DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.37

水稻覆膜旱作对土壤环境及水稻生长的影响研究进展

赵 龙[1], 张友良[1], 王 娟[1], 田承伟[2], 苗恒录[3]
(1.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.抚州市水文局, 江西 抚州 344000; 3.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: 水稻覆膜旱作技术是通过覆膜旱作旱管来控制水稻根区土壤水分,充分利用降雨且辅以适时适量灌溉的技术。在前人研究的基础上,总结归纳了水稻覆膜旱作对土壤水热、土壤养分、温室气体排放及其生长的影响,分析了在不同地区覆膜旱作水稻产量变化,探讨了水稻覆膜旱作对提高水分利用效率的影响机理。提出覆膜旱作水稻水热传输过程、不同薄膜材料的优选及不同地区实现覆膜旱作水稻的增产是水稻覆膜旱作未来研究的重要内容及方向。

关键词: 水稻; 覆膜旱作技术; 土壤环境; 水分利用效率;水稻产量
中图分类号:S511.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2020)05-0255-06

Research progress of effects of ground cover rice production system with plastic film mulch on soil environment and rice growth

ZHAO Long[1], **ZHANG Youliang**[1], **WANG Juan**[1], **TIAN Chengwei**[2], **MIAO Henglu**[3]
(1. *College of Hydraulic, Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou* 225009, *China*; 2. *Fuzhou Hydrological Bureau, Fuzhou* 344000, *China*; 3. *Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot* 010020, *China*)

Abstract: Plastic film mulching can control soil water content in the root zone under ground cover rice production system. With this system rainfall water can be fully used with the supplement of irrigations at appropriate amount and frequency. Based on previous research, the effects of plastic film mulching on soil water and heat, soil nutrients, greenhouse gas emission, and rice growth were summarized under ground cover rice production system in this paper. Moreover, the reasons of the yield change in different areas were analyzed and the mechanisms of water use efficiency enhancement were discussed. It is suggested that the water heat transfer process, the optimal selection of mulch materials, and the rice yield increase in different areas are the primary areas and directions for the future research on ground cover rice production with plastic film mulching.

Key words: rice; plastic film mulching production; soil environment; water use efficiency; rice yield

1 研究背景

我国是水稻生产大国,2016年我国水稻总产约2.11×10^8 t,占世界的28.5%,居世界第一[1]。但是我国水稻主要种植方式为淹水灌溉,耗水达13 500 m^3/hm^2,远高于其生理需水[2]。水稻覆膜旱作技术可以减少水稻生长过程中的水面蒸发和深层渗漏、避免水稻早期的低温胁迫、能够抑制杂草、保证产量和提高水分利用效率[3-6]。因此,在水资源日益紧缺的形势下,研究利用水稻覆膜旱作技术以提高水稻的产量和水分利用效率,对于保障我国水安全和粮食安全具有重要意义。

本文通过总结归纳已有研究文献,分析水稻覆膜旱作对土壤水肥气热的影响机理及对水稻生长、

收稿日期:2019-09-12; **修回日期**:2020-01-29
基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180929); 国家自然科学基金青年基金项目(51809225); 中国博士后科学基金第65批面上项目(2019M651977)
作者简介:赵 龙(1996-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为土壤水热环境与调控。
通讯作者:张友良(1987-),男,江西萍乡人,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为农业水土环境与生态。

