

DOI: 10.11766/trxb201907170371

宋开付, 张广斌, 徐华, 马静. 中国再生稻种植的影响因素及可持续性研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1365–1377.

SONG Kaifu, ZHANG Guangbin, XU Hua, MA Jing. A Review of Research on Influencing Factors and Sustainability of Ratoon Rice Cultivation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1365–1377.

中国再生稻种植的影响因素及可持续性研究进展*

宋开付^{1,2}, 张广斌¹, 徐华¹, 马静^{1†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 再生稻作为一种特殊的水稻耕作模式, 种一茬可收获两次, 对增加粮食产量、保障国家粮食安全和提高稻田综合效益有重大意义。综述了中国再生稻的发展趋势, 分析了再生稻种植的关键影响因子, 阐释了再生稻高产栽培技术, 提出在种好头季稻的前提下, 适当高留桩, 在头季稻齐穗后 15 d 施用尿素 150 kg·hm⁻² 作为促芽肥, 头季稻收割后 3 d 施用尿素 150 kg·hm⁻² 作为发苗肥, 同时配施磷钾肥, 可在保证土壤养分平衡的基础上使再生稻获得高产, 最后讨论了当前存在的问题及今后发展的方向, 认为未来的研究需重点关注再生稻产业化、土壤养分管理、高产栽培技术、稻米品质、温室气体和水体质量, 以促进再生稻的发展并为国内同行的研究提供参考与借鉴。

关键词: 再生稻; 栽培技术; 留桩高度; 产量

中图分类号: S551 **文献标志码:** A

A Review of Research on Influencing Factors and Sustainability of Ratoon Rice Cultivation in China

SONG Kaifu^{1,2}, ZHANG Guangbin¹, XU Hua¹, MA Jing^{1†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a special rice cultivation mode, ratoon rice, once planted and harvested twice, is of great significance for increasing grain yield, ensuring national food security and improving rice field utilization efficiency. This paper reviewed development trends of ratoon rice cultivation in China, analyzed their key affecting factors, elucidated high-yield cultivation techniques, and proposed that under the premise of a good first crop, 150 kg·hm⁻² of urea be applied as sprout fertilizer 15 days after the heading stage of the first season rice, rice stubbles of a proper height be retained in harvesting, and another 150 kg·hm⁻² of urea coupled with P and K fertilizers be applied as seedling prompting fertilizer 3 days after harvesting of the first season rice to ensure balance of soil nutrients for higher yield. In the end, current problems and future directions were discussed. It is considered that researches in future should focus on issues, like industrialization, soil nutrient management, and high yield cultivation techniques for ratoon

* 国家自然科学基金项目(41671241)和中国科学院南京土壤研究所领域前沿项目(ISSASIP1652, ISSASIP1654)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671241) and the Knowledge Innovation Program of Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (Nos. ISSASIP1652 and ISSASIP1654)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jma@issas.ac.cn

作者简介: 宋开付(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事稻田温室气体减排及对策研究。E-mail: songkaifu@issas.ac.cn

收稿日期: 2019-7-17; 收到修改稿日期: 2019-12-11; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2020-01-15

rice cultivation, quality of ratoon rice, greenhouse gases and water quality in ratoon paddy fields to promote development of ratoon rice cultivation and provide reference for domestic peers in their research.

Key words: Ratoon rice; Cultivation techniques; Stubble height; Grain yield

再生稻是在单季稻的基础上发展起来的, 利用头季稻收割后稻桩上存活的休眠芽, 在适宜的水、温度、光照和养分等条件下重新发苗, 萌发再生蘖, 进而抽穗成熟, 再收一季^[1]。再生稻作为晚秋作物, 具有生育期短、日产量高、米质优、省种、省工、节水、调节劳力、生产成本低和经济效益高等优点, 对于我国南方种植一季稻热量有余而种植双季稻热量又不足的稻麦两熟区, 或双季稻区仅种一季中稻的稻田, 是提高复种指数、增加单位面积稻谷产量和经济收入的主要措施之一^[1]。发展再生稻对适应农业结构调整、增加粮食产量、提高农民收入和保障我国粮食安全具有重要意义。

1 中国再生稻的发展趋势

我国最早有关再生稻的记载可以追溯到 1 700 多年前西晋·郭义恭著《广志》一书: “南方有盖下白稻, 正月种, 五月收, 获讫, 其茎根复生, 九月熟。” 此后, 史书对再生稻的记载一直未间断, 东晋·张湛《养生要集》、北宋·乐史《太平寰宇记》、明·徐光启《农政全书》均有对再生稻的相关记载。这表明在古代农民已经开始利用再生稻, 且对其种植收割方式、生长规律等方面有了粗浅的认识, 当时农民称之为“秧孙谷”或“抱孙谷”。到了宋代, 再生稻在长江流域的江苏、浙江、安徽、江西、四川等地均有所种植, 明清时期再生稻的种植面积继续扩大, 发展到了云贵高原^[2]。早在 20 世纪 30 年代, 杨开渠就开始了再生稻的研究, 是中国乃至世界上最早对再生稻进行全面和深入研究的科学家, 他利用高秆籼稻品种水白条和小南粘为材料, 研究了休眠芽的生长与幼穗分化进程、头季稻播种量、每穴栽插苗数、成熟期、留桩高度等方面及其与再生稻产量和再生稻品种间重要性状的相关性等, 为我国近代再生稻的研究奠定了基础^[1, 3]。

历史上我国南方的再生稻受水稻品种和栽培技术的限制, 多以小面积种植、零星分布为主, 主要

作为头季稻欠收的补救措施, 未能形成再生稻集中产区和稳定的稻田耕作制度, 生产发展缓慢。1980 年以后, 杂交水稻的培育成功与利用, 特别是以汕优 63 和汕优 2 号等穗数型为代表的一批具有强再生力品种的育成, 促进了再生稻的进步与发展, 川东南地区再生稻面积达 $3.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 超过了美国墨西哥湾沿岸 $1.1 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 再生稻区, 成为当时世界上面积最大的再生稻集中产区^[4]。在国家的鼓励与支持下, 1990—1993 年, 我国再生稻累计收获面积达到 $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 两季总产达 $3.2 \times 10^6 \text{ t}$ ^[4]。21 世纪以来, 我国南方单季稻作区适宜种植再生稻的面积约为 $3.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 主要分布于四川、重庆和福建等地^[5]。其中, 四川省再生稻种植面积最大, 约为 $2.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 两季总产量约为 $10.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (头季 $8.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、再生季 $2.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$); 重庆每年再生稻收获面积 $7.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 再生季产量略低于四川; 福建省的再生稻面积不算大 (约为 $4.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$), 但是产量水平居全国最高, 两季总产可高达 $17.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (头季 $9.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、再生季 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[5-6]。近几年, 湖北、湖南、江西、广西、云南等地的部分地区也相继恢复和发展了再生稻, 湖北省再生稻发展迅猛, 推广种植面积约为 $4.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 机收头季和人工收割再生季的平均产量分别达 5.2 和 $6.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[7-8]。

