

# Meta 分析氮肥对我国秋季大白菜产量的影响及调控因素解析

周康<sup>1</sup> 杜岩功<sup>2\*</sup> (1.威海市农业农村局,山东威海 264200; 2.中国科学院西北高原生物研究所,青海西宁 810001)

**摘要** 采用 Meta 分析方法,通过对我国已开展的 118 组有关施用尿素对秋季大白菜产量影响的试验结果进行耦合分析。结果表明,施用尿素对我国秋季大白菜产量影响的平均效应值约为 0.37±0.04 (95% 置信区间 0.30~0.44),施氮肥显著提高秋季大白菜产量 ( $P < 0.001$ )。施肥对不同省份秋季大白菜产量影响存在较大异质性,湖南、广西、宁夏、福建、新疆平均效应值较高,而江苏、贵州、辽宁、江西、内蒙平均效应值偏低,显著低于全国平均水平 ( $P < 0.000 1$ )。不同氮素施用水平对产量影响的平均效应值从高到低依次为高、低和中等水平,三者之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。土壤有机质、速效磷和速效钾含量对平均效应值具有显著影响 ( $P < 0.01$ ),提高其供给能力,可以有效促进尿素对秋季大白菜的增产效果。

**关键词** 尿素; 剂量; Meta 分析; 随机效应模型; 平均效应值

中图分类号 S634.1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)20-0160-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.20.043



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Meta-analysis of the Effect Size of Nitrogen Fertilization on the Yield of Chinese Cabbage in Autumn and Its Regulatory Factors**  
ZHOU Geng<sup>1</sup> DU Yan-gong<sup>2</sup> (1. Bureau of Rural Area and Agriculture in Weihai, Weihai, Shandong 264200; 2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining, Qinghai 810001)

**Abstract** 118 groups of experiment results about the averaged effect size of urea application on the yield of Chinese cabbage in autumn were analyzed by meta-analysis. This study indicated that the average effect size was 0.37±0.04 (95% confidence interval 0.30-0.44) of urea application on the yield of Chinese cabbage in autumn, and nitrogen application significantly increased the yield of Chinese cabbage in autumn ( $P < 0.001$ ). The average effect sizes of fertilization on the yield of Chinese cabbage in autumn in different provinces was quite different. Province of Hunan, Guangxi, Ningxia, Fujian and Xinjiang had higher average effect sizes, while Jiangsu, Guizhou, Liaoning, Jiangxi and Inner Mongolia had lower average effect sizes, significantly lower than the national average level ( $P < 0.000 1$ ). Furthermore, the order of the average effect size of different nitrogen application levels was high, low and medium level. There was significant difference between them ( $P < 0.05$ ). Soil organic matter, available phosphorus and available potassium had significant effect on the average effect value ( $P < 0.01$ ). Increasing their supply capacity could effectively promote the yield increase effect of urea on Chinese cabbage in autumn.

**Key words** Urea; Dose; Meta-analysis; Random effect model; Effect size

在现代农业生产中,氮肥对蔬菜作物的生长具有重要作用<sup>[1]</sup>。受肥料性质及环境因素的影响,我国氮肥当季利用率为 30%~35%,蔬菜生产肥料用量过高<sup>[2-3]</sup>,造成资源浪费且对生态环境产生严重负面影响<sup>[4]</sup>。

大白菜是我国北方主要的冬贮蔬菜,同时也是长江流域地区主要秋冬蔬菜<sup>[5]</sup>。施肥显著提高秋季大白菜产量但不影响其品质<sup>[6]</sup>。氮肥减量到适宜水平的 80% 时,施肥量对大白菜产量无显著影响,而将氮肥增加到 120% 时,减产达显著水平<sup>[7]</sup>。随着氮肥施用量增加,秋季大白菜产量先增加后降低,河南地区施肥量 30.0 g/m<sup>2</sup> 时,大白菜产量最高<sup>[8]</sup>。而宁夏灌区秋季大白菜高产的最佳施肥量为 42.7 g/m<sup>2</sup>,但农业生产大量施用氮肥,施氮量高达 90.0 g/m<sup>2</sup><sup>[9]</sup>,致使耕作层土壤残留大量硝态氮<sup>[8]</sup>。

