

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.004

王强盛, 薄雨心, 余坤龙, 等. 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望. 土壤, 2021, 53(2): 243–249.

绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望^①

王强盛¹, 薄雨心^{1,2}, 余坤龙¹, 刘晓雪¹

(1 南京农业大学现代农作制度与生态循环农业实验室, 南京 210095; 2 南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘要: 绿肥种植利用是中国传统农业技术的精华, 也是绿色生态循环农业发展的关键性举措, 为中国粮食稳定和绿色增效发挥着十分重要的作用。水稻栽种之前的绿肥还田耕作模式就是将绿肥植物体直接耕翻于稻田中作为肥料或是将绿肥植物体沤堆成肥再施用于稻田土壤, 这不仅能够培肥稻田土壤、增强土壤供肥能力和减少稻季化学肥料施用, 而且能够减少稻田周年化学养分供给、减轻稻田营养物质流失、提高养分资源利用效率, 是轻简种植、绿色高效的农作制度模式。本文概述了绿肥还田对稻田土壤质量、资源利用效率和温室气体排放等方面的影响, 展望了绿肥在稻田资源利用中的潜力, 为绿肥高效种植和合理还田提供参考。

关键词: 绿肥植物; 稻作系统; 土壤质量; 温室气体

中图分类号: S551+3; S551+7; S553+9 **文献标志码:** A

Analysis and Research Prospect of Effect of Green Manure Returning on Rice Cropping Ecosystem

WANG Qiangsheng¹, BO Yuxin^{1,2}, YU Kunlong¹, LIU Xiaoxue¹

(1 *Laboratory of Modern Farming System and Ecological Circular Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*; 2 *College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: The cultivation and utilization of green manure plants is not only the essence of Chinese traditional agricultural technology, but also the key measure for the development of green ecological circular agriculture, which plays a very important role in maintaining soil fertility and grain stability and realizing green increasing efficiency in China. Returning green manure to the field is, before rice transplanting, to plough green manure plants directly into paddy field as fertilizer or to compost green manure plants into fertilizer and then apply it to paddy soil, it can not only fertilize paddy soil, enhance soil fertilizer supply capacity and reduce the application of chemical fertilizer in rice season, but also reduce the annual supply of chemical nutrients and reduce nutrient loss in paddy field, thus, improve the utilization efficiency of nutrient resources, therefore, it is an easy, green and efficient farming system. This paper summarizes the impact of green manure returning on soil quality, resource utilization efficiency and greenhouse gas emission of paddy fields, looks forward to the development of green manure utilization in paddy field, and provides the reference for efficient planting and reasonable return of green manure.

Key words: Green manure plant; Paddy ecosystem; Soil quality; Greenhouse gas

绿肥, 顾名思义就是“绿色的肥料”, 是指将植物的鲜植物体直接翻压或经过堆沤发酵后施用到土地中作肥料的绿色植物体。绿肥还田作为一种传统的农耕技术, 在没有大规模运用化肥之前, 是稻田有机质的重要来源, 是确保水稻正常生长的关键性培肥措施, 曾在农业生产中有着举足轻重的地位。

早在西周和春秋战国时代, 人们就开始利用锄去的杂草肥田, 《诗经》记载了“其耨斯赵, 以薅荼蓼,

荼蓼朽止, 黍稷茂止”^[1], 反映了当时用绿肥、烂草来肥田的做法。在公元三世纪之前, 中国就开始了以苜蓿为主的绿肥栽培种植。《齐民要术》更是中国绿肥发展的重要里程碑, 总结了不同绿肥种类的肥效, 提出了绿色种植的地位及轮作重要性, 指出了绿肥压青的适宜时间等诸多内容, 极大地促进了绿肥的发展。在此之后, 绿肥的品种利用、种植模式和种养结合都得以稳步发展, 如种植苕子还田培肥, 对于维持

^①基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2018333)、江苏省现代农业产业技术体系项目(JATS[2019]443)和江苏省政策引导科技计划项目(SZ-YC2019005)资助。

作者简介: 王强盛(1971—), 男, 江苏东台人, 博士, 主要从事稻田生态种养、稻田轮作休耕和生态循环农业研究。E-mail: qswang@njau.edu.cn

