

# 用乙醇注入法包封 EGCG 的研究

刘志军<sup>1</sup>, 万鑫<sup>1</sup>, 李志义<sup>1</sup>, 刘凤霞<sup>1</sup>, 李士生<sup>2</sup>, 魏炜<sup>1\*</sup>

(1.大连理工大学流体与粉体工程研究设计所, 辽宁大连 116024;

2.大连育明高级中学, 辽宁大连 116023)

**摘要:**以卵磷脂和胆固醇为壁材,采用乙醇注入法制备 EGCG(表没食子儿茶素没食子酸酯)脂质体。系统考察了制备过程中壁材质量比、乙醇加入量、EGCG 添加量、搅拌温度、吐温 80 用量、搅拌时间对脂质体粒径和包封率的影响,并通过正交实验分析得出最优组合。采用纳米粒径分析仪、紫外分光光度计等对制备的脂质体微胶囊进行表征。结果表明,当胆固醇:卵磷脂质量比为 1:5、EGCG 质量分数为 0.06%、吐温 80 质量分数为 0、乙醇体积分数为 14%、搅拌温度为 40℃、搅拌速度为 540 r/min 时,脂质体粒径小于 100 nm,包封率大于 90%。通过实验优化,能够得到小粒径、高包封率的脂质体,提高了 EGCG 生物利用度。

**关键词:**EGCG;微胶囊;乙醇注入法;脂质体

中图分类号:TQ917;TS201.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0184-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.034

## Study on encapsulation of EGCG by ethanol injection

LIU Zhi-jun<sup>1</sup>, WAN Xin<sup>1</sup>, LI Zhi-yi<sup>1</sup>, LIU Feng-xia<sup>1</sup>, LI Shi-sheng<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>1\*</sup>

(1.Research & Design Institute of Fluid and Powder Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, China; 2.Dalian Yuming Senior High School, Dalian 116023, China)

**Abstract:** EGCG (epigallocatechin gallate) liposomes are prepared via ethanol injection with lecithin and cholesterol as wall materials. The influences of the mass ratio of wall materials, the dosage of ethanol, the dosage of EGCG, the stirring temperature, the usage of Tween 80 and the stirring time on the particle size and the encapsulation rate of liposomes are evaluated systematically, and the optimal combination is obtained through orthogonal experimental analysis. The prepared liposome microcapsules are characterized by means of nanometer particle size analyzer and ultraviolet spectrophotometer. Results show that the particle size of liposomes is less than 100 nm and the encapsulation rate exceeds 90% when the mass ratio of cholesterol to lecithin is 1:5, the mass fraction of EGCG is 0.06%, the mass fraction of Tween 80 is 0, the volume fraction of ethanol is 14%, the stirring temperature is 40℃ and the stirring speed is 540 r·min<sup>-1</sup>. Through experimental optimization, the liposomes with small particle size and high encapsulation rate can be obtained, and the bioavailability of EGCG can be improved.

**Key words:** EGCG; microcapsule; ethanol injection method; liposome

表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)作为儿茶素含量最高的一种水溶性活性成分,已有很多研究表明具备多种健康有益的生物活性,约占鲜茶叶儿茶素总量的 32%~75%<sup>[1-2]</sup>。EGCG 分子包含 3 个芳香环、1 个吡喃环,并带有 8 个酚羟基,这种化学结构使 EGCG 具有很强的抗氧化能力,功能特性也优于其他多酚类物质<sup>[3-5]</sup>。也有研究表明 EGCG 在抗炎、抗癌及心血管疾病治疗方面等有重要作用<sup>[6-8]</sup>。但是 EGCG 易受温度、氧气含量、浓度以及 pH 等因素影响而被氧化,这加速了它们在长期储存过程中的降解<sup>[9]</sup>,且 EGCG 具有极高的亲水性和低脂溶性,难以被细胞吸收,生物利用率低。所以要对 EGCG 进行保护,提高其生物利用度<sup>[6]</sup>。EGCG 保护方法有金属纳米颗粒载体法<sup>[10]</sup>、水凝胶递送体系<sup>[11]</sup>、脂质体包埋