产量和水分利用效率的影响机理,探讨水稻覆膜旱作技术存在的问题及未来研究方向,为该技术的进一步研究与应用提供参考。

2 水稻覆膜旱作对土壤水肥气热的影响

2.1 水稻覆膜旱作对土壤水热的影响

覆膜水稻相较于裸地旱种可以有效提高土壤温度和土壤含水率。覆膜削弱了潜热交换损失,减弱土壤与外界的热交换,使土壤热通量和土壤温度增加。同时,地膜阻隔了稻田和外界环境的物质与能量交换,使土壤蒸发的水汽被保留到稻田与薄膜形成的气室中,当昼夜温度降低时水汽凝结成水滴返回土壤,保持土壤水分,使土壤含水率增加[7]。程旺大等[8-9]研究了水稻覆膜对土壤含水率和土壤温度的影响,结果表明:0~60 cm 土层内,水稻覆膜的土层含水率均高于常规旱作处理下的土层含水率;0~20 cm土层内,日平均最低和最高土壤温度均高于常规旱作处理。Li 等[10]研究表明水稻覆膜处理的土壤含水率约为饱和含水率的80%,其土壤温度比常规旱作高约13%,随着水稻的生长该增温效应逐渐减弱甚至消失。

2.2 水稻覆膜旱作对土壤养分的影响

土壤养分是水稻生长和产量增加的保障,土壤养分含量和分布受土壤通气性、土壤水分和温度等的影响。水稻覆膜旱作通过调控土壤水分温度和土壤通气性来影响土壤养分含量及其时空分布。潘腊青等[11]发现水稻覆膜土壤中铁和锰的有效态含量分别提高了47.8%和19.9%。Liu 等[12]研究表明水稻覆膜会增加5~20 a 内土壤有机碳(SOC)和氮含量,且能使土壤容重增大。Li 等[13]、李永山等[14]研究表明,与常规淹水栽培相比,覆膜处理的土壤有机质含量减少8.3%~24.5%,全氮含量减少5.2%~22%,速效钾含量减少9.6%~50.4%,全磷含量减少13.5%~27.8%,这主要是因为覆膜增强了水稻根系的生长,使其能从土壤中吸收更多的营养物质,进而减少土壤中有机质和无机质的含量。此外,因为覆膜改善了土壤通气性,覆膜水稻土壤铵态氮、硝态氮和无机氮的含量要远高于常规水种和裸地旱种。Yang 等[15]在兰溪实验发现水稻覆膜会降低土壤有机质、全氮、速效磷和可交换性钾的含量,这与李永山等[14]的研究结果一致。但是 Chen 等[16]研究表明水稻覆膜总体上可以维持土壤氮储量,水稻覆膜能够促进根系生长,提高氮肥的利用效率,使得C 和 N 返回至土壤中,与土壤硝化和生物固氮的影响抵消,防止了土壤总氮的净损失。

2.3 水稻覆膜旱作对温室气体排放的影响

全球气候变化越来越受到关注,稻田温室气体排放也逐渐成为研究的热点。土壤中有机质可分解为无机碳和无机氮,无机碳在厌氧环境下产生 CH_4,无机氮在硝化和反硝化过程中会产生 N_2O。水稻覆膜旱作通过改变土壤有机质含量、土壤通气性和土壤水分温度等来调节温室气体排放量。

常规淹水种植的稻田长期存在水层,促进了甲烷菌的生长和活性,使得 CH_4 排放通量增加。与常规淹水种植相比,覆膜旱作可以改善土壤的通气性,使土壤的氧化还原电位处于一个较高水平,抑制了 CH_4 的产生,但覆膜同时会使土壤水分发生剧烈的变化,使得硝化作用和反硝化作用同时存在,再加上外来肥料的一次性施入,导致 N_2O 急剧增加[17-18]。刘芳等[19]发现覆膜水稻全生育期 CH_4 累计排放通量为2.46 g/m^2,较常规淹水处理降低了88%。张怡等[20]在四川中部对覆膜水稻全年 CH_4 排放通量进行研究也得出类似的结论。王玉英等[21]通过对常规淹水、常规旱作、覆膜旱作3种栽培方式对照处理的研究表明,拔节后覆膜旱作栽培的 CH_4 平均排放通量为11.776 mg/(m^2·h),低于常规淹水栽培的14.024 mg/(m^2·h)。Zhang 等[22]在2010-2014年通过实验得出,与常规淹水栽培相比,覆膜水稻 CH_4 排放通量降低了45%~85%,但 N_2O 的排放通量增加了2.06~11.53倍。张旭[23]的研究表明,水稻覆膜旱作处理中基本上没有检测到 CH_4 的排放,但覆膜水稻 N_2O 的总排放通量的平均值为611 mg/(m^2·h),远高于常规淹水处理的37 mg/(m^2·h),且水稻排水落干期施肥会对 N_2O 的排放产生促进作用。石将来等[24]研究表明,覆膜处理下 CH_4 和 N_2O 的 GWP(全球增温潜势)分别为386.05和862.91 kg/hm^2,均高于常规处理(262.01和771.95 kg/hm^2)。