土壤肥力起到不可磨灭的作用。

然而,中国现代农业发展过程虽然基本解决了民众吃饱吃好的问题,但也出现了一些问题,如长期大量化学制品的投入,导致资源短缺、环境污染加重;稻田土壤板结,土壤养分流失加快;生产成本增加但产量徘徊不增;稻米品质下降,甚至出现食品安全的隐患。这些问题与人民日益增长的美好生活需要形成了主要矛盾。稻米作为中国民众的主要粮食之一,有 60% 以上人口将其作为主要口粮,而绿肥-水稻合理轮作种植在减少化学养分施用、改善土壤肥力、增加稻谷产量、提升稻米品质以及促进水稻生长和调优稻田系统等方面有较好的推动作用。近年来,国家与社会越来越关注绿肥生产的恢复,现代农业呼唤传统农业的精华回归^[2]。2006 年,国家启动了土壤有机质提升项目,出台了绿肥种植的补贴政策,推动了绿肥生产的迅速回升,至今,涵盖绿肥栽培与土壤及养分管理、绿肥机械、病虫害防治等全国绿肥体系已初步建成^[3]。现在中国各地都有较多的生态适应性绿肥品种出现,种植模式也不断更新和发展,现有绿肥主要种植品种有紫云英、紫花苜蓿、黄花苜蓿、苕子、豌豆、蚕豆、油菜等。通过发展绿肥、改善土壤理化性状来实现“一控二减三基本”的“双减”目标,适度降低使用化肥带来的化学性物质污染,是响应习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”发展理念的生态途径,也是现代农业可持续发展的必然要求。本文概述了绿肥种植还田对稻田土壤性质的影响及生态效应,也指出了绿肥还田存在的问题和合理措施,为绿肥种植在稻田生态系统资源高效利用提供参考。

1 绿肥还田对土壤性质的影响

绿肥还田会改变土壤的理化性质,影响土壤中微生物数量和活性以及有机物的转化^[4],从而改善土地质量,维持土壤生产力。

绿肥还田能降低土壤容重、提高土壤渗透性和持水力^[5]以及增加阳离子交换量^[6],达到改善土壤理化性质的目的。绿肥还田后可刺激有益真菌的快速繁殖,绿肥作物在土壤微生物的矿化作用下,与土壤形成有机-无机复合体,促进土壤胶体的吸附作用^[7]。土壤酶活性(包括脱氢酶、脲酶、酸性磷酸酶和 β -葡萄糖苷酶)在绿肥还田后也得到提升,一般 C/N、C/P 比低且木质素含量低的绿肥,如苜蓿,经还田后土壤氮、磷输入量和积累量较高,更有利于激发土壤酶活性^[8]。但也有研究表明,土壤酶活性大小受施肥制度

影响更为突出,如土壤转化酶与土壤酸性磷酸酶活性在单施绿肥下没有显著的提升,需要配施化肥才有明显的促进^[9]。此外,土壤 pH 变化受绿肥品种、环境差异和时间长短的影响。杨滨娟等^[10]研究表明,绿肥还田后的土壤 pH 高于冬闲对照,以紫云英还田的稻田 pH 最高,能有效改善土壤酸化问题。但也有研究表明,绿肥还田降低了土壤 pH^[11],这可能是由于有机肥促进水稻根系有机酸的分泌,土壤中 H^+ 浓度增加,土壤 pH 降低^[12]。

绿肥还田后在腐解过程中释放出腐殖质,补充土壤养分。有研究表明,绿肥还田后土壤全氮、有效氮、有效磷、有效钾的含量分别提高了 3 g/kg、22 mg/kg、21 mg/kg 和 15 mg/kg^[13]。溶解性有机质表征土壤养分的有效性。Gao 等^[14]结果表明,绿肥还田不仅可以增加溶解性有机质含量,而且其基团和结构也更复杂,有效养分在土壤中更稳定。方畅宇等^[15]研究表明,有机无机肥配施比单施化肥更能达到提高土壤速效养分含量和提供水稻植株所需养分的目的。绿肥腐解后释放出的养分很大程度上取决于绿肥质量(C/N 比和 C/P 比),因此 C/N 比和 C/P 比较低的绿肥作物还田,如豆科绿肥苜蓿,能显著提高土壤全氮和有效磷含量^[16]。氮(磷)平衡是指氮(磷)输出和输入之间的差异,对维持土壤养分平衡至关重要。Hong 等^[17]研究表明,绿肥还田后土壤氮平衡值均低于冬闲处理,且紫云英还田下降幅度最大,氮平衡值下降说明氮输入增加,即绿肥还田能有效增加土壤的氮含量;但磷平衡变化差异不大。但也有研究表明,豆科绿肥还田后土壤中硝酸盐减少^[18],这可能是绿色还田后土壤碳和氮增加,微生物利用 NO_3^- 速率加快^[18];或者是控制反硝化酶的功能基因发挥作用^[19]。从总体上来看,绿肥还田能够改善土壤性质,增加土壤的肥力和养分的有效性。

