

可食性涂膜及其对水产品品质的影响

赵丹丹, 胡俊, 陈文烜* (浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江杭州 310021)

摘要 水产品在进行加工与保鲜过程中极易发生腐败变质。利用可食性涂膜可有效抑制水产品在进行加工与保鲜过程中的微生物繁殖, 减少水产品的水分流失、脂肪氧化及蛋白质降解, 能提高水产品的品质并延长产品的货架期。重点介绍了几种主要的可食性涂膜材料, 分析了可食性涂膜对水产品品质的影响。

关键词 水产品; 可食性涂膜; 品质; 货架期

中图分类号 TS254 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)23-0004-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.23.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Edible Coatings and the Effects on Seafood Quality

ZHAO Dan-dan, HU Jun, CHEN Wen-xuan (Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310021)

Abstract Seafood is highly perishable during processing and preservation. Edible coatings can improve the quality of seafood products and extend their shelf life during processing and preservation by retarding microbial growth, reducing moisture loss, lipid oxidation and protein degradation. The various types of edible coatings and their effects on seafood quality were reviewed.

Key words Seafood; Edible coating; Quality; Shelf life

水产品具有极高的营养价值, 但因其有较高的含水量及丰富的蛋白质, 在保鲜与加工过程中极易引起微生物污染而发生腐败变质。可食性涂膜是以天然可食性物质(包括多糖、蛋白质、脂类等)为材料, 添加可食性的增塑剂、交联剂等, 通过分子间不同的相互作用, 以包裹、涂布或微胶囊等形式覆盖于食品表面, 形成具有保护作用的薄层, 具有生物可降解性、阻水性、透气性及抗菌性等特点^[1]。研究发现, 可食性涂膜可以通过抑制微生物的生长繁殖、减少脂肪氧化及蛋白质降解, 提高水产品的品质并延长产品的货架期。目前, 可食性涂膜已广泛用于水产品的保鲜、加工及储藏。笔者介绍了目前主要的可食性涂膜材料, 分析了可食性涂膜对水产品加工与保藏过程中品质的影响, 以期利用可食性涂膜来改善水产品品质提供理论依据。

1 可食性涂膜材料

1.1 多糖 多糖类可食性膜材料主要有纤维素、淀粉、果胶衍生物、海藻提取物(包括海藻酸盐、角叉菜胶和琼脂等)、树胶(包括阿拉伯树胶、黄芪胶和瓜尔豆等)和壳聚糖等。多糖类大分子具有较强的亲水性和透气性, 因此多糖类涂膜可通过补充食品表面水分以延缓水分流失, 同时多糖类涂膜对 O₂ 和 CO₂ 具有选择渗透性, 具有防止脂肪氧化等作用^[2]。

树胶是常用的多糖类涂膜材料。在水溶液中, 树胶分子发生重排形成胶束, 在分子间氢键作用下强化, 干燥后可形成结构稳定的可食性膜^[3]。不同树胶高分子链之间的分子间氢键作用范围不同, 使制备的可食性膜具有不同的成膜特性。目前主要用于制备可食性膜的树胶主要有植物分泌物(如阿拉伯树胶等)、植物的水浸提物(如果胶等)、种子胶(如瓜尔胶、角豆胶等)及海藻胶(如琼胶、褐藻胶等)等。

Mostafavi 等^[4]制备了黄耆胶-槐树豆胶可食性复合膜, 提高了膜的透明度、阻水性及机械强度, 认为该复合膜可作为新的食品包装材料。Liu 等^[5]以明胶和阿拉伯胶为基质制备了具有较强乳化性能的微胶囊, 且该微胶囊能有效防止油脂的氧化。Nie 等^[6]以褐藻胶和茶多酚为基质制备的可食性涂膜能有效抑制鲈鱼片在冷藏过程中挥发性盐基氮(TVB-N)的产生、脂肪氧化及蛋白质降解。