为减少覆膜产生的温室效应,有研究表明可以在覆膜稻田中加入稳定性肥料(添加脲酶抑制剂或硝化抑制剂或同时添加两种抑制剂的肥料)[25-27]。于海洋等[28]将硝化抑制剂(三氯甲基吡啶,CP)与尿素配施加入覆膜水稻系统中发现产量提升0.24 t/hm^2 且 CH_4 和 N_2O 的排放通量均降低11%。张怡等[29]研究发现在覆膜水稻系统中用控释肥料代替尿素可以在不影响产量的同时使 N_2O 的排放峰值减少43.6%、总排放量减少52.6%。

综上所述,前人关于对于覆膜旱作对水稻田间土壤水热、土壤养分及温室气体排放进行了深入研究,得出覆膜旱作相较于常规旱作可以增加土壤水分及土壤温度,尤其是在水稻生长前期,覆膜的增温保墒作用明显。但是覆膜旱作对土壤养分的影响,不同研究者得到的结论不一致,有的认为覆膜旱作可以增加土壤有机质和氮的含量,但也有人发现该技术会减少土壤有机质和氮的含量,这可能是由于不同研究者的水稻覆膜和水稻品种不同,导致其研究的覆膜增温效益及覆膜对水稻根系生长的影响不同,进而影响了土壤养分的含量。对于温室气体排放,研究者认为覆膜旱作可以减少 CH_4 的排放,但是 N_2O 的排放会有一定程度的增加。

迄今为止,前人关于不同颜色的覆膜材料对土壤水热、土壤养分及温室气体排放研究较少,由于不同颜色的薄膜材料光学性质不同,对水稻田间土壤水热环境的影响不同,从而对土壤养分及温室气体排放通量的影响有所不同。目前对于水稻不同生育期覆膜旱作条件下的土壤水热、土壤养分及温室气体排放的研究也较少。

3　水稻覆膜旱作对水稻生理生长及产量和水分利用效率的影响

3.1　水稻覆膜旱作对水稻生理生长的影响

土壤水肥气热的变化会影响水稻根系的生长及其对水分和养分的吸收,进而影响水稻的分蘖、冠层生长及地上生物量的形成等。徐俊增等[30]通过建立水稻茎蘖动态模拟模型发现,覆膜水稻分蘖前期茎蘖增长缓于常规处理,分蘖高峰期滞后 10 ~ 20 d。王晓航等[31]研究发现,灌浆期覆膜水稻的叶面积指数均高于 7。张亚男等[32-33]研究表明,覆膜水稻在 0 ~ 40 cm 土层内的根干重、根长密度和根表面积,均显著高于常规淹水栽培。刘晓菲[34]对覆膜水稻生长特征的研究表明,水稻覆膜可促进更多根系分布于根区深层土壤中。Yang 等[35]对水稻抗倒伏性影响的研究表明,覆膜会增加水稻的单株生物量,且倒伏指数较常规种植增加 14.68% ~ 17.09%。李森[36]研究了不同覆膜处理下水稻的根系变化,发现生育前期覆膜水稻根系生长和分枝最强,但之后却受到抑制,这主要是因为在水稻生长前期,覆膜处理可以提高土壤温度和含水率,对水稻根系生长产生促进作用,但之后随着覆膜增温效应和土壤肥力的减弱,使水稻根系生长受到抑制。大量研究表明,与常规淹水栽培相比,在水稻覆膜的基础上实施直播技术还可以缩短水稻生育期,提高光合生产上的叶面积指数、光合势和净同化率[37-39]。

