

春玉米-晚稻轮作模式的综合效益研究：现状、挑战与展望

郑林娜 凌霄霞 杨显轲 彭少兵 黄见良 熊栋梁*

(华中农业大学 植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 武汉 430070; *通信作者, email: dlxiong@mail.hzau.edu.cn)

Research on Comprehensive Benefit of Spring Maize-late Rice Rotation System: Current Status, Challenges and Prospects

ZHENG Linna, LING Xiaoxia, YANG Xianke, PENG Shaobing, HUANG Jianliang, XIONG Dongliang*

(National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement/MOA Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River/College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; *Corresponding author, email: dlxiong@mail.hzau.edu.cn)

Abstract: Stable growth in grain production plays a vital role in safeguarding China's food security. Given the continued decline in arable land area and the slow increase in yield per unit area, spring maize-late rice rotation system has emerged as an effective strategy to increase annual productivity through increasing cropping frequency. As a representative paddy-upland rotation system, the maize-rice system demonstrates superior annual energy-equivalent yield compared to other rice-based systems, with the late rice season exhibiting higher yield than the single-cropping late rice system. This work reviewed the current production status of the spring maize-late rice rotation and systematically analyzed its agronomic advantages, including its impacts on soil physicochemical properties, yield stability, resource use efficiency, and greenhouse gas emission patterns. Furthermore, we discuss potential approaches for improving productivity and achieving sustainable development in this rotation system. These findings provide theoretical support for optimizing high-yield cultivation techniques and promoting the large-scale adoption of this cropping pattern.

Key words: paddy-upland rotation; yield; resource use efficiency; greenhouse gas emission; soil physicochemical property

摘 要: 稳定提高粮食产量对保障我国粮食安全至关重要。在耕地面积不断减少和单产增长缓慢的背景下, 大力发展春玉米-晚稻轮作模式提高收获频次是增加单位土地面积周年产量的重要途径之一。作为典型的水旱轮作模式, 玉米-晚稻系统的周年能量当量产量要高于其他稻作系统, 而且该模式下晚稻季的产量水平也要高于一季晚稻。本文介绍了春玉米-晚稻模式的生产现状, 全面综述了该轮作模式在土壤理化性质演变、产量和资源利用效率表现以及温室气体排放特征等方面的生产优势, 探讨了未来进一步提高玉米-晚稻模式产量及绿色可持续发展的可能途径, 以期为该模式的高产技术构建以及生产中的大面积推广提供理论依据。

关键词: 水旱轮作; 产量; 资源利用效率; 温室气体排放; 土壤理化特性

在耕地面积有限和单产增长缓慢的背景下, 通过周年轮作提高收获频次是增加单位土地面积产量的重要途径之一^[1, 2]。玉米作为全球重要的粮食与饲料作物, 在我国农业生产中具有战略地位^[3]。然而, 在南方地区, 玉米产量与需求之间存在巨大缺口, 亟待通过种植制度创新等途径来扩大玉米生产的规模^[4], 从而增强玉米的供应能力、稳定粮食价格^[5]。近些年来, 湖北等中部地区尝试将部分双季稻或稻麦两熟轮作改为玉米-水稻两熟轮作的新模式, 以期实现周年内玉米和水稻双丰收, 同时协

调口粮与饲料用粮的矛盾^[6]。玉米-水稻两熟模式是指春玉米和晚稻轮作种植的栽培模式, 在长江中下游流域, 春玉米季一般在3月中下旬直播, 7月中下旬收获; 晚稻季则是在6月下旬播种育秧, 玉米收获后及时移栽, 至10月中下旬收获。

作为典型的水旱轮作模式, 玉米-水稻系统的周年能量当量产量(产量归一化指标)要高于其他稻作系统, 而且该模式下晚稻季的产量水平也要高于一季晚稻^[7]。研究表明, 合理的轮作模式不仅能够提升光温资源利用效率^[8], 还能通过水旱交替改善土

收稿日期: 2024-12-29; 修改稿收到日期: 2025-04-11。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFD2300600); 国家水稻产业技术体系资助项目(CARS-01)。

壤理化性质^[9]。因此,系统分析春玉米-晚稻这种水旱轮作模式的生产优势和综合效益,明确该模式未来的发展瓶颈及方向,对春玉米在我国南方稻区的大面积推广意义重大。为此,本文介绍了春玉米-晚稻模式的生产现状,综述了该轮作模式在土壤理化性质演变、产量形成、资源利用效率以及温室气体排放特征等方面的生产表现,探讨了未来进一步提高玉米-水稻模式产量及绿色可持续发展的可能途径,以期为该模式的高产技术研发提供理论依据。

1 春玉米-晚稻轮作模式的发展与现状

1.1 发展历程

玉米-水稻轮作模式作为我国长江流域重要的种植制度创新,经历了较为漫长的探索。20世纪90年代,江苏省农业科学院连续多年的多点试验表明,玉米-水稻轮作模式在粮食增长率和生态适应性上都有较强的优势^[10],并研发了配套的省工高产栽培技术。随后,刘建^[11]成功地把“两段覆膜”和“塑盘早育大苗抛秧”的新技术应用到春玉米-晚稻的种植模式中,实现了玉米和水稻产量的同步增长,提高了种植效益。2008年以后,湖南、湖北、浙江等地的研究人员^[12-14]陆续研究了春玉米-晚稻种植模式的土壤碳氮转化、周年生产力、资源利用效率、温室气体排放等,并针对推广中常见的茬间磷肥配置、品种搭配和选择、前茬作物秸秆还田等问题开展了深入研究^[15,16],形成了长江中游地区春玉米连作晚稻的栽培技术规程^[17],为提高玉米-晚稻模式的生产水平和种植面积奠定了基础。

1.2 生产现状及前景

在我国粮食生产中,玉米降本增产潜力大,是决定未来我国粮食安全的重要因素^[18]。随着生物燃料和食品加工业的发展,特别是在南方,对玉米的需求量逐年增加。然而,玉米总产提升仅仅依靠单产提升较难实现,必须大力扩大玉米的种植面积^[19]。1997—2020年间,尽管中国玉米的总种植面积逐年增加、总产量缓慢上升,但是南方地区受限于土地资源,玉米的播种面积和产量增长均不明显^[20]。随着春玉米-晚稻模式理论研究的深入,湖北、浙江、湖南等地开始从政策层面大力推广,种植面积和总产均有了较大的提升。南方地区以湖北为例,2023年玉米种植面积已达76.53万hm²,总产量为318.2万t^[21]。然而,由于种植经验缺乏、栽培技术不到位,南方稻区的玉米产量水平还有较大提