Meta 分析可以针对相同或相似问题的多个案例研究得到普遍性结论,并进行差异原因解析<sup>[10-11]</sup>。目前氮肥施用量对大白菜产量的影响仍是热点研究内容<sup>[9]</sup>,而有关我国各省份秋季大白菜对不同用量尿素响应特征的整合研究仍相对比较薄弱。笔者基于 Meta 分析结果,综合分析施用尿素对我国秋季大白菜产量的影响,解析平均效应值与主要土壤理化性质等调控因素之间的耦合关系,为指导我国及主要省份

合理施用尿素、提高秋季大白菜产量提供科学依据。

## 1 材料与与方法

**1.1 数据收集** 通过 CNKI 中国知网数据库,检索关键词“氮肥”且“白菜”或者“产量”;共计搜索到中文论文 85 篇。通过原文下载,按照如下准则进行文章筛选:研究对象为秋季大白菜,施用肥料为尿素,设置对照和重复试验处理。45 篇论文包含 118 组研究数据被采用,进行统计分析。调查样点主要分布于 17 省和自治区,河北省 15 组,宁夏 14 组,湖南 11 组,北京、贵州和山东各 10 组,广西和四川各 8 组,辽宁 7 组,福建、江苏和浙江各 4 组,新疆、内蒙古、青海和河南各 3 组,江西省 1 组数据。对于论文以图片发表的数据,采用 WebPlotDigitizer 软件进行数据提取<sup>[12]</sup>。

**1.2 基于均值的效应值(反应比)**  $\ln R = \ln \frac{x_e}{x_c} = \ln(x_e) - \ln(x_c)$  式中,  $x_e$  为施肥处理样地产量均值,  $x_c$  为对照的均值。

与效应值相对应的研究内方差:

$$V_{\ln R} = \frac{S_e^2}{N_e x_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c x_c^2}$$

式中,  $S_e$  为处理的标准差,  $S_c$  为对照的标准差。

基于随机效应模型的平均效应值及置信区间的计算:

单个研究结论的权重  $w_i^* = 1/(v_i + \tau^2)$

$$\text{平均效应值 } y = \frac{\sum_{i=1}^k w_i^* y_i}{\sum_{i=1}^k w_i^*}$$

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目(31770532);青海省自然科学基金面上项目(2018-ZJ-914)。

**作者简介** 周康(1982—)男,山东威海人,农艺师,从事农产品质量监管与执法工作。\* 通信作者,研究员,博士,从事农田氮素循环及其环境效应研究。

**收稿日期** 2020-04-12

$$\text{总体标准误差 SE} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*}}$$

平均效应值的 95% 置信区间  $CI = \bar{y} \pm 1.96 SE$

式中  $\rho_i$  表示研究内方差  $\tau^2$  表示研究间方差  $\rho_i$  为单个研究效应值。

**1.3 数据统计分析方法** 数据通过 R 语言 (3.6.1 版本) 程序进行 meta 分析。效应值和平均效应值的计算采用随机效应模型 (rma)。当效应值的整体异质性很强时 (即  $Q_t$  值较高, 且  $P < 0.05$ ) 表明试验的效应值存在较大差异, 基于混合效应模型 (mods), 引入解释变量对这种差异进行分析。发表偏差通过漏斗图对称性检验完成 (Egger's regression test)。

**2 结果与分析**

**2.1 施用氮肥对我国秋季大白菜产量的影响** 平均效应值表示施用尿素处理组与对照组的差异程度, 即表明氮肥对秋季大白菜产量影响的大小指标, 效应值越大则施肥作用效应越强。施用尿素对我国秋季大白菜产量影响的平均效应值为  $0.37 \pm 0.04$  (95% 置信区间  $0.30 \sim 0.44$ , 图 1)。这表明施氮肥显著提高我国秋季大白菜产量 ( $P < 0.001$ )。施用尿素农田大白菜产量约为对照的 1.45 倍。施用氮肥对秋季大白菜产量影响极大, 增产范围为  $0.10\% \sim 841.74\%$ , 平均值为  $(63.12 \pm 121.31)\%$ 。

施肥对不同省份秋季大白菜产量影响的平均效应值存在较大差异, 作用强度从高到低依次为湖南、广西、宁夏、福建、新疆, 平均效应值高于 0.50; 四川、青海、浙江、山东、北京、河北、河南平均效应值为  $0.20 \sim 0.50$ ; 江苏、贵州、辽宁、江西、内蒙平均效应值低于 0.20 (图 2), 显著低于全国平均效应值 ( $P < 0.0001$ )。

