

DOI: 10.11686/cyxb2025287

http://cyxb.magtech.com.cn

柴龙行, 赵锐, 刘晓焱, 等. 绿肥对我国农田增产节氮效应的整合分析. 草业学报, 2026, 35(5): 162-174.

CHAI Long-hang, ZHAO Rui, LIU Xiao-yi, et al. A meta-analysis of the effects of green manure on yield increase and chemical nitrogen fertilizer saving in Chinese farmlands. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 162-174.

绿肥对我国农田增产节氮效应的整合分析

柴龙行, 赵锐, 刘晓焱, 白金顺*

(北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为量化绿肥对我国作物产量的总体影响,明确不同绿肥与氮肥配合方式的产量效应差异及主要影响因素,准确评估我国农田绿肥还田的增产节氮潜力,为合理利用绿肥实现农田减肥增效提供科学依据。以无绿肥为对照,以绿肥为处理,系统收集了2000-2024年7月公开发表的文献238篇,建立了含有2528组对比数据的数据库,采用整合分析方法定量绿肥对作物产量的影响及影响因素,采用随机森林预测模型分析绿肥对产量效应影响的主控因素,采用线性回归方法分析绿肥替代氮肥比例与产量效应的关系。结果表明:我国农田绿肥平均增加作物产量4.68%。其中,绿肥配合氮肥平均增产8.86%。绿肥配合氮肥在不同主作物管理、绿肥种植和利用方式下均表现增产,但增产幅度(5.32%~17.03%)有所变化;随机森林分析表明,绿肥施用年限、氮肥施用量和绿肥种类是主要影响因素,在长期施用、主作物氮肥用量较低、绿肥混合播种条件下增产效应最高。绿肥替代氮肥总体无显著增产效应,绿肥替代氮肥在不同主作物管理、绿肥种植和利用方式下产量效应在-20.53%~13.26%,随机森林分析发现绿肥替代比例和作物种类是影响绿肥替代氮肥产量效应的主要影响因素,在低替代比例下,小麦或单季稻种植条件下增产效应最高。绿肥替代氮肥产量效应与替代比例呈显著负相关,替代比例临界值为40.5%时能够实现增产与节肥的协同效应。不同作物节氮阈值有所差异,依次为单季稻(54.8%)、小麦(43.8%)、早稻(39.9%)、晚稻(34.7%)和玉米(21.5%)。不同替代比例的产量效应随年限变化表现不同,替代比例为0~40%时具有长期增产节氮效应,替代比例为40%~60%可实现长期节氮同时增产或稳产,而替代比例高于60%在一定时期内作物减产,长期可能实现平产或不减产。我国农田绿肥具有显著增产节氮潜力,但合理发挥绿肥增产节氮效应需要综合考虑主作物管理、绿肥种植和绿肥施用等因素的优化组合。研究为准确评估绿肥应用的作物产量效应提供了量化证据,同时为合理发挥绿肥的增产节肥效应提供了理论依据和技术参考。

关键词:绿肥;作物产量;Meta分析;随机森林

A meta-analysis of the effects of green manure on yield increase and chemical nitrogen fertilizer saving in Chinese farmlands

CHAI Long-hang, ZHAO Rui, LIU Xiao-yi, BAI Jin-shun*

State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arable Land in China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: This study aims to quantify the overall effect of green manure incorporation on crop yields in China, clarify the yield response differences under various green manure and nitrogen fertilizer combination regimes, and identify the main factors influencing responses. The results provide a scientific basis for accurately evaluating the potential of green manure to increase yield and reduce nitrogen fertilizer application in Chinese farmland, as well as for optimizing

收稿日期:2025-07-09;改回日期:2025-09-10

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(GY2023-12)资助。

作者简介:柴龙行(2000-),男,河南洛阳人,硕士。E-mail: 17836955015@139.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: baijinshun@caas.cn

green manure utilization to achieve synergistic benefits of yield enhancement and chemical fertilizer reduction. Using fields without green manure as the control and green manure incorporation as the treatment, we collected 238 publicly published studies from 2000 to July 2024 and established a database containing 2528 paired observations. A meta-analysis was conducted to quantify the effects of green manure on crop yield and identify factors influencing responses. The Random Forest model was employed to analyze the dominant factors controlling the yield response to green manure, while linear regression was applied to examine the relationship between the substitution ratio of chemical nitrogen fertilizer by green manure and the corresponding yield effect. On average, green manure incorporation increased crop yield by 4.68% in Chinese farmland. Specifically, the combination of green manure with nitrogen fertilizer significantly enhanced this effect, yielding an average increase of 8.86%. While this integrated approach consistently demonstrated yield benefits across various main crop management practices and green manure cultivation/utilization methods, the magnitude of improvement varied within a range of 5.32% to 17.03%. Random Forest analysis identified duration of green manure application, nitrogen fertilizer application rate, and green manure species as the dominant factors influencing responses. The highest yield gains were observed under conditions of long-term green manure use, lower nitrogen fertilizer inputs for main crops, and mixed sowing of green manure species. In contrast, substituting nitrogen fertilizer solely with green manure did not exhibit a significant overall yield effect. The yield response under substitution strategies varied widely (−20.53% to 13.26%) across different crop management and green manure practices. Random Forest modeling revealed that the substitution ratio and crop type were the primary factors determining the yield effect. The most positive yield outcomes occurred under low substitution ratios and in cropping systems dominated by wheat or single-season rice. There is a significant negative correlation between the yield effect of green manure substituting chemical nitrogen fertilizer and the substitution ratio. A synergistic effect of yield increase and fertilizer saving can be achieved when the critical substitution ratio reaches 40.5%. The nitrogen reduction thresholds varied across crops, in the following order: single-season rice (54.8%), wheat (43.8%), early rice (39.9%), late rice (34.7%), maize (21.5%). The yield effects under different substitution ratios exhibited distinct temporal patterns: At 0–40% substitution: Sustained long-term yield increase and nitrogen reduction; At 40%–60% substitution: Achieved long-term nitrogen reduction while maintaining yield stability or moderate increase; Above 60% substitution: Resulted in short-term yield reduction with potential transition to yield stabilization without reduction over extended periods. Green manure incorporation demonstrates significant potential for simultaneously increasing crop yields and reducing nitrogen fertilizer use in Chinese agricultural systems. However, optimizing these benefits requires integrated management strategies that consider interactions among main crop management practices, green manure cultivation methods, and utilization techniques. This study provides quantitative evidence for accurately predicting yield responses to green manure application while offering a theoretical framework and technical guidance for maximizing the green manure dual benefits of yield enhancement and fertilizer reduction.

Key words: green manure; crop yield; meta-analysis; Random Forest

绿肥是重要的有机肥源,国内外相关研究表明,合理利用绿肥在增加作物产量^[1–6]、促进主作物氮素吸收^[7]、降低氮素损失^[8]、提高土壤肥力^[9]等方面具有积极作用。近年来,我国绿肥不断发展,全国种植面积从 2007 年的约 200 万 hm^2 增长到 2022 年的 412 万 hm^2 ^[10]。同时,绿肥也是我国耕地质量提升和化肥减施增效等国家行动的重要技术手段之一^[1,10–11]。因此,系统评估绿肥在我国农业生产中的增产节氮效应对于合理利用和发展绿肥具有重要意义。