升空间^[22],该轮作模式的优势还未充分发挥。

相较之下,春玉米-晚稻的轮作模式在亚洲范围内的推广成效更为显著。据国际水稻研究所统计,该模式在南亚地区分布广泛,主要集中于孟加拉国、印度、尼泊尔和巴基斯坦等国^[23-25]。这些国家的累计种植面积已超过350万hm²,且呈现逐年增长趋势^[26]。这一模式的普及得益于其独特的水旱轮作机制与资源适配性:一是节水高效,旱季种植玉米需水量低,而雨季种植水稻可充分利用降水,大幅缓解农业用水压力;二是稳产抗逆,玉米作为典型的C₄作物,具有CO₂浓缩机制^[27],不仅具有更高的光合效率以及水分利用效率,产量稳定,周年资源利用效率较高^[12],适合南亚地区的高温与缺水环境^[28]。此外,多项研究表明,相较于其他轮作模式,玉米-水稻轮作模式能显著提高作物产量^[12,29-31]。基于此,联合国粮农组织已将其列为农业集约化生产的战略性模式,认可其对粮食安全与生态平衡的长期价值^[32]。

因此,未来通过构建南方地区春玉米-晚稻周年超高产关键技术及模式,充分发挥该模式的产量潜力和生态优势,从而提高玉米的种植面积,这对于我国农业的绿色可持续发展以及保障粮食安全意义重大。

2 春玉米-晚稻轮作模式下土壤理化特性的演变

与双季稻模式相比,春玉米-晚稻模式显著增加晚稻季的土壤容重,这是由于稻田长时间淹水,土壤结构较差,而水旱轮作可以消除这种负面影响,提高土壤大团聚体比例、增加团聚度,进而使土壤容重增加^[13,33-36]。作为衡量土壤肥力的核心指标^[37],尽管土壤容重增加意味着孔隙度降低,但是水旱轮作降低了土壤次生潜育化风险,并提高了土壤通透性,避免土壤板结^[33]。正常翻耕条件下,与双季稻模式相比,前茬种植春玉米显著降低了土壤有机质含量^[13,35]、增加了晚稻季土壤速效钾含量,对速效磷、有机碳、碱解氮等的影响还未有一致结论。春玉米-晚稻轮作会促进土壤有机碳分解,这是因为在玉米季,良好的通气条件使土壤处于氧化状态,土壤微生物活性增强,加快了土壤有机质(SOM)的矿化分解^[38-40]。而春玉米秸秆还田,则会显著增加晚稻季土壤有机质含量^[37,41-42]。

土壤养分转化和有机质分解过程与土壤的酶

活性密切相关^[43]。研究表明, 土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、过氧化物酶活性与各形态有机碳含量显著或极显著正相关^[44]。一般情况下, 水旱轮作会提高土壤腺酶、转化酶、过氧化氢酶、脱氢酶的活性^[45]。春玉米-晚稻模式中, 第一茬春玉米季土壤的纤维素酶、硝酸还原酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、多酚氧化酶的活性明显低于双季稻模式, 而脲酶、 β -1, 4-葡萄糖苷酶的活性则高于双季稻模式^[14, 34, 46]。不仅如此, 水旱轮作通过改善土壤的结构和通气性, 还会显著影响土壤细菌和真菌的丰度, 但对其微生物群落多样性无影响^[46]。稻田与春玉米轮作后, 增加了第一季土壤中变形菌门、酸杆菌门、厚壁菌门、芽单胞菌门和拟杆菌门等土壤有机质降解菌丰度, 同时降低了绿弯菌门和硝化螺旋菌门的丰度^[14]。此外, 上述变化在根际与非根际土壤之间还存在显著差异^[46]。由此可见, 春玉米-晚稻轮作模式通过土壤干湿状态的季节性交替, 使晚稻季的土壤容重增加、通气性提高, 进而调控土壤微生物丰度和酶活性, 从而使土壤有机质含量降低。

3 春玉米-晚稻轮作模式的产量及资源利用效率表现

3.1 产量表现

春玉米-晚稻模式属于典型的水-旱轮作系统, 是克服连作障碍的有效途径^[47]。水旱轮作可以通过土壤水热条件的交替变化, 促进植物根系对土壤养分的吸收, 从而促进植物的生长。研究表明, 春玉米-晚稻的周年产量可达 21.3 t/hm^2 , 与南方稻区的麦-稻和稻-稻两熟制相比, 玉-稻模式增产 10% 和 20%^[13, 29], 增产幅度在不同研究之间存在一定的差异。例如, 展茗等^[17]的结果表明, 春玉米-晚稻模式比春玉米-秋玉米模式、早稻-秋玉米和双季稻模式的周年产量分别提高了 6.5%、14.2% 和 22.0%, 而在田少阳等^[48]的研究中, 与双季稻模式相比, 春玉米-晚稻模式的增产幅度则达到了 30.6%, 增产 4.33 t/hm^2 。通过对已公开发表的研究数据进行统计分析, 发现在南方地区, 与双季稻模式相比, 春玉米-晚稻模式的周年产量平均提高 3.29 t/hm^2 , 增产 22.3%(图 1)。

春玉米-晚稻模式中周年产量的提高一方面是因为玉米作为经典的 C_4 高光合植物, 具有天然的产量优势, 一般情况下春玉米产量比早稻高 17.2%~35.9%^[14]。统计分析发现, 春玉米季的产量

水平为 $5.69\sim 12.19 \text{ t/hm}^2$, 早稻季的产量水平为 $6.55\sim 9.79 \text{ t/hm}^2$, 春玉米季的产量比早稻季产量平均增加 34.8%, 平均增产 2.47 t/hm^2 。但值得注意的是, 春玉米的产量波动幅度达到了 6.5 t/hm^2 , 远高于早稻季的 3.24 t/hm^2 , 这也进一步验证了当前南方地区玉米栽培技术不到位的生产现状。此外, 晚稻季的产量增益也对周年增产有较大贡献。与双季稻模式的晚稻季相比, 采用同一耕作方式, 春玉米的引入使得晚稻产量提高了 12.4%~26.4%^[14]。整体而言, 与双季稻模式相比, 春玉米-晚稻轮作使得晚稻季产量平均增加了 0.85 t/hm^2 , 平均增产幅度为 12.0%, 最高增产幅度可达 26.9%(图 1)。

