

稻田冬闲期间覆盖稻草的生态效应

尹春梅^{1,2,*}, 谢小立^{1,2}, 王凯荣^{1,3}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农田生态系统
国家野外科学观测研究站, 长沙 410125; 3. 青岛农业大学农业生态与环境健康研究所, 青岛 266109)

摘要: 冬季覆盖和裸田休闲作为两种主要的冬闲方式, 在我国南方地区广泛存在, 且有扩大趋势。研究其生态效应, 具有良好的理论及实践意义。以湖南亚热带双季稻作区为典型研究区域, 以耕层土壤温湿度、田间植被生长、温室气体排放为主要指标, 研究早晚稻草覆盖还田与无覆盖还田两种冬闲方式生态效应的不同。试验结果表明, 稻草覆盖还田对冬闲稻田的生态效应主要包括 4 个方面: 保温、保水、抑制田间杂草生长以及增加了指向大气的 CO_2 排放。覆盖对土温的影响主要在地下 5 cm 层, 试验期内, 温度较无覆盖平均高出 $1.0 \sim 3.2^\circ\text{C}$; 覆盖对耕层水分的影响主要在 $0 \sim 15\text{cm}$ 层, 覆盖与无覆盖之间差异达到极显著水平; 另外覆盖显著改变了冬闲稻田生态系统的 CO_2 与大气的交换情况, 试验期内, 由无覆盖的固定了 CO_2 气体 $4.13 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 转为覆盖处理的净排放 $3.06 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 致使冬闲稻田由大气的碳汇变为碳源。

关键词: 冬闲稻田覆盖; 土壤温度; 土壤含水量 杂草; CO_2 通量

文章编号: 1000-0933(2009)04-2162-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Ecological effect of straw mulch on wintry fallow paddy

YIN Chun-Mei^{1,2,*}, XIE Xiao-Li^{1,2}, WANG Kai-Rong^{1,3}

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 National Observation Station of Taoyuan Agro-ecology System, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

3 Institute of Agriculture Ecological and Environmental Health, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2162 ~ 2168.

Abstract: Straw mulch is a very common measure during wintry fallow period that can last more than five months in southern China. However, few studies have investigated the effects of straw mulch during the winter fallow season. Experiment was started at Taoyuan Agro-ecological station of the Chinese Academy of Sciences to find out the effect of straw mulch on agro-ecosystem and settle a foundation of exploring economically feasible and eco-friendly mulching option. Two treatments were set: with $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ straw mulch in winter and $3500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ straw mulch in late spring per year and CK. Both treatments were replicated twice in a complete randomized block design. Through the experiment, we monitored the dynamics of soil temperature and moisture, CO_2 fluxes from the wintry paddy ecosystem, and investigated the growth of weeds. The results showed that straw mulching on wintry fallow paddy would be heat preservation, the temperature of upper layer ($0 - 5\text{cm}$) was $1.0 - 3.2^\circ\text{C}$ higher than CK; Mulching significantly retarded the loss of soil moisture in surface layer ($0 - 15\text{cm}$), and also restrained the growth of weed. Furthermore, mulching strongly influenced the CO_2 fluxes between agro-ecosystems and atmosphere. During the experiment, while CK fixed $4.13 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ from atmosphere, the mulched treatment released $3.06 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ into air.

Key Words: wintry fallow paddy; straw mulch; soil moisture; soil temperature; weeds; CO_2 fluxes

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX2-YW-423)

收稿日期: 2007-01-22; 修订日期: 2008-12-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yin.cm@163.com

目前,国内外已有大量试验报道稻草覆盖对农田生态系统土壤肥力是有利的^[1~3],我国南方地区秸秆资源丰富,且有研究表明,秸秆还田(土)是南方红壤丘陵区作物秸秆最主要的利用途径之一^[4]。许多学者就秸秆还田的量、还田方式、还田时间等方面作了大量的研究^[4~7],以期能更好实现秸秆的资源化利用。但对于秸秆覆盖对冬季休闲稻田温室气体排放的影响,目前尚未见报道。

