

DOI:10.11937/bfyy.201506049

农田生态系统土壤呼吸作用的研究进展

吴丹娜¹, 江洪^{1,2}, 张金梦¹

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300;

2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要:农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分。我国是农业大国,为农田生态系统土壤呼吸作用的研究创造了很好的条件。文章综述了中国农田土壤呼吸近 10 年来的研究进展,指出了土壤温湿度、作物生理生长状况和田间管理措施是影响农田土壤呼吸作用的主要影响因子。同时指出了农田土壤呼吸作用的时间变化特点和空间变化特点,及当下农田土壤呼吸研究的几个问题,应加强农田土壤呼吸的区域性研究和比较,标准化和规范化土壤呼吸的试验设计和测定方法,扩大作物研究范围为农田生态系统碳循环碳源和碳汇的问题提供依据。

关键词:农田生态系统;土壤呼吸作用;碳循环

中图分类号:S 155.4⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)06-0178-05

在过去的 100 年里,地球表面平均温度升高了 0.74℃^[1],大气中 CO₂ 浓度上升了近 25%,每年还在继续上升。温室气体的不断累积,使全球气候产生了巨大变化。有关研究发现,人类活动导致的碳排放是引起 CO₂ 浓度增长的主要原因。农田生态系统是人类活动最活跃的生态系统,又是陆地生态系统的重要组成部分,研究农田生态系统碳收支规律,为研究全球气候变化提供了依据。

第一作者简介:吴丹娜(1989-),女,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为生态系统分析与物联网监测。E-mail:nbwbn103@163.com.

责任作者:江洪(1955-),男,博士,教授,现主要从事生态系统碳-氮-水循环及全球变化和植物生理生态等研究工作。E-mail:jianghong_china@hotmail.com.

基金项目:上海市战略性新兴产业重大资助项目(重大 2013-14 号);2012 年上海市科技兴农推广资助项目(沪农科推字 2012 第 1-4 号);2013 年上海市科委生态崇明重点支撑资助项目(13231204400);上海市科委 2013 年度“创新行动计划”上海工程技术研究中心建设资助项目(13DZ2250900)。

收稿日期:2014-11-20

1 农田土壤呼吸作用的测定方法

1.1 微气象法

微气象法包括涡度相关法、松弛涡度累积法、空气动力学方法、能量平衡法,其中使用最多的方法是涡度相关法。涡度相关法是应用微气象原理,直接测量植被层上方的 CO₂ 涡流传递速度,再进一步计算出植被群落的碳收支动态变化^[2]。涡度相关法是一种非破坏性的微气象学技术,适合较大范围的长期观测^[3],在农田生态生态系统碳通量的观测中已有较广泛的应用,如张雪松^[4]对冬小麦农田生态系统碳-水循环特征的研究。但是,微气象法也有缺点,如要求热力中性大气条件、地面宏观均匀、广阔的逆风向区^[5]。

1.2 气室法

1.2.1 静态气室法 静态气室法分为静态碱液吸收法和静态密闭气室法。静态碱液吸收法(AA)是测定土壤呼吸的传统方法^[6-7],通过碱液(KOH 和 NaOH)吸收土壤释放的 CO₂ 的量来标定一定时间内土壤呼吸量。该方法经济、使用简单,适用于土壤呼吸空间变化较大的区域^[8],但是精度较差,需要重复试验提高测量的准确性。目前,静态碱液吸收法在生态系统土壤呼吸试验中

Abstract: As small non-coding RNAs, microRNAs regulate gene expression and protein translation in post-transcriptional level. microRNAs have emerged as master regulators of plant development. In this review, synthetic process of microRNA and target genes identification was introduced. This review also provided a coherent set of research progress in the aspect of plant development and stress regulation.

Keywords: microRNA; target identification; post-transcriptional; abiotic stress

得到广泛应用,如草原生态系统^[9-10]、森林生态系统^[11]、沙地生态系统^[12]等。近年来,在农田土壤呼吸研究中也较有广泛的应用,如诸葛玉平等^[13]对黑土土壤呼吸过程的研究,张庆忠等^[14]研究秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响。静态密闭气室法,用专用密闭集气装置收集气体,实验室内用气相色谱分析仪^[15]或红外分析仪测定CO₂的量,再利用浓度差来计算土壤呼吸量。该方法精确度较高,但是伴随着较高成本,故普遍率不高。乔云发等^[16]研究不同施肥对黑土土壤呼吸的影响时就使用了气相色谱分析仪。