3.2 资源利用效率

3.2.1 肥料利用效率

优化氮肥施用对保障粮食安全、减少氮肥流失和提高氮肥利用率至关重要。Jiang 等^[30]通过 ^{15}N 同位素示踪技术探究了将春玉米引入稻作系统后对氮素利用的影响, 结果表明春玉米-晚稻轮作可以促进土壤的氮素利用。与早稻-秋玉米、双季玉米和双季稻模式相比, 春玉米晚稻的氮肥吸收利用率最高^[49]。此外, 早-晚稻模式下晚稻的适宜施氮量一般为 225 kg/hm^2 , 而春玉米-晚稻模式下晚稻的适宜施氮量则为 150 kg/hm^2 , 表明春玉米-晚稻模式还可以降低晚稻的氮肥施用量^[14]。值得注意的是, 春玉米-晚稻模式在氮肥偏生产力、氮肥生理利用率和农学利用率等指标上未表现出明显的优势^[13]。

为获得合理的周年养分管理方案, 已有科研人员围绕春玉米-晚稻模式下前后季养分协调、周年肥料运筹优化等内容开展了一些研究^[50]。一般而言, 肥料的利用率会随着施用量的增加而下降^[50]。因此, 在不降低春玉米产量的前提下, 适当降低春玉米的施氮量, 调节施氮时间或比例以提高春玉米对氮肥的吸收, 减少氮肥在土壤中的残留同时降低土壤背景氮, 将有利于提高后茬作物水稻的产量和氮肥利用率^[13]。在玉米-晚稻轮作系统中, 为了获得更高的产量及较高的磷肥利用效率, 水稻季磷肥的 2/3 或者全部可以前移至玉米季作底肥施用^[15]。在周年产量不变的前提下, 该方式可使周年磷肥的施用量减少 15%^[51]。此外, 当双季秸秆均还田时, 由于秸秆对钾肥具有一定的替代效应, 只施 33% 的钾肥可以在增产的同时提高钾素利用效率和钾素表观回收率^[16]。因此, 生产中春玉米-晚稻模式的养分运筹应结合秸秆还田、水分管理等栽培措施进行针对性的调整。

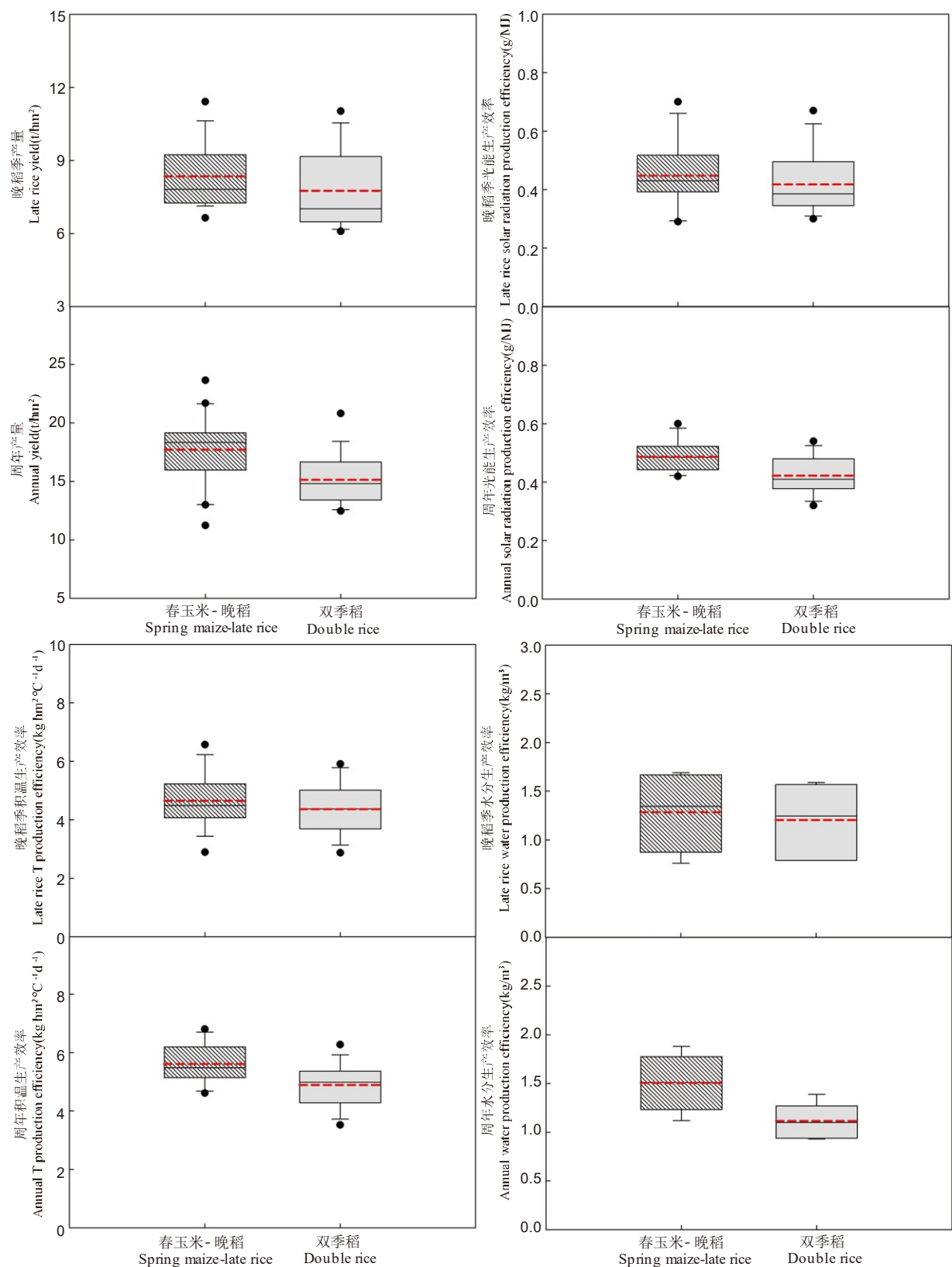


图1 春玉米-晚稻和双季稻模式下晚稻季及周年的产量、光能生产效率、积温生产效率和水分生产效率的比较[6, 10, 13, 17, 29, 34, 37, 42, 48, 52, 55, 62]

Fig. 1. Comparison of yield, solar radiation production efficiency, accumulated temperature production efficiency and water production efficiency during the late rice season and on annual basis between spring maize-late rice and double cropping rice system[6, 10, 13, 17, 29, 34, 37, 42, 48, 52, 55, 62]