根据绿肥与氮肥配合施用方式不同,我国绿肥施用模式主要分为两种类型:一种是在氮肥施用量不变基础上

配合绿肥还田施用,本研究称为绿肥配合氮肥模式;另一种是在绿肥还田施用的条件下减少氮肥施用,本研究称为绿肥替代氮肥模式。多数研究认为绿肥配合氮肥还田施用可显著提高作物产量^[1-4],但也有研究认为绿肥配合氮肥降低了作物产量,如绿肥与主作物竞争土壤水分会使小麦(*Triticum aestivum*)产量降低^[12]。在绿肥替代氮肥研究方面,作物产量因氮肥替代比例的不同而有所差异。例如:秦文利等^[13]在华北地区的研究证实,绿肥替代25%氮肥能显著提高玉米(*Zea mays*)产量。苏向向等^[14]在西北旱地的研究表明,绿肥替代20%氮肥可维持翌年玉米产量,而替代40%氮肥则降低玉米产量。杜光辉等^[15]在豫南地区的研究显示,紫云英(*Astragalus sinicus*)替代40%氮肥增加了水稻(*Oryza sativa*)产量。聂良鹏等^[16]在信阳地区为期11年的研究证明,紫云英替代0~60%的氮肥可维持水稻产量,其中20%替代显著提高了水稻产量。总体上,绿肥对作物的产量效应与绿肥氮肥配合施用方式密切相关,且其对作物产量的影响方向及变化幅度受绿肥种类、作物种类、利用年限等因素的综合调控^[17]。因此,量化不同绿肥与氮肥配合施用及其主要调控因素对作物产量的影响,是准确认识和理解绿肥还田增产节氮效应的重要基础。

Meta分析是对一系列独立研究进行综合分析的方法,可定量总结多项独立研究结果^[18]。前人应用Meta方法在量化绿肥措施产量效应方面做了一些有益探索,例如:Fan等^[19]研究表明与休耕相比,绿肥模式下我国主要作物产量增加10%,马佳玉等^[20]研究表明绿肥模式下作物产量相比于休耕提高了12.2%。此外,刘俊海等^[21]的研究表明与冬闲田相比,绿肥还田可使水稻产量增加11.65%。然而,上述研究主要关注绿肥配合化肥模式对作物产量的影响,而对绿肥替代化肥模式的产量效应及合理替代比例尚未见报道,对绿肥模式农田应用的总体产量效应并不清楚。

为此,本研究收集我国2000—2024年已发表绿肥农田应用有关文献,采用Meta分析方法,结合随机森林预测模型,量化绿肥措施对我国粮食作物产量的总体影响,厘清不同绿肥与氮肥配合施用方式下作物产量效应差异及其主要调控因素,探讨我国绿肥模式的农田增产节肥协同效应,为建立绿肥优化管理和发挥绿肥农田应用的减肥增效作用提供理论依据和科学参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

本研究通过“Web of Science”和中国知网(CNKI)数据库,以“China*”“green manure*”“cover crop*”“catch crop*”“agri*”“crop yield”“yield”和“绿肥”“填闲作物”“覆盖作物”“小麦”“玉米”“水稻”“产量”为关键词,综合考虑我国绿肥研究轨迹^[10]和论文发表情况以及研究结果的代表性,检索2000年1月到2024年7月已发表期刊文献。同时,为确保研究数据科学有效,本研究设定了以下文献筛选标准:1)文献是以水稻、小麦、玉米为研究对象的田间试验研究,不包含盆栽试验、温室试验以及模型模拟研究。2)试验处理必须至少包含一个绿肥处理和一个非绿肥对照,除施肥措施外,其他条件均保持一致。3)能够从文献中精确获取试验中对照和绿肥处理的产量平均值和重复次数(3次以上)。4)对于出现在不同论文中的同一试验数据,采取仅录入一次的原则。

依据上述筛选标准,获得符合本研究要求的中英文文献共计238篇。其中,英文文献63篇,中文文献175篇。然后,对这些文献的试验基本信息、管理措施、作物产量等进行有关信息和数据提取。在数据提取过程中,对于以数字形式直接展示的数据,直接提取;对于图表中显示的数据,使用GetData Graph Digitizer提取。对于给出标准差的试验直接录入,而对于文献中没有给出标准差数据的情况,采用整个数据库的变异系数来计算缺失的标准差。最终建立由2528组产量数据构成的数据库。

为区分不同绿肥与氮肥配合施用方式对产量效应的影响差异,本研究将建立的总体数据库按照前述定义的绿肥施用措施分为两组,一组是绿肥配合氮肥处理,即在氮肥施用量不变基础上配合绿肥施用措施,对照为无绿肥措施。另一组是绿肥替代氮肥处理,即在绿肥施用的条件下减少氮肥施用,对照为常规施肥措施。最终,绿肥配合氮肥组共包含1377组数据,绿肥替代氮肥组共包含1151组数据。

为进一步分析不同绿肥措施产量效应的影响因素,将提取的相关试验信息按照主作物管理、绿肥生产和绿肥施用3类因素进行亚组划分,具体如下:主作物管理因素包括农田利用类型(旱地和水田)、作物种类(小麦、玉米、

双季稻、单季稻等)和农田施氮量;其中农田施氮量参考李炫等^[22]和任科宇等^[23]的研究具体分为 ≤ 120 、(120, 180]、(180, 250]、 $> 250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。绿肥生产因素包括绿肥种类(科属及名称)和绿肥种植类型(轮作和间作等)。绿肥施用因素包括绿肥施用方式(原位还田和异位还田)、翻压量和绿肥施用年限;其中翻压量参考张成兰等^[24]的研究划分为 ≤ 11250 、(11250, 22500]、(22500, 37500]、 $> 37500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,绿肥施用年限按照数据分布划分为 ≤ 5 、(5, 10]、(10, 15]、 > 15 年。

1.2 数据分析

1.2.1 Meta分析 采用Meta分析法来构建不同因素的置信区间(confidence interval, CI),为了使产量响应比呈正态分布,采用自然对数转换后的响应比(ln response ratio, ln R)来表示绿肥处理和对照组之间的量化关系^[23],平均响应比(R)通过单个效应量(R_i)和对应权重(W_i)计算得到,权重是效应大小方差($V_{\ln R}$)的倒数(W_i)^[23,25]。计算公式如下:

$$\ln R = \ln X_g - \ln X_c$$

式中: X_g 是绿肥处理的平均值; X_c 是对照处理的平均值。

$$V_{\ln R} = \frac{SD_g^2}{n_g X_g^2} + \frac{SD_c^2}{n_c X_c^2}$$

式中: SD_g 和 SD_c 分别是绿肥和对照处理的标准差; n_g 和 n_c 分别是绿肥和对照处理中的重复次数。

$$R = \frac{\sum W_i R_i}{\sum W_i}$$

式中: R_i 代表第*i*个效应量的值;与第*i*个产量记录相关联的权重 W_i 是 $V_{\ln R}$ 的倒数效应。

与对照相比,绿肥处理产量变化百分比(变化幅度, In)^[23]为:

$$\text{In}(\%) = (R - 1) \times 100$$

使用MetaWin 3.1软件进行平均效应大小和95%置信区间(95%CI)计算。平均效应大小的95%置信区间(95%CI)通过迭代999次的bootstrapping方法^[25]估算得出。如果95%置信区间不与零重叠,则认为效应显著。如果95%置信区间 > 0 ,则绿肥处理对产量有正向影响。当95%置信区间 < 0 时,绿肥处理对作物产量有负面影响。当95%置信区间 $= 0$ 时,绿肥处理对作物产量无显著影响。若组间置信区间不重叠,表明组间对产量效应的影响存在显著差异。

另外,本研究失安全数(fail-safe number)为5100043,样本量*k*为2528,失安全数大于 $5k + 10$,说明本结果受发表偏倚性的影响小,相关结果可靠性高。

1.2.2 数据处理 采用Microsoft Excel 2019软件进行数据收集和建立数据库。通过Origin 2022软件绘制散点图,采用R语言中的软件包“Random Forest”进行各因素贡献的随机森林模型计算,利用Graphpad prism 10.0绘制绿肥处理与对照处理产量变化的森林图。

2 结果与分析

2.1 绿肥的总体产量效应

相较于无绿肥对照,绿肥还田总体上呈现出显著的增产效应,增产幅度达4.68%(图1)。其中,绿肥配合氮肥表现出较高的增产率,达8.86%。而绿肥替代氮肥无显著增产效果。这说明我国农业绿肥的产量效应因其与氮肥的配合施用方式不同而存在显著差异。