2 再生稻种植的关键因子

2.1 生育期积温与光热条件

热量是决定再生稻能否种植的主要气候因素。据方文等^[9]研究, 从头季稻播种到再生稻齐穗的积温需达到 $4\ 015 \sim 4\ 270 \text{ }^\circ\text{C}$ 。李实贵等^[10]研究表明: 在海拔 350 m 以下, 9 月上旬均温大于等于 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、中旬大于等于 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 、下旬大于等于 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ 才能保证再生稻安全生长。不同地区和不同的水稻品种对光热条件的要求各异, 适宜再生稻种植的气候区划也不同 (表 1)。以四川省为例, 研究发现, 海拔高度与头季稻收割后 30 d 积温呈显著负相关; 当海拔高度在 230~350 m 且头季稻收割后 30 d 积温在 $740 \sim$

780℃之间时，再生稻单产最高^[9]。影响再生稻生长发育的最重要指标是 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温^[11]，从表 1 中可以看出，云南省适宜种植再生稻区域的 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温最高，最高积温为 6 500℃，江西省早熟再生稻区域 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温较低。

再生稻齐穗、扬花和结实对气温变化十分敏感，

开花期的日均温仅有在 22℃以上才能顺利完成受精过程，保证再生稻高产稳产^[10]。巴西陆稻再生稻安全齐穗期的日均温要求大于等于 20℃，温度大于等于 10℃初日到大于等于 20℃终日之间持续的天数和大于 10℃的活动积温是衡量当地能否种植巴西陆稻的重要热量指标之一^[12]。

表 1 适宜再生稻种植的气候区划

Table 1 Climate zoning for ratoon rice cultivation

再生稻种植区	代表省份	热量指标	不同区域积温	参考文献
Ratoon rice growing area	Representative province	Heat index/°C	Accumulated temperature/°C	Reference
西南再生稻区	贵州省	≥ 10	最适宜区 ^① 4 500~5 000	[13]
Southwest China	Guizhou Province		适宜区 ^② 4 000~4 500	
			次适宜区 ^③ 3 800~4 000	
	云南省	≥ 10	最适宜区 ^① 6 500	[14]
	Yunnan Province		适宜区 ^② 5 500~6 500	
			次适宜区 ^③ 5 200~5 500	
华南再生稻区	广西省	≥ 10	$\geq 4 650$	[12]
South China	Guangxi Province			
华东南再生稻区	福建省	两季总积温 ^⑦	$\geq 4 800$	[15]
Southeast China	Fujian Province			
	江西省	10~20	早熟 ^④ 3 765~4 400	[16]
	Jiangxi Province		中熟 ^⑤ 4 400~4 700	
			迟熟 ^⑥ $\geq 4 700$	
华中再生稻区	河南省	≥ 10	5 022	[17]
Central China	Henan Province			
	湖北省	≥ 10	适宜区 ^② 5 100~5 400	[11]
	Hubei Province		次适宜区 ^③ 4 900~5 100	
华东再生稻区	安徽省	≥ 10	适宜区 ^② 4 800~5 300	[18]
East China	Anhui Province		次适宜区 ^③ 4 700	

① The most suitable region, ② Suitable region, ③ Fairly suitable region, ④ Rice of early maturation, ⑤ Rice of middle maturation, ⑥ Rice of late maturation, ⑦ Total accumulated temperature of two seasons

影响再生稻生长发育和产量形成的主要生态因素为：日均温、日照时间、降水量、生长期积温和海拔高度等。熊洪和方文^[19]研究表明：再生稻产量与日均温、日照时数、日射呈显著相关，通过途径分析得出它们对再生稻产量的直接效应由大到小依次为日均温、日照时数、日降水量和日射量，间接效应由大到小依次为日射量、日照时数、日降水量和日均温；水稻抽穗灌浆期日均温高、日射强、日

照时间长，促进干物质积累、提高结实率；日降水量与产量呈微弱负相关（ $r=-0.247$ ），而降水日数与产量呈显著负相关（ $r=-0.823$ ），降水量大小代表降水日数的多少，降水日数较多，则光照减少、温度降低、光合作用减弱，进而影响再生稻产量。

再生稻千粒重受温光条件的影响。水稻产量三分之二来源于抽穗开花后的光合产物，而光合产物量取决于水稻后期绿叶面积与气象条件。方文等^[20]

分析再生稻抽穗扬花期到成熟期温光条件与千粒重的关系得出,日照时数和日均温与千粒重的相关系数分别为 $r=0.826$ 和 $r=0.894$,呈显著正相关。再生稻千粒重仅为头季稻的85%~90%,这与其齐穗期的绿叶面积为头季稻的50%~60%、灌浆期气温下降快、雨水多和日照少关系密切^[20]。将再生稻抽穗灌浆期安排在日照时间长、降水量少和气温较高的天气条件下,有利于提高光合作用、促进干物质积累、增加千粒重,从而提高再生稻产量。

2.2 再生能力强的品种选育

选育出优良的再生稻品种是再生稻培植的基础。不同水稻品种再生力差异很大,生产上应选用丰产性好、再生力强、抗逆性强、生育期适宜、抗病虫害能力较强的再生稻品种。早在20世纪70年代就有科研工作者对再生稻品种进行鉴定选育,发现在近千个再生稻品种中,矮秆品种的10%具有中等再生力,1%左右具有较强的再生力^[21]。胡慧英和赵式英^[22]对400多个品种进行研究,结果表明:再生稻株高、穗长、每穗实粒数、千粒重分别与头季稻株高、穗长、每穗实粒数、千粒重显著相关,水稻的茎秆粗细及茎壁厚度与再生力无关。徐富贤和熊洪^[23-24]研究了品种间着粒数和粒叶比与再生力的关系,结果表明:二者均与再生力呈显著负相关,原因在于粒叶比与单位颖花绿叶面积呈负相关,即粒叶比小,单位颖花绿叶面积占有量大,使头季稻收割时母茎鞘中积累更多的干物质,为再生芽的生长创造了有利的条件。将头季稻品种间着粒数作为评价再生力的重要指标,可操作性强。

据报道^[1, 25],再生稻的产量在 $1.5\sim 8.4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。Turner和Jund^[26]研究指出,再生稻产量与头季稻收割后茎、叶中的总非结构性碳水化合物呈正相关。当前我国水稻生产的新形势下,除了需选育出头季再生力强、产量高的水稻品种,抗逆、抗病和优质特性也成为育种专家不断追求的目标。再生稻头季移栽后的返青期易受到坐蔸低温的影响,7月下旬抽穗扬花期常遭遇高温热害,影响千粒重和结实率,再生季的齐穗期(9月中下旬)较迟,寒露风也会影响空壳率,从而影响再生季水稻产量。稻瘟病、纹枯病和稻飞虱等水稻易发病虫害问题尚未解决。

再生稻再生季的米质好于头季稻^[27-29]。郑萃立

等^[27]及杜登科和刘会桃^[28]研究表明:再生稻再生季精米率、直链淀粉含量和垩白度等指标优于头季稻。调整育种思路,以优质稻谷国家三级标准为准则,通过加强品种再生力的基因测定和标记,对分子育种和再生力的遗传规律进行深入研究,加快再生稻育种进程,在提高产量的同时,筛选出再生力强、特定生育期的耐热性和耐寒性强、抗病虫害、米质优的再生稻品种,更加有利于促进再生稻的进一步发展。

