doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23413

种植绿肥对我国水稻产量和土壤肥力影响的整合分析

李　炫[1]，肖大康[1]，胡　洋[1]，胡　仁[1]，李锦涛[1]，侯　俊[1*]，韩天富[2]，曹玉贤[3*]，年介响[4]，张卫峰[5]

［1. 长江大学农学院 / 农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室（部省共建），湖北　荆州　434025；2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 耕地培育技术国家工程实验室，北京　100081；3. 长江大学生命科学学院，湖北　荆州　434025；4. 新华农大（武汉）科技有限公司，湖北　武汉　430070；5. 中国农业大学资源与环境学院，北京　100193］

摘　要：为探究种植绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响以及为水稻增产稳产和土壤改良提供科学依据。对已发表的相关文献数据进行了收集，建立了 362 组包含种植绿肥（GM）和冬闲田（FFP）处理下水稻产量和土壤肥力的数据库。采用整合分析的方法，定量绿肥在不同地区、水稻种植模式、土壤性质、氮肥用量、绿肥种类下对水稻产量及土壤肥力的提升幅度，采用随机森林模型探究影响绿肥效应的主控因素。研究结果发现，在不同地区下，GM 处理对土壤有机质含量的提升在南方稻区最大（21.17%）。在不同水稻种植模式下，GM 处理对水稻产量和土壤肥力的提升幅度均表现为双季稻 > 单季稻；土壤全氮含量≤ 1.5 g/kg、有机质含量≤ 20 g/kg 时对产量的提升幅度较高；当 GM 处理的施氮量≤ 150 kg/hm^2 时对产量和土壤有机质含量的提升幅度均较高，分别为 12.47% 和 22.36%，但是随着施氮量的逐渐增加，GM 处理的增产幅度下降。不同绿肥种类下，GM 处理对产量和土壤有机质含量的提升幅度有所差异，在产量提升方面，豆科绿肥（12.47%）> 非豆科绿肥（7.22%）> 混合绿肥（6.32%）；对土壤有机质含量提升方面混合绿肥（12.69%）> 非豆科绿肥（10.93%）> 豆科绿肥（9.37%）。随机森林分析结果表明，在主控因素方面 GM 处理对水稻增产主要受土壤有机质含量、施氮量和有效磷含量（贡献率分别为 18%、16% 和 15%）的影响，而 GM 提高有机质的影响因素主要有地区、速效钾和速效氮含量（贡献率分别为 14%、12% 和 11%）。因此，GM 能显著提高水稻产量和土壤肥力，尤其是在低肥力的土壤状况下 GM 处理对产量的提升幅度较好，GM 与化肥配合使用能促进水稻增产和稻田土壤有机质含量的提升，但 GM 的施氮量不宜超过 150 kg/hm^2，水稻和绿肥轮作长江流域稻区推荐豆科绿肥，而在南方稻区进行混合绿肥。

关键词：绿肥；水稻；产量；土壤肥力；整合分析；随机森林

水稻是我国重要的粮食作物之一，其产量在全国粮食总产量的占比达到了 1/3 以上。土壤肥力是限制水稻高产和稳产的重要因素之一[1]。近年来我国稻田土壤肥力下降，进一步限制了水稻产量的提高，同时单季稻种植模式还存在冬闲田的问题。种植绿肥还田在解决冬闲田问题的同时还能提高稻田复种指数、改善土壤肥力，促进水稻增产[2]。因此，探究种植绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响及其关键作用因子对于水稻高产稳产、土壤培肥等具有重要意义。

种植绿肥对土壤腐殖质和有机质有着较好的提升作用，在提高土壤养分有效性和改善土壤理化性质上具有显著效果[3-5]。高嵩涓等[6]发现紫云英 – 稻草联合还田相对于单独稻草还田，水稻产量增加了 11.71%。王璐等[7]研究表明，秸秆还田配合种植绿肥可使土壤有机质、全氮和速效氮分别增加 10.85%、7.83% 和 5.66%。然而很少从不同种植区域、管理措施（如施氮量）、土壤理化性质等方面探讨种植绿肥对水稻产量及土壤肥力的影响特征。首先在品种和其他管理措施相对稳定的情况下，施肥处理的产量主要决定于施肥处理本身与环境互作效应[8]，其次我国的水稻种植面积较大，不同种植区域因地力基础或农民耕作措施使得土壤肥力差异较大[9]，这就导致土壤肥力和水稻产量对绿肥

收稿日期：2023-07-10；**录用日期：**2023-10-07

基金项目：湖北省重点研发计划（2023BBB082）；衢州市农业碳中和账户建设（衢农合 2021-27，2022-31）。

作者简介：李炫（2000-），本科在读，研究方向为植物营养。E-mail：1261464838@qq.com。

通讯作者：侯俊，E-mail：houjungoodluck1@163.com；曹玉贤，E-mail：1553671854@qq.com。

的响应特征不同[10]。因此，探明不同稻田土壤肥力水平下种植绿肥对水稻产量及土壤肥力的影响，进而为各水稻种植区域不同水稻种植制度下合理种植绿肥提供依据显得尤为重要。

首先，独立田间试验研究难以准确回答较大区域上种植绿肥对产量的影响，且在不同种植区域探究种植绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响及其关键因素的研究到目前为止还鲜见报道。其次，基于随机森林算法——一种高效的组合分类方法，根据变量重要性程度提取特征变量[11]。进而探究绿肥对水稻产量和土壤肥力影响的关键因素。因此，本研究运用整合分析方法，探讨不同土壤背景、绿肥品种、水稻种植模式、施氮量等因素下种植绿肥对水稻产量和土壤肥力的综合效应，明确不同因素水平下种植绿肥的效果，并通过随机森林模型明确产生影响的关键因素。旨在为种植绿肥提升土壤肥力和水稻产量提供理论支持，也为水稻－绿肥轮作制的制定和推广提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　数据来源