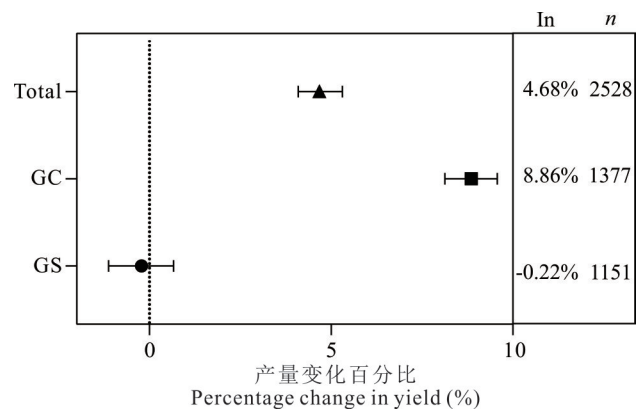


图1 绿肥还田对作物产量的影响

Fig. 1 Effects of green manure incorporation on crop yields

Total: 总体; GC: 绿肥配合 Green manure combination; GS: 绿肥替代 Green manure substitution; In: 与对照相比,绿肥还田产量变化百分比 The percentage change in the yield of green manure returned to the field compared with the control; n: 样本数 Sample number. 下同 The same below.

2.2 绿肥配合氮肥产量效应及其影响因素

绿肥配合氮肥的作物产量效应亚组分析结果(图2)表明,在主作物管理因素方面,农田利用类型、作物类型和作物施氮量均对增产效应具有显著影响($P < 0.05$)。其中,绿肥配合氮肥在水田(10.86%)的增产效果显著高于旱地(6.92%, $P < 0.05$)。水稻增产效果优于小麦和玉米,不同作物的增产效果依次是早稻(11.60%)、晚稻(11.25%)、单季稻(9.35%)、玉米(7.80%)、小麦(5.32%)。随施氮量增加作物增产效应呈降低趋势,但增产效应在不同施氮量条件下均表现显著。在绿肥生产因素方面,不同绿肥种类对作物增产效应存在显著影响($P < 0.05$),其中,豆科与十字花科混合种植增产效果最好,增产幅度为13.53%,显著高于不同科绿肥作物单独种植。豆科与禾本科混合种植虽然平均增产幅度较高(10.84%),但与绿肥单独种植无显著差异。豆科、十字花科和禾本科绿肥单独种植下作物增产幅度依次为9.35%、7.27%和6.46%,但三者之间无显著差异($P > 0.05$)。绿肥种植类型对作物增产效应具有显著影响($P < 0.05$),轮作类型(9.08%)显著高于间作类型(5.38%)。绿肥配合氮肥的作物产量效应随翻压量的增加呈升高趋势,翻压量为22500~37500 kg·hm⁻²时增产效应为15.67%,显著高于0~22500 kg·hm⁻²翻压量增产效应,更高翻压量因样本较少变异较大,与其他翻压量下的增产效应均无显著差

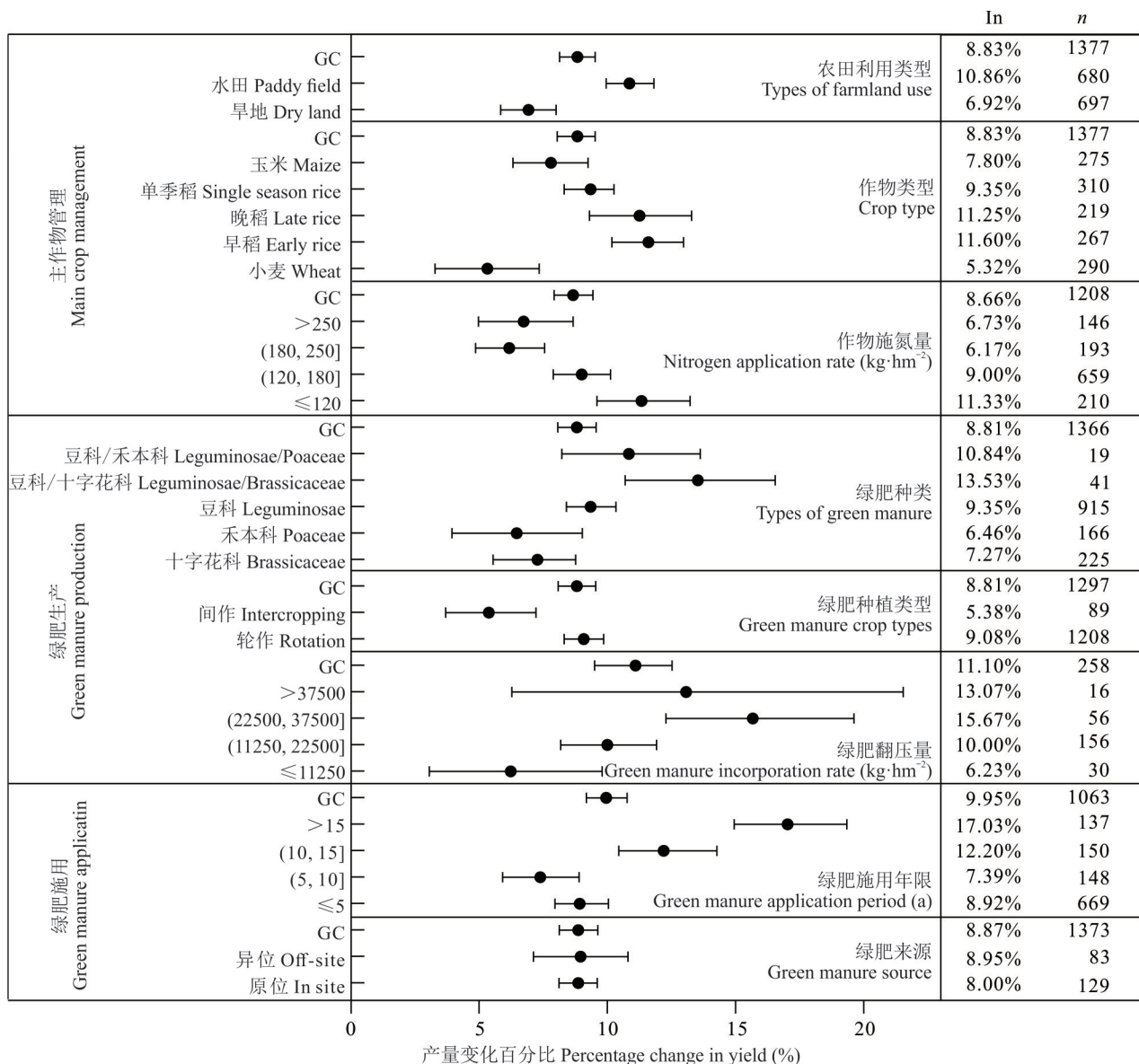


图2 绿肥配合氮肥对作物产量的影响

Fig. 2 Effects of green manure combined with nitrogen fertilizer on crop yields

异。在绿肥施用因素方面,其对作物增产效应的影响表现不同,绿肥施用年限对增产效应影响显著($P < 0.05$),随施用年限增加增产效应也逐渐增加,从 1~5 年的 8.92% 增产率增加到大于 15 年的 17.03%。而不同绿肥施用方式对绿肥配合氮肥的作物产量效应无显著影响。

基于随机森林模型的绿肥配合氮肥下产量效应影响因素分析结果(图 3)表明,各因素对绿肥配合氮肥产量效应变异的贡献率从高到低依次是绿肥施用年限、作物施氮量、绿肥种类、作物种类、农田利用类型和绿肥种植类型,其中绿肥施用年限、作物施氮量、绿肥种类是对产量效应变异贡献相对较大的影响因素。