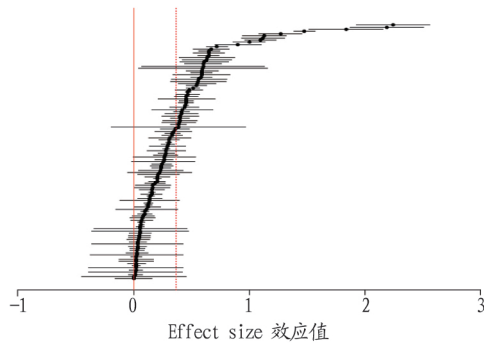


图 1 施氮对我国秋季大白菜产量影响的效应值森林图

Fig.1 Forest plots of effect size of nitrogen fertilization on Chinese cabbage production in autumn

**2.2 不同剂量氮肥对秋季大白菜产量影响的平均效应值及异质性检验** 施用氮肥对我国秋季大白菜产量影响的效应值异质性检验表明, 数据异质性很强 ( $P < 0.0001$ ) 需要引入解释变量对异质性的来源进一步分析。该研究引入了分类变量即不同尿素施用 (高、中、低) 水平作为解释变量, 探讨不同施氮量对效应值的影响幅度。不同氮素水平对平均效应值具有极显著影响 ( $P < 0.0001$ )。对平均效应值影响从高到低依次为高、低和中等水平, 即  $0.40 \pm 0.07$ 、 $0.37 \pm 0.05$ 、 $0.34 \pm 0.08$ , 三者之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 各处理均可以显著

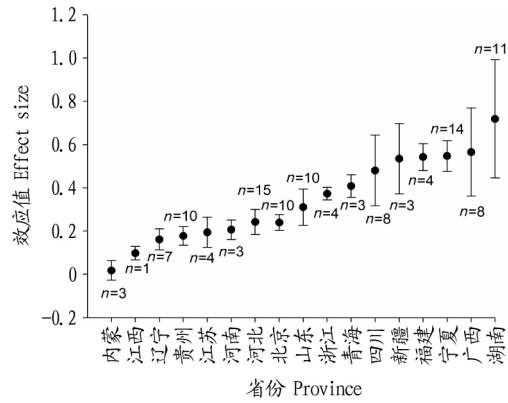


图 2 尿素对不同省份秋季大白菜产量影响的平均效应值对比

Fig.2 Comparison of effect sizes on Chinese cabbages between different province

增加秋季大白菜产量 ( $P < 0.0001$ , 表 1)。残差异质性检验结果表明残差仍具有异质性, 需要引入其他解释变量 ( $P < 0.0001$ , 表 1)。

表 1 不同氮素水平对平均效应值的影响及 95% 置信区间

Table 1 Effects of nitrogen contents on cumulative effect value

氮肥剂量 Types	自由度 (df)	平均效应值 Effect size	95% 置信区间 Confidence interval	P
高 High	38	$0.40 \pm 0.07$ a	0.26~0.53	<0.0001
中 Medium	29	$0.34 \pm 0.08$ c	0.18~0.49	<0.0001
低 Low	48	$0.37 \pm 0.05$ b	0.28~0.46	<0.001

注: 同列不同小写字母表示表示不同剂量间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 氮素剂量包括高 ( $41 \text{ g/m}^2$ )、中 ( $21 \sim 40 \text{ g/m}^2$ ) 和低 ( $1 \sim 20 \text{ g/m}^2$ ) 水平  
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different doses ( $P < 0.05$ ); nitrogen dose included high ( $41 \text{ g/m}^2$ ), medium ( $21 \sim 40 \text{ g/m}^2$ ) and low ( $1 \sim 20 \text{ g/m}^2$ )

**2.3 平均效应值对土壤理化性质等连续变量的响应特征** 进一步引入了土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH 等连续变量 (表 2)。解释变量异质性检验

表 2 平均效应值对土壤理化性质的响应

Table 2 Response of cumulative effect sizes on soil physical characteristic

解释变量 (x) Moderators	异质性检验 Test of heterogeneity (QM)	P	拟合方程 Simulated equation	效应值变异 $R^2$ Effect size variation // %
有机质 Organic matter	35.57	<0.001	$Y = 0.45 + 0.01x$	25.24
速效磷 Available phosphorus	32.17	<0.001	$Y = 0.49 + 0.003x$	22.38
速效钾 Available potassium	7.03	<0.01	$Y = 0.07 + 0.003x$	7.11
pH	2.08	0.15	$Y = 0.85 - 0.06x$	1.39
全氮 Total nitrogen	1.05	0.31	$Y = 0.37 + 0.02x$	0.51
速效氮 Available nitrogen	0.84	0.41	$Y = 0.75 - 0.004x$	0.32
全钾 Total potassium	0.30	0.58	$Y = 0.32 - 0.004x$	0.00
全磷 Total phosphorus	0.03	0.85	$Y = 0.58 - 0.003x$	0.00