1.2.2 动态气室法 动态气室法主要应用远红外气体分析法(IRGA),根据该方法可将动态气室法分为动态密闭气室法和开放气流红外CO₂分析法。动态密闭气室法是通过测定土壤CO₂的累积量来测定土壤呼吸的,该方法经济方便、精度较高,而且便于携带。随着远红外气体分析技术及相关仪器的不断改进,动态密闭气室法已经成为目前最为流行的测定方法,相关仪器以美国Li-Cor公司的最著名,如Li-Cor6400便携式气体分析系统、Li-Cor6400-09土壤呼吸室和Li-Cor8100开路式土壤碳通量测量系统。韩广轩等^[17]对玉米的研究、寇太记等^[19]对冬小麦的研究、张前兵等^[18]对绿洲棉田的研究,分别用到了上述3种土壤呼吸测量系统。开放气流红外CO₂分析法是使用红外CO₂分析仪和气室连接,通过计算进出口装置土壤的瞬时CO₂浓度差得到土壤呼吸的量。寇太记等^[19]的研究表明,动态气室法的数值的变异程度一定程度上略高于静态气室法的相应结果,但是2种测定方法所得到的土壤呼吸均达到显著差异。

2 农田土壤呼吸作用的影响因子

2.1 土壤呼吸速率与土壤温湿度

土壤呼吸通常包括3个生物学过程,分别为植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸和1个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用)。其中,植物根系呼吸和土壤微生物呼吸所产生的CO₂量占土壤呼吸总量的绝大部分。就植物根系呼吸而言,在森林生态系统中,根系呼吸量约占土壤呼吸总量的40%;在草地生态系统中,根系呼吸量占约30%^[20]。而土壤温湿度强烈影响植物根系呼吸,对土壤微生物和土壤动物的呼吸和含碳矿物质的化学氧化作用也会产生一定的影响。

由于受灌溉等人为因素影响,农田生态系统的土壤呼吸速率季节变化主要与土壤温度有关,如表1所示,与土壤湿度的相关关系不显著或无明显规律。高翔^[21]对旱作春玉米的水碳变化规律的研究表明,由于该年在玉米生育期内,降雨量充足而且分布均匀,土壤中的水分能满足玉米在各个生长期的水分需要,因此该年土壤湿度在日变化和季节变化尺度上对土壤呼吸速率的影响都没有显著的规律。农田生态系统中,只有在极端条件下,土壤湿度才会对土壤呼吸作用起限制作用。陈述悦等^[22]研究发现,夏季的小麦田里的土壤呼吸作用和土壤含水量的最高点和最低点几乎是同步的。

农田生态系统土壤呼吸作用与土壤温度的关系如表1所示,二者关系多呈指数函数关系,如靳东升等^[23]对工矿复垦区玉米农田土壤呼吸的研究,张风霞等^[24]对科尔沁沙地典型玉米农田土壤呼吸的研究。也有少数线性相关关系,如刘武仁等^[25]对玉米秸秆还田对土壤呼

表1 土壤温湿度对农田生态系统土壤呼吸作用季节变化的影响

Table 1 Effect of temperature-humidity of soil on seasonal variations of soil respiration in farmland ecosystems

