

水氮胁迫对我国小麦产量和品质影响的 Meta 分析

孟远, 吴熠婷, 姜美君, 江佳琦, 余国春, 黄志坤, 邵鹏程, 张倩倩, 刘建超

(浙江农林大学暨阳学院, 浙江诸暨 311800)

摘要 [目的] 为水氮胁迫的合理选择提供理论依据。[方法] 利用 Meta 分析 (meta-analysis) 的方法, 系统分析了来自各个地区试验的水氮胁迫对小麦影响的相关论文 (共 71 篇, 有效数据 65 组), 研究了不同施氮量、施氮次数、施氮时期对小麦产量和品质的影响。[结果] 施氮能有效提高小麦产量改善品质, 当施氮量达到 250 kg/hm^2 时, 小麦产量和籽粒蛋白质含量增长率为研究峰值, 而施氮量继续增长时, 小麦籽粒蛋白质含量增长率与产量增长率均呈下降趋势。与施氮量所造成的影响类似, 施氮次数对于小麦产量和籽粒蛋白质含量增长率的作用也是先增后降。灌浆期追氮对小麦产量的促进作用较为明显, 增长率达 0.358%, 氮肥后移对灌浆期籽粒增重作用明显, 能保持灌浆后劲、延长灌浆过程。拔节期追氮处理有利于小麦在抽穗期和灌浆期较高叶面积指数的维持, 利于小麦获得较高产量。[结论] 施氮对我国小麦品质和产量具有显著促进作用, 氮肥后移和分次施肥对小麦干物质积累有益, 增产改善品质效果尤佳。

关键词 小麦; Meta 分析; 籽粒品质; 产量; 水氮胁迫

中图分类号 S512.1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)09-0028-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.09.007



开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

Meta-analysis of the Effects of Water and Nitrogen Stress on Wheat Yield and Quality

MENG Yuan, WU Yi-ting, JIANG Mei-jun et al (Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji, Zhejiang 311800)

Abstract [Objective] To provide theoretical basis for the reasonable selection of water and nitrogen stress. [Methods] We systematically analyzed the seventy-one papers about the effects of water and nitrogen stress on wheat from different regions by meta-analysis, and researched the effects of nitrogen application, nitrogen fertilizer application times and nitrogen application stages on wheat yield and quality. [Results] Nitrogen application improved wheat yield and quality effectively. When nitrogen application was 250 kg/hm^2 , the growth rate of wheat yield and quality reached peak value. If nitrogen application continued to increase, the growth rate of wheat yield and quality showed a downward trend. Similar like the influence of nitrogen application, effects of nitrogen fertilizer application times on the growth rates of wheat yield and quality firstly increased, and then decreased. Nitrogen application at pustulation period had obvious promoting effect on wheat yield, the growth rate reached 0.358%. Nitrogen application at later stage had a marked effect at pustulation period on weight gain of wheat grain and it also prolonged the grouting process. Nitrogen application at jointing stage was helpful to the maintain of high leaf area index of wheat at heading and pustulation stages, and could obtain relatively high wheat yield. [Conclusions] Nitrogen application showed significant promotion effects on wheat quality and yield. Nitrogen application at later stage had positive effects on dry matter accumulation in wheat, and the yield increasing and quality improving effects were ideal.

Key words Wheat; Meta-analysis; Grain quality; Yield; Water and nitrogen stress

水氮胁迫在小麦作物生产中有着重要的影响, 对小麦产量和品质起着不容忽视的作用。我国各地区水资源储备不同造就了各地区不同的用水类型, 同时氮素在小麦生产过程中是不可缺少的, 我国年施氮量全球占比达 40%。数据表明, 我国大部分种植小麦的地区因为水资源短缺, 都要实行节水农业。有研究表明, 小麦产量不足受水利用率过低影响。翟丙年等^[1]研究表明, 水分胁迫对氮肥利用率起着重要的作用。因此, 水氮胁迫对小麦产量和品质影响的 Meta 分析对于我国各地区调整灌溉量, 合理利用水资源, 提升氮素利用率, 明确水氮施量最优解有着重要意义。郑惠玲等^[2]研究表明, 不同水氮条件对周麦 18 有不同的影响。重度缺水时施氮对小麦株高及穗粒数等多方面有着良性影响。支虎名等^[3]研究表明, 在年降水类型不同的情况下, 拔节期补灌可提高穗数但会减少穗粒数, 降低千粒重, 从而影响了产量的提高。祁有玲等^[4]研究表明, 苗期干旱胁迫对小麦影响不大, 其他时期则有明显影响, 氮胁迫条件相同的情况下, 水分