3 再生稻高产栽培技术

3.1 种好头季稻

种好头季稻是再生稻获得高产的前提。适时早播、早栽头季稻不但可以延长头季稻和再生稻的营养生长期,积累更多的干物质,进而大幅提高再生稻产量,还能使再生稻抽穗灌浆期免受低温冷害的影响^[30-32]。头季稻最佳栽插密度应保持在每公顷 $21.84\sim 26.76$ 万穴^[33]。根据品种生育特性和当地所处的气候条件,协调N、P、K比例,合理施肥,原则上重施底肥,早施蘖肥,巧施穗肥,底肥约占总肥料用量的60%~70%;中期适度烤田,控制无效分蘖,改善光照条件和群体结构,后期湿润灌溉,增强根系活力。整个生育期均要注意病虫害的防治,特别注重防治纹枯病、稻瘟病和稻飞虱等^[34]。

头季稻收割的早迟不仅与头季稻产量高低直接相关,还影响再生稻的发苗率及能否安全抽穗开花^[35]。有关头季稻收割期的研究较多,但结果不一。白宗绪^[36]认为九成黄熟时收割最佳。黄世聪等^[37]主张全田成熟度达九成至九五成黄熟收割较为合适。苗昌泽^[38]认为过早收割,头季稻因籽粒成熟不足影响高产,过迟收割影响再生稻安全齐穗,以九五成黄熟为标准。吕泽林等^[33]、罗文质^[39]及熊洪等^[40]提出头季稻十成黄收割,再生稻发苗数和有效穗多,两季总产量高。蒋彭炎^[41]认为收割时的成熟度越高,茎鞘中积累的碳水化合物含量越多,再生力越强。熊洪等^[42]研究表明:休眠芽开始破鞘现青时收割头季稻是最适宜收割期,较之以籽粒成熟度确定头季稻收割期更为方便和准确,还可以缓解高温伏旱对再生稻发苗的影响,以实现多穗高产。作者认为在田间观测到再生芽伸出叶鞘时为头季稻的最佳收割

期，利用再生芽长度与再生芽破鞘的数量关系可知此时再生芽已达 6~9 cm^[43]，绝大部分可发苗成穗。

3.2 适高留桩

头季稻留桩高度是关系再生稻能否培植成功的一项关键措施，也是影响再生稻高产的重要因素。不同的杂交组合水稻品种、生态或海拔地区、头季稻高低及节位离地面的高度决定了头季稻的留桩高度^[44]。在一定范围内适当高留桩，可缩短再生稻生育期，增加再生苗和有效穗，提高再生稻产量^[45-50]。也有研究表明，低留桩处理更有利于再生稻的高产，这是因为随着留桩高度的降低，再生稻比叶重和粒叶比提高，进而增加产量^[51-53]。张桂莲和屠乃美^[54]提出，现使用的再生稻品种多属于上位芽再生型，总体表现趋势是再生稻产量随留桩高度的增加而提高。生产上，一般早、中熟品种留桩高度不低于 20 cm，中、迟中熟品种应不低于 30 cm。

多数研究认为，留桩高度对再生稻生育期有显著的影响。随着留桩高度的降低，再生稻生育期逐渐延长^[55-57]。与留桩 30 cm 相比，留桩 15 cm

再生稻生育期延长 4~6 d；留桩 10 cm 较 40 cm 处理再生稻生育期延长 8~14 d^[58]。如果后期积温不够，低留桩再生稻的安全齐穗可能会受影响，因此，不建议在生产实践中采取低留桩^[59]。再生稻休眠芽发生率受留桩高度的影响。研究^[48]发现，在一定范围内，随着留桩高度的增加，留茬节位的增多，低节位休眠芽发生率逐渐减小，高节位休眠芽发生率逐渐增多，品种间趋势一致，可能原因是茎秆上部休眠芽对下部休眠芽的营养抑制作用。综上，在适当的范围内增加留桩高度有利于缩短再生稻的生育期，增加再生稻产量，具有更普适性的意义。

3.3 土壤养分管理

化学肥料的施用是耕作土壤养分的重要来源，也是再生稻高产的关键措施。人们通常通过提高施肥量的方法来加强土壤养分管理。与磷、钾肥相比，施用氮肥对促进再生稻高产的效果更加显著，因此，对再生稻促芽肥和发苗肥的施用时间和施用量的研究较多（表 2）。

表 2 再生稻促芽肥和发苗肥的施用时间、施用量及再生季产量

Table 2 Timing and rate of application of sprouting and seedling promoting fertilizer for ratoon rice and yield of the ratoon rice season

地点 Site	供试水稻品种 Tested rice variety	促芽肥 Sprout fertilizer		发苗肥 Seedling promoting fertilizer		再生季产量 Yield of ratoon season/ (t·hm ⁻²)	参考文献 Reference
		施用时间 Application time	施用量 Application rate/ (kg·hm ⁻² Urea)	施用时间 Application time	施用量 Application rate/ (kg·hm ⁻² Urea)		
四川自贡 Zigong, Sichuan	冈优 725、II 优 7 号 Gangyou725, II you No.7	头季稻齐穗 后 5 天 ^① 、 头季稻齐穗 后 10 天 ^②	300	—	—	3.16~3.30	[33]
重庆 永川 Yongchuan, Chongqing	矮优 2 号 Aiyou No.2	头季稻齐穗 后 17 天 ^③	150 300	—	—	2.83~2.98	[60]
江苏扬州 Yangzhou, Jiangsu	庆莲 16、盐粳 504、广陆 矮 4 号等 Qinglian 16, Yanxian 504, Guangluai No.4 et al	头季稻收割 前 7 天 ^④	187.75	—	—	1.58~5.10	[61]

续表

地点 Site	供试水稻品种 Tested rice variety	促芽肥		发苗肥		再生季产量 Yield of ratoon season/ (t·hm ⁻²)	参考文献 Reference
		Sprout fertilizer		Seedling promoting fertilizer			
		施用时间	施用量	施用时间	施用量		
		Application time	Application rate/ (kg·hm ⁻² Urea)	Application time	Application rate/ (kg·hm ⁻² Urea)		
四川泸县 Luxian, Sichuan	—	头季稻齐穗 期 ^⑤	150	—	—	—	[62]
湖北蕲春 Qichun, Hubei	黄华占、天优华占 Huanghuazhan, Tianyouhuazhan	头季稻扬花 后 15~20 天 ^⑦	163	头季稻收割后 3 天 ^⑧	163	4.19~5.71	[63]
湖南湘潭 Xiangtan, Hunan	深两优 5814、隆两优华占 Shenliangyou 5814, Longliangyouhuazhan	头季稻收割 前 10 天 ^⑨	75	头季稻收割后 3 天 ^⑩	150	3.30~3.74	[64]
湖南衡东 Hengdong, Hunan	晶两优 534 Jingliangyou 534	头季稻收割 前 10~12 天 ^⑩	150	头季稻收割后 3 天 ^⑩	150	3.19	[65]
河南信阳 Xinyang, Henan	两优 6326 Liangyou 6326	头季稻齐穗 后 15 ^⑥	450	头季稻收割后 3 天 ^⑩	75	5.67	[66]
福建长汀 Changting, Fujian	晶两优华占 Jingliangyouhuazhan	头季稻收割 前 15 天 ^⑩	300~375	头季稻收割后 3 天 ^⑩	150	5.23~5.44	[67]