壳聚糖学名为聚-N-乙酰-D-葡萄糖胺, 是通过 β-D-(1-4)糖苷键连接而成的 2-乙酰胺基-2-脱氧-D-吡喃葡萄糖链节的线型聚合物, 来源于虾、蟹等甲壳类动物的甲壳质。壳聚糖是优良的涂膜材料, 具有无毒、可生物降解、生物相容性好、可抑菌、易成膜等特点, 已广泛应用于水产品的加工与贮藏。然而受分子结构的影响, 壳聚糖涂膜具有吸湿性、水溶性、透气性较差和机械强度较弱等缺点^[7], 因此可通过物理或化学改性的方法对壳聚糖的成膜特性进行改善。利用纳米材料可增强膜的机械强度和抗菌活性, 目前主要使用的纳米粒子有纳米 SiO_x、ZnO、TiO₂、Ag 及其混合物等。Sun 等^[8-9]利用纳米 SiO_x、CaCO₃ 等对壳聚糖进行改性, 能有效改善膜的微观结构, 增强机械性能, 制备的复合膜能有效延长美国红鱼的货架期。除了改性, 壳聚糖也可与其他材料复配以增强成膜性能。Dang 等^[10]将壳聚糖与淀粉复合, 增强了膜的挤压加工性能、拉伸强度和热稳定性, 降低了水溶性和表面黏性。壳聚糖也可与有机酸、天然防腐剂等抗菌剂复配制备抑菌膜。Vimaladevi 等^[11]利用乙酸、丙酸分别与壳聚糖复配制备抗菌膜, 有效延长了干制鲱鱼在常温储藏过程中的货架期。吴春华^[12]以壳聚糖为基质, 将没食子酸嵌入其分子骨架, 构建了抗氧化、抗菌活性优于壳聚糖的衍生物, 该壳聚糖衍生物能显著延长银鲱鱼在冷藏过程中的货架期。

1.2 蛋白质 在水溶液中, 蛋白质分子依靠氢键、二硫键、离子键及疏水键等基团的相互作用维持稳定结构。适当的高温 and 酸碱处理使蛋白质分子发生变性, 暴露其分子内部的

基金项目 浙江省农业科学院学科建设专项(2018-2020)。

作者简介 赵丹丹(1990—), 女, 浙江杭州人, 助理研究员, 博士, 从事水产品加工研究。*通信作者, 研究员, 博士, 从事水产品加工研究。

收稿日期 2019-06-12

疏水基团,二硫键断裂并重新交联,形成一个均匀的相对稳定的空间立体网络结构^[13]。蛋白类可食性膜的机械强度高、阻氧性高、透明性好、营养价值高,且易于消化吸收,近年来颇受欢迎。由于蛋白质的亲水-疏水平衡性,蛋白质对亲水表面具有良好的黏附性,但不具备水蒸气阻隔性能。另外,在蛋白质膜中通常会加入甘油、山梨醇等增塑剂来提高膜的弹性,但同时也会影响膜的阻水性。

目前主要用于制备可食性膜的蛋白质主要有酪蛋白、乳清、大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白、胶原蛋白、小麦面筋蛋白、明胶、角蛋白和蛋清等一些生物可降解资源,且一般可从加工副产物中回收利用。蛋白质膜在水产品保鲜与加工中已得到广泛应用。Shokri 等^[14]研究了乳过氧化氢酶-乳清蛋白可食性涂膜对 4℃ 冷藏虹鳟鱼品质的影响,结果发现,与对照组相比,该涂膜可有效改善虹鳟鱼在冷藏过程中的品质,减少 TVB-N 的产生、脂肪氧化、腐败微生物的繁殖,可将虹鳟鱼的货架期由 12 d 延长至 16 d。Rodriguez-Turienzo 等^[15]发现浓缩乳清蛋白与甘油 1:1 混合制备可食性膜可有效改善冷冻大西洋鲑鱼品质。Dursun 等^[16]利用大豆分离蛋白、浓缩乳清蛋白、蛋清粉蛋白、小麦蛋白及鱼肌肉蛋白等制备了蛋白质可食性膜,并发现该类膜可延长真空包装的热熏虹鳟鱼在冷藏过程中的货架期。Lin 等^[17]将玉米蛋白与抗氧化剂复合制备可食性膜,用于保持市售鱼丸在冷藏过程中的品质。Wang 等^[18]用胶原蛋白和溶菌酶制备了可食性涂膜保鲜三文鱼片,发现该涂膜可有效保持三文鱼片品质,能够抑制三文鱼片在冷藏过程中 TVB-N 的产生及微生物的生长繁殖。Wang 等^[19]通过鱼明胶-羧酸盐纤维素纤维复配,增强了鱼明胶涂膜的成膜性能和阻水性。

