

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020157

植物多酚对木材加工性能的影响和应用

王超, 余养伦

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 阐述植物多酚的主要特点, 包括在木材中的分布、与木材组分之间的作用以及与金属的络合作用; 分析植物多酚对木材加工性能的影响, 总结植物多酚及其络合物在木材加工中的应用前景。

关键词: 植物多酚; 金属络合作用; 木材加工; 应用

中图分类号: S781; TS65 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2021) 03-0001-05

Application and the Effect of Plant Polyphenolic Compounds on Wood Processing Properties

WANG Chao, YU Yang-lun

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The authors briefly introduced the main characteristic of plant polyphenolic compounds, including the distribution in the wood structure, the interaction between the wood composition and plant polyphenolic compounds, and ionic bonding abilities between metal ionic and plant polyphenolic compounds. The influence of plant polyphenolic compounds on the wood properties were analyzed. The application and prospective trends of plant polyphenolic complex compound on the wood processing were summarized.

Key words: plant polyphenolic compounds; metal complexation; wood processing; application

植物多酚是具有多个酚羟基的次生代谢产物, 广泛地存在于植物的根、茎、皮、叶、果中, 其含量仅次于纤维素、半纤维素和木质素。相对分子质量在500~3 000之间的又称单宁^[1]。目前, 在各类植物中发现了包括低分子量的简单酚类及具有高聚合结构的大分子聚合物, 约8 000多种酚类化合物^[2]。植物多酚的多元酚结构, 赋予其独特的

物理、化学和生物特性, 因此, 被广泛应用于医药、食品、材料、环境、能源等多种领域^[2-3]。

植物多酚是木材的重要组成部分, 存在于大部分树种的木质部中, 是决定木材色泽的主要成分^[4]; 因其性质活泼、易迁移, 植物多酚对人造板胶合、木材表面涂饰、木材变色、木材防腐处理以及木工机械刀具损伤等均有一定程度的影响^[5-9]。但在木材加工领域, 通常将植物多酚视为抽提物, 因而对其组成、含量、分布和性质的研究较少, 并未引起充分重视。

鉴于此, 本文对植物多酚的特性、在木材中的分布以及对木材加工性能的影响进行了总结,

收稿日期: 2020-10-27; 修改日期: 2021-02-24

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“植物多酚的原位络合及其对木材重组性能的影响机制”(CAFYBB2020QC002)。

作者简介: 王超 (1965—), 男, 工程师。Email: wangc@criwi.org.cn

通讯作者: 余养伦, 男, 研究员。Email: yuyanglun@caf.ac.cn

重点阐述植物多酚及其络合物在木材加工中的应用, 旨为植物多酚在木材加工领域的高值化利用提供借鉴和参考。

1 植物多酚的特性及其与金属离子的络合性能

1.1 植物多酚的化学特性

植物多酚中含有丰富的酚羟基和多元酚结构, 赋予其一系列独特的化学性质。如, 芳环结构可以与疏水位点相互结合, 形成疏水作用^[10]; 可以与带正电荷的分子形成静电相互作用; 还可以与蛋白质、多糖(纤维素、半纤维素等)、生物碱、微生物、酶等产生多种形式的结合, 形成衍生化反应^[11]。酚羟基可以作为氢键的供体, 形成氢键作用^[12]; 另外, 酚羟基具有高电荷密度, 可作为金属螯合剂, 与金属离子发生络合或静电作用, 生成植物多酚-金属络合物^[13]; 酚羟基还可以与羧酸发生酯化反应^[14], 与烷基卤化物、环氧化合物发生醚化反应^[2, 15], 以及发生 Michael 加成^[16]或 Schiff 碱反应^[17]; 此外, 植物多酚还具有还原性^[18]、捕捉自由基^[19]、吸收紫外线^[20]等特性。

1.2 植物多酚与金属离子的络合作用

植物多酚与金属离子的络合作用是其最重要的化学特征之一, 这方面的研究工作较为深入^[12]。植物多酚可以与 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等金属离子络合, 形成植物多酚-金属络合物/配合物^[2], 其与不同金属离子的络合能力不同。由于铁离子络合能力强、生物毒性低, 是当前被研究最多的金属离子^[21], 其植物多酚-金属络合物被广泛应用于多功能表面的构建和功能材料的设计中^[1, 22]。