冬季休闲稻田作为一种独特的农田生态系统,在我国南方水稻种植区广泛存在,其特点是春夏季种植两季水稻,10月下旬水稻收割后休闲直到翌年4月中旬左右移栽水稻。据不完全统计,南方13省、市、自治区有冬闲田约 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[8],晚稻收割后稻草覆盖还田和裸田休闲是最主要的两种冬季休闲方式。近年来东南部经济发展较快,农业生产比较效益低,冬闲田面积呈扩大趋势。鉴于秸秆还田能取得较好的增产效果,有改良土壤、培肥地力的作用^[9],同时省工省力,农民越来越趋向于将稻草收割后直接还田。

如何进行冬闲田的管理及其生态效益评价是十分有意义的工作,本试验以此为研究目标,旨在了解稻草覆盖对冬闲的稻田生态系统的作用和影响过程,综合评价稻田冬闲稻草覆盖的农田生态效应,不仅可以填补学术上关于这一问题的研究空白,而且可为冬闲覆盖稻草在南方地区的推广应用和发展方向提供理论参考,具有广阔的应用前景。冬闲期间稻草覆盖还田作为我国南方地区普遍应用的稻田冬闲方式,其社会效益、经济效益和生态效益都是非常值得探讨的问题。

1.1 研究区概况及试验设计

试验在中国科学院桃源农业生态站(28°55'N、111°30'E、海拔91.6m)、于2003年开始的定位试验田进行,代表区域为亚热带红壤丘陵农田生态类型区,属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候区,年平均气温16.5℃,年降雨量1447.9mm,年蒸发量1157mm,日照时数1531.4h,太阳辐射422.6kJ·cm⁻²。

试验区土壤为第四纪红土发育的水稻土,耕层厚度约20cm。土壤基本肥力性状为:有机碳15.1g·kg⁻¹,全N1.76g·kg⁻¹,全P0.60g·kg⁻¹,全K14.9g·kg⁻¹,Olsen-P5.90mg·kg⁻¹,pH5.04。试验设两个处理:稻草覆盖还田休闲(A)与裸田休闲(早晚稻均无稻草覆盖,B),每处理设两次重复。其他农事措施与管理措施均与当地农户种植水平一致。种植制度为早稻-晚稻-冬闲。覆盖秸秆还田量:早稻为4000kg·hm⁻²(晚稻干草),于前季晚稻收割后15d左右还田,晚稻为3500kg·hm⁻²(早稻鲜草,折干重),于早稻收割后3d内还田。稻草覆盖之前切成5~6cm长的碎段,均匀撒于土表。休闲期间不集雨不灌水。

1.2 野外观测和实验室测定方法

CO₂通量的测定采用透明静态箱式法。静态箱由箱体与箱底座组成,为活盖箱,箱体由65cm×65cm×90cm的有机玻璃板制成,其箱基部分在试验过程中一致固定嵌在土壤中,箱基和箱盖之间用粘贴的可压缩橡胶密封条进行密封。箱体侧上部有一接口与CO₂分析仪连接,上部安装2个由220V交流电源供电的直径15cm的电风扇。观测开始于晚稻收割后第5天(2005年10月20日),至稻田淹水犁耕前一天(2006年4月3日)结束,试验时间跨度为164d。观测频率为每周1次(如遇雨天则适当调整测定日期),测定间隔时间2h。每个静态箱每次测定持续时间为10min,气体流速为0.4L·min⁻¹。测定时箱盖短时间关闭,测定完毕后立即打开箱盖。气体分析用CI-310PS便携式光合作用测定仪(美国CID公司)的single channel absolute功能进行测定。测定同时记录气压及气温数据。通过线性回归计算该时间间隔内CO₂浓度随时间的变化速率以代表CO₂排放通量^[10, 11]。

土壤水分含量采用烘干法。采集耕层3种深度(0~10cm、10~15cm、10~20cm)土壤测定含水量。平均间隔为两周,测定日期尽量与CO₂测定日期一致。

土壤含水量用质量分数表示,计算公式为: $W\% = \frac{M_{\text{鲜}} - M_{\text{干}}}{M_{\text{干}}} \times 100\%$

