



中国中药杂志

China Journal of Chinese Materia Medica

ISSN 1001-5302, CN 11-2272/R

## 《中国中药杂志》网络首发论文

题目： 生产中氮肥施用及其对中药材产量和质量的影响  
作者： 葛阳, 康传志, 万修福, 王升, 吕朝耕, 张文晋, 袁庆军, 闫滨滨, 郭兰萍  
DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20210203.102  
收稿日期: 2021-01-19  
网络首发日期: 2021-02-07  
引用格式: 葛阳, 康传志, 万修福, 王升, 吕朝耕, 张文晋, 袁庆军, 闫滨滨, 郭兰萍. 生产中氮肥施用及其对中药材产量和质量的影响. 中国中药杂志.  
<https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20210203.102>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 生产中氮肥施用及其对中药材产量和质量的影响

葛阳, 康传志, 万修福, 王升, 吕朝耕, 张文晋, 袁庆军, 闫滨滨, 郭兰萍\*

(中国中医科学院 中药资源中心 道地药材国家重点实验室培育基地, 北京 100700)

\*通信作者 郭兰萍, E-mail: glp01@126.com

**摘要** 氮肥是药用植物栽培中施用频率最高的化肥, 对药用植物产量具有突出贡献。由于普遍认为氮肥的使用可提升中药材产量, 中药材栽培中存在较严重的偏施、过量施氮的现象。该文首先总结了自 1998 年起我国配方施肥研究中对不同中药材的建议施氮浓度, 发现不同中药材品种在不同产地对氮的需求情况呈现较大差别 ( $0\sim1\ 035.55\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 这既与中药材品种有关, 也与不同产地的土壤肥力程度有关。其次, 归纳了施氮对中药材产量的影响, 并分析了适量施氮能够提高中药材产量, 但过量施氮可能导致产量降低的原因, 认为这主要与施氮后中药材营养物质含量、水分利用率、光合作用能力等的变化有关。最后, 阐明了施氮对中药材质量的调控作用及机制, 通常适量施氮会增加中药材中的含氮次生代谢物, 降低非含氮次生代谢物含量, 施氮对不同次生代谢物的影响主要与其合成途径有关, 同时还可能受植物营养状态的影响。综上, 虽然适量施氮能促进中药材产量及某些次生代谢物含量的提升, 但施氮还可能降低某些非含氮次生代谢物含量, 减低中药材质量, 同时过量施氮也无法进一步增加中药材的产量。因此, 应在前人研究基础上合理规划施氮浓度, 配方施肥, 该文旨在为中药材种植中氮肥的合理施用提供思路和参考。

**关键词** 氮肥; 中药材; 配方施肥; 含氮次生物质; 非含氮次生物质

DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20210203.102

## Current situation of nitrogen application and its effects on yield and quality of Chinese materia medica

GE Yang, KANG Chuan-zhi, WAN Xiu-fu, WANG Sheng, LYU Chao-geng, ZHANG Wen-jin, YUAN Qing-jun, YAN Bin-bin, GUO Lan-ping\*

(State Key Laboratory and Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

**Abstract** Nitrogen fertilizer has been the long-lasting crucial component in cultivation of Chinese materia medica (CMM) and crops for its profound effects on enhancing the productivity. In consideration of its role in better production, intensive and excessive application of N fertilizer is often found in CMM cultivation. Therefore, firstly, this review summarized various concentrations of N application with regards to different CMM and districts from the literatures published in the last two decades. Recommended concentration of nitrogen application of forty seven CMM species were covered in this review. We found that the optimum rates of nitrogen fertilizer for different medicinal plants species were varied in the range between  $0\sim1\ 035.55\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ . Most of the optimum rates of nitrogen fertilizer for CMM in published researches fell between  $100\sim199\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ . The optimum rate of nitrogen fertilizer is not only related to amount of nitrogen required for different medicinal plants but also to soil fertilities of different fields. In addition, we outlined the different effects of proper and excessive nitrogen deposition on yield of CMM. Proper nitrogen deposition benefits the yield of CMM, however, excessive nitrogen use accounts for a decrease in CMM yield. We elucidated that nutritional content, water use efficiencies, and photosynthesis capacity were major influencing factors. Researches showed that proper nitrogen fertilizer could promote the water use efficiencies of plants and boost photosynthesis. Consequently, the yield of CMM can be enhanced after nitrogen deposition. However, negative effects of nitrogen fertilizer were also found on plant including producing toxic substances to the soil and causing severe pest damages. Lastly we analyzed the impact of N fertilizer application on secondary metabolites which accounts for a large part of active pharmaceutical ingredients of CMM. It usually caused an increase in nitrogen-containing

收稿日期: 2021-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1700701); 国家自然科学基金重大项目 (81891014); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-21); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZZXT202009& ZZXT201805)

作者简介: 葛阳, 助理研究员, 中药材害虫防治, E-mail: 1374285418@qq.com

网络首发时间: 2021-02-07 09:42:15 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2272.R.20210205.1913.001.html>

secondary metabolites content and a decrease in non-nitrogen-containing secondary metabolites content respectively. The potential underlying mechanisms are the different synthetic pathways of these metabolites and the plant nutritional status. Synthesis of non-nitrogen-containing secondary metabolites like phenols can be inhibited after nitrogen application because of the competition of the same precursor substances between metabolites synthesis and plant growth. To sum up, impacts and mechanisms of nitrogen fertilizer on yield and quality enhancement of CMM were discussed in this review. Negative effects of excessive nitrogen application on CMM should be paid special attention in CMM cultivation and prescription fertilization based on the field soil quality is strongly recommended. Overall, this review aims to provides insights on improving the proper application of N fertilizer in the cultivation of CMM.

**Key words** nitrogen fertilizer; Chinese materia medica; prescription fertilization; nitrogen-containing secondary metabolites; non-nitrogen-containing secondary metabolites

自 20 世纪 60 年代以来, 中药材种植过程中开始使用化肥, 其中氮肥是农业生产中施用频率最高的化肥。由于普遍认为氮肥的使用可提升中药材产量<sup>[1]</sup>, 中药材栽培中普遍存在严重的偏施、过量施氮的现象<sup>[2]</sup>。而氮肥只有科学施用才能达到提升作物产量和质量的目的。近年来, 有研究发现, 过量施氮不仅不能提高中药材产量, 甚至还会降低其产量和品质。

一直以来, 药用植物施氮的研究大多集中在施氮对某种中药材的产量及一种或几种药效成分含量的影响方面<sup>[3]</sup>。然而, 施氮对中药材产量及质量的影响究竟是什么, 施氮对中药材产量及质量的调控机制是什么都鲜有研究报道。为此, 本文在总结了近 20 年来我国配方施肥研究中施氮情况的基础上, 分析了施氮对中药材产量和质量的影响及调控机制, 旨在为科学、合理地药用植物施氮提供参考。

## 1 药用植物施氮研究现状

合理的施氮浓度、优化的施氮技术一直是中药农业科研工作者研究的热点, 更是药农种植中药材时最关心的问题之一<sup>[4]</sup>。近 20 年来, 我国关于中药材配方施肥的研究逐渐兴起。这些研究以提高药效成分、产量等为目标, 通过田间及盆栽试验<sup>[5]</sup>, 采用三因素二次 D 饱和最优设计<sup>[6]</sup>、正交设计<sup>[7]</sup>等方法, 在全国各地设置不同浓度、配比的施肥方案并统计中药材产量、次生物质、挥发油等含量, 通过模型拟合出对于不同中药材品种在各产地的最佳施氮浓度。