| 作物类型 | 地点 | 测定时间 | 温度 | 函数关系 | 湿度 | 参考文献 |
|-------|---------|------|--------------------|------|------------------------------|------|
| | | | 层次 | | | |
| 玉米 | 山西省孝义市 | 全年 | 5 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [23] |
| | 山西省寿阳县 | 生长季 | 气温 | 线性相关 | 不相关关系 | [21] |
| | 山西省寿阳县 | 生长季 | 10 cm 土壤温度 | 指数函数 | 降雨明显抑制了土壤呼吸及其分量 | [28] |
| | 内蒙古奈曼旗 | 全年 | 5、10、15 cm 土壤温度 | 指数函数 | 土壤呼吸速率与大气相对湿度显著正相关 | [24] |
| | 辽宁省锦州市 | 生长季 | 5 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [29] |
| | 吉林省公主岭市 | 全年 | 5 cm 土壤温度 | 线性相关 | | [25] |
| | 辽宁省沈阳市 | 生长季 | 10 cm 土壤温度 | 线性相关 | | [17] |
| | 山西省太原市 | 全年 | 10 cm 土壤温度 | 线性相关 | 标准化后,土壤呼吸与土壤水分呈极显著相关 | [30] |
| | 辽宁省锦州市 | 生长季 | 10 cm 土壤温度 | 指数函数 | 土壤呼吸速率与近地表的空气相对湿度呈显著负相关 | [31] |
| | 河南省洛阳市 | 生长季 | 5 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [32] |
| 小麦 | 江苏省江都市 | 生长季 | 10 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [19] |
| | 山东省禹城市 | 生长季 | 5 cm 土壤温度 | 指数函数 | 土壤温度趋于一致时,土壤呼吸速率与土壤含水量成正相关关系 | [33] |
| | 山东省禹城市 | 生长季 | 5 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [22] |
| 冬小麦 | 河南省封丘市 | 生长季 | 气温和 5、20 cm 土壤温度 | 线性相关 | 土壤呼吸通量与土壤水分的相关性不显著 | [34] |
| 夏玉米轮作 | 山东省桓台县 | 全年 | 5、10、15、20 cm 土壤温度 | 指数函数 | 不相关关系 | [14] |
| 棉花 | 新疆乌兰乌苏市 | 生长季 | 10 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [18] |
| 水稻 | 湖南省长沙市 | 全年 | 5、10、20 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [35] |
| 大豆 | 江苏省南京市 | 生长季 | 5 cm 土壤温度 | 指数函数 | | [36] |

吸速率影响的研究。

有关研究表明,根据土壤温度和土壤湿度建立的模拟方程可以解释 54% 的土壤呼吸的季节性变异^[26]。除了土壤温度和土壤湿度外,作物的生理生长状况和土壤呼吸作用也有着重要的联系。有研究指出,土壤呼吸速率与植物叶面积指数和细根生物量之间呈正相关关系^[27]。对玉米施氮的研究也发现,随着玉米根系的生长,玉米土壤呼吸速率也有较明显的季节变化,土壤呼吸速率在一定程度上能反映出玉米的生长状况。

2.2 土壤呼吸速率与田间管理措施

不同于其它生态系统,农田生态系统受人类活动干扰最大,耕作、排灌和施肥等田间管理活动将直接或间接地改变农田生态系统的土壤环境。农田耕作会改变土壤的物理结构,使原本埋在土壤底部的有机质暴露到空气当中,加速土壤有机质的氧化,进而增加了土壤中 CO₂ 向大气的释放量^[37-39];排灌包括排水和灌溉 2 个方面,排水一般是在发生涝害的情况下进行,而灌溉则是在土壤干旱缺水的情况下进行,二者都能够在促进植被生长的同时显著提高土壤呼吸速率;氮肥有机肥的施加,通过提高土壤中有机质的含量,为土壤呼吸提供充足的底物,加快作物根系呼吸速率,促进作物的生长。

有研究表明,免耕是对土壤扰动最小的耕作方式,实行免耕作可以减少土壤有机质的流失,延长有机质在土壤中的分解时间,可以一定程度上减缓土壤呼吸速率^[40],王永强等^[41]的相关研究也得到了类似的结论,并指出采用这种保护性耕作方式,可以重新固定 60%~70% 损失碳。氮钾肥的施用会使土壤 pH 值显著降低,土壤呼吸速率增强,如果在相同氮钾肥施肥水平的情况下增加有机肥的施用比例,土壤呼吸强度增强的更加显著^[42]。在玉米苗期和拔节孕穗期施加氮肥,土壤呼吸量没有显著变化,而在玉米抽穗开花期和成熟期,增施氮肥显著增强了土壤呼吸速率^[26]。施加有机肥对温室种植的西红杮的土壤呼吸也有深刻影响,有机肥的施加改善了土壤的理化环境,促进了微生物的繁殖,加快了西红杮根系代谢^[43]。随着秸秆还田量的增加,CO₂ 排放量呈逐渐增加的趋势,随着小麦进入灌浆期,土壤呼吸值增高,CO₂ 排放量达到麦季的最高值^[44]。在华北平原冬小麦-玉米轮作的高产粮区,随着秸秆还田量的增加土壤呼吸量也随之增加,但随着时间推移增加的量逐渐减少,且秸秆还田对土壤呼吸的作用要在秸秆还田后一段时间才能体现出来^[14]。李玮等^[45]对黄淮海平原夏玉米土壤呼吸的研究中也得到了相似结论,秸秆还田对农田土壤呼吸有显著影响。