土壤团聚体也是衡量土壤结构状况和肥力水平的重要指标^[20]。土壤能否适于作物生长往往取决于土壤团聚体的含量与分布。绿肥还田可以通过增加有机质和胶结物质含量来改善土壤团聚体结构,使得土壤中水稳性团聚体^[21]与机械稳定性团聚体含量提高^[22];同时也可以缓解团聚体在水蚀作用下的分散程度,降低团聚体的破坏率,提高土壤团聚体的稳定性^[22]。绿肥还田对不同粒径土壤团聚体的分布及其养分含量也有一定影响。由于土壤酶活性和 0~20 cm 土层的全氮、有机碳含量在绿肥还田后得到提高,而大团聚体含量与土壤理化性质及土壤酶活性呈正相关^[23],因而绿肥还田可以增加土壤大团聚体含量,优化土质。

绿肥还田较冬闲模式提高了水稳性团聚体 $0.75 \sim 1.26 \text{ g/kg}$ 有机碳, 且主要富集在 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 粒径的团聚体内^[7], 这可能是由于团聚体粒径的增大, 土壤中胶结物质含量也随之增加, 对碳的凝集作用变强^[24]。可见大粒径团聚体对有机碳的积累有积极作用。

绿肥还田后, 土壤理化性质、养分含量、团聚体含量等均有所提高, 这均有利于土壤性质的改善, 为下茬水稻的生长提供有利的生长环境。

2 绿肥还田对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤必不可缺的组成部分, 将土壤中的植物残体腐解成腐殖质, 它既是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力, 又是土壤中植物有效养分的储备库^[25]。因此, 其在土壤肥力和植物营养中具有重要作用。

植物与土壤间养分的转化、吸收都与微生物的数量及群落的结构有密切关系。Zhang 等^[26]试验表明, 绿肥还田后, 水稻根际微生物丰富度(Chao 值)均高于冬闲处理, 但是降低了微生物多样性(Shannon 和 Simpson 指数)。这可能是绿肥还田可以改善根际环境, 增加水稻根际细菌数量, 但有些根际微生物可能对土壤环境因子的变化极为敏感, 土壤的微小变动均会引起其活性变化^[25], 微生物群落的种类多样性降低。Toda 和 Uchida^[27]研究得出, 绿肥还田后改变了土壤中细菌的种群分布, 如芽孢杆菌和变形杆菌的比例增加。这些细菌可参与难分解有机物的腐殖化^[28], 土壤中碳、氮储量增加, 改变了微生物生长环境, 从而影响了土壤微生物种类分布。绿肥还田后氨氧化细

菌丰富度增加, 可归因于绿肥腐解产生的有机物经矿化形成 NH_4^+ , 刺激了氨氧化细菌的生长^[11]。绿肥还田也会影响一些古菌的群落结构, 如绿肥翻压过的稻田土壤中产甲烷古菌的丰富度较单施化肥处理高^[29]。当绿肥有机质分解时, 土壤兼性细菌和厌氧细菌会消耗土壤中大量氧气和氧化态无机化合物并产生还原物质, 使得稻田氧化还原电位快速下降^[30], 为产甲烷古菌提供适宜的生长环境, 产甲烷古菌的丰度增加。绿肥还田不仅改变了土壤微生物的群落特征, 也改善了微生物特性。Gao 等^[31]对长期种植绿肥条件下土壤微生物的生物量进行了分析, 发现绿肥还田能够有效提高稻田土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵。因此, 绿肥还田后会改变土壤环境, 进而影响微生物的种类、丰富度、活性及结构。

豆科植物的根系能分泌凝集素, 刺激根瘤菌聚集根际, 根瘤菌与根毛接触后, 细胞壁变软, 根毛发生卷曲, 之后细胞壁发生内陷, 根瘤菌侵入豆科绿肥的根部, 在根皮层进行大量繁殖并转变为类菌体, 皮层增生形成瘤状组织, 从而形成根瘤^[32]。本文将豆科绿肥的固氮过程总结如图 1。焦健和田长富^[33]具体解释了根瘤菌固氮的具体过程: 固氮过程中, 植物根瘤细胞通过豆血红蛋白的调控, 以保证类菌体能够利用植物供给的碳源所产生的能量, 在钼铁蛋白催化下, 将 N_2 还原为 NH_3 ; NH_3 在跨越共生体膜时变为植物可以直接利用的 NH_4^+ ; 铵盐在根瘤菌中的氨基化酶的催化下合成有机胺。当根瘤衰老时其中定殖的大量根瘤菌细胞被释放到土壤中, 随着根瘤菌侵染根皮层, 释放有机胺和无机铵。