胁迫对穗长、千粒重影响明显, 而对穗粒数和单株产量影响极大。不同条件的氮胁迫对小麦影响不尽相同, 但是都能在在一定程度上起到促进作用。自我国开始追求小麦产量品质以来, 已有大量针对水氮胁迫所带来影响的研究, 但研究方向多是在特定地区、特定土壤环境进行, 其研究结果并不具备足够的普适性。为了解各条件下水氮胁迫对小麦产量和品质的影响, 需要在全国范围内汇集有价值的试验数据, 并进行 Meta 分析, 将水氮胁迫对小麦产量和品质的影响进行系统化分析。鉴于此, 笔者通过搜集全国范围内有关水氮胁迫对小麦产量和品质影响的文章, 进行 Meta 分析 (Meta-analysis), 系统分析水氮胁迫对小麦产量和品质的影响以及其环境因素差异, 进而为水氮胁迫的合理选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源 该研究是根据已发布的文献数据实行的, 从中国知网和万方等文献数据库搜索“水分胁迫”“氮胁迫”“土壤养分质地”“土壤水分”4 个关键词, 并且基于以下条件筛选文献: ①试验是在中国农田进行的, 且研究对象是小麦; ②同一试验必须含有不同的水胁迫条件或氮胁迫条件; ③试验必须含有小麦产量和品质的数据; ④每种处理至少重复 3 次; ⑤有小麦品种、土壤指标、试验点地理位置、气候条件等信息。经筛选后, 得到文献 71 篇, 有效数据 65 组, 281 个。

基金项目 浙江农林大学暨阳学院人才启动项目 (RQ1905A01); 浙江农林大学暨阳学院院级大学生科技创新活动计划项目 (JYKC1910); 浙江农林大学暨阳学院院级大学生科技创新活动计划项目 (JYKC1908); 浙江省新苗人才项目 (2020R412036)。

作者简介 孟远 (1999—), 男, 河南商丘人, 从事作物系统模拟研究。

收稿日期 2020-09-04; **修回日期** 2020-09-29

将文献数据结合研究目标及内容分组来研究水氮胁迫对小麦产量和品质的影响。

1.2 研究方法 搜集文献数据时用 Get ata Graph Digitizer 2.24 软件提取图形式的数据。若文献中提供的数据为标准误差(*SE*),则标准差(*SD*)可根据公式(1)来转换:

$$SD = SE / \sqrt{n} \quad (1)$$

式中,*n* 为重复次数。

统计学指标以响应比(responseratios, RR)呈现,且计算 95%的置信区间(95%CI):

$$R = (NUE_i / NUE_e) \quad (2)$$

式中,*NUE_i* 和 *NUE_e* 分别为对照组(NPK)和处理组(NPKM)的变量 *NUE* 的平均值。在分析过程里,需要将 RR 对数化,使用自然对响应比(lnRR)来表示 *NUE* 受施用有氮肥的影响程度并且可由以下计算得: $\ln RR = \ln(NUE_i) - \ln(NUE_e)$ (3)