多酚分子中的多个邻位酚羟基结构, 是形成稳定的多酚-金属络合物的必要条件, 而对于芳香环上只有一个羟基酚类化合物, 如苯酚, 则不能与金属离子螯合。通常而言, 配位基团多、络合能力强、络合物稳定。如邻苯二酚, 其单元结构中的两个相邻的酚羟基, 在阳离子存在时, 如 Fe^{3+} 或 Al^{3+} , 酚羟基的质子可以在低 pH 值下被置换形成氧负离子, 而脱质子酚基具有较高的电荷密度, 给金属阳离子提供了良好的配体, 从而形成稳定的五元环螯合物; 而邻苯三酚结构中具有三个酚羟基, 虽然第三个酚羟基没有参与络合, 但可以

促进其他两个酚羟基的离解, 从而形成更稳定的络合物。植物多酚与金属离子的络合性能还受 pH 值、紫外线等外部环境的影响。如 pH 值 < 4.0 时, 形成一配基络合物; $4 < \text{pH 值} < 6$ 时, 形成二配基络合物; pH 值 > 7.0 时, 形成三配基络合物^[23]。

植物多酚与金属离子的络合作用是其多种应用的化学基础, 近些年在医药、食品、环境、能源等领域的突破^[2-3, 18], 都是建立在植物多酚与金属离子络合作用的基础之上。

2 植物多酚在木材中的含量和分布特征及其对木材加工性能的影响

2.1 木材中植物多酚的含量和分布特征

植物多酚是木材的重要组成部分, 存在于大部分树种的木质部中, 是决定木材色泽的主要成分。常用的木材树种, 如: 栎树 (*Quercus* spp.)、桉树 (*Eucalyptus* spp.)、枫木 (*Liquidambar formosana*)、桃花心 (*Swietenia mahagoni*)、泡桐 (*Paulownia* spp.)、楸木 (*Catalpa duclouxii* Dode)、落叶松 (*Larix gmelinii*) 等, 其多酚含量均在 3% 以上, 而葡萄牙栎 (*Quercus variabilis* Bl.) 的心材中多酚含量甚至高达 15%^[24]。不同树种, 植物多酚的含量、种类和性能各不相同, 即使相同树种, 产地、部位不同, 其含量也不同^[25]。通常而言, 心材植物多酚高于边材, 早材高于晚材, 薄壁细胞、导管高于纤维细胞(管胞), 细胞腔、胞间层周边的高于细胞壁^[26]。

植物多酚与木材组分之间的作用较为复杂, 其存在的状态和位置不同, 作用方式也不同^[27]。在新鲜的木材中, 植物多酚主要以液体形式存在于树脂道和细胞腔中; 在干燥后的木材中, 随着干燥过程水分迁移和蒸发, 植物多酚发生迁移和附集, 主要以固体形式, 通过物理吸附或次级键作用, 存在于各类细胞中^[28]。其中: 细胞腔或胞间层中的植物多酚, 主要是通过物理吸附存在于细胞的内、外壁上^[24]; 而细胞壁中的植物多酚, 通过氢键、疏水作用和范德华作用力等次级键作用^[29], 与纤维素、半纤维素等多糖类物质结合^[30-31]。

目前, 植物多酚与多糖分子的作用机制尚不清楚, 大部分观点认为植物多酚是以疏水键、多

点氢键与多糖结合, 并提出类似植物多酚与蛋白质的“手-手套”“夹子-锯齿”“锁-钥”等分子识别模型。而有关植物多酚与木质素结合的报道较少, 文献也只提及木质素中含有植物多酚, 但无具体的作用方式, 可能是由于植物多酚性质活泼, 很容易发生缩合或者降解反应; 加之, 植物多酚与木质素结构复杂且相似, 导致研究难度增加。

