

紫云英配施化肥对我国水稻产量效应的整合分析

张成兰¹, 刘春增^{1*}, 李本银¹, 郑春风¹, 张济世¹, 吕玉虎², 徐祺豪¹, 曹卫东³

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 信阳市农业科学院, 河南 信阳 464000; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 定量分析我国不同条件下紫云英配施化肥对水稻产量的影响, 为紫云英配施化肥模式在稻田的推广应用提供科学依据。以单施化肥为对照, 通过搜集整理已发表的田间试验数据, 运用整合分析 (Meta-analysis) 的方法, 明确紫云英配施化肥对水稻产量的综合效应, 量化分析了水稻种植模式、化肥配施比例、紫云英翻压量、施肥量、土壤理化性状对紫云英配施化肥增产效应的影响。结果表明: 与单施化肥相比, 紫云英配施化肥显著提高了水稻产量, 增产率为 4.47% (95%CI, 3.16% ~ 5.77%), 其中单季稻增产率为 4.89% (95%CI, 3.01% ~ 6.76%), 双季稻增产率为 4.06% (95%CI, 2.26% ~ 5.87%)。水稻增产率随化肥配施比例的增加呈逐渐上升趋势, 当化肥配施比例 ≤ 0.4 时, 水稻减产 4.58% (95%CI, -2.26% ~ -5.87%)。水稻增产率随紫云英翻压量增加呈先上升后下降趋势, 以紫云英翻压量为 22500 ~ 37500 kg/hm² 时, 增产率较高。稻田施氮量 >180 kg/hm²、施磷量 30 ~ 60 kg/hm²、施钾量 60 ~ 120 kg/hm² 时, 紫云英配施化肥的水稻增产率较高; 土壤有机质含量 <20 g/kg, 土壤全氮含量 <1.5 g/kg, 土壤有效磷含量为 10 ~ 20 mg/kg, 土壤速效钾含量 <50 mg/kg, 土壤 pH 6.5 ~ 7.5 时, 紫云英配施化肥的水稻增产率较高。综上所述, 与单施化肥相比, 紫云英配施化肥可显著提高水稻产量, 且在土壤有机质、全氮含量较低, 土壤 pH 偏中性条件下增产效果较好。紫云英配施化肥条件下, 化肥减施 20% ~ 40%, 紫云英翻压 22500 ~ 37500 kg/hm² 仍能保证水稻增产。

关键词: 紫云英; 水稻; 产量效应; 整合分析

紫云英为豆科黄芪属, 是我国稻田主要的冬季绿肥。冬闲种植翻压紫云英, 能合理利用水、光、热和土地等自然资源, 改善土壤理化性状、培肥土壤^[1], 起到节肥、增产的效果^[2]。目前关于紫云英配施化肥对水稻产量影响的报道较多。万水霞等^[3]指出, 在安徽沿江双季稻区 70% 化肥配施 15000 kg/hm² 紫云英较单施化肥能显著提高水稻产量, 增产率达到 36.29%。刘春增等^[1]指出, 豫南稻区紫云英翻压量为 22500 kg/hm² 情况下, 化肥减施 20% ~ 40%, 仍能保证水稻不减产, 化肥减施过多, 会导致水稻产量下降。陈静蕊等^[4]提出, 长期紫云英还田配施减量化肥对早、晚稻产量产生正面效应, 与常规施肥相比, 不同用量紫云英配施 20% 减量化肥的早稻产量均得

到显著提高, 增产幅度为 5.0% ~ 13.2%。然而, 这些研究多是基于某个试验点或某个地区开展, 其结果受地域、气候、土壤类型等环境条件的限制, 研究结果仅对该区域的生产具有指导意义, 并不能全面阐述不同条件下紫云英配施化肥对水稻产量的响应, 因此需要收集全国范围内的独立试验数据, 进行定量系统的分析。通过收集目前国内外已发表的文献数据, 运用整合分析的方法, 定量分析水稻种植模式、化肥减施比例、紫云英翻压量、施肥量、不同理化性状对水稻产量的影响, 旨在为紫云英配施化肥这一有机无机配施模式在全国范围内的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

基于中国知网、百度学术、谷歌学术、Science Direct 等数据库以“紫云英 (*Astragalus sinicus* or Chinese milk vetch)”、“水稻产量 (Rice yield)”为关键词进行文献检索, 再根据以下条件筛选获取数据: (1) 中文文献要求试验结果发表在北大中文核心期刊上; (2) 必须是大田试验, 排除盆栽等

