

生物质基单宁甲醛捕捉剂油水比对薄木饰面板甲醛释放的影响

程 进,王佳楠,胡润生,李棒棒,王顺新,郭云辉,朱晓冬\*

(东北林业大学 生物质材料科学与技术教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**基于壳聚糖采用乳化交联法制备的生物质基单宁甲醛捕捉剂为研究对象,探讨不同油水比的生物质基单宁甲醛捕捉剂对薄木饰面板甲醛释放的影响。通过对比不同油水比制备的甲醛捕捉剂形态、包封量和包封率以及对甲醛水溶液降解情况,分析油水比对甲醛捕捉剂的影响以及在最佳油水比时,研究将生物质基单宁甲醛捕捉剂应用到人造板中吸收薄木饰面板释放的甲醛的情况。结果表明,油水比为4:1时可以获得表面光滑的球形结构甲醛捕捉剂;油水比为2:1、3:1、4:1制备的生物质基单宁甲醛捕捉剂在60 min内对甲醛水溶液的降解分别可达24.68%、33.17%、38.84%;相比于未添加甲醛捕捉剂的薄木饰面板,添加了油水比为4:1时制备的甲醛捕捉剂薄木饰面板在24、48、72 h降解甲醛的效率分别达到了46.68%、50.64%、53.20%。因此,采用高油水比时,生物质基单宁甲醛捕捉剂可以持续有效地捕获甲醛。

**关键词:**单宁;甲醛;甲醛捕捉剂;乳化交联法

**中图分类号:**S781.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)02-0208-05

Effects of Oil-Water Ratio of Biomass-Based Tannin-Formaldehyde Capture Agent on Formaldehyde Release from Thin Wood Veneer

CHENG Jin, WANG Jia-nan, HU Run-sheng, LI Bang-bang, WANG Shun-xin, GUO Yun-hui, ZHU Xiao-dong\*

(Key Laboratory of Biomass Materials Science and Technology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In this paper, a biomass-based formaldehyde capture agent prepared by emulsion cross-linking method using tannin and chitosan was used as the research object to investigate the effects of oil-water ratio on the performance of the agent that was applied to thin wood veneer. By comparing the morphology, encapsulation amount, encapsulation rate and degradation of formaldehyde aqueous solution of the agent prepared by different oil-water ratios, the effects of the oil-water ratio on the agent were examined. The agent with optimal oil-water ratio was applied to the artificial thin wood veneer. The results showed that when the oil-water ratio was 4:1, a formaldehyde capture agent with a smooth spherical structure could be obtained; the agents prepared with oil-water ratios of 2:1, 3:1, and 4:1 could degrade 24.68%, 33.17%, and 38.84% of formaldehyde aqueous solution within 60 minutes. Compared to the thin wood veneer without applying the agent, the agent prepared with the oil-water ratio of 4:1 could degrade 46.68%, 50.64% and 53.20% of the formaldehyde released from the wood veer at 24, 48, and 72 h. Therefore, the agent with high oil-water ratio (4:1) could continuously and effectively scavenge formaldehyde.

**Key words:** tannin; formaldehyde; formaldehyde capture agent; emulsion cross-linking method

甲醛是室内环境污染中一个重要的污染物<sup>[1]</sup>。 目前装修板材中主要以人造板为主,如胶合板,纤维

收稿日期:2019-04-25 修回日期:2019-10-28  
基金项目:东北林业大学大学生国家级创新训练计划项目(201810225002)。  
作者简介:程 进,男,在读本科,研究方向:人造板生产工艺。E-mail:chengjinonly@163.com  
\* 通信作者:朱晓冬,博士,副教授,研究方向:木材改性。E-mail:pe4646@126.com