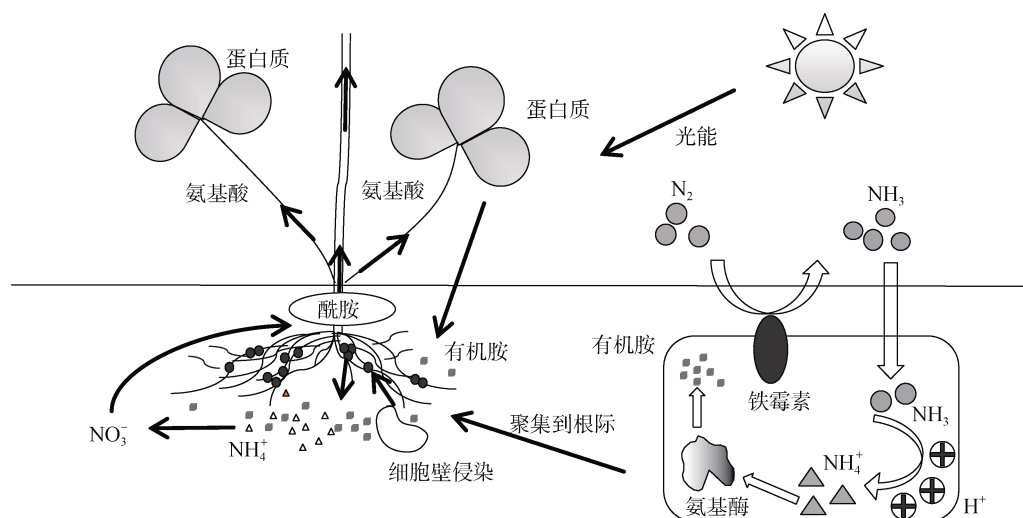


图 1 豆科绿肥根瘤菌固氮过程

Fig. 1 Nitrogen fixation process of *Rhizobium solani*

方宇等^[34]研究表明,绿肥还田后,随着土壤 pH 增加,根瘤菌丰富度明显提升了 4.25%~7.12%。有研究表明,绿肥还田后,土壤中根瘤菌的丰富度增加,紫云英还田后的根瘤菌丰富度增加最多,约为冬闲处理的 6 倍~9 倍,这可能是豆科紫云英与根瘤菌形成互利共生体为根瘤菌的生长和繁殖提供有利环境的原因^[31]。

3 绿肥还田对 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

缓解环境气候变化和确保粮食安全是 21 世纪的两大挑战。随着地表温度的逐年上升,环境气候日益恶化,温室气体的排放问题已成为关注的焦点之一。当前有许多研究表明,绿肥还田对培肥地力、改善土壤性质有积极的作用,但对绿肥还田后的温室气体产生情况以及对生态系统的影响研究并不深入。

大气中约 20% 的温室气体来自农业土壤排放,其中 CH₄ 占农田总温室气体的 8%~15%^[35],被视为最主要的稻田温室气体释放源,仅次于 CO₂。郑佳舜等^[36]研究表明,稻田 CH₄ 排放量与绿肥还田量有关,并且绿肥还田后到水稻晒田前对 CH₄ 排放影响较大。这可能是因为这段时期绿肥处于腐解养分释放的关键期。稻田在淹水条件下,绿肥腐解加速了氧化还原电位的下降,为水稻田提供了良好的厌氧环境^[37],加快了 CH₄ 释放速率。黑麦由于其 C/N 比较高,作绿肥时 CH₄ 排放量较高。在黑麦的营养生长过程中,C/N 比降低,生物积累量增加,在开花期时 C/N 比最小,因此开花期时 CH₄ 排放潜力最低,是黑麦收获还田以降低温室气体排放的最佳阶段^[38]。在缺氧条件下,由于产甲烷古菌分解绿肥,稻田会产生 CH₄^[39]。Gao 等^[40]试验表明,C/N 比高的绿肥还田,如蚕豆,虽然增加了水稻产量,但温室气体强度也随之增强;而低 C/N 比的绿肥还田,如苜蓿不仅增加了生态系统净碳预算和土壤总碳变化,而且水稻产量也更高。这表明 C/N 比低的绿肥是提高水稻产量、减少温室气体排放并增加土壤碳储量的理想绿肥。