3.2.2 光、温、水生产效率

玉米生育期长,在南方稻区作春玉米种植可以较好地利用充足的雨热资源。与双季稻系统相比,春玉米-晚稻模式显著提高了周年的光能生产效率、积温生产效率及水分利用率(图 1),证实了该模式在光、温、水等气候资源的高效利用上具有明显优势。具体而言,与双季稻、双季玉米和早稻-秋玉米模式相比,春玉米-晚稻模式的光能生产效率平均提高了 16.4%、6.1%和 15.2%^[17],积温生产效率则分别提高了 6.62%、4.7%和 14.4%^[17, 52]。上述结果进一步说明,春玉米-晚稻模式对于自然资源的利用效率在南方稻区常见的玉米种植模式中具有显著优势^[53]。究其原因,一方面是因为玉米作为高光效植物,较高生物积累量的特性决定其具有较高的自然资源利用率;另一方面,春玉米的引入提高了后季稻的自然资源利用率。研究表明,春玉米的引入可以显著提高晚稻的光能利用率,提高幅度为 11.5%~24.7%^[13]。除此之外,相较于双季稻模式,春玉米-晚稻模式下晚稻季的水分利用率显著提高了 34.6%(图 1),光能生产效率、积温生产效率及水分利用率均有一定的提高,表明该水旱轮作系统有利于晚稻的生长。

3.3 经济效益

春玉米-晚稻模式除了上述优势外,还具有田间管理简单、用工投入低、经济收益高的优点,实现了高产与高效的有机结合^[54]。与双季稻模式相比,春玉米-晚稻模式的经济效益平均增加 5595.98 元/hm²(图 2)。春玉米-晚稻模式的总投入和总收益都显著高于早稻-晚稻模式,经济效益高主要得益于玉米的高产值^[55]。20 世纪 80 年代后期,受限于栽培条件和技术措施,春玉米产量尚未突破 10.5 t/hm²^[56]。随着研究深入,春玉米-晚稻模式的高产栽培理论和配套关键技术的形成与推广应用,该模式的经济效益还有较大上升空间。

4 春玉米-晚稻轮作模式的减碳减排潜力

4.1 温室气体排放

农业生态系统是温室气体排放的重要来源,其 CH₄ 与 N₂O 排放占全球人为源总排放量的 52%和 84%^[57],其中稻田 CH₄ 占全世界总 CH₄ 排放的 12%。水田长期淹水使土壤处于厌氧及还原状态,并且其氧化还原电位处于较低水平,易导致甲烷的产生与排放,而旱地土壤则为好氧环境,产 CH₄ 菌在数量、种类上与水田土壤有较大差异^[58]。水田改为旱地种

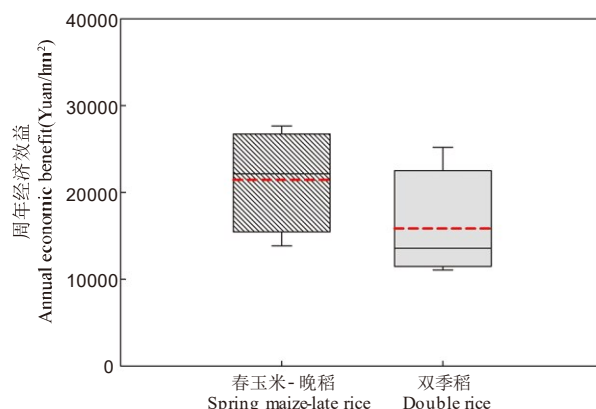


图 2 春玉米-晚稻和双季稻模式下周年经济效益的比较^[6, 37, 52, 53, 55]

Fig. 2. Comparison of annual economic benefits between spring maize-late rice and double cropping rice systems^[6, 37, 52, 53, 55]

植后,土壤中的铵态氮(NH₄⁺)经过硝化作用被氧化为硝态氮(NO₃⁻),从而增大了 N₂O 的排放(Sun)。已有研究表明,C₄作物引入稻作系统后土壤碳氮循环的改变会导致土壤以 CH₄ 排放为主转变为以 N₂O 排放为主^[59]。

相较于双季稻模式,春玉米-晚稻模式显著降低了周年的甲烷排放,降低幅度最高达 1565.2 kg/hm²(图 3)。该模式中甲烷排放量降低的原因是晚稻季排放量的降低,其降低幅度最高达到了 1253.7 kg/hm²。这主要是因为晚稻季 CH₄ 的氧化潜力大于产生潜力,尽管晚稻较高的生物量增大了 CH₄ 量,但是较高的土壤氧含量使 CH₄ 氧化量增加、排放量减少^[14]。而在 N₂O 和 CO₂ 排放上,春玉米-晚稻模式的排放量则显著高于双季稻模式(图 3),主要原因是春玉米季相对于早稻的 N₂O 和 CO₂ 排放量显著增加。总体而言,与双季稻模式相比,春玉米-晚稻模式的周年增温潜势无明显变化,但是晚稻季的增温潜势显著降低^[60]。

4.2 碳足迹

农业系统碳足迹通过量化作物生产过程中农资投入的间接排放与农田直接排放总量,为农业清洁生产提供科学依据^[61]。相较于双季稻模式,引入春玉米后晚稻生长季甲烷(CH₄)排放量显著降低,作物固碳能力同步提升。基于净生态系统碳收支评估,春玉米-晚稻模式的碳足迹较传统双季稻模式减少 35.0%~43.4%^[14]。稻田引入春玉米可以显著减少稻田温室气体和碳足迹,增加生态系统净碳汇^[31, 62]。无论秸秆是否还田,玉-稻模式周年温室气体排放强度(GHGI)均低于双季稻和再生稻模式^[63]。总的来说,春玉米-晚稻模式是一种温室气