板,刨花板等。而人造板主要使用了脲醛树脂、酚醛树脂等醛类胶黏剂<sup>[2]</sup>,在人造板的生产使用过程中,甲醛无法在短时间内释放完全,都会残留一定的数量。一般而言,人造板中甲醛释放的周期为3~15 a,而甲醛释放是一个长期缓慢的过程,这是造成室内环境甲醛含量超标的一个重要因素<sup>[3]</sup>。当室内甲醛浓度过高时,一般会引起人头晕头痛,四肢乏力,重则引发人体细胞癌变导致白血病等癌症<sup>[4]</sup>。2004年,甲醛被世界卫生组织正式确定为一类致癌物质<sup>[5]</sup>。所以,如何有效地控制并减少人造板中甲醛的污染是十分重要的<sup>[6]</sup>。

当前减少甲醛污染的方法主要有机械法、物理法、化学法等。通风换气是最简单、最直接的机械方法,但是如果不能实时进行空气交换,它就失去了作用。物理方法主要是物理吸附技术,依靠吸附材料的多孔性实现对甲醛的吸附,常用的物理吸附材料有活性炭、硅胶等。物理吸附技术操作简单,但是吸附材料的大小有限,而且吸附一定时间后就会达到饱和,必须定时进行更换才能继续吸附甲醛,实际使用限制条件较多<sup>[7]</sup>。化学法能较快地降低甲醛的浓度,包括空气负离子技术、催化技术等。空气负离子技术虽然效果较好,但是副作用目前还未确定;催化技术目前并不成熟,成本较高<sup>[8]</sup>。

甲醛捕捉剂是一种能够与甲醛发生化学反应从而除去甲醛的物质,包括无机化合物、有机化合物以及生物质材料等<sup>[9-10]</sup>。段红云等<sup>[11]</sup>已经证明甲醛捕捉剂是清除甲醛一种有效的方法。单宁作为一种天然生物质材料,可以与甲醛反应生成羟甲基继而反应生成一种高聚物从而除去甲醛<sup>[12-13]</sup>。而壳聚糖作为一种天然的直链的多糖,经过化学交联之后可以形成体型结构从而作为一种缓释载体<sup>[14-16]</sup>。本研究以单宁,壳聚糖为原料,以三聚磷酸钠为交联剂,采用乳化交联法制备了一种生物质基单宁甲醛捕捉剂,并探讨不同试验条件对甲醛捕捉剂形态、包封量和包封率以及对甲醛水溶液降解的影响。在此基础上,研究在最佳试验条件下,单宁甲醛捕捉剂对薄木饰面板释放的甲醛的吸收情况,为进一步开发生物质基甲醛捕捉剂提供一定的理论与试验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

壳聚糖,购自上海蓝季科技发展有限公司;单宁,购自中国医药上海化学试剂分公司;三聚磷酸钠,购自天津市天力化学试剂有限公司;甲苯,购于天津市富宇精细化工有限公司;吐温80,购自天津市光复精细研究所;乙酸,购于天津市富宇精细化工有限公司;

甲醛,购自丹东市龙海试剂厂;桦木(*Betula*)薄木,厚度0.2 mm;脲醛树脂胶粘剂,固体含量65%;4层桦木胶合板,幅面尺寸16 cm×10 cm×0.4 cm。

### 1.2 设备

722N型可见光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;AL204型精密电子天平、PL2002型电子分析天平,上海浦春计量仪器有限公司;HH-D4型数显恒温水浴锅,金坛市双捷实验仪器厂;数显高速分散均质机、JJ-1型电动搅拌机,上海标本模型厂;FEI TECNAI G2 F20 200KV场发射透射电子显微镜、美国FEI公司。

### 1.3 方法

1.3.1 单宁甲醛捕捉剂的制备 将0.3 g壳聚糖溶解于10 mL质量分数为2%的乙酸溶液中,将0.3 g单宁溶解于10 mL去离子水中,待两者溶解完全后混合在冷水浴中以500 r/min的速率搅拌30 min分散完全形成水相,调节pH为4.5~5.0。分别量取40、60、80 mL的甲苯于烧瓶中作为油相,控制油水比(O/W)为2:1、3:1、4:1,滴入2 mL Tween 80并在冷水浴中以500 r/min的速率搅拌30 min形成油相。在300 r/min的搅拌条件下将制备好的水相缓慢加入到油相中,然后在50℃的条件下搅拌120 min,然后将三聚磷酸钠溶液加入到混合的油相水相中,继续在50℃的条件下搅拌120 min,冷却到室温进行过滤,用丙酮洗涤5次滤液,最后将产物放在60℃的真干干燥箱中干燥48 h。