式中,W为含水量质量分数, $M_{\text{鲜}}$ 为土壤质量鲜重, $M_{\text{干}}$ 为烘干后土壤质量。

在各处理小区内埋设曲管地温计测量土壤耕层各层次温度,深度分别为土表(0cm)、地下5、10cm和20cm。平均测定间隔为1周,温度测定日期与CO₂测定日期保持一致。测定日每间隔2h读数1次。

每月 1 次随机选取试验小区内面积 0.5 m^2 样方,将杂草连根拔起,洗净、杀青、烘干,测定杂草干物质量,每小区两次重复取均值,用以表示杂草生长情况。

1.3 数据分析

采用 DPS 数据处理系统进行数据处理,Student'- t 测验法进行成对比较, $p < 0.05$ 作为差异显著水平。

CO_2 通量测定和温度测定均为 2h 测定 1 次,以处理均值表示测定时间点的测定值, CO_2 日通量以积分法计算,日平均温度以 12 次测定的均值计算。

2 结果与讨论

2.1 冬闲稻草覆盖还田影响耕层土壤水分含量

冬闲稻草覆盖还田对耕层土壤质量含水量的影响情况如图 1 所示。试验期内,稻草覆盖还田与无覆盖处理相比,0~10cm 和 10~15cm 土壤含水量平均分别提高了 9.22% 和 9.27%。采用 Student'- t 测验法对两处理进行成对样本的均值分析,结果表明,稻草覆盖还田与不还田处理土壤 0~10cm 和 10~15cm 层含水量差异均达到了极显著水平。 $(t = 6.88 > t_{0.01} = 3.11 \quad p < 0.01; t = 4.34 > t_{0.01} = 3.11 \quad p < 0.01)$ 。而两处理的 15~20cm 土壤含水量则无显著差异。

