麦角固醇含量^[35]
Table 3 Vitamin D₂ and ergosterol contents of several edible fungi exposed to UV for different durations^[35]

食用菌名称	拉丁学名	紫外光类型	照射时间/h	照射后VD ₂ 含量/ (μg/g干样)	照射后麦角固醇含量/ (μg/g干样)
双孢菇	<i>Agaricus bisporus</i>	UV-C	0	2.20	273.97
			0.5	4.49	165.62
			1	6.00	91.47
			2	7.30	33.93
大肥菇	<i>Agaricus bitorquis</i>	UV-C	0	4.01	50.78
			0.5	4.59	43.53
			1	5.62	78.57
			2	5.32	254.88
双孢菇	<i>Agaricus bisporus</i>	UV-B	0	2.20	273.97
			0.5	5.74	21.61
			1	8.51	40.39
			2	12.48	56.69
香菇	<i>Lentinus edodes</i>	UV-B	0	2.16	297.09
			0.5	3.71	316.61
			1	4.69	373.15
			2	6.58	286.16
草菇	<i>Volvariella volvacea</i>	UV-B	0	3.86	185.89
			0.5	4.98	96.92
			1	6.28	233.56
			2	7.58	215.81

Mau等^[35]报道，将新鲜的双孢菇和大肥菇在12 °C环境中分别用UV-C照射0、0.5、1、2 h后，发现双孢菇中VD₂含量随着照射时间的延长持续增加，麦角固醇含量相应地持续降低。和双孢菇不同的是，大肥菇照射1 h后，VD₂含量趋于稳定，麦角固醇含量则在0~0.5 h内逐渐下降，0.5~2 h内呈上升趋势。将新鲜的双孢菇、香菇和草菇在12 °C环境中分别用UV-B照射0、0.5、1、2 h后发现，随着照射时间延长，这3 种食用菌中VD₂含

量都不同程度持续升高，麦角固醇含量则呈不同水平的变化（表3）。Krings等^[40]将新鲜的平菇（*Pleurotus ostreatus*）通过UV-B（310~320 nm）照射10~60 min，其中VD₂含量持续上升，从未经照射时不含VD₂到10 min时VD₂含量为6 mg/100 g干样，60 min时达到15 mg/100 g干样。由表3可知，最适合的照射时间为1 h，1 h后食用菌中VD₂含量增加不多或趋于稳定，甚至下降。

3.5 食用菌照射部位对VD₂产率的影响

Jasinghe等^[38]研究发现，相同条件下相同剂量的UV-A照射后，香菇菌褶VD₂含量高于菌盖。Krings等^[40]用UV-B（310~320 nm）持续照射平菇60 min，发现菌褶VD₂含量是菌盖的2倍多。Ko等^[39]研究发现，相同条件下相同剂量的UV-B处理后，香菇菌褶VD₂含量最高，其次是菌柄，菌盖VD₂含量最低（表4）。出现这一结果是由于香菇不同部分的麦角固醇含量不同，其中菌褶部分麦角固醇含量最高。可见食用菌受紫外光照射部位的选择很重要，菌褶麦角固醇含量最高，大约是菌盖的2倍，如果将菌褶部分经UV-B照射后，其中富含的麦角固醇转化的VD₂含量就会增加。

表4 几种食用菌不同部位照射前麦角固醇含量和照射后VD₂含量^[38,40]
Table 4 Ergosterol contents before UV irradiation and vitamin D₂ contents after exposed to UV of different parts of several edible fungi^[38,40]