收稿日期: 2022-03-01; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700203); 国家绿肥产业技术体系项目 (CARS-22); 河南省农业科学院科技创新团队项目 (2023TD24); 河南省中央引导地方科技发展资金项目 (Z20221341071)。

作者简介: 张成兰 (1990-), 助理研究员, 硕士, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: 616704053@qq.com。

通讯作者: 刘春增, E-mail: liucz321@aliyun.com。

培养试验及调查类文献；(3) 同一试验必须包含配对的处理组和对照组，处理组为紫云英配施化肥，对照组为单施化肥；(4) 数据要包含水稻产量的平均值、标准差/误和重复数；(5) 田间轮作模式为水稻-紫云英；(6) 同一试验设计所得试验数据发表在不同期刊时，选择数据最为详尽的1篇。基于以上标准，共筛选出文献70篇，其中中文文献55篇，英文文献15篇。从选取的文献中提取试验地点、试验地初始土壤性质、种植模式、紫云英翻压量、化肥减施量、水稻产量平均值、标准差、重复数等数值。对于双季稻区，由于紫云英翻压后，化肥的减施主要在早稻季，因此提取早稻产量进行分析比较。在数据提取过程中，以图形形式呈现数据，采用 Webplotdigitizer 软件进行数据提取。如图1所示，所收集的水稻产量数据经对数转换后符合正态分布 ($P < 0.01$)，满足整合分析的必要条件。

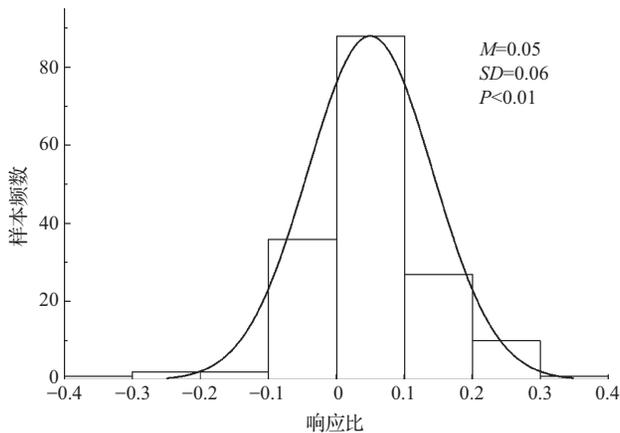


图1 水稻产量响应比正态分布

1.2 数据分析

本研究主要利用 MetaWin 2.1 软件进行整合分析，在检验差异性时，每组数据中需要同时包含平均值 (M)、标准差 (SD) 和样本数 (n)，对于文献中给出标准误 (SE) 的数据，利用以下公式将其转化为标准差。

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

对于文献中没有给出标准差或者标准误数据的，采用整个数据库的变异系数来计算缺失的 SD [5]。

统计学指标采用合并计数资料响应比 (RR) 表示，并计算其 95% 的置信区间 (Confidence interval, CI)。在分析过程中，采用自然对数响应比 ($\ln RR$)

反映不同条件下紫云英配施化肥对水稻产量的影响程度， $\ln RR$ 由以下公式表示：

$$\ln RR = \ln (M_i / M_c) = \ln (M_i) - \ln (M_c) \quad (2)$$

式中， M_i 和 M_c 分别为处理组和对照组的平均值。

平均值的变异系数 V 、权重系数 W_{ij} 、权重响应比 RR_{++} 、 RR_{++} 的标准误 S 以及其 95% CI 可通过以下公式计算。

$$V = SD_i^2 / n_i M_i^2 + SD_c^2 / n_c M_c^2 \quad (3)$$

$$W_{ij} = 1/V \quad (4)$$

$$RR_{++} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} RR_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} \quad (5)$$

$$S (RR_{++}) = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (6)$$

$$95\% \text{CI} = RR_{++} \pm 1.96 S (RR_{++}) \quad (7)$$

式中， SD_i 和 SD_c 分别代表处理组和对照组的方差， n_i 和 n_c 分别代表处理组和对照组的样本数。

数据分析处理前须进行异质性检验，若 $P > 0.1$ ，各研究结果无异质性，采用固定效应模型 (FEM) 进行分析，反之采用随机效应模型 (REM) [6]。权重响应比及其 95% CI 通过 $(e^{RR_{++}} - 1) \times 100\%$ 来转化。如果 95% CI 包含零值，表明该变量中处理组与对照组没有显著差异 ($P > 0.05$) [7]。