1.3.2 透射电子显微镜(TEM)表征 利用TEM电子显微镜(Tecnaig2F20)观察合成的单宁甲醛捕捉剂的微观形貌。表征的方法:用无水乙醇溶解单宁甲醛捕捉剂粉末,然后在超声波分散器中分散10 min,将分散后的捕捉剂液滴在超薄碳膜载网上,干燥后进行表征。

1.3.3 计算包封量和包封率 将烘干后的单宁甲醛捕捉剂研碎,用分析天平称取0.2 g研碎的捕捉剂粉末于圆底烧瓶中,用移液管量取20 mL去离子水溶解,再分别加入4 mL甲醛、2 mL盐酸,然后把圆底烧瓶接上球形冷凝管,在电炉上缓慢加热,冷凝管开始回流时便计时,加热30 min,加热期间应适时摇动烧瓶,避免烧瓶内的物体沾壁。加热完毕后,将烧瓶内的反应物置于砂芯坩埚中,用沸水洗涤3次,量取25 mL甲醇静止过滤。然后把坩埚放在126~128℃的烘箱中4 h,烘干后在干燥器干燥30 min冷却后称重计算单宁的质量。包封量=甲醛捕捉剂中包埋的单宁质量/甲醛捕捉剂的总质量×100%;包封率=甲醛捕捉剂中包埋的单宁质量/加入的单宁总质量×100%。

1.3.4 绘制校准曲线 取不同体积浓度已知的甲醛溶液于比色管中,用去离子水稀释定容到 10 mL,加入 0.25%乙酰丙酮溶液 2 mL,震荡均匀;在沸水浴中加热 3 min,取出冷却至室温;用 1 cm 吸收池,以水为参比,在波长 413 nm 处测定吸光度从而测定出甲醛的含量。以校准吸光度为纵坐标、甲醛含量为横坐标,绘制校准曲线,或用最小二乘法计算回归方程式。

标准曲线如图 1 所示,可以发现,吸光度与甲醛含量的回归方程为  $y=0.2149x+0.0591$ ,斜率为 0.2149,截距为 0.0591;回归方程的决定性系数为 0.9996,表示甲醛浓度在 0~23.94 mg/L 范围内,吸光度与甲醛含量成一个良好的线性关系。试验过程中,实验室环境对实验仪器有一定的影响,如果实验室周围环境发生改变,就需要重新制作标准曲线。

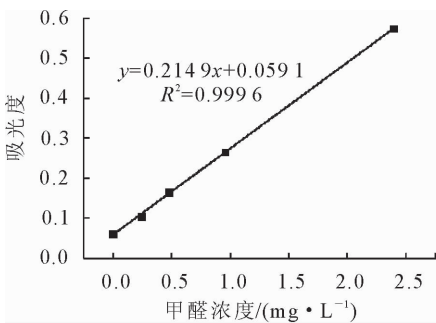


图 1 吸光度与甲醛浓度标准曲线

Fig. 1 Absorbance and formaldehyde concentration standard curve

1.3.5 测试捕捉剂对甲醛水溶液的吸收 配置溶有质量浓度为 2 g/L 单宁甲醛捕捉剂的 1 mg/L 的甲醛水溶液:用分析天平称取单宁甲醛捕捉剂 0.1 g 于 50 mL 容量瓶中,滴入 2 mL 质量浓度为 25 mg/L 的甲醛溶液,加入去离子水定容至 50 mL;然后分别在 1、2、3 h 时间点量取 5 mL 甲醛水溶液于 50 mL 定容瓶中,用去离子水稀释定容,然后再取 5 mL 试样于 25 mL 的比色管中,用去离子水定容至 10 mL 刻度线。以下步骤按照 1.3 进行分光光度测定,从而测定甲醛水溶液中甲醛的浓度。