食用菌名称	拉丁学名	食用菌部位	麦角固醇含量/ (mg/g 干样)	照射后VD ₂ 含量/ (μg/g 干样)
香菇	<i>Lentinus edodes</i>	菌盖	—	37
		菌褶	—	106
		菌柄	—	69
双孢菇	<i>Agaricus bisporus</i>	菌盖	—	13
		菌褶	—	17
香菇	<i>Lentinus edodes</i>	菌盖	5	5
		菌褶	10	23
		菌柄	3	—
鸡油菌	<i>Cantharellus cibarius</i>	菌盖	140	102
		菌褶	278	115
		菌柄	100	24
管状鸡油菌	<i>Cantharellus tubaeformis</i>	菌盖	367	337
		菌褶	439	104
		菌柄	345	187
牛肝菌	<i>Boletus edulis</i>	菌盖	589	22
		菌褶	549	2
		菌柄	444	2
乳菇	<i>Lactarius trivialis</i>	菌盖	335	53
		菌褶	346	6
		菌柄	235	7

3.6 食用菌的生长期对VD₂产率的影响

胡彬彬等^[41]用UV-B分别照射不同生长阶段的鸡腿菇，采用HPLC法检测其中VD₂的含量。结果发现，未经UV-B照射时，菇蕾期、成熟前期和成熟期的鸡腿菇菌盖中均未检测到VD₂，但在各时期的鸡腿菇菌柄中VD₂含量

较高。其中成熟前期的VD₂含量达3.473 1 μg/g。UV-B照射不同时间后，鸡腿菇的菌柄和菌盖中的VD₂含量均显著增加，其中成熟前期的菌盖和菌柄中含量最高，分别为23.309 3、22.858 5 μg/g。这表明食用菌的发育阶段对VD₂含量影响也很大，选择成熟前期的食用菌经UV-B处理后，其中VD₂含量更高一些。其他有关食用菌不同生长阶段VD₂含量的研究尚未见报道。

3.7 食用菌含水量和反应温度对VD₂产率的影响

Vayalil等^[42]报道，紫外光照射会导致气体氧化，合成的VD₂也会光解。Perera等^[43]报道，麦角固醇向VD₂转化效率最高的食用菌水分含量是70%~80%。Jasinghe等^[37-38]将新鲜的香菇、平菇、双孢菇和鲍鱼菇用不同波长的紫外光照射1 h，结果发现不同波长的紫外光照射下，在温度为35 ℃，食用菌水分含量为80%时VD₂产率最高，可能和紫外光照射导致VD₂光解一样，在其他温度下会导致热应力、细胞死亡和褐色素形成等，从而降低转化率，也推测可能是由于食用菌水分含量过高时，则其中麦角固醇的浓度变低，从而降低转化率；而食用菌水分含量过低时，组织的比表面积增加，会导致VD₂氧化。由于食用菌本身水分含量高，所以水分含量对紫外光处理麦角固醇向VD₂转化的影响很大。

4 结 语

近年来，VD缺乏或不足的发生率越来越高，全球有近10亿人VD缺乏或不足。富含VD的食物并不多，如果可以将普通农产品转变为一种独特的VD培植源，那么给成长中或者刚采摘的食用菌进行紫外光照射将是非常廉价而且容易办到的事情，这对素食者来说是一个好消息，食用菌也将成为人们补充VD的重要来源。紫外光照射后食用菌中VD₂的安全性、生物活性等在动物体内也得到证实^[44]。希望紫外光照射在食用菌中的应用得到不断发展，广泛应用于药物、食品和饲料等多个领域。

参考文献：

[1] DELUCA H F. History of the discovery of vitamin D and its active metabolites[J]. BoneKey Reports, 2014, 3: 479. doi: 10.1038/bonekey.2013.213.

[2] GALLAGHER J C. Vitamin D and aging[J]. Endocrinology and Metabolism Clinics of North America, 2013, 42(2): 319-332.

[3] GULSETH L, GJELSTAD M F, BIRKELAND I, et al. Vitamin D and the metabolic syndrome[J]. Current Vascular Pharmacology, 2013, 11(6): 968-984.

[4] LEYSSENS C, VERLINDEN L, VERSTUYF A. The future of vitamin D analogs[J]. Frontiers in Physiology, 2014, 5: 122. doi: 10.3389/fphys.2014.00122.

