ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第3期
2016年3月15日

目 次

第 37 卷第 3 期
2016 年 3 月

环 境 科 学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

Vol. 37, No. 3
Mar., 2016

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响

周泉,王龙昌*,熊瑛,张赛,杜娟,赵琳璐
(西南大学农学与生物科技学院,南方山地农业教育部工程研究中心,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400716)

摘要:在全球变暖的大背景下,农田土壤呼吸成为农业碳排放的主要途径,而绿肥对抑制温室气体排放、实现节能减排有巨大潜力. 在我国西南紫色土地区,有关绿肥间作条件下的农田土壤呼吸特征尚不明确. 通过绿肥紫云英与油菜间作,重点研究了秸秆覆盖条件下紫云英与油菜间作对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响. 结果表明,与秸秆覆盖相比,隔根方式成为影响油菜根际土壤有机碳含量的主要因素,绿肥间作使油菜根际土壤有机碳含量显著降低;秸秆覆盖可促进油菜田间土壤呼吸,而绿肥间作抑制了油菜田间土壤呼吸,土壤呼吸受油菜生育阶段影响较大,呈现出先下降后升高再下降的总体特征,且与土壤温度之间表现出回归式抛物线关系,根际呼吸在油菜生长后期成为土壤呼吸的主要成分.

关键词:根系互作;紫云英;油菜;隔根;碳通量
中图分类号:X144 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2016)03-1114-07 **DOI**:10.13227/j.hjkx.2016.03.042

Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration

ZHOU Quan, WANG Long-chang*, XIONG Ying, ZHANG Sai, DU Juan, ZHAO Lin-lu
(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Under the background of global warming, the farmland soil respiration has become the main way of agricultural carbon emissions. And green manure has great potential to curb greenhouse gas emissions and achieve energy conservation and emissions reduction. However, in purple soil region of Southwest, China, soil respiration under green manure remains unclear, especially in the winter and intercropping. Through the green manure (Chinese milk vetch) intercropping with rape, therefore, we compared the effects of rape rhizosphere under straw mulching. The soil organic carbon and soil respiration were examined. The results showed, compared with straw mulching, root separation was the major influencing factors of soil organic carbon on rape rhizosphere. Soil organic carbon was significantly decreased by root interaction. In addition, straw mulching promoted while green manure intercropping inhibited the soil respiration. Soil respiration presented the general characteristics of fall-rise-fall due to the strong influence of rape growth period. Therefore, it showed a cubic curve relationship with soil temperature.

Key words: root interaction; Chinese milk vetch; rape (*Brassica napus* L.); root separation; carbon flux

从 18 世纪工业革命以来,人类正面临着严峻的全球气候变化,如全球变暖、土地退化等. 在 2014 年纽约召开的联合国气候峰会上,科学家们宣布 2014 年大气中的二氧化碳水平将达到新高. 农业是重要的温室气体排放源,农业源排放的 CO_2 和 CH_4 分别占人为温室气体排放量的 21% ~ 25% 和 57%[1],而农田土壤呼吸也成为农业碳排放的主要途径[2]. 但目前对农田土壤呼吸的研究主要集中在春夏秋季[3],且主要以单作或轮作为主[4~12],缺乏对冬季低温环境和间作条件下根际土壤有机碳和土壤呼吸的深入探讨.

在全球变化的大背景下,绿肥在为农田提供肥源、减少化肥施用的同时,也可为抑制全球气候变暖做出贡献[13]. 绿肥的种植和利用具有提供养分、合理用地养地、部分替代化肥、提供饲草来源、保障粮食安全、改善生态环境、固氮、吸碳以及节能减耗等作用[14],对于应对全球气候变化具有十分重要的意义. 然而,自 20 世纪 80 年代以来,随着化肥工业的迅猛发展,绿肥生产和应用日益减少.