2.3 绿肥替代氮肥的产量效应及其影响因素

绿肥替代氮肥的产量效应亚组分析结果(图 4)表明:在主作物管理因素方面,不同农田利用类型对产量效应无显著影响($P > 0.05$)。不同作物类型间产量效应存在显著差异,单季稻和小麦具有显著增产效应,分别增产 1.51% 和 3.05%,早稻和晚稻无显著增产效应,玉米表现为减产 6.70%。绿肥替代比例对产量效应影响显著,随绿肥替代氮肥比例提高作物产量效应呈逐渐降低趋势,替代比例为 0~20% 和 20%~40% 具有显著增产效应,分别增产 11.14% 和 4.37%,替代比例为 40%~60% 无显著产量效应,替代比例为 60%~80% 和 100% 替代都具有显著减产效应,分别减产 4.70% 和 20.53%。在绿肥生产因素方面,不同绿肥种类的产量效应存在显著差异,仅豆科与十字花科混种具有显著增产效应,增产 13.26%,豆科与禾本科单种或混种均无显著增产效应,十字花科单种下产量效应显著降低 9.16%。不同绿肥种植类型间产量效应有显著差异,轮作方式无显著产量效应,而间作显著减产 5.69%。绿肥替代氮肥的作物产量效应随翻压量的增加呈先升高后降低趋势,在 $22500 < \text{翻压量} \leq 37500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时增产效果最好,增产幅度为 3.94%。在绿肥施用因素方面,不同绿肥施用年限之间无显著差异,但在绿肥施用 15 年以上产量效应表现为显著减产 4.91%,可能与样品量较少、结果变异较大有关。不同绿肥来源间作物产量效应差异显著,绿肥异位还田具有显著增产效应(4.11%),而绿肥原位还田下产量效应不显著。

基于随机森林模型的绿肥替代氮肥下产量效应影响因素分析结果(图 5)表明,各因素对绿肥替代氮肥产量效应变异的贡献率从高到低依次是绿肥替代比例、作物种类、绿肥种类、绿肥种植类型、农田利用类型和绿肥施用年限。其中绿肥替代比例和作物种类是对产量效应变异贡献相对较大的影响因素。

2.4 绿肥还田的节氮效应及其影响因素

总体上,绿肥替代氮肥比例与作物增产效应的相关分析结果表明,二者呈显著负相关($R^2 = 0.336$, $P < 0.05$),由此得出作物增产幅度为 0 时的绿肥替代氮肥的临界比例为 40.5%,说明在保障作物产量的同时绿肥还田可平均替代氮肥 40.5%(图 6)。

在农田利用类型方面的亚组分析表明(图 7),绿肥替代氮肥比例的产量效应在不同农田利用类型下总体变化趋势基本一致,随替代比例提高产量效应均从正值逐渐降低直至负值,替代比例为 0~40% 均表现正产量效应,在 100% 替代比例下产量效应均为负。绿肥替代氮肥比例与作物增产效应的相关分析结果表明,旱地的绿肥替代氮肥阈值为 40.53%,水田绿肥替代氮肥阈值为 39.32%,二者基本相当。

从作物类型方面的亚组分析表明(图 8),除了玉米在 20%~40% 替代比例下减产外,其他作物在 0~20% 和 20%~40% 替代比例下均表现为增产,以小麦的增产效果最好,为 7.93%~16.63%;其次是水稻,为 2.85%~13.96%。在 40%~60% 绿肥替代下,早稻、晚稻和小麦产量变化不显著,玉米产量显著降低 10.46%,单季稻产量增加了 3.55%。在 60%~80% 绿肥替代下,单季稻和小麦产量变化不显著,玉米和早稻、晚稻产量均显著降

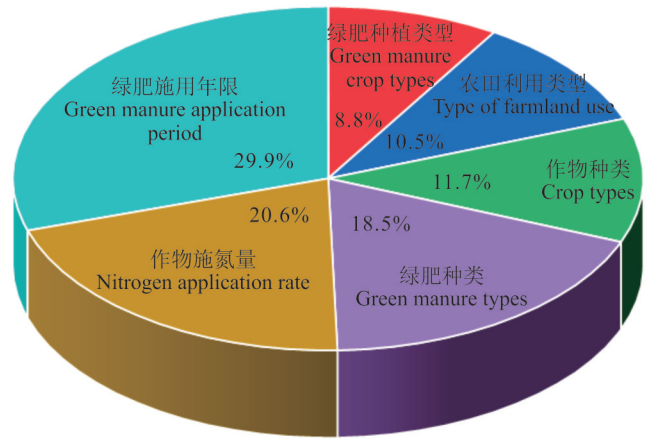


图 3 绿肥配合氮肥下影响产量效应的各因素相对贡献率

Fig. 3 Relative contribution rates of various factors influencing yield response under the combination of green manure and nitrogen fertilizer

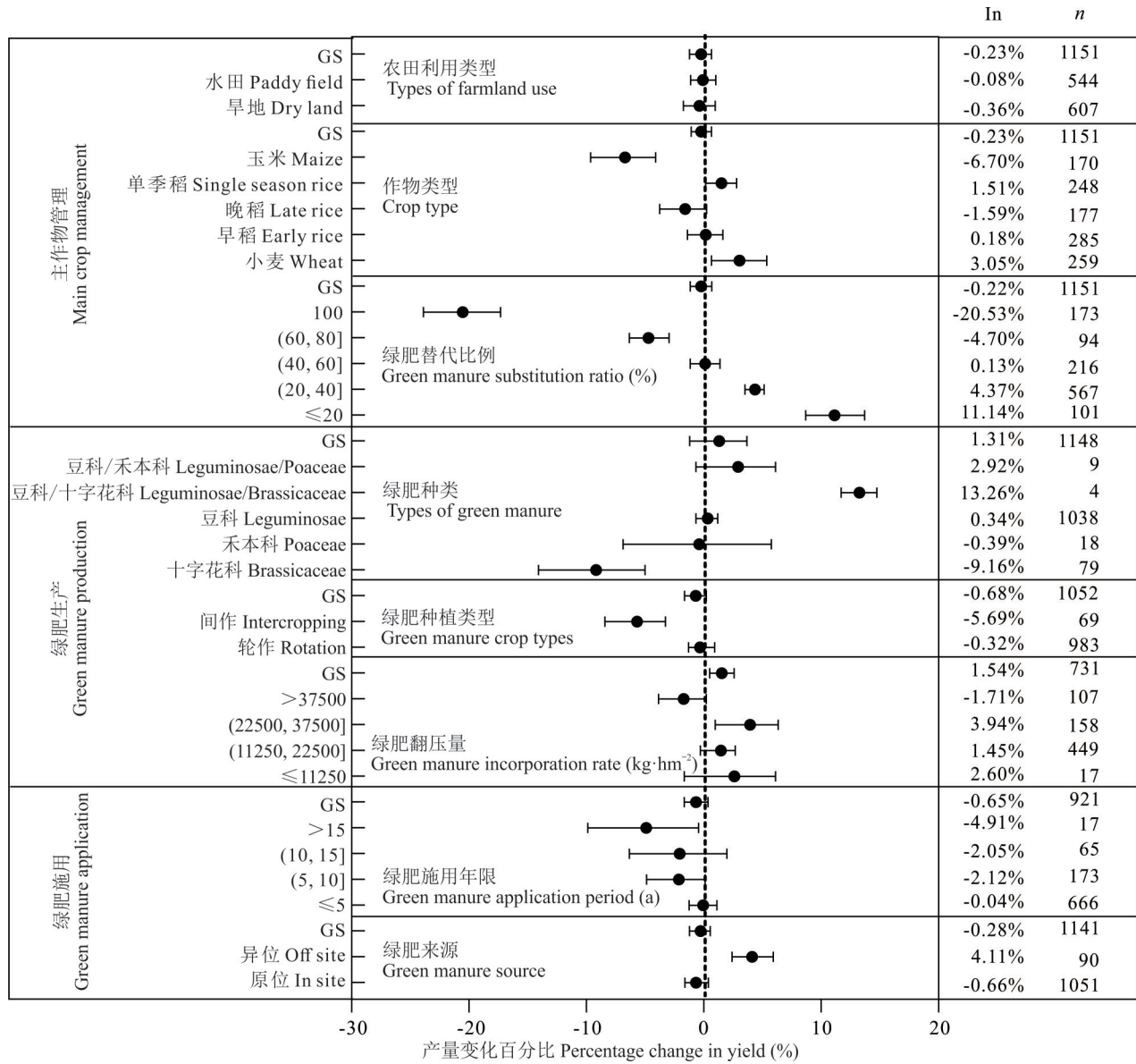


图4 绿肥替代氮肥对作物产量的影响

Fig. 4 Effects of green manure substitution for nitrogen fertilizer on crop yields