法<sup>[12]</sup>和分子修饰法<sup>[13-15]</sup>等。其中脂质体包埋法因制备工艺比较简单、能够增强 EGCG 的脂溶性、提高生物利用度等优点,被广泛关注。

脂质体是磷脂分散在水中自然形成多层囊泡,每层均为脂质双分子层,囊泡中央和各层之间被水相隔开<sup>[16]</sup>。由于这种特殊的脂质结构,很容易与肠黏膜细胞融合,使得被包裹的营养物质很容易进入体内<sup>[17]</sup>。目前 EGCG 脂质体的制备方法主要有薄膜水化法、逆向蒸发法、乙醇注入法等。Chen 等<sup>[18]</sup>采用薄膜水化法制备脂质体来包载 EGCG 和槲皮素,EGCG 包封率为(61.73±2.55)%;Istencič 等<sup>[19]</sup>以磷脂为主要原料通过逆相蒸发法制备了负载 EGCG 的脂质体。但是薄膜分散法制备的茶多酚脂质体包封率不高;逆相蒸发法需要用到有机溶剂,可能会造成污染;而乙醇注入法操作简单,比较安全可

收稿日期:2024-03-11;修回日期:2024-08-05

作者简介:刘志军(1969-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为纳米材料和微胶囊包覆,liuzj@dlut.edu.cn;魏炜(1978-),女,博士,副教授,研究方向为抗氧化性物质研究与保护,通讯联系人,hjweiwei@dlut.edu.cn。

靠。马宁等<sup>[20]</sup>使用乙醇注入法制备茶多酚脂质体,得出最优条件下茶多酚脂质体包封率达 78.10%,粒径分布于 400~1 000 nm。

目前关于 EGCG 脂质体的研究中,对工艺参数的考察较少,粒径较大,包封率较小,但是较小的粒径和高的包封率有助于提高生物利用度<sup>[21]</sup>。基于此,本文中通过探究和优化乙醇注入法制备 EGCG 脂质体的各项因素,以粒径和包封率为指标对所制备的 EGCG 脂质体的质量进行评价,为制备 EGCG 脂质体提供了一定理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

EGCG 来自大连医诺生物股份有限公司;卵磷脂(>90%)、胆固醇(>95%),来自麦克林;无水乙醇( $\geq 99.7\%$ ),天津市富宇精细化工有限公司;吐温 80,国药集团化学试剂有限公司;去离子水,大连理工大学。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 脂质体制备

将一定质量的吐温 80 与胆固醇、卵磷脂按比例混合,并在固定温度下溶解在一定体积含有预定浓度 EGCG 的无水乙醇中。用注射器将所得溶液缓慢均匀地注入装有去离子水的烧杯中,用磁力搅拌器持续温和搅拌一定时间。然后通过 0.1 MPa 下减压蒸发除去无水乙醇。

#### 1.2.2 EGCG 测量方法

使用紫外分光光度计(UV-1800SPC)建立 EGCG 标准曲线,以吸光值  $Y$  为纵坐标,EGCG 质量浓度  $X$  为横坐标进行线性回归,绘制标准曲线。采用比色法测定吸光值,代入标准曲线即得相应 EGCG 浓度。

#### 1.2.3 粒径和 PDI、Zeta 电位分析

测试采用马尔文 zs90 纳米粒度分析仪,温度设置在 25℃,设定角度为 90°,平衡时间 2 min 的条件下进行,将制备的 EGCG 脂质体加入到样品池中,稀释至透光,放入仪器中进行测量,每个样品平行测定 3 次。

#### 1.2.4 包封率计算

采用超速离心法和过滤法联用,分离包裹 EGCG 的脂质体与游离的 EGCG,分别测定游离 EGCG 质量浓度  $C_1$  和未形成脂质体前加入 EGCG 的总质量浓度  $C_2$ ,按如下公式计算 EGCG 脂质体的包封率( $EE$ ):

$$EE = [(C_2 - C_1) / C_2] \times 100\%$$

### 1.2.5 正交实验和极差分析

根据单因素实验初步结果,设计了 6 因素 5 水平的正交实验表,并进行极差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 EGCG 标准曲线