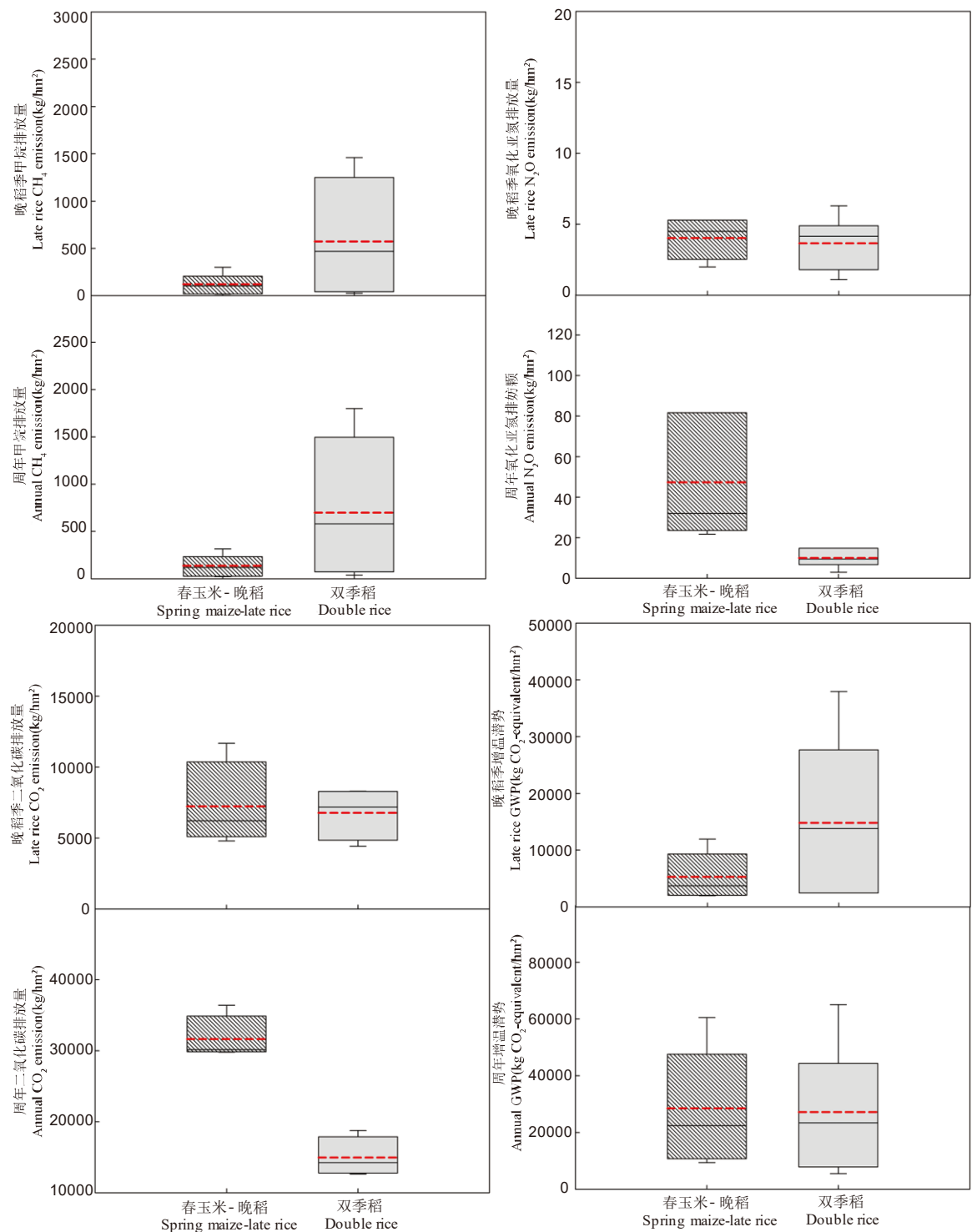


图3 春玉米-晚稻和双季稻模式下晚稻季及周年的CH₄、N₂O、CO₂排放量以及增温潜势的比较^[17, 34, 42, 48, 52]

Fig. 3. Comparison of CH₄ emission, N₂O emission, CO₂ emission, and global warming potential of late rice season and the whole year between spring maize-late rice and double cropping rice systems^[17, 34, 42, 48, 52]

体排放低、碳汇高的种植模式。

5 问题与展望

综上所述,春玉米-晚稻轮作模式通过土壤干湿

状态的季节性交替,使晚稻季的土壤容重增加、通气性提高,进而调控土壤微生物丰度和酶活,最终使土壤有机质含量降低。在南方地区,与双季稻模式相比,春玉米-晚稻模式的周年产量平均提高 3.29 t/hm²、增产 22.3%,使晚稻季产量平均增加 0.85

t/hm², 平均增产幅度为 12.0%。春玉米-晚稻模式可以降低晚稻的氮肥施用量, 具有较高的氮肥吸收利用效率。与双季稻模式相比, 春玉米-晚稻模式显著提高了周年和晚稻季的光、温生产效率及水分利用率, 经济效益平均增加 5595.98 元/hm²。此外, 与双季稻模式相比, 春玉米-晚稻模式由于晚稻季 CH₄ 排放量降低, 使周年甲烷排放量也显著降低, 减少了碳足迹, 是一种温室气体排放低、碳汇高的种植模式。然而, 目前大部分研究主要集中于模式的表现研究, 对该模式周年的增产机理、产量潜力以及栽培调控还知之甚少。基于此, 我们提出了春玉米-晚稻模式研究中亟待解决的几大问题, 探讨了该模式的发展方向并加以展望。

5.1 春玉米-晚稻轮作模式的增产机理及产量潜力探究

春玉米与水稻轮作可以显著提高晚稻季的籽粒产量, 这在多个研究中均被归因于春玉米季提高了晚稻土壤中的养分有效性和养分利用率, 使晚稻季增产^[13]。然而, 土壤-养分-作物对水旱轮作的级联响应机制还未明确, 对植株根系构建、碳氮代谢等的影响尚不清楚。此外, 长期水旱轮作下, 土壤理化特性又将如何演变, 该变化在春玉米和晚稻的产量形成中又会扮演什么角色也有待进一步探究。目前, 针对春玉米-晚稻模式, 国外通过生长模型分析后认为玉米-水稻模式的生产潜力还有较大上升空间^[64, 65]。而在国内, 对于春玉米-晚稻模式的产量潜力评估及适宜种植区域模拟的研究鲜有报道。因此, 明确该模式的增产空间及限制增产的关键栽培因子, 能够为进一步优化生产管理措施、提高该模式的周年产量提供重要理论依据。

5.2 春玉米-晚稻轮作模式的品种选择及搭配

在春玉米-晚稻模式的高产栽培技术中, 适配的优良品种是关键^[66]。一般来说, 玉米应选择生育期在 120 d 以内, 且具有花后耐高温特性的品种, 晚稻应选用生育期在 125 d 内的优质品种。南方不同稻区的温光资源和生产水平存在差异, 如何根据当地的生产特点去匹配适宜的玉米和水稻品种或引入高附加值玉米品种以实现模式的高产高效, 亟需明确的指导方案。

5.3 春玉米-晚稻轮作模式下的秸秆处理与土壤耕作

作物秸秆含有丰富的碳、氮、磷和钾等, 秸秆还田可以提高土壤有机质含量, 并且还能够提高土壤微生物量(SMB)以及活性^[67], 从而促进作物生长、提高作物产量^[68, 69]。春玉米-晚稻模式中, 两季茬

口紧张, 玉米季秸秆量大、腐解时间短, 不利于水稻季秧苗移栽/直播, 而且玉米秸秆未充分腐解会使腐解次生物抑制水稻前期生长, 限制水稻季产量形成^[70]。鉴于此, 生产中农民经常直接将玉米季的秸秆焚烧或者直接废弃, 污染大、浪费多。因此, 模式中秸秆还田时的粉碎规格、方式以及与田块耕整配套等技术要点还需明确, 秸秆腐熟剂的添加、秸秆还田后肥料的适当减施以及秸秆还田对于土壤理化性质的影响也需要进一步探究。