施氮对冬小麦品质及产量的影响上使用了反应比(response ratio, R)作为效应量,其公式为:

$$\ln R = \ln(X_e / X_c) = \ln(X_e) - \ln(X_c) \quad (4)$$

式中,*X_e* 和 *X_c* 分别是独立研究中对照组和试验组的平均值。将所述反应比转化为百分比变化率,公式如下:

$$Y = (e^{\ln R} - 1) \times 100\% \quad (5)$$

式中,正 *Y* 值表示施氮处理产生正效应,负 *Y* 值则表示产生负效应。若 *Y* 值的 95%置信区间与 0 重合,则认为施氮效应不显著,反之效应显著。各亚组分析中,若不同分组内各个 *Y* 值的 95%置信区间未重合,就认为组间差异显著,相反则差异不显著。

1.3 数据分析 Meta 分析归并计数资料的响应比,且在求得加权平均响应前,应确认各试验处理及结果有无异质性(不同研究结果之间或处理之间是否是由于随机误差引起)。因此,使用卡方检验(Chi-square test)来检验异质性,若检验结果 $P > 0.05$,表示不同研究结果或不同处理之间具有同质性,可以选择固定响应模型计算归并统计量,否则采用随机效应模型。

Meta 分析以 MetaWin 2.1 软件进行。Meta 分析中,根据不同气候条件和土壤因素,比较 *NUE* 受 NPK 相比 NPKM 的影响程度。关于各篇文献的观测值,可以通过响应值来估计 NPK 相较 NPKM 处理 *NUE* 的增长量(响应值大小则可以体现对照组相比处理组的影响效果)。数据分析过程中,还考虑了我国因地区不同,NPK 和 NPKM 处理间 *NUE* 的差异,使用 SPSS 软件 11.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)实行显著性检验和数据统计分析,例如 $P < 0.05$,则认为 NPK 和 NPKM 处理的 *NUE* 存在明显差异。

随机森林方法是指使用 R 语言中的软件包“RandomForest”计算不同因素对氮肥“增效”作用的贡献率。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对小麦品质和产量的影响

2.1.1 对小麦籽粒蛋白质含量的影响。氮素对冬小麦生长发育有至关重要的影响,合理施氮对小麦籽粒蛋白质含量具有较明显的促进作用。施氮量小于 400 kg/hm² 对小麦籽粒

蛋白质含量有促进作用(图 1)。其中促进作用在施氮量 250 kg/hm² 时达到峰值,GPC 增加 28.35%;当施氮量为 50 kg/hm² 时,增长率最低,为 6.84%。当施氮量小于 250 kg/hm² 时,GPC 增长率随施氮量的增加而增加;当施氮量大于 250 kg/hm² 时,小麦籽粒蛋白质含量增长率开始下降。合理施氮对于小麦籽粒蛋白质含量均有促进作用,在施氮量为 250 kg/hm² 时效果最佳,之后小麦籽粒蛋白质含量增长率随施氮量增加而下降。

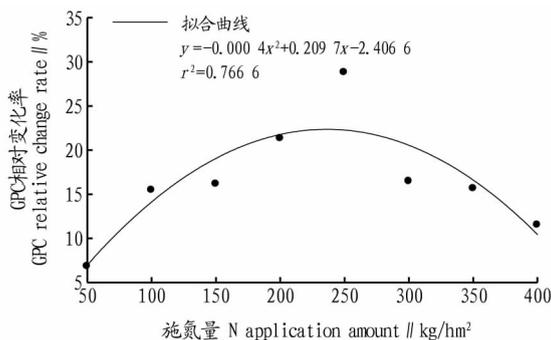


图 1 施氮量对小麦 GPC 的影响

Fig. 1 Effects of N application amount on wheat GPC

2.1.2 对小麦产量的影响。合理施氮对小麦产量同样具有促进作用。在施氮量达到 200 kg/hm² 之前,随着施氮量的增加,小麦产量增长率也在增加;当施氮量达到 200 kg/hm² 时,小麦产量增长率达到研究峰值,为 35.4%;当施氮量为 50 kg/hm² 时增长率是 18.64%,为最低值;而当施氮量高于 200 kg/hm² 时,增长率呈下滑趋势。总之,施氮量对于小麦产量有着促进作用,该研究中施氮量为 200 kg/hm² 时效果最佳(图 2)。