低。绿肥 100% 替代氮肥时,作物产量均显著降低,以单季稻减产最少,减产 9.60%。相关性分析表明,不同作物节氮阈值大小依次为单季稻(54.8%)、小麦(43.8%)、早稻(39.9%)、晚稻(34.7%)和玉米(21.5%)。

从施用年限看(图9),总体上,随替代年限变化绿肥替代氮肥的产量效应无明显变化。从不同替代比例亚组来看,除 20%~40% 替代比例下,>15 年施用年限为减产效应外,在替代比例为 0~20% 和 20%~40% 内不同年限均有增产效应。在替代比例为 40%~60% 内表现为无显著产量效应或略有增产。在替代比例>60% 后产量效应随年限变化规律略有

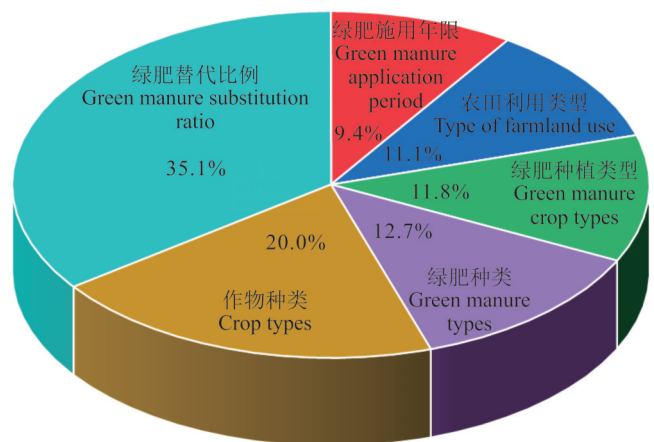


图5 绿肥替代氮肥下影响产量效应的各因素相对贡献率

Fig. 5 Relative contribution rates of various factors influencing yield response under green manure substitution for nitrogen fertilizer

不同,但随年限增加均为负产量效应。其中,替代比例为 60%~80% 下,均为负产量效应,平均减产 4.19%;而替代比例为 100% 时,也均为负产量效应,平均减产 21.75%。综上,绿肥替代氮肥在替代比例为 0~60% 内表现为作物增产或稳产,而在替代比例为 60%~80% 和 80%~100% 时无增产效应,即使随年限的增加产量效应有增大的趋势,但在统计上无显著差异,且数据量低变异大,结论有待进一步验证。

3 讨论

3.1 我国农田绿肥的产量效应

研究结果表明,我国农田绿肥还田平均增加作物产量 4.68%, 低于其他有关绿肥 Meta 研究报道的增产效应(平均增产 10.0%~12.2%)^[19-21], 主要原因是其他研究仅关注了绿肥配合化肥还田,即在氮肥施用量不变基础上配合绿肥施用对作物产量的影响,而本

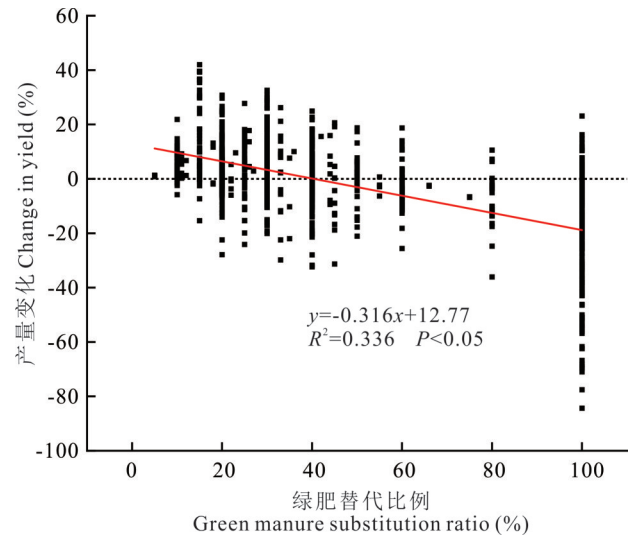


图 6 绿肥替代氮肥比例与作物产量变化幅度的线性相关分析
Fig. 6 Linear correlation analysis between green manure substitution ratio for nitrogen fertilizer and crop yield change range

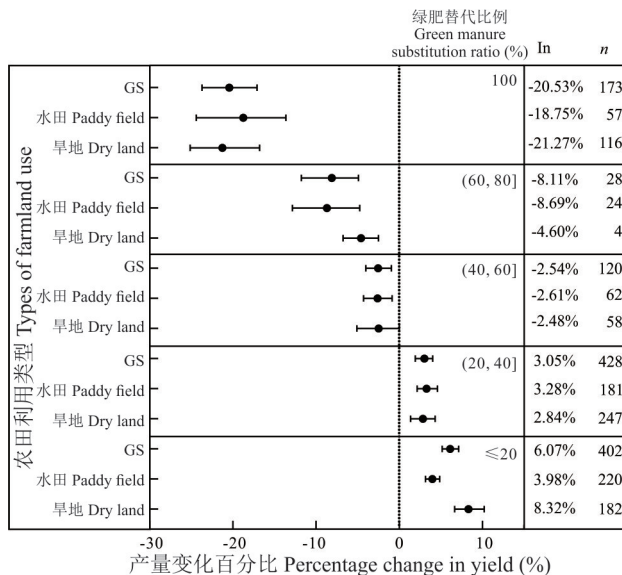
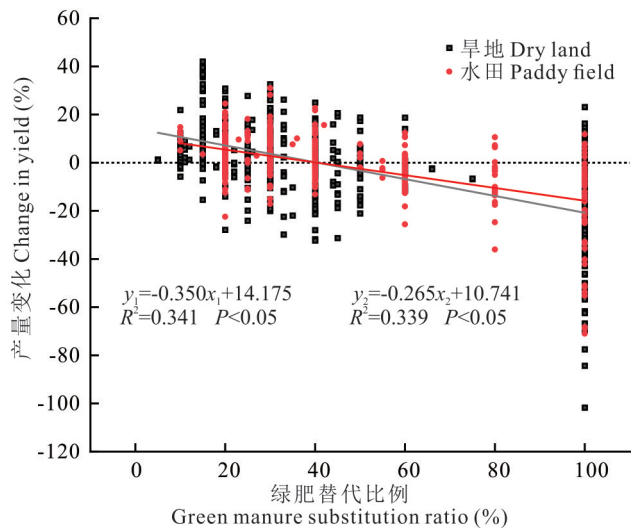


图 7 不同绿肥替代比例和农田利用类型对作物产量的影响及与作物产量变化的相关分析

Fig. 7 Effects of different green manure substitution ratios and farmland use types on crop yield and correlation analysis with crop yield changes

y_1 : 旱地上产量变化 The yield change in dry land; y_2 : 水田上产量变化 The yield change in paddy field.