1.3.6 制备捕捉剂浸渍的人造板 选取 6 块无缺陷的薄木,以 3 块为一组,将一组薄木用 O/W 为 4:1 的没有过滤的单宁甲醛捕捉剂溶液浸渍,20

min 后自然晾干,另外一组薄木不作任何处理。然后再用脲醛树脂胶黏剂对 2 块薄木进行涂胶处理,单位面积涂胶量为 140 g/m<sup>2</sup>;之后在温度 120℃、压力 2.0 MPa 的条件下热压 4 min。

1.3.7 测定浸渍人造板的甲醛释放量 在干燥器的结晶皿中加入 300 mL 去离子水,将试件固定在干燥器内,试件释放出的甲醛会溶解于水中,分别干燥 24、48、72 h,温度为 20℃,然后采用 1.3.5 的测试方法检测浸渍后 3 个时间点薄木饰面板的甲醛释放量。

2 结果与分析

2.1 单宁甲醛捕捉剂形貌表征

捕捉剂的表面形貌与捕捉剂能否发挥作用有着密切的关系<sup>[11]</sup>。本研究采用乳化交联法制备单宁甲醛捕捉剂,固定其他条件不变,控制 O/W 分别为 2:1、3:1、4:1。通过 TEM 对制成的 3 种单宁甲醛捕捉剂进行表征,TEM 如图 2 所示。

由图 2 可知,O/W 为 2:1 时,可以观察到没有形成明显的球状结构;O/W 为 3:1 时,可以观察到明显的球状结构,但是捕捉剂表面粗糙不光滑,有显著的凹陷与褶皱;O/W 为 4:1 时,可以清楚地观察到球状结构,而且捕捉剂表面没有褶皱,光滑,整体呈现一个完整的球状结构。壳聚糖为一种线性高分子聚合物,通过与三聚磷酸钠形成离子键而交联,由线性分子转变为三维网状结构的体型分子,阻止单宁迅速向外扩散,之后壳聚糖吸水形成粘稠层,单宁通过粘稠层然后与甲醛反应,同时外界的甲醛也可以通过粘稠层向内渗入与单宁发生反应<sup>[17-20]</sup>。结果显示,随着 O/W 的提高,成球效果越来越好。在 O/W 型乳化体系中,油相体积大于水相,乳化剂可以在粒子界面形成空间位阻,减小界面的张力,增强乳化体系的稳定性<sup>[21]</sup>。随着 O/W 的提高,水相可以更好地分散在油相中,使得微球可以被更厚的油相包裹,不但可以避免在搅拌过程中个体相互碰撞而无法成球,而且还可以使得微球在搅拌流动过程中更好地形成球状的体型结构,包裹住内部的单宁。