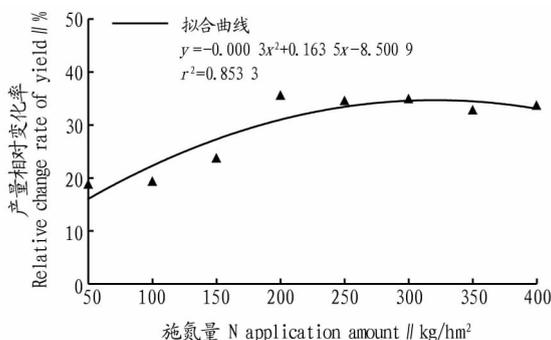


图 2 施氮量对小麦产量的影响

Fig. 2 Effects of N application amount on wheat yield

2.2 不同施氮次数对小麦作物的影响

2.2.1 对小麦籽粒蛋白质含量的影响。小麦生长期不同施氮次数对小麦籽粒蛋白质含量影响显著,对小麦籽粒蛋白质含量而言,5 次及 5 次以内的施氮处理对小麦籽粒蛋白质含量呈促进作用。从图 3 可以看出,施氮 3 次时籽粒蛋白质含量增长率达到峰值,增长率达 45.12%;施氮次数达 5 次时增长率最低,仅 8.22%;合理次数内施氮处理对于小麦籽粒蛋白质含量具有促进作用,施氮 3 次时效果最显著,而次数再增加时促进效果明显下降。

2.2.2 对小麦产量的影响。该研究统计了 3 次及 3 次以内

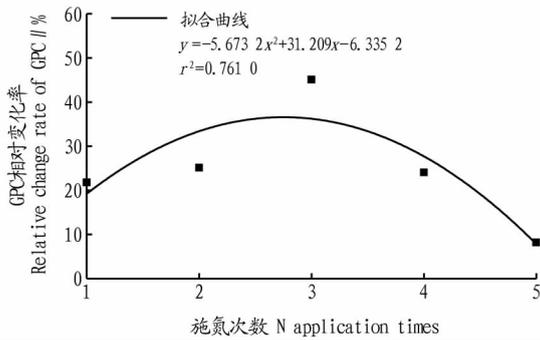


图3 施氮次数对小麦 GPC 的影响

Fig. 3 Effects of N application times on wheat GPC

施氮次数对小麦产量的影响,均对小麦产量有促进作用,平均增长率为 36.18%。从图 4 可以看出,施氮 1 次时小麦产量增长率为 33.8%,施氮 2 次时小麦产量增长率为 35.48%,施氮 3 次时小麦产量增长率最高,达 39.26%。

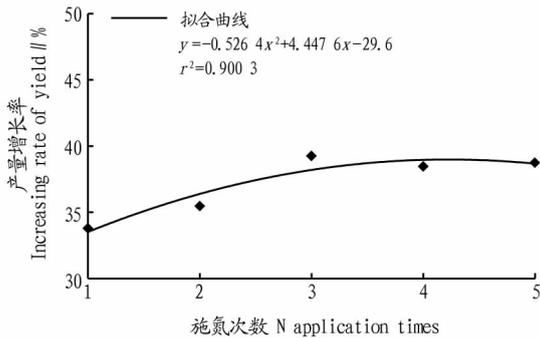


图4 施氮次数对小麦产量的影响

Fig. 4 Effects of N application times on wheat yield

2.3 不同追氮时期对小麦作物的影响

2.3.1 对小麦籽粒蛋白质含量的影响。不同时期追氮处理会对小麦籽粒蛋白质含量造成不同影响。在不同生长阶段对小麦进行追氮处理对其籽粒蛋白质含量有促进作用,小麦籽粒蛋白质含量平均增长率达到 21.67%。从图 5 可以看出,在开花期进行追氮处理,小麦籽粒蛋白质含量增长率最高,达 34.47%,灌浆期追氮处理小麦籽粒蛋白质含量的增长率仅 15.72%,为各时期最低。