1.3 脂类 脂类物质是防止食品基质中水分迁移的有效屏障。脂类物质化学基团的分布、脂肪链的长度,以及不饱和程度等因素影响了脂类物质的极性及其水分迁移的程度,其中长链、极性低、不饱和度低的脂肪酸能降低食品的水分迁移率^[20]。脂质本身不具有成膜性,但可以与其他涂膜材料混合后制备复合性涂膜,提高可食性膜的凝聚力、疏水性及弹性,从而有效防止水分扩散,保障食品的品质、风味、色泽及微生物安全^[21]。

蜡是长链脂肪酸与长链脂肪醇形成的酯类物质。与其他脂类物质相比,蜡含有少量的极性基团及较多的长链脂肪醇和烷烃,能有效地阻止水分迁移。单硬脂酸甘油酯、双硬脂酸甘油酯以及甘油三脂是食品中常用的涂膜材料,因其化学结构不同,水蒸气渗透性等功能特性也不同。其中,短链的甘油三酯可部分水溶,然而长链的分子难溶于水。与饱和脂肪酸相比,不饱和脂肪酸能够显著降低熔点并增加水分迁移率。另外,脂质中的乙酰化程度越高,亲水的羟基基团越少,涂膜材料的防水作用越强。Bravin 等^[22]发现豆油、玉米淀粉及甲基纤维素制备的可食性涂膜具有较好的阻水性,能有效降低饼干在存放过程中的湿度变化,延长饼干的货架期。Valencia-Chamorro 等^[23]用羟丙甲纤维素、蜂蜡、虫胶等材料制备了复合涂膜,发现该涂膜能有效抑制柑橘在储藏过

程中霉菌的产生,并减少柑橘质量损失,且对柑橘的风味感官等品质无不利影响,具有较好的保鲜效果。王丽^[24]以棕榈油、粉末磷脂、蔗糖酯、海藻糖等为主要原料,制备了一种乳化型脂质类保鲜剂,发现该保鲜剂对大米具有较好的保鲜效果,减少了大米在储藏过程中发生的脂肪氧化、水分流失、黏性和硬度值下降等品质问题。目前国内外关于利用脂类作为水产品涂膜材料的研究较少。

2 可食性涂膜对水产品品质的影响

2.1 脂肪氧化 油脂含量高的鱼类等水产品冷冻、保鲜或加工过程中会发生脂肪氧化,引起酸败。当鱼体死亡后体内的抗氧化功能机制失去作用,鱼肉的可食部分接触氧气后,脂肪酸氧化形成脂质氢过氧化物,其形成速率与早期脂质氧化的速度有关,可通过测定过氧化值进行分析。脂质氢过氧化物进一步发生裂解,产生醛、酮等挥发性二级氧化产物,导致酸败气味产生,其氧化产物醛类等可通过硫代巴比妥酸法(TBARS)进行测定分析。同时,鱼死后肌肉组织中酯化脂质的酶解反应会导致游离脂肪酸的分解^[25]。因此,此类水产品及其加工制品会在加工或储藏过程中因脂肪氧化产生酸败气味而达到货架期终点。

已有学者研究了可食性涂膜对水产品脂肪氧化的影响。Rodriguez-Turienzo 等^[15]分析了乳清蛋白涂膜对鲑鱼过氧化氢值和 TBARS 值的影响,发现乳清蛋白涂膜能延缓鲑鱼片的脂肪氧化,并保持其风味特性。研究表明,在涂膜中添加抗氧化剂能降低鱼体肌肉脂肪氧化速率。Song 等^[26]发现在藻朊酸盐涂膜中添加 5% 的维生素 C 能更加有效地延长武昌鱼在(4±1)℃下冷藏时的货架期。Li 等^[27]研究发现,壳聚糖结合茶多酚等天然防腐剂可有效延长红鼓鱼在冷藏过程中的货架期。Choulitoudi 等^[28]用羧甲基纤维素钠包埋迷迭香精油提取物制备了熏鳗鱼的可食性涂膜,发现在涂膜中添加 2 000 mg/L 迷迭香精油及 200 mg/L 精油提取物的混合物可有效抑制熏鳗鱼脂肪氧化一级、二级产物的产生。此外,可食性涂膜结合不同包装方式也能有效减少鱼肉在冷藏过程中的脂肪氧化。Duan 等^[29]研究发现,壳聚糖涂膜结合真空或气调包装可有效降低鳕鱼肉在冷藏过程中的 TBARS 值。Binsi 等^[30]用阿拉伯胶涂膜结合真空包装能有效延缓鲭鱼在冷藏过程中发生的脂肪氧化,改善感官品质和质地结构,延长货架期。