目前, 国际上普遍采用的科学施肥技术为配方施肥 (prescription fertilization), 即根据植物需肥规律、土壤供肥性能及肥料效应进行科学施肥<sup>[8]</sup>。为更好地了解药用植物的需肥性, 避免中药材种植者盲目施氮或照搬当地农作物的施氮技术, 为中药材的配方施肥提供基础数据, 我们以“中药材 施氮”及“药用植物 施氮”为关键词查阅了 1998 年至 2019 年关于中药材种植中施氮的相关研究, 总结了不同地区、不同中药材最佳氮、磷、钾肥施用浓度等有关信息 (表 1) 及不同地区土壤肥力程度信息 (表 2)。需要说明的是, 由于氮、磷、钾之间具有协同效应, 氮肥与磷、钾肥的合理配施能够促进中药材高产, 因此关于药用植物施氮技术研究中, 大部分同时涉及氮磷钾的配比。本文一并统计了施氮研究中有关氮磷钾的配比, 旨在为广大中药材种植者和相关研究提供更有实用价值的参考信息。

表1 1998—2019年中药材氮、磷、钾的建议施用量  
Table 1 Recommended N application with regards to different CMM and districts from the literatures published from 1998 to 2019

中药材	入药部位	氮/kg · hm <sup>2</sup>	磷/kg · hm <sup>2</sup>	钾/kg · hm <sup>2</sup>	位置	作者	年份
蒙古黄芪	根	尿素 90.03 ~ 103.57 (氮含量 46.4%≈41.77~48.06)	过磷酸钙 70.12 ~ 156.21	硫酸钾 96.14 ~ 167.57	陕西	高星 <sup>[9]</sup>	2017
蒙古黄芪	根	氮 95.71 ~ 98.45	五氧化二磷 124.76 ~ 134.07	氧化钾 77.27 ~ 97.43	陕西	程萌萌 <sup>[10]</sup>	2016
蒙古黄芪	根	氮 225.00	过磷酸钙 150.00	硫酸钾 79.41	陕西	高青鸽 <sup>[11]</sup>	2015
黄芪	根	尿素 78.90 (氮含量>46.4%≈36.61)	过磷酸钙 99.10	硫酸钾 65.00	北京	宋庆燕 <sup>[12]</sup>	2017
冰草	根	氮 281.10	磷 749.90	钾 153.50	内蒙古	杨晓刚等 <sup>[13]</sup>	2016
秦艽	根	尿素 322.35 ~ 630.45 (氮含量≥46%≈148.28~290.01)	过磷酸钙 742.95 ~ 986.25	硫酸钾 395.10 ~ 644.55	云南	吴春 <sup>[14]</sup>	2015
何首乌	根	0.00 ~ 2.32 (g/盆)	五氧化二磷 4.32 (g/盆)	氧化钾 6.00 (g/盆)	贵州	胡继田等 <sup>[15]</sup>	2012
桔梗(两年生)	根	氮 102.44~129.86	五氧化二磷 581.96~114.36	氧化钾 126.00~172.32	陕西	王静 <sup>[16]</sup>	2012
三岛柴胡(一年生)	根	氮 93.30	五氧化二磷 0.00	氧化钾 121.50	山东	马晓冲 <sup>[17]</sup>	2010
三岛柴胡(二年生)	根	氮 186.60	五氧化二磷 546.20	氧化钾 0.00	山东	马晓冲 <sup>[17]</sup>	2010
三岛柴胡	根	氮 207.00	五氧化二磷 72.00	氧化钾 234.00	河北	吴鸣岐等 <sup>[18]</sup>	1999
柴胡	根	尿素 167.00 ~ 246.00 (未说明氮含量≈76.82~113.16)	五氧化二磷 451.00 ~ 529.00	氧化钾 224.00 ~ 269.00	陕西	朱再标 <sup>[8]</sup>	2005
怀牛膝	根	氮 261.42	五氧化二磷 96.01	氧化钾 161.82	河南	左晓燕 <sup>[19]</sup>	2008
南板蓝	根	氮 931.96 ~ 1 035.55	五氧化二磷 140.80 ~ 172.80	氧化磷 388.80 ~ 432.00	贵州	魏世勇 <sup>[20]</sup>	2007
板蓝根	根	尿素 869.00 (氮含量 46%≈399.74)	过磷酸钙 1 428.60	硫酸钾 0.00	江苏	王康才等 <sup>[21]</sup>	2007
纹党	根	氮 155.00	五氧化二磷 250.00	氧化钾 60.00	甘肃	黄鹏 <sup>[22]</sup>	1999
滇重楼(根茎增长率)	根茎	氮 517.50	五氧化二磷 270.00	氧化钾 0.00	云南	李金龙 <sup>[23]</sup>	2016
甘草	根茎	氮 171.00	磷 292.50	钾 49.50	甘肃	纪瑛等 <sup>[24]</sup>	2014
川芎	根茎	氮 201.00 ~ 206.00	过磷酸钙 458.00 ~ 522.00	硫酸钾 362.00 ~ 388.00	四川	刘金亮 <sup>[25]</sup>	2014

山药	根茎	尿素 988.00 (氮含量 46% $\approx$ 454.48)	过磷酸钙 489.30	硫酸钾 987.3	山东	许念芳等 <sup>[26]</sup>	2014
三七	根茎	氮 0.00	五氧化二磷 255.15	氧化钾 853.05	云南	赵宏光 <sup>[27]</sup>	2013
三七	根茎	氮 337.5 ~ 450.00	—	—	云南	韦美丽等 <sup>[28]</sup>	2008
黄精	根茎	氮 103.91~136.18	五氧化二磷 121.39 ~ 124.27	氧化钾 68.16 ~ 92.63	陕西	王占红 <sup>[29]</sup>	2012
丹参	根茎	氮 210	五氧化二磷 75.00	氧化钾 90.00	河南	夏奉乾 <sup>[30]</sup>	2010
丹参	根茎	氮 225.00	五氧化二磷 120.00	氧化钾 150.00	河北	翟彩霞等 <sup>[31]</sup>	2008
丹参	根茎	氮 150.00	五氧化二磷 120.00	—	山东	薛永峰 <sup>[32]</sup>	2008
白芨	茎	氮 90.00 ~ 180.00	五氧化二磷 105.00 ~ 157.50	氧化钾 45.00~135.00	贵州	李姣红等 <sup>[33]</sup>	2009
泽泻	茎	尿素 315.61 ~ 370.50 (氮含量 46.4% $\approx$ 146.44~171.91)	过磷酸钙 169.94 ~ 199.50	硫酸钾 206.36 ~ 242.25	四川	窦明明等 <sup>[34]</sup>	2017
泽泻	茎	氮 225.00	五氧化二磷 187.50	氧化磷 225.00	福建	张秋芳等 <sup>[35]</sup>	2006
瓦布贝母	茎	尿素 8.98 ~ 12.00 (氮含量 46% $\approx$ 4.13~4.8)	过磷酸钙 38.79 ~ 43.37	硫酸钾 17.44 ~ 24.49	四川	邓秋林等 <sup>[36]</sup>	2019
藤三七	茎	氮 575.00	—	氧化钾 390	甘肃	黄鹏等 <sup>[37]</sup>	2009
大蒜	茎	氮 160.00 ~ 350.00	五氧化二磷 120.00 ~ 150.00	氧化钾 133.40	河南	张翔等 <sup>[38]</sup>	1998
扶芳藤	茎叶	氮 247.00	五氧化二磷 148.90	氧化钾 123.50	广西	江泽普等 <sup>[39]</sup>	2009
益母草	地上部分	尿素 150.00 (氮含量 $\geq$ 46.4% $\approx$ 69.6)	过磷酸钙 250.00	硫酸钾 480.00	四川	李兴等 <sup>[40]</sup>	2019
益母草	地上部分	氮 400	磷 448	钾 333	北京	张燕等 <sup>[41]</sup>	2007
藿香	地上部分	氮 150.65	磷 87.28	钾 114.77	江苏	薛启等 <sup>[42]</sup>	2018
广金钱草	地上部分	氮 424.00 ~ 645.00	磷 495.00 ~ 590.00	钾 300.00 ~ 410.00	广州	卢挺等 <sup>[43]</sup>	2014
广金钱草	地上部分	氮 120.00	磷 80.00	钾 80.00	广州	杨全等 <sup>[44]</sup>	2013
荆芥	地上部分	氮 195.80	五氧化二磷 92.60	氧化钾 130.30	河南	张文军等 <sup>[6]</sup>	2010
黄花蒿	地上部分	尿素 186.00~242.00 (未说明氮含量 $\approx$ 85.56~111.32)	过磷酸钙 874.00~1 023.00	氯化钾 135.00~165.00	重庆	吴叶宽等 <sup>[45]</sup>	2009
青蒿	地上部分	氮 300.00	五氧化二磷 150.00 ~ 300.00	氧化钾 210.00	重庆	杨水平等 <sup>[46]</sup>	2009