本研究是对2011年1月1日—2022年12月30日已发表的文献进行数据的收集、整合与分析。在中国知网（CNKI）和Web of Science数据库设置“水稻”“绿肥”“产量”“土壤肥力”和“Rice”“green manure”“yield”“soil fertility”关键词进行文献检索。文献筛选中需通过以下条件进行控制：（1）以水稻为研究对象的大田试验，且具有确切的试验地点与时间；（2）相同试验须同时包含冬闲田（FFP）和种植绿肥（GM）处理，且具有相应的产量（双季稻产量为两季总产量）和土壤肥力的数据或者其中之一；（3）每个试验处理至少有3次的重复；（4）试验前土壤的基础理化性质（土壤有机质、全氮、速效氮、有效磷、速效钾含量和pH）以及水稻期的施肥量（水稻整个生育期的施氮量，双季稻的施氮量为两季稻施氮量的加和）有明确说明；（5）绿肥在试验前冬季空闲田时种植的，成熟之后翻压还田，且GM和FFP水稻施肥和其他管理相同。针对选择的每一个研究，可以直接从表格中获取原始数据，而对于文献中以图呈现的数据需通过用Get Data Graph Digitizer 2.24（Get Data Pty Ltd，Kogarah NSW 2210，澳大利亚）提取。经过筛选，共获取62篇文献，产量数据291组，土壤有机质数据217组，土壤全氮数据151组等，表1是对文献中解释变量的具体划分，解释变量包括有地区（根据绿肥生长环境并根据武良[12]的划分方法进行划分）、水稻种植模式及土壤有机质、全氮、速效氮、有效磷、速效钾含量、pH、施氮量、绿肥种类。本研究中绿肥种植连续年限（yr.）有明确结果的有358组，其中1 ≤ yr. ≤ 3的有322组，占比90%，3<yr. ≤ 5的有24组，占比7%，yr.>5的仅有12组，占比3%，因此本研究未对绿肥种植年限进行分组。

种植绿肥是影响水稻产量和土壤肥力的重要因素。本文参考Zhang等[13]研究将施氮水平划为3个水平；土壤养分指标分类以第二次土壤普查为准[14]，将土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤速效氮含量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤pH均划分为高、中、低3水平。见表1。

表1　种植绿肥对水稻产量和土壤肥力效应数据库解释变量分类分组

解释变量	分组
地区	长江流域；南方地区
水稻种植类型	单季稻模式；双季稻模式
有机质含量（g/kg）	≤ 20；（20，30］；>30
全氮含量（g/kg）	≤ 1.5；（1.5，2］；>2
速效氮含量（mg/kg）	≤ 90；（90，150］；>150
有效磷含量（mg/kg）	≤ 10；（10，20］；>20
速效钾含量（mg/kg）	≤ 50；（50，100］；>100
pH	≤ 6.5；（6.5，7.5］；>7.5
施氮量（kg/hm^2）	≤ 150；（150，250］；>250
绿肥种类	豆科；非豆科；混合绿肥

注：长江流域包括湖北省、江苏省、湖南省、江西省、安徽省、河南省南部、上海市，南方地区包括广东省、福建省、浙江省、广西省。其他为天津市和陕西省，由于样本数分别为4和10组，故不做统计。豆科包括紫云英、箭筈豌豆、毛叶苕子等，非豆科包括油菜和黑麦草；混合绿肥是两种或者两种以上绿肥品种混合，至少包括1种豆科和1种非豆科。

1.2　数据计算与分析

整合分析方法可对多个相互独立的研究结果进行定量综合评价[15]。本研究采用Meta Win 2.1进行整合统计分析[16]，为了描述绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响，用自然对数响应比lnR来表示[13]：

$$\ln R=\ln\left(X_A/X_B\right)$$

式中，X_A 和 X_B 分别是 GM 和 FFP 对应的水稻产量、土壤肥力的平均值。在分组计算合并效应时，利用对独立的响应比进行加权处理[17]，公式如下：

$$V=\frac{SD_a^2}{nx_a^2}+\frac{SD_b^2}{nx_b^2}$$

$$W=\frac{1}{V}$$

式中，V 为平均变异系数，W 为权重系数，SD_a^2 和 SD_b^2 分别代表 GM 和 FFP 处理的标准差，由于分析的大多数研究没有报告结果的标准偏差，因此，通过产量平均数的 5% 作为相应处理的标准差（SD）。其中 n 分别对应 GM 和 FFP 各自的重复数。采用随机效应模型计算平均效应值，95% 置信区间（CI）采用 bootstrapping（n=4999）法进行估计。本研究中的合并效应值以百分比表示，通过公式（$e^{\ln R}-1$）×100% 进行换算[18]。

如果一个变量的 95%CI 重叠于零，表明该种 GM 处理的变量被认为与 FFP 处理无显著差异。如果分类变量的 95%CI 没有重叠，则认为它们的均值存在显著差异，在零刻度右边表明 GM 显著高于 FFP；左边表明 GM 显著低于 FFP[19]。通过卡方检验对不同分组间的效应值进行异质性检验，若检验结果 P<0.05，表示分组间结果存在异质性，采用随机效应模型，反之采用固定效应模型[20]。

1.3　数据与分析

采用 Excel 2010 进行数据整理，采用 Meta Win 2.1 进行 Meta 统计分析。运用 SPSS 22.0 单因素分析中的 Duncan 法进行显著性分析。随机森林方法则是运用 R 语言中的软件包“Random Forest”来计算各因素对种植绿肥“增效”作用的重要度，采用 Sigmaplot 10.0 和 Origin 9.0 绘图。

2　结果与分析

2.1　种植绿肥处理下水稻产量和土壤肥力差异及其响应比的分布

利用 Meta 分析了 271 组水稻产量和 195 组土壤有机质的响应比（本研究水稻的响应比是指种植绿肥对产量和土壤有机质的提升幅度），且分布检验表明全部响应比符合正态分布（P<0.01），水稻产量和土壤有机质含量的响应比平均值分别为 0.10 ± 0.10 和 0.10 ± 0.13，因此不用进行数据转换而直接进行因素分析，下述响应比进一步转化为提升幅度。见图 1。