2.2 蛋白质水解 水产品由于水分含量高、肌肉组织脆弱、内源酶活跃,不同的加工处理及储藏方式对其产品质量影响巨大,主要会引起化学组分变化及肌肉蛋白质降解。水产品中的蛋白质、氨基酸及其他含氮物质在内源酶或微生物酶的作用下被分解产生氨及胺类、硫化物、醇类、醛类、酮类、有机酸和其他小分子产物,使肌肉蛋白质发生聚合,并产生腐败气味^[31]。蛋白质降解时,其溶解性、乳化性、持水力、解冻汁液流失率、质构等理化特性会发生改变。

水产动物死后,肌肉发生糖酵解产生乳酸导致 pH 下降,内源蛋白酶如组织蛋白酶等得到释放,腐败微生物大量生长。微生物分泌的酶类会产生具有腐败气味的挥发性物质,

TVB-N 是蛋白质分解产生的氨以及胺类等碱性含氮物质,是水产品的鲜度指标。在内源酶及腐败细菌分泌的酶类作用下,氧化三甲胺分解成三甲胺。在腐败进程中,随着细菌数量的增加,三甲胺大量产生,TVB-N 不断增加,水产品鲜度下降。气单孢菌、肠杆菌、发光杆菌、希瓦氏菌及弧菌等是分解氧化三甲胺产生三甲胺的主要细菌^[32]。Qiu 等^[33]研究了壳聚糖和有机酸对日本鲈鱼品质的影响,发现经过处理后鱼肉中微生物生长与 TVB-N 均有一定下降。Cai 等^[34]研究了 ϵ -多聚赖氨酸、海藻酸钠等不同处理剂对日本鲈鱼在冷藏过程中品质的影响,发现经过处理后鲈鱼产生的 TVB-N 小于对照组。Mohan 等^[35]研究发现可食性壳聚糖涂膜能够抑制沙丁鱼在储藏过程中三甲胺氮和 TVB-N 的产生。Feng 等^[36]研究发现明胶-茶多酚涂膜能通过抑制金鲳鱼片肌原纤维的降解,延长其冷藏货架期。

2.3 K 值变化 K 值是评价水产品鲜度的指标。新鲜鱼肉的 K 值一般少于 10%,当鱼体死亡后鱼肉 K 值在内源酶和微生物酶的作用下逐渐增加。随着鱼体腐败进程的进行,K 值大幅度升高。鱼肉鲜度最适 K 值在 20%~60%。Ahmad 等^[37]用明胶及 25% 柠檬香茅精油处理鲈鱼片,分析其在 4℃ 冷藏过程中发生的微生物及物理化学变化,并以 K 值作为鲜度指标,结果发现,对照组的 K 值在冷藏 10 d 后达 66%,且感官评价超出可接受范围,而涂膜试验组的 K 值一直处于鲜度范围。Soares 等^[38]研究发现壳聚糖涂膜降低了鲑鱼肉在冻藏过程中 K 值的增加速率。Souza 等^[39]研究发现壳聚糖涂膜能显著减小 5-核苷酸酶活性,降低鲑鱼片的 K 值,延长货架期。Wu 等^[40]构建的壳聚糖-没食子酸保鲜剂能显著抑制银鲳鱼在冷藏过程中微生物的生长繁殖,降低鱼肉中 TVB-N 值,延缓脂质氧化,并抑制银鲳鱼中 ATP 的分解,降低 K 值,延长货架期 3~6 d。

3 展望

可食性涂膜可有效改善水产品加工与保鲜过程中的品质并延长货架期。关于如何制备安全高效、广谱抗菌、成膜性能好的可食性涂膜材料并应用于水产品加工与贮藏过程中的品质改善,需要更深入的研究。