注: Y 是平均效应值  
Note: Y is the average effect value

结果表明,土壤有机质、速效磷、速效钾对平均效应值具有显著影响( $P < 0.01$ ,表2)。基于拟合方程结果,可以发现平均效应值与有机质、速效磷、速效钾、全氮之间存在正相关关系,而与pH、速效氮、全磷之间存在正相关关系(表2)。土壤有机质、速效氮、分别可以解释25.24%、22.38%的效应值变异。通过施用有机肥和磷肥,提高土壤有机质和速效磷养分含量,均可以有效提高平均效应值,显著增加秋季大白菜产量。

**2.4 氮肥对我国秋季大白菜产量影响效应值漏斗图的对称性检验** Meta分析是对效应值和平均效应值的定量化评价,数据来源于公开发表的论文,这可能会受论文选择性偏倚的影响。通过对漏斗图的对称性进行检验( $z = 2.73$ ,  $P = 0.63$ ),发现 $P$ 值远大于0.05,这说明所采用数据的漏斗图检验结果基本对称(图3)。因此,该研究并无研究论文发表偏爱性,研究结果具备充分可信度。

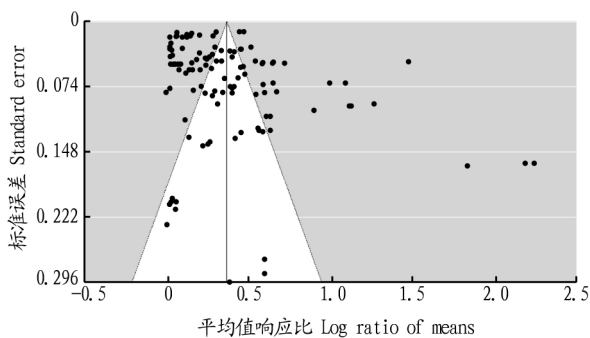


图3 施肥对我国秋季大白菜产量影响的发表偏爱性检验

Fig.3 Egger's regression test for funnel plot asymmetry on effects size in yield

### 3 讨论

近年来,虽然温室蔬菜种植面积急剧增加,但秋冬茬大白菜仍是北方地区冬季的主要供应蔬菜品种<sup>[13]</sup>。大量施用氮肥可能会降低农田地力,降低产量和经济效应<sup>[14]</sup>,而且影响其品质,该研究发现施肥可以显著提高全国尺度秋季大白菜产量,这也说明氮肥是我国农田和蔬菜产业重要的调控因素。尤其是对于湖南、广西、宁夏、福建、新疆这些省份平均效应值明显高于其余12个省份,这些地区由于其土壤肥力以及水热条件更适宜施用氮肥调控秋季大白菜的产量<sup>[15-17]</sup>。作为秋季大白菜的主要产地山东、北京、河北、河南地区,施用尿素对其产量也具有较好的增产效果<sup>[18-19]</sup>。但在内蒙和江西地区,施用尿素的增产效果不明显,经济效益偏低<sup>[20-21]</sup>。

土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分,也是植物营养的主要来源,能促进植物的生长发育<sup>[22]</sup>。土壤氮素供应充足时,大白菜可合成较多的蛋白质,促进细胞的分裂和增长<sup>[13]</sup>,因此植物叶面积增长快,能有更多的叶面积用来进行光合作用。磷肥能促进早期根系的形成和生长,提高植物适应外界环境条件的能力<sup>[5]</sup>。蔬菜作物缺磷时,表现为生长迟缓、产量降低。钾肥能够促进光合作用、提高水分利用效率,缺钾使植物光合作用和根系吸收水分能力明显减弱<sup>[23]</sup>。秋季大白菜的产量同时受土壤有机质和氮磷钾含量等耦合因素的影响<sup>[5,24]</sup>。该研究发现土壤有机质、速效磷、速效钾