3.2　水稻覆膜旱作对水稻产量的影响

水稻产量形成的过程实际上是干物质积累、分配与转运的过程[40]。水稻覆膜旱作通过影响土壤水肥气热环境间接影响水稻的生理生长及其产量。目前研究表明覆膜水稻的产量明显高于常规旱作处理,但产量与淹水处理在不同地域和种植时间上差异明显。王友贞等[41]研究发现水稻覆膜后与裸地旱种相比每公顷产量至少增加 2 500 kg,这主要是因为覆膜的增温保墒作用使水稻在生育前期的生长分蘖速度高于常规旱作处理,从而增加了地上部分干物质的积累。肖海华等[42]2011 年 4 – 8 月在四川资阳的研究发现,覆膜水稻产量达到 8 620 kg/hm^2,较常规淹水处理增加 18%,其穗长、穗粒数、千粒重、有效穗数、结实率等产量构成因素均高于常规处理。Guo 等[43-44]2014 年 5 – 9 月分别在中国中部海拔 500 和 900 m 地区进行实验,发现水稻在高海拔地区的产量、每平方米的小穗数和籽粒充实率显著高于低海拔地区。刘美菊[45]2011 年 4 – 9 月在湖北十堰等多个地方的研究发现,覆膜处理使水稻产量较淹水处理提高 18%。Qu 等[5]在湖北经过 7 年的田间试验也得到了类似的结论。而张自常[46]于实验期的 6 – 10 月在江苏扬州的实验发现,覆膜导致水稻减产约 10%。崔国贤[47]1998 年 6 – 10 月在江苏大丰的实验发现,覆膜旱作使水稻产量和产量构成因素均有所下降,不同品种对旱作环境的适应性也明显不同。这可能是因为在春季高海拔地区温度偏低,覆膜有效提高了前期的土壤温度和含水量,使其有利于水稻生长;而在夏季低海拔平原地区,过高的温度反而会抑制水稻的生长。

不同的施氮量和种植方式也会影响覆膜水稻的产量。邓小强等[48]研究表明,施氮 120 kg/hm^2 时,覆膜水稻产量最高单产 9 532.9 kg/hm^2。丰大清等[49-50]对水稻产量的研究表明,用 150 kg/hm^2 的控释肥代替尿素可以使覆膜水稻增产 27.3%,另外对覆膜水稻进行厢畦式处理可以使水稻增产 28.44%。袁玲等[51]对秸秆还田条件下水稻产量的研究表明,覆膜水稻的产量平均提升 3.3%,且能有效提升稻米中的铁、锌含量。

由此可见,水稻产量受品种、气候、土壤肥力和管理措施等多方面因素的制约,外界气候条件和土壤环境通过影响水稻的生理状况,进而影响水稻干物质积累和产量。覆膜处理对水稻产量的影响机理

还有待进一步探究。

3.3 水稻覆膜旱作对水分利用效率的影响

水稻覆膜旱作田间没有淹水,可以大量减少棵间蒸发和深层渗漏,从而降低作物需水量和灌水量。张立成等[52]研究表明,覆膜水稻灌溉用水量比常规灌溉低9.54%,灌耗比降低0.1。金欣欣[53]研究表明,覆膜水稻全生育期蒸腾总量降低6.1%~9.7%,深层渗漏和蒸发损失相对常规处理降低80%以上。石建初等[54]研究发现,覆膜水稻的生态耗水较常规淹水减少了57.2%,总耗水量减少了34.6%,且当根区平均土壤含水量保持在田间持水量的80%时,其节水效果更为明显。朱士江等[55]在黑龙江通过不同灌水条件(淹灌、控灌和间歇灌溉)对覆膜水稻耗水量进行研究,发现与常规处理相比,覆膜淹灌水分利用效率提高31.23%,覆膜控灌提高16.84%,覆膜间歇灌溉提高21.57%,且3种处理下的水分生产效率均提高。