西南紫色土地区人为活动剧烈、土层浅薄、水土流失严重. 近年来的研究表明,该地区以秸秆覆盖、垄作为主的保护性耕作在保土保水、改善土壤

收稿日期:2015-08-08;**修订日期**:2015-10-30
基金项目:国家自然科学基金项目(31271673);公益性行业(农业)科研专项(201503127)
作者简介:周泉(1987 ~),男,博士研究生,主要研究方向为生态农业与可持续发展,E-mail:zhouquanyilang@163.com
* 通讯联系人,E-mail:wanglc2003@163.com

肥力、增加固碳潜力、提高作物产量方面的效益显著[15~18]，但对于紫色土丘陵区旱作农田绿肥种植与土壤呼吸特征相结合的研究尚属空白，这也是全球变化背景下亟待探究的学术问题. 基于此，本研究以紫云英为主要绿肥作物，通过紫云英与油菜间作，重点研究秸秆覆盖条件下紫云英与油菜间作对冬季旱作农田土壤呼吸特征的影响，一方面为农业高产稳产提供理论依据，另一方面为建立区域农田可持续利用机制和实现清洁生产、节能减排奠定基础.

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2014 年 10 月至 2015 年 4 月在重庆市北碚区西南大学教学试验农场进行. 当地多年平均降雨量1 156.8 mm，其中春、夏、秋、冬降雨量分别为全年的 25.3%、46.8%、22.5% 和 5.4%，年蒸发量1 181.1 mm，年日照时数在 888.5 ~ 1 539.6 h 之间，日照百分率仅为 25% ~35%，冬季日照更少，仅占全年的 10% 左右. 试验所用土壤为旱地紫色土，地力相对均匀. 试验前土壤 pH 值 6.47，土壤有机碳 8.40 $g\cdot kg^{-1}$，全氮 0.97 $g\cdot kg^{-1}$，速效磷 18.13 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾 170.13 $mg\cdot kg^{-1}$.

1.2　试验设计

采用盆栽试验，绿肥作物为“紫云英”，主作物为“油菜”，随机区组排列，2 ×3 双因素试验设计，3 次重复. 设 3 种隔根方式：Ⅰ. 完全隔根(F)：用塑料膜完全隔根，相当于单作；Ⅱ. 尼龙网隔根(P)：用 120 目尼龙网隔根，相当于部分间作；Ⅲ. 不隔根(N)：不隔根，相当于完全间作. 设 2 种覆盖方式：Ⅰ. 无覆盖(T)：作物生长期内均不进行秸秆覆盖. Ⅱ. 覆盖(S)：于作物播种期将相当于3 750 $kg\cdot hm^{-2}$ 的水稻秸秆均匀覆盖(每盆 0.15 kg). 共 6 个处理分别为：FT(完全隔根 + 无覆盖)、FS(完全隔根 + 覆盖)、PT(尼龙网隔根 + 无覆盖)、PS(尼龙网隔根 + 覆盖)、NT(不隔根 + 无覆盖)、NS(不隔根 + 覆盖). 试验在 160 L 钢化盆内进行，每盆装土 50kg，施氮肥(N) 0.10 $g\cdot kg^{-1}$，磷肥(P_2O_5) 0.10 $g\cdot kg^{-1}$，钾肥(K_2O) 0.10 $g\cdot kg^{-1}$，肥料为三洋牌 16-16-16 三元素复合肥，所有肥料与土混匀一次施入，分 3 行平行摆布，行间距 1 m×1 m. 紫云英和油菜采取条播(间距 20 cm)，每盆各播种一行，出苗后每盆各留 2 株油菜(间距 20 cm)，作物生长期间土壤相对含水量控制在 60% 左右.