2.2 植物多酚对木材加工性能的影响

1) 颜色: 植物多酚的酚羟基, 尤其邻位酚羟基(邻苯二酚、邻苯三酚)容易被氧化, 形成醌基, 从而使颜色变深, 尤其是在高温和湿热蒸汽的作用下, 羟基经氧化转化为羰基、羧基、酯基和酮基等, 使木材的颜色发生变化; 此外, 植物多酚中的色素、单宁等在有氧的条件下易发生氧化反应变色, 从而形成色差。

在木材加工过程中植物多酚与刀具中的铁离子反应, 生成单宁酸铁, 形成黑点或色斑。而在实际的生产过程, 植物多酚对颜色的影响是多重反应叠加致使木材变色, 在络合的同时, 常常发生氧化还原反应。

2) 表/界面性能(涂饰和胶合性能): 植物多酚易迁移, 在木材的加工和使用过程中, 尤其是在旋切、热磨过程中受到机械挤压以及干燥过程中受湿、热等外力的作用, 存在于细胞液中的液态植物多酚随着水分子迁移、蒸发, 并附积在木材的表面, 从而改变原有木质表面的性能, 降低其自由能^[32-33], 导致木材表面胶合、涂饰状况恶化, 从而影响木材的胶合和涂饰性能。

3) 木材加工性能: 植物多酚易迁移、性质活泼, 对木材加工的胶合^[5, 34]、表面涂饰^[6-7]、防腐处理、防霉处理^[8]等具有显著影响, 还易导致木工机械刀具损伤^[9]。

植物多酚在水溶液中易溶出, 在施胶过程中, 尤其是浸渍酚醛树脂胶时, 多酚在水和碱的共同作用下, 水解形成单宁酸, 改变了酚醛树脂的酸碱度, 阻止或延缓酚醛树脂固化过程的聚合反应^[35]; 且植物多酚中含有大量的活性基团, 如酚羟基、羧基等, 这些基团易与酚醛树脂发生自缩合反应, 改变原有树脂的酚/醛的量比, 降低酚醛树脂的活性^[5, 32], 从而影响胶黏剂的固化。

3 植物多酚在木材加工中的应用

3.1 制备单宁胶黏剂和聚氨酯涂料

单宁酸或者栲胶是一种可从多种植物中提取的天然植物多酚, 含有多个邻苯二酚和邻苯三酚基团, 可以提供多个物理/化学键位, 使其易发生酚核上的亲电反应和羟基衍生化反应, 在甲醛或异氰酸酯等交联剂的作用下, 固化生成不溶不熔的树脂^[36], 可作为天然酚原料替代苯酚或间苯二酚制备胶黏剂, 用于人造板生产。主要原理是单宁酸与醛在酸性或碱性条件下发生缩合反应, 生成单宁酸-醛树脂, 如南非、澳大利亚利用黑荆树皮单宁, 阿根廷用坚木单宁, 我国用落叶松单宁合成的单宁胶黏剂, 其使用性能与酚醛树脂相当, 在刨花板、胶合板以及耐水瓦楞纸板等领域得到了一定推广应用^[1]。将单宁酸与聚酰胺多胺-环氧氯丙烷直接混合后, 可以形成复合凝胶, 由于静电作用和氢键的协同效应, 复合凝胶显示出了优异的粘附性能^[37]。采用单宁酸和聚乙烯亚胺共交联网络改性的豆粕胶黏剂, 制备的胶合板也展现了较高的湿粘接强度^[38]。在聚氨酯涂料的制备过程中, 常引入植物多酚或其衍生物类分子结构, 使聚氨酯分子具有更为丰富的氢键供体结构, 增强其在基材表面的粘附性^[39], 且植物多酚结构能够使聚氨酯分子链间形成更为复杂的氢键作用和疏水相互作用等, 从而增强涂料的力学性能和耐水性能^[40]。

虽然利用植物多酚制备胶黏剂和涂料在工业化应用方面取得了一定进展, 但在大规模工业化推广过程中还存在一些问题: 植物多酚具有多个物理、化学键位, 性质活泼, 在胶黏剂和涂料的合成过程中, 合成路径的稳定控制难度极大; 另外, 植物多酚是一种天然生物质原料, 存在一定的变异性, 这对产品质量的稳定性是一个巨大的考验; 此外, 与脲醛和酚醛树脂相比, 植物多酚的成本依然偏高。

