

气候变化对湿地影响的研究

董晓玉¹, 李长慧^{1*}, 杨多林², 魏胜强², 马少忠²

(1. 青海大学农牧学院, 青海西宁 810000; 2. 青海省祁连县林业与环境保护局, 青海海北 810400)

摘要 近年来, 全球气候变化以变暖为主, 冰川融化、海平面上升、各种自然灾害频发、环境劣变, 全球气候变化严重影响了人类的生存和发展。湿地具有重要的社会、经济和生态价值, 与森林、海洋并称地球三大生态系统, 湿地生态系统所具备的独特生态功能不仅与气候变化密切相关, 而且对气候的变化较其他生态系统更为敏感。因此, 从气候变化对湿地面积分布和主要生态功能的影响进行论述, 旨在为更好地保护和利用湿地生态系统以及应对气候变化提供理论依据。

关键词 湿地; 气候变化; 面积分布; 生态功能

中图分类号 S-3; X24 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)23-0007-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.23.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Impacts of Climate Change on Wetlands

DONG Xiao-yu¹, LI Chang-hui¹, YANG Duo-lin² et al (1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810000; 2. Qilian County Forestry and Environmental Protection Bureau, Haibei, Qinghai 810400)

Abstract In recent years, global climate change has been dominated by warming. With extreme weather and natural disasters such as melting glaciers and rising sea levels, global climate change has seriously affected the survival and development of human beings, and the uniqueness of wetland ecosystems. Wetland has important social, economic and ecological values. It is also called the three major ecosystems of the earth and forests and oceans. Ecological functions are not only closely related to climate change but also sensitive to climate change. Therefore, this paper discussed the impact of climate change on wetland distribution and main ecological functions, aiming to provide a theoretical basis for better protection and utilization of wetland ecosystems and for addressing climate change.

Key words Wetland; Climate change; Area distribution; Ecological function

湿地是陆地与水体的过渡地带, 在全球范围分布广泛, 因其拥有独特的自然景观和丰富的生物多样性, 能为人类提供重要的社会、经济和生态价值而被称作“生物超市”和“地球之肾”^[1-2]。

在全球气候变化背景下, 地球系统出现了一系列客观现象, 例如, 干旱、洪涝、土壤沙漠化日益严重等。IPCC 第四次评估报告明确指出, 全球气候变化以变暖为主, 从而导致出现冰川融化、海平面上升、自然灾害频发、环境劣变等现象, 并且在未来全球气温仍然有持续上升的趋势^[3]。由于湿地生态系统及生态功能的复杂性, 湿地生态系统对气候变化较其他陆地生态系更加敏感^[4]。目前, 国内外对于气候变化与湿地之间关系的研究较多, 普遍认为湿地与气候变化之间是相互影响、相互作用的^[5], 根据前人的研究结果, 可将其简要概括为以下几个方面: 首先, 全球气候变化与湿地消长有密切关联, 其对湿地的影响作用主要体现为, 一方面气候变化可以改变湿地的能量和物质循环, 另一方面, 气候变化对湿地动植物也有显著影响, 这一影响将使得湿地的分布、生态功能及生态系统结构发生重大的变化^[6]; 其次, 湿地作为重要的“储碳库”, 储碳量要远高于其他生态系统, 根据调查报告显示, 湿地储存碳大约 525 Gt, 占全球碳库的 35% 左右, 可见湿地在全球碳循环中具有重要的作用^[7]。而在湿地的储碳量中以湿地土壤和泥炭地的储量最高, 湿地土壤中的碳