1.3　测定指标与方法

土壤有机碳测定：于油菜收获时将植株根系从土壤中挖出(保证根系完整)，慢慢抖掉与根系结合比较松散的土壤，然后用经火焰灭菌的镊子刮取附着在作物根系上的薄层(<10 mm)土壤作为根际土壤，并将取得的土样弄碎混匀，按 4 分法取样，用无菌塑料袋包好，带回实验室后，自然晾干后过 0.25 mm 土筛，用于测定总有机碳；另取 20 g 过 2 mm 土筛的风干土样，按水土比 2∶1添加蒸馏水，在室温下振荡 30 min(200 $r\cdot min^{-1}$)，再离心 20 min(4 000 $r\cdot min^{-1}$)，然后用 0.45 μm 微孔滤膜过虑，滤液用于测定水溶性有机碳. 土壤总有机碳和水溶性有机碳采用岛津 TOC 分析仪(TOC-L SSM-5000A and ASI-L，日本 SHIMADZU 公司)测定. 经测定试验土壤 pH 值低于 6.5，偏酸性，无机碳含量忽略不计，总碳即为土壤总有机碳含量.

土壤呼吸测定：于油菜苗期、蕾薹期、开花期和角果期各测定一次，测定时间统一为上午 09:00 ~11:00. 测定仪器为 LI6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 呼吸室(Li6400-09，LI-COR Inc.，Lincoln，USA)，选取盆内两株油菜之间作为测定点，每个点放自制的 PVC 环，于测定前一天安置好，以减少对土壤的干扰. 每个 PVC 环测定 1 次，3 个循环，每个处理 3 次重复，共 9 个数据，取其平均值作为土壤呼吸值.

土壤温度测定：用 LI6400-09 自带的土壤温度探针测定，深度为 10 cm.

1.4　统计分析

用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件进行数据整理、分析，采用 General Linear Model 进行单变量双因素方差分析，多重比较采用 Duncan's 新复极差法.

2　结果与分析

2.1　油菜根际土壤有机碳

由表 1 可知，隔根方式对油菜根际土壤总有机碳和水溶性有机碳均有极显著影响，而覆盖方式和两因素的交互作用对土壤有机碳的影响不显著. 可见，两因素中隔根方式是主效应，对油菜根际土壤有机碳的影响最大.

由图 1 可知，不同处理对油菜根际土壤总有机碳和水溶性有机碳均有显著影响. 对总有机碳，在相同隔根条件下，覆盖与否对总有机碳的影响均不显著；而不论是否覆盖，不隔根条件下的油菜根

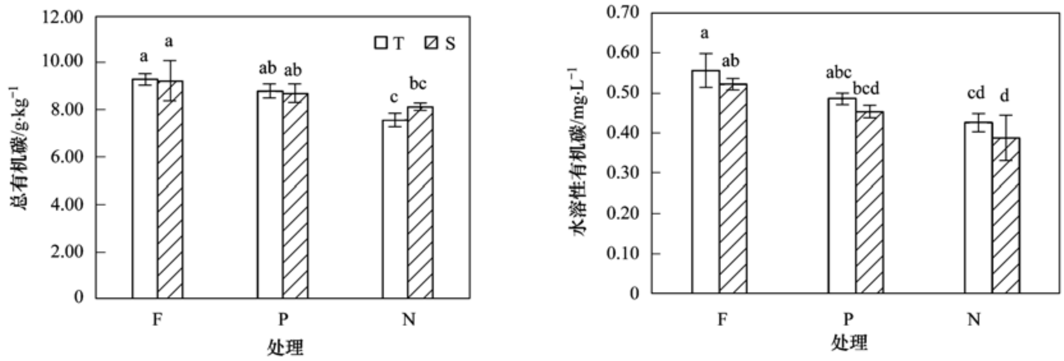
际土壤总有机碳显著低于完全隔根. 对水溶性有机碳,均表现出不覆盖处理 > 覆盖处理,完全隔根 > 尼龙网隔根 > 不隔根,且覆盖与否差异不显著,不隔根条件下的油菜根际土壤水溶性有机碳显著低于完全隔根. 说明绿肥间作显著影响了油菜根际的土壤有机碳含量,促进了油菜对碳源的吸收利用效率,而这跟本研究土壤呼吸的变化关系密切.