3 农田土壤呼吸的时空变化

3.1 农田土壤呼吸的时间变化

对农田土壤呼吸作用的研究中,土壤呼吸日变化和

季节变化的研究占很大比例,研究结果也较为相近,总体表现出明显的日变化规律和季节变化规律,且土壤呼吸速率与温度多呈显著指数函数关系,如表 1 所示。

农田生态系统土壤呼吸作用存在明显的昼夜波动变化,多呈现为单峰型曲线,这与森林生态系统^[46]和草原生态系统^[47]等的土壤呼吸日动态变化研究结果一致,且与土壤温度的日变化具有较好的一致性,呼吸速率随温度的升高而加快,随温度的降低而减慢,尤其是 5 cm 深处的土壤温度的变化趋势与土壤呼吸速率的变化趋势最为相似^[48]。邓爱娟等^[33]在华北平原地区对麦田的研究发现土壤呼吸速率日变化最高值和最低值分别出现在 12:30—14:30 和 5:00—6:30,这与之前陈述悦等^[22]在相同区域对麦田所得到的研究结论相近,研究结果表明土壤呼吸速率日变化最高值出现在 13:00 左右,最低值在 4:00 左右。不同种作物土壤呼吸速率会有不同程度的差异,同种作物不同生育时期的土壤呼吸速率也会有差异。新疆干旱区棉田,盛花期土壤呼吸最高值出现在 15:00—17:00,而盛铃期最高值在 15:00 就能达到^[18]。

农田生态系统土壤呼吸作用还表现出明显的季节动态变化,主要的影响因子是当地的水热条件。通常情况下,土壤呼吸速率的最高值出现在夏季,最低值出现在冬季或初春。陶祥云^[49]对三江平原“空育 131”、“龙粳 18”和“垦鉴稻 6”这 3 个水稻品种的研究发现,CO₂ 排放峰值均出现在温度和降水量较高的夏季。华北平原冬小麦田土壤呼吸速率,在冬季温度较低时最低值为 31.23 mg·m⁻²·h⁻¹,随着春季温度缓慢回升土壤呼吸速率加快,到夏季达到最高值为 606.85 mg·m⁻²·h⁻¹^[22]。5 月份玉米播种前土壤温度较低,植物根系呼吸和土壤微生物呼吸均较弱,土壤呼吸速率也较低;随着夏季的到来,气温逐渐上升,6 月份下旬玉米快速生长,土壤呼吸速率也显著加快;到 8 月份上旬气温上升至最高,土壤呼吸速率也随之达到最高值^[23]。山西省寿阳县旱作春玉米的研究发现,在春玉米的生长季内降水一般集中在夏季,但在 2010 年由于极端天气等因素影响导致降水大幅度下降,进而严重影响了春玉米生长,土壤呼吸速率也较 2009 年低很多^[50]。

3.2 农田土壤呼吸的空间变化

我国是农业大国,农业种植区遍布全国,但由于幅员辽阔,地理条件、水文条件、土壤类型、农作物类型和土壤微生物组成等因素的影响,农田土壤呼吸作用表现出较大的空间异质性^[51]。就玉米而言,科尔沁沙地的内蒙古奈曼旗中北部平原区玉米地,生长季土壤呼吸速率最高值和最低值分别为 7.490 μmol·m⁻²·s⁻¹ 和 1.491 μmol·m⁻²·s⁻¹^[24],辽宁省锦州市的玉米土壤呼吸速率最高值和最低值分别为 4.77 μmol·m⁻²·s⁻¹ 和

1.31 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最高值前者是后者的 1.6 倍^[17]。而在山西太原的玉米地, 生长季土壤呼吸速率变化范围为 0.2~8.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[30], 变化幅度均大于内蒙古奈曼旗中北部平原区和辽宁省锦州市的玉米地的测定范围。华北平原麦田土壤呼吸速率最高值为 9.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[33], 江苏省江都市稻麦轮作小麦生长季的土壤呼吸速率最高值为 4.97 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[19], 前者最高值是后者的 1.8 倍。