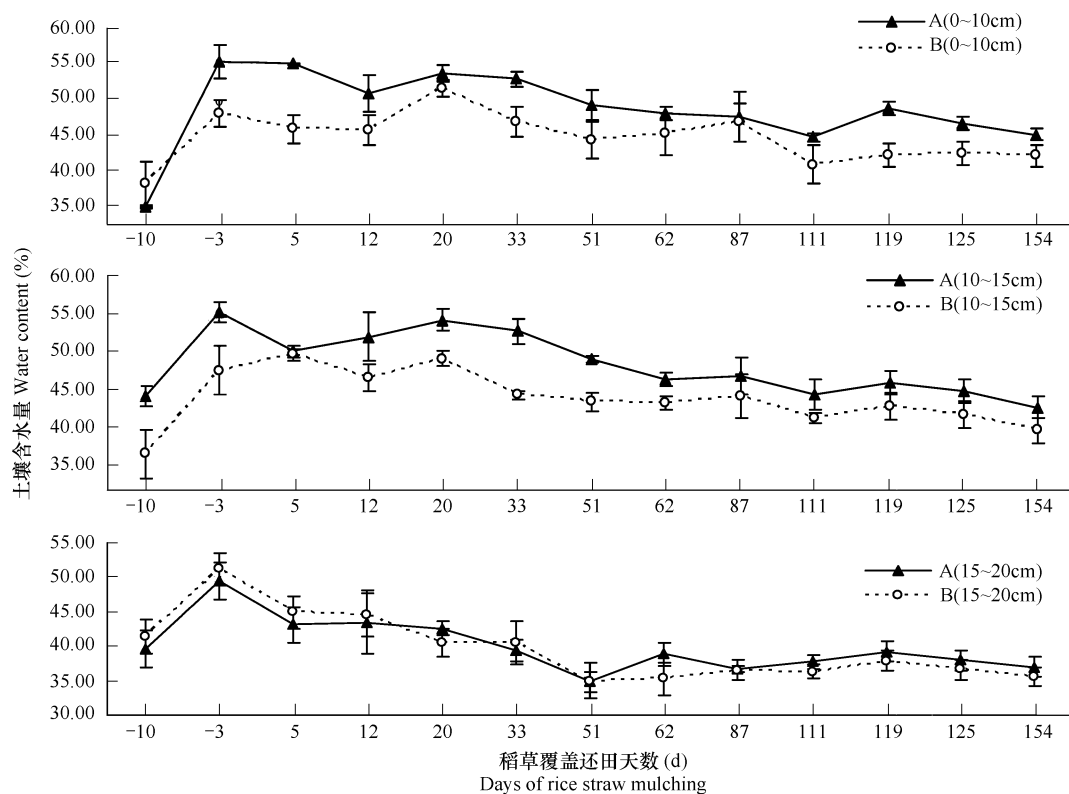


图 1 稻草覆盖还田对土壤水分含量的影响

Fig. 1 Effect of straw mulch on soil water content

冬闲期间稻草覆盖还田对土壤水分的影响主要体现在耕层 0~15cm 范围内。农田的蒸散耗水主要以土壤蒸发为主,在稻草覆盖表土后,土壤蒸发被有效抑制。通过覆盖,一方面减少了土壤水蒸发散失,从能量平衡的角度来讲,稻草覆盖后,由于覆盖阻隔了阳光的直接辐射,对太阳辐射的反射率高,产生的辐射热总量小于裸露地面,覆盖的地面和上部耕层形成了较低温度环境,降低了扩散进入大气的水汽传导速率,同时地表的稻草能截留部分水分,使之重新回到土壤,从而能有效减少土壤蒸发量,促进了秸秆覆盖的保水效果;另一方面保护了土表结构,利于雨水渗入、减轻径流发生^[12]。

稻草秸秆具有较强的吸湿性,在降雨时可吸持较多水分。在土壤湿度较小(土壤含水量占田间持水量的

40%~65%)的条件下,秸秆覆盖能够有效地抑制土壤蒸发,保持土壤水分,改善土壤水分供应状况^[13]。其机理为秸秆覆盖后使地面增加了一层天然保护层:①由于覆盖于地表的秸秆容水和阻水作用,可以使土壤免受风吹日晒和雨淋的直接冲击,保护土层土壤结构,提高土壤入渗率,减缓了地表径流量,延长了土壤水分的保墒时间;②可以隔断蒸发表面与下层土壤的毛管联系,减弱土壤空气与大气之间的交换强度,有效的抑制蒸发。试验期间,稻草覆盖处理与无覆盖处理比较,耕层0~15cm土壤含水量均达到了差异显著水平,说明覆盖对休闲期间耕层土壤水分起到了良好的保持作用,稻草覆盖产生了明显的水分表聚现象。本试验中,土壤水分的变化与CO₂通量之间没有显著的相关关系,可能是因为在水分不成为限制因子的条件下,土壤呼吸和土壤含水量不构成相关^[14],截断了土壤含水量对CO₂通量的影响途径。

2.2 冬闲稻草覆盖还田影响土壤温度

根据试验结果,稻草覆盖后,土壤温度的日变化振幅减少,极值温差缩小,土壤午间的最高温度降低,而对早、晚的温度影响较小。在表层,由于覆盖物的遮盖,白天以降温和夜间则以保温为主。覆盖较对照的地表温度在11:00~15:00相差最大,最多时较无覆盖低4.7~7.9℃。稻草覆盖地温的变化,随日光照射的强度而有差异,光照越强,气温越高,则无覆盖比覆盖处理的地表温度高得越多。稻田冬闲期间,覆盖处理地表温度日平均增加-0.3~2.6℃。地表以下则覆盖均表现为保温作用,地下5cm层(Tg5)日均可增温1.0~3.2℃,稻草覆盖和无覆盖处理在试验期间的Tg5曲线如图2所示。稻草覆盖20d左右,覆盖有极显著的增温效果,这是因为这期间气温突然降低的缘故;覆盖40d以后,稻草表现为增温效应,且覆盖在高温时表现为降温,低温时则起升温的作用^[15]。随着土层深度的增加,处理间温差越来越小,据本试验测定结果,在地下20cm层仍有0.3~1.5℃的增温效果。