采用 Excel 2010 进行数据统计整理，MetaWin 2.1 进行整合分析，SPSS 18.0 进行数据分析，分析软件 R 进行增强回归树 (Boosted regression tree, BRT) 分析，Origin 8.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 水稻种植模式、化肥配施比例及紫云英翻压量对水稻产量效应的影响

整合分析结果表明，与单施化肥相比，紫云英配施化肥显著提高了水稻产量，增产率为 4.47% (95% CI, 3.16% ~ 5.77%)。不同种植模式显著影响水稻产量，紫云英配施化肥处理较单施化肥单季稻增产率为 4.89% (95% CI, 3.01% ~ 6.76%)，双季稻增产率为 4.06% (95% CI, 2.26% ~ 5.87%)。化肥配施比例直接影响田间化肥施用量，进而影响水稻产量。由图 2 可知，水稻增产率随化肥配施比例的增加呈逐渐上升趋势，化肥配施比例 > 0.8 和 $0.6 \sim 0.8$ 时，紫云英配施化肥显著提高了水稻产量，其增产率分别为 8.69% (95% CI, 6.71% ~ 10.67%)、6.34% (95% CI, 4.00% ~ 8.69%)，化肥配施比例为 $0.4 \sim 0.6$ 时，虽然水稻增产率为 1.53% (95% CI, -0.99% ~

4.04%)，但并未达到显著水平 ($P>0.05$)，当化肥配施比例 ≤ 0.4 时，水稻减产 4.58% (95%CI, -2.26% ~ -5.87%)，说明紫云英配施化肥条件下，化肥最佳减施量为 20% ~ 40%，减施过多，会导致水稻减产。由图 2 可知，水稻增产率随紫云英翻压量增加呈先升高后降低趋势，以紫云英翻压量为 22500 ~ 30000 和 30000 ~ 37500 kg/hm² 时，水稻增产率较高，分别为 5.83% (95%CI, 1.23% ~ 10.44%)、5.77% (95%CI, 1.51% ~ 10.03%)，说明紫云英翻压量过多或过少均不利于水稻增产，紫云英配施化肥条件下紫云英最佳翻压量为 22500 ~ 37000 kg/hm²。

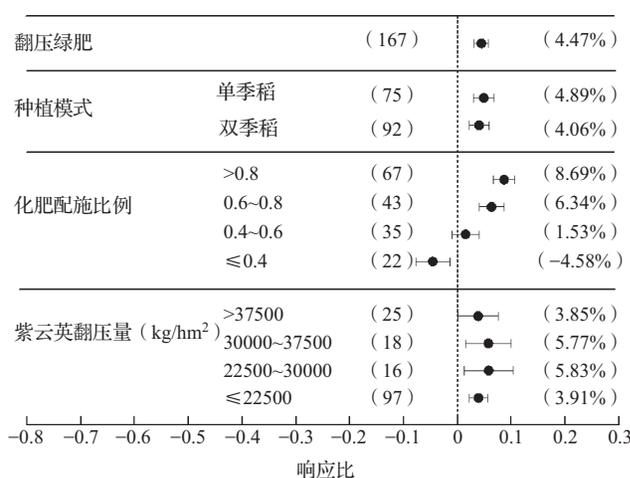


图 2 不同种植模式、化肥配施比例及紫云英翻压量下水稻产量的权重响应比

注：图中 0.4 ~ 0.6 表示 $0.4 < x \leq 0.6$ ，0.6 ~ 0.8 表示 $0.6 < x \leq 0.8$ ；22500 ~ 30000 表示 $22500 < x \leq 30000$ ，30000 ~ 37500 表示 $30000 < x \leq 37500$ 。