3.2 诱发木材化学变色

植物多酚是人类最早利用的天然着色剂之一。很早以前, 人们使用烧酒浸泡红木锯屑, 取浸泡液擦洗家具表面^[41], 保持木材表面颜色美观。20世纪90年代, 有学者开始探索利用铁、铬等离子

诱导枫树、栎木等木材变色,由于变色后材料色泽不均、颜色暗淡等原因,尚未引起产业的重视^[42]。近些年,随着人们对环保和产品个性化的追求,同时伴随着高级灰装修风格的兴起,学者们又将目光投向了化学变色,主要是利用 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 离子与木材中多酚发生络合反应^[43],生成单宁酸铁,促使多酚电荷转移跃迁,使其电子从酚氧基配体 π 轨道跃迁到金属离子 d 轨道,改变植物多酚在紫外-可见区域的吸收峰,从而诱发木材颜色发生灰变,满足市场的需求。目前,使木材发生化学变色的主要有2种工艺:一是将铁盐溶液通过浸渍或涂饰方式施加到木材表面,与木材中的多酚发生络合反应,从而改变木材颜色^[44-45];二是将铁盐与植物多酚添加到涂料中,通过配色,使木材表面颜色发生变化。

与现有的染料着色相比,木材化学变色不仅可以最大限度地保留木材天然纹理,还可以使其层次感更加分明;同时具有绿色、环保等特点,但也存在色系单调(主要以灰、黑色为主),耐光色牢度不稳定,不同产地、不同批次、不同部位(心边材、早晚材)变色不均、不稳定等问题,如何控制变色的稳定性是未来产业化过程需要解决的关键技术问题。

3.3 提高木材尺寸稳定性

植物多酚的分子中含有大量的邻苯二酚或邻苯三酚基团,能够与多价的金属(铁、铝)离子产生络合作用,生成不溶、疏水的植物多酚-金属络合物。根据上述原理,将植物多酚和金属盐浸渍到木材中,他们在胞间层、细胞腔中发生络合反应,生成多酚金属络合物,附着在木材细胞的内、外壁表面,有助于增强木材的疏水性能^[46];此外,进入到细胞壁中的多酚和金属离子,会与纤维素、半纤维素之间形成氢键或疏水键,形成“多糖-植物多酚-金属离子”大分子结构,这种大分子结构在细胞壁内产生空间位阻,减小木材吸湿和解吸过程中产生的膨胀或收缩^[47]。

前期实验表明,杨木、桦木、落叶松等速生人工林木材经过栲胶与硫酸铝和硫酸亚铁处理后,其耐水性能、尺寸稳定性、力学性能等得到了大幅度的改善^[48]。与常规脲醛、酚醛、糠醛等树脂浸

渍改性方法相比,植物多酚络合改性技术更加绿色、环保。目前,正在评估产业化推广可行性和转化路径。

3.4 抗防腐剂流失

植物多酚锯齿状的酚羟基结构,易与金属离子络合,形成稳定的五元环结构,经常被用于固定金属离子。早在20世纪80年代,就有学者提出多酚固定防腐剂的设想^[49],特别自2003年12月起,美国、欧盟、日本、中国等国家相继禁止和限用CCA处理木材后,铜和硼基等环保型木材防腐剂相继问世。与CCA相比,这两类防腐剂的最大缺点就是易流失,许多学者尝试通过植物多酚将铜、硼等防腐剂的有效组分固定在木材中^[50],以减少防腐剂的流失。

3.5 多酚原位络合固定

植物多酚在木材中以一种无定型的状态存在,并且具有一定的水溶性,在木材的加工和储存过程中,经常会迁移到木材表面,改变了木材的胶合性能和表面涂饰性能,或被空气氧化,导致木材变色等缺陷。植物多酚的基本组成单元为邻苯二酚、邻苯三酚、黄烷醇等^[51],易与金属离子发生络合反应,形成稳定的五元环螯合物,被原位固定在细胞壁中^[52],利用硫酸亚铁、硫酸铝等金属离子处理桉树、栎木等木材后,再制造重组木、胶合板等,其开裂、脱胶现象明显减少,取得了积极的效果^[53-54]。