使用紫外分光光度计,以吸光值  $Y$  为纵坐标,EGCG 质量浓度  $X$  为横坐标建立了 EGCG 紫外标准曲线如图 1 所示,回归方程为  $Y = 0.0249X - 0.0138$ ,  $R_2 = 0.9998$ 。

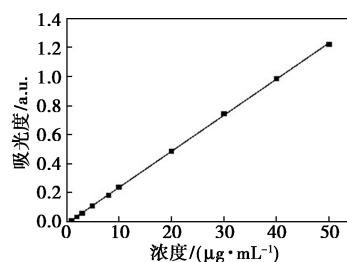


图 1 EGCG 紫外标准曲线

### 2.2 粒径、PDI 和包封率分析

#### 2.2.1 壁材比例的影响

胆固醇的添加可以增强脂质双分子排列的紧密程度,增加刚性,降低通透性,从而起到稳定脂质膜和减少渗漏的作用,但过量的添加使得膜的形成困难,制备的脂质体不够稳定<sup>[22]</sup>。因此,实验首先对所用卵磷脂与胆固醇的质量比进行考察,由图 2 可以看出,随着胆固醇和卵磷脂比值的减小,脂质体粒径先减小后增大,在 1:3 时粒径达到最小。对包封率的影响如图 3 所示。随着胆固醇和卵磷脂的比值

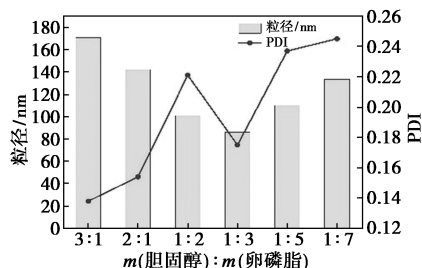


图 2 壁材比例对脂质体粒径和 PDI 的影响

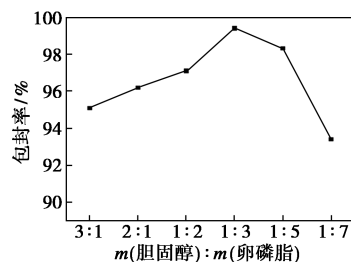


图 3 壁材比例对脂质体包封率的影响

减小,包封率先增加后减少,在 1:3 时,包封率达到最大,这可能归因于胆固醇在双层膜中黏合泄漏空间的能力,但当胆固醇超过一定水平,会破坏双分子层结构,使包封率降低<sup>[22]</sup>。

### 2.2.2 EGCG 添加量的影响

有限体积的脂质体囊泡只能包埋一定量的 EGCG,过量的 EGCG 还会影响脂质体的形成<sup>[23]</sup>。由图 4 可知,在 EGCG 质量分数为 0.03% 时粒径最小。EGCG 的添加量也会影响脂质体的包封率,从而影响 EGCG 的利用度。由图 5 可知,随着 EGCG 质量增加,包封率先增大后减小,在 0.16% 时包封率达到最大。

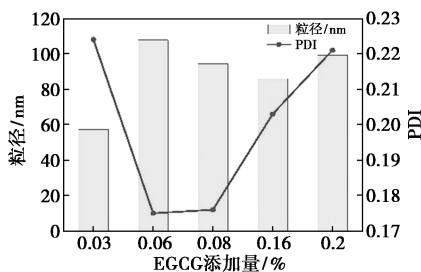


图 4 EGCG 质量对脂质体粒径和 PDI 的影响

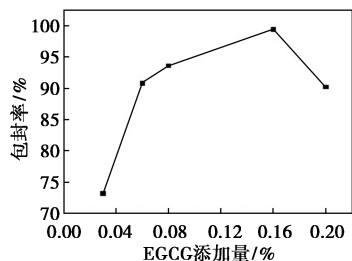


图 5 EGCG 质量对脂质体包封率的影响

### 2.2.3 吐温 80 用量的影响

吐温 80 可以与胆固醇分子的联结更紧密,使制备的脂质体更稳定<sup>[24]</sup>。由图 6 可知,吐温 80 质量分数为 0.2% 时粒径达到最小。这是因为吐温 80 起到降低表面张力的作用,能够降低脂质体颗粒曲率,使粒径减小<sup>[25]</sup>。由图 7 可知,随着吐温 80 质量增