2.2 捕捉剂的包封量与包封率

试验中制备了不同 O/W 的单宁甲醛捕捉剂,

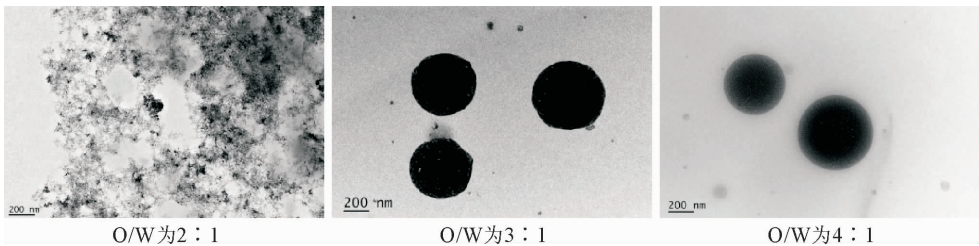


图 2 不同 O/W 的甲醛捕捉剂透镜

Fig. 2 Different O/W formaldehyde capture agent lens

由 2 : 1 增加到 4 : 1。由表 1 可知,随着 O/W 增大,测得相对应的单宁甲醛捕捉剂包封量从 16.67% 逐渐提高到 29.80%,包封效率由 41.68% 逐渐提高到 74.51%。由于单宁易溶于水,O/W 较低时,水相在油相中分散效果较差,单位体积的水相能够溶解较多的单宁,造成大量单宁无法被包裹在壳聚糖内,所以包封量与包封率较差;随着 O/W 提高,油相的分散效果提高,单位体积的水相溶解的单宁减少,更多的单宁可以被包裹在壳聚糖内,从而包封量与包封率得以显著提高。

2.3 油水比对甲醛降解的影响

由表 2 可知,在 180 min 的降解测试时间里,相比于不添加捕捉剂的甲醛水溶液,添加了 3 种不同的甲醛捕捉剂的甲醛水溶液的质量浓度有了明显降低。O/W 为 2 : 1 时,60、120、180 min 内甲醛分别降解了 24.75%、33.17%、40.77%;O/W 为 3 : 1 时,60、120、180 min 内甲醛分别降解了 30.42%、43.61%、49.18%;O/W 为 4 : 1 时,60、120、180

min 内甲醛分别降解了 39.05%、46.45%、54.56%;随着时间的增加,单宁通过粘稠层持久缓慢地与甲醛反应从而吸收甲醛,甲醛也会通过粘稠层渗进捕捉剂中与单宁反应从而实现对甲醛的降解。O/W 的提高可以增强捕捉剂的球型结构稳定性,提高捕捉剂的包封量与包封率,在保证捕捉剂的缓释效果的同时保证甲醛的降解效果。

对未添加捕捉剂以及添加 3 种不同 O/W 的单宁甲醛捕捉剂的甲醛溶液质量浓度进行单因素方差分析(表 3)。从表 3 可知, $F$  值为 24.141 而  $P < 0.1$ ,各组之间差异极其显著。

表 1 生物质基单宁甲醛捕捉剂的包封量与包封率

Table 1 Encapsulation amount and encapsulation rate of biomass-based tannin-formaldehyde capture agent %		
O/W	包封量均值(标准偏差)	包封率均值(标准偏差)
2 : 1	16.67(3.57)	41.68(1.56)
3 : 1	22.61(3.79)	56.25(1.78)
4 : 1	29.80(4.55)	74.51(1.23)

表 2 甲醛溶液的质量浓度

Table 2 Mass concentration of formaldehyde solution (mg · L <sup>-1</sup> )				
降解时间 /min	未加甲醛捕捉剂的均值(标准偏差)	O/W 为 2 : 1 的均值(标准偏差)	O/W 为 3 : 1 的均值(标准偏差)	O/W 为 4 : 1 的均值(标准偏差)
60	0.986(0.002)	0.742(0.003)	0.686(0.008)	0.601(0.003)
120	0.986(0.004)	0.659(0.002)	0.556(0.005)	0.528(0.001)
180	0.986(0.001)	0.584(0.002)	0.501(0.007)	0.448(0.004)

表 3 甲醛溶液质量浓度的单因素方差分析

Table 3 One-way analysis of variance of mass concentration of formaldehyde solution					
	平方和	$df$	均方	$F$	$P$
组间	0.382	3	0.127	24.141	0.000
组内	0.042	8	0.005		
总数	0.424	11			

表 4 薄木饰面板的甲醛释放量

Table 4 Formaldehyde emission from thin wood veneer (mg · L <sup>-1</sup> )		
处理时间/h	未加甲醛捕捉剂的均值(标准偏差)	添加甲醛捕捉剂的均值(标准偏差)
24	1.491(0.015)	0.795(0.002)
48	1.489(0.013)	0.735(0.005)
72	1.485(0.018)	0.695(0.001)