表 1 两因素间油菜根际土壤有机碳的方差分析(P 值)[1)]

Table 1 Variance analysis of rape rhizosphere soil organic carbon between the two factors(P-Value)

因素	总有机碳	水溶性有机碳
隔根方式	0.001**	0.003**
覆盖方式	0.530	0.148
隔根 + 覆盖	0.339	0.944

1) * 表示在 0.05 水平上差异显著($P<0.05$), ** 表示在 0.01 水平上差异显著($P<0.01$),下同



图中不同字母表示对 6 个处理进行多重比较时在 0.05 水平上差异显著($P<0.05$),下同

图 1 不同处理对油菜根际土壤有机碳的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on rhizosphere soil organic carbon of rape

2.2 土壤呼吸

由表 2 可知,隔根和覆盖两个因素在不同生育阶段对土壤呼吸的影响不同,对开花期的影响最大. 在苗期,仅隔根方式对土壤温度的影响显著. 在蕾薹期,两因素均对土壤碳通量的影响达到显著水平. 在开花期,隔根仅对土壤碳通量影响极显著,而覆盖对土壤温度和碳通量均影响极显著,同时两因素对碳通量影响的交互作用也达到显著水平. 在角果期,仅覆盖对土壤碳通量的影响达到显著水平. 说明覆盖是影响土壤呼吸的主效应,而绿肥间作对土壤呼吸的影响受到作物生长状况的影响较大.

表 2 两因素间油菜土壤呼吸的方差分析(P 值)

Table 2 Variance analysis of soil respiration between the two factors(P-value)

因素		苗期	蕾薹期	开花期	角果期
土壤温度	隔根方式	0.024*	0.195	0.551	0.455
	覆盖方式	0.111	0.050	0.002**	0.203
	隔根 + 覆盖	0.567	0.765	0.655	0.932
土壤碳通量	隔根方式	0.290	0.017*	0.003**	0.219
	覆盖方式	0.300	0.019*	0.000**	0.000**
	隔根 + 覆盖	0.893	0.126	0.015*	0.152

2.2.1 土壤温度

通过对各处理之间的多重比较发现(图 2),不同生育期各处理之间的土壤温度差异不同. 在苗期,覆盖条件下的绿肥间作显著降低了土壤温度. 在蕾薹期,绿肥间作和覆盖对土壤温度的影响均不显著. 在开花期,在单作或部分间作下覆盖均可显著提高土壤温度. 而在角果期,各处理间差异均不显著. 由此可见,秸秆覆盖可提高冬季农田土壤温度,而绿肥间作在一定程度上削弱了秸秆覆盖的增温效应.

2.2.2 土壤碳通量

由图 3 可知,油菜整个生育期土壤碳通量的表现与土壤温度不同,呈现出先下降后升高再下降的总体趋势,其中蕾薹期最低,开花期最高,且油菜生长期间秸秆覆盖处理的土壤碳通量均高于不覆盖处理. 在苗期,各处理间差异均不显著. 在蕾薹期,秸秆覆盖条件下单作和部分间作的土壤碳通量显著增大. 在开花期,秸秆覆盖条件下单作、部分间作和