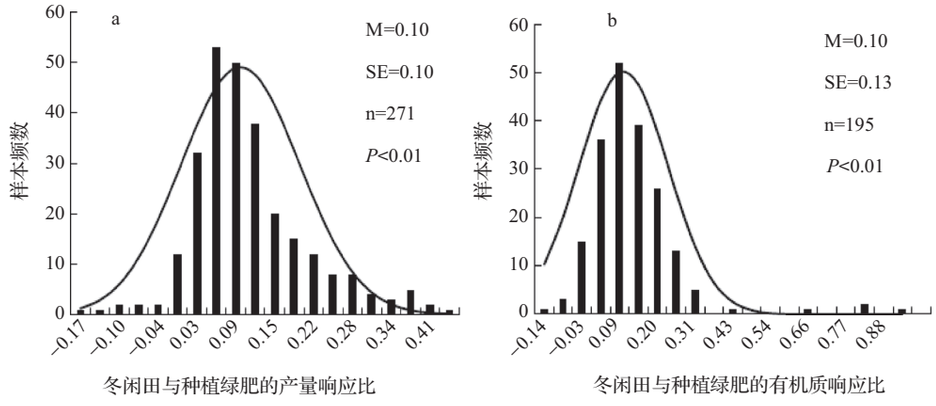

图 1　水稻产量（a）土壤有机质（b）的样本分布频率

注：曲线代表数据呈极显著的正态分布（P< 0.01）；M 和 SE 分别代表数据的平均值和标准误。

2.2　种植绿肥对水稻产量提升的影响

2.2.1　不同水稻种植区和水稻种植模式下种植绿肥对产量增幅的影响

与 FFP 处理相比，GM 处理能显著提高水稻的产量（图 2）。在不同种植区域下，GM 处理对产量的提升幅度表现为长江流域稻区（10.21%）> 南方稻区（10.03%）。在不同水稻种植模式下，GM 处理对单季稻产量和双季稻产量的提升幅度分别为 9.87% 和 9.95%，且差异不显著（P>0.05）。

2.2.2　不同全氮、速效氮、有效磷和速效钾含量下种植绿肥对产量增幅的影响

不同土壤条件下 GM 处理对水稻产量的影响具有显著性差异（图 3）。GM 处理对产量的提高受到稻田土壤养分影响。就土壤全氮含量而言，GM

处理较 FFP 处理在低全氮含量（≤ 1.5 g/kg）下对水稻产量的提升幅度为 10.85%，在中等全氮含量（1.5 ~ 2 g/kg）和高全氮含量（>2 g/kg）下提升幅度仅分别为 8.56% 和 8.52%，可见随着全氮含量的增加，GM 处理对产量的提升幅度呈下降趋势。就速效氮含量而言，在速效氮含量较低（≤ 90 mg/kg）情况下，GM 处理的水稻产量提升幅度（17.70%）显著高于速效氮含量较高（>150 mg/kg）情况下的提升幅度（8.54%）。随着速效钾含量的增加，GM 处理对水稻产量的提升幅度呈先增加后减少的趋势。在低有效磷含量（≤ 10 mg/kg）下，GM 处理的产量提升幅度最高为 11.56%，而中等有效磷（10 ~ 20 mg/kg）和高有效磷含量（>20 mg/kg）的提升幅度相对较低，分别为 7.66% 和 8.96%。可见，在较低土壤养分下种植绿肥对水稻产量的提升效果更佳。

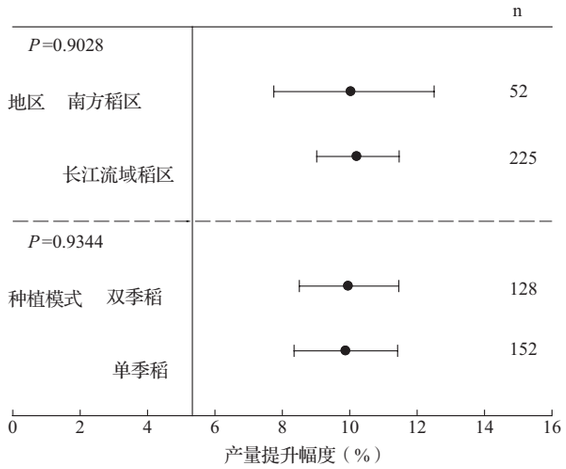

图 2　不同地区和不同种植模式下种植绿肥对产量增幅的影响

注：点和误差线分别代表响应比及其 95% 的置信区间，如果误差线没有跨越零线表示处理和对照存在显著差异；后面的数值代表样本数。下同。

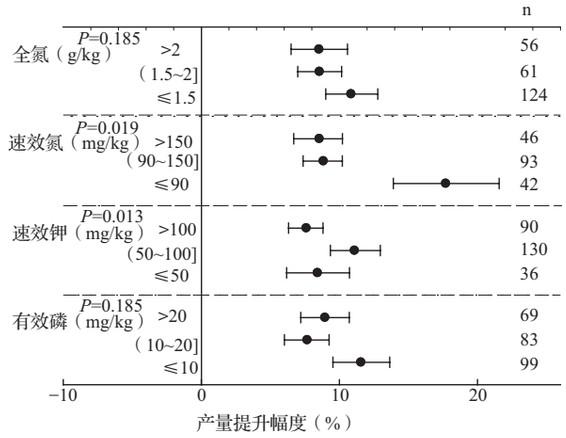

图 3　不同稻田土壤养分下种植绿肥对产量增幅的影响

2.2.3　不同有机质含量、pH 下种植绿肥对产量增幅的影响

由图 4 可知，GM 处理对水稻产量的提高受到土壤有机质含量和 pH 影响。随着有机质含量的增加，GM 处理对水稻产量的提升幅度呈下降趋势，有机质含量≤ 20 g/kg 时产量提升幅度为 12.34%；20 g/kg< 有机质含量≤ 30 g/kg 时为 9.63%；有机质含量 >30 g/kg 时为 7.13%。偏酸性土壤（pH ≤ 6.5）下，GM 处理对产量提升幅度最高，为 10.78%，而在中性（6.5 ~ 7.5）和偏碱性（>7.5）土壤上的提升幅度较低，分别为 7.51% 和 7.33%。总体来看，绿肥的增产效果在土壤理化性质上存在差异，在较低有机质含量和偏酸性的土壤下，GM 处理后水稻产量的增幅较高。