穿心莲	地上部分	氮 225.00	五氧化二磷 540.00	—	安徽	张从宇等 <sup>[47]</sup>	2007
灯盏花	全草	氮 151.40	五氧化二磷 120.70	氧化钾 71.00	云南	鲁泽刚 <sup>[5]</sup>	2019
艾纳香	全草	氮 100.00	五氧化二磷 200.00	氧化钾 200.00	贵州	顾岑等 <sup>[48]</sup>	2018
香青兰	全草	氮 225.00	—	—	呼和浩特	边丽梅等 <sup>[49]</sup>	2009
花曲柳	皮	氮 100.00~150.00	—	—	黑龙江	张忠满 <sup>[50]</sup>	2017
厚朴	皮、根和枝	尿素 60.00 (g/棵, 氮含量 $\geq$ 46%)	过磷酸钙 120.00 (g/棵)	硫酸钾 50.00 (g/棵)	福建	胡小龙 <sup>[51]</sup>	2014
山银花	花	氮 26.78~35.42 (g/株)	磷 16.46~24.37 (g/株)	钾 32.57~46.62 (g/株)	重庆	张建海等 <sup>[52]</sup>	2013
杭白菊	花	氮 150.00	—	—	山东	祝丽香等 <sup>[53]</sup>	2010
金盏花	花	氮 169.68	五氧化二磷 111.16	氧化钾 67.13	甘肃	朱亚等 <sup>[54]</sup>	2010
金银花	花	尿素 140.00 (氮含量 46% $\approx$ 64.40)	过磷酸钙 420.00	硫酸钾 105.00	汉中	王俊儒等 <sup>[55]</sup>	2009
瓜蒌	果	氮 183.00	磷 565.00	钾 270.00	山东	张荣超等 <sup>[56]</sup>	2016
夏枯草	果	氮 303.90~335.1	五氧化二磷 432.50~500.60	钾 206.60~240.20	安徽	郭巧生等 <sup>[57]</sup>	2011
蒺藜	果	尿素 450.00 (氮含量 46% $\approx$ 207)	过磷酸钙 500.00	硫酸钾 270.00	吉林	韩梅 <sup>[58]</sup>	2009
三叶木通	果	尿素 900.00 (氮含量 47.5% $\approx$ 427.50)	钙镁磷 900.00	硫酸钾 750.00	江西	曹岚等 <sup>[59]</sup>	2008
王不留行	种子	氮 150.00	—	—	河北	李宁等 <sup>[60]</sup>	2018
白果	种子	尿素 555.50 (氮含量 $\geq$ 46.3% $\approx$ 255.53)	过磷酸钙 555.50	氯化钾 444.50	江苏	郁万文等 <sup>[61]</sup>	2013

表2 1998—2019年中药材土壤本底氮、磷、钾含量

Table 2 Corresponding N,P,K content in CMM soil before fertilization collected from the literatures published from 1998 to 2019

中药材	入药部位	氮/mg · kg <sup>-1</sup>	速效磷/mg · kg <sup>-1</sup>	速效钾/mg · kg <sup>-1</sup>	位置	作者	年份
蒙古黄芪	根	全氮 20.00	2.30	85.00	陕西	高星 <sup>[9]</sup>	2017
蒙古黄芪	根	全氮 200.00; 碱解氮 20.00	2.30	85.00	陕西	程萌萌 <sup>[10]</sup>	2016
蒙古黄芪	根	全氮 900.00; 碱解氮 20.00	2.30	85.00	陕西	高青鸽 <sup>[11]</sup>	2015

黄芪	根	—	—	—	北京	宋庆燕 <sup>[12]</sup>	2017
冰草	根	—	—	—	内蒙古	杨晓刚等 <sup>[13]</sup>	2016
秦艽	根	—	—	—	云南	吴春 <sup>[14]</sup>	2015
何首乌	根	碱解氮 147.61	31.97	117.73	贵州	胡继田等 <sup>[15]</sup>	2012
桔梗(两年生)	根	—	—	—	陕西	王静 <sup>[16]</sup>	2012
三岛柴胡(一年生)	根	碱解氮 75.60	33.71	114.28	山东	马晓冲 <sup>[17]</sup>	2010
三岛柴胡(二年生)	根	碱解氮 75.60	33.71	114.28	山东	马晓冲 <sup>[17]</sup>	2010
三岛柴胡	根	碱解氮 11.50	18.50	72.00	河北	吴鸣岐等 <sup>[18]</sup>	1999
柴胡	根	全氮 810; 碱解氮 45.52	17.89	161.81	陕西	朱再标 <sup>[8]</sup>	2005
怀牛膝	根	全氮 680.00; 碱解氮 30.75	7.67	84.80	焦作	左晓燕 <sup>[19]</sup>	2008
南板蓝	根	碱解氮 210.60	6.70	39.70	贵州	魏世勇 <sup>[20]</sup>	2007
板蓝根	根	全氮 500.00~1 000.00	—	—0	江苏	王康才等 <sup>[21]</sup>	2007
纹党	根	碱解氮 79.50	5.84	82.70	甘肃	黄鹏 <sup>[22]</sup>	1999
滇重楼(根茎增长率)	根茎	全氮 1 260.00; 碱解氮 111.95	0.57	170.50	云南	李金龙 <sup>[23]</sup>	2016
甘草	根茎	碱解氮 22.94	18.50	125.00	甘肃	纪瑛等 <sup>[24]</sup>	2014
川芎	根茎	—	—	—	四川	刘金亮 <sup>[25]</sup>	2014
山药	根茎	碱解氮 44.90	51.50	61.80	山东	许念芳等 <sup>[26]</sup>	2014
三七	根茎	全氮 1 250.00; 速效氮 36.99	91.90	246.52	云南	赵宏光 <sup>[27]</sup>	2013
三七	根茎	—	—	—	云南	韦美丽等 <sup>[28]</sup>	2008
黄精	根茎	全氮 970.00; 碱解氮 52.467.89	—	270.04	陕西	王占红 <sup>[29]</sup>	2012
丹参	根茎	碱解氮 74.00	11.50	160.00	河南	夏奉乾 <sup>[30]</sup>	2010
丹参	根茎	碱解氮 73.50	38.76	121.50	河北	翟彩霞等 <sup>[31]</sup>	2008