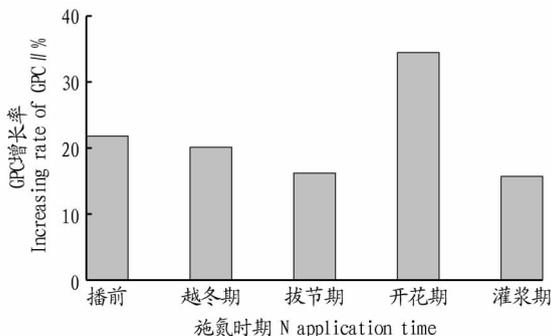


图5 施氮时期对小麦 GPC 的影响

Fig. 5 Effects of N application stage on wheat GPC

2.3.2 对小麦产量的影响。相似地,不同时期追氮处理会对小麦产量造成不同影响,平均产量增长率为 31.7%。根据图 6 可以看出,拔节期追氮小麦产量增长率为 28.37%,为研

究最低值,灌浆追氮小麦产量增长率为 35.82%。总之,在灌浆期进行追氮处理对小麦产量的促进效果最好,在开花期和越冬期追氮促进效果相差不多,促进效果较差,与对小麦籽粒蛋白质的影响相比,不同时期追氮对小麦产量影响更大。

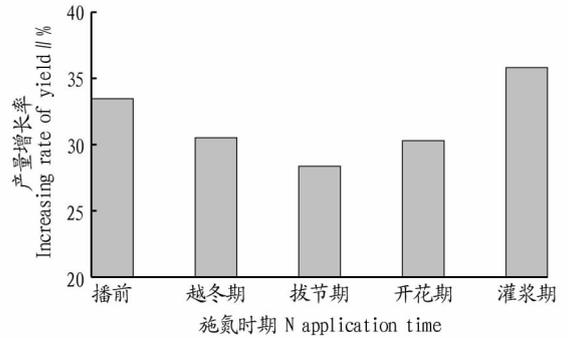


图6 施氮时期对小麦产量的影响

Fig. 6 Effects of N application stage on wheat yield

3 讨论

3.1 不同施氮量与施氮次数对小麦产量和籽粒蛋白质含量的影响 不同施氮量对小麦产量和籽粒蛋白质含量影响显著,合理的施氮处理可以协调小麦品质和籽粒产量之间的关系,实现优质高效高产同步增长的目标。在氮水平较低时,增施氮肥处理可提高小麦品质和产量;当施氮量到达产量高限时,继续增施氮肥可能造成产量降低,但还有可能使品质提高。通过 Meta 分析发现,在研究中的数据范围内,无论施氮量多少,都会对小麦品质和产量有促进作用,当施氮量达到 250 kg/hm² 时,小麦产量和籽粒蛋白质含量增长率为研究峰值。介晓磊等^[5] 研究认为,在土壤为中高肥力的条件下,施氮量达到 240 kg/hm² 时小麦产量达到最高,这与该研究结果基本一致。但施氮量继续增长时,小麦籽粒蛋白质含量增长率与产量增长率均呈下降趋势,该施氮量会增加成本、浪费氮肥。关于小麦籽粒蛋白质和施氮量的关系,研究结果总体一致,即两者呈显著正相关,籽粒蛋白质含量随着施氮量的增加而增加^[6]。小麦生长期不同的施氮频次对于小麦产量和籽粒蛋白质含量也有重大影响,研究表明与施氮量所造成的影响类似,施氮次数对于小麦产量和籽粒蛋白质含量增长率的作用也是先增后降。