5.4 春玉米-晚稻轮作模式对于气候变化的响应机制

未来全球气候变暖, 作物生产频繁遭遇高温、洪涝等非生物胁迫将会是大概率事件^[71]。相比于水稻/玉米单作模式, 春玉米-晚稻轮作模式下玉米季却易遭受渍害、水稻季易遭遇寒露风。此外, 7 月份高温、高湿, 玉米收获后不易干燥和存储, 易使玉米霉变产生黄曲霉素, 威胁食品安全。然而, 目前轮作模式对于气候变化的响应机制还不清楚, 各环境因子的变化对于两季作物生长、管理和贮存等方面的影响研究不多, 缺乏应对极端气候条件的栽培调控技术。解决上述问题, 有利于充分发挥春玉米-晚稻轮作模式的产量优势, 促进其可持续发展, 并为今后该模式的周年高产和稳产提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China [J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3-8.
- [2] Ray D K, Foley J A. Increasing global crop harvest frequency: Recent trends and future directions[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 44041-44050.
- [3] 戴景瑞. 我国玉米生产发展的前景及对策[J]. 作物杂志, 1998(5): 7-12.
Dai J R. Prospects and countermeasures of maize production development in China[J]. *Crops*, 1998(5): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- [4] 展茗, 赵明, 刘永忠, 徐尚忠. 湖北省玉米产需矛盾及提升玉米生产科技水平对策[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(4): 802-806.
Zhan M, Zhao M, Liu Y Z, Xu S Z. Enhance maize production technology, alleviate the contradiction between production and demands of maize in Hubei Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(4): 802-806. (in Chinese with English abstract)
- [5] 武兰芳, 朱文珊. 试论中国种植制度改革与发展[J]. 耕作与栽培, 1999(4): 2-5.

- Wu L F, Zhu W S. On the reform and development of planting system in China[J]. *Tillage and Cultivation*, 1999(4): 2-5.
- [6] 龚松玲, 曹培, 高珍珍, 李成伟, 刘章勇, 朱波. 种植模式对南方作物产量及资源利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2021(1): 68-73.
- Gong S L, Cao P, Gao Z Z, Li C W, Liu Z Y, Zhu B. Effects of cropping patterns on crop yield and resource utilization efficiency in Southern China [J]. *Crops*, 2021(1): 68-73. (in Chinese with English abstract)
- [7] 黄家达. 长江中游稻田不同复种模式产量、资源利用效率和碳足迹的差异及机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- Huang J D. Yield, resource use efficiency and carbon footprint of different crop rotation systems in the paddy field of middle reaches of Yangtze River, China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [8] 辛良杰, 李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 58-65.
- Xin L J, Li X B. Changes of multiple cropping in double cropping rice area of Southern China and its policy implications[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐华山, 李培德. 长江中下游双季稻发展面临的问题与建议[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(19): 72-73.
- Xu H S, Li P D. Problems and suggestions for the development of double-cropping rice in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(19): 72-73. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘建. 江苏沿江地区以春玉米为中心多元高效种植制度研究[J]. 中国农学通报, 2003(6): 105-109.
- Liu J. Study on multi-efficient planting system with spring maize as the center in Jiangsu region [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003(6): 105-109. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘建, 徐少安, 周根友, 沈锦根, 陆虎华. 沿江稻区多熟制春玉米两段覆膜种植技术[J]. 江苏农业学报, 2001(1): 13-18.
- Liu J, Xu S A, Zhou G Y, Shen J G, Lu H H. Cultivation techniques for multi-cropping spring maize with plastic film covered at two stages in paddy region along Yangtze River [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2001(1): 13-18. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 葛均筑, 徐莹, 王梦影, 曹凑贵, 翟中兵, 凌霄霞, 展茗, 赵明. 长江中游不同玉米种植模式产量及资源利用效率的比较研究[J]. 作物学报, 2015, 41(10): 1537-1547.
- Li S Y, Tian S Y, Yuan G Y, Ge J Z, Xu Y, Wang M Y, Cao C G, Zhai Z B, Ling X X, Zhan M, Zhao M. Comparison of yield and resource utilization efficiency among different maize and rice cropping systems in Middle Reaches of Yangtze River [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(10): 1537-1547. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李小勇. 南方稻田春玉米-晚稻种植模式资源利用效率及生产力优势研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- Li X Y. Study on Resource use efficiency and Relative advantage of Productivity in Spring maize-late rice planting model on South China paddy field [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姜振辉. 稻田春玉米-晚稻轮作模式对土壤碳氮转化的影响效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Jiang Z H. Effect of spring maize-late rice rotation on the transformation of soil carbon and nitrogen in the paddy field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [15] 袁国印. 玉米栽培系统中的磷肥在茬间的配置研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- Yuan G Y. Investigation on distribution of phosphate between crops in maize-rice system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩玉玲. 玉米轮作下秸秆全量还田对土壤培肥及钾肥减施效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- Han Y L. Effects of straw return on soil fertility and potassium fertilizer reduction in maize-rice cropping system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [17] 展茗, 赵明, 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 葛均筑, 翟中兵, 凌霄霞. 长江中游玉米多熟制模式创新及效应分析[C]//中国作物学会. 作物多熟种植与国家粮油安全高峰论坛论文集. 湖南长沙: 中国作物学会, 2015: 12.
- Zhan M, Zhao M, Li S Y, Li S Y, Tian S Y, Yuan G Y, Ge J Z, Zhai Z B, Ling X X. Model innovation and effect analysis of maize multi-cropping in middle reaches of Yangtze River [C]//China Crop Society. Proceedings of the Summit Forum on Crop Multi-cropping and National Grain and Oil Security. Changsha, Hunan: China Crop Society, 2015: 12.
- [18] 陈印军, 王琦琪, 向雁. 我国玉米生产地位、优势与自给率分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 7-16.
- Chen Y J, Wang Q Q, Xiang Y. Analysis on the status, superiority and self-sufficiency ratio of maize in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(1): 7-16. (in Chinese with English abstract)
- [19] 石德权, 郭庆法, 汪黎明, 孟昭东, 温义昌, 郭珍. 我国玉米品质现状、问题及发展优质食用玉米对策[J]. 玉米科学, 2001(2): 3-7.
- Shi D Q, Guo Q F, Wang L M, Meng Z D, Wen Y C, Guo Z. The situation of maize quality and development priority of high quality food maize in China [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2001(2): 3-7. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张奥妮, 曾庆平, 田丰, 罗红兵, 刘松芹, 邓敏.