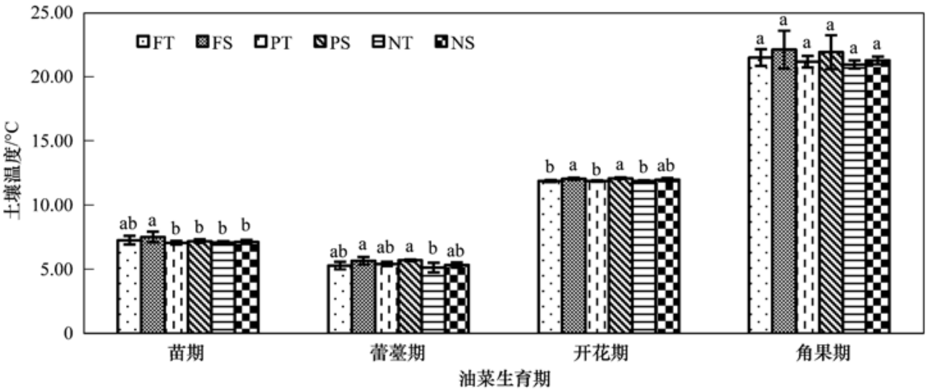


图 2　不同处理对土壤温度的影响

Fig. 2　Effects of different treatments on soil temperature

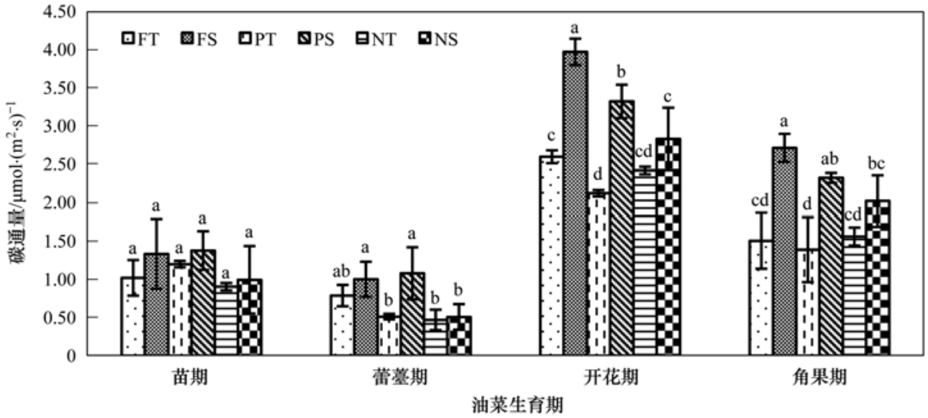


图 3　不同处理对土壤碳通量的影响

Fig. 3　Effects of different treatments on soil carbon flux

完全间作的土壤碳通量依次下降，且差异显著. 在角果期，各处理间土壤碳通量与开花期规律相似. 由此可见，在单作或部分间作条件下秸秆覆盖可显著增加土壤碳通量，而在秸秆覆盖条件下绿肥间作可显著降低土壤碳通量. 说明绿肥间作与秸秆覆盖对土壤碳通量的影响相反，绿肥间作可降低土壤碳通量，起到降低碳排放的作用.

2.3　土壤呼吸与土壤温度的关系

本研究测定的是冬季农田油菜生长季的土壤呼吸特征，在整个油菜生长季土壤温度的变化规律是：蕾薹期 < 苗期 < 开花期 < 角果期，而土壤碳通量的变化规律是：蕾薹期 < 苗期 < 角果期 < 开花期，两者在角果期时的变化规律出现明显不一致.

对此，通过土壤碳通量与土壤温度之间的回归模型模拟发现，两者之间存在极显著的三次曲线关系（$P=0.000$）（图 4）. 土壤呼吸主要由微生物呼吸和根系呼吸组成，由于盆栽试验中土壤呼吸受作物根系呼吸的影响较大，这个拟合程度较高（$R^2=0.7082$）的回归式抛物线较好地解释了在冬季油菜生长季土壤呼吸先降后升再降的关系. 说明在角果期，虽然土壤温度不断升高，但作物临近收获，根系活力的下降导致根系呼吸呈现逐渐下降的态势.

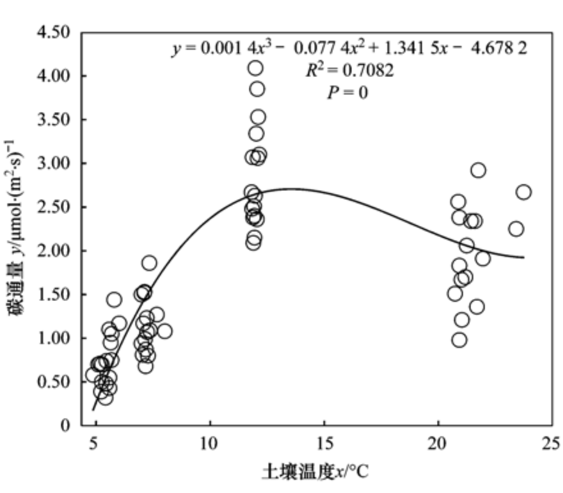


图 4　土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 4　Relationship between soil respiration and soil temperature