丹参	根茎	全氮 1 340.00; 速效氮 105.93	63.07	88.24	山东	薛永峰 <sup>[32]</sup>	2008
白芨	茎	全氮 2780.00; 碱解氮 44.94	4.00	150.00	贵州	李姣红等 <sup>[33]</sup>	2009
泽泻	茎	全氮 2 810.00; 碱解氮 147.33	12.20	83.42	四川	窦明明等 <sup>[34]</sup>	2017
泽泻	茎	碱解氮 161.00	113.50	76.56	福建	张秋芳等 <sup>[35]</sup>	2006
瓦布贝母	茎	碱解氮 490.06	105.11	168.55	四川	邓秋林等 <sup>[36]</sup>	2019
藤三七	茎	全氮 980.00; 碱解氮 65.008.60		122.00	甘肃	黄鹏等 <sup>[37]</sup>	2009
大蒜	茎	碱解氮 42.80~67.10	14.90~23.40	88.10~126.50	河南	张翔等 <sup>[38]</sup>	1998
扶芳藤	茎叶	—	—	—	广西	江泽普等 <sup>[39]</sup>	2009
益母草	地上部分	—	—	—	四川	李兴等 <sup>[40]</sup>	2019
益母草	地上部分	全氮 160.00	2.04	10.82	北京	张燕等 <sup>[41]</sup>	2007
藿香	地上部分	全氮 1 650.00	39.80	124.00	江苏	薛启等 <sup>[42]</sup>	2018
广金钱草	地上部分	—	60.00	60.00	广州	卢挺等 <sup>[43]</sup>	2014
广金钱草	地上部分	—	—	—	广州	杨全等 <sup>[44]</sup>	2013
荆芥	地上部分	—	—	—	河南	张文军等 <sup>[6]</sup>	2010
黄花蒿	地上部分	—	—	—	重庆	吴叶宽等 <sup>[45]</sup>	2009
青蒿	地上部分	碱解氮 98.10	13.60	78.80	重庆	杨水平等 <sup>[46]</sup>	2009
穿心莲	地上部分	碱解氮 64.40	7.50	28.00	安徽	张从宇等 <sup>[47]</sup>	2007
灯盏花	全草	全氮 2 100.00	8.40	21.30	云南	鲁泽刚等 <sup>[5]</sup>	2019
艾纳香	全草	碱解氮 50.75	4.30	78.00	贵州	顾岑等 <sup>[48]</sup>	2018
香青兰	全草	碱解氮 41.40	24.15	114.60	呼和浩特	边丽梅等 <sup>[49]</sup>	2009
花曲柳	皮	—	—	—	黑龙江	张忠满 <sup>[50]</sup>	2017
厚朴	皮、根和枝	速效氮 70.73	1.52	27.74	福建	胡小龙 <sup>[51]</sup>	2014

山银花	花	全氮 3 059.00; 硝态氮 33.64	10.55	101.65	重庆	张建海等 <sup>[52]</sup>	2013
杭白菊	花	碱解氮 105.92	13.06	102.36	山东	祝丽香等 <sup>[53]</sup>	2010
金盏花	花	全氮 860.00; 碱解氮 63.20	8.69	91.95	甘肃	朱亚等 <sup>[54]</sup>	2010
金银花	花	全氮 980.00; 碱解氮 87.40	12.80	136.60	汉中	王俊儒等 <sup>[55]</sup>	2009
瓜蒌	果	碱解氮 61.50	27.94	129.50	山东	张荣超等 <sup>[56]</sup>	2016
夏枯草	果	全氮 790.00; 碱解氮 53.9	14.20	168.80	安徽	郭巧生等 <sup>[57]</sup>	2011
蒺藜	果	—	—	—	吉林	韩梅 <sup>[58]</sup>	2009
三叶木通	果	全氮 32 800.00	—	—	江西	曹岚等 <sup>[59]</sup>	2008
王不留行	种子	—	—	—	河北	李宁等 <sup>[60]</sup>	2018
白果	种子	全氮 538.00; 碱解氮 61.25	4.53	95.17	江苏	郁万文等 <sup>[61]</sup>	2013

药用植物施氮研究通常以不同浓度组合的氮磷钾肥为处理, 并比较各处理的中药材产量、药效成分含量, 表 1 中建议施氮浓度为固定值的研究是在不同氮磷钾浓度处理组中, 筛选出产量或药效成分含量最高的浓度处理作为建议施肥浓度<sup>[17]</sup>。而建议施氮浓度为一个区间的研究是根据不同施肥浓度处理组的产量、药效成分等数据, 先拟合出氮磷钾肥浓度与产量、药效成分等之间关系的肥料效应方程, 再以一定范围的产量、药效成分为目标, 代入肥料效应方程得出建议施肥浓度范围<sup>[8]</sup>。

表 1 中共总结了 57 篇文章中对中药材氮、磷、钾肥的建议施用浓度, 以不同入药部位进行整理, 涉及中药材品种 47 个。其中多数研究报道了建议施用纯氮的浓度, 其他研究报道的是建议施用的尿素浓度, 为方便比较, 将建议施用尿素浓度按其中的氮百分比含量折合成建议施用纯氮浓度, 对于没有报道尿素中纯氮百分比的研究, 按照 46% 的纯氮含量 (大部分研究中尿素的含氮量为 46%) 进行折算。此外, 由于对厚朴、何首乌、山银花的研究针对的是盆栽苗或单株植物, 无法与其他研究的施氮浓度单位统一, 分析时未包括此 3 篇研究。结果表明, 以上研究中尿素为中药材种植过程中最常用的氮肥产品, 作者对表 1 中药用植物施氮量进行了分析, 发现以不同部位入药的药用植物施氮量之间并未显著差异 (单因素 ANOVA,  $F=0.299$ ,  $P=0.963$ )。但不同中药材品种的建议施氮浓度呈现较大差别, 处于 0~1 035.55 kg·hm<sup>-2</sup>, 建议施氮浓度最低的品种为三七, 最高的品种为南板蓝。建议施氮浓度在 100~199 kg·hm<sup>-2</sup> 的研究最多, 约占表 1 中研究总数的 37.04% (甘草、藿香、丹参等) (图 1), 其次为 200~299 kg·hm<sup>-2</sup>, 约占研究总数的 25.93% (川芎、茯苓、穿心莲等), 再次为 0~99 kg·hm<sup>-2</sup> 约占研究总数的 14.81% (如瓦布贝母、山银花、黄芪、金银花、益母草等), 仅有 1 篇研究建议施氮浓度高于 700 kg·hm<sup>-2</sup>。不同中药材需氮量的差异可能主要与以下因素有关。①施肥前土壤的肥力程度。在所有中药材品种中, 赵宏光等<sup>[27]</sup>在云南省石林县对三七的研究及胡继田等<sup>[15]</sup>在贵州省贵阳市对何首乌的研究给出的建议施氮浓度最低 (为 0), 通过与其他研究对比, 发现这两地土壤中氮磷钾 3 种元素中的 2 种元素含量在所有研究中排名前十, 土壤养分整体处于“极丰”状态, 可能为中药材的生长提供了足够的营养, 因此导致无须施氮。进一步对表中施肥前土壤氮、磷、钾含量与药用植物施氮量进行回归分析, 发现当对表中所有药用植物施氮量与土壤氮磷钾含量进行回归分析时, 并不显著相关 (线性回归,  $F=1.672$ ,  $P=0.196$ )。但当仅研究以根部或根茎入药的药用植物施氮量与土壤中氮、磷、钾含量回归关系时, 发现显著相关 (线性回归,  $F=4.732$ ,  $P=0.021$ )。研究结果表明根及根茎入药的药用植物对土壤养分的敏感程度高于以叶、花、果等其他部位入药的药用植物。并且, 当对各地土壤氮磷钾含量进行分析时, 发现种植不同药用植物的土壤本底氮磷钾含量之间有一定差异, 其中以根茎入药的药用植物种植的土壤中钾含量显著较高 (单因素 ANOVA,  $F=0.299$ ,  $P=0.963$ )。这些发现表明了对于药用植物, 特别是以根及根茎入药的药用植物, 测土配方的科学性和重要性, 只有在施氮前明确土壤中的养分含量, 才能制定出合理的中药材施肥方案。②研究目的。同一中药材品种, 即使在同一地区, 研究目的的不同也会造成建议施氮浓度的较大差异, 如同样是陕西榆林地区的蒙古黄芪, 以黄芪多糖、皂苷等药效成分含量为目标得到的建议施氮浓度为 225 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[11]</sup>, 而以药效成分及产量  $\geq 3\ 400$  kg·hm<sup>-2</sup> 为目标时, 建议施氮浓度为 95.71~98.45 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[10]</sup>。因此, 明确生产目标是制定合理施氮方案的前提。③中药材品种。不同中药材品种在生长发育过程中对氮的需求量可能有较大差异。表 1 所有研究中建议施氮浓度最高的品种为南板蓝 (931.96~1 035.55 kg·hm<sup>-2</sup>), 显著高于其他中药材品种 (线性回归,  $t=4.28$ ,  $P=0.002$ ), 而其研究所在地贵州的土壤碱解氮含量除了低于四川省茂县, 在表 2 所有研究中土壤碱解氮含量最高, 磷钾含量也处于中等水平。这可能是由于南板蓝在生长过程中具有需氮量高的特性, 才导致了对它的建议施氮浓度显著高于其他中药材品种。