2.3 冬闲稻草覆盖影响田间杂草生长

冬闲期间稻田植被主要是一种名为看麦娘(后文简称杂草)的杂草。看麦娘(*Alopecurus aequalis* Sobol),别名麦娘娘、麦陀陀、棒槌草、晃晃草、野麦属,禾本科越年生或1年生杂草。看麦娘在冬闲稻田中的生长期约130d(2005年12月至2006年3月中下旬),田间试验表明,稻草覆盖后,显著地抑制了田间杂草的发芽和生长,稻草覆盖还田处理杂草发芽期(1月2日测定)和生长盛期(3月2日测定)生物量干重分别为6.83 g·m⁻²、26.56 g·m⁻²,分别为无覆盖处理的83%和54%。

秸秆覆盖对杂草的抑制机理据目前报道,一是由于秸秆覆盖的遮荫作用^[16],制约了某些喜光性杂草的生长,或者阻碍了杂草生长所需要的某一特定波长光的透入^[17],另一是由于生物种间的他感效应^[18]。

2.4 稻草覆盖影响冬闲期稻田CO₂通量

二氧化碳是最主要的温室气体之一,稻田生态系统对大气温室气体的吸收/排放以及对全球气候变化起着不可忽视的影响^[19,20]。农业生态系统对全球变化的影响主要是通过改变温室气体在土壤大气界面的交换而实现的。

由图3可以看出,覆盖对稻田生态系统CO₂通量的影响以覆盖后1个月以内影响最为显著。整个试验期间,稻草覆盖对CO₂的排放表现出正效应,即,相对于不还田处理,增加了CO₂的排放,且增加量随气温升高呈上升趋势。为表示CO₂通量的方向,以指向大气的CO₂通量为正,指向稻田生态系统的通量为负。结果表明,稻草覆盖还田后10d左右,微生物的活动开始增强,稻草腐解过程开始,覆盖处理与没有覆盖处理相比指向大气的CO₂通量平均高出187.9 kg·hm⁻²·d⁻¹;覆盖25d左右与不覆盖处理之间的CO₂通量差达到最高值199.5

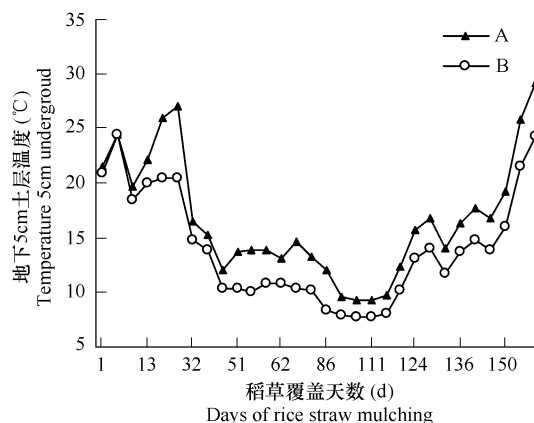
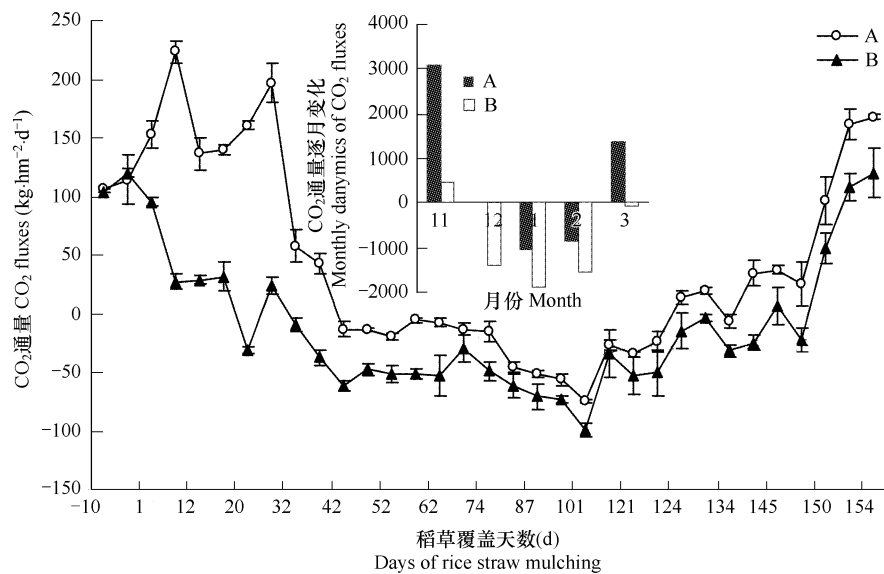