2.4 薄木饰面板的甲醛释放

由表 4 可知,与未进行浸渍处理的薄木饰面板相比,捕捉剂浸渍处理后的人造板的甲醛释放量分别降低了 46.68%、50.64%、53.20%。热压后的人造板 24 h 内游离甲醛含量高,芯材单宁的快速释放去除了大部分的游离甲醛;随着时间的延长,薄木饰面板内游离甲醛浓度降低,甲醛捕捉剂持续地释放芯材单宁,去除低浓度的游离甲醛。所以,浸渍捕捉剂溶液的薄木饰面板起始甲醛释放量下降较快,而后下降趋势变缓。

3 结论与讨论

通过对不同 O/W 制备的单宁甲醛捕捉剂形态的观察,对包封量与包封率、甲醛水溶液及薄木饰面

板的甲醛降解情况的分析,得出以下研究结论:  
W/O 型乳化体系中,O/W 的提高有利于水相在油相中的分散,使得乳化体系更加稳定,形成空间位阻保护,阻止微球之间相互接触,促进其形成体型结构。3 种 O/W 制备单宁甲醛捕捉剂最佳的为 4 : 1,捕捉剂呈现光滑的球状。  
提高 O/W,单位体积的水相溶解的单宁减少,微球中单宁含量增加,包封量与包封率增加。同时,单宁通过粘稠层可以持久地与甲醛进行反应,单宁甲醛捕捉剂在实现了缓慢释放的同时对甲醛的降解效果更好。随着 O/W 的增加,甲醛水溶液 180 min 内甲醛含量分别降低了 40.77%、49.18%、54.56%。  
采用高 O/W 制备的单宁甲醛捕捉剂处理薄木饰面板,长时间内清除甲醛的效率更高,72 h 内甲

醛的捕获率达到 53.20%，明显清除了薄木饰面板释放出的游离甲醛。

参考文献：

[1] 杨楠. 室内装修中甲醛污染物的检测与防治方法探讨[J]. 居舍, 2018, 39(33): 23.

[2] 唐启恒, 谭宏伟, 韦淇峰, 等. 低甲醛释放高密度纤维板的制备及性能[J]. 林业工程学报, 2019, 4(2): 26-30.

[3] 汤正捷, 詹先旭, 杨勇, 等. 三聚氰胺甲醛树脂薄木浸渍工艺及性能[J]. 林业工程学报, 2018, 3(6): 32-37.

[4] 王璇, 吴志刚, 董雯莹, 等. 羟甲基酚制备单宁基胶黏剂与性能[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 234-238.

WANG W, WU Z, DONG Y Y, *et al.* Preparation and performance of tannin-based adhesive crolinked by hydroxymethyl phenol[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 234-238. (in Chinese)

[5] YANG D, LIU Y, ZHANG J, *et al.* Experimental study on microwave modified AC and its adsorption on formaldehyde[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 3755-3762.

[6] 王高超, 沈隽, 李爽. 室内装饰材料甲醛释放研究现状及发展趋势[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 188-191.

WANG G C, SHEN J, LI S. Current research and development trends of the formaldehyde emission from interior decoration materials[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(1): 188-191. (in Chinese)

[7] 罗洪镁. 室内甲醛污染源、危害及防治技术研究进展[J]. 化工管理, 2016, 32(26): 288-290.

[8] 高小红, 刘玉华, 吴春姗, 等. 室内空气中甲醛的危害及其净化技术[J]. 科技创业月刊, 2013, 26(5): 186-187.

[9] 王巍聪, 刘玉, 朱晓冬. 基于尿素微胶囊的薄木饰面板甲醛控释研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(6): 38-42.

WANG W C, LIU Y, ZHU X D. Control of formaldehyde release of surface-veneered panel using urea microcapsule[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(6): 38-42. (in Chinese)

[10] 马灼明, 李淑君, 杨冬梅. 酶解木质素的活化及用于酚醛树脂

的制备[J]. 森林工程, 2017, 33(2): 64-67.