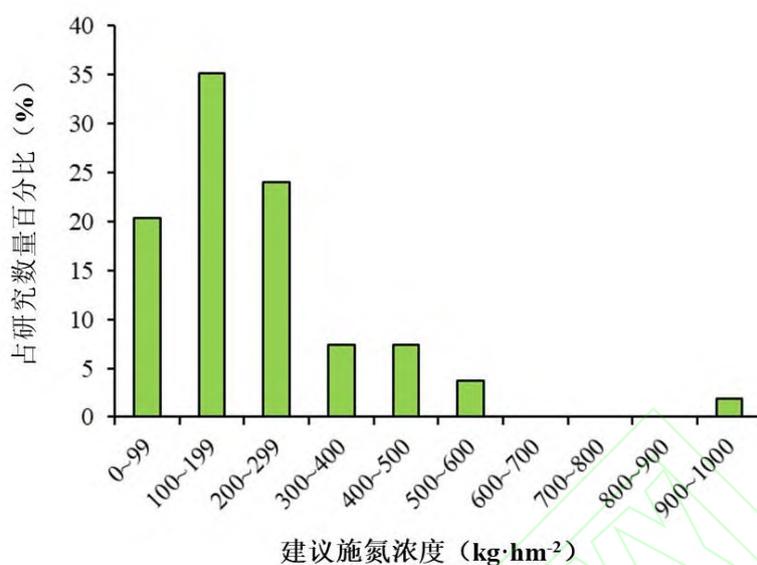


图1 表1 研究中建议施氮浓度的分布情况  
Fig. 1 Distribution of applied N concentration with regards to different CMM in table 1

综上, 要实现中药材的科学施氮, 应充分考虑以上 3 个方面因素, 即了解土壤的养分含量, 并且在明确生产目标前提下, 借鉴前人对该药用植物需肥量的研究结果 (表 1), 根据土壤营养本底数据及该药用植物拟需肥量, 制定合理的配方施肥方案。

## 2 氮肥对中药材产量的影响及机制

### 2.1 氮肥对中药材产量的影响

对中药材的研究发现, 施氮能够提高川芎、丹参等多种中药材的产量, 对膜荚黄芪<sup>[62]</sup>、南板蓝<sup>[20]</sup>等中药材产量的贡献尤为突出, 缺氮会导致西洋参根部生长发育不良, 出现增重少且根细等问题<sup>[63]</sup>。需要注意的是, 尽管适当施氮能够增加产量, 但过量施氮对产量的促进作用微乎其微, 如研究发现过量施 30% 的氮肥仅能使玉米产量增加 4%, 对川芎施用低、中、高氮后, 不同施氮处理之间川芎干重分别较对照高 32.3%, 32.5%, 35.6% 并无显著差异<sup>[63]</sup>。当施氮浓度过高时, 甚至会对植物包括中药材产量产生不利影响。如对小麦的研究发现, 小麦产量随施氮浓度的增加呈先增加后降低的趋势<sup>[64]</sup>。关于中药材的研究发现, 对猫尾草施氮量加倍后, 会导致猫尾草产量降低及土壤中过量氮的积累<sup>[65]</sup>; 对益母草<sup>[40]</sup>、艾纳香<sup>[48]</sup>等施氮浓度过高, 也会导致其产量和品质的降低, 在磷肥施用浓度相同的情况下, 当尿素施用量从 150 kg·hm<sup>-2</sup> 升高至 300 kg·hm<sup>-2</sup>, 益母草产量不仅没有升高, 反而从 298.56 kg·hm<sup>-2</sup> 下降至 297.41 kg·hm<sup>-2</sup>, 并且其药效成分盐酸水苏碱含量从 1.14% 下降至 1.08%。此外, 对于藤三七<sup>[27]</sup>、何首乌<sup>[15]</sup>等药材甚至推荐不施氮, 施氮会导致藤三七产量的下降<sup>[27]</sup>。

### 2.2 氮肥影响中药材产量的机制

施氮可能主要通过以下 5 个方面调控中药材产量。

#### 2.2.1 中药材中干物质的积累

适量施氮对中药材干物质的主要构成成分, 蛋白质的积累具有促进作用。这与施氮后药用植物中营养元素含量的变化密切相关。适量施氮后植物中氮含量多随氮肥的施用而增加<sup>[32]</sup>。氮作为植物正常生长、发育的必需元素, 一般占植物干重的约 1.5%~2%, 占植物总蛋白质的 16%<sup>[66]</sup>。适量施氮还能够进一步促进中药材对于氮素的吸收<sup>[8]</sup>。因此, 适量施氮可通过提升中药材中氮及蛋白质的含量从而提升中药材产量。对中药材的研究发现, 施氮后板蓝根总氮含量显著提高<sup>[67]</sup>; 施氮后广金钱草、银莲花中可溶性蛋白的含量也显著提高<sup>[68]</sup>。并且, 适量施氮也能提高中药材, 如丹参中可溶性糖、淀粉的

积累<sup>[32]</sup>。中药材常以根入药,对一些中药材,施氮引起的根部干物质的积累甚至大于地上部的积累<sup>[32]</sup>。但是,过量施氮会导致中药材中干物质的下降,如对丹参施氮浓度超过  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  后,丹参的可溶性糖、淀粉含量以及产量都会下降,甚至还会造成烧苗<sup>[32]</sup>。

### 2.2.2 中药材的水分利用率

水分是除营养外制约植物产量的另一重要限制性因素,特别是在干旱及半干旱地区,如我国的西北部,水分对植物的产量至关重要,水分利用率的提高会促进产量的提升<sup>[69]</sup>。而在一定的施氮范围内,氮肥的施用可能会提高植物的水分利用率。适量施氮能提高中药材水分利用率的原因是,一方面,适量施氮促进植物根系的生长,增加长根数量,因此有利于中药材对深层土壤水分的吸收及土壤水分利用率的提高。另一方面,施氮后植物中氮含量通常增加,但磷含量多降低,因此施氮后植物中氮磷比通常上升,研究发现氮磷比的提升也是促进水分利用率提高的重要原因<sup>[70]</sup>。然而,过高的施氮浓度无法进一步促进植物水分利用率的提高<sup>[70]</sup>,甚至导致植物氮利用率的降低。施氮浓度过高时,氮淋洗会逐渐增加,并且当土壤环境中氮过多时,会增加土壤环境压力,抑制根部吸收水分,如研究表明对小麦过量施氮会降低  $0\sim 200 \text{ cm}$  土层的储水量,对植物生长不利<sup>[69]</sup>。

### 2.2.3 植物的生长及光合作用

适量施氮能够增强叶片的光合作用能力<sup>[8]</sup>,光合作用的增强有利于营养器官的生长,增加叶面积指数和植物的蒸腾率<sup>[71]</sup>。对于中药材,研究发现氮肥作为茎叶生长的重要元素,能有效促进荆芥的分枝数及成穗数<sup>[6]</sup>,还能增加禾本科的分蘖<sup>[72]</sup>。特别是干旱条件下,施氮还能够缓解叶绿素 a、叶绿素 b 的下降程度进而保护干旱条件下中药材的产量。但是,过高的施氮浓度无法进一步促进植物的生长<sup>[70]</sup>。

### 2.2.4 毒性物质

过高的氮肥浓度会产生亚硝酸盐等毒性物质,对植物及土壤微生物产生毒害作用,影响植物对周围环境的物候反应及生理反应,并降低土壤中微生物的多样性<sup>[73]</sup>,这都可能会降低药用植物的产量。