为调控尿素对大白菜增产效果的主要因素,而与全量养分之间相关性较低,这可能是因为土壤有机质和速效养分可以快速供给大白菜的吸收利用<sup>[22]</sup>。

### 4 结论

施用尿素可以显著提升我国秋季大白菜产量,尤其是湖南、广西、宁夏、福建、新疆增产效果极其显著。不同剂量尿素对平均效应值影响从高到低依次为高、低和中等水平,且三者之间存在显著差异。施用高水平尿素对大白菜产量提升效果最高。土壤有机质、速效磷、速效钾含量对平均效应值具有显著影响,提高其相应水平,可以有效促进尿素对秋季大白菜的增产效果。

### 参考文献

- [1] 谷佳林,曹兵,徐秋明,等.包衣尿素在春白菜上的应用效果研究[J].中国农学通报,2006,22(4):284-287.
- [2] 黄万花,锦屏县芥菜2+X氮肥分期调控试验初报[J].耕作与栽培,2019,39(1):40-41,45.
- [3] ZHAO C S, HU C X, HUANG W, et al. A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China [J]. Journal of soils and sediments, 2010, 10: 9-17.
- [4] 范文静,林海涛,刘兆辉,等.包膜控释尿素及硝化抑制剂结合尿素对大白菜产量和品质的影响[D].山东农业科学,2015,47(3):56-58,62.
- [5] 孙晓,姜学玲,张占田,等.氮磷钾肥丰缺对白菜产量及养分利用效率的影响[J].山东农业科学,2019,51(5):109-112,116.
- [6] 曹兵,徐秋明,李亚星,等.不同控释肥品种对大白菜产量、氮素吸收和品质的影响[J].华北农学报,2006,21(3):41-45.
- [7] 李月霞,许文营,王煜,等.大白菜氮肥用量梯度对产量的影响[J].河南农业,2017(36):38-39.
- [8] 杨秀臻.氮肥及有机肥对大白菜产量和品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2006.
- [9] 高艳明,孙权,李建设.氮肥施用量对大白菜硝酸盐累积的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(2):115-117.
- [10] ZHAN T Y, ZHANG Z C, SUN J, et al. Meta-analysis demonstrating that moderate grazing can improve the soil quality across China's grassland ecosystems [J/OL]. Applied soil ecology, 2020, 147 [2020-01-05]. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103438.
- [11] BENÍTEZ-LÓPEZ A, ALKEMADE R, SCHIPPER A M, et al. The impact of hunting on tropical mammal and bird populations [J]. Science, 2017, 356(6334):180-183.
- [12] BURDA B U, O'CONNOR E A, WEBBER E M, et al. Estimating data from figures with a Web-based program: Considerations for a systematic review [J]. Research synthesis methods, 2017, 8(3):258-262.
- [13] 郑明强.有机肥和氮肥不同施用量对白菜产量及经济效益的影响[J].安徽农业科学,2016,44(30):112-114.
- [14] 刘顺国,韩晓日,刘小虎,等.氮肥不同施用方式对大白菜产量的影响[J].安徽农业科学,2015,43(28):105-106,196.
- [15] 李贵兵,马广福,杨银林,等.麦后复种大白菜氮肥施用量试验初报[J].宁夏农林科技,2012,53(12):99-100.
- [16] 张海涛,王倩,刘金,等.不同施肥处理对黄淮地区大白菜产量及养分利用率的影响[J].河南农业大学学报,2012,46(4):392-396.
- [17] 林丽红.大白菜“2+x”氮肥试验初报[J].福建农业科技,2015(10):14-15.
- [18] 王靖莹,满孝印,李海云,等.充足磷钾供应下大白菜产量和品质对氮素形态的响应[J].聊城大学学报(自然科学版),2016,29(3):48-51.
- [19] 冯浩杰,刘善江.肥料增效剂对白菜农学效应的影响[J].北方园艺,2015(14):174-177.
- [20] 余策金,郭在斌,谈梅芳,等.氮肥总量控制对大白菜产量影响初探[J].农业与技术,2015,35(1):27.
- [21] 张云艳,宋英霞.氮肥和有机肥对白菜产量及氮磷钾吸收的影响[J].内蒙古农业科技,2013(2):65-66.
- [22] 杨俊刚,徐凯,佟二健,等.控释肥料与普通氮肥混施对春白菜产量、品质和氮素损失的影响[J].应用生态学报,2010,21(12):3147-3153.
- [23] 孙劲寿,李会合,戴亨林.氮钾肥对叶菜产量和品质的效应[J].西南农业大学学报(自然科学版),2004,26(6):710-714.
- [24] 孙权,丁福荣,李鹏,等.氮肥对大白菜硝酸盐累积的影响及合理施用量研究[J].土壤,2003,35(3):255-258.