① Five days after the heading stage of the first rice season, ② Ten days after the heading stage of the first rice season, ③ Seventeen days after the heading stage of the first rice season, ④ Seven days before harvesting of the first rice season, ⑤ Heading stage of the first rice season, ⑥ Fifteen days after the heading stage of the first rice season, ⑦ Fifteen to twenty days after the flowering stage of the first rice season, ⑧ Three days after harvesting of the first rice season, ⑨ Ten days after harvesting of the first rice season, ⑩ Ten to twelve days after harvesting of the first rice season, ⑪ Fifteen days before harvesting of the first rice season

促芽肥施用的目的是促进再生稻休眠芽的萌发。吕泽林等^[33]认为,头季稻齐穗后 5~10 d 施用促芽肥再生季产量最高,较孙晓辉等^[60]研究的施用时间提前 12~17 d。凌启鸿和苏祖芳^[61]指出头季收割前 7 d 施用促芽肥再生季产量较高。头季稻齐穗后 10~15 d 是促芽肥的最佳施用期^[33-34, 62, 64, 66],水稻品种和地区气候因子的差异是造成促芽肥施用时间不同的主要原因。熊洪等^[1]认为要获得再生稻的高产,每公顷应施尿素 300 kg。促芽肥的施用量与头季稻着粒数有关,头季稻着粒数高(大于 160

粒)的大穗型品种要增加促芽肥施用量并提前施用,一般用量为每公顷施用尿素 150 kg^[62]。利用头季稻齐穗期剑叶 SPAD (Soil and Plant Analyzer Development, 土壤作物分析仪器开发,表示叶绿素含量)值预测再生稻促芽肥的需求量也是一种重要的确定施氮量的方法^[68]。

发苗肥施用的目的是改善再生稻株碳氮代谢,提高结实率和穗实粒数^[69]。大多数研究^[63-67]认为发苗肥的施用时间应在头季稻收割后 3 d 内,一般施用量为 150 kg·hm⁻² 尿素,可获得再生季高产(表 2)。

徐思忠^[70]研究指出，在再生季施氮总量（ $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，以 N 计）不变的前提下，促芽肥与发苗肥的比例为 5:5 时，氮素吸收利用率和产量最高。根据各地土壤肥力状况及生态气候条件制定出适宜的促芽肥和发苗肥施用时期及施用量方案有助于进一步提高再生稻产量。

然而，在大量施氮促进再生稻高产的同时却忽略了磷钾肥的施用，导致土壤养分失调，土壤磷钾含量相对短缺，氮含量相对盈余^[71]。应平衡施用氮磷钾肥提高再生稻产量和加强土壤养分管理。

3.4 科学用水

科学的水分管理对再生稻的再生芽萌发和幼穗分化具有重要意义。头季稻收割前结合促芽肥的施用灌一次水，自然落干后保持田间湿润状态至头季收割^[25]。在头季稻收割后及时进行浅水灌溉，有助于促进再生芽的萌发和再生苗的生长，齐穗后湿润灌溉至再生稻成熟^[37, 49]。

4 问题及展望

随着人口数量的日益增长，对粮食的需求也将不断增加。再生稻作为一种提高粮食产量和增加农民收入的重要耕作方式，在政府的鼓励和支持下，必将具有广阔的发展前景。农业农村部出台的《全国种植业调整规划（2016—2020 年）》中提出，应在我国西南地区发展再生稻，长江中下游地区、华南地区因地制宜发展再生稻。可是，再生稻种植的大面积推广也将引发一系列土壤、环境等科学问题。比如，为保证再生季有足够的水热资源以获得较高产量，头季插秧时间通常较单季中稻提前约两个月，且再生季氮肥施用量与头季或麦季的相当^[72]。这意味着，蓄留再生稻将使得：（1）整个稻季延长，水稻品种也可能异于常规，势必影响温室气体排放；（2）部分稻田冬季无法种植小麦或油菜，但可以播种绿肥或休闲，让土地有足够的休耕时间，从而可能改善土壤结构、提高土壤肥力；（3）大量氮肥集中在生育期较短的再生季施用，可能引起氮素流失、造成水体污染。此外，再生季生育期相对较短且根系老化，植株吸收、富集重金属离子的效率较头季很可能明显减弱，这或许将大大降低稻米受污染的风险；再生季水稻灌浆期间昼夜温差大且基本不施

农药，其稻米品质很可能与头季稻的不同。因此，深入研究再生稻种植的经济和环境效益对响应农业结构调整、确保国家粮食安全以及农业可持续发展具有重大战略意义。针对上述科学问题，未来的重点研究方向主要有：

4.1 农田耕作制度与再生稻发展产业化

我国农田的耕作制度在逐渐发生改变。由于农民工工资上涨，农业生产成本（种子、化肥、农药）增长过快，水稻种植效益有限，农村青壮年劳动力大量外出务工，导致部分双季稻地区改为种植再生稻；稻麦轮作地区受降水和气候等条件的限制，小麦产量难以达到较高水平，有可能改为种植再生稻。这些改变引起的经济效益也需要进行重新评估，进而科学地引导农业生产方式的变革。稻农种植再生稻获得较高的经济效益也会对乡村振兴战略的实施和农业农村现代化的推进起到积极的促进作用。

保证再生稻持续、稳定、健康的发展需要各方共同的努力。政府层面上^[73]，首先要重视再生稻产业的发展，明确再生稻产业是粮食持续稳定增长、国家粮食安全、农民持续增收的重要保障，是国家利益与农民利益的有机结合；其次，在政策上给予一定的扶持，目前针对水稻的各类补贴中，再生稻仅能获得头季的惠农补贴，再生季不享有补贴。企业层面上，加大宣传力度，再生稻米质优、口感好、绿色、健康的特性让广大消费者所熟知并认可；树立品牌意识，加强品牌建设；建立健全再生稻质量认证体系。科研机构层面，农业科研院所及高校加强合作，协同开展再生稻研究工作，尽快形成再生稻高产及普适性品种的遗传理论和方法体系。合作社层面，提高种植全程机械化、再生稻产业化程度，加强农技人才队伍培训，建设科技服务网络，探索出一条适宜再生稻产业健康稳定发展的先进科学的道路。

4.2 再生稻养分管理与头季稻收割

氮肥对于提高作物产量起到关键作用。有关再生稻的氮肥运筹机理方面的研究相对缺乏，亟需更加深入的研究来指导促芽肥和发苗肥的施用技术，提高再生稻氮肥吸收利用率，在现有产量的基础上进一步提高再生稻产量。与单季稻相比，再生稻施用促芽肥和发苗肥增加了施肥用工，使种植再生稻的成本增加，这必然要求减少施肥次数。根据再生