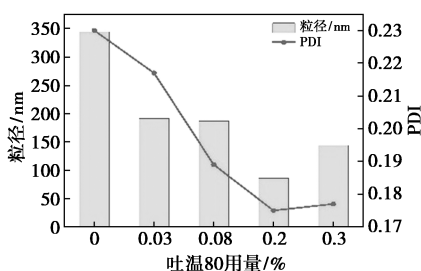


图 6 吐温质量对脂质体粒径和 PDI 的影响

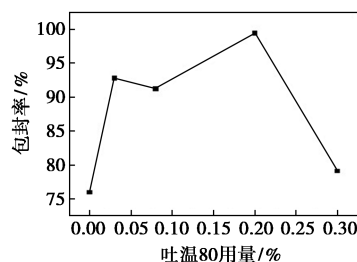


图 7 吐温质量对脂质体包封率的影响

加,脂质体包封率先增加后减小,在 0.2% 时包封率达到最大。

### 2.2.4 乙醇加入量的影响

乙醇的加入量会影响搅拌时脂质浓度的大小,进而影响脂质体的粒径和包封率,脂质体分散体中的最终脂质浓度取决于制备过程中的水化体积<sup>[26]</sup>。实验中选用不同的乙醇体积分数,控制壁材、EGCG 添加、吐温 80 用量等条件不变制备样品,对其粒径和包封率进行比较。由图 8 可知,随着乙醇体积增加,脂质体粒径先减小后增大最后减小,乙醇体积分数为 6% 时粒径达到最小。由图 9 可知,在乙醇体积分数为 6% 时包封率达到最大。

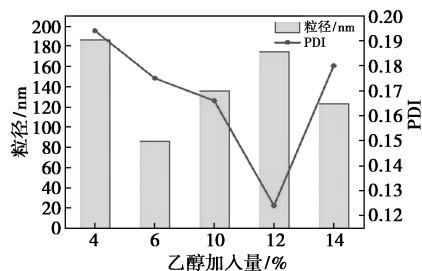


图 8 乙醇体积对脂质体粒径和 PDI 的影响

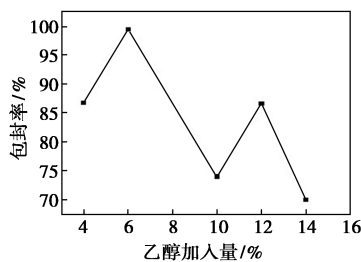


图 9 乙醇体积对脂质体包封率的影响

### 2.2.5 搅拌温度的影响

搅拌温度会影响脂质体的形成,是脂质体形成的关键因素之一<sup>[27]</sup>。实验中选用不同的搅拌温度,控制壁材、EGCG 添加量、吐温 80 用量以及乙醇体积分数等条件不变制备样品,对其粒径和包封率进行比较。由图 10 可知,随着搅拌温度增加,脂质体粒径先减小后增大。在 60℃ 时粒径达到最小。从

图 11 可以看出,在搅拌温度为 60℃ 时,EGCG 脂质体的包封率最高。

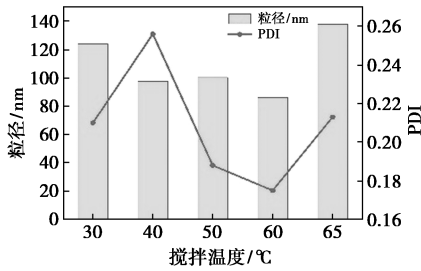


图 10 搅拌温度对脂质体粒径和 PDI 的影响

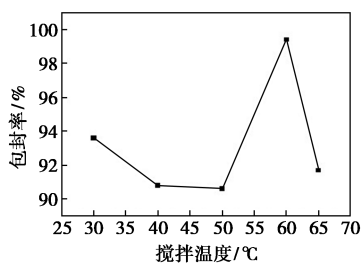


图 11 搅拌温度对脂质体包封率的影响

### 2.2.6 搅拌速度的影响

搅拌速度会影响脂质体的完整性和大小。实验中选用不同的搅拌速度,对脂质体的粒径和包封率进行考察。由图 12 可知,随着搅拌速度的增加,脂质体粒径先减小后增大,在 320 r/min 时粒径达到最小。由图 13 可知,随着搅拌速度的增加,脂质体包封率先增大后减小,在 160 r/min 时包封率达到最大。