图2 覆盖稻草对Tg5的增温效果
Fig. 2 Effect of rice straw overlain on Tg5

图3 稻草覆盖对CO₂通量季节动态的影响Fig. 3 Effect of straw mulch on seasonal dynamics of CO₂ fluxes in fallow paddy

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 覆盖后的40d内, 覆盖处理的CO₂通量比无覆盖处理平均约高 $182.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。覆盖通过温度主要影响土壤呼吸部分的CO₂通量。

按月份来看, 12月、1月、2月份3个月是冬闲稻田固定大气CO₂的阶段。3月起, 气温开始回升, 杂草衰亡开始, 稻田生态系统转而开始向大气排放CO₂气体。稻草覆盖还田的月均通量和日均通量均显著高于不还田处理($t = 4.05 > t_{0.05} = 2.77$, $p < 0.05$; $t = 5.92 > t_{0.01} = 2.75$, $p < 0.01$)。试验表明冬闲覆盖稻草通过减少气温波动对土温的影响强度, 从而减小整个耕层土壤温度日变化幅度, 与无覆盖处理相比, 土壤耕层水分含量丰富, 土温适宜, 同时又为土壤微生物的活动提供了丰富的可溶性能源物质, 土壤综合生态因子的改善, 激发了土壤微生物细胞大量繁殖^[25,26], 土壤微生物的活动必然更趋活跃, 而土壤生物活性的提高和微生物活动的加强又必然促进秸秆的分解转化, 进一步改善土壤生态环境, 又必促进土壤生物活性和微生物活动, 形成互促效应。这与杨靖春^[21]在草原所得的结果相似覆盖前期覆盖处理比无覆盖处理CO₂排放量大的重要原因。

杂草看麦娘在冬闲稻田中的生长期约120d(2005年12月至2006年3月), 对于CO₂通量的变化起着非常重要的作用。杂草的呼吸与光合作用, 占稻田生态系统CO₂通量变化的80%以上(以白天和夜间的变化差计算), 覆盖处理减少了杂草生物量, 成为无覆盖处理与PAR的相关性更好的重要原因, 也是稻草覆盖还田后期(时间上与杂草生长盛期同步)覆盖处理较无覆盖处理CO₂排放量大的主要原因。田间杂草的减少对CO₂通量的影响主要体现在白天。

综合而言, 冬闲覆盖稻草, 一方面由于改善了土壤环境, 使之更适于微生物的生长而增加了土壤呼吸作用CO₂的释放, 另一方面, 由于覆盖减少了自然植被生长, 从而减少了植被的光合而导致对CO₂的吸收能力减弱。

稻草覆盖处理在试验期间日均排放通量为 $1.99 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 而其对照不还田处理日均排放通量为 $-2.68 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。也就是说稻草覆盖处理在整个试验期间约向大气排放CO₂气体 $3.06 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 而无覆盖处理则从大气固定了CO₂气体 $4.13 \text{ tCO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 约占稻田生态系统全年吸碳量的1/5^[22]。按照娄运生等^[23]的研究结果, 在我国中亚热带测得的农田土壤CO₂年排放通量 $13.7 \sim 27.3 \text{ tCO}_2 / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 红壤稻田冬闲期间若采用覆盖处理, 则约使中亚热带农田土壤CO₂年排放通量增加 $11.22\% \sim 22.33\%$, 若采用无覆盖处理, 且冬闲期间以杂草为植被计算, 则减少了 $15.13\% \sim 30.15\%$ 的农田生态系统CO₂年排放通量。由此可见, 冬闲期间的CO₂通量状况, 在亚热带稻田生态系统乃至整个农田生态系统CO₂通量年际变化中占极其重要地