- 1997-2020 年中国玉米种植面积与产量变化分析[J]. 作物研究, 2024, 38(4): 329-333.
- Zhang A N, Zeng Q P, Tian F, Luo H B, Liu S Q, Deng M. Analysis on the changes of maize sown area and yield in China from 1997 to 2020 [J]. *Crop Research*, 2024, 38(4): 329-333. (in Chinese with English abstract)
- [21] 湖北省统计局, 国家统计局湖北调查总队. 湖北省 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2024-03-26][2024-12-20], https://media.hubei.gov.cn/zyxmt/push/weixin/202403/t20240327_5135870.shtml.
- [22] Agus F, Andrade J F, Edreira J I R, Deng N, Purwantomo D K G, Agustiani N, Aristya V E, Batubara S F, Herniwati, Hosang E Y. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia [J]. *Field Crops Research*, 2019, 237: 12-22.
- [23] Ali M Y, Waddington S R, Timsina J, Hodson D P, Dixon J. Maize-rice cropping systems in Bangladesh: Status and research needs [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008, 3: 16.
- [24] Breidenbach B, Blaser M B, Klose M, Conrad R. Crop rotation of flooded rice with upland maize impacts the resident and active methanogenic microbial community [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(9): 2868-2885.
- [25] Breidenbach B, Brenzinger K, Brandt F B, Blaser M B, Conrad R. The effect of crop rotation between wetland rice and up land maize on the microbial communities associated with roots [J]. *Plant and Soil*, 2017, 419: 435-445.
- [26] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Save and grow in practice: Maize, rice, wheat: A guide to sustainable cereal production[R]. [2016-01-18]. <http://www.fao.org/publications/save-and-grow/maize-rice-wheat/en/>.
- [27] Osmond C B, Winter K, Ziegler H. Functional significance of different pathways of CO₂ fixation in photosynthesis[M]//Lange O L, Nobel P S, Osmond C B. Encyclopedia of Plant Physiology. Berlin: Springer Verlag, 1982, 12B: 479-547.
- [28] Jat M L, Chakraborty D, Ladha J K, Rana D S, Gathala M L, McDonald A, Gerard B. Conservation agriculture for sustainable intensification in South Asia [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 336-343.
- [29] 赵强基, 郑建初, 卞新民, 李萍萍, 章熙谷. 中国南方稻区玉米-稻种植模式的建立和实践[J]. 江苏农业学报, 1997(4): 25-29.
- Zhao Q J, Zheng J C, Bian X M, Li P P, Zhang X G. Establishment and practice on maize-rice cropping model in paddy area of Southern China [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1997(4): 25-29. (in Chinese with English abstract)
- [30] Jiang Z H, Cui H, Lin J D, Mo C Y, Liu Y Z, Li Y F, Yang J P. In corporation of spring maize into paddy fields increased nitrogen up take in late rice by enhancing soil nitrogen supply: Field ¹⁵N tracer studies [J]. *Field Crops Research*, 2023, 299: 108990.
- [31] Sun M, Zhan M, Zhao M, Tang L L, Qin M G, Cao C G, Cai M L, Jiang Y, Liu Z H. Maize and rice double cropping benefits carbon footprint and soil carbon budget in paddy field [J]. *Field Crops Research*, 2019, 243: 107620.
- [32] Reeves TG, Thomas G, Ramsay G. Save and grow in practice: maize, rice, wheat. A guide to sustainable real production. FAO, 2016.
- [33] 王子芳, 高明, 秦建成, 慈恩. 稻田长期水旱轮作对土壤肥力的影响研究[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2003: 514-517+521.
- Wang Z F, Gao M, Qin J C, Ci E. Effect of long-term paddy-upland rotation on soil fertility of paddy fields[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2003: 514-517+521. (in Chinese with English abstract)
- [34] 孙梦. 玉-稻水旱轮作与双季稻温室气体排放及土壤理化特性差异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- Sun M. Study on the difference in soil greenhouse gases emission and soil physicochemical properties between maize-rice rotation and double rice cropping patterns [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [35] 朱治国. 不同种植模式对土壤理化性质、产量和养分利用效率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- Zhu ZG. Effects of different planting patterns on soil physicochemical properties, yield and nutrient use efficiency [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [36] Dong J, Shao F, Zhang L, Jiang C, Zu C. Effects of tillage patterns on physical and chemical properties of paddy soils and economic efficiency [J]. *Soils*, 2015, 47: 509-514.
- [37] Han Y, Ma W, Zhou B, Yang X, Salah A, Li C, Cao C, Zhan M, Zhao M. Effects of straw-return method for the maize-rice rotation system on soil properties and crop yields [J]. *Agronomy*, 2020, 10: 461.
- [38] Witt C, Cassman K G, Olk D C, Biker U, Liboon S P, Samson M I, Ottow J C G. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems [J]. *Plant Soil*, 2000, 225: 263-278.
- [39] Huang G Q, Wang S B. Improving soil fertility through rice-wheat rotation in subtropical China: A meta-analysis [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(4): 2567-2578.
- [40] Yadav R L, Dwivedi B S, Pandey P S. Rice-wheat cropping system: Assessment of sustainability under green manuring and chemical fertilizer inputs [J]. *Field Crops Research*, 2000, 65(1): 15-30.
- [41] 方雪东. 玉-稻与双季稻系统前季作物源碳对土壤有机碳贡献的差异[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- Fang X D. Comparison of contribution of previous