综上所述,已有研究表明水稻覆膜旱作可以促进水稻的生长,主要体现在生物量、根系等生理生长指标方面,这主要是由于覆膜旱作对水稻田间土壤水热环境的改善。但是由于产量受气候、土壤等多方面因素的影响,有的研究表明覆膜旱作可以增加水稻产量,但有的研究表明覆膜旱作会导致水稻产量降低。与水稻常规旱作及常规淹水灌溉相比,覆膜旱作可以显著提高水分利用效率。由现有研究可以发现水稻覆膜旱作对水稻产量的影响可能是积极的,也有可能是消极的,怎样根据不同的气候和土壤等条件,通过覆膜旱作调控土壤水热、土壤养分等因素,充分发挥覆膜旱作的积极影响,避免其消极影响是未来水稻覆膜旱作研究的一个重要方向。

4 结 论

水稻覆膜旱作技术可以调控水稻生长的水肥气热条件,促进水稻的生长,在减少用水的同时,保证其产量,需要通过更多研究充分发挥其潜力。通过分析现有国内外关于覆膜旱作技术对水稻田间土壤水热、养分和温室气体排放及其对水稻生理生长、产量和水分利用效率的影响的研究,可以得出未来水稻覆膜旱作在以下几个方面需要进一步研究:

(1)现有研究主要关注水稻覆膜旱作技术对土壤水热环境的影响,但是对水稻覆膜旱作大气—作物—薄膜—土壤系统的水热环境传输过程研究较少,需要通过进一步的研究明确覆膜旱作水稻的水热传输过程及机理。

(2)关于不同薄膜材料对覆膜旱作水稻的土壤水肥气热及水稻生长的影响研究较少。由于不同薄膜材料具有不同的光学性质,它是影响土壤环境的关键因素,在水稻生长初期影响最大。因此,需要进一步研究利用薄膜材料调控水稻生长的方法。

(3)关于覆膜旱作对不同地区水稻产量的影响还需进一步研究,需要充分发挥覆膜旱作水稻的积极作用,实现水稻产量的增加,为该技术的推广应用提供理论依据。

致谢:在本文的写作过程中,扬州大学水利科学与工程学院的冯绍元教授提供了宝贵的修改意见,在此表示感谢。

参考文献:

[1] ZHAO Ling, ZHAO Chunfang, ZHOU Lihui, et al. Analysis on rice production in China [J]. Agricultural Science & Technology, 2016,17(1):78-80+105.

[2] 林贤青,朱德峰,李春寿,等. 水稻不同灌溉方式下的高产生理特性[J]. 中国水稻科学,2005,19(4):328-332.

[3] JIN Xinxin, ZUO Qiang, MA Wenwen, et al. Water consumption and water-saving characteristics of a ground cover rice production system[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 220-231.

[4] LIU Meiju, LIN Shan, DANNENMANN M, et al. Do water-saving ground cover rice production systems increase grain yields at regional scales? [J]. Field Crops Research, 2013, 150: 19-28.

[5] QU Hang, TAO Hongbin, TAO Yueyue, et al. Ground cover rice production system increases yield and nitrogen recovery efficiency [J]. Agronomy Journal, 2012, 104(5): 1399-1407.

[6] 彭世彰,李荣超. 覆膜旱作水稻作物系数试验研究[J]. 水科学进展,2001,12(3):312-317.

[7] 王丽丽,余海龙,黄菊莹,等. 不同覆盖措施的土壤生态环境效应和作物增产效应述评[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):11-15.

[8] 程旺大,赵国平,王岳钧,等. 浙江省发展水稻节水高效栽培技术的探讨[J]. 农业现代化研究,2000,21(4):197-200.

[9] 程旺大,赵国平,张国平,等. 水稻节水栽培的生态和环境效应[J]. 农业工程学报,2002,18(1):191-194.

[10] LI Sen, ZUO Qiang, JIN Xinxin. The physiological processes and mechanisms for superior water productivity of a popular ground cover rice production system[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 11-20.