位,冬闲稻草覆盖对 CO_2 通量所产生的影响,无论是从量上来看,还是从最后的吸收转为排放的结果来看,都是非常值得关注的问题。

3 结论

稻草覆盖还田对冬闲稻田的生态效应主要包括 4 个方面:保温、保水、抑制田间杂草生长以及增加了指向大气的 CO_2 排放。将稻草用于稻田冬闲覆盖,相比于秸秆燃烧,大大减少了直接排入大气中 CO_2 的量,也没有燃烧过程向大气排放的颗粒物污染,还增加了稻田土壤有机碳的积累。据叶文培等^[9]的研究发现,相较于早稻收获后的稻草还田对晚稻产量的影响,晚稻收获后覆盖还田对早稻产量的增益更大,并且紫云英的种植可以作为早稻的基肥,有利于早稻生产。已有报道称^[25],秸秆还田量过多会使作物减产,因为还田量越大,短时间积累各种有机酸和 CO_2 的浓度也就越高,对水稻生长的有害影响也越大。从经济效益和水稻的产量效益两方面来讲,建议将早稻稻草异地还田,如用于红壤旱地覆盖^[26]。稻草还田作为农田废弃物循环利用、改善土壤理化性质、培肥地力的一种重要手段,有其存在的必要性,但由于其也有一定的负面效应,需要掌握一定的方法和措施。结合本文研究结果而知,稻草还田的时间宜在晚稻收割后进行,稻田冬闲覆盖稻草可以抑制杂草、培肥土壤,有良好的生态效应,同时利于早稻生产具有良好的经济效益。并且稻草冬闲覆盖的同时需要配合其他的田间管理措施,如种植紫云英等,可以减少由覆盖导致的 CO_2 排放增加,使冬闲稻草覆盖的效应达到社会、经济和生态效益的有机统一。

References:

- [1] Bruce R R, Langdale G W, Dillard A L. Tillage and crop rotation effect on characteristics of a sandy surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54, 1744—1747.
- [2] Halvorson A, Peterson G A, Reule C A. Tillage system and crop rotation effects on dryland crop yield and soil carbon in the central Great Plains. *Agronomy*, 2002, 94: 1429—1436.
- [3] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 906—912.
- [4] Zhu Q H, Huang D Y, Liu S L, *et al.* Status and prospects of crop straw comprehensive utilization in hilly red soil region. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1483—1486.
- [5] Hentiksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35: 41—48.
- [6] Salinas-Garcia J R, Hons F M, Matocha J E. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 152—159.
- [7] Ye W P, Xie X L, Wang K R, *et al.* Effects of rice straw manuring in different periods on growth and yield of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008(1): 65—70.
- [8] Xu Q, Yang L Z, Dong Y H, *et al.* Rice paddy ecological system in China. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [9] Zeng M X, Wang R F, Peng S Q. Summary of returning straw into field of main agricultural areas in China. *Soil Science*, 2002, 33(5): 336—339.
- [10] Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758—764.
- [11] Zheng X H, Xu Z J, Wang Y S, *et al.* Determination of net exchange of CO_2 between paddy fields and atmosphere with static technique-chamber-based measurements. *Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1240—1244.
- [12] Shen Y H, Huang X G, Wang H Q. Field Effects of Straw Mulching. *Agric. Research in Arid Areas*, 1998, 16(1): 45—50.
- [13] Zhang K L, Cheng X Y. Mulching effect on water and soil conservancy. *Water Conservancy Technology and Economy*, 2005, 11(7): 434—435.
- [14] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biochemistry*, 2000, 48: 53—69.
- [15] Jiang Y H, Yu Z R, Ma Y L. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth. *Soil Science*, 2001, 32(5): 209—213.
- [16] Prihar S S, Sandhu K S, Khera K L. Maize (*Zea mays* L.) and weed growth as affected by levels of mulching with and without herbicide under conventional and minimum tillage. *Indian Journal of Ecology*, 1976, 2: 13—22.