2.2 施肥量对水稻产量效应的影响

如图 3 所示，不同施氮量条件下，紫云英配施化肥处理较单施化肥显著提高了水稻产量，水稻增产率随施氮量增加呈逐渐上升趋势，以施氮量 >180 kg/hm² 时，水稻增产率较高，达到 7.55% (95%CI, 2.95% ~ 12.15%)。不同施磷量条件下，与单施化肥相比，紫云英配施化肥显著提高了水稻产量，水稻增产率随施磷量增加呈先升高后降低趋势，以施磷量 30 ~ 60 kg/hm² 时，水稻增产率较高，达到 5.34% (95%CI, 3.24% ~ 7.43%)。水稻增产率随施钾量增加呈先升高后降低趋势，当施钾量 60 ~ 120 kg/hm² 时，水稻增产率较高，达到 5.88% (95%CI, 4.27% ~ 7.50%)，当施钾量 <60 kg/hm² 时，增产率为 0.24% (95%CI, -2.70% ~ 3.19%)，但差异并不显著 ($P>0.05$)。

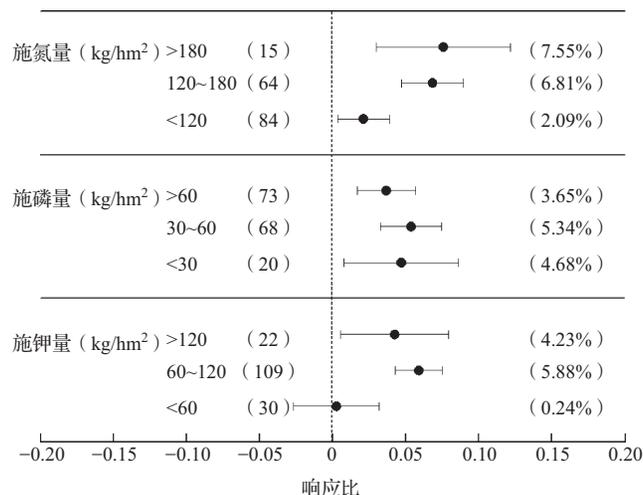


图 3 不同施肥量下水稻产量的权重响应比

2.3 土壤理化性状对水稻产量效应的影响

紫云英配施化肥对水稻产量的提高程度与土壤的理化性质密切相关。如图 4 所示，随土壤有机质含量和土壤全氮含量的增加，水稻增产率均呈下降趋势，当有机质 >30 g/kg、全氮 >2 g/kg 时，紫云英配施化肥较单施化肥水稻增产率分别为 2.13% (95%CI, -0.67% ~ 4.94%)、1.61% (95%CI, -0.81% ~ 4.02%)，均未达到显著水平 ($P>0.05$)；以有机质 <20 g/kg、全氮 <1.5 g/kg 时，水稻增产率较高，分别达到 8.46% (95%CI, 5.65% ~ 11.26%)、6.47% (95%CI, 4.31% ~ 8.62%)。紫云英配施化肥条件下，水稻增产率以有效磷含量 10 ~ 20 mg/kg 时较高，达到 4.91% (95%CI, 3.19% ~ 6.63%)，当有效磷 >20 mg/kg，水稻增产率较 10 ~ 20 mg/kg 时仅降低了 0.01 个百分点。水稻增产率随土壤

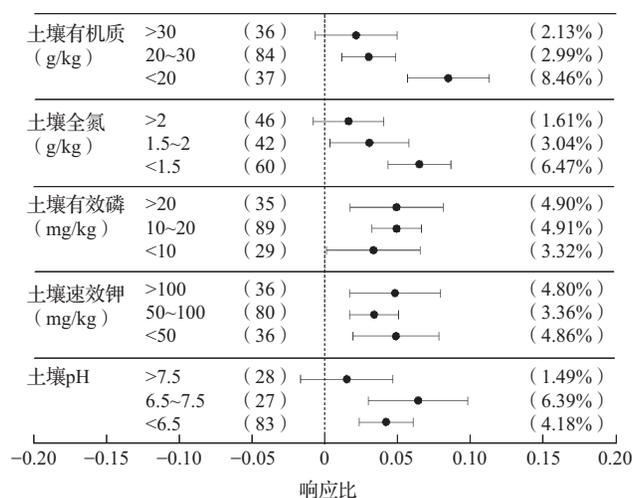


图 4 不同土壤理化性状下水稻产量的权重响应比

速效钾含量的增加呈先下降后上升的趋势,以速效钾含量 50 ~ 100 mg/kg 时增产率最低,为 3.36% (95%CI, 1.68% ~ 5.03%), 达到显著水平 ($P < 0.05$)。紫云英配施化肥条件下,水稻增产率随土壤 pH 的增加呈先升高后降低的趋势,以偏中性 (pH 6.5 ~ 7.5) 土壤上水稻增产率较好,达到 6.39% (95%CI, 2.98% ~ 9.80%), 在 pH < 6.5 时,水稻增产 4.18% (95%CI, 2.32% ~ 6.05%), 当 pH > 7.5 时,水稻虽然增产 1.49% (95%CI, 1.69% ~ 4.66%), 但差异并不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 不同因素对水稻产量响应比的贡献率