参考文献

- [1] 提伟钢,于文越,邵士凤,等.可食性涂膜保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2013,13(2):49-52,57.
- [2] KESTER J J,FENNEMA O R. Edible films and coatings:A review [J]. Food technology,1986,40(12):47-59.
- [3] DEGHANI S,HOSSEINI S V,REGENSTEIN J M. Edible films and coatings in seafood preservation:A review[J]. Food chemistry,2017,240:505-513.
- [4] MOSTAFAVI F S,KADKHODAE R,EMADZADEH B,et al. Preparation and characterization of tragacanth-locust bean gum edible blend films[J]. Carbohydrate polymers,2016,139:20-27.
- [5] LIU S,LOW N H,NICKERSON M T. Entrapment of flaxseed oil within gelatin-gum Arabic capsules[J]. Journal of the American oil chemists society,2010,87(7):809-815.
- [6] NIE X B,WANG L H,WANG Q,et al. Effect of a sodium alginate coating infused with tea polyphenols on the quality of fresh Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets[J]. Journal of food science,2018,83(6):1695-1700.
- [7] 姜燕,柳佳齐,鲍慧娟,等.壳聚糖涂膜保鲜剂的改性研究进展[J].食

- 品工业科技,2013,34(18):391-393,398.
- [8] SUN T,WU C L,HAO H,et al. Preparation and preservation properties of the chitosan coatings modified with the *in situ* synthesized nano SiO₂[J]. Food hydrocolloids,2016,54:130-138.
- [9] SUN T,HAO W T,LI J R,et al. Preservation properties of *in situ* modified CaCO₃-chitosan composite coatings [J]. Food chemistry,2015,183:217-226.
- [10] DANG K M,YOKSAN R. Development of thermoplastic starch blown film by incorporating plasticized chitosan [J]. Carbohydrate polymers,2015,115:575-581.
- [11] VIMALADEVI S,PANDA S K,XAVIER K A M,et al. Packaging performance of organic acid incorporated chitosan films on dried anchovy (*Stolephorus indicus*) [J]. Carbohydrate polymers,2015,127:189-194.
- [12] 吴春华.壳聚糖衍生物分子修饰机理及其在银鲳鱼保鲜中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [13] KUNTE L A,GENNADIOS A,CUPPETT S L,et al. Cast films from soy protein isolates and fractions [J]. Journal of food science,1997,74(2):115-118.
- [14] SHOKRI S,EHSANI A,JASOUR M S. Efficacy of lactoperoxidase system-whey protein coating on shelf-life extension of rainbow trout fillets during cold storage(4°C) [J]. Food and bioprocess technology,2015,8(1):54-62.
- [15] RODRIGUEZ-TURIENZO L,COBOS A,MORENO V,et al. Whey protein-based coatings on frozen Atlantic salmon (*Salmo salar*): Influence of the plasticizer and the moment of coating on quality preservation [J]. Food chemistry,2011,128(1):187-194.
- [16] DURSUN S,ERKAN N. The effect of edible coating on the quality of smoked fish [J]. Italian journal of food science,2014,26(4):370-382.
- [17] LIN L S,WANG B J,WENG Y M. Quality preservation of commercial fish balls with antimicrobial zein coatings [J]. Journal of food quality,2011,34(2):81-87.
- [18] WANG Z,HU S F,GAO Y P,et al. Effect of collagen-lysozyme coating on fresh-salmon fillets preservation [J]. LWT-Food Science and Technology,2017,75:59-64.
- [19] WANG W H,LIU Y W,JIA H J,et al. Effects of cellulose nanofibers filling and palmitic acid emulsions coating on the physical properties of fish gelatin films [J]. Food biophysics,2017,12(1):23-32.
- [20] DE AZEREDO H M C. Edible coatings [M]//RODRIGUES S,FERNANDES F A N. Advances in fruit processing technologies. Boca Raton: CRC Press Inc.,2012:345-361.
- [21] SÁNCHEZ-ORTEGA I,GARCÍA-ALMENDÁREZ B E,SANTOS-LÓPEZ E M,et al. Antimicrobial edible films and coatings for meat and meat products preservation [J]. The scientific world journal,2014,2014:1-18.
- [22] BRAVIN B,PERESSINI D,SENSIDONI A. Development and application of polysaccharide-lipid edible coating to extend shelf-life of dry bakery products [J]. Journal of food engineering,2006,76(3):280-290.
- [23] VALENCIA-CHAMORRO S A,LLUÍS PALOU,MIGUEL ÁNGEL DEL RÍO,et al. Performance of hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)-lipid edible coatings with antifungal food additives during cold storage of 'Clemenules' mandarins [J]. LWT-Food Science and Technology,2011,44(10):2342-2348.
- [24] 王丽.脂质类大米保鲜剂的研究[D].郑州:河南工业大学,2013.
- [25] BREMNER A H. Safety and quality issues in fish processing [M]. Boca Raton:Woodhead Publishing,2002.
- [26] SONG Y L,LIU L,SHEN H X,et al. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. Food control,2011,22(3):608-615.
- [27] LI T T,LI J R,HU W Z,et al. Quality enhancement in refrigerated red drum (*Sciaenops ocellatus*) fillets using chitosan coatings containing natural preservatives [J]. Food chemistry,2013,138(2/3):821-826.
- [28] CHOULITOU DI E,GANIARI S,TSIRONI T,et al. Edible coating enriched with rosemary extracts to enhance oxidative and microbial stability of smoked eel fillets [J]. Food packaging and shelf life,2017,12:107-113.
- [29] DUAN J Y,JIANG Y,CHERIAN G,et al. Effect of combined chitosan-krill oil coating and modified atmosphere packaging on the storability of cold-stored lingcod (*Ophiodon elongates*) fillets [J]. Food chemistry,2010,122(4):1035-1042.