### 2.2.5 病虫害

施氮对产量的影响除了取决于植物自身,与病虫害的危害程度也紧密相关。施氮对中药材抗性具有调控作用。在农作物上的研究表明虽然施肥会促进水稻的生长,但由于同时加重了病虫害,导致施肥后的产量与未施肥相比不升反降<sup>[74]</sup>。对中药材的研究发现,红花施氮过多会诱发炭疽病,在延胡索生长后期施氮过多会造成霜霉病及菌核病的严重发生<sup>[75]</sup>。也有研究表明,施氮会提高植物对全蚀病、叶斑病等的抗性,降低一些死体营养型病原菌的感染力<sup>[71]</sup>。

因此,把握施氮量对提高中药材产量至关重要,此外,选对施氮时期也是促进中药材产量提升的关键。在中药材生育前期,通常对氮素需求较为迫切。在此阶段施氮,能更好地促进中药材干物质的积累。如对川芎的研究发现,春季施氮能够显著提高川芎产量<sup>[63]</sup>,然而在季节晚期再施氮就起不到增产的目的。

## 3 施氮对中药材质量的影响及机制

次生代谢物作为中药材的主要药效成分,是构成中药材质量的物质基础<sup>[76]</sup>。20 世纪 50 年代,研究发现植物中的次生代谢物是抵御病原物和植食性昆虫的重要抗性物质<sup>[77]</sup>,由于这些代谢物没有在初级代谢中直接发挥作用,因此被称为次生代谢物。次生代谢物约有 10 000 种,是植物抗性的重要组成部分。中药材中的次生代谢物种类繁多,有芥子油苷、萜类、生物碱等<sup>[19,78]</sup>。植物中次生物质的含量会受到多种因素的调控,不同植物包括中药材对氮肥的响应不同,有的植物抗性完全或者几乎完全由植物的基因型决定,如已经适应了贫瘠营养条件的植物,营养条件等的变化不会对其次生代谢物含量产生显著影响<sup>[77]</sup>。而对于其他受营养条件影响在抗性方面可塑性较强的植物,研究发现,施肥是造成不同栽培条件下植物次生物质含量差别的主要原因,比施用杀虫剂的影响更强<sup>[79]</sup>。受施氮影响的次生代谢物既包括含氮次生代谢物(生物碱、非蛋白质氨基酸等),又包括非含氮次生代谢物(如酚类、萜烯、类黄酮、鞣酸等)<sup>[80]</sup>。

### 3.1 施氮对含氮次生代谢物的影响及机制

关于施氮对中药材中含氮次生代谢物影响的研究发现, 适量施氮能够增加川芎、黄连、苦豆子、益母草等多种中药材中生物碱的含量<sup>[63, 81]</sup>。对川芎施氮(31.8 kg·hm<sup>-2</sup>)后, 其总生物碱含量较不施肥提高 49.5%<sup>[63]</sup>; 对黄连施氮后 (Hoagland 液氮浓度), 黄连中小檗碱含量由施氮前根干重的 1.2% 上升至 4.56%, 提高了 2 倍多<sup>[82]</sup>; 不同浓度氮肥均有提高苦豆子叶、茎、根中苦参碱含量的效应, 施氮浓度为 150 kg·hm<sup>-2</sup> 时苦豆子中苦参碱积累量提高较大, 叶、茎、根较不施氮分别提高 77.9%, 42.6%, 59.5%<sup>[83]</sup>; 益母草中水苏碱和总生物碱含量也在施氮后显著提高<sup>[41]</sup>。 $\gamma$ -氨基丁酸(GABA)是非蛋白质氨基酸, 也是多种中药的有效成分, 具有降压等作用。虽然目前尚无研究报道施氮对中药材中非蛋白质氨基酸影响的报道, 但对农作物糙米的研究发现, 施氮能够增加其  $\gamma$ -氨基丁酸的含量<sup>[84]</sup>。之所以适量施氮能够增加植物包括中药材中含氮次生代谢物含量, 可能与叶片是合成生物碱的第一器官有关, 适当施氮能够增加生物碱合成前体所需的氮源, 从而提高了生物碱的积累。并且生态学中关于营养调控植物抗性的一个重要假说, 碳素-营养平衡假说认为, 施氮会降低植物中碳与营养物质 (通常为氮) 的比值, 从而使植物中含氮的次生代谢物水平升高<sup>[77]</sup>。

### 3.2 施氮对非含氮次生代谢物的影响及机制

对于非含氮次生物质, 施氮后通常会造造成中药材中酚类物质含量的显著降低。当磷、钾肥施用浓度相同时, 施氮 8 个月后, 不施氮的丹参中迷迭香酸质量分数约为 4%, 高于施用低浓度 (0.423 g·L<sup>-1</sup>)、中浓度 (0.845 g·L<sup>-1</sup>)、高浓度 (1.263 g·L<sup>-1</sup>) 氮肥的丹参中约 2.4%, 2%, 1.7% 的迷迭香酸含量; 并且丹酚酸 B 也呈现了相同的趋势, 即施氮浓度越高, 丹酚酸 B 含量越低, 施氮 8 个月后, 施高浓度氮的丹参中丹酚酸 B 质量分数仅为约 2.2%, 而不施氮丹参中丹酚酸 B 质量分数约为 3.2%, 约为施高浓度氮的近 1.5 倍<sup>[85]</sup>。赶黄草施氮 (2.94 g/盆) 后, 其中的槲皮素由 2.182 mg·g<sup>-1</sup> 下降至 1.843 mg·g<sup>-1</sup>。此外, 麦冬中麦冬黄酮、芝麻和胡麻中的类黄酮含量也均出现下降<sup>[86]</sup>。这与前人关于施氮对水果<sup>[87]</sup>、蔬菜<sup>[79]</sup>中酚类次生代谢物的影响一致。

施氮之所以会造成酚类物质含量的降低, 主要与合成途径中的酶活性及前体化合物有关。首先, 施氮会导致合成酚的关键酶苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 和酪氨酸解氨酶活性降低, 进而导致植株总酚含量降低<sup>[8]</sup>。研究发现药菊、荞麦中 PAL 活性与施氮浓度成反比<sup>[88]</sup>。其次, 酚类物质中的苯丙烷类及其衍生化合物, 会与蛋白质的合成竞争同一前体物质—苯丙氨酸。苯丙烷类及其衍生化合物 (如羟基苯丙烯酸, 类黄酮, 鞣酸, 木质素等) 是由苯丙氨酸通过莽草酸合成途径合成的, 而蛋白质也是通过苯丙氨酸合成。当植物加速生长时, 由于需要合成大量蛋白质, 会造成苯丙氨酸浓度的降低。并且施氮后, 植物通常会将更多的能量用于生长发育, 因此, 与蛋白质合成竞争同一前体物质的酚类物质合成便会受到抑制<sup>[80]</sup>。

萜类及可水解的单宁也属于非含氮代谢物, 施氮对萜类及可水解的单宁的影响与酚类物质可能有所不同<sup>[89]</sup>。研究发现施氮对三七中的萜类物质皂苷的含量及泽泻中 23-乙酰泽泻醇 B 的含量没有显著影响<sup>[35]</sup>。之所以出现这样的现象可能是由于萜类通过甲羟戊酸途径合成, 可水解的单宁的合成前体为五倍子酸, 萜类物质及可水解的单宁的合成与蛋白质合成之间没有直接的竞争关系<sup>[89]</sup>。然而, 也有研究发现施氮会增加木本植物的萜类物质水平, 如在重庆地区的研究发现, 施氮后 (150~300 kg·hm<sup>-2</sup>) 青蒿中的青蒿素含量逐渐升高<sup>[46]</sup>。研究所在地有机质含量仅为 12.1 g·kg<sup>-1</sup>, 与较其他青蒿种植地相比较低。因此施氮后青蒿素含量的提高可能与植物营养状态有关, 研究发现对营养匮乏的植物施用适量氮后, 通常会增加植物中次生代谢物浓度<sup>[90]</sup>。因此, 施氮对次生代谢物的影响除了与其合成通路有关, 还可能受不同地区施氮前土壤的基础营养条件的影响。