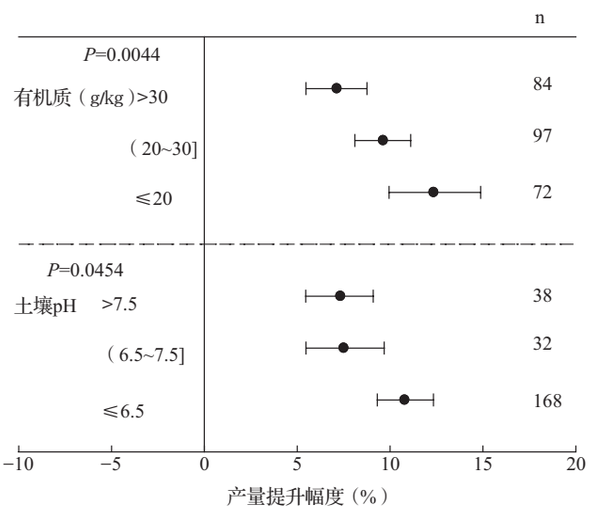

图 4　不同稻田土壤有机质和 pH 下种植绿肥对产量增幅的影响

2.2.4　不同施氮量、绿肥种类下种植绿肥对产量增幅的影响

由图 5 可知，GM 处理对水稻产量的提高与施氮量及绿肥种类有着密切的关系。施氮量是影响水稻增产的一个重要因素。低施氮量（≤ 150 kg/hm^2）下的产量提升幅度为 12.47%，比中施氮量（150 ~ 250 kg/hm^2）和高施氮量（>250 kg/hm^2）下的提升幅度分别高 4.41 和 5.15 个百分点，综合不同绿肥种类而言，绿肥种类为豆科绿肥时，GM 对产量的提升幅度（12.47%）分别是种植非豆科绿肥（7.22%）和混合绿肥（6.32%）的 1.7 和 2.0 倍。综上所述，在配施较低施氮量下种植绿肥对水稻产量的增幅效果更好，豆科绿肥对产量的提升效果优于非豆科绿肥和混合绿肥。

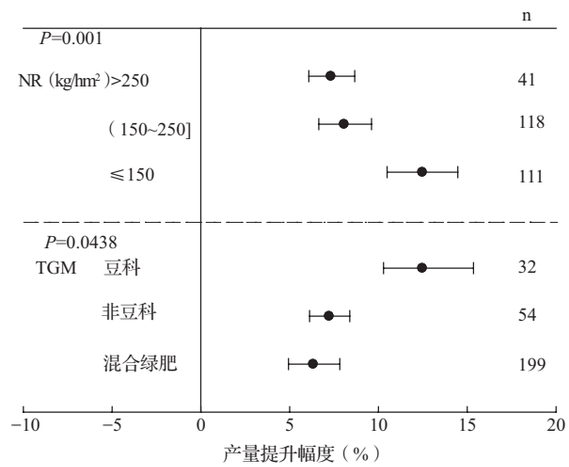

图 5　不同施氮量和绿肥种类下种植绿肥对产量增幅的影响

注：NR，施氮量；TGM，绿肥种类。

2.3　种植绿肥对土壤有机质的提升

2.3.1　不同种植区、水稻种植模式、土壤养分下种植绿肥对土壤有机质含量提升的影响

GM 处理对有机质含量有着较大的提高（图 6）。南方稻区种植绿肥对有机质含量的提升幅度（21.17%）高于长江流域稻区（6.85%），且 GM 处理后 2 个稻区的土壤有机质含量平均分别可达到 29.68 和 38.42 g/kg，显著高于 FFP 处理（P<0.05）。在不同水稻模式下，FFP 处理的有机质含量分别为 28.03 和 29.79 g/kg，GM 处理后有机质含量分别显著增加了 1.76 和 3.59 g/kg。全氮是影响土壤有机质含量提升的重要因素之一，GM 处理全氮含量由低到高下的土壤有机质含量分别为 27.81、30.83 和 36.37 g/kg，相对于 FFP 处理分别增加了 3.96、