4 结语

植物多酚是木材的重要组成部分,存在于大部分树种中,是木材抽提物的主要成分之一。以往对植物多酚的研究重点,主要集中在多酚对木材的胶合、涂饰、色泽等加工和使用性能的影响;近些年,随着植物多酚在生物化学、食品、材料、环境、医药、能源等领域取得了重大突破,研究人员也开始探索将植物多酚作为改性剂,在木材化学变色、改善木材尺寸稳定性、减少木材抗防腐剂重金属流失、植物多酚固定等方面进行了探索性研究,取得了一些进展,如木材化学变色等成果已经实现了产业化。

植物多酚作为木材次生代谢产物,与木材组

分具有天然的亲缘关系, 随着对多酚及其衍生物研究不断深入, 将木材作为多酚的底物, 在木材改性、木质多酚金属盐功能材料、净化金属废液等方面具有广泛应用前景。

参考文献:

- [1] 石碧, 狄莹. 植物多酚[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] XU L Q, Neoh K G, Kang E T. Natural polyphenols as versatile platforms for material engineering and surface functionalization[J]. *Progress in Polymer Science*, 2018, 87: 165-196.
- [3] Shin M, Park E, Lee H. Plant-inspired pyrogallol-containing functional materials[J]. *Advanced Functional Materials*, DOI: 10.1002/adfm.201903022.
- [4] 李坚. 木材科学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] Santoso M, Widyorini R, Agus Prayitno T, et al. The effects of extractives substances for bonding performance of three natural binder on nipa fronds particleboard[J]. *KnE Life Sciences*, 2019, 4(11): 227.
- [6] Ghofrani M, Mirkhandouzi F Z, Ashori A. Effects of extractives removal on the performance of clear varnish coatings on boards[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(21): 3019-3024.
- [7] Malik J, Ozarska B, Santoso A. Colour changes and morphological performance of impregnated jabon wood using polymerised merbau extractives[J]. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 2018, 20(1): 118-221.
- [8] Tondi G, Wieland S, Wimmer T, et al. Tannin-boron preservatives for wood buildings: Mechanical and fire properties[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, 70(5): 689-696.
- [9] 彭万喜, 朱同林, 郑真真, 等. 木材抽提物的研究现状与趋势[J]. *林业科技开发*, 2004, 18(5): 6-9.
- PENG W X, ZHU T L, ZHENG Z Z, et al. Present situation and developing tendency of extracts from wood[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2004, 18(5): 6-9.
- [10] ZHOU H H, SUN X Y, ZHANG L L, et al. Fabrication of biopolymeric complex coacervation core micelles for efficient tea polyphenol delivery via a green process[J]. *Langmuir*, 2012, 28(41): 14553-14561.
- [11] Rahim M A, Kristufek S L, Pan S J, et al. Phenolic building blocks for the assembly of functional materials[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(7): 1904-1927.
- [12] Braun D E, Bhardwaj R M, Florence A J, et al. Complex polymorphic system of Gallic acid—five monohydrates, three anhydrides, and over 20 solvates[J]. *Crystal Growth & Design*, 2013, 13(1): 19-23.
- [13] Ejima H, Richardson J J, Liang K, et al. One-step assembly of coordination complexes for versatile film and particle engineering[J]. *Science*, 2013, 341(6142): 154-157.
- [14] Maier G P, Rapp M V, Waite J H, et al. Adaptive synergy between catechol and lysine promotes wet adhesion by surface salt displacement[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 628-632.
- [15] Liu R, Zhu J J, Luo J, et al. Synthesis and application of novel UV-curable hyperbranched methacrylates from renewable natural tannic acid[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77(1): 30-37.
- [16] Guo J L, Suma T, Richardson J J, et al. Modular assembly of biomaterials using polyphenols as building blocks[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2019, 5(11): 5578-5596.
- [17] Yüksel E, Bilici A, Geçibesler İ H, et al. Synthesis and antioxidant activities of phenolic Schiff base monomers and polymers[J]. *Canadian Journal of Chemistry*, 2020, 98(3): 151-157.
- [18] Sedó J, Saiz-Poseu J, Busqué F, et al. Catechol-based biomimetic functional materials[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(5): 653-701.