3.2 不同追氮时期对小麦产量和籽粒蛋白质含量的影响 不同时期追氮处理会对小麦籽粒蛋白质含量与小麦产量造成不同影响。利用 Meta 分析的方法发现,灌浆期追氮对小麦产量的促进作用较明显,增长率达 0.358%,不同追氮时期对小麦产量的影响在于群体数量,当小麦穗数逐渐增加时,产量提高。李珊珊等^[7] 研究表明,追氮在一定程度上可延缓旗叶的衰老,并可将其功能期延长,其中以开花期追氮作为后期处理为佳。且后期追氮,特别是开花期追氮会使旗叶中硝酸还原酶处于一个较高的活性水平,并且有利于活性保持相对比较长的时间。在小麦籽粒蛋白质含量和施氮时期的关系中,前人普遍认为当施氮时期后移时,籽粒蛋白质含量呈增加趋势^[8-11]。目前,对小麦最佳施氮时期还没有形成统一的结论,自拔节期到开花期均有推荐^[12]。张军等^[8]

认为在适宜的施氮量条件下,开花期作追氮处理蛋白质含量最高,抽穗期追氮处理次之。杨丽娟等^[13]研究表明,氮肥后移对灌浆期籽粒增重作用明显,能保持灌浆后劲、延长灌浆过程,利于小麦增产和籽粒品质的提高。而在开花期追氮处理会导致穗数少,从而引起产量下降。拔节期做追氮处理有利于小麦在抽穗期和灌浆期维持较高叶面积指数,而抽穗期和灌浆期是小麦干物质积累的关键时期,最终利于小麦获得较高产量。

3.3 研究的不足与意义 氮条件对小麦生长发育的影响是一个繁杂的过程,要正确认知这一过程,既需要关注小麦各项生长指标,对其进行分析,也要探究多方面因子以及不同种环境条件所带来的综合作用,以此向 Meta 分析提供多且可靠的数据基础。小麦经过常年培育,由于风土环境不同,培育出了相当数量的品种,该研究虽参考了大量文献但并没有考虑到由于品种、地区所造成差异的影响,也没有将温度、水分胁迫、土壤质地等会对小麦产量和籽粒蛋白质含量有影响的条件纳入研究中。由于该研究参考的文献较少提到小麦的施肥方式,因此未将施肥模式对小麦产量和籽粒蛋白质含量的影响纳入研究条件中。尽管对于影响小麦产量和籽粒蛋白质含量的因素考虑不够详尽,关于氮条件对于小麦产量和籽粒蛋白质含量影响的研究比较符合日常经验结果。已有文献显示,氮条件对小麦产量和籽粒蛋白质含量具有显著影响,该研究的结果也为小麦如何科学施氮、最大程度避免减产并增产提供了科学依据,从而为我国小麦产量和品质的提升提供了理论和科学依据。

4 结论

施氮条件对小麦品质和产量有明显影响。在小麦不同

生长期施氮,对品质和产量都有正面作用。在拔节期追氮,小麦产量增长率最低;在灌浆期追氮,小麦产量增长率最高,为 0.358%。

施氮量达到 250 kg/hm² 时,小麦产量和籽粒蛋白质含量增长率均为最高。当施氮量继续增加时,产量增长率下降但品质还有可能继续提高;但当施氮量过高时,产量和品质增长率均呈下降趋势。在该研究中的数据范围内进行多次施氮同样对小麦产量和品质具有正面作用,以 3 次最佳。