稻对氮肥的需求特性, 一次性精准施用缓控释肥为减少劳动成本提供了可能。

由于传统的再生稻头季需人工收割, 随着劳动力老龄化和劳动成本增加, 人工收割头季再生稻的模式不为农民所接受。常规机械收割头季稻碾压严重、难以形成良好的再生模式。再生稻机械化程度低已成为再生稻进一步推广种植的薄弱环节, 限制了再生稻面积的进一步扩大。机械收割再生稻是今后发展再生稻的必然趋势。研制出割幅宽且履带窄, 对头季稻桩碾压少并可大规模推广应用的收割机是目前亟需解决的重大课题。

4.3 再生稻米质与土壤健康状况

随着人民生活水平的不断提高, 稻米品质的优劣也越来越受到重视, 它直接影响到人体健康。然而对再生稻头季与再生季稻米加工品质、外观品质、营养品质和蒸煮品质的影响因素及其机理研究不足。稻米中重金属含量同样影响稻米品质的好坏, 前人对单季稻和双季稻稻米中重金属含量已有大量研究^[74-75], 再生稻稻米中重金属含量方面的研究鲜有报道。因此, 有必要对再生稻稻米品质进行深入研究。

良好的土壤条件是作物健康生长的基础, 再生稻种植过程中的土壤环境问题也是限制再生稻谷品质与产量的重要因素, 主要包括再生季土壤免耕导致的土壤板结、容重增加, 长期淹水稻田还原性物质的累积和单一的种植制度使土壤生物多样性降低, 抗逆性、缓冲性减弱和重金属污染问题^[71]。重点从秸秆还田、种植绿肥、施用有机肥和加深耕作层等方面来改善土壤团粒结构, 增加土壤孔隙度, 提高土壤肥力, 增加生物多样性, 并开展水稻种植区重金属污染土壤调查、防治和修复。

4.4 再生稻田的气体排放与水体质量

CH₄ 和 N₂O 是引起全球气候变暖的两种重要温室气体, 稻田土壤是大气 CH₄ 和 N₂O 的重要排放源, 种植制度的改变势必会引起温室气体排放量的变化。目前, 有关单季稻和双季稻的温室气体排放规律研究已有大量文献报道^[76-78], 而关于再生稻 CH₄ 和 N₂O 排放通量观测还严重缺乏, 仅有零星报道^[79-81]。再生稻的生育期、肥料施用量及施用时间等均不同于传统的单季稻和双季稻^[64, 82], 其 CH₄ 和 N₂O 排放规律也随之发生改变。开展再生稻田土壤温室气体排放研究可为准确评估我国稻田生态系统

温室气体排放量提供参考数据。

农田氮磷流失导致的水体富营养化现象备受关注。我国水稻生产中氮、磷肥施用量高、利用率低, 防控稻田氮磷流失对于治理农业面源污染至关重要。以往仅关注单双季稻田的氨挥发、氮磷径流、渗漏损失^[83-86], 而再生稻田的氮磷流失主要途径及流失量尚不清楚。研究再生稻田肥料施用对稻田水体环境质量的影响可为指导合理施肥、提高肥料利用率、加强氮磷损失防控、防治面源污染提供数据支撑和科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Xiong H, Ran M L, Xu F X, et al. Achievements and developments of ratooning rice in south of China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26 (3): 297—304. [熊洪, 冉茂林, 徐富贤, 等. 南方稻区再生稻研究进展及发展[J]. 作物学报, 2000, 26 (3): 297—304.]
- [2] Guo W T. A brief discussion on the historical development of ratoon rice in China[J]. Agriculture History in China, 1993, 12 (4): 1—6. [郭文韬. 略论中国再生稻的历史发展[J]. 中国农史, 1993, 12 (4): 1—6.]
- [3] Jones D B. Rice Ratoon response to main crop harvest cutting height[J]. Agronomy Journal, 1993, 85 (6): 1139—1142.
- [4] Sun X H. The studies on ratooning rice in China[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1995, 13(4): 506-517. [孙晓辉. 中国的再生稻研究(综述)[J]. 四川农业大学学报, 1995, 13 (4): 506—517.]
- [5] Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (9): 1702—1717. [徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (9): 1702—1717.]
- [6] Xu F X, Xiong H. High yield theory and regulation approaches of ratoon hybrid rice[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2016: 2—11. [徐富贤, 熊洪. 杂交中稻蓄留再生稻高产理论与调控途径[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016: 2—11.]
- [7] Fei Z J, Dong H L, Wu X Z, et al. The development status and potential of ratoon rice in Hubei Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52 (24): 5977—5978, 6002. [费震江, 董华林, 武晓智, 等. 湖北省再生稻发展的现状及潜力[J]. 湖北农业科学, 2013, 52 (24): 5977—5978, 6002.]
- [8] Peng S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period[J]. Scientia Sinica:

- Vitae, 2014, 44 (8): 845—850. [彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44 (8): 845—850.]
- [9] Fang W, Luo W Z, Zhang J G, et al. Ecological conditions of ratooning rice and its area suitability[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1994, 7 (3): 15—22. [方文, 罗文质, 张景国, 等. 四川再生稻的生态条件及区域适应性研究[J]. 西南农业学报, 1994, 7 (3): 15—22.]
- [10] Li S B, Yang M J, Cui M X. Primary research on regional planning of ratoon rice plantation in Sichuan[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1989, 2 (2): 1—6. [李实贵, 杨明均, 崔明新. 四川省再生稻种植区划初探[J]. 西南农业学报, 1989, 2(2): 1—6.]
- [11] Wang G X, Huang Y Q, Chen G H, et al. Climatic and ecological division of ratoon rice cultivation in Hubei Province[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1995, 17 (3): 202—206. [王贵学, 黄友钦, 陈国惠, 等. 湖北省再生稻气候生态区划研究[J]. 西南农业大学学报, 1995, 17 (3): 202—206.]
- [12] He Y, Li Z, Liao X P, et al. Climate Division of rational layout on Brazilian upland ratooning rice based on GIS[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27 (4): 310—313, 334. [何燕, 李政, 廖雪萍, 等. GIS支持下的巴西陆稻 IAPAR-9 再生稻合理布局气候区划[J]. 中国农业气象, 2006, 27 (4): 310—313, 334.]
- [13] Liu X M, Zheng X B. Analysis on the climatic conditions for developing ratoon rice in Guizhou[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 1993, 21 (1): 41—44. [刘雪梅, 郑小波. 贵州省发展再生稻的气候条件分析[J]. 贵州农业科学, 1993, 21 (1): 41—44.]
- [14] Chen G H, Zhang H. Climatic and ecological division of ratoon rice cultivation in Yunnan Province[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1994 (4): 390—395. [陈国惠, 张洪. 云南省再生稻种植气候生态区划[J]. 西南农业大学学报, 1994 (4): 390—395.]
- [15] Li Y Z, Huang Y M, Lin W, et al. Study on regeneration and high yield technology of rice VII, climatic and ecological adaptability regionalization of ratoon rice in Fujian mountain area[J]. Fujian Science and Technology of Rice and Wheat, 1993, 11 (2): 15—21. [李义珍, 黄育民, 林文, 等. 水稻再生丰产技术研究 VII报、福建山区再生稻气候生态适应性区划[J]. 福建稻麦科技, 1993, 11 (2): 15—21.]
- [16] Huang S E, Li Y C, Yin J M. Application of “3S” technology in climatic feasibility study of ratooning paddy growing in Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2001, 23 (4): 573—576. [黄淑娥, 李迎春, 殷剑敏. “3S”技术在江西省再生稻种植气候可行性研究中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2001, 23 (4): 573—576.]
- [17] Feng D Q, Liu X C, Liu C Z, et al. Analysis and practice of climate suitability of ratoon rice in south area of Henan[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44 (7): 41—44. [丰大清, 刘祥臣, 刘春增, 等. 豫南稻区再生稻气候适宜性分析与实践[J]. 山东农业科学, 2012, 44 (7): 41—44.]
- [18] Wang G X, Huang Y Q, Chen G H, et al. Climatic and ecological division of ratoon rice cultivation in Anhui Province[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1995, 17 (3): 207—211. [王贵学, 黄友钦, 陈国惠, 等. 安徽省再生稻气候生态区划研究[J]. 西南农业大学学报, 1995, 17 (3): 207—211.]
- [19] Xiong H, Fang W. Study on ecological conditions of axillary bud sprouting and yield of the ratooning rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14 (2): 161—167. [熊洪, 方文. 再生稻腋芽萌发与产量形成的生态研究[J]. 生态学报, 1994, 14 (2): 161—167.]
- [20] Fang W, Xiong H, Yao W L. Discussion on meteorological conditions for improving the yield of ratooning rice[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1990, 11 (1): 35—38. [方文, 熊洪, 姚文力. 提高再生稻产量的气象条件探讨[J]. 中国农业气象, 1990, 11 (1): 35—38.]
- [21] Rice Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences. Breeding of ratoon rice varieties[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 1977 (11): 10—11. [四川省农业科学院水稻研究所. 再生稻品种选育[J]. 农业科技通讯, 1977 (11): 10—11.]
- [22] Hu H Y, Zhao S Y. Study on the correlation between ratooning rice and main cropping traits[J]. Jiangxi Agricultural Science and Technology, 1987 (7): 3—5. [胡慧英, 赵式英. 再生稻与主作性状相关性的研究[J]. 江西农业科技, 1987 (7): 3—5.]
- [23] Xu F X, Xiong H. Relationship between grain number per panicle of main crop among varieties and their ratooning ability in hybrid mid-rice[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1998, 16 (3): 304—306. [徐富贤, 熊洪. 杂交中稻品种间着粒数与再生力关系[J]. 四川农业大学学报, 1998, 16 (3): 304—306.]
- [24] Xu F X, Xiong H. Relationship between ratio of grain to leaf area and ratooning ability in middle season hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2000, 14 (4): 249—252. [徐富贤, 熊洪. 杂交中稻粒叶比与再生力的关系[J]. 中国水稻科学, 2000, 14 (4): 249—252.]
- [25] Chen S A. The grown performance and high-yield cultivation techniques of ratooning rice Tianyou673[J]. Fujian Science and Technology of Rice and Wheat, 2017, 35 (3): 65—68. [陈世安. 天优 673 在尤溪县作再生稻种植表现及高产栽培技术[J]. 福建稻麦科技, 2017, 35 (3): 65—68.]
- [26] Turner F T, Jund M F. Rice ratoon crop yield linked to main crop stem carbohydrates[J]. Crop Science, 1993, 33 (1): 150—153.

- [27] Zheng P L, Li Q H, Lin L N. Comparison of rice quality between the first crop and the second crop[J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2011, 29 (3): 44—46. [郑苹立, 李清华, 林玲娜. 头季稻与再生稻的米质比较分析[J]. *福建稻麦科技*, 2011, 29(3): 44—46.]
- [28] Du D K, Liu H T. Comparison of rice quality between main crop and ratoon crop[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2005 (5): 17—18, 25. [杜登科, 刘会桃. 头季稻与再生稻的品质比较研究[J]. *湖南农业科学*, 2005 (5): 17—18, 25.]
- [29] Xu F X, Xiong H, Zhang L, et al. Effects of stubble height on ratoon rice quality and its relationship to the first season rice quality[J]. *China Rice*, 2014, 20 (1): 86—87, 89. [徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 杂交中稻留桩高度对再生稻米质的影响及其与头季稻米质的关系[J]. *中国稻米*, 2014, 20 (1): 86—87, 89.]
- [30] Wu J B, Li Y B, Wang D L, et al. The influence of different seeding period on the yielding of ratooning rice and its good seeding period[J]. *Journal of Hunan Environment-Biological Polytechnic*, 2011, 17(1): 1—4. [吴集斌, 李玉白, 王大来, 等. 再生稻不同播种期对产量的影响及其适宜的播种期[J]. *湖南环境生物职业技术学院学报*, 2011, 17 (1): 1—4.]
- [31] Zhang G L, Tu N M, Yuan J H, et al. Effects of sowing stage on the sprouting of axillary bud and yield of ratooning rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition)*, 2005, 31 (3): 229—232. [张桂莲, 屠乃美, 袁菊红, 等. 播种期对再生稻腋芽萌发和产量的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 31 (3): 229—232.]
- [32] Gao C Q, Luo Z M, Wang J A, et al. Effects of different sowing stage on yield and yield composition of Fengliangyouxiang 1 ratoon rice[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015 (5): 179—181. [高长清, 罗珍美, 王记安, 等. 不同播种期对丰两优香 1 号再生稻产量及产量构成的影响[J]. *农业科技通讯*, 2015 (5): 179—181.]
- [33] Lü Z L, Zhong S Q, Yang H. Study on ratoon rice high and stable yield cultivation techniques[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(17): 8886—8888, 8891. [吕泽林, 钟顺清, 杨航. 再生稻高产稳产栽培技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(17): 8886—8888, 8891.]
- [34] Cui M X. The Technology of cultivating ratoon rice by hybrid middle-season rice[J]. *Hybrid Rice*, 1987, 2 (3): 15—16. [崔明新. 杂交中稻培植再生稻的技术[J]. *杂交水稻*, 1987, 2 (3): 15—16.]
- [35] Negalur R B, Yadahalli G S, Chittapur B M, et al. Ratoon rice: A climate and resource smart technology[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6 (5): 1638—1653.
- [36] Bai Z X. Several key techniques for increasing the grain yield of ratooning rice[J]. *Hybrid Rice*, 1995(5): 16—17. [白宗绪. 提高再生稻产量的几项关键技术[J]. *杂交水稻*, 1995 (5): 16—17.]
- [37] Huang S C, Yu Q Y, Yi K W, et al. Mechanized high yield cultivation techniques of Y Liangyou9188 ratoon rice[J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2017, 5 (10): 116—117. [黄世聪, 余庆燕, 易孔文, 等. Y 两优 9918 再生稻机械化高产栽培技术[J]. *基层农技推广*, 2017, 5 (10): 116—117.]
- [38] Miao C Z. High yield technical measures for cultivation of ratoon rice Shanyou63[J]. *Jiangxi Agricultural Science & Technology*, 1996 (3): 1—2. [苗昌泽. 汕优 63 培育再生稻的高产技术措施[J]. *江西农业科技*, 1996 (3): 1—2.]
- [39] Luo W Z. Selection and cultivation techniques of ratoon rice[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 1978 (9): 16—17. [罗文质. 再生稻品种选用和栽培技术[J]. *农业科技通讯*, 1978 (9): 16—17.]
- [40] Xiong H, Fang W, Tan Z B. Appropriate harvest period for retention of ratoon rice in hybrid mid-season rice[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 1990 (4): 4. [熊洪, 方文, 谭震波. 杂交中稻蓄留再生稻的适宜收割期[J]. *四川农业科技*, 1990 (4): 4.]
- [41] Jiang P Y. Growth characteristics and high yield cultivation points of ratoon rice[J]. *China Rice*, 1996(6): 30-33. [蒋彭炎. 再生稻的生育特性与高产栽培要点[J]. *中国稻米*, 1996 (6): 30—33.]
- [42] Xiong H, Fang W, Tan Z B. Effects of harvesting in different periods of hybrid mid-season rice on the yield of first season rice and ratoon rice[J]. *Hybrid Rice*, 1990, 5 (3): 8—10. [熊洪, 方文, 谭震波. 杂交中稻不同时期收割对头季稻和再生稻产量的影响[J]. *杂交水稻*, 1990, 5 (3): 8—10.]
- [43] Zou Y C. The optimum harvest period of first season rice[J]. *Farm Science and Technology*, 1998(7): 12—13. [邹永成. 头季稻的最佳收割期[J]. *农家科技*, 1998 (7): 12—13.]
- [44] He H R, Fang X T, Weng G H, et al. Current status and prospect of the effects of stubble height of the main crop on growth, development and grain yield of ratoon rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (9): 6-10. [何花榕, 房贤涛, 翁国华, 等. 留桩高度对再生稻生长发育和产量的影响研究现状及展望[J]. *中国农学通报*, 2012, 28 (9): 6—10.]
- [45] Gao C Q, Wang J A, Liu C B, et al. Effect of stubble height on growth and yield of Fengliangyouxiang 1 ratoon rice[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015 (9): 9, 11. [高长清, 王记安, 刘长兵, 等. 留桩高度对丰两优香 1 号再生稻生长及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2015 (9): 9, 11.]
- [46] Gao J X, Lan T Q, Liu C J, et al. Effects of different