利用 BRT 模型分析了不同的影响因素对水稻产量的相对贡献率。如图 5 所示,施氮量和土壤有机质对水稻产量的相对贡献率较大,分别为 30.04% 和 22.21%, 其他因素对水稻产量的贡献率分别为:土壤速效钾 (12.36%) > 施钾量 (11.85%) > 土壤全氮 (8.07%) > 紫云英翻压量 (6.76%) > 土壤有效磷 (4.25%) > 土壤 pH (2.21%) > 水稻种植模式 (1.13%) > 施磷量 (0.91%) > 化肥配施比例 (0.11%)。

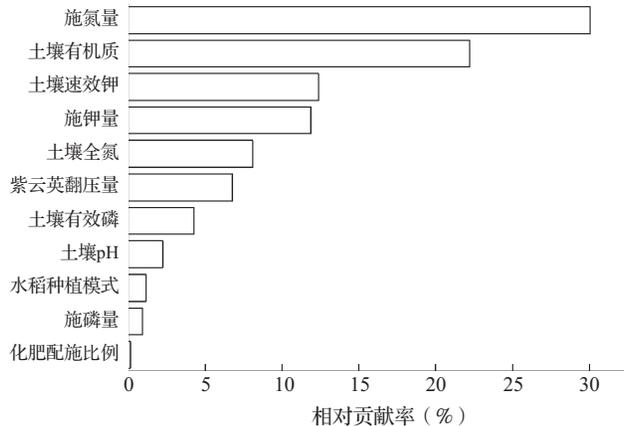


图 5 各因素对水稻产量响应比的 BRT 分析

3 讨论

3.1 紫云英配施化肥对水稻产量的整体影响

利用整合分析的方法,定量研究了紫云英配施化肥对水稻产量的影响。结果显示,紫云英配施化肥较单施化肥显著提高了水稻产量,增产率为 4.47% (95%CI, 3.16% ~ 5.77%), 这与众多研究结果相似^[8-9],一方面,紫云英配施化肥可优化水稻产量构成,增加水稻株高、有效穗、穗粒数、千粒重等^[2,10];另一方面,翻压紫云英可提高土壤

肥力,不仅能增加土壤碳、氮、磷、钾养分^[11-14],还能补充土壤铁、硫、锰、锌等微量元素^[15],进而提高水稻产量。

3.2 水稻种植模式、化肥配施比例及紫云英翻压量对水稻产量效应的影响

研究结果显示,单季稻的增产率高于双季稻,这与水稻生育期长短有关,随生育期延长,水稻产量增加^[16]。众多研究指出^[17-19],化肥减施 20% ~ 40% 条件下,种植翻压紫云英仍能保证水稻不减产,这与本研究得到的结果一致。化肥减施 20% ~ 40% 时,紫云英配施化肥较单施化肥水稻增产 6.34% (95%CI, 4.00% ~ 8.69%), 化肥减施量小于 20% 时,水稻增产 8.69% (95%CI, 6.71% ~ 10.67%), 主要是因为紫云英翻压后释放出的养分能满足水稻对速效养分的需求,提高水稻产量;当化肥减施量超过 60% 时,水稻减产 4.58% (95%CI, -2.26% ~ -5.87%), 说明化肥减施过多,土壤中速效养分较少,不能满足水稻生长发育,导致水稻减产。本研究结果显示,紫云英翻压量过多或过少,均不利于水稻增产。紫云英翻压量过少时,腐解释放的养分少,增产效果不明显;紫云英翻压量过多时,水稻增产率反而有所降低,一方面,过量紫云英在腐解初期有大量微生物生长繁殖,消耗了土壤中养分,出现微生物与水稻增肥现象,造成水稻生育期延迟,导致水稻产量降低;另一方面,过量紫云英在腐解过程中产生大量 H_2S 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等还原性有害物质,影响水稻初期生长发育进而降低水稻增产率^[20]。