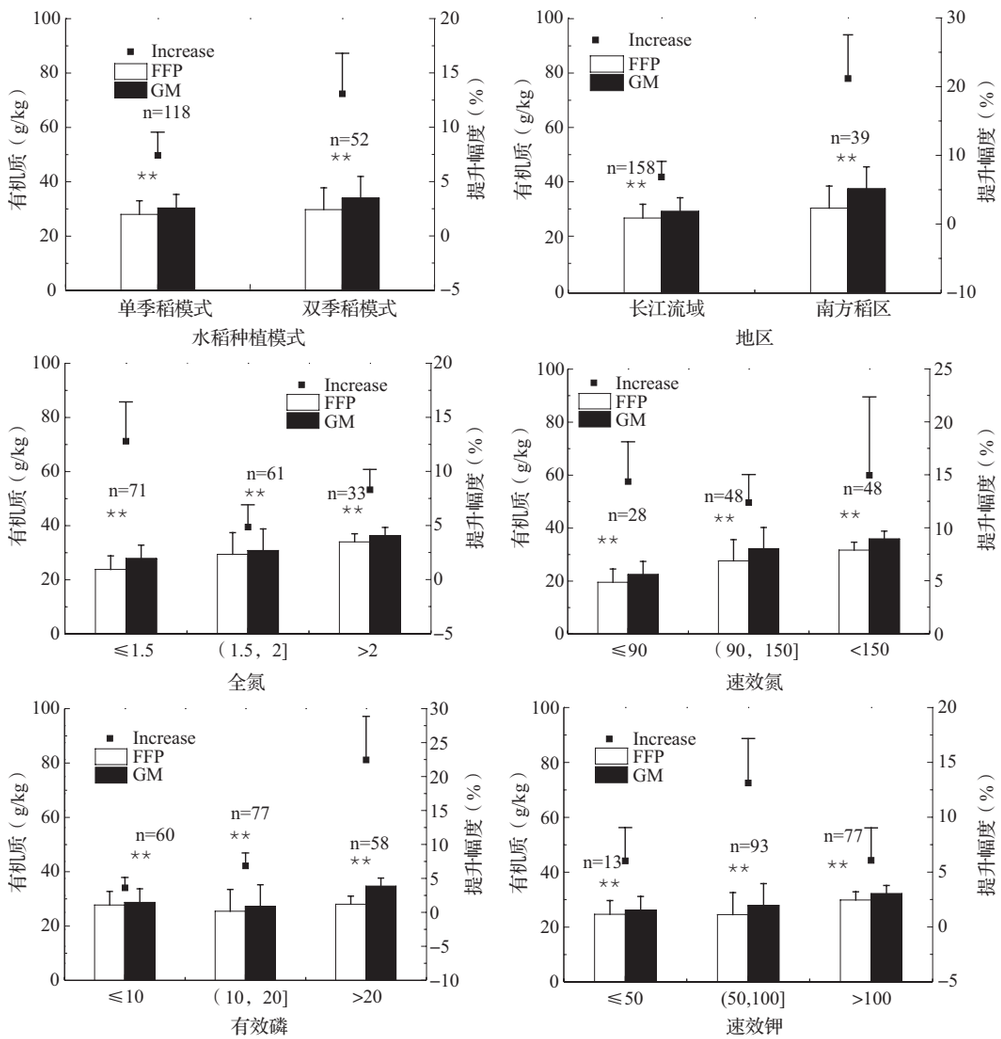

图 6　不同种植区、水稻种植模式和土壤养分下种植绿肥对土壤有机质提升的影响

注：n 代表样本数，* 表示 P<0.05；** 表示 P<0.01。increase 为提升幅度；GM：种植绿肥；FFP：冬闲田。下同。

1.40 和 2.36 g/kg。就速效养分（速效氮、有效磷、速效钾含量）而言，GM 处理下土壤速效养分含量中等或较高时对土壤有机质含量提升较好，增幅分别为 14.96%、22.47% 和 13.12%。

2.3.2　不同土壤有机质含量、pH、施氮量和绿肥种类下种植绿肥对有机质提升的影响

由图 7 可知，GM 处理对有机质含量提高与稻田基本土壤理化性质和绿肥种类有着很大的联系。随着有机质含量的增加，GM 处理对有机质含量的提升幅度分别为 6.02%、13.63% 和 8.81%，呈现先增加后降低的趋势。在偏酸性土壤下，GM 处理对有机质含量的提升幅度最大（9.81%），中性土壤次之（5.64%），碱性土壤最低（2.05%）。施氮量是影响有机质含量提升的重要因素之一，施氮量由低到高，GM 处理对有机质含量的提升幅度分别为 12.56%、6.95% 和 22.36%，在高施氮量下有机质含量可达到 31.45 g/kg，且在 3 种不同施氮水平下 GM 处理的有机质含量均显著高于 FFP（P<0.01）。在种植不同种类绿肥下 GM 处理的有机质含量均显著高于 FFP（P<0.05），GM 处理中种植豆科绿肥、非豆科绿肥和混合绿肥的有机质含量分别为 30.92、25.54 和 34.36 g/kg，其中种植混合绿肥下，GM 处理对有机质含量的提升幅度相对较高（12.69%）。总之，在中等土壤理化性质和偏酸性的土壤中种植绿肥对土壤有机质含量的提升效果较好；种植混合绿肥对土壤有机质含量的提升优于种植豆科绿肥和非豆科绿肥。