研究包含了我国绿肥施用的两种主要类型,一种是绿肥配合氮肥,另外一种绿肥替代氮肥,从宏观上定量回答了目前我国绿肥还田的总体增产效应。对绿肥还田产量效应的进一步分析发现,两种绿肥模式的产量效应明显不同,绿肥配合氮肥显著增产 8.86% (95% CI: 8.13%~9.67%), 尽管增产幅度较其他 Meta 研究略低,但与其他研究的增产效应范围[(95% CI: 8.5%~14.6%) 和 (95% CI: 6.0%~13.4%)]^[19-20] 较为一致,增产率略低可能与本研究的数据来源跨度和数据库更新以及数据来源变化有关。而绿肥替代氮肥整体上无产量效应,且产量效应方向存在较大变异。另外,张成兰等^[24] 的研究表明,相比于单施化肥,紫云英配施化肥平均增加了 4.47% 的水稻产量,本研究结果与此相似,进一步证明了本研究结果真实性。本研究结果表明绿肥还田是我国农田重要的增



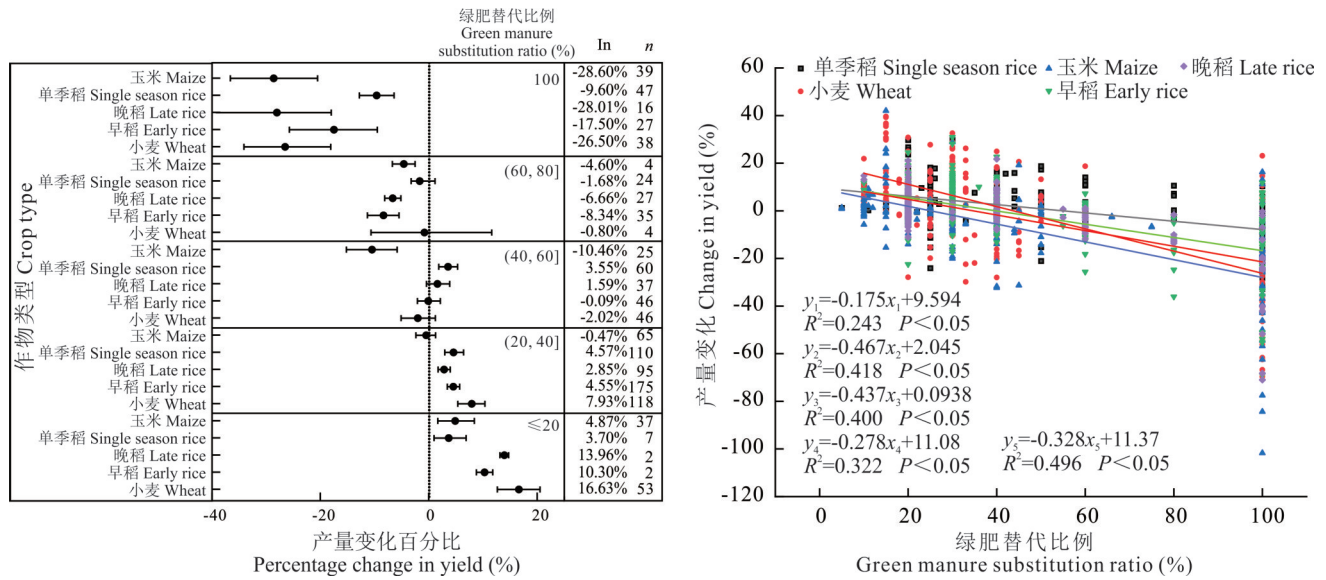


图8 不同绿肥替代比例和作物类型对作物产量的影响及与作物产量变化的相关分析
 Fig. 8 Effects of different green manure substitution ratios and crop types on crop yield and correlation analysis with crop yield changes

y_1 : 单季稻产量变化 Changes in single-season rice yield; y_2 : 小麦产量变化 Changes in wheat yield; y_3 : 玉米产量变化 Changes in corn yield; y_4 : 早稻产量变化 Changes in early rice yield; y_5 : 晚稻产量变化 Changes in late rice yield.

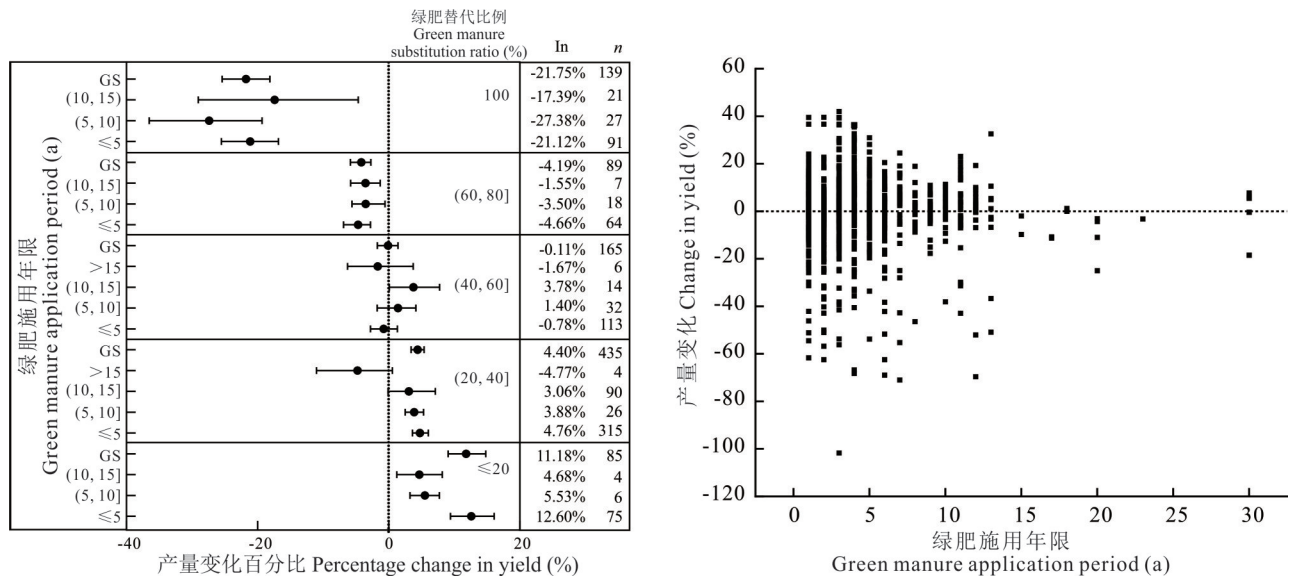


图9 不同绿肥替代比例和绿肥施用年限对作物产量的影响及与作物产量变化的相关分析
 Fig. 9 Effects of different green manure substitution ratios and green manure application period on crop yield and correlation analysis with crop yield changes

产措施,但需要考虑绿肥与氮肥配合使用的不同方式。总体上,本研究结果为准确评价我国农田绿肥还田的产量效应提供了更为完整的证据,同时也为农田生产中合理发挥绿肥作用提供了一定技术参考。

3.2 绿肥配合氮肥的增产效应

本研究结果表明绿肥配合氮肥的产量效应受不同因素的显著影响。水田的增产效应显著高于旱地,该结果与不同作物类型的增产效果基本一致,水稻增产效果优于小麦和玉米。这可能是因为水田较早地有相对较好的光温条件,绿肥的生物量相对较大^[26],且水田以豆科绿肥为主,而豆科绿肥具有较高的固氮能力^[27],提高土壤肥力和改善土壤结构优势更大^[28],对主作物的养分供应能力更强^[20,22]。同时,绿肥种类对作物增产效应的影响结果也