[11] DUAN H, QIU T, GUO L, *et al.* The microcapsule-type formaldehyde scavenger: the preparation and the application in urea-formaldehyde adhesives[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 293: 46-53.

[12] 郭胜利, 杨淑慎, 黄治国. 五角枫翅果中单宁的提取及其改性研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 134-137.

[13] 郭如振, 高振华, 张荔. 生物质甲醛捕捉剂的应用与进展[J]. 粘接, 2010, 31(4): 64-69.

[14] 朱茂电, 靳雅莉. 纳米缓释微胶囊的制备及其缓释性能[J]. 合成树脂及塑料, 2018, 35(2): 41-43.

[15] PAULRAJ M G, IGNACIMUTHU S, GANDHI M R, *et al.* Comparative studies of tripolyphosphate and glutaraldehyde cross-linked chitosan-botanical pesticide nanoparticles and their Agricultural Applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 104: 1813-1819.

[16] 付雅静. 壳聚糖交联微球的制备[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017.

[17] GRASIANO, SISWANTA, MUDASIR, *et al.* Retracted-glutaraldehyde-crosslinked chitosan-pectin nanoparticles as a potential carrier for curcumin delivery and its *in vitro* release study[J]. International Journal of Drug Delivery, 2015, 7(3): 167-173.

[18] 陈惠, 王学军, 宋居易, 等. 壳聚糖涂膜对蚕豆鲜荚采后生理及贮藏品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 220-223.

[19] 殷茂力, 王英泮, 任学宏. 改性壳聚糖抗菌纳米微球的制备[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(1): 173-179.

[20] ALSHAAHRANI A A, AL-ZOUBI H, LONG D N, *et al.* Synthesis and characterisation of MWNT/chitosan and MWNT/chitosan-crosslinked buckypaper membranes for desalination[J]. Desalination, 2017, 418: 60-70.

[21] EI-GUENDOUIZ S, AAZZA S, LYOUSSEI B, *et al.* Effect of poplar-type propolis on oxidative stability and rheological properties of O/W emulsions[J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2018, 26(8): 1073-1082.

(上接第 196 页)

[19] 樊桢. 浅谈光伏电站建设对荒漠地区治理意义——以甘肃为例[J]. 中国经贸导刊, 2015(35): 8-10.

[20] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4156-4163.

HUANG M, JI J J, CAO M K, *et al.* Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China [J]. Acta Ecologica Sinica , 2006, 26(12) : 4156-4163. (in Chinese)

[21] WANG M, DONG Z, LUO W, *et al.* Spatial variability of vegetation characteristics, soil properties and their relationships in and around China’s Badain Jaran Desert [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 6847-6858.

[22] 迟琦, 吴迪, 王月, 等. 小兴安岭森林湿地不同过渡带土壤微生物群落结构研究[J]. 森林工程, 2018, 34(3): 6-13, 18.

[23] 杜倩, 梁素钰, 李琳, 等. 阔叶红松林土壤酶活性及微生物群落功能多样性分析[J]. 森林工程, 2019, 35(1): 1-7, 15.

[24] 张玲, 张东来, 毛子军, 等. 不同群落类型土壤惰性碳含量特征与维持机制[J]. 森林工程, 2019, 35(6): 16-25.

[25] 黄晔, 王雪梅. 干旱区典型植物群落土壤水盐空间差异[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 126-130.

[26] 王健铭, 王文娟, 李景文, 等. 中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J]. 生物多样性, 2017, 25(11): 1192-1201.

[27] 王根绪, 胡宏吕, 王一博, 等. 青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 1671-1679.

[28] GUO Q F, BERRY W. Species richness and biomass: dissection of the hump-shaped relationships [J]. Ecology, 1998, 79(7): 2555-2559.

[29] HUSTON M A, SMITH T. Plant succession: life history and competition[J]. American Naturalist, 1987, 130(2): 168-198.

[30] BONSER S P, READER R J. Plant competition and herbivory in relation to vegetation biomass[J]. Ecology, 1995, 54(7): 775-787.