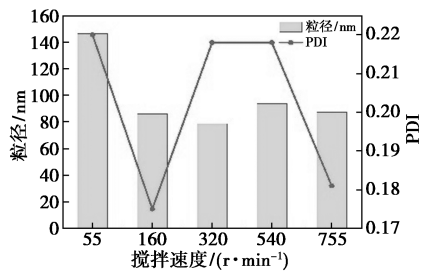


图 12 搅拌速度对脂质体粒径和 PDI 的影响

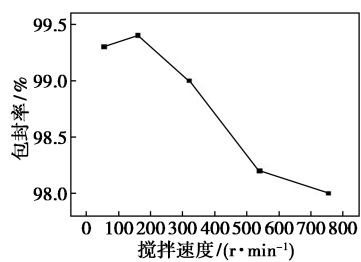


图 13 搅拌速度对脂质体包封率的影响

## 2.3 正交实验分析

### 2.3.1 正交实验设计与实验结果

根据单因素实验初步结果,设计了 6 因素 5 水平正交实验表,以壁材比(A)、EGCG 添加量(B)、吐温 80 用量(C)、乙醇加入量(D)、搅拌温度(E)、搅拌速度(F)为考察因素,以粒径和包封率为评价指标,进行极差分析,从而优化 EGCG 脂质体的制备工艺。正交设计与实验结果见表 1、表 2,极差分析见表 3、表 4。

表 1 正交实验设计因素水平表

水平	A/(m:m)	B/%	C/%	D/%	E/℃	F/(r·min <sup>-1</sup> )
1	3:1	0.03	0	4	30	55
2	2:1	0.06	0.03	6	40	160
3	1:2	0.08	0.08	10	50	320
4	1:3	0.16	0.20	12	60	540
5	1:5	0.20	0.30	14	65	755

表 2 正交实验结果

编号	A	B	C	D	E	F	粒径/nm	包封率/%
1	1	1	1	1	1	1	209.50	98.27
2	1	2	3	4	5	2	127.10	95.73
3	1	3	5	2	4	3	157.70	92.50
4	1	4	2	5	3	4	129.10	99.46
5	1	5	4	3	2	5	145.00	99.55
6	2	1	5	4	3	5	205.50	93.20
7	2	2	2	2	2	1	138.10	98.60
8	2	3	4	5	1	2	155.40	94.70
9	2	4	1	3	5	3	158.30	99.45
10	2	5	3	1	4	4	117.00	99.20
11	3	1	4	2	5	4	60.65	95.80
12	3	2	1	5	4	5	87.24	99.05
13	3	3	3	3	3	1	142.80	99.34
14	3	4	5	1	2	2	108.30	99.43
15	3	5	2	4	1	3	124.80	99.54
16	4	1	3	5	2	3	63.71	91.72
17	4	2	5	3	1	4	37.62	93.36
18	4	3	2	1	5	5	253.10	98.75
19	4	4	4	4	4	1	159.70	98.64
20	4	5	1	2	3	2	116.10	99.16
21	5	1	2	3	4	2	81.50	91.12
22	5	2	4	1	3	3	123.30	93.47
23	5	3	1	4	2	4	91.76	98.59
24	5	4	3	2	1	5	122.80	98.42
25	5	5	5	5	5	1	71.92	98.89

表 3 粒径极差分析结果

项	水平	A	B	C	D	E	F
K 值	1	768.40	620.86	662.90	811.20	650.12	722.02
	2	774.30	513.36	726.60	595.35	546.87	588.40
	3	523.79	800.76	573.41	565.22	716.80	627.81
	4	630.23	678.20	644.05	708.86	603.14	436.13
	5	491.28	574.82	581.04	507.37	671.07	813.64
K <sub>avg</sub> 值	1	153.68	124.17	132.58	162.24	130.02	144.40
	2	154.86	102.67	145.32	119.07	109.37	117.68
	3	104.76	160.15	114.68	113.04	143.36	125.56
	4	126.05	135.64	128.81	141.77	120.63	87.23
	5	98.26	114.96	116.21	101.47	134.21	162.73
最佳水平		5.00	2.00	3.00	5.00	2.00	4.00
R		56.60	57.48	30.64	60.77	33.99	75.50