土壤呼吸的空间变化不仅受地域、作物类型的影响, 还与作物的种植方式、人为管理措施等因素有关^[52]。吕国红等^[31]研究种植密度对东北玉米农田土壤呼吸的影响时发现, 不仅种植密度会影响土壤呼吸速率峰值的出现时间, 低密度种植的玉米土壤呼吸速率日动态最高值比常规种植的玉米延时 1~2 h, 还发现测定位置距离玉米植株越近土壤呼吸值越高, 这可能是由于玉米播种时采用固定的株距和行距导致根系分布的空间异质性引起的。赵海超等^[53]研究也发现, 种植密度改变了玉米根系生物量, 空间分布、残落物和根系分泌物改变了土壤有机质的组成, 微生物群体活动又促进了土壤有机质的分解。

4 问题与展望

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 是人类活动最活跃的生态系统, 因此它也是受到人类活动的干扰最频繁的生态系统。近十几年来, 诸多学者对农田生态系统土壤呼吸进行了大量的研究工作, 已经取得了很大的进展, 但是众多研究结果在揭示农田生态系统碳循环过程及其机理上还没有统一的结论。总结出以下 4 点问题: 1) 农田土壤呼吸作用的研究具有区域性, 如旱作玉米的研究多集中在黄淮海区和东北区, 而对水稻的研究多集中在长江中下游区, 各自的研究结果很难推广到其他区域; 2) 农田土壤呼吸作用的试验仪器和试验设计不统一, 导致各个研究结果之间可比性较差; 3) 目前研究者研究的作物类型较为单一, 常见的为冬小麦-夏玉米、小麦、棉花、水稻等, 其它作物种类很少有研究者踏足; 4) 农田土壤呼吸作用中施肥的研究, 多揭示不同施肥处理下, 作物土壤呼吸速率日变化和季节变化的规律^[54], 其中少数研究会涉及对土壤微生物数量的影响^[43], 但很少有研究者进一步挖掘农田土壤呼吸对碳存储的贡献。

针对上述问题, 今后的农田土壤呼吸作用研究应侧重以下 3 点: 1) 进一步加强农田土壤呼吸区域性研究, 并积极探索不同区域间农田生态系统的比较研究; 2) 探讨解决土壤呼吸研究试验设计和测定方法的标准化规范化问题, 使各研究结果间具有较好的可比性; 3) 扩大作物研究范围, 为研究农田生态系统碳循环碳源和碳汇的问题提供更多参考依据。

参考文献

- [1] 高国伟, 刘拓. 全球变暖与中国粮食安全[J]. 生态经济, 2014, 30(2): 120-122.
- [2] 肖复明, 张群, 范少辉. 中国森林生态系统碳平衡研究[J]. 世界林业研究, 2006, 19(1): 53-57.
- [3] Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect[M]. New York, NY (USA): John Wiley and Sons Inc, 1990: 289-301.
- [4] 张雪松. 冬小麦农田生态系统碳、水循环特征及冠层上方碳通量的模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [5] Baldocchi D D, Meyers. Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest I, Evaporation and CO₂ efflux[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(D4): 7171-7285.
- [6] Monteith J L, Seicz. Crop photosynthesis and the flux of carbon dioxide below the canopy[J]. Journal of Applied Ecology, 1964(1): 321-337.
- [7] Edwards N T. The use of soda lime for measuring respiration rates in terrestrial systems[J]. Pedobiologia, 1982, 23: 321-330.
- [8] Janssens I A, Ceulemans. Spatial variability in forest soil CO₂ efflux assessed with a calibrated soda lime technique[J]. Ecology Letters, 1998(1): 95-98.
- [9] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.
- [10] 崔晓勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 390-394.
- [11] Yim M H, Joo S J, Shutou K, et al. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175(1/3): 585-588.
- [12] 李玉强, 赵哈林, 李玉霖, 等. 沙地土壤呼吸观测与测定方法比较[J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 680-686.
- [13] 诸葛玉平, 张旭东, 刘启. 长期施肥对黑土呼吸过程的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 392-394.
- [14] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [15] Raich J W. Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54: 1754-1757.
- [16] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1028-1035.
- [17] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态与碳收支初步估算[J]. 中国生态农业学报, 2009(5): 874-879.
- [18] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 77-84.
- [19] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 冬小麦旺盛生长期 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1111-1116.
- [20] 杨昕, 王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 427-435.
- [21] 高翔. 旱作春玉米田水碳通量变化规律及其影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [22] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1552-1560.
- [23] 靳东升, 张强, 郜春花, 等. 不同施肥处理对工矿复垦区玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 现代农业科技, 2014(2): 257-259.
- [24] 张风霞, 韩娟娟, 陈银萍. 科尔沁沙地典型玉米农田土壤呼吸特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 140-146.
- [25] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 玉米秸秆还田对土壤呼吸速率的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 105-108.
- [26] 陈书涛, 朱大威, 牛传坡, 等. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸的

影响[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2858-2865.