- stubble height on yield and related characters of Liangyou 527 ratoon rice[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015 (10): 22, 24. [高家旭, 蓝天琼, 刘成家, 等. 不同留桩高度对准两优 527 再生稻产量及相关性状的影响[J]. *现代农业科技*, 2015 (10): 22, 24.]
- [47] Prashar C R K. Some factors governing rice-ratoon yields[J]. *Plant and Soil*, 1970, 32 (1/2/3): 540—541.
- [48] Daliri M S, Eftekhari A, Mobasser H R, et al. Effect of cutting time and cutting height on yield and yield components of ratoon rice (Tarom Langrodi variety) [J]. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2009, 8 (1): 89—91.
- [49] Su Z F, Zhang H C. Studies on development characters and cultural technology for high yield in regeneration rice[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 1990, 11 (1): 15—21. [苏祖芳, 张洪程. 再生稻的生育特性及高产栽培技术研究[J]. *江苏农学院学报*, 1990, 11 (1): 15—21.]
- [50] Jiang T J, Yi Z X, Tu N M. Effect of stubble height on ratooning properties of Pei'ai 64S/E32[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition)*, 2005, 31 (4): 359—363. [蒋廷杰, 易镇邪, 屠乃美. 留桩高度对培矮 64S/E32 再生特性的影响[J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2005, 31 (4): 359—363.]
- [51] Huang Z G, Tu N M, Jiang J A, et al. Effects of rudimental stubble heights on the yield and source-sink characteristics of ratooning rice: A case study for two-line hybrid rice Peiliangyou 210[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (8): 4572—4579. [黄志刚, 屠乃美, 江巨鳌, 等. 留桩高度对培两优 210 再生稻产量和源库性状的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29 (8): 4572—4579.]
- [52] Xu G M. Effects of different rudimental stubble heights on yield of high quality ratoon rice Jiafuzhan[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011(1): 63—63. [许光明. 不同留桩高度对优质稻佳辐占再生稻产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2011 (1): 63—63.]
- [53] Shin J H, Kim S K, Park S G. Effects of stubble height, irrigation and nitrogen fertilization on rice ratooning in Korea[J]. *The Korean Journal of Crop Science*, 2015, 60 (4): 431—435.
- [54] Zhang G L, Tu N M. Research status and prospect of ratoon rice[J]. *Crop Research*, 2001, 15(3): 64—69. [张桂莲, 屠乃美. 再生稻研究现状与展望[J]. *作物研究*, 2001, 15 (3): 64—69.]
- [55] Liu A Z, Zou D S, Tu N M, et al. Effect of stubble height on growth and yield of ratooning rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(17): 5120—5121. [刘爱中, 邹冬生, 屠乃美, 等. 留桩高度对再生稻生长发育及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(17): 5120—5121.]
- [56] Wang H L. Preliminary study on different stubble height test of ratoon rice [J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2017, 5 (10): 17—19. [王鸿林. 再生稻不同留桩高度试验初探[J]. *基层农技推广*, 2017, 5(10): 17—19.]
- [57] Ma J, Chen N Y. Effects of different transplanting methods and stubble height on yield of early rice-ratoon rice[J]. *Jiangxi Agricultural Science and Technology*, 1996 (2): 12—13. [马静, 陈年镛. 早稻—再生稻不同插秧方式与留桩高度对产量的影响[J]. *江西农业科技*, 1996 (2): 12—13.]
- [58] Lian H, Zhou H T, Chen W J, et al. Effects of sowing dates and stubble height of retaining piles on grain yield and yield components of ratooning rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017 (4): 28—31. [练红, 周海涛, 陈维建, 等. 播种期和留桩高度对再生稻产量及产量构成因素的影响[J]. *湖南农业科学*, 2017 (4): 28—31.]
- [59] Zhang J X, Qian T P, Zhang X Y, et al. Effects of hybrid rice different stubble height on yield of ratooning rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2014, 42 (8): 2221—2222, 2224. [张继新, 钱太平, 张晓勇, 等. 杂交水稻不同留桩高度对再生稻产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42 (8): 2221—2222, 2224.]
- [60] Sun X H, Tian Y H, Ren T J. Study on the effect of bud promoting fertilizer on the cultivation of ratooning rice in hybrid rice. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 1982 (3): 1—4, 7. [孙晓辉, 田彦华, 任天举. 促芽肥对杂交稻培育再生稻效果研究. *四川农业科技*, 1982 (3): 1—4, 7.]
- [61] Ling Q H, Su Z F. Studies on the growth and panicle differentiation of resting bud and its application in rice plants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22 (1): 35—43. [凌启鸿, 苏祖芳. 水稻潜伏芽生长和穗分化形成规律及其应用的研究[J]. *中国农业科学*, 1989, 22 (1): 35—43.]
- [62] Xu F X, Xiong H, Hong S, et al. Effects of n application for bud development on the ratooning ability of hybrid mid-season rice and its relationship with grain number per panicle of the main crop[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2000, 22 (4): 310—311, 322. [徐富贤, 熊洪, 洪松, 等. 促芽肥对杂交中稻再生力的作用与头季稻品种间着粒数的关系[J]. *西南农业大学学报*, 2000, 22 (4): 310—311, 322.]
- [63] Chen Q, He A B, Wang W Q, et al. Comparisons of regeneration rate and yields performance between inbred and hybrid rice cultivars in a direct seeding rice-ratoon rice system in central China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 223: 164—170.
- [64] Tang R G, Huang Y J, Yi Z X. Analysis on benefit of demonstration planting of super rice-ratooning rice in Xiangtan County[J]. *Crop Research*, 2018, 32 (2): 152—155. [唐仁庚, 黄云军, 易镇邪. 湘潭县超级稻—