表 4 包封率极差分析结果

项	水平	A	B	C	D	E	F
K 值	1	485.51	470.11	494.52	489.12	484.29	493.74
	2	485.15	480.21	487.47	484.48	487.89	480.14
	3	493.16	483.88	484.41	482.82	484.63	476.68
	4	481.63	495.40	482.16	485.70	480.51	486.41
	5	480.49	496.34	477.38	483.82	488.62	488.97
K <sub>avg</sub> 值	1	97.10	94.02	98.90	97.82	96.86	98.75
	2	97.03	96.04	97.49	96.90	97.58	96.03
	3	98.63	96.78	96.88	96.56	96.93	95.34
	4	96.33	99.08	96.43	97.14	96.10	97.28
	5	96.10	99.27	95.48	96.76	97.72	97.79
最佳水平		3.00	5.00	1.00	1.00	5.00	1.00
R		2.53	5.25	3.43	1.26	1.62	3.41

### 2.3.2 极差分析

极差  $R$  越大,说明因素的水平变化对实验结果的影响越大,从表 3 可以看出,影响粒径的因素主次顺序为  $F$ 、 $D$ 、 $B$ 、 $A$ 、 $E$ 、 $C$ ,相应因素的最优水平为  $A_5$ 、 $B_2$ 、 $C_3$ 、 $D_5$ 、 $E_2$ 、 $F_4$ ;从表 4 可以看出,影响包封率的因素主次顺序为  $B$ 、 $C$ 、 $F$ 、 $A$ 、 $E$ 、 $D$ ,相应因素的最优水平为  $A_3$ 、 $B_5$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_5$ 、 $F_1$ 。最优水平不一致,综合分析  $E$ 、 $C$  为粒径不重要因素, $E$ 、 $D$  为包封率指标不重要因素,且  $E$  对粒径影响更大,故其优化水平为  $C_1$ 、 $D_5$ 、 $E_2$ , $A$  为两者第 4 因素,选择  $A_5$  或  $A_3$ ,对比  $A_5$  与  $A_3$ ,包封率变化幅度较小,粒径变化幅度较大,故选  $A_5$  更合适,同理选择  $B_2$ ,而  $F$  为粒径主要因素、包封率次要因素,故选择  $F_4$ 。

## 3 结论

通过乙醇注入法可以制备出粒径小、包封率高的 EGCG 纳米脂质体。通过单因素实验研究各因素对脂质体粒径和包封率的影响。通过正交设计优化了制备工艺,制备出了性质稳定的脂质纳米制剂,且包封率较高,粒径小且分布均匀,得出最优水平组合:胆固醇:卵磷脂为 1:5、EGCG 质量分数为 0.06%、吐温 80 质量分数为 0、乙醇体积分数为 14%、搅拌温度为 40℃、搅拌速度为 540 r/min。研究结果为制备 EGCG 微胶囊提供了一定理论依据,为下一步 EGCG 在食品、药品领域的进一步研究奠定了基础。