- [17] Ossom E M, Pace P F, Rhykerd R L, *et al.* Effect of mulch on weed infestation, soil temperature, nutrient concentration, and tuber yield in *Ipomoea batatas* (L.) Lam. In Papua New Guinea. Tropical Agriculture (Trinidad) 2001, 78: 144—151.
- [18] Wang L F. Agro-ecology. Xi'an, Shanxi: Sciences and Technology Press, 1994. 46—57.
- [19] Li K R. Land use change, greenhouse gases emission and carbon cycle of terrestrial ecosystem. Beijing: China Meteorology Press, 2002. 60—67.
- [20] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(3): 100—109.
- [21] Yang J C, Ni P, Zu Y G, *et al.* Study on the microbial respiration in *Leymus chinensis* grassland. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(6): 139—143.
- [22] Zhu Y L, Wu J S, Zhou W J, *et al.* CO₂ emission from the paddy ecosystem in subtropical region and its influence factors. China Environmental Science, 2005, 25(2): 151—154.
- [23] Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. CO₂ emissions from upland and paddy red soils in mid-subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 978—983.
- [24] Wang L H, Hu Y G, Yang G L. Carbon fixation by winter cover crops in South China and the effects of WCC on rice yields. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 616—619.
- [25] Shan Y H, Cai Z C, Han Y. Accumulation of organic acids in relation to C: N ratios of straws and N application in flooded soil. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 941—947.
- [26] Roberts T D, Harrington C A, Terry T A. Harvest residue and competing vegetation affect soil moisture, soil temperature, N availability and Douglas-fir seedling growth. Forest Ecology & Management, 2005, 205: 333—350.

参考文献:

- [4] 朱奇宏, 黄道友, 刘守龙, 等. 红壤丘陵区农作物秸秆综合利用现状与展望. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1483—1486.
- [7] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 李志国. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响. 中国水稻科学, 2008(1): 65—70.
- [8] 徐琪, 杨林章, 董元华, 等. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [9] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪. 我国主要农区秸秆还田试验总结. 土壤通报, 2002, 33(5): 336—339.
- [10] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758—764.
- [11] 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高影响稻田-大气 CO₂ 净交换的静态暗箱法观测研究. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1240—1244.
- [12] 沈裕琥, 黄相国, 王海庆. 秸秆覆盖的农田效应. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 45—50.
- [13] 张克林, 程秀英. 秸秆覆盖的水土保持生态环境效应. 水利科技与经济, 2005, 11(7): 434—435.
- [15] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响. 土壤通报, 2001, 32(5): 209—213.
- [18] 王留芳主编. 农业生态学. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- [19] 李克让主编. 土地利用变化和温室气体排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2002.
- [20] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻图有机碳固定研究的建议. 南京农业大学报, 2002, 25(3): 100—109.
- [21] 杨靖春, 倪平, 祖元刚, 等. 东北羊草草原土壤微生物呼吸速率的研究. 生态学报, 1989, 9(6): 139—143.
- [22] 朱咏莉, 吴金水, 周卫军, 等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 排放及影响因素. 中国环境科学, 2005, 25(2): 151—154.
- [23] 娄运生, 李忠佩, 张桃林. 不同利用方式对红壤 CO₂ 排放的影响. 生态学报, 2004, 24(5): 978—983.
- [24] 王丽宏, 胡跃高, 杨光立. 南方冬季覆盖作物的碳蓄积及其对水稻产量的影响. 生态环境, 2006, 15(3): 616—619.
- [25] 单玉华, 蔡祖聪, 韩勇, 等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及氮供应的关系. 土壤学报, 2006, 43(6): 941—947.