在一定程度上支持这一结果,豆科绿肥的增产幅度高于十字花科和禾本科绿肥,尽管差异不显著。另外,旱地多在我国北方地区,虽然也有研究表明绿肥具有保持土壤水分的优势,但是绿肥的种植可能会与主作物存在水分竞争关系^[29]。与绿肥单独种植相比,绿肥混合种植的增产效应更高,尤其是豆科与十字花科混合种植增产效应最高,可能原因是绿肥混合种植有利于还田绿肥养分释放与作物养分需求的时间匹配,进而促进作物吸收和产量形成^[30-31]。主作物的施氮量对绿肥配合氮肥的增产效应大小有一定影响,随施氮量的增加增产效应逐渐降低,说明绿肥施用增产效应与土壤氮素供应增加有关,在高施氮量条件下的增产效应也表明绿肥施用存在除供氮作用以外的其他有益作用^[32]。此外,绿肥与主作物的种植类型对绿肥配合氮肥的产量效应也有一定影响。尽管总体上大部分试验样本以轮作方式为主,间作条件下试验样本很少。本研究结果表明轮作增产效应显著高于间作,可能与间作条件下绿肥生物量较低且与主作物存在资源竞争有关^[33-34]。

绿肥翻压量是绿肥发挥养分供应和土壤培肥的重要基础。总体上,除翻压量高于 $37500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 亚组样本量少变异较大外,作物增产效应随翻压量增加而增加,这与随翻压量提高能够为主作物提供更多的有机物质和养分有关^[7]。此外,绿肥施用的增产效应在施用年限 >10 年后显著增加,说明绿肥施用对产量影响具有累积效应^[35],随年限增加绿肥还田对土壤物理结构^[1-2]、微生物群落^[34,36]和土壤肥力^[37-38]的改善作用逐渐显现,进而促进作物增产效应的不断提高。基于随机森林的各影响因素贡献分析结果表明,绿肥配合氮肥增产效应受施用年限、氮肥用量、绿肥种类、作物种类、农田利用类型和绿肥种植类型的综合影响,其中绿肥施用年限、氮肥用量和绿肥种类是主要的影响因素。因而,我国农田绿肥配合氮肥应考虑主作物种植、绿肥种植和绿肥施用等因素的合理匹配,该措施在长期应用、氮肥用量较低、绿肥混合播种条件下增产效应更好。

3.3 绿肥替代氮肥的增产节氮效应

以往较多田间研究表明绿肥具有替代氮肥作用^[1,4,7,11],但对我国农田绿肥替代氮肥的增产效应缺少定量分析。本研究结果表明,绿肥替代氮肥总体上无显著增产效应。基于随机森林的各影响因素贡献分析结果表明,绿肥替代氮肥的产量效应受替代比例、作物种类、绿肥种类、农田利用类型、施用年限和绿肥种植类型的综合影响,说明绿肥替代在实际应用中应考虑适用条件。本研究结果也表明替代比例、作物种类是主要的影响因素。随替代比例增加产量效应逐渐下降,在替代比例为 $0 \sim 20\%$ 增产幅度为 11.14% ,替代比例为 $20\% \sim 40\%$ 增产幅度降低 4.37% ,更高比例替代亚组表现减产可能与高替代比例条件下难以满足作物养分需求有关^[39]。不同作物的产量效应表现不同,小麦和单季稻表现为增产效应,早稻和晚稻无增产效应,而玉米表现为显著减产效应。综合来看,绿肥替代氮肥在替代比例 $<20\%$ 、小麦和单季稻体系中具有更好的增产效果。

为进一步阐明绿肥替代氮肥的节氮阈值,对不同氮肥替代比例与替代措施的产量效应进行了相关性分析,结果表明我国农田绿肥替代氮肥的平均临界比例为 40.5% ,高于该替代比例将降低产量,这与上述绿肥替代氮肥产量效应的分析结果一致。具体替代比例在不同农田利用类型和作物类型方面表现不同,水田的替代潜力相较于旱地无差异,而玉米的替代潜力 (21.5%) 显著低于水稻 ($34.7\% \sim 54.8\%$)、小麦 (43.8%) 等其他作物。绿肥种类可能是影响不同作物种类氮肥替代阈值的主要原因,水田作物水稻和旱地小麦体系主要以豆科绿肥或豆科与其他科属作物混合种植为主^[1,4],且南方稻田冬季绿肥^[4]和西北旱地小麦体系^[40]的夏季绿肥生长季节适宜绿肥生长和固氮,因而具有较大的氮肥替代潜力,而玉米体系主要以冬季绿肥为主^[41],生物量相对较小且主要以非豆科绿肥为主,因而导致其生物量和养分累积能力较低,对主作物的替代效应较小。此外,较玉米而言,小麦季降水较少,水分保障是决定其产量的重要因素,已有研究表明,绿肥种植能有效改善土壤结构、增强土壤保水能力^[1,26,29,42],小麦产量与土壤水分存在显著正相关关系^[43]。这也是小麦较玉米有较高增产效应和替代潜力的原因。

绿肥替代氮肥节氮效应的可持续性是本研究所关注的另外一个科学问题。关于绿肥替代氮肥随施用年限增加的产量效应变化的分析表明,二者间并无显著相关关系,说明绿肥替代氮肥在全国尺度上具有一定可持续性。进一步对不同替代比例下作物产量效应的时间变化的分析表明,绿肥替代氮肥对作物产量影响与替代年限密切相关,替代比例为 $0 \sim 40\%$ 在不同年份下均表现增产,而替代比例为 $40\% \sim 60\%$ 均保持稳产或略有增产,替代比例 $>60\%$ 后,一定年限内显著减产,但长期应用后与常规措施无产量差异。这些结果说明在替代比例为 $0 \sim 40\%$

可实现作物增产与节肥相协同,而替代比例在40%~60%只能实现作物稳产,进一步提高替代比例,在短期内表现减产,但长期后会达到与常规施肥相同的产量,这可能与土壤肥力逐步提高,土壤养分供应能力不断提升,进而保障作物产量有关^[17],但绿肥替代氮肥随绿肥施用年限增长的具体节氮阈值差异值仍需进一步研究。因而,目前我国农田实现增产与节肥的协同效应需要保持肥料替代比例(0~40%),且随时间变化,应考虑根据土壤肥力变化对适宜替代比例进行进一步调控。

4 结论

本研究基于Meta分析方法对我国农田绿肥的增产节肥效应进行了定量评估。总体上绿肥还田具有显著的增产效应,平均增产4.68%,但不同绿肥还田的增产效应表现不同,绿肥配合氮肥增产8.86%,绿肥施用年限、氮肥用量和绿肥种类是绿肥配合氮肥增产效应的主要影响因素,在长期施用、主作物氮肥用量较低和绿肥混合播种条件下增产效应最高。绿肥替代氮肥无显著增产效应,替代比例和作物种类是影响绿肥替代氮肥产量效应的主要因素,在较低替代比例、小麦或单季稻体系下具有更好的增产与节肥协同效应。绿肥具有显著的节肥效应,替代比例与产量效应呈显著负相关,氮肥替代比例的临界值为40.5%,不同作物节氮阈值依次为单季稻>小麦>早稻>晚稻>玉米。总体上,农田绿肥具有良好的节氮和增产效应,但合理发挥绿肥增产节肥效益需要综合考虑主作物种植、绿肥种植和绿肥施用等因素的优化组合。本研究为准确评估绿肥对作物产量效应提供了量化证据,同时为合理发挥绿肥的增产节肥效应提供了理论依据和技术参考。

参考文献 References:

- [1] Cao W D, Zhou G P, Gao S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(7): 1274–1283.
曹卫东,周国朋,高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1274–1283.
- [2] Feng X M, Alletto L, Cong F W, *et al.* Strategies to improve field establishment of cover crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2024, 44(5): 47.
- [3] Liang K L, Wang X Q, Du Y T, *et al.* Effect of legume green manure on yield increases of three major crops in China, a Meta analysis. *Agronomy*, 2022, 8: 1753.
- [4] Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2115–2126.
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. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2115–2126.
- [5] Ding W C, Xu X P, He P, *et al.* Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11–18.
- [6] Tonitto C, David M, Drinkwater L. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A Meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 112(1): 58–72.
- [7] Liang H, Li S, Zhang L, *et al.* Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system. *Soil & Tillage Research*, 2022, 220: 105369.
- [8] Huang H, Zhang Z H, Wu Q, *et al.* Global comprehensive evaluation shows that green manure enhances crop productivity while mitigating gaseous nitrogen losses. *Resources, Conservation & Recycling*, 2025, 220: 108351.
- [9] Yang R, Song S J, Chen S Y, *et al.* Adaptive evaluation of green manure rotation for a low fertility farmland system: Impacts on crop yield, soil nutrients, and soil microbial community. *Catena*, 2023, 222: 106873.
- [10] Cao W D, Bao X G, Xu C X, *et al.* Reviews and prospects on science and technology of green manure in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1450–1461.
曹卫东,包兴国,徐昌旭,等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1450–1461.
- [11] Li Y, Zhang W, Ma L, *et al.* An integrated analysis of agricultural management practices for enhancing carbon sequestration and ecosystem services in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 345: 108321.
- [12] Zhang D B, Yao P W, Zhao N, *et al.* Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 26856.