## 参考文献

- [1] Xu Y Q, Zhang Y N, Chen J X, et al. Quantitative analyses of the bitterness and astringency of catechins from green tea [J]. Food Chemistry, 2018, 258: 6-24.
- [2] He J, Xu L, Yang L, et al. Epigallocatechin gallate is the most effective catechin against antioxidant stress via hydrogen peroxide and radical scavenging activity [J]. Medical Science Monitor, 2018, 24, 8198-8206.
- [3] Gan R Y, Li H B, Sui Z Q, et al. Absorption, metabolism, anticancer effect and molecular targets of epigallocatechin gallate (EGCG): An updated review [J]. Critical Reviews Food Science and Nutrition, 2016, 58(6): 924-941.
- [4] Nikoo M, Regenstein J M, Gavlighi H A. Antioxidant and antimicrobial activities of (-)-epigallocatechin-3-gallate (EGCG) and its potential to preserve the quality and safety of foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(3): 732-753.
- [5] Yqx A, Ying G A, Dg B. Effects of epigallocatechin gallate, epigallocatechin and epicatechin gallate on the chemical and cell-based antioxidant activity, sensory properties, and cytotoxicity of a catechin-free model beverage-ScienceDirect [J]. Food Chemistry, 2020, 339: 128060.
- [6] Dai W, Ruan C, Zhang Y, et al. Bioavailability enhancement of EGCG by structural modification and nano-delivery: A review [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 65: 103732.
- [7] Byun E B, Kim W S, Sung N Y, et al. Epigallocatechin-3-gallate regulates anti-inflammatory action through 67 kDa laminin receptor-mediated tollip signaling induction in lipopolysaccharide-stimulated human intestinal epithelial cells [J]. Cellular Physiology & Biochemistry, 2018, 46(5): 2072-2081.
- [8] Qian Y E, Punniyakoti V T, Ramamurthy S. Molecular understanding of epigallocatechin gallate (EGCG) in cardiovascular and metabolic diseases [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2017, 210: 296-310.
- [9] Cao Y, Teng J, Selbo J. Amorphous solid dispersion of epigallocate-