3.3 施肥量对水稻产量效应的影响

施肥是促进水稻生长发育,提高水稻产量的主要途径。本研究显示,随着施氮量增加,紫云英配施化肥对水稻的增产效应随之增加,当施氮量 > 180 kg/hm² 时,水稻增产率增加幅度却降低。增施氮肥可提高水稻有效穗、穗粒数等产量构成因子^[21],增加水稻产量;而过量氮肥使水稻穗粒数和结实率下降,导致水稻产量降低^[22],考虑到过量氮肥带来的高生产成本及潜在的环境污染风险,紫云英配施中量氮肥 (120 ~ 180 kg/hm²) 较为合理。本研究显示,水稻增产效应随施磷量增加呈先升高后降低趋势,这与郭鑫年等^[23]提出的施磷量与水稻籽粒产量呈极显著二次曲线关系的结论相似。紫云英中全磷含量较低,干基为 0.3% ~ 0.7% (P_2O_5),且翻压后腐解过程中磷素

逐渐向难溶态转化^[24-25],说明水稻吸收的磷主要来自于土壤和肥料。本研究以紫云英配施 30 ~ 60 kg/hm² 磷肥时,水稻增产效果最佳,但适宜施磷量受土壤类型、土壤基础地力、水稻品种等影响差异较大^[26],还需要根据当地实际情况确定。水稻是需钾量较高的作物,但钾肥往往不受农民重视,导致稻田钾肥用量不足。本研究显示,随着施钾量增加,紫云英配施化肥对水稻的增产率呈先升高后降低趋势,说明在缺钾土壤上,施钾量是影响水稻产量的关键因素,水稻产量随着施钾量增加而增加^[27-28],而过量钾肥造成资源浪费,钾利用率降低。水稻秸秆收获会从土壤中带走大量钾素,导致稻田钾素不断亏缺,因此紫云英翻压还田需要考虑钾肥的施入,以缓解土壤中钾的耗竭,维持水稻高产。此外,还可考虑紫云英与水稻秸秆联合还田,一方面水稻秸秆还田为土壤补充钾素,另一方面紫云英和水稻秸秆还田具有协同促进效应,高嵩涓等^[2]指出紫云英与稻草联合还田较二者单独还田更能增加水稻产量和产量稳定性。

3.4 土壤理化性状对水稻产量效应的影响

土壤理化性状与水稻产量密切相关,研究指出^[29],土壤的基础理化性状越好,土壤自身供肥能力越强,水稻增产对施肥的依赖程度越低。土壤有机质和全氮是衡量土壤综合肥力的一个重要指标,在低有机质(<20 g/kg)、低全氮(<1.5 g/kg)水平下,土壤肥力较低,紫云英配施化肥的增产效果较好,这与韩天富等^[30]的研究结果相似。土壤 pH 直接影响土壤养分的有效性,土壤养分在偏中性(pH 6.5 ~ 7.5)条件下有效性较高,水稻增产效果较好。相较于微碱性(pH>7.5)土壤,紫云英配施化肥对微酸性(pH<6.5)土壤中水稻的增产效果较好,可能原因是紫云英翻压后提高了酸性稻田土壤的 pH^[31],不仅促进土壤有机质的矿化和土壤养分向有效态转化^[32],还增加了土壤阳离子交换量和磷、钾、镁等元素的生物有效性^[33],进而提高水稻产量。

3.5 不同影响因素对水稻产量效应的贡献率

BRT模型的分析结果显示,施肥量(施氮量、施钾量)和土壤因素(土壤有机质、土壤速效钾、土壤全氮)对水稻产量效应的影响较大,且主要影响元素是氮和钾。水稻对氮和钾的吸收量较大,单季水稻氮吸收量为 150 ~ 300 kg/hm²,钾的吸收量与氮相近,甚至超过氮吸收量^[34-35],但

是钾肥的增产效果和经济效益低于氮肥^[36],农业生产中往往存在重施氮肥,轻施钾肥的现象。紫云英干基氮含量 2.0% ~ 3.5% (N),钾含量 2.5% ~ 3.5% (K₂O),按照翻压量 22500 kg/hm² 计算,翻压后可为土壤提供 N 45 ~ 78.75 kg/hm²、K₂O 56.25 ~ 78.75 kg/hm²,且紫云英翻压后可提高土壤有机质含量^[1],因此可以通过翻压紫云英来改善影响水稻产量效应的因素,进而提高水稻产量。