参考文献

- [1] 翟丙年,李生秀.冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定[J].中国农业科学,2005,38(6):1188-1195.
 - [2] 郑惠玲,武继承,潘晓莹,等.不同生育时期追施氮肥与补灌结合对小麦生长发育及产量的影响[J].河南农业科学,2015,44(6):18-23.
 - [3] 支虎明,刘建华.不同生育期(阶段)有限补灌对小麦产量、水分利用效率及经济效率的影响[J].中国农学通报,2011,27(9):314-319.
 - [4] 祁有玲,张富仓,李开峰,等.不同生育期水分亏缺及氮营养对冬小麦生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2009,28(1):24-27.
 - [5] 介晓磊,韩燕来.不同肥力和土壤质地条件下麦田氮肥利用率的研究[J].作物学报,1998(6):884-888.
 - [6] 李洪梅,孟淑华,白洪立,等.施氮量对不同强筋小麦品种产量和品质的影响[J].山东农业科学,2007,39(4):78-81.
 - [7] 李姗姗,赵广才,常旭虹,等.追氮时期对强筋小麦产量、品质及其相关生理指标的影响[J].麦类作物学报,2008,28(3):461-465.
 - [8] 张军,张洪程,许轲,等.氮肥施用时期对强筋小麦品质影响的研究[J].江苏农业科学,2005,33(2):31-34.
 - [9] 张宝军,蒋纪芸.施氮时期对小麦不同种籽粒蛋白质品质的影响[J].西北农业大学学报,1996,24(1):32-36.
 - [10] 周青,陈风华,张国良,等.施氮时期对弱筋小麦产量和品质的调节效应[J].麦类作物学报,2005,25(3):67-70.
 - [11] 李磊,王成雨,李金才,等.氮肥施用技术对小麦籽粒产量和品质的调控效应[J].安徽农业科学,2007,35(13):3938-3939,3964.
 - [12] 马宗斌,熊淑萍,马新明,等.施氮对小麦品质的影响研究进展[J].河南农业大学学报,2007,41(1):117-122.
 - [13] 杨丽娟,蒋志凯,盛坤,等.氮肥追施时期对强筋小麦产量和面粉品质的影响[J].中国农学通报,2015,31(6):26-30.
- 研究汇刊,2011,30(2):40-42,54.
- [49] KUMARAN A, JOEL KARUNAKARAN R. Antioxidant and free radical scavenging activity of an aqueous extract of *Coleus aromaticus* [J]. Food chemistry, 2006, 97(1):109-114.
 - [50] KARIOTI A, HADJIPAVLOU-LITINA D, MENSAH M L K, et al. Composition and antioxidant activity of the essential oils of *Xylopiya aethiopia* (Dun) A. Rich. (Annonaceae) leaves, stem bark, root bark, and fresh and dried fruits, growing in Ghana [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2004, 52(2):8094-8098.
 - [51] ORAMAHI H A, YOSHIMURA T. Antifungal and antitermitic activities of wood vinegar from *Vitex pubescens* Vahl [J]. Journal of wood science, 2013, 59(4):344-350.
 - [52] BAIMARK Y, NIAMSA N. Study on wood vinegars for use as coagulating and antifungal agents on the production of natural rubber sheets [J]. Biomass & bioenergy, 2009, 33(6/7):994-998.
 - [53] HWANG Y H, MATSUSHITA Y I, SUGAMOTO K, et al. Antimicrobial effect of the wood vinegar from *Cryptomeria japonica* sapwood on plant pathogenic microorganisms [J]. Journal of microbiology and biotechnology, 2005, 15(5):1106-1109.

(上接第 21 页)

- [41] 张立华,孙凤杰,赵文亚,等.石榴皮木醋液的化学成分及抗氧化活性[J].食品科学,2016,37(8):127-130.
- [42] 张立华,王丹,宫文哲,等.枣核木醋液化学成分分析及其抑菌活性[J].食品科学,2016,37(14):123-127.
- [43] 冯晨.芳香植物木醋液的化学成分及生物活性研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2017.
- [44] GAO T, BIAN R J, JOSEPH S, et al. Wheat straw vinegar: A more cost-effective solution than chemical fungicides for sustainable wheat plant protection [J/OL]. Science of the total environment, 2020, 725 [2020-04-20]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138359>.
- [45] 张雪,苗婷婷,陆炯,等.天然产物抗氧化活性评价方法研究进展[J].广州化工,2017,45(19):7-10.
- [46] LIYANA-PATHIRANA C M, SHAHIDI F, ALASALVAR C. Antioxidant activity of cherry laurel fruit (*Laurocerasus officinalis* Roem.) and its concentrated juice [J]. Food chemistry, 2006, 99(1):121-128.
- [47] 韦献雅,殷丽琴,钟成,等. DPPH 法评价抗氧化活性研究进展[J].食品科学,2014,35(9):317-322.
- [48] 崔宇,刘华巍,孙涛.竹醋液与茶多酚协同抗氧化性能研究[J].竹子