[5] GIRGIS C M, CLIFTON-BLIGH R J, MOKBEL N, et al. Vitamin D signaling regulates proliferation, differentiation, and myotube size in C2C12 skeletal muscle cells[J]. Endocrinology, 2014, 155(2): 347-357.

- [6] CURTIS E M, MOON R J, DENNISON E M, et al. Prenatal calcium and vitamin D intake, and bone mass in later life[J]. *Current Osteoporosis Reports*, 2014, 12(2): 194-204.
- [7] ROUX C, BINKLEY N, BOONEN S, et al. Vitamin D status and bone mineral density changes during alendronate treatment in postmenopausal osteoporosis[J]. *Calcified Tissue International*, 2014, 94(2): 153-157.
- [8] O'RIORDAN J L H, BIJVOET O L M. Rickets before the discovery of vitamin D[J]. *BoneKey Reports*, 2014, 3: 478. doi: 10.1038/bonekey.2013.212.
- [9] CHRISTAKOS S, DELUCA H F. Minireview: vitamin D: is there a role in extraskeletal health?[J]. *Endocrinology*, 2011, 152(8): 1930-2936.
- [10] HOLICK M F. Vitamin D: extraskeletal health[J]. *Rheumatic Disease Clinics of North America*, 2012, 38(1): 141-160.
- [11] BRENNER H, YIN L, RAUM E, et al. Vitamin D and cancer: an overview of epidemiological studies[J]. *Anticancer Research*, 2011, 31(4): 1501-1502.
- [12] BONT L. Vitamin D, bronchiolitis and asthma[J]. *Paediatric Respiratory Reviews*, 2013, 14(Suppl 2): 36. doi: 10.1016/S1526-0542(13)70032-0.
- [13] 齐继成. 维生素D₂产销概况[J]. *中国制药信息*, 2002, 18(8): 30-32.
- [14] 王峰, 陶明焯, 程光宇, 等. 4种食用菌提取物自由基清除作用及降血糖作用的研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(21): 343-347.
- [15] 刘芳, 陈贵堂, 胡秋辉. 金针菇锌多糖分离纯化及其结构特征[J]. *食品科学*, 2014, 35(5): 1-7.
- [16] 杨宁宁, 黄圣卓, 马青云. 远东疣柄牛肝菌化学成分分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(6): 78-82.
- [17] HUANG Buhan, YUNG Kunghing, CHANG Shuting. The sterol composition of *Volvariella volvacea* and other edible mushrooms[J]. *Mycologia*, 1985, 77(6): 959-963.
- [18] 苗景赞, 邓利, 谭天伟. 麦角固醇连续光转化生产维生素D₂新工艺[J]. *北京化工大学学报*, 2003, 30(3): 39-41.
- [19] 韩秋漪, 张善端. 用于维生素D光化学合成的紫外光源[C]//上海照明科技及应用趋势论坛论文集. 上海: 上海照明电器行业协会, 2012: 152-156.
- [20] 张焱, 程学新, 刘颀颀, 等. 光化学合成维生素D[J]. *精细与专用化学品*, 2005, 13(5): 5-7.
- [21] YOUNG J C, GAMES D E. Supercritical fluid extraction and supercritical fluid chromatography of the fungal metabolite ergosterol[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1993, 41(4): 577-581.
- [22] POREP J U, WALTER R, KORTEKAMP A, et al. Ergosterol as an objective indicator for grape rot and fungal biomass in grapes[J]. *Food Control*, 2014, 37: 77-84.
- [23] BARREIRA J C M, OLIVEIRA M B P P, FERREIRA I C F R. Development of a novel methodology for the analysis of ergosterol in mushrooms[J]. *Food Analytical Methods*, 2014, 7(1): 217-223.
- [24] 杨帅, 李开通, 张艺轩, 等. 点柄乳牛肝菌中麦角甾醇的分离鉴定及含量测定[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(9): 131-134.
- [25] 易承学, 童珊珊, 徐希明, 等. HPLC法同时测定金针菇中麦角甾醇和22,23-二氢麦角甾醇的含量[J]. *江苏大学学报: 医学版*, 2014, 24(2): 126-128.
- [26] KALARAS M D, BEELMAN R B. Vitamin D₂ enrichment in fresh mushrooms using pulsed UV light[DB/OL]. [2014-01-15]. <http://foodscience.psu.edu/directory/rbb6/VitaminDEnrichment.pdf>.
- [27] VILLARES A, MATEO-VIVARACHO L, GARCÍA-LAFUENTE A, et al. Storage temperature and UV-irradiation influence on the ergosterol content in edible mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147: 252-256.