2.4　影响种植绿肥效果的主控因素

GM处理下，影响水稻产量和土壤肥力提高的主控因素存在差异（图 8）。GM 处理下对水稻

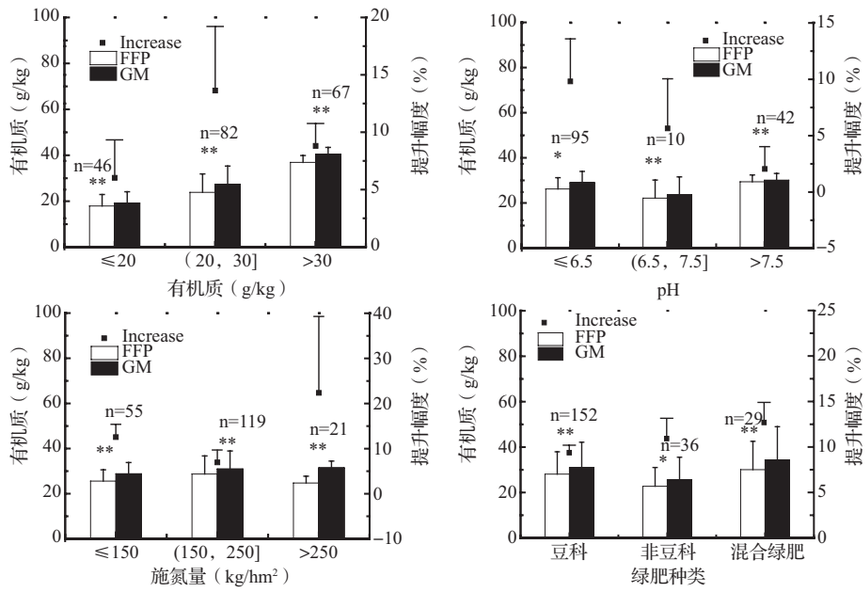

图 7　不同土壤有机质、pH、施氮量和绿肥种类下种植绿肥对有机质提升的影响

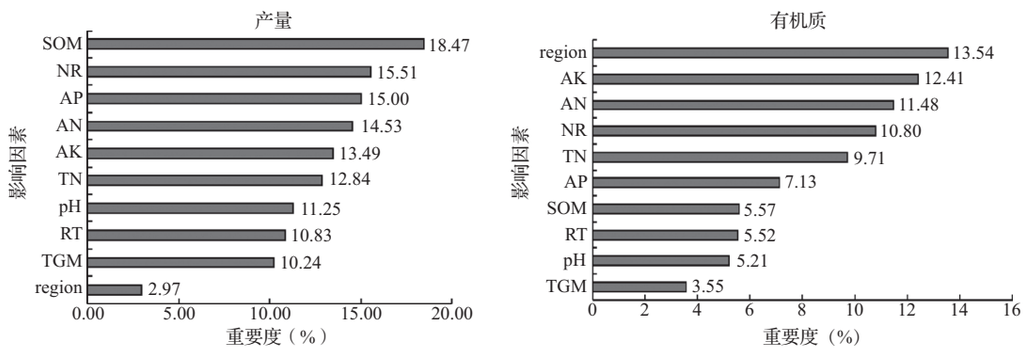

图 8　各因素影响种植绿肥提高水稻产量和土壤有机质的重要度

注：柱后的数字代表各因素的重要度。NR：施氮量；SOM：有机质；AN：速效氮；AK：速效钾；AP：有效磷；TN：全氮；pH：酸碱度；RT：水稻种植模式；TGM：绿肥种类；region：地区。

产量的提升作用主要受有机质含量（重要度18.47%）、施氮量（重要度15.51%）、有效磷含量（重要度15.00%）的影响，三者的总贡献率达到48.98%；对有机质的提升作用主要受地区（重要度13.54%）、速效钾含量（重要度12.41%）、速效氮含量（重要度11.48%）的影响，总贡献率达到37.43%。

3　讨论

3.1　种植绿肥对水稻产量提升的影响

本研究中，GM较FFP能够促进水稻增产，在不同水稻种植区域、土壤状况、施氮量和绿肥种类下水稻产量的增幅不同。绿肥是稻田中重要的有机肥源[21]，GM能调整土壤结构，促进养分循环[22]，实现水稻增产。吴玉红等[23]研究表明种植绿肥能使水稻产量增产8.59%。然而受到以下因素影响增产幅度不同。首先，本研究中长江流域稻区的产量提升幅度高于南方稻区（图2），是因为在中国南方水稻种植区，高温多雨，使得豆科作物固氮能力有所下降[24]，削弱了绿肥对水稻的增产效果。其次，曾祥明等[25]研究发现与不施肥处理比较，高地力和低地力下施肥产量分别平均提高17.3%和30.3%。这与本研究结果相似。研究中在低土壤肥力状况下，GM对水稻产量的提升幅度最大，原因可能是低肥力土壤对氮肥敏感性更强[26]，低氮情况下，水稻结实率较高，与水稻穗数的相关性更大[27]。此外，绿肥增产还受施氮量的影响，胡启良等[28]研究发现，施肥较不施肥处理早稻产量增加24.42% ~ 39.23%，晚稻增产19.34% ~ 31.59%，徐新朋等[29]进一步发现当施氮量小于180 kg/hm^{2}时，单位面积穗数和有效穗数随着施氮量的增加而增加，从而产量得到提高。在本研究中施氮量≤150 kg/hm^{2}时，GM对产量的提升幅度较大（12.47%）。这可能是因为在施用适当的氮肥后，作物对氮肥的利用率提高，从而有助于水稻的增产[30]。同时也可能是在土壤地力基础较差条件下土壤氮素依存率低，使得从外界加入土壤中的氮贡献最大，施肥增产的潜力大[25]。最后，由于不同区域因地带气候特征的不同导致GM对产量的影响差异较大[31]，所以我们应注意绿肥品种选择上的因地制宜。胡启良等[28]研究发现绿肥混播下，早稻和晚稻增产效果好，本研究发现种植豆科绿肥对产量提升幅度优于非豆科和混合绿肥，分别为12.47%、7.22%和6.32%，导致此结果可能与豆科绿肥具有较强的固氮能力有关。同时本研究中并未进行土壤中微生物以及物理作用对水稻产量提升的影响，需进一步进行分析。

3.2　种植绿肥对稻田土壤肥力提升的影响

GM在不同水稻种植区域、种植条件（如土壤状况、施氮量）和绿肥种类下对稻田土壤肥力的提升效果有所差异。绿肥还田具有提升土壤养分含量、改善土壤肥力的作用[32]。本研究还进一步发现GM对土壤有机质含量提升表现为混合绿肥的提升效果最好（12.69%），陶云彬等[33]通过11年的定位试验发现，绿肥混播还田处理土壤有机质含量最高，较初始值提高了34%，土壤培肥效果优于紫云英清种还田。熊迎等[34]研究发现混播绿肥下水稻植株的氮积累优于单种豆科绿肥，分别为58.2和54.1 kg/hm^2。一方面可能是混播中不同绿肥可以同时发挥各自的优势，能够更好地提高土壤肥力，提升方面也更加地全面[35]，另一方面，GM增加土壤有机质含量的同时促进了土壤固碳[36]。同时本研究还发现GM南方稻区的土壤有机质含量提升最大（21.17%），这可能也与土壤碳氮含量有关。因为温度和降水强烈影响土壤有机碳的输入和输出过程，是土壤有机碳平衡的决定性因素[37]，Chen等[38]发现年均降水量在400 ~ 800 mm时土壤有机碳储量的增加幅度最大，>800 mm时土壤全氮储量的增加效应明显。除此之外，GM提升土壤肥力还受土壤含氮量的影响，李文慧等[24]研究发现土壤基础条件较差的地区土壤碳氮储量增加效应最高，分别达32.3%和34.1%，这与本研究结果一致。造成此结果的原因可能是初始土壤碳氮含量高的地区容易发生碳氮损失，而初始土壤碳氮含量低的地区则更容易实现固碳[39]。在水稻种植过程中，施氮量是影响土壤肥力提升的又一重要因子。廖育林等[40]指出种植绿肥配施化肥较不施肥土壤有机质含量提升了14.7%，研究中进一步发现施氮量≥250 kg/hm^{2}时，GM对土壤有机质含量的提升效果（22.36%）更佳（图7），可能是施氮量较高有利于土壤中活性氮组分的转化[30]，加速绿肥腐解转化为有机质，培肥地力[41]。GM除了能提高土壤肥力外，还能减少温室气体排放[35]，其环境效应及机制需要深入研究。