紫云英配施化肥对水稻的增产效应受各种因素的影响,并不仅限于本研究所涉及的这些因素,如水稻种植区域、紫云英翻压年限、土壤类型等因素,由于文献中涉及的相关数据较少,本研究没有进行提取,因此还需要进一步与田间生产实践相结合,因地制宜地分析不同区域内紫云英配施化肥的增产效应。

4 结论

整合分析结果表明,紫云英配施化肥具有显著的增产效应,增产率达到 4.47%。紫云英配施化肥条件下,化肥最佳减施比例为 20% ~ 40%,紫云英最佳翻压量为 22500 ~ 37000 kg/hm²。综合考虑经济和环境效益,以施氮量 120 ~ 180 kg/hm²、施磷量 30 ~ 60 kg/hm²、施钾量 60 ~ 120 kg/hm² 水稻增产效果较好。土壤有机质含量 <20 g/kg,土壤全氮含量 <1.5 g/kg,土壤有效磷含量 10 ~ 20 mg/kg,土壤速效钾含量 <50 mg/kg,土壤 pH 6.5 ~ 7.5 时,紫云英配施化肥对水稻的增产效果较好。BRT 模型结果显示,施氮量和土壤有机质是影响水稻产量效应的主要因素。

参考文献:

- [1] 刘春增,常单娜,李本银,等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 657-669.
- [2] 高嵩涓,周国朋,曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2115-2126.
- [3] 万水霞,朱宏斌,唐杉,等. 紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 387-395.
- [4] 陈静蕊,秦文婧,王少先,等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 280-287
- [5] Yu Y Y, Turner N C, Gong Y H, et al. Benefits and limitations

- to straw and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: a meta-analysis across hydrothermal gradients [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 99: 138-147.
- [6] 肖琼, 王齐齐, 邹磊, 等. 施肥对中国农田土壤微生物群落结构与酶活性影响的整合分析 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (6): 1598-1609.
- [7] Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the north China plain [J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (6): 813-820.
- [8] Xie Z J, Tu S X, Shah F, et al. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China [J]. *Field Crops Research*, 2016, 188: 142-149.
- [9] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (5): 106-112.
- [10] Lee C H, Park K D, Jung K Y, et al. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. *Agriculture [J]. Ecosystems & Environment*, 2010, 138 (3-4): 343.
- [11] 颜志雷, 方宇, 陈济琛, 等. 连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (5): 1151-1160.
- [12] 杨滨娟, 黄国勤, 陈洪俊, 等. 利于水稻氮素吸收的绿肥翻压量和施氮水平研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (5): 1187-1195.
- [13] Xie Z J, Shah F, Tu S X, et al. Chinese milk vetch as green manure mitigates nitrous oxide emission from monocropped rice system in south China [J]. *PLOS ONE*, 2016, 11 (12): 1-16.
- [14] Zhu B, Yi L X, Guo L M, et al. Performance of two winter cover crops and their impacts on soil properties and two subsequent rice crops in Dongting Lake Plain, Hunan, China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 95-101.
- [15] 邹长明, 王允青, 杨杰, 等. 化肥配施紫云英对稻田土壤微生物及养分的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013, 248 (6): 28-31.
- [16] 叶全宝. 不同水稻基因型对氮肥反应的差异及氮素利用效率的研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2005.
- [17] 王建红, 曹凯, 张贤. 紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响 [J]. *土壤学报*, 2014, 51 (4): 888-896.
- [18] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39 (2): 343-349.
- [19] 刘春增, 刘小粉, 王守刚, 等. 种植紫云英不还田对水稻农艺性状、产量和经济效益的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014, 251 (3): 68-71.
- [20] 张成兰, 吕玉虎, 刘春增, 等. 减量化肥配施紫云英对水稻产量稳定性的影响 [J]. *核农学报*, 2021, 35 (3): 704-713.
- [21] 汪本福, 余振渊, 程建平, 等. 氮素对水稻产量和品质形成的影响研究进展 [J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41 (1): 76-83.
- [22] 刘建超. 高温对水稻籽粒淀粉粒径分布以及蔗糖降解、贮藏蛋白积累代谢的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [23] 郭鑫年, 孙娇, 梁锦绣, 等. 栽培方式与施磷量对水稻养分累积、分配及磷素平衡的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017, 270 (4): 104-111.
- [24] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (3): 626-633.
- [25] Williams M A, Myrold D D, Bottomley P J. Distribution and fate of ¹³C-labeled root and straw residues from ryegrass and crimson clover in soil under western Oregon field conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 42: 523-531.
- [26] 龚金龙, 张洪程, 李杰, 等. 施磷量对超级稻南粳44产量和品质的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2011, 25 (4): 447-451.
- [27] Ye T H, Xue X X, Lu J W, et al. Effects of potassium fertilization on crops yield, potassium uptake and soil potassium fertility in rice-oilseed rape cropping systems [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 68 (7): 873-885.
- [28] Ye T H, Xue X X, Lu J W, et al. Yield and potassium uptake of rice as affected by potassium rate in the middle reaches of the Yangtze River, China [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112: 1318-1329.
- [29] 李官沫, 张文菊, 曲潇琳, 等. 旱作种植条件下基础地力贡献率演变特征及影响因素分析 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (19): 4132-4142.
- [30] 韩天富, 马常宝, 黄晶, 等. 基于Meta分析中国水稻产量对施肥的响应特征 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (11): 1918-1929.
- [31] Liu L Y, Li H Y, Zhu S H, et al. The response of agronomic characters and rice yield to organic fertilization in subtropical China: A three-level meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2021, 263: 108049.
- [32] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (9): 3231-3239.
- [33] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41: 15-21.
- [34] 朱芸, 廖世鹏, 刘煜, 等. 长江流域油-稻与麦-稻轮作体系周年养分收支差异 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (1): 64-73.
- [35] Xu X P, Xie J G, Hou Y P, et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China [J]. *Field Crop Research*, 2015, 180: 37-45.
- [36] 吴可, 谢慧敏, 刘文奇, 等. 氮、磷、钾肥对南方双季稻区水稻产量及产量构成因子的影响 [J]. *作物杂志*, 2021, 203 (4): 178-183.