N₂O 也是一种稻田温室气体,土壤排放的 N₂O 已被确定是大气中 N₂O 的主要人为排放来源。Xie 等^[41]试验结果表明,稻田 N₂O 的排放强度为单施紫云英<紫云英+氮肥<单施氮肥。绿肥还田 N₂O 排放减少可能是由于土壤微生物在分解绿肥时产生了还原性物质,降低了氧化还原电位,进行反硝化将 N₂O 还原为 NO 或 N₂,从而降低了 N₂O 排放^[42];或者是由于绿肥还田时产生了化感物质,抑制了土壤 N₂O 的产生^[43]。常单娜等^[44]研究表明,绿肥还田增加了

CO₂、CH₄ 排放,但降低了 N₂O 的排放。因为翻压后期强还原条件下易完成反硝化作用,硝态氮被还原为 N₂,这使得 N₂O 排放主要集中在翻压前期,从而减少了 N₂O 的排放^[45]。Xu 等^[46]研究指出,绿肥还田与稻鸭共作可以降低稻田温室气体的排放潜势。可见,绿肥还田可减少稻田 N₂O 的排放。

4 绿肥还田对氮素利用效率的影响

水稻可持续生产面临的主要挑战是在降低成本、优化环境的条件下提高水稻产量与品质,近年来通过有机肥的补给来减少无机肥的投入受到了广泛的关注。绿肥作为生态的有机肥是替代化肥的一种科学的选择,它以较少的投入带来较高的回报,对实现生态友好、经济可行的可持续农业具有深远意义。瞿怀康等^[47]研究紫花苜蓿还田下减少的稻田氮肥施用量,结果表明,绿肥还田下 80% 氮肥配置的稻田产量最高,60% 氮肥配置产量次之,但差异不大。因此,在不减少稻谷产量前提下,紫花苜蓿还田可减少 20%~40% 的氮肥施用量。利培星^[48]研究结果表明,油菜秸秆与紫云英还田可以代替 15%~30% 化肥,且绿肥还田后稻田施肥,水稻的化肥利用率比常规施肥提高了 21.42%。水生绿肥浮萍与尿素结合使用能降低 25% 氮肥使用量,降低 36%~52% 氮损失^[49]。这主要归因于浮萍在土壤表面形成了物理屏障,减少 NH₃ 挥发,氮素流失减少^[50]。同时,在浮萍覆盖下,硝化细菌群落大量繁殖,积累了大量 NH₄⁺,提高了硝化进程,氮素以 NO₃⁻-N 的形式释放到稻田中^[51],促进了水稻对氮的利用。水稻易吸收土壤或肥料提供的氮而非生物固定的氮,因而单施氮肥时水稻摄入的氮是紫云英还田配施氮肥的 1.45 倍,但氮素损失量是后者的 4.02 倍,土壤中氮素残余量只为后者的 0.23 倍^[52]。这说明绿肥还田后未被吸收的氮残留在土壤中可以叠加利用,有利于后茬作物的生长,提高了氮的利用效率。种植绿肥可以通过增加土壤有机质含量和植物可利用的养分以减少肥料的使用,但是绿肥不能完全替代化肥,不能作为作物的唯一营养来源^[53]。

5 绿肥还田对水稻产量和品质的影响

通过绿肥翻压入土,形成有机肥释放到稻田土壤中,配施化肥,既提高了肥料的利用率,也保证了水稻生长的各阶段需肥,提高了水稻产量。Gao 等^[16]研究表明,绿肥还田能增加水稻产量,并且苜蓿比蚕豆增加水稻产量 45.1 kg/hm²。因为 C/N、C/P 比低的绿肥对水稻增产效果更佳^[39]。Kang 等^[54]研究表明,