3 讨论

3.1 绿肥间作和秸秆覆盖下的油菜根际土壤有机碳特征

一般来讲,土壤有机碳含量比较稳定,在一个生长季内的变化较小,但本试验研究的是盆栽条件下的根际土壤有机碳,它受根际分泌物以及根际微环境(例如微生物)等的影响较大,在一个生长季内产生差异是正常的. 本研究表明,与秸秆覆盖相比,隔根方式成为影响油菜根际土壤有机碳含量的主要因素,油菜根际土壤有机碳含量的显著降低,说明了绿肥间作促进了油菜对根际碳源的吸收利用. 从紫云英与油菜的间作优势和种间竞争力来看,油菜是优势作物,紫云英处于劣势[21],间作优势的作物生态基础之一就是对养分资源的充分利用[22,23]. 由此,对油菜和紫云英间作来讲,紫云英的根系分泌物对油菜生长产生了影响,两者生态位互补拓宽了油菜对养分利用的空间[24],进而影响了油菜对根际碳源的吸收利用.

另外,本研究中绿肥间作下油菜根际土壤有机碳含量的下降,与油菜田间土壤呼吸的变化密切相关. 一方面土壤有机碳为微生物活动提供能源[25],另一方面土壤有机碳与土壤微生物量一般呈正相关的关系[26],因此,油菜根际土壤有机碳的降低反映了土壤微生物的状况. 同时,由于微生物呼吸又是土壤呼吸的重要组成部分,所以土壤有机碳的降低也会导致土壤呼吸的下降,这与本研究对土壤呼吸特征的研究结果一致.

3.2 绿肥间作和秸秆覆盖下的油菜田间土壤呼吸特征

本研究发现,秸秆覆盖可提高冬季农田土壤温度,而绿肥间作在一定程度上削弱了秸秆覆盖的增温效应. 一般来讲,秸秆覆盖在低温下具有保温作用,在高温下具有降温作用[27],目前,在小麦、棉花、玉米、大豆等作物上发现,秸秆覆盖与无覆盖相比,都会出现前期低温季节增温、后期高温季节降温的双重效应,并能平抑地温在季节间和昼夜间的剧烈变化,这种双重效应被认为是覆盖增产的重要机制[28~37]. 本研究得出的秸秆覆盖在冬季低温下可提高土壤温度的结果与一般研究结果一致. 另外,目前对果麦、林草等农林间作系统的研究结果表明,间作能够降低土壤温度[38~40],这与本研究中绿肥间作对土壤增温有削弱作用一致. 因此,当绿肥间作与秸秆覆盖相结合,可以平稳地抑制土壤温度在季节间和昼夜间的剧烈变化,增强了土壤温度的稳定性.

本研究还发现,不同处理下油菜根际土壤的呼吸特征表现为先降后升再降的趋势,这与徐志波等[41]对油菜田间土壤呼吸的研究结果一致. 目前,对冬季农田土壤呼吸的研究主要集中在冬小麦生长季[42~45],发现冬小麦生长季的土壤呼吸特征表现为前期与土壤温度的变化一致,在后期出现下降的趋势,这同样与本研究油菜田间土壤呼吸的变化趋势相似. 说明在一定范围内土壤呼吸与土壤温度呈正相关,但同时与作物的生长息息相关. 因为土壤呼吸主要包括根系呼吸、微生物分解根系来源物质和微生物分解土壤有机质,前两部分合称为根际呼吸,而根际呼吸占土壤呼吸的60%以上[46,47],尤其是盆栽条件下土壤呼吸则主要受到根际呼吸控制[48],在作物生长后期作物生命力(根系活力)下降必然导致土壤呼吸的下降.