- 再生稻示范种植效益分析[J]. 作物研究, 2018, 32(2): 152—155.]
- [65] Yuan Q L, Yan Y B, Deng Z R, et al. Performance evaluation and high yield cultivation techniques of Jingliangyou 534 as ratooning rice[J]. China Seed Industry, 2019 (3): 90—92. [袁秋良, 颜焱炳, 邓峙嵘, 等. 晶两优 534 作再生稻性能评价及高产栽培技术[J]. 中国种业, 2019 (3): 90—92.]
- [66] Yu G L, Liu X C, Feng D Q, et al. Effects of different stubble height on yield and growth period of ratoon rice in south of Henan[J]. China Rice, 2018, 24(5): 112-115. [余贵龙, 刘祥臣, 丰大清, 等. 不同留茬高度对豫南再生稻生育期及产量的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(5): 112—115.]
- [67] Cai L. Planting performance and high-yielding cultivation techniques of jingliangyou Huazhan as mid-season rice-ratooning rice[J]. Fujian Science and Technology of Rice and Wheat, 2018, 36(4): 49—51. [蔡林. 晶两优华占作中稻—再生稻种植表现及高产栽培技术[J]. 福建稻麦科技, 2018, 36(4): 49—51.]
- [68] Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, et al. Estimation of efficient rate of nitrogen application for promoting ratooning bud development using chlorophyll meter reading (SPAD value) of flag leaf at the full heading stage of main crop in mid-season hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(1): 51—56. [徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 利用杂交中稻齐穗期剑叶叶绿素计读数 (SPAD 值) 预测再生稻促芽肥高效施用量[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 51—56.]
- [69] Yuan J C, Sun X H, Tian Y H, et al. Study on nitrogen requirement and split application of nitrogen fertilizer in ratooning rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(3): 345—352. [袁继超, 孙晓辉, 田彦华, 等. 再生稻需氮特性和分次施氮的研究[J]. 作物学报, 1996, 22(3): 345—352.]
- [70] Xu S Z. Effects of nitrogen fertilizer application ratio on ratooning rice[J]. Primary Agricultural Technology Extension, 2018, 6(9): 28-30. [徐思忠. 氮肥施肥比例对再生稻的影响[J]. 基层农技推广, 2018, 6(9): 28—30.]
- [71] Li C F, Hu H Q, Cao C G, et al. Research and practice on improvement of ratoon rice soil fertility in China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(14): 2666-2669, 2721. [李成芳, 胡红青, 曹凑贵, 等. 中国再生稻田土壤培肥途径的研究与实践[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(14): 2666—2669, 2721.]
- [72] Dong H L, Chen Q, Wang W Q, et al. The growth and yield of a wet-seeded rice-ratoon rice system in central China[J]. Field Crops Research, 2017, 208: 55—59.
- [73] Lin W X. Developmental status and problems of rice ratooning[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(1): 246—247.
- [74] Li C, Xiao X P, Tang H M, et al. Effects of growing-microbial agents on yield, soil nutrients and heavy metal Cd of double cropping rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(29): 1—6. [李超, 肖小平, 唐海明, 等. 种植型微生物菌剂对双季稻植株产量、土壤养分及重金属 Cd 的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(29): 1—6.]
- [75] Guan W W, Dai Q G, Zhang H C, et al. Effect of selenium fertilization on rice growth and accumulation of heavy metals in rice (*Oryza sativa*) [J]. Soils, 2018, 50(6): 1165—1169. [管文文, 戴其根, 张洪程, 等. 硒肥对水稻生长及其重金属累积的影响[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1165—1169.]
- [76] Zhang G B, Ma J, Yang Y T, et al. Achieving low methane and nitrous oxide emissions with high economic incomes in a rice-based cropping system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 95—106.
- [77] Yang Y T, Huang Q, Yu H Y, et al. Winter tillage with the incorporation of stubble reduces the net global warming potential and greenhouse gas intensity of double-cropping rice fields[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 19—27.
- [78] Sun H J, Min J, Shi W M, et al. Effect of sewage irrigation on crop yield, ammonia volatilization and nitrous oxide emission in rice-wheat rotation[J]. Soils, 2015, 47(3): 503—508. [孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 稻麦轮作体系养殖肥水灌溉对产量、氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3): 503—508.]
- [79] Lindau C W, Bollich P K. Methane emissions from Louisiana first and ratoon crop rice[J]. Soil Science, 1993, 156(1): 42—48.
- [80] Song K F, Yu H Y, Zhang G B, et al. N₂O emissions from ratoon paddy fields covered with plastic film mulching in the hilly area of central Sichuan, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(6): 1381—1387. [宋开付, 于海洋, 张广斌, 等. 川中丘陵区覆膜再生稻田 N₂O 排放规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1381—1387.]
- [81] Song K F, Yang Y T, Yu H Y, et al. Effects of plastic film mulching cultivation of ratoon rice on CH₄ emissions in the hilly area of central Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7258—7266. [宋开付, 杨玉婷, 于海洋, 等. 川中丘陵区覆膜栽培再生稻对 CH₄ 排放的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7258—7266.]
- [82] Zhang C H, Li L Z, Wu X C, et al. Analysis on economic benefits of ratoon rice of double-cropping late indica hybrids[J]. Hybrid Rice, 2012, 27(4): 37—43. [张长海, 李立中, 吴行春, 等. 籼型双晚杂交稻组合作再生稻表现及经济效益分析[J]. 杂交水稻, 2012, 27(4): 37—43.]
- [83] Yang K Y, Wang M H, Wang Y, et al. Characteristics and determinants of nitrogen and phosphorus runoff losses

- under different agronomic measures in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (8): 1723—1734. [杨坤宇, 王美慧, 王毅, 等. 不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38 (8): 1723—1734.]
- [84] Tian C, Zhou X, Xie G X, et al. Ammonia volatilization loss and nitrogen use efficiency in double-cropping rice field as affected by decreasing controlled-release urea application level[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32 (4): 387—397. [田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32 (4): 387—397.]
- [85] Zhang J, Wang D J, Wang C. Nitrogen and Phosphorus balance under paddy field irrigation-drainage system in south Jiangsu plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (4): 657—662. [张静, 王德建, 王灿. 苏南平原稻田灌排水系统中氮磷平衡状况[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (4): 657—662.]
- [86] Tian Y H, Zeng K, Yao Y L, et al. Ammonia emission following fertilization at booting stage of rice crop in Taihu lake region relative to monitoring techniques[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 693—702. [田玉华, 曾科, 姚元林, 等. 基于不同监测方法的太湖地区水稻穗肥期氨排放研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 693—702.]

(责任编辑：陈荣府)