- [2] MITSCH W J, GOSSELINK J G, et al. Wetlands [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Physical science basis contribution [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [4] 孟焯, 王琳, 张仲胜, 等. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究[J]. 湿地科学, 2016, 14(5): 710-716.
- [5] 陈克林, 张小红, 吕咏. 气候变化与湿地[J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 73-77.
- [6] 谢传宁. 气候变化与湿地生态系统的关系[J]. 绿色科技, 2011(7): 187-189, 194.
- [7] 雷光春. “湿地保护”: 应对气候变化的自然方案[N]. 中国妇女报, 2019-02-19(08).
- [8] 董瑜. 气候变化对湿地生态系统影响的研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2013, 25(2): 37-40.
- [9] 张树春. 全球合作是解决气候变化的金钥匙[J]. 环境科技, 1992, 12(3): 5-7.
- [10] 张树清, 张柏, 汪爱华. 三江平原湿地消长与区域气候变化关系研究[J]. 地球科学进展, 2001, 16(6): 836-841.
- [11] 徐玲玲, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 近20年盘锦湿地变化特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 483-490.
- [12] 纪玲玲, 申双和, 郭安红, 等. “三江源”气候变化及其对湿地影响的研究综述[J]. 吉林气象, 2009(1): 14-17, 43.
- [13] BROCK T C M, VIERSAN W V. Climatic change and hydrophite-dominated communities in inland wetland ecosystem[J]. Wetland ecology and management, 1992, 2: 37-49.
- [14] 李凤霞, 伏洋, 肖建设, 等. 长江源头湿地消长对气候变化的响应[J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 49-56.
- [15] LIU H J, BU R C, LIU J T, et al. Predicting the wetland distributions under climate warming in the Great Xing'an Mountains, northeastern China [J]. Ecological research, 2011, 26(3): 605-613.
- [16] 沃晓棠, 孙彦坤, 玄明君, 等. 气候变暖背景下扎龙湿地气候变化特征[J]. 气象科技, 2011, 39(1): 38-43.
- [17] 刘贵花. 三江平原挠力河流域水文要素变化特征及其影响研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [18] 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 772-779.
- [19] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158.
- [20] IPCC. Climate change and water [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [21] 吴绍洪, 赵宗慈. 气候变化和水的最新科学认知[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(3): 125-133.
- [22] 欧英娟, 彭晓春, 周健, 等. 气候变化对生态系统脆弱性的影响及其应对措施[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(12): 136-141.
- [23] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 120-128.
- [24] 董李勤, 章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 429-436.
- [25] HUGHES P D M, LOMAS-CLARKE S H, SCHULZ J, et al. The declining quality of late-Holocene ombrotrophic communities and the loss of *Sphagnum austrii* (Sull. ex Aust.) on raised bogs in Wales [J]. Holocene, 2010, 17: 613-625.
- [26] CHARMAN D J, BLUNDELL A, CHIVERRELL R C, et al. Compilation of non-annually resolved Holocene proxy climate records: Stacked Holocene peatland palaeo-water table reconstructions from northern Britain [J]. Quaternary science reviews, 2006, 25: 336-350.
- [27] SCHONING K, CHARMAN D J, WASTEGÅRD S. Reconstructed water tables from two ombrotrophic mires in eastern central Sweden compared with instrumental meteorological data [J]. The holocene, 2005, 15(1): 111-118.
- [28] BANASZUK P, KAMOCKI A. Effects of climatic fluctuations and land-use changes on the hydrology of temperate fluviogenous mire [J]. Ecological engineering, 2008, 32(2): 133-146.
- [29] 崔巍, 李伟, 张曼胤, 等. 湿地土壤生态功能研究概述[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 203-207.
- [30] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 622-628.
- [31] SONG C C, SUN L, HUANG Y, et al. Carbon exchange in a freshwater-marsh in the Sanjiang Plain, northeastern China [J]. Agricultural and forest meteorology, 2011, 151(8): 1131-1138.
- [32] 江长胜, 郝庆菊, 宋长春, 等. 垦殖对沼泽湿地土壤呼吸速率的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4539-4548.
- [33] 黄易. 纳帕海湿地退化对碳氮积累影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(13): 6095-6097.
- [34] 高志勇, 谢恒星, 李吉锋, 等. 气候变化对湿地生态环境及生物多样性的影响[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(2): 57-60.
- [35] SCHEFFER M, SZABÓ S, GRAGNANI A, et al. Floating plant dominance as a stable state [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2003, 100(7): 4040-4045.
- [36] 高永恒, 曾晓阳, 周国英, 等. 长江源区高寒湿地植物群落主要种群种间关系分析[J]. 湿地科学, 2011, 9(1): 1-7.
- [37] MOYLE P B, CECH J J. Fishes: An introduction to ichthyology [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1984.
- [38] 何斌源, 范航清, 王瑁, 等. 中国红树林湿地物种多样性及其形成[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4859-4870.