占土壤总蓄积量的 11%, 所以湿地土壤中碳的变化对湿地生态系统碳循环有深刻的影响, 特别是在对温室气体 (CO₂、CH₄) 的固定和释放中有重要影响。湿地通过植物的生长、死亡和动植物尸体的分解富集养分, 最终形成富含有机质的土壤和泥炭层, 对全球碳固定有积极作用; 同时, 湿地植物群落通过光合作用吸收 CO₂ 将其固定为有机物质的同时可释放出大量的 O₂, 所以湿地可以有效地调节大气组分^[5]。湿地作为大气中各温室气体的“源”“汇”, 湿地生境本身也会排放出温室气体, 转化成 CO₂、CH₄、NH₃ 等回到大气中。近年来, 人为干扰和气候变化加剧使得湿地生态系统平衡被打破, 从而导致湿地发生“源”“汇”转化, 碳物质释放大幅度增加, 加速了全球气候变暖进程。因此, 研究气候变化对湿地的影响对未来全球气候变化大背景下湿地的适应性管理和缓解气候变化带来的影响具有重要的意义^[6]。

湿地所具有的重要功能和价值以及它为全球提供的社会、经济和生态效益不言而喻。但是目前由于气候变化和人类活动两大因素的影响, 湿地正在快速消失, 有研究表明, 气候变化是导致湿地面积减少生态系统退化的主要因素^[8]; 调查显示, 1970—2015 年, 全球近 35% 的湿地消失并且消失速度是森林的 3 倍。目前, 湿地面积快速减少的同时, 还伴随着水体污染、生物多样性下降和物种入侵等威胁, 所以在应对气候变化过程中, 人们应该清楚地认识到湿地在减缓和适应气候变化方面的重要作用, 从而进一步加大力度保护湿地, 减少湿地流失和湿地持续退化, 恢复湿地生态系统, 更好地利用湿地生态系统来积极面对气候变化^[9]。笔者通过探究气候变化对湿地面积、空间分布以及湿地水文等主要生态功能的影响, 进一步揭露气候变化对湿地生态系统的重要作

基金项目 青海洮河源国家湿地公园管理局高寒湿地恢复技术研究项目基金(K151817)。

作者简介 董晓玉(1995—), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向: 饲草料生产加工及利用。* 通信作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事饲草料生产加工及利用研究。

收稿日期 2019-06-19

用,旨在为未来湿地保护和缓解气候变化提供一定的理论依据。

1 气候变化对湿地面积和分布的影响

影响湿地面积和分布的主要气象因子有气温、降雨量和蒸发量;但在研究气候变化对湿地生态的影响时,不能只考虑单一气候因子对湿地的影响,应综合考虑多种气象因子^[4]。相关研究表明,湿地面积一般与气温负相关,与降水量、相对湿度正相关,气候变化对湿地面积和分布所产生的影响因所处地域不同也存在一定的差异^[10-11]。干旱区和半干旱区对气候变化极为敏感,降水量的增加可以在一定程度上缓解湿地面积的减少,但在干旱和半干旱地区由于受季风的影响,蒸发量显著大于降水量,湿地面积呈现萎缩趋势^[4]。陈克林等^[5]认为降水减少将大大改变湿地面积,20世纪70年代,由于降水量较少,导致尕斯库勒湖面积减少,降低了上游泥炭地水位,使得泥炭地退化。纪玲玲等^[12]通过研究气候变化对北方泥炭地的影响时发现全球气温变暖,永久冻土开始融化,北半球冻土的南部边界开始北移,这一变化不仅会改变区域水文和地貌特性而且会影响碳循环过程,冻土层的减少会直接导致泥炭地的减少,使大量CO₂不断释放到大气中。国外学者曾对半干旱区以水生植物为主的湿地对气候的响应进行研究,同样认为半干旱区气温的升高与湿地面积的减少呈负相关,其研究表明在气温升高3~4℃后,湿地将会在5年之内减少70%~80%^[13]。