Effects of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer on rice yield in China: a meta-analysis

ZHANG Cheng-lan¹, LIU Chun-zeng^{1*}, LI Ben-yin¹, ZHENG Chun-feng¹, ZHANG Ji-shi¹, LU Yu-hu², XU Qi-hao¹, CAO Wei-dong³ (1. Institute of Plant Nutrition, Agriculture Resources and Environment Sciences, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Xinyang Henan 464000; 3. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The effects of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer on rice yield were quantitatively analyzed to provide a scientific basis for the popularization and application of such combination in rice fields. The overall effect of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer on rice yield was determined by collecting and collating published experimental data and performing a meta-analysis. The effects of rice planting pattern, chemical fertilizer ratio, milk vetch overturning amount, fertilizer amount, and soil physical and chemical properties on the yield increase of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer were quantitatively analyzed. The results showed that, compared with chemical fertilizer, Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer significantly increased rice yield by 4.47% (95%CI, 3.16% ~ 5.77%). The yield increase rate of single-crop rice was 4.89% (95%CI, 3.01% ~ 6.76%), and that of double-crop rice was 4.06% (95%CI, 2.26% ~ 5.87%). The yield increase rate of rice increased gradually with the increase of the ratio of chemical fertilizer. When the ratio of chemical fertilizer was less than 0.4, rice yield decreased by 4.58% (95%CI, -2.26% ~ -5.87%). The yield increase rate of rice first increased and then decreased with the increase of the amount of Chinese milk vetch overturn, and the yield increase rate was higher when the amount of Chinese milk was 22500 ~ 37500 kg/hm². The yield increase rate of rice was the highest when the application of N, P and K was more than 180, 30 ~ 60 and 60 ~ 120 kg/hm², respectively. The rice yield increase rate of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer was the highest when the soil organic matter content was less than 20 g/kg, soil total nitrogen content was less than 1.5 g/kg, soil available phosphorus content was 10 ~ 20 mg/kg, soil available potassium content was less than 50 mg/kg, and pH 6.5 ~ 7.5. In conclusion, Chinese milk vetch application combined with chemical fertilizer can significantly increase rice yield compared with solely chemical fertilizer application, and the effect of rice yield increasing was better under the conditions of low soil organic matter, total nitrogen content and neutral soil pH. Under the condition of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer, the rice yield could still be increased at 22500 ~ 37500 kg/hm² returning of Chinese milk vetch when chemical fertilizer was reduced by 20% ~ 40%.

Key words: Chinese milk vetch; rice; yield effect; meta-analysis