- [19] Khalil M I, Al-Zahem A M, Al-Qunaibit M H. Synthesis, characterization, mössbauer parameters, and antitumor activity of Fe (III) curcumin complex[J]. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, DOI: 10.1155/2013/982423.
- [20] Zhao G X, Huang X B, Tang Z W, et al. Polymer-based nanocomposites for heavy metal ions removal from aqueous solution: A review[J]. *Polymer Chemistry*, 2018, 9(26): 3562-3582.
- [21] Elhabiri M, Carrër C, Marmolle F, et al. Complexation of iron(III) by catecholate-type polyphenols[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2007, 360(1): 353-359.
- [22] Guo J L, Tardy B L, Christofferson A J, et al. Modular assembly of superstructures from polyphenol-functionalized building blocks[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(12): 1105-1111.
- [23] Boniecki M T, Freibert S A, Mühlenhoff U, et al. Structure and functional dynamics of the mitochondrial Fe/S cluster synthesis complex[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1287.
- [24] Miranda I, Sousa V, Ferreira J, et al. Chemical characterization and extractives composition of heartwood and sapwood from *Quercus faginea*[J]. *PLoS One*, DOI: 10.1371/journal.pone.0179268.
- [25] Chang T C, Chang S T. Wood photostabilization roles of the condensed tannins and flavonoids from the EtOAc fraction in the heartwood extract of *Acacia confusa*[J]. *Wood Science and Technology*, 2018, 52(3): 855-871.
- [26] Giovando S, Koch G, Romagnoli M, et al. Spectro-topochemical investigation of the location of polyphenolic extractives (tannins) in chestnut wood structure and ultrastructure[J]. *Industrial Crops and Products*, DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111767.
- [27] Mishra G, Collings D A, Altaner C M. Cell organelles and fluorescence of parenchyma cells in *Eucalyptus bosistoana* sapwood and heartwood investigated by microscopy[J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2018, 48(1): 1-10.
- [28] Bariska M, Pizzi A. The interaction of polyflavonoid tannins with wood cell-walls[J]. *Holzforschung*, 1986, 40(5): 299-302.
- [29] Billes F, Mohammed-Ziegler I, Bombicz P. Vibrational spectroscopic study on the quantum chemical model and the X-ray structure of Gallic acid, solvent effect on the structure and spectra[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2007, 43(1): 193-202.
- [30] Tang H R, Covington A D, Hancock R A. Structure-activity relationships in the hydrophobic interactions of polyphenols with cellulose and collagen[J]. *Biopolymers*, 2003, 70(3): 403-413.
- [31] Bruno M, Björn L. Brief overview on cellulose dissolution/regeneration interactions and mechanisms[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2015(222): 502-508.
- [32] Yamamoto A, Rohumaa A, Hughes M, et al. Surface modification of birch veneer by peroxide bleaching[J]. *Wood Science and Technology*, 2017, 51(1): 85-95.
- [33] Baar J, Paschová Z, Hofmann T, et al. Natural durability of subfossil oak: Wood chemical composition changes through the ages[J]. *Holzforschung*, 2019, 74(1): 47-59.
- [34] Roffael E. Significance of wood extractives for wood bonding[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(4): 1589-1596.
- [35] 雷洪, 杜官本, Pizzi A. 单宁基木材胶黏剂的研究进展[J]. *林产工业*, 2008, 35(6): 15-19.
- LEI H, DU G B, PIZZI A. Research progress of tannin-based wood adhesive[J]. *China Forest Products Industry*, 2008, 35(6): 15-19.
- [36] HUANG Y X, LIN Q Q, YU Y L, et al. Functionalization of wood fibers based on immobilization of tannic acid and in situ complexation of Fe(II) ions[J]. *Applied Surface Science*, DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145436.