湿润区和半湿润区的降水量要远远大于干旱区和半干旱区,因此,湿润区和半湿润区的水文循环要较干旱区和半干旱区活跃。李凤霞等^[14]对长江源头气候变化对湿地影响进行研究,发现长江源头气候自1990年以来呈现暖湿化趋势,即气温升高,蒸发量小于降水量,使得湿地面积有明显的扩展,湿地面积在十年内增加了353.22 km²。但在进入21世纪以来在全球气候变化大背景的影响下,长江源头气温依然处于上升的趋势,降水量却出现下降的趋势,全年的蒸发量明显高于降水量,仅在2000—2004年湿地面积减少了20.57 km²。受全球气候变化的影响,预计到2050年,大兴安岭地区湿地面积消失30%,到2100年将约有60%的湿地消失^[15]。在半湿润区气候呈现暖干趋势,气温上升,降水量下降,蒸发量增加,水源不能及时供给,水位持续下降使得半湿润区湿地面积出现萎缩现象,更严重的是湿地将会向草地和耕地进行转变,进而影响湿地生态功能和生态环境^[16]。

2 气候变化对湿地生态功能的影响

2.1 气候变化对湿地水文的影响

水文条件是湿地形成过程中最重要的影响因素之一,不同的水文条件会形成不同的湿地类型。湿地水文在湿地物质循环方面具有重要的作用,是影响湿地生物组成的关键因素^[17]。湿地水文不仅在湿地生态系统和生态功能中有重要的作用,而且对于气候变化具有高度敏感性和重要的反馈作用。湿地水文的一系列变化势必会导致湿地生态系统退化、生态功能下降,引发一系列湿地生态环境问题。降雨、地表径流和地下水为湿地的主要水源,近年来由于全球气候变化,各地区降雨量和蒸发量明

显改变,引发水资源在时空上被重新分布导致降水模式降水量等发生改变,使湿地水源补给减少,从而影响湿地生态环境^[18-19]。气候变化对湿地水文的影响主要表现在以下两方面:①气候变化改变了水文循环和大气环流过程,这一变化不仅导致降雨总量发生变化,更严重的是降水强度和频率以及降水量时空分布不均,使自然灾害频发,对湿地物质、能量循环和水资源收支平衡产生影响,进而影响湿地水文过程和水循环^[20-21];②气温升高,相应的蒸发量增大,导致干旱的大面积出现,各方面的用水需求增大,间接减少了湿地水文补给,从而改变湿地的蒸散、水位、周期等水文过程^[22]。

由于湿地类型的多样性和生态系统内部的复杂性,不同类型湿地水分状况明显不同,各地区湿地水文水资源对全球气候变化的响应也不尽相同^[23-24]。沼泽湿地的唯一补给水源是来自降雨,相应的该类型湿地对气候变化的响应较为敏感^[25-26];国外相关研究发现,沼泽湿地由于降雨减少和地下水位下降,湿地面积锐减,湿地环境和湿地生态功能明显退化^[27];Banaszuk P等^[28]研究表明,气候变化是引起内陆河流域湿地水文水资源量变化的主要原因,例如在波兰境内的雷夫河流域,夏季气温升高、降雨量下降,导致流域内蒸发量增加了7%左右,地表径流量减少,导致流域内湿地地表水下降了60 cm左右,湿地土壤含水量也急剧降低。在高海拔及北方高纬度地,春夏季融雪径流是湿地水资源的主要补给来源,但近年来由于气候变化导致冬季径流增加,而春夏季径流量明显减小,水文循环现状发生改变,引起湿地水量的时空分布特征及可利用性受到显著影响,导致以春夏季融雪径流为主要补给方式的湿地对气候变化的响应更为敏感^[24]。内陆湖泊湿地水资源的主要补给来源是降水,更容易受到气候影响,对气候变化所引起的降水量和蒸发量之间的差额变化尤为敏感^[20]。我国西北干旱和半干旱区受气候变化的影响,大部分内陆湖泊水体向盐碱化和萎缩方向发展,若河川径流变化不明显,平原湖泊由于水体蒸发量增加,将会加快萎缩湿地水文水资源的变化,对湿地生态环境、生态功能产生重大的影响。