大麦、紫云英等绿肥在 $7\,500 \sim 30\,000 \text{ kg/hm}^2$ 的掺入水平下, 水稻产量与绿肥的施用量呈正相关。不同品种绿肥还田对水稻增产效果也存在差异, 为紫云英>油菜>黑麦草>冬闲对照, 其中黑麦草是禾本科植物, 在生长过程中吸取大量养分, 较多地消耗地力, 从而影响后茬水稻的生长^[10]。Islam 等^[55]将绿肥与不同分子量的氮混合处理后, 得出绿肥还田后水稻的叶绿素含量、叶面积指数、光拦截百分比和净同化率都有所增加, 干物质质量增加, 从而提高稻谷产量。绿肥还田不仅可以提高水稻产量, 还能改善稻米品质, 糙米率上升了 $0.71\% \sim 1.29\%$, 蛋白质含量增加了 $0.29\% \sim 0.53\%$, 直链淀粉含量增加了 $0.02\% \sim 0.05\%$, 而稻米外观变化不大^[56]。但也有研究表明, 干旱半干旱地区种植利用绿肥会导致作物减产, 绿肥种植期间过多消耗土壤水分而导致下茬作物生长期缺水, 引起产量降低^[57]。

6 问题与展望

绿肥种植还田在增加土壤肥力水平、提高稻田养分供应能力、增强稻田资源利用效率和适度提高水稻产量以及改善稻米品质方面具有较好的促进作用, 但在实际应用中还存在诸多问题, 还需要更多地进行绿肥高效种植、还田方式、水肥管理、抗逆措施以及相应的生态效应等许多环节研究与应用, 以便更好地揭示绿肥-稻田-环境之间的关系, 为现代农业的绿色发展和稳产增效提供关键性措施。

6.1 现阶段绿肥研究的不足

目前绿肥的研究和应用也存在不少问题, 如绿肥的水肥管理未能引起足够重视、绿肥病虫害的防治体系不完善、绿肥的采后技术相对缺乏等。今后的绿肥研究中应注意以下几方面的问题。

1) 虫害发生复杂。我国绿肥种植历史悠久、种类繁多, 虫害的发生规律也较为复杂, 其相应的防治技术需要进一步完善。其中豆科绿肥和禾本科绿肥易受病虫害的侵害, 这主要是由于此类害虫多为远距离迁飞性, 且预测难度大, 爆发性明显, 摄食量大, 在迁飞过程中常以绿肥作物为能量补给, 所危害地区的绿肥基本被毁尽。在翻耕前做好天敌保护措施, 将生物防治与化学防治相结合, 对下茬作物的虫害防治具有重要意义。

2) 水肥管理不当。绿肥可以为土壤供肥, 但并不代表其生长不需要施肥, 在种植过程中, 农户往往忽略了绿肥的生长用肥。多施磷钾肥可促进作物根系发展, 增强抗倒伏力; 若施用氮肥过多, 作物贪青晚熟,

影响绿肥结实率与产量。绿肥的生长也需要定期清除杂草, 做到地无荒草。此外, 绿肥在生长过程中需要根据降水量和田间水分, 准确把控水分管理。如果遇到雪灾或者春后连续阴雨, 有些抗寒较差的绿肥如紫花苜蓿, 会导致绿肥出苗率低, 需要雨后及时补种; 若遇贫瘠的土壤且缺少适当的水肥管理, 会严重影响耐贫瘠能力差绿肥的产量。

3) 翻压操作不合理。绿肥成熟后需要翻压, 不当的翻压操作也会影响绿肥还田的肥效。若翻压过早, 植株尚未成熟, 茎叶幼嫩、含氮量较低、水分多、腐解程度较快, 肥效时期短; 若翻压过迟, 茎叶老化、营养低, 且不易分解, 分解时会产生有机酸, 也会降低肥效。绿肥翻压的数量应控制在每亩(1亩=667 m²) $1\,500 \sim 2\,000 \text{ kg}$, 若翻压数量过多, 腐解过程中会产生有毒气体, 不仅危害环境, 而且会影响下茬水稻的正常生长; 翻压的深度应该在 $15 \sim 20 \text{ cm}$, 如果翻压过深, 则会缺氧, 不利于腐解。绿肥翻压后应及时灌水, 以加速腐解, 提高肥料转化效率。

6.2 建议与措施

1) 强化绿肥品种选育。长期以来, 绿肥品种主要延续过去的“经典”, 新品种更新较慢, 品种类型有限, 花形色彩简单。首先, 可以积极引进具有适应性强、抗逆性强、用途广的新品种; 其次, 可以通过杂交育种或分子技术、组培快繁等方式选育出新花色、新花型的品种, 同时选育出固氮能力高或肥料利用率高的新品种。绿肥新品种的使用不仅可以提高稻田“颜值”, 更能改善土质, 优化稻田环境。