[11] 潘腊青,吴良欢,姚 琳,等. 不同栽培方式和稻草还田

对土壤重金属含量及有效性的影响[J]. 浙江农业科学,2013(12):1659 – 1661.

[12] LIU Meiju, DANNENMANN M, GUO Lin, et al. Ground cover rice production systems increase soil carbon and nitrogen stocks at regional scale [J]. Biogeosciences, 2015,12(4): 4831 – 4840.

[13] LI Yongshan, WU Lianghuan, ZHAO Limei. Influence of continuous plastic film mulching on yield, water use efficiency and soil properties of rice fields under non-flooding condition[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(2): 370 – 378.

[14] 李永山,吴良欢,路兴花,等. 丘陵山区覆膜旱作稻田土壤硝态氮和铵态氮动态变化规律探讨[J]. 科技通报, 2007,23(2):207 – 210.

[15] YANG Xin, MI Wenhai, TAN Xiaoli. Effect of non-flooded plastic film mulching cultivation for rice in southeast China[J]. Weed Science, 2018,66(1):134 – 141.

[16] CHEN Zhe, LIN Shan, YAO Zhisheng. Enhanced nitrogen cycling and N_2O loss in water-saving ground cover rice production systems (GCRPS) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,121: 77 – 86.

[17] YAO Zhisheng, ZHENG Xunhua, LIU Chunyan. Improving rice production sustainability by reducing water demand and greenhouse gas emissions with biodegradable films[J]. Scientific Reports, 2017,7:39855.

[18] 廖松婷. 东北黑土区不同种植模式下水稻 CH_4、N_2O 排放研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.

[19] 刘 芳,李天安,樊小林. 华南地区覆膜旱种稻田甲烷排放及其与土壤水分和温度的关系[J]. 农业工程学报, 2013,29(2):110 – 116.

[20] 张 怡,吕世华,马 静,等. 冬季水分管理和水稻覆膜栽培对川中丘陵地区冬水田 CH_4 排放的影响[J]. 生态学报,2016,36(4):1095 – 1103.

[21] 王玉英,朱 波,胡春胜,等. 水稻强化栽培体系的 CH_4 排放特征[J]. 生态环境,2007,16(4):1271 – 1276.

[22] ZHANG Guangbin, MA Jing, YANG Yuting. 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.

[23] 张 旭. 北京地区水稻地表覆盖旱作中温室气体排放[D]. 北京:中国农业大学,2004.

[24] 石将来,郝庆菊,冯 迪,等. 地膜覆盖对稻 – 油轮作农田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学,2017,38(11):4790 – 4799.

[25] MARCHESAN E, GROHS M, WALTER M, et al. Agronomic performance of rice to the use of urease inhibitor in two cropping systems[J]. Revista Ciência Agronômica, 2013,44(3):594 – 603.

[26] LINQUIST B A, LIU Lijun, VAN KESSEL C, et al. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: Meta-analysis of yield and nitrogen uptake[J]. Field Crops Research, 2013,154:246 – 254.

[27] 孙祥鑫,李东坡,武志杰,等. 持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤 NH_3 挥发与 N_2O 排放特征[J]. 应用生态学报,2016,27(6):1901 – 1909.

[28] 于海洋,杨玉婷,马 静,等. 硝化抑制剂对覆膜稻 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报,2017,26(3): 461 – 467.

[29] 张 怡,吕世华,马 静,等. 控释肥料对覆膜栽培稻田 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(3):769 – 775.

[30] 徐俊增,彭世彰,魏 征. 分蘖期水分调控对覆膜旱作水稻茎蘖动态影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):511 – 515.

[31] 王晓航,耿艳秋,金 峰,等. 秸秆还田和地膜覆盖对土壤环境和水稻生长的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018,39(5):1 – 7.

[32] 张亚男. 水稻覆膜旱作的节水增产机理与优化措施[D]. 北京:中国农业大学,2017.