土壤温度与土壤呼吸的关系常采用 Q_{10} 值表示,即温度每增加 10℃ 土壤呼吸增加的倍数,是呼吸速率对温度变化的敏感性指标[19]. 以往的研究表明,土壤温度与土壤呼吸之间通常为指数关系[20],但这往往是比较理想的状态下. 实际上两者之间的关系具有多样化,目前主要有线性模型、指数模型和乘幂模型等,其中以指数模型最常见[49],但在冬季低温环境下,简单的指数模型对温度的响应太敏感[50],有学者就研究发现在低温环境下土壤呼吸与土壤温度存在二次曲线关系[51],另外,针对我国农田土壤呼吸,有研究表明虽然土壤呼吸与土壤温度呈指数关系,但在西南地区的土壤呼吸年际变化却呈现双峰模型[52]. 由此可见,土壤呼吸与土壤温度的关系非常紧密,但也存在很多的不确定性. 本研究在探讨油菜田间土壤呼吸与土壤温度的关系时,发现二者间呈三次曲线关系(回归式抛物线),一方面土壤呼吸在冬季油菜生长季出现一个峰值后下降的表现与上述对西南地区的研究结果[52]基本吻合,另一方面由于是盆栽试验,作物根际呼吸的贡献率比大田要高,必然也会对土壤呼吸和温度的关系产生影响,油菜生长后期根系活力下降导致的土壤呼吸的下降也从实际中反映的这种关系.

总的来看,在探讨绿肥间作与秸秆覆盖对油菜根际土壤有机碳和土壤呼吸的影响方面,还有很多问题需要深入研究:①绿肥间作下油菜根系呼吸的动态变化及其对土壤呼吸的贡献; ②绿肥间作下的土壤微生物及其呼吸特征; ③绿肥间作下的农田碳

平衡特征.

4 结论

与秸秆覆盖相比,隔根方式成为影响油菜根际土壤有机碳含量的主要因素,绿肥间作使油菜根际土壤有机碳含量显著降低；秸秆覆盖可促进油菜田间土壤呼吸,而绿肥间作抑制了油菜田间土壤呼吸,土壤呼吸受油菜生育阶段影响较大,呈现出先下降后升高再下降的总体特征,且与土壤温度之间表现出回归式抛物线关系,根际呼吸在油菜生长后期成为土壤呼吸的主要成分.

参考文献：

[1] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化[M]. 北京：科学出版社, 2005.

[2] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 71-90.

[3] 王娓, 汪涛, 彭书时, 等. 冬季土壤呼吸：不可忽视的地气 CO_2 交换过程[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 394-402.

[4] 闫静静, 杨兰芳, 庞静. 大豆和棉花生长对土壤呼吸的影响[J]. 作物学报, 2010, **36**(9): 1559-1567.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 李建敏, 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对玉米生长季土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(8): 2025-2030.

[8] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等. UV-B 辐射增强与秸秆施用对大豆田土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1638-1642.

[9] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, **30**(11): 2919-2924.

[10] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(18): 192-199.

[11] 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 等. 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4205-4211.

[12] 任志杰, 高兵, 黄涛, 等. 不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2367-2375.

[13] Kim S Y, Lee C H, Gutierrez J, *et al*. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation[J]. Plant and Soil, 2013, **366**(1-2): 273-286.

[14] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (4): 1-3.

[15] 黄承建, 赵思毅, 王龙昌, 等. 马铃薯/玉米套作对马铃薯品种光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, **39**(2): 330-342.

[16] 王龙昌, 邹聪明, 张云兰, 等. 西南"旱三熟"地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效益的影响[J]. 作物学报, 2013, **39**(10): 1880-1890.

[17] 张赛, 王龙昌, 周航飞, 等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6244-6255.

[18] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(2): 226-231, 256.

[19] Simmons J A, Fernandez I J, Briggs R D, *et al*. Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine, USA[J]. Forest Ecology and Management, 1996, **84**(1-3): 81-95.

[20] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al*. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, **413**(6856): 622-625.

[21] 宋莉, 韩上, 席莹莹, 等. 间作对油菜和紫云英生长及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, **36**(2): 231-237.

[22] 廖桂平, 官春云. 不同播期对不同基因型油菜产量特性的影响[J]. 应用生态学报, 2001, **12**(6): 853-858.

[23] 王秋杰, 曹一平, 张福锁, 等. 间套作研究中的统计分析方法[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, **4**(2): 176-182.