3.3　影响绿肥“增效”作用的主控因素

总体来看，施氮量及有机质和有效磷含量是影响绿肥增产的主控因素（图8），可能因为土壤是作物生长的直接载体，土壤性状的变化会直接

影响作物对养分的吸收利用[42]，种植绿肥后土壤因子（如有机质和有效磷）作用于绿肥，当绿肥翻压还田时可能会对水稻增产产生较大影响，同时 Carvalhais 等[37]研究发现土壤中的碳氮平衡也是影响水稻产量的重要因素之一，杨馨逸等[30]进一步研究发现施氮会影响土壤中活性氮组分的转化，因此施氮量在影响绿肥对水稻增产方面也尤为重要。其次，与影响绿肥增产不同，影响绿肥增加土壤有机质的主控因素是地区及速效钾和速效氮含量（图 8），Carvalhais 等[37]研究发现气候条件是影响土壤有机质平衡的决定性因素，不同地区的气候差异较大，对绿肥生长造成差异影响，随之相对于其他因素，地区因素在绿肥增加土壤有机质含量上影响较大。除此之外，速效养分（速效钾和速效氮）作为主控因素之一，是因为不同地区速效钾含量差异较大，比如我国南方地区土壤钾含量普遍较低[43]，这样对绿肥造成较大影响；而速效氮含量会影响绿肥转化为有机质[42]，所以两者在影响绿肥“增效”上发挥重要作用。

4　结论

种植绿肥对水稻产量和土壤肥力均有显著的提高，具体结论如下：

（1）长江流域稻区种植绿肥对水稻产量的增幅高于南方稻区，而对土壤肥力的增幅表现为南方稻区较高，需要深入分析限制因素提高效能。

（2）低土壤肥力下，种植绿肥促进水稻增产增效的作用显著；反之，则增产增效作用不显著。

（3）施氮量不超过 150 kg/hm^2 时，种植绿肥对水稻增产效果好；施氮量约 250 kg/hm^2 以及土壤 pH 略低（≤ 6.5）有利于提升土壤有机质。

（4）绿肥提高稻田有机质含量要选用混合绿肥种类，提高水稻产量方面豆科绿肥更好，绿肥种植要综合考虑绿肥种类因素。

参考文献：

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2018.

[2] 杨滨娟，黄国勤，王超，等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国生态农业学报，2013，21（10）：1209-1216.

[3] 熊云明，黄国勤，王淑彬，等. 稻田轮作对土壤理化性状和作物产量的影响[J]. 中国科技导报，2004，6（4）：42-45.

[4] Doran J W，Safley M. Defining and assessing soil healthy and sustainable productivity[M]//Biological indicators of soil health. Wallingford，Oxon，UK：CAB International，1997：1-28.

[5] 高菊生，李菊梅，徐明岗，等. 长期施用化肥对红壤旱地作物和水稻产量影响[J]. 中国农学通报，2008，24（1）：286-292.

[6] 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.

[7] 王璐，吴建富，潘晓华，等. 紫云英和稻草还田免耕抛栽对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报，2010，26（20）：299-303.

[8] 程谊，张金波，蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. 土壤学报，2019，56（3）：507-515.

[9] 胡建利，王德建，王灿，等. 不同施肥方式对水稻产量构成及其稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报，2009，17（1）：48-53.

[10] 吴良泉，武良，崔振岭，等. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 中国农业大学学报，2016，21（9）：1-13.

[11] Mellor A，Haywood A，Stone C，et al. The performance of random forests in an operational setting for large area sclerophyll forest classification[J]. Remote Sensing，2013，5（6）：2838-2856.

[12] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究[D]. 北京：中国农业大学，2014.

[13] Zhang X，Fang Q，Zhang T，et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China：a meta-analysis[J]. Global Change Biology，2020，26（2）：888-900.

[14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京：中国农业出版社，1998：356.

[15] 蔡岸冬，张文菊，杨品品，等. 基于 Meta-analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学，2015，48（15）：2995-3004.

[16] Rosenberg M S，Adams D C，Gurevitch J. Metawin：statistical software for meta-analysis with resampling tests（Version 1）[M]. Sunderland MA：Sinauer Associates Inc，1997.

[17] Luo Y Q，Hui D F，Zhang D Q. Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems：a meta-analysis[J]. Ecology，2006，87（1）：53-63.

[18] 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[J]. 农业资源与环境学报，2022，39（4）：716-725.

[19] Hedges L V，Gurevitch J，Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology，1999，80（4）：1150-1156.

[20] 何寒青，陈坤. Meta 分析中的异质性检验方法[J]. 中国卫生统计，2006，23（6）：486-487.