- [28] MATTILA P, PIIRONEN V, UUSI-RAUVA E, et al. Vitamin D contents in edible mushrooms[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1994, 42(11): 2449-2453.
- [29] MATTILA P, KONKO K, EUROLA M, et al. Contents of vitamins, mineral elements and some phenolic compounds in cultivated mushrooms[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(5): 2343-2348.
- [30] MATTILA P, LAMPI A M, RONKAINEN R, et al. Sterol and vitamin D₂ contents in some wild and cultivated mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2002, 76(3): 293-298.
- [31] PHILLIPS K M, RUGGIO D M, HORST R L, et al. Vitamin D and sterol composition of 10 types of mushrooms from retail suppliers in the United States[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(14): 7841-7853.
- [32] TAKAMURA K, HOSHINO H. Vitamin D₂ of shiitake mushrooms[J]. *New Food Industry*, 1995, 37(8): 33-39.
- [33] 李三星. 紫外线照射含有麦角固醇的物质能增加VD₂的量[J]. 王敏, 译. *日本食品科学工学会志*, 1995, 42(4): 262-267.
- [34] 浙讯. 香菇经紫外线照射可增加维生素D含量[J]. *中国食用菌*, 2001, 20(2): 48.
- [35] MAU J L, CHEN P R, YANG J H. Ultraviolet irradiation increased vitamin D₂ content in edible mushrooms[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46(12): 5269-5272.
- [36] SAPOZHNIKOVA Y, BYRDWELL W C, LOBATO A, et al. Effects of UV-B radiation levels on concentrations of phytosterol, ergothioneine, and polyphenolic compounds in mushroom powders used as dietary supplements[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(14): 3034-3042.
- [37] JASINGHE V J, PERERA C O. Ultraviolet irradiation: the generator of vitamin D₂ in edible mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2006, 95(4): 638-643.
- [38] JASINGHE V J, PERERA C O. Distribution of ergosterol in different tissues of mushrooms and its effect on the conversion of ergosterol to vitamin D₂ by UV irradiation [J]. *Food Chemistry*, 2005, 92: 541-546.
- [39] KO J A, LEE B H, LEE J S, et al. Effect of UV-B exposure on the concentration of vitamin D₂ in sliced shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) and white button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(10): 3671-3674.
- [40] KRINGS U, BERGER R G. Dynamics of sterols and fatty acids during UV-B treatment of oyster mushroom[J]. *Food Chemistry*, 2014, 149: 10-14.
- [41] 胡彬彬, 武忠伟, 王振河, 等. 紫外辐照对鸡腿菇中维生素D₂含量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(13): 2758-2760.
- [42] VAYALIL P K, ELMETS C A, KATYAR S K. Treatment of green tea polyphenols in hydrophilic cream prevents UVB-induced oxidation of lipids and proteins, depletion of antioxidant enzymes and phosphorylation of MAPK proteins in SKH-1 hairless mouse skin[J]. *Carcinogenesis*, 2003, 24: 927-936.
- [43] PERERA C O, JASINGHE V J, NG F L, et al. The effect of moisture content on the conversion of ergosterol to vitamin D in shiitake mushrooms[J]. *Drying Technology*, 2003, 21: 1093-1101.
- [44] CALVO M S, BABU U S, GARTHOFF L H, et al. Vitamin D₂ from light-exposed edible mushrooms is safe, bioavailable and effectively supports bone growth in rats[J]. *Osteoporosis International*, 2013, 24(1): 197-207.