综上, 施氮通常会增加中药材中生物碱等含氮次生代谢物含量, 降低中药材中酚类物质等非含氮次生代谢物含量。中药材中发挥药效成分的次生代谢物种类各异, 因此应针对不同中药材中的目标次生代谢物种类科学地施用氮肥, 不能盲目照搬传统农业生产中以植株快速生长、高产为目标的施肥方式, 不合理地施氮可能会造成中药材质量的下降。

## 4 展望

综上所述, 施氮对中药材的产量及次生物质含量具有重要的调控作用, 氮肥对不同中药材产量、质量的影响有很大差异, 施氮浓度差异也会造成对中药材产量、质量的不同影响。施氮对中药材产量及质量的调控作用及机制研究对中药材的科学施肥具有重要的指导及实践意义, 目前, 对于施肥对中药材产量和质量的调控作用研究还大多停留在现象发掘阶段, 关于调控机制的研究仍少之又少。应进一步从以下方面深入研究施肥对中药材产量及品质的调控机制。①从分子水平研究氮肥对中药材产量的调控机制, 氮肥对不同中药材产量的影响各不相同, 这与其基因有关。目前, 对于模式作物如番茄和拟南芥, 已经开展了关于其根系中对氮有响应的基因及调控氮利用率基因, 如丙氨酸转移酶等的研究, 然而对于中药材中参与氮肥的利用、代谢等基因的研究仍基本为空白。②从分子水平研究氮肥对中药材质量的调控机制, 一些次生代谢物在中药材中的合成通路已经明确, 研究施氮对这些次生代谢物合成通路基因的调控作用将为中药材品质的提高提供新途径。③加强关于磷肥、钾肥、微量元素等常用肥料对中药材产量和品质的调控作用研究, 这些营养元素对中药材的生长和药效成分的积累也具有重要作用, 在田间常与氮肥配施, 研究这些元素对中药材产量和品质的调控作用对于配方施肥至关重要, 将有助于通过科学施肥最大化中药材种植效益、促进中药材的可持续发展。

### [参考文献]

- [1] 于彩莲, 刘元英, 彭显龙. 中草药施肥研究状况及展望[J]. 东北农业大学学报, 2003 (4): 478.
- [2] 关佳莉, 王刚, 张梦蕊, 等. 不同氮素供应水平对菘蓝生长及药材质量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33 (10): 2077.
- [3] 王丹, 侯俊玲, 万春阳, 等. 中药材施肥研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42 (1): 225.
- [4] HAMZAH A, BEH C W, SARMANI S B, et al. Studies on elemental analysis of Chinese traditional herbs by neutron activation technique and their mutagenic effect[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2004, 259(3):499.
- [5] 鲁泽刚, 卢迎春, 张广辉, 等. 氮磷钾配施对灯盏花产量和品质的影响及肥料效应[J]. 核农学报, 2019, 33 (3): 616.
- [6] 张文军, 骆翔, 郭玉海, 等. 氮、磷、钾对荆芥产量及挥发油含量的影响[J]. 北方园艺, 2010 (16): 194.
- [7] 吴家胜, 张往祥, 曹福亮. 氮磷钾对银杏苗生长和生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报. 自然科学版, 2003, 27 (1): 63.
- [8] 朱再标. 柴胡配方施肥及需水规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- [9] 高星. 沙地黄芪规范化栽培综合农艺措施集成[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [10] 程萌萌. 氮磷钾对蒙古黄芪生长发育及次生代谢产物积累的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [11] 高青鸽. 施肥及采收期对蒙古黄芪生长和次生代谢的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [12] 宋庆燕. 氮磷钾配施对黄芪产量和质量的影响[D]. 北京: 北京中医药大学, 2017.
- [13] 杨晓刚, 庄洋, 李青山, 等. 氮磷钾配比施肥对根茎冰草产量及营养成分的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55 (3): 692.
- [14] 吴春, 陈兴福, 杨文钰, 等. 秦艽质量与产量方程施肥效应研究[J]. 中药材, 2015, 38 (9): 1798.
- [15] 胡继田, 赵致, 王华磊, 等. 不同水肥处理对何首乌几个栽培生理指标的影响研究[J]. 时珍国医国药, 2012, 23 (11): 2863.
- [16] 王静. 矿质营养对桔梗生长及有效成分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [17] 马晓冲. 施肥和密度对三岛柴胡产量品质及氮磷钾吸收的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [18] 吴鸣岐, 魏玉昌, 杜连恩, 等. 氮、磷、钾肥不同配比对三岛柴胡产量及品质的影响[J]. 河北农业科学, 1999, 3 (3): 13.
- [19] 左晓燕. 怀牛膝氮磷钾营养特性及施肥对其产量和品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008.
- [20] 魏世勇. 氮、磷、钾肥配施对南板蓝产量及靛玉红含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007 (3): 43.
- [21] 王康才, 唐晓清, 吴健, 等. 配方施肥对板蓝根产量和多糖含量的影响[J]. 中国中药杂志, 2007, 32 (24): 2588.
- [22] 黄鹏. 施肥对绞股蓝产量及根径的效应[J]. 中药材, 1999, 22 (1): 1.
- [23] 李金龙, 熊俊芬, 张海涛, 等. 氮、磷、钾对滇重楼产量及皂苷含量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31 (5): 895.
- [24] 纪瑛, 张佳杰, 王龙强, 等. 氮磷钾配施对甘草生长动态和产量的影响[J]. 草业科学, 2014, 31 (4): 717.
- [25] 刘金亮. 川芎品质评价方法构建与规范化生产技术规程集成[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- [26] 许念芳, 刘少军, 兰成云, 等. 氮磷钾配方施肥对山药产量的影响[J]. 山东农业科学, 2014, 46 (11): 79.
- [27] 赵宏光. 不同土壤水肥对三七的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [28] 韦美丽, 孙玉琴, 黄天卫, 等. 不同施氮水平对三七生长及皂苷含量的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2008, 22 (1): 17.
- [29] 王占红. 黄精营养特性及配方施肥技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [30] 夏奉乾. 丹参营养特性及需肥规律研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2010.
- [31] 翟彩霞, 温春秀, 王凯辉, 等. 氮、磷、钾肥对丹参根系生长及养分含量的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23 (z1): 220.
- [32] 薛永峰. 不同氮、磷水平对丹参产量和有效成分的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [33] 李姣红, 张崇玉, 罗光琼. 氮磷钾配施对白芷产量和多糖的影响[J]. 中草药, 2009, 40 (11): 1803.
- [34] 窦明明, 石峰, 马留辉, 等. 微肥配施对泽泻产量的影响[J]. 中药材, 2017, 40 (1): 7.
- [35] 张秋芳, 刘波, 史怀, 等. 氮磷钾肥对地道药材建泽泻生长与品质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15 (3): 39.
- [36] 邓秋林, 杨正明, 陈雨, 等. 氮磷钾配施对瓦布贝母产量及总生物碱质量分数的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28 (7): 1.
- [37] 黄鹏, 陈敏, 安泽山, 等. 氮钾肥配施对藤三七叶片产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25 (24): 240.
- [38] 张翔, 朱洪助, 孙春河. 大蒜氮磷钾营养吸收规律与平衡施肥研究[J]. 土壤肥料, 1998 (2): 10.