[33] ZHANG Yanan, LIU Meiju, SAIZ G, et al. Enhancement of root systems improves productivity and sustainability in water saving ground cover rice production system [J]. Field Crops Research, 2017, 213: 186 – 193.

[34] 刘晓菲. 覆膜旱作水稻生长特征与节水效应[D]. 北京:中国农业大学,2013.

[35] YANG Yu, DENG Wen, QING Xianguo. Effect of film-mulched and dry-farming on lodging resistance of medium hybrid rice [J]. Agricultural Science & Technology, 2010,11(8):94 – 97 + 148.

[36] 李 森. 覆膜水稻生理节水机制及水分利用效率评估[D]. 北京:中国农业大学,2017.

[37] 李树杏,王丽丽,涂 敏,等. 水稻覆膜直播干物质积累和产量构成因素的变化[J]. 山西农业科学,2017,45(7):1100 – 1102 + 1133.

[38] 沈康荣,李家军,刘 军,等. 水稻覆膜直播旱作技术的特点及关键技术[J]. 中国稻米,2005(3):29.

[39] 郭 慧,李树杏,杨占烈,等. 覆膜直播与常规手栽种植方式对水稻光合物质生产特征的影响[J]. 华北农学报,2016,31(4):146 – 152.

[40] 周 勇,黄世君,李乾安,等. 高产大穗型水稻品种干物质积累与分配特性研究[J]. 西南农业学报,2014,27(3):910 – 914.

[41] 王友贞,袁先江,许 浒,等. 水稻旱作覆膜的增温保墒效果及其对生育性状影响研究[J]. 农业工程学报, 2002,18(2):29 – 31.

[42] 肖海华,徐 刚,方美玉,等. 水稻覆膜栽培技术对土壤水、热和产量影响研究[C]//中国土壤学会. 面向未来

的土壤科学(上册)——中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集,成都:电子科技大学出版社,2012.

[43] GUO Lin, LIU Meiju, ZHANG Yanan. Yield differences get large with ascendant altitude between traditional paddy and water-saving ground cover rice production system [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 92: 9 - 16.

[44] 郭 琳. 海拔高度和水肥措施对覆膜旱作水稻产量和品质的影响[D]. 北京:中国农业大学,2018.

[45] 刘美菊. 区域尺度覆膜节水栽培体系水稻产量和土壤碳氮储量评价[D]. 北京:中国农业大学,2014.

[46] 张自常. 覆盖旱种对水稻产量与品质的影响及其生理机制[D]. 扬州:扬州大学,2009.

[47] 崔国贤. 覆盖旱作水稻营养生理的变异特征及其适应机理研究[D]. 南京:南京农业大学,1999.

[48] 邓小强,范贵国,王 懿. 施氮量对覆膜栽培水稻经济性状、产量与氮肥利用的影响[J]. 湖北农业科学,2016,55(16):4103 - 4106.

[49] 丰大清,刘祥臣,乔 利,等. 降解地膜与控释肥对再生稻生长及产量的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(3):1 - 7.

[50] 丰大清,刘祥臣,李本银,等. 不同栽培模式对水稻生长发育及产量的影响[J]. 山东农业科学,2012,44(8):49 - 52 + 56.

[51] 袁 玲,张 宣,杨 静,等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. 作物学报,2013,39(2):350 - 359.

[52] 张立成,姚帮松,肖卫华,等. 大田土壤耕作层覆膜防渗灌溉栽培水稻研究[J]. 灌溉排水学报,2016,35(9):36 - 39.

[53] 金欣欣. 覆膜栽培对水稻耗水和节水特性的影响[D]. 北京:中国农业大学,2016.

[54] 石建初,金欣欣,李 森,等. 覆膜旱作稻田水均衡及蒸腾耗水规律分析[J]. 水利学报,2016,47(10):1260 - 1268.

[55] 朱士江,王忠波,张忠学,等. 寒地水稻覆膜灌溉耗水规律及水分生产效率试验研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(6):97 - 99.