2) 做好绿肥高效管理。合理的播期和播量是保障绿肥健壮生长的关键环节, 应综合当地气候、地形、绿肥种类及其生长特点、收获还田时期来考虑, 采用开沟成畦或机械起垄等模式来播种、栽苗, 并尽量利用冬前的温光资源, 促进冬前分枝的生长。在绿肥生长过程中要“三沟”配套, 做好绿肥的水肥和病虫害绿色管理, 豆科植物适度增施根瘤菌源。有关绿肥生长与水肥管理、微生物菌体之间的作用机理还需不断深入研究, 并且绿肥还田后的机械还田深度、稻季“减肥”效应、土壤微生物多样性变化、土壤培肥的持续能力和减少养分损失和温室气体排放等相关基础研究需要系统分析, 甚至需要长期定位试验来开展。

3) 拓宽绿肥利用途径。随着现代农业的快速发展, 农业生产的主体不再局限于农耕劳作, 开始向服务业、观光旅游业等休闲产业发展, 更加地贴近生活、体验生态。种植观光绿肥, 可在丰富民众业余生活、满足消费者需求的同时, 提高农户的经济收入。充分

利用稻田地块资源,合理规划绿肥的种植,可实现观光农业与绿肥生产的有效结合。

参考文献:

- [1] 焦彬. 论我国绿肥的历史演变及其应用[J]. 中国农史, 1984, 3(1): 54–57.
- [2] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 1–3.
- [3] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450–1461.
- [4] 刘国顺, 罗贞宝, 王岩, 等. 绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2006(1): 95–98.
- [5] Irmak S, Sharma V, Mohammed A T, et al. Impacts of cover crops on soil physical properties: field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity, and infiltration[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(4): 1307–1321.
- [6] 索龙, 潘凤娥, 胡俊鹏, 等. 秸秆及生物质炭对砖红壤酸度及交换性能的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1157–1162.
- [7] 杨曾平. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土质量和生产力可持续性影响的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学学位, 2011.
- [8] Gao X Y, Shi D Y, Lv A M, et al. Increase phosphorus availability from the use of alfalfa green manure in rice agroecosystem[J]. Scientific reports, 2016, 6: 6981.
- [9] Gao X Y, Shi D Y, Lv A, et al. Increase phosphorus availability from the use of alfalfa (*Medicago sativa* L) green manure in rice (*Oryza sativa* L.) agroecosystem[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 36981.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Fang Y, Wang F, Jia X B, et al. Distinct responses of ammonia-oxidizing bacteria and archaea to green manure combined with reduced chemical fertilizer in a paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(4): 1613–1623.
- [13] 关强, 蒲瑶瑶, 张欣, 等. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115–121.
- [14] Yang L, Zhou X, Liao Y L, et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake[J]. Crop Science, 2019, 59(2): 749–759.
- [15] Gao S J, Gao J S, Cao W D, et al. Effects of long-term green manure application on the content and structure of dissolved organic matter in red paddy soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(8): 1852–1860.
- [16] 方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 462–468.
- [17] Gao X Y, Lv A, Zhou P, et al. Effect of green manures on rice growth and plant nutrients under conventional and no-till systems[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(6): 2335–2346.
- [18] Hong X, Ma C, Gao J S, et al. Effects of different green manure treatments on soil apparent N and P balance under a 34-year double-rice cropping system[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 73–80.
- [19] Bernard L, Mougél C, Maron P A, et al. Dynamics and identification of soil microbial populations actively assimilating carbon from ¹³C-labelled wheat residue as estimated by DNA- and RNA-SIP techniques[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(3): 752–764.
- [20] Wang Y, Uchida Y, Shimomura Y, et al. Responses of denitrifying bacterial communities to short-term waterlogging of soils[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 803.
- [21] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1): 35–40.
- [22] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715–722.
- [23] 张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 9–16.
- [24] Zhang D B, Yao Z Y, Chen J, et al. Improving soil aggregation, aggregate-associated C and N, and enzyme activities by green manure crops in the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(6): 1267–1279.
- [25] 刘春增, 刘小粉, 李本银, 等. 紫云英配施不同用量化肥对土壤养分、团聚性及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 409–413.
- [26] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 83–90.
- [27] Zhang X X, Zhang R J, Gao J S, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 104: 208–217.
- [28] Toda M, Uchida Y. Long-term use of green manure legume and chemical fertiliser affect soil bacterial community structures but not the rate of soil nitrate decrease when excess carbon and nitrogen are applied[J]. Soil Research, 2017, 55(6): 524–533.
- [29] Mocali, Galeffi, Perrin, et al. Alteration of bacterial communities and organic matter in microbial fuel cells (MFCs) supplied with soil and organic fertilizer[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 2013, 97(3): 1299–1315.
- [30] 赵晓萌, 刘婧娜, 易丽霞, 等. 绿肥还田对双季稻根际土壤产甲烷古菌群落结构的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 698–707.
- [31] Liu Y, Lou J, Li F B, et al. Evaluating oxidation-reduction properties of Dissolved organic matter from Chinese milk