- crop-derived carbon to soil organic carbon [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [42] 秦明广. 玉-稻与双季稻系统土壤有机碳变化与氮吸收利用的差异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- Qin M G. Study on Difference of soil organic carbon and nitrogen utilization between maize-rice rotation and double rice cropping system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [43] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 王慧一, 焦浩, 隋海霞. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 171-178.
- Bian X L, Zhao W L, Yue Z H, Wang H Y, Jiao H, Sui H X. Research process of soil enzymes effect on carbon and nitrogen cycle in agricultural ecosystem [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(4): 171-178. (in Chinese with English abstract)
- [44] 张英英, 蔡立群, 武均, 齐鹏, 罗珠珠, 张仁陟. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 1-7.
- Zhang Y Y, Cai L Q, Wu J, Qi P, Luo Z Z, Zhang R Z. The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [45] 高明, 周保同, 魏朝富, 谢德体, 张磊. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. 应用生态学报, 2004(7): 1177-1181.
- Gao M, Zhou B T, Wei C F, Xie D T, Zhang L. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(7): 1177-1181. (in Chinese with English abstract)
- [46] 吴杨潇影. 种植模式及氮肥分配对稻田根际与非根际土壤氮素及微生物影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Wu Y X Y. Effects of planting pattern and nitrogen distribution on rhizosphere and non-rhizosphere soil nitrogen and microorganisms in rice field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [47] 范明生, 江荣风, 张福锁, 吕世华, 刘学军. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424-432.
- Fan M S, Jiang R F, Zhang F S, Lü S H, Liu X J. Nutrient management strategy of paddy rice-upland crop rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 424-432. (in Chinese with English abstract)
- [48] 田少阳. 玉稻系统温室气体排放及土壤碳收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Tian S Y. Study on greenhouse gases emissions and soil carbon budget in maize and rice rotation field [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [49] 房康睿, 龙世平, 彭斯文, 陈山, 廖育林, 徐新朋, 赵士诚, 仇少君, 何萍, 周卫. 洞庭湖区典型稻田玉米水稻轮作下土壤-作物系统对施氮措施的响应[J]. 中国农业科学, 2024, 57(10): 1979-1994.
- Fang K R, Long S P, Peng S W, Chen S, Liao Y L, Xu X P, Zhao S C, Qiu S J, He P, Zhou W. Response of soil-crop system to different nitrogen fertilization practices under maize and rice cropping system in the paddy soil of Dongting Lake Plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(10): 1979-1994. (in Chinese with English abstract)
- [50] 晏娟, 沈其荣, 尹斌. 施氮量对氮高效水稻种质 4007 的氮素吸收、转运和利用的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 107-114.
- Yan J, Shen Q R, Yin B. Effects of nitrogen application rate on uptake, translocation and use of nitrogen by rice germplasm 4007 high in nitrogen use efficiency [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [51] 袁国印, 何俊欧, 陈文, 王丹, 葛均筑, 李萍, 展茗, 赵明. 前季施肥对玉-稻轮作养分吸收及土壤养分表现平衡的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(7): 1-7.
- Yuan G Y, He J O, Chen W, Wang D, Ge J Z, Li P, Zhan M, Zhao M. Fertilization in maize season: Effects on nutrient uptake and soil nutrient apparent balance in maize-rice rotation system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(7): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [52] 夏飞. 长江中游不同种植模式产量、资源利用效率及环境代价的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- Xia F. Study on yield, resource utilization efficiency and environmental cost of different planting patterns in the middle reaches of Yangtze River [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [53] 李淑娅. 长江中游不同玉稻种植模式产量形成及资源利用效率比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Li S Y. Comparative studies on yield formation and resource use efficiency of different maize and rice cropping systems in middle reaches of Yangtze River [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [54] 姜振辉, 杨旭, 刘益珍, 林景东, 吴杨潇影, 杨京平. 春玉米-晚稻与早稻-晚稻种植模式碳足迹比较[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8091-8099.
- Jiang Z H, Yang X, Liu Y Z, Lin J D, Wu Y X Y, Yang J P. Comparison of carbon footprint between spring maize-late rice and early rice-late rice cropping system

- [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 8091-8099. (in Chinese with English abstract)
- [55] 雷恩. 高产栽培条件下春玉米-晚稻种植模式产量及经济效益研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- Lei E. Studies on the yield and economic benefits of cropping system of spring maize-late rice under high yielding cultivation conditions[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [56] 吴泽军. 关于发展玉米生产的建议[J]. 粮食经济与科技, 1994(4): 29-30.
- Wu Z J. Suggestions for developing maize production [J]. *Food Science and Technology and Economy*, 1994(4): 29-30. (in Chinese)
- [57] Smith P, Gary L, Wernerl K, Nina B, Werner E, Marc A. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(3): 302-315.
- [58] 颜晓元, 蔡祖聪. 水稻土中 CH_4 氧化的研究[J]. 应用生态学报, 1997(6): 589-594.
- Yan X Y, Cai Z C. Methane oxidation in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997(6): 589-594. (in Chinese with English abstract)
- [59] Wassmann R, Buendia L V, Lantin R S, Bueno C S, Neue H U. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Baños, Philippines[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1): 107-119.
- [60] Weller S, Kraus D, Ayag K R P, Wassmann R, Alberto M C R, Butterbach-Bahl K, Kiese R. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101: 37-53.
- [61] Hillier J, Hawes C, Squire G, Hilton A, Wale S, Smith P. The carbon footprints of food crop production[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7(2): 107-118.
- [62] Jiang Z, Lin J, Liu Y, Yang J. Double paddy rice conversion to maize-paddy rice reduces carbon footprint and enhances net carbon sink [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120643.
- [63] 李心雨, 邓姣, 朱杰, 李成伟, 蒋梦蝶, 刘章勇, 聂江文, 朱波. 秸秆还田和种植制度对长江中游稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(8): 1915-1927.
- Li X Y, Deng J, Zhu J, Li C W, Jiang M D, Liu Z Y, Nie J W, Zhu B. Interaction effects of straw returning and cropping systems on greenhouse gas emissions in rice fields in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(8): 1915-1927. (in Chinese with English abstract)
- [64] Timsina J, Jat M L, Majumdar K. Rice-maize systems of South Asia: Current status, future prospects and research priorities for nutrient management[J]. *Plant Soil*, 2010, 335: 65-82.
- [65] Timsina J, Buresh R J, Dobermann A, Dixon J. Rice-maize systems in Asia: Current situation and potential [M]. Philippines: International Rice Research Institute and International Maize and Wheat Improvement Centre, 2011: 232.
- [66] 刘志辉, 潘高峰, 陈文, 秦明广, 曹凑贵, 常昌龙, 展茗. 品种搭配对湖北省玉米-晚稻复种产量及资源效率的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(12): 1945-1957.
- Liu Z H, Pan G F, Chen W, Qin M G, Cao C G, Chang C L, Zhan M. Effects of varieties collocation between crop seasons on the yield and resource use efficiency of maize-late rice cropping in Hubei Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(12): 1945-1957. (in Chinese with English abstract)
- [67] 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 辜运富, 张先琴, 张小平. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5210-5218.
- Liu X Q, Tu S H, Sun X F, Gu Y F, Zhang X Q, Zhang X P. Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5210-5218. (in Chinese with English abstract)
- [68] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M. Changes in long-term no-till corn growth and yield under different rates of stover mulch[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 1128-1136.
- [69] 潘高峰. 玉-稻轮作系统晚稻育秧栽插方式及玉米秸秆还田效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- Pan G F. Research on the effects of late rice seedlings nursing methods and maize straw return in the maize-rice rotation system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [70] 盛海君, 牛东, 孙光佑, 孙凯文, 朱新开. 秸秆直接还田对土壤微生物、理化特性和酶活性的影响研究进展[J]. 土壤科学, 2016, 4(2): 19-26.
- Sheng H J, Niu D, Sun G Y, Sun K W, Zhu X K. Research progress of effect of direct straw returning on soil microorganism, physical and chemical characteristics and enzyme activities [J]. *Hans Journal of Soil Science*, 2016, 4(2): 19-26. (in Chinese with English abstract)
- [71] Teixeira E I, Fischer G, Velthuisen V H, Walter C, Ewert F. Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 206-215.