(上接第6页)

- [30] BINSI P K, NAYAK N, SARKAR P C, et al. Comparative evaluation of gum arabic coating and vacuum packaging on chilled storage characteristics of Indian mackerel (*Rastrelliger kanagartha*) [J]. Journal of food science and technology, 2016, 53(4): 1889-1898.
- [31] 李学鹏, 陈杨, 王金厢, 等. 水产品贮藏过程中肌肉蛋白质降解规律的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(12): 4844-4850.
- [32] HEISING J K, BOEKEL M A J S V, DEKKER M. Mathematical models for the trimethylamine (TMA) formation on packed cod fish fillets at different temperatures [J]. Food research international, 2014, 56(2): 272-278.
- [33] QIU X J, CHEN S J, LIU G M, et al. Quality enhancement in the Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets stored at 4 °C by chitosan coating incorporated with citric acid or licorice extract [J]. Food Chemistry, 2014, 162: 156-160.
- [34] CAI L Y, CAO A L, BAI F L, et al. Effect of ε-polylysine in combination with alginate coating treatment on physicochemical and microbial characteristics of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) during refrigerated storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1053-1059.
- [35] MOHAN C O, RAVISHANKAR C N, LALITHA K V, et al. Effect of chitosan edible coating on the quality of double filleted Indian oil sardine (*Sardinella longiceps*) during chilled storage [J]. Food hydrocolloids, 2012, 26(1): 167-174.
- [36] FENG X, NG V K, MIKŠ-KRAJNÍK M, et al. Effects of fish gelatin and tea polyphenol coating on the spoilage and degradation of myofibril in fish fillet during cold storage [J]. Food & bioprocess technology, 2017, 10(1): 89-102.
- [37] AHMAD M, BENJAKUL S, SUMPAPAPOL P, et al. Quality changes of sea bass slices wrapped with gelatin film incorporated with lemongrass essential oil [J]. International journal of food microbiology, 2012, 155(3): 171-178.
- [38] SOARES N M, MENDES T S, VICENTE A A. Effect of chitosan-based solutions applied as edible coatings and water glazing on frozen salmon preservation-A pilot-scale study [J]. Journal of food engineering, 2013, 119(2): 316-323.
- [39] SOUZA B W S, CERQUEIRA M A, RUIZ H A, et al. Effect of chitosan-based coatings on the shelf life of salmon (*Salmo salar*) [J]. Journal of agricultural food chemistry, 2010, 58(21): 11456-11462.
- [40] WU C H, FU S L, XIANG Y C, et al. Effect of chitosan gallate coating on the quality maintenance of refrigerated (4 °C) silver pomfret (*Pampus argentus*) [J]. Food & bioprocess technology, 2016, 9(11): 1835-1843.