[24] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 等. 间套作条件下作物根系数量与活性的空间分布及变化规律研究：Ⅱ. 间作早春玉米根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. 作物学报, 2001, **27**(6): 974-979.

[25] 贾丙瑞, 周广胜, 王风玉, 等. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(8): 1547-1552.

[26] 沈程文, 肖润林, 徐华勤, 等. 覆盖与间作对亚热带丘陵区茶园土壤微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(3): 141-144.

[27] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(10): 171-173.

[28] 高丽娜, 陈素英, 张喜英, 等. 华北平原冬小麦麦田覆盖对土壤温度和生育进程的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, **27**(1): 107-113.

[29] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, *et al*. Chapter seven-ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, **118**: 429-476.

[30] Zhang S L, Lövdahl L, Grip H, *et al*. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **102**(1): 78-86.

[31] 胡明芳, 田长彦. 新疆棉田地膜覆盖耕层土壤温度效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, **11**(3): 128-130.

[32] 陈恒洪, 柴守玺, 黄彩霞, 等. 地膜覆盖对旱地春小麦土壤温度的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, **48**(1): 63-67.

[33] 员学锋, 吴普特, 汪有科, 等. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(7): 22-26.

[34] 刘冬青, 辛淑荣, 张世贵. 不同覆盖方式对旱地棉田土壤环境及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, **21**(2): 18-21.

[35] Cao J S, Zhou X, Zhang W J, *et al*. Effects of mulching on soil temperature and moisture in the rain-fed farmland of summer corn in the Taihang Mountain of China [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, **10**(1): 519-523.

[36] 党占平, 刘文国, 周济铭, 等. 渭北旱地冬小麦不同覆盖模式增温效应研究[J]. 西北农业学报, 2007, **16**(2): 24-27.

[37] 刘炜, 高亚军, 杨君林, 等. 旱地冬小麦返青前秸秆覆盖的土壤温度效应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, **25**(4): 197-201.

[38] 黄爱军, 乔旭, 陈兴武, 等. 果麦间作系统小气候特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2013, **18**(6): 88-95.

[39] 彭晚霞, 宋同清, 肖润林, 等. 覆盖与间作对亚热带丘陵茶园地温时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(5): 778-782.

[40] 宋同清, 王克林, 彭晚霞, 等. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应[J]. 生态学报, 2006, **26**(11): 3647-3655.

[41] 徐志波, 江长胜, 郝庆菊, 等. 稻-油轮作农田油菜生长季土壤呼吸作用及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(12): 1599-1605.

[42] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J]. 生态学报, 2009, **29**(5): 2551-2559.

[43] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(9): 3354-3360.

[44] 上官宇先, 师日鹏, 韩坤, 等. 垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸[J]. 生态学报, 2012, **32**(18): 5729-5737.

[45] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2419-2425.

[46] Fu S L, ChengW X, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: a greenhouse pot experiment [J]. Plant and Soil, 2002, **239**(1): 133-140.

[47] Domanski G, Kuzyakov Y, Siniakina S V, *et al*. Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*)[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001, **164**(4): 381-387.

[48] 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, **24**(12): 2955-2960.

[49] 梁贻仓, 李佩茹. 农田土壤呼吸研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, **24**(5): 279-281.

[50] Luo Y Q, Zhou X H. Soil Respiration and the Environment[M]. San Diego: Elsevier Inc, 2006: 215-230.

[51] 李荣平, 周广胜, 王宇. 中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应[J]. 科学通报, 2010, **55**(13): 1247-1254.

[52] 江国福, 刘畅, 李金全, 等. 中国农田土壤呼吸速率及驱动因子[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, **44**(7): 725-735.

HUANJING KEXUE Vol. 37 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2016

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 3 月 15 日　第 37 卷　第 3 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 3　Mar. 15, 2016

主　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102，010-62849343；Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订购处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司（北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号： ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　**国内邮发代号：** 2-821

国内定价： 120.00 元　　**国外发行代号：** M 205

国内外公开发行