2.2 气候变化对湿地土壤的影响

湿地土壤是外部环境要素长期相互作用的产物,是构成湿地生态系统的又一重要环境因子,在湿地生态系统发挥其生态功能的过程中起着关键的不可替代的作用。湿地作为重要的“储碳库”,研究表明试点土壤和泥炭地其单位面积碳储量在各种生态系统中最高,而湿地土壤中的碳储量可占土壤总蓄积量11%,所以湿地土壤中碳的变化在湿地生态系统碳循环中起着关键性作用。但随着全球变暖,气温和大气中CO₂浓度升高,导致土壤温度升高,加速了土壤中植物残体的分解速率,使产生的CO₂或者CH₄释放到大气中去,湿地土壤碳库通过呼吸作用释放出的CO₂虽数量微小但对于大气中的CO₂含量变化有重大的影响,将有可能进一步影响气候的变化。所以湿地土壤中碳的变化在CO₂、CH₄等温室气体的固定和释放中起着重要作用^[29-30]。通过对东北地区长期淹水沼泽和三江平原沼泽CH₄排放通量的研究发现,湿地排放出的CH₄因土层温

度的增加呈现指数增加趋势,尤其是随着 5 cm 深度土壤温度的增加 CH_4 排放量显著增加。这与气温上升土壤温度升高加强了土壤微生物活性、根系分泌物为甲烷菌提供了丰富的碳源有一定的关系。而在非长期淹水的湿地中,温度升高与湿地 CH_4 排放量成正比,在降低湿地土壤含水量和地下水位的同时, CH_4 排放量也会下降^[31]。沼泽湿地受人类活动和气候变化的影响,其生物、化学过程以及物质循环明显改变,这些环境因子的变化对土壤呼吸产生强烈的影响^[32]。相关研究表明,原生沼泽湿地退化为草甸的过程中,土壤有机质含量显著降低,这是由于退化过程中土壤通气性增强,泥炭化、潜育化过程减弱,加速了有机质的分解过程。经估算表明,湿地退化为草甸的过程中有机氮和碳的 79.67%、89.40% 主要通过硝化作用以 CO_2 、 NO_2 等温室气体的形式释放到大气中,温室效应加剧,导致全球出现持续变暖的趋势^[33]。

2.3 气候变化对湿地生物多样性的影响 湿地由于其生态功能的复杂性,为多种动植物包括一些濒临灭绝的生物提供栖息和繁衍的场所,是有着生物多样性的重点区域。气候变化使湿地生态环境恶化,导致生长和栖息于湿地中的生物生境发生改变,湿地生物多样性受到严重威胁。

2.3.1 气候变化对湿地植物的影响。湿地植被作为湿地生态系统的重要组成部分,从湿地植被的结构、功能和生态特征能综合反映湿地生态环境的基本特点和功能特性^[34],全球气候变化对湿地植物也产生了一定的影响,主要表现在:
①影响植物的正常生长过程,气候变化导致降雨量和降雨的季节性分布不均,对植物将产生较大的影响。气温过高使一些水生杂草例如水葫芦、千屈菜生长迅速,和水中其他的水生植物进行氧气等养分的争夺,影响其他水生植物的生长和繁殖,同时水葫芦等杂草的疯长会挡住阳光照射到水下,使水下植物不能接受充分的光照进行光合作用而死亡^[35],明显降低浮游植物的生产率,使生物多样性遭到严重破坏生态平衡受到威胁。
②气候变化对植物群落和种群数量也有显著的影响,随着湿地的退化,在各个不同的环境因子的协同作用下,植物群落结构也会不断发生变化,同时气候变化影响不同植物种群生长,从而改变种群竞争的相互作用过程^[30]。由于气候变暖引起冻土层消融,土壤表层水分减少,使土壤结构、组分发生变化,从而使高寒沼泽湿地向高寒草甸等方向退化,湿生性植物逐渐减少,优势植物种群发生演替,中生或中旱生植物逐渐在群落占据优势,最终高寒沼泽植被将被高寒草甸植被所替代,一些适应高寒环境的遗传基因也因高寒生物物种资源的灭绝而可能消失。所以气候变化引起的生物群落的变化,有可能导致一些种群的消失和一些种群出现新的变种^[36]。