- [39] 江泽普, 韦广波, 蒙炎成, 等. 优化施肥模式对岩溶区中药材扶芳藤生长及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2009, 22 (6): 1649.
- [40] 李兴, 马建强, 陈太星, 等. 氮磷钾配比施肥对益母草药材产量和质量的影响[J]. 现代农业科技, 2019 (6): 32.
- [41] 张燕. 益母草生物碱调控的营养条件及其作用机制研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2007.
- [42] 薛启, 王康才, 隋利, 等. 氮磷钾配施对藜蒿生长和产量的影响[J]. 中药材, 2018, 41 (4): 784.
- [43] 卢挺, 杨全, 唐晓敏, 等. 氮磷钾配施对广金钱草产量及质量的影响[J]. 广西植物, 2014, 34 (3): 426.
- [44] 杨全, 唐晓敏, 程轩轩, 等. 氮磷钾配施对广金钱草生长和夏佛塔苷含量影响的研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29 (4): 206.
- [45] 吴叶宽, 李隆云, 胡莹. 黄花蒿种子生产优化措施探讨[J]. 中国中药杂志, 2009, 34 (17): 2144.
- [46] 杨水平, 杨宪, 黄建国, 等. 氮磷钾肥和密度对青蒿生长和青蒿素产量的影响[J]. 中国中药杂志, 2009, 34 (18): 2290.
- [47] 张从宇, 谭志静, 陶成林, 等. 密度、磷、氮对穿心莲产量和质量的影响[J]. 中草药, 2007, 38 (7): 1067.
- [48] 顾岑, 王华磊, 赵致, 等. 氮磷钾配施对艾纳香生长及产量、品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (8): 146.
- [49] 边丽梅, 张雄杰, 盛晋华. 施氮量对香青兰生长、产量及挥发油含量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30 (1): 45.
- [50] 张忠满. 花曲柳育苗中氮肥对苗木生长的影响[J]. 林业勘查设计, 2017 (4): 38.
- [51] 胡小龙. 厚朴营养诊断及质量评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [52] 张建海, 冯彬彬, 徐晓玉, 等. 优化施肥效应模型对山银花产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26 (4): 1546.
- [53] 祝丽香, 王建华, 毕建杰, 等. 不同氮素用量对杭白菊养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (4): 992.
- [54] 朱亚, 赵永平, 周彦芳, 等. 氮磷钾肥配施对金盏花产量的影响[J]. 北方园艺, 2010 (19): 101.
- [55] 王俊儒, 霍阿丽, 张晓丽, 等. 氮磷配施对金银花产量和品质的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40 (4): 847.
- [56] 张荣超, 辛杰, 郭庆梅. “3414”肥效试验对瓜蒌产量的影响[J]. 作物杂志, 2016 (4): 150.
- [57] 郭巧生, 陈宇航, 刘丽, 等. 优化施肥对夏枯草果穗干物质及其产量的效应分析[J]. 中国中药杂志, 2011, 36 (21): 2932.
- [58] 韩梅, 杨利民, 韩大勇, 等. 施肥对蒺藜药材产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31 (2): 178.
- [59] 曹岚, 张寿文, 邵爱娟, 等. 配方施肥对三叶木通春梢生长效应的影响研究[J]. 中国中药杂志, 2008, 33 (13): 1540.
- [60] 李宁, 杨太新. 不同氮肥处理对王不留行氮素吸收利用及产量的影响[J]. 中药材, 2018, 41 (9): 2044.
- [61] 郁万文, 曹福亮, 谢友超. 氮磷钾配施对白果产量和品质的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33 (3): 9.
- [62] 王渭玲, 王振, 徐福利. 氮、磷、钾对膜荚黄芪生长发育及有效成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2008, 33 (15): 1802.
- [63] 范巧佳, 刘灵, 郑顺林, 等. 春季施氮时期和数量对川芎产量、生物碱和阿魏酸的影响[J]. 四川农业大学学报, 2013, 31 (2): 136.
- [64] YANG Y, XIONG J, TAO L, et al. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review[J]. Sci Total Environ, 2020, 708:135186.
- [65] AHMED M, RAUF M, MUKHTAR Z, et al. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2017, 24(35):26983.
- [66] SUN Y, WANG M, MUR L, et al. Unravelling the roles of nitrogen nutrition in plant disease defences[J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(2):572.
- [67] 唐晓清, 杨月, 吕婷婷, 等. 氮素形态及配比对夏播苕蓝生长及活性成分含量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26 (1): 21.
- [68] 黄敏. 施氮水平对广金钱草碳氮代谢及其活性成分含量和药材产量的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
- [69] ZHONG Y, SHANGGUAN Z. Water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat under long-term nitrogen fertilization regimes in northwest China[J]. PLoS ONE, 2014, 9(6):e98850.
- [70] YAN W, ZHONG Y, SHANGGUAN Z. The relationships and sensibility of wheat C:N:P stoichiometry and water use efficiency under nitrogen fertilization[J]. Plant Soil Environ, 2015, 61(5):201.
- [71] RAHMAN M, CHIKUSHI J, SAIFIZZAMAN M, et al. Rice straw mulching and nitrogen response of no-till wheat following rice in Bangladesh[J]. Field Crops Res, 2005, 91:71.
- [72] STUMPF B, YAN F, HONERMEIER B. Influence of nitrogen fertilization on yield and phenolic compounds in wheat grains (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*)[J]. J of Plant Nutr Soil Sci, 2019, 182(1):111.
- [73] ELHANAFI L, HOUBOU M, RAIS C, et al. Impact of excessive nitrogen fertilization on the biochemical quality, phenolic compounds, and antioxidant power of *Sesamum indicum* L Seeds[J]. J Food Quality, 2019, 2019:1.
- [74] HU X, CHENG C, LUO F, et al. Effects of different fertilization practices on the incidence of rice pests and diseases: a three-year case study in Shanghai, in subtropical southeastern China[J]. Field Crops Res, 2016, 196:33.
- [75] 董岩. 药用植物病虫害的农业防治方法[J]. 中国林副特产, 1996 (1): 26.
- [76] 黄璐琦, 郭兰萍. 中药资源生态学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2009.
- [77] STAMP N. Out of the quagmire of plant defense hypotheses[M]. Chicago: The University of Chicago Press, 2003.
- [78] 蒋待泉, 王红阳, 康传志, 等. 复合胁迫对药用植物次生代谢的影响及机制[J]. 中国中药杂志, 2020, 45 (9): 2009.
- [79] BRANDT K, LEIFERT C, SANDERSON R, et al. Agroecosystem management and nutritional quality of plant foods: the case of organic fruits and vegetables[J]. CRC Crit Rev in Plant Sci, 2011, 30(1-2):177.
- [80] CHEN Y, OLSON D M, RUBERSON J R. Effects of nitrogen fertilization on tritrophic interactions[J]. Arthropod Plant Interact, 2010, 4(2):81.
- [81] 周波. 主要矿质元素对生育前期黄连植株生长发育的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [82] 张丽萍, 陈震, 马小军, 等. 不同氮素水平对黄连植株生长及根茎小檗碱含量的影响[J]. 中国中药杂志, 1998, 23 (7): 10.
- [83] 纪瑛, 蔺海明, 陈垣, 等. 施氮对苦豆子生物量及生物碱积累的影响[J]. 草业学报, 2008, 17 (3): 40.
- [84] 石洪芳, 易志杰, 杨特武, 等. 氮钾运筹模式对高花青素特种稻产量及糙米营养品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37 (2): 43.
- [85] 夏贵惠. 丹参氮磷钾需求及其与产量质量的关系初探[D]. 北京: 北京中医药大学, 2017.
- [86] 胡尚钦, 邓科君, 童文, 等. 施氮磷钾对赶黄草产量和槲皮素含量的影响[J]. 西南农业学报, 2009, 22 (5): 1383.
- [87] STEFANELLI D, GOODWIN I, JONES R. Minimal nitrogen and water use in horticulture: effects on quality and content of selected

- nutrients[J]. *Food Res Int*,2010,43(7):1833.
- [88] MARGNA U, MARGNA E, VAINJARV T. Influence of nitrogen nutrition on the utilization of L-phenylalanine for building flavonoids in buckwheat seedling tissues[J]. *J Plant Physiol*,1989,134(6):697.
- [89] HAUKIOJA E, OSSIPOV V, KORICHEVA J, et al. Biosynthetic origin of carbon-based secondary compounds: cause of variable responses of woody plants to fertilization?[J]. *Chemoecology*,1998,8(3):133.
- [90] HERMS D A. Effects of fertilization on insect resistance of woody ornamental plants: reassessing an entrenched paradigm[J]. *Environ Entomol*,2002,31(6):923.