[27] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M. Analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems [J]. Biogeochemistry, 2005, 73: 29-70.

[28] 高翔, 郝卫平, 顾峰雪, 等. 降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7883-7893.

[29] 孙敬松, 周广胜, 韩广轩. 太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5925-5932.

[30] 严俊霞, 李洪建, 尤龙凤. 玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010(3): 183-189.

[31] 吕国红, 温日红, 赵秋石, 等. 种植密度对东北玉米农田土壤呼吸时空动态的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 283-289.

[32] 吴会军, 蔡典雄, 武雪萍, 等. 不同施肥条件下小麦田土壤呼吸特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 70-74.

[33] 邓爱娟, 申双和, 张雪松, 等. 华北平原地区麦田土壤呼吸特征[J]. 生态学杂志, 2009(11): 2286-2292.

[34] 孟磊, 丁维新, 何秋香, 等. 长期施肥对冬小麦/夏玉米轮作下土壤呼吸及其组分的影响[J]. 土壤, 2008, 40(5): 725-731.

[35] 任秀娥, 王勤学, 童成立, 等. 亚热带稻田生态系统土壤呼吸的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(13): 1548-1553.

[36] 杨兰芳, 蔡祖聪. 不同生长期盆栽大豆的土壤呼吸昼夜变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2004(12): 2955-2960.

[37] Alvarez R, Alvarez C R, Lorenzo G. Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa[J]. Eur J Soil Biol, 2001, 37(3): 161-166.

[38] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N_2O , CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. Soil Till Res, 1999, 53(1): 29-39.

[39] Reicosky D C, Lindstrom M J. Fall tillage method: Effect on short-term carbon dioxide flux from soil[J]. Agron J, 1993, 85(6): 1237-1243.

[40] 陈敦敦, 格日乐. 施肥与耕作方式对农田土壤呼吸的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.

特: 内蒙古农业大学, 2008.

[41] 王永强, 崔凤娟, 郭小刚. 农田生态系统土壤呼吸文献综述[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3): 65-67.

[42] 文俊玲. 氮, 钾, 有机肥配施对越冬茬黄瓜生长发育及土壤环境的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.

[43] 杜社妮, 梁银丽, 张成娥. 施肥对西红柿土壤微生物和土壤呼吸的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 178-181.

[44] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1374-1380.

[45] 李玮, 张佳宝, 张丛志. 秸秆还田方式和氮肥类型对黄淮海平原夏玉米土壤呼吸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 842-849.

[46] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 北亚热带-南亚热带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1791-1802.

[47] 贾丙瑞, 凰广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1611-1615.

[48] 李海玲. 平原农区杨农复合生态系统碳储量与碳平衡研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.

[49] 陶祥云. 水稻品种对三江平原稻田温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

[50] 张丁辰. 寿阳旱作春玉米不同耕作施肥农田土壤呼吸及碳排放估算[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

[51] Parfitt R L, Scott. Land-use change effects on soil C and N transformations in soil of high N status: comparisons under indigenous forest, pasture and pine plantation[J]. Biochemistry, 2003, 66: 203-221.

[52] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1017-1025.

[53] 赵海超, 刘景辉, 张星杰. 春玉米种植密度对土壤有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1051-1056.

[54] 芦思佳, 韩晓增. 施肥对土壤呼吸的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(3): 366-370.

Research Progress on the Soil Respiration of Farmland Ecosystems

WU Dan-na¹, JIANG Hong^{1,2}, ZHANG Jin-meng¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300; 2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093)

Abstract: Farmland ecosystems plays important roles in terrestrial ecosystems. With a long history of agriculture, China provides good experimental conditions for soil respiration research. This paper summarized the research on farmland soil respiration in recent 10 years in China. Temperature and humidity of soil, crop biological characteristics and agricultural management activities played key roles in the researches of soil respiration. This paper pointed out the characteristics of spatial and temporal variations of soil respiration. It also discussed key issues and further tasks, including strengthening the research and comparison of regional farmland soil respiration, standardizing and normalizing of soil respiration experimental design and measuring method, expanding the scope of the research for providing foundation for ecosystem carbon cycle issues.

Keywords: farmland ecosystems; soil respiration; carbon cycle