- vetch (*Astragalus sinicus* L.): A comprehensive multi-parametric study[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(15): 1916–1927.
- [32] Gao S J, Zhang R G, Cao W D, et al. Long-term rice-rice-green manure rotation changing the microbial communities in typical red paddy soil in South China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2512–2520.
- [33] 黎林. 生物固氮的研究现状初探[J]. *韶关学院学报*, 2009, 30(3): 88–91.
- [34] 焦健, 田长富. 根瘤菌共生固氮能力的进化模式[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(2): 388–397.
- [35] 方宇, 王飞, 李清华, 等. 连续水旱轮作对水稻冷浸田土壤细菌群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 515–525.
- [36] Stocker T F, Qin D, Plattner G K. *Climate change 2013: the physical science basis, contribution of the intergovernmental panel on climate change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [37] 郑佳舜, 胡钧铭, 韦翔华, 等. 绿肥压青粉垄保护性耕作对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(1): 15–24.
- [38] Zhang A, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 469–475.
- [39] Kim S Y, Park C K, Gwon H S, et al. Optimizing the harvesting stage of rye as a green manure to maximize nutrient production and to minimize methane production in mono-rice paddies[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 537: 441–446.
- [40] Kim S Y, Lee C H, Gutierrez J, et al. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 273–286.
- [41] Gao X Y, Lv A, Wang S Y, et al. Greenhouse gas intensity and net ecosystem carbon budget following the application of green manures in rice paddies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 106(2): 169–183.
- [42] 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): e0168134.
- [43] Minamikawa K, Nishimura S, Sawamoto T, et al. Annual emissions of Dissolved CO₂, CH₄, and N₂O in the subsurface drainage from three cropping systems[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 796–809.
- [44] Braker G, Zhou J Z, Wu L Y, et al. Nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) as functional markers to investigate diversity of denitrifying bacteria in Pacific northwest marine sediment communities[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, 66(5): 2096–2104.
- [45] 常单娜, 刘春增, 李本银, 等. 翻压紫云英对稻田土壤还原物质变化特征及温室气体排放的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(12): 133–144.
- [46] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(4): 457–466.
- [47] Xu G C, Liu X, Wang Q S, et al. Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 575: 58–66.
- [48] 瞿怀康, 高月华, 韩九荣. 绿肥紫花苜蓿还田下水稻氮肥减量效应研究[J]. *农业装备技术*, 2018, 44(1): 22–24.
- [49] 利培星. 稻-油轮作体系纳入绿肥种植的作物生产、节肥与培肥效应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [50] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, et al. Duckweed (*Spirodela polyrhiza*) as green manure for increasing yield and reducing nitrogen loss in rice production[J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 273–282.
- [51] Li H, Liang X Q, Lian Y F, et al. Reduction of ammonia volatilization from urea by a floating duckweed in flooded rice fields[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(6): 1890–1895.
- [52] Srivastava J K, Chandra H, Kalra S J S, et al. Plant-microbe interaction in aquatic system and their role in the management of water quality: a review[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(3): 1079–1090.
- [53] Meng X T, Li Y Y, Zhang Y, et al. Green manure application improves rice growth and urea nitrogen use efficiency assessed using ¹⁵N labeling[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(5): 511–518.
- [54] Brown L K, Kazas C, Stockan J, et al. Is green manure from riparian buffer strip species an effective nutrient source for crops?[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(2): 385–393.
- [55] Kang S W, Seo D C, Cho J S. Effect of incorporation levels of green manure crops on rice yield and soil chemical properties[J]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 2017, 50(3): 187–194.
- [56] Islam M M, Urmi T A, Rana M S, et al. Green manuring effects on crop morpho-physiological characters, rice yield and soil properties[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2019, 25(1): 303–312.
- [57] 刘威. 冬种绿肥和稻草还田对水稻生长、土壤性质及周年温室气体排放影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [58] 赵娜. 夏闲季种植豆科绿肥对旱地土壤性质和冬小麦生长的影响及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.