2.3.2 气候变化对湿地动物的影响。同湿地植物一样,湿地动物也会受到全球气候变化的影响,一些珍贵的湿地动物因受到气候变化的影响,变得稀有甚至会濒临灭绝。气候变化会引起湿地水资源化学物质组成的改变,例如溶解氧量、pH、营养物质浓度等。鱼类和两栖类动物对栖息地环境的变化尤为敏感^[37],气温升高,溶氧量的下降,鱼类、两栖类动物

种群数量呈现下降的趋势。气温的上升和降水量的减少导致湿地生态系统遭到破坏,从而对这些动物的正常生长繁殖造成一定的威胁。同时湿地作为许多鸟类的栖息地和停留地,为许多鸟类提供了良好的越冬生境。超过 80% 的迁徙鸟类会把湿地作为它们停靠地点。气候变化对鸟类的影响主要体现在,一方面气温的变化会影响鸟类的繁殖速率,进而影响其种群数量^[38];另一方面区域降水量年内和年际变化会影响鸟类对于湿地的依赖程度,例如在一些湿润区,季风可以带来水资源和一些鸟类食用的营养物质,则该区的鸟类数量呈明显的增加趋势;而降水量的减少湿地面积萎缩使得鸟类数量明显下降,最终会导致一些依赖湿地生存的鸟类面临失去栖息地和停留地的危险。

3 结语及展望

湿地被称为“地球之肾”,由此可见它对于人类生产生活以及动植物生存的重要性。全球变暖是不争的事实,气温升高、降水量的季节性分配不均和极端天气与自然災害的频发对湿地生态系统产生了严重的影响。全球气候趋向暖干化方向发展,降水量的减少导致湿地面积萎缩;气温升高、降水量减少、蒸发量的增加影响湿地地表径流、地下水位等水文过程。湿地土壤中的碳储量可占土壤总蓄积量的 11%,全球变暖使大气中 CO_2 浓度升高,导致土壤温度升高加速了土壤碳库通过呼吸作用释放出的 CO_2 量,所以湿地土壤对温室气体的固定和释放起着重要的作用;气候变暖,降水量减少导致湿地退化和湿地生境质量下降湿地生物多样性受到威胁,湿地生物种群数量下降。

综上所述,气候控制着湿地的消长,进而影响湿地生态系统,湿地生态系统的变化会进一步加快气候变化的速度,所以气候变化和湿地变化相互影响、相互作用。通过分析当前国内外的研究现状,今后关于气候变化与湿地的研究重点应侧重于以下几个方面:①对于保护和利用湿地应在掌握气候变化的前提下进行,在气候变化中应该清楚地认识到湿地在减缓气候变化方面的重要作用;②由于湿地生态功能的复杂性,湿地生态系统与气候变化和其他环境因素之间的关系也是错综复杂。近几年,虽然国内有关湿地的研究已取得了一些初步的成果,但仍然存在不确定性,因此,在未来全球气候变化对湿地影响的研究中要重点考虑外围气象因子和湿地水文、土壤之间的相互的关系,定性定量分析气候变化和湿地的生态过程及生理机制;③根据目前的研究成果,不仅要考虑气候变化是如何影响湿地各种机制变化的,还要考虑如何降低或减缓湿地对气候变化所带来的负面效应,认真分析探讨湿地对于气候变化的响应及其反馈机制,以期为缓解气候变化带来的负面影响提供重要的依据。我国作为湿地大国,对于湿地的保护、修复和合理利用将会直接影响全球可持续发展的未来。所以,应进一步加大力度保护湿地,减少湿地持续退化,保护和恢复湿地生态系统,更好地合理利用湿地来积极面对气候变化。

参考文献

[1] 崔保山. 湿地学[M]. 北京:北京师范大学出版社,2006:79-86.

- [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.