- [13] Qin W L, Zhi J F, Xie N, *et al.* Effects of partial replacement of chemical fertilizers with green manure on dry matter accumulation and yield formation of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(13): 2549–2567.
秦文利, 智健飞, 谢楠, 等. 绿肥部分替代化肥对玉米干物质积累与产量形成的影响. *中国农业科学*, 2024, 57(13): 2549–2567.
- [14] Su X X, Yu A Z, Lü H Q, *et al.* Effects of wheat multiple cropping with green manure on grain yield formation and nitrogen absorption and utilization of maize in oasis irrigation area in Northwest China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1208–1218.
苏向向, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿洲灌区小麦复种绿肥并翻压还田对翌年玉米产量形成及氮素吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1208–1218.
- [15] Du G H, Zhang L, Ding L, *et al.* Effects of co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with nitrogen fertilizer reduction on rice yield and nitrogen nutrition balance. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40(6): 1012–1019.
杜光辉, 张琳, 丁丽, 等. 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及氮素营养平衡的影响. *江苏农业学报*, 2024, 40(6): 1012–1019.
- [16] Nie L P, Guo L W, Zheng C F, *et al.* Effects of planting and plowing under Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer application on soil physical and chemical properties and rice yield in paddy fields. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(27): 65–69.
聂良鹏, 郭利伟, 郑春风, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤理化性状和水稻产量的影响. *中国农学通报*, 2021, 37(27): 65–69.
- [17] Yu P, Wang L X, Jacinthe P A, *et al.* Global synthesis of cover crop impacts on main crop yield. *Field Crops Research*, 2024, 310: 109343.
- [18] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. Statistical issues in ecological Meta-analyses. *Ecology*, 1999, 80(4): 1142–1149.
- [19] Fan F, Wopke W D V, David M, *et al.* Cover crops promote primary crop yield in China: A Meta-regression of factors affecting yield gain. *Field Crops Research*, 2021, 271: 108237.
- [20] Ma J Y, Wang T, Liu X L, *et al.* Meta-analysis of yield effects and influencing factors of cover crops on main grain crops in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10): 1871–1880.
马佳玉, 王涛, 刘小利, 等. 覆盖作物对我国粮食作物的产量效应及影响因素的 Meta 分析. *中国农业科学*, 2023, 56(10): 1871–1880.
- [21] Liu J H, Yang R X, Wu G C, *et al.* Analysis of yield increasing effect of winter green manure on rice fields in south China. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 111–120.
刘俊海, 杨瑞雪, 吴桂成, 等. 我国南方稻田冬绿肥培肥增产效应的分析研究. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 111–120.
- [22] Li X, Xiao D K, Hu Y, *et al.* Effects of green manure on rice yield and soil fertility in China: a Meta-analysis. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(6): 79–88.
李炫, 肖大康, 胡洋, 等. 种植绿肥对我国水稻产量和土壤肥力影响的整合分析. *中国土壤与肥料*, 2024(6): 79–88.
- [23] Ren K Y, Lu D M, Zou H Q, *et al.* Effects of substituting manure for fertilizer on yield and nitrogen content of rice grain in the Yangtze River basin. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 716–725.
任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(4): 716–725.
- [24] Zhang C L, Liu C Z, Li B Y, *et al.* Effects of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer on rice yield in China: a Meta-analysis. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(3): 39–45.
张成兰, 刘春增, 李本银, 等. 紫云英配施化肥对我国水稻产量效应的整合分析. *中国土壤与肥料*, 2023(3): 39–45.
- [25] Lehrer E J, Wang M, Sun Y L, *et al.* An introduction to Meta-analysis. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2023, 115(3): 564–571.
- [26] Feng Y, Liang H, Nie J, *et al.* Roles of microbial community and keystone taxa in rice productivity under green manuring in South China. *Sustainability*, 2024, 16(9): 3565.
- [27] Zhang L, Du J T, Fan Q Y, *et al.* Response of biological nitrogen fixation by milk vetch to soil fertility and rhizobium inoculation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(5): 51–63.
张磊, 杜锦涛, 范倩玉, 等. 紫云英生物固氮对土壤肥力及根瘤菌的响应特征. *草业学报*, 2025, 34(5): 51–63.
- [28] Yao W, Yang Y, Beillouin D, *et al.* Legume-rice rotations increase rice yields and carbon sequestration potential globally. *One Earth*, 2025, 8(2): 101170.

- [29] Allen B L, Pikul J L, Waddell J T, *et al.* Long-term lentil green-manure replacement for fallow in the semiarid northern great plains. *Agronomy Journal*, 2011, 103: 1292–1298.
- [30] Xia Y H, Gao P, Lei W S, *et al.* Covering green manure increases rice yields via improving nitrogen cycling between soil and crops in paddy fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 383: 109517.
- [31] Cherr M C, Scholberg S M J, McSorley R. Green manure approaches to crop production: A synthesis. *Agronomy Journal*, 2006, 98(2): 302–319.
- [32] Muhammad I, Lyu J Z, Wang J, *et al.* Regulation of soil microbial community structure and biomass to mitigate soil greenhouse gas emission. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 868862.
- [33] Neely C B, Jr R F M, Morgan C L S, *et al.* Legume green manure and intercropping for high biomass sorghum production. *Agricultural Sciences*, 2024, 15(6): 605–621.
- [34] Kumar V, Ram V, Rajkumari P. Evaluating intercropping indices, yield attributes and yield of baby corn and green gram under different planting patterns. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2024, 36(8): 460–469.
- [35] Mukhtar A I, Olalekan T K, Abdulraheem M I, *et al.* Green manure for agricultural sustainability and improvement of soil fertility. *Farming and Management*, 2022, 7(1): 1–8.
- [36] Muhammad I K, Hyo S G, Muhammad A A, *et al.* Short term effects of different green manure amendments on the composition of main microbial groups and microbial activity of a submerged rice cropping system. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103400.
- [37] Valkama E, Lemola R, Känkänen H E T. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 20: 93–101.
- [38] Thorup-Kristensen K, Magid J, Jensen S L. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*, 2003, 79: 227–302.
- [39] 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. *Field Crops Research*, 2016, 188: 142–149.
- [40] Lyu H Q, Li Y, Wang Y L, *et al.* Drive soil nitrogen transformation and improve crop nitrogen absorption and utilization: A review of green manure applications. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 14: 1305600.
- [41] Ma D K, Yin L N, Ju W L, *et al.* Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Research*, 2021, 266: 108146.
- [42] Wang X, Zhang J D, Zhao Y M, *et al.* Evaluation of farmland soil health and optimization of evaluation system under different green manure applications in a semi-arid irrigation area. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(5): 1913–1926.
- [43] Meng Z L, Zhu Q, Ni X F, *et al.* Impact of conservation tillage on soil moisture utilization, wheat water requirements and yield. *China Seed Industry*, 2024(10): 35–37, 41.
孟自力, 朱倩, 倪雪峰, 等. 保护性耕作对土壤水分利用与小麦需水特性和产量影响研究. *中国种业*, 2024(10): 35–37, 41.