- chin gallate for enhanced physical stability and controlled release [J]. *Pharmaceuticals*, 2017, 10(4): 88.
- [10] Mieszawska A J, Mulder W J, Fayad Z A, *et al.* Multifunctional gold nanoparticles for diagnosis and therapy of disease [J]. *Molecular Pharmaceutics*, 2013, 10(3): 831–847.
- [11] Gómez-mascaraque L G, Méndez J A, Fernández-gutiérrez M, *et al.* Oxidized dextrans as alternative crosslinking agents for polysaccharides: Application to hydrogels of agarose-chitosan [J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(2): 798–811.
- [12] Rashidinejad A, Birch E J, Sun-Waterhouse D, *et al.* Delivery of green tea catechin and epigallocatechin gallate in liposomes incorporated into low-fat hard cheese [J]. *Food Chem*, 2014, 156: 176–183.
- [13] Forester S C, Lambert J D. The catechol-*O*-methyltransferase inhibitor, tolcapone, increases the bioavailability of unmethylated (–)-epigallocatechin-3-gallate in mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 17: 183–188.
- [14] Wang M, Zhang X, Ying J Z, *et al.* Antiglication activity of lipophilized epigallocatechin gallate (EGCG) derivatives [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 1022–1026.
- [15] Zhang X, Wang J, Hu J M, *et al.* Synthesis and biological testing of novel glucosylated epigallocatechin gallate (EGCG) derivatives [J]. *Molecules*, 2016, 21(5): 620.
- [16] Bangham A D, Standish M M, Watkins J C. Diffusion of univalent ions across the lamellae of swollen phospholipids [J]. *Mol Biol*, 1965, 13(1): 238–252.
- [17] He H, Yi L, Qi J, *et al.* Adapting liposomes for oral drug delivery [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2018, 9(1): 36–48.
- [18] Chen W, Zou M, Ma X, *et al.* Co-encapsulation of EGCG and quercetin in liposomes for optimum antioxidant activity [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(1): 111–120.
- [19] Istenič K, Korošec R C, Ulrich N P. Encapsulation of (–)-epigallocatechin gallate into liposomes and into alginate or chitosan microparticles reinforced with liposomes [J]. *Journal of Science and Food Agriculture*, 2016, 96(13): 4623–4632.
- [20] 马宁, 濮少杰. 茶多酚脂质体的制备 [J]. *食品科学*, 2012, 33(20): 16–20.
- [21] Yang S, Liu W, Liu C, *et al.* Characterization and bioavailability of vitamin C nanoliposomes prepared by film evaporation–dynamic high pressure microfluidization [J]. *Dispers Sci Technol*, 2012, 33: 1608–1614.
- [22] Fan M, Xu S, Xia S, *et al.* Preparation of salidroside nano-liposomes by ethanol injection method and in vitro release study [J]. *Eur Food Res Technol*, 2008, 227: 167–174.
- [23] Lu Q, Li D C, Jiang J G. Preparation of a tea polyphenol nanoliposome system and its physicochemical properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(24): 13004–13011.
- [24] Manosroi A, Wongtrakul P, Manosroi J, *et al.* Characterization of vesicles prepared with various non-ionic surfactants mixed with cholesterol [J]. *Colloids And Surfaces B-Biointerfaces*, 2003, 30(1/2): 129–138.
- [25] Xia S Q, Xu S Y. Ferrous sulfate liposomes: Preparation, stability and application in fluid milk [J]. *Food Res Int*, 2005, 38: 289–296.
- [26] Imura T, Otake K, Hashimoto S, *et al.* Preparation and physicochemical properties of various soybean lecithin liposomes using supercritical reverse phase evaporation method [J]. *Coll and Surf B*, 2002, 27: 133–140.
- [27] Marianecchi C, Di Marzio L, Rinaldi F, *et al.* Niosomes from 80 s to present: The state of the art [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 205: 187–206. ■
- .....
- (上接第 183 页)
- [3] Zhang Z E, Wang T, Blunt M J, *et al.* Advances in carbon capture, utilization and storage [J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115627.
- [4] 程志远. 一种新型脱硝除碳烟气净化装置的试验探究 [J]. *能源与节能*, 2023, (3): 89–92, 198.
- [5] 吴江, 陈玉年, 张鑫, 等. 碳中和背景下燃煤烟气重金属污染物控制技术展望 [J]. *上海电力大学学报*, 2022, 38(5): 427–432.
- [6] Xu S Q, Dai S P. CCUS as a second-best choice for China's carbon neutrality: An institutional analysis [J]. *Climate Policy*, 2021, 21(7): 927–938.
- [7] 吴悦, 万祥龙, 钱艳峰, 等. 二氧化碳捕集与分离技术研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2023, 51(3): 247–251.
- [8] 杨晴, 孙云琪, 周荷雯, 等. 我国典型行业碳捕集利用与封存技术研究综述 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2023, 51(1): 101–110, 145.
- [9] Xin K, Hashish M, Roghair I, *et al.* Process simulation and economic Analysis of pre-combustion CO<sub>2</sub> capture with deep eutectic solvents [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 573267.
- [10] 熊波, 陈健, 李克兵, 等. 工业排放气二氧化碳捕集与利用技术进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(1): 9–18.
- [11] Hou S S, Chiang C Y, Lin T H. Oxy-fuel combustion characteristics of pulverized coal under O<sub>2</sub>/recirculated flue gas atmospheres [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1362.
- [12] 张嘉伟, 顾文波, 张富龙. 基于化学吸收法的二氧化碳捕集技术研究进展 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(4): 96–106.
- [13] Du Y B, Zhao N, Wang J X, *et al.* Effect of CO<sub>2</sub> on coal devolatilization in oxy-fuel combustion: Exploring the influence of temperature and inherent alkali/alkaline earth metal [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 96: 103004.
- [14] 王建行, 赵颖颖, 李佳慧, 等. 二氧化碳的捕集、固定与利用的研究进展 [J]. *无机盐工业*, 2020, 52(4): 12–17.
- [15] 康宇龙, 白艳伟, 江绍静, 等. 延长石油碳捕集、利用与封存全流程技术特色与工程实践 [J]. *应用化工*, 2020, 49(7): 1768–1771, 1775.
- [16] 魏炜, 曾令梓, 刘凤霞, 等. 混合醇胺捕集低浓度 CO<sub>2</sub> 性能研究 [J]. *低碳化学与化工*, 2023, 48(3): 116–122.
- [17] Nwaoha C, Saiwan C, Tontiwachwuthikul P, *et al.* Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture: Absorption-desorption capabilities of 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP), piperazine (PZ) and monoethanolamine (MEA) tri-solvent blends [J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2016, 33: 742–750.
- [18] 贺鹏, 郑伯红, 龚凯. 醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究 [J]. *现代化工*, 2016, 36(9): 171–174.
- [19] 赵东亚, 王家凤, 田群宏, 等. MEA 法碳捕集工艺再生塔能耗优化 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(2): 181–186.
- [20] 赵东亚, 揭超, 李兆敏. 醇胺法碳捕集工艺解吸塔能耗分析 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(6): 150–155. ■