[21] 李继明，黄庆海，袁天佑，等. 长期施用绿肥对红壤稻田

水稻产量和土壤养分的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2011，17（3）：563-570.
［22］ 蔡丽君，张敬涛，盖志佳，等. 东北三江平原覆盖作物种植效果［J］. 应用生态学报，2022，33（10）：2736-2742.
［23］ 吴玉红，王吕，崔月贞，等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量稻米品质及土壤肥力的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2021，27（11）：1926-1937.
［24］ 李文慧，林妍敏，南雄雄，等. 果树-覆盖作物可持续种植体系土壤碳氮固存及其影响因素［J］. 应用生态学报，2023，34（2）：471-480.
［25］ 曾祥明，韩宝吉，徐芳森，等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响［J］. 中国农业科学，2012，45（14）：2886-2894.
［26］ 艾玉春，董月，汪吉东，等. 水稻产量主要养分限制因子及养分运筹应对技术研究［J］. 江苏农业学报，2015，31（3）：558-563.
［27］ 孙志广，王宝祥，杨波，等. 施氮量对不同水稻品种氮肥利用率和农艺性状的影响［J］. 江西农业学报，2019，31（12）：23-28.
［28］ 胡启良，杨滨娟，刘宁，等. 绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响［J］. 华中农业大学学报，2022，41（6）：16-26.
［29］ 徐新朋，周卫，梁国庆，等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响［J］. 植物营养与肥料学，2015，21（3）：763-772.
［30］ 杨馨逸，刘小虎，韩晓日. 施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响［J］. 中国农业科学，2016，49（13）：2561-2571.
［31］ 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.
［32］ 周国朋，谢志坚，曹卫东，等. 稻草高茬—紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量［J］. 农业工程学报，2017，33（23）：157-163.
［33］ 陶云彬，刘晓霞. 紫云英、油菜长期混播还田的作物增产和土壤培肥效应［J］. 浙江农业科学，2019，60（12）：2206-2208.
［34］ 熊迎，翟国栋，马海青. 稻田紫云英与油菜混播不同配比效应研究［J］. 湖北农业科学，2014，53（23）：5677-5679.
［35］ Yang L，Zhou X，Liao Y，et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake［J］. Crop Science，2019，59（2）：749-759.
［36］ 夏文建，秦文婧，刘佳，等. 长期绿肥利用下红壤性水稻土有机碳和可溶性有机碳的垂直分布特征［J］. 浙江农业学报，2020，32（5）：879-886.
［37］ Carvalhais N，Forkel M，Khomik M，et al. Global cova-riation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems［J］. Nature，2014，514：213-217.
［38］ Chen H，Li X，Hu F，et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition：a meta-analysis［J］. Global Change Biology，2013，19（10）：2956-2964.
［39］ 赵永存，徐胜祥，王美艳，等. 中国农田土壤固碳潜力与速率：认识、挑战与研究建议［J］. 中国科学院院刊，2018，33（2）：191-197.
［40］ 廖育林，郑圣先，聂军，等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响［J］. 中国农业科学，2009，42（10）：3541-3550.
［41］ Tang H M，Xu Y L，Sun J，et al. Soil enzyme activities and soil microbe population as influenced by long-term fertilizer management under an intensive cropping system［J］. Journal of Pure and Applied Microbiology，2014，8（2）：15-23.
［42］ 徐明岗，梁国庆，张夫道. 中国土壤肥力演变［M］. 北京：中国农业科学技术出版社，2006.
［43］ 韩天富. 酸化红壤施石灰后根际土壤钾素转化特征与机制［D］. 北京：中国农业科学院，2017.

Effects of green manure on rice yield and soil fertility in China：a Meta-analysis

LI Xuan[1]，XIAO Da-kang[1]，HU Yang[1]，HU Ren[1]，LI Jin-tao[1]，HOU Jun[1*]，HAN Tian-fu[2]，CAO Yu-xian[3*]，NIAN Jie-xiang[4]，ZHANG Wei-feng[5]［1. College of Agriculture，Yangtze University，Key Laboratory of Sustainable Crop Production in the Middle Reaches of the Yangtze River，Ministry of Agriculture and Rural Affairs（Co-construction by Ministry and Province），Jingzhou Hubei 434025；2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning，Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land，Beijing 100081；3. College of Life Sciences，Yangtze University，Jingzhou Hubei 434025；4. Xinhua Agricultural University（Wuhan）Technology Co. Ltd.，Wuhan Hubei 430070；5. College of Resources and Environmental Science，China Agricultural University，Beijing 100193］

Abstract： This study provided scientific basis for exploring the effects of planting green fertilizer on rice yield and soil fertility，and for increasing and stabilizing rice yield and soil improvement. Data were collected from the published literature and 362 databases of rice yield and soil fertility under green manure（GM）and winter fallow field（FFP）treatments were established. A Meta-analysis method was used to quantify the increase of green fertilizer on rice yield and soil fertility in different regions，rice cropping patterns，soil properties，nitrogen fertilizer dosage，and green fertilizer types，and to explore the main controlling factors affecting green fertilizer effects by using random forest model. The results showed that GM treatment had the largest effect on soil organic matter content in southern rice region（21.17%）. Under different cropping

modes，the increase of GM treatment on rice yield and soil fertility was both ranked as double cropping rice > single cropping rice. When soil total nitrogen content was less than or equal 1.5 g/kg and soil organic matter content was less than or equal 20 g/kg，the yield increased significantly. When the nitrogen application rate of GM treatment was less than or equal 150 kg/hm^2，the yield and soil organic matter content were both increased by 12.47% and 22.36%，respectively. However，the increase rate of GM was decreased with the gradual increase of nitrogen application rate. Under different green fertilizer varieties，the increase of GM on yield and soil organic matter content was different. In terms of yield increase，it ranked as leguminous green fertilizer（12.47%）> non-leguminous green fertilizer（7.22%）> mixed green fertilizer（6.32%）；In terms of soil organic matter content improvement，it ranked as mixed green fertilizer（12.69%）> non-legume green fertilizer（10.93%）> legume green fertilizer（9.37%）. The results of random forest analysis showed that the main controlling factors of GM treatment on rice yield were soil organic matter，nitrogen application and available phosphorus contents（contribution rate of 18%，16% and 15%，respectively），while the main influencing factors of GM on organic matter were region，available potassium and available nitrogen contents（contribution rate of 14%，12% and 11%，respectively）. Therefore，planting green fertilizer could significantly improve rice yield and soil fertility，especially under the condition of low fertility soil，GM treatment had a good increase in yield. The combination of GM and chemical fertilizer could promote rice yield increase and soil organic matter content in paddy field，but the nitrogen application of GM treatment should not exceed 150 kg/hm^2. Legume green fertilizer was recommended for rice and green fertilizer rotation in the rice area of Yangtze River Basin. And in the southern rice area，mixed green manure was recommended.

Key words：green fertilizer；rice；yield；soil fertility；integration analysis；random forest