环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.12
第40卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第12期
2019年12月15日

目 次(卷终)

研究报告

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第40卷 第12期 2019年12月
Vol. 40, No. 12 Dec., 2019

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响

严俊霞[1],张媛[1],焦晓燕[2*]

(1. 山西大学黄土高原研究所,太原 030006;2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所,太原 030031)

摘要:基于对高粱地进行的5种培肥模式的长期定位试验,研究了不同培肥模式下土壤呼吸速率(R_s)及其温度敏感性(Q_{10})与环境因子以及光谱特征参数的关系. 试验共设5个处理:不施肥(CK)、无机肥(INF)、无机肥+有机肥(INF+M)、无机肥+有机肥+秸秆(INF+M+S)和有机肥+秸秆(M+S). 结果表明,施肥处理没有改变R_s的时间动态变化趋势. INF与CK的R_s没有明显差异,测定期间的平均值分别为3.68 μmol·(m^2·s)$^{-1}$和3.51 μmol·(m^2·s)$^{-1}$. 与INF或CK相比,INF+M、M+S和INF+M+S的R_s分别增加了28.2%~39.1%、47.9%~76.0%和46.2%~50.8%,有机肥和秸秆还田处理后R_s增加. 土壤温度和土壤水分分别能解释R_s季节变化的14%~96%和6%~37%,施肥处理显著提高了土壤温度的解释能力,而土壤水分的解释能力没有明显差异;R_s与差值植被指数、比值植被指数、增强植被指数的相关系数高于归一化植被指数;与红边斜率和红边面积的相关系数高于红边位置. 有机肥和秸秆的施用降低了R_s与光谱特征参数的相关性. 以光谱特征参数、T_{10}、W_s为自变量的3因子模型的决定系数R^2都高于双因子和单因子模型. 与CK相比,INF、INF+M、INF+M+S和M+S的Q_{10}分别提高了26%、39%、21%和37%,表明施肥可以提高土壤呼吸的温度敏感性. 造成不同处理$R_s/Q_{10}/R_{10}$差异的主要因子分别为Shannon多样性指数/容重/土壤有机质,可以解释其97.6%/78.2%/92.8%的变异.

关键词:培肥模式;环境因子;土壤呼吸;温度敏感性;高粱作物

中图分类号:X144 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2019)12-5515-09 **DOI**:10.13227/j.hjkx.201905138

Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field

YAN Jun-xia[1], ZHANG Yuan[1], JIAO Xiao-yan[2*]

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Resource, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract: The characteristics of soil respiration under the condition of fertilization have not been fully understood, especially for a long-term fertilization condition. In this study we measured both soil respiration using an LI-COR-6400-09 soil chamber attached to LI-COR-6400 portable photosynthesis system, and the vegetation spectrum using an ASD FieldSpec HandHeld2, in five different fertilization treatment fields. The soil respiration (R_s) and vegetation spectrum were simultaneously measured with two samples per month in the growing season in 2016 and 2017. The soil temperature at 10 cm depth (T_{10}) and moisture (W_s) for the surface of 10 cm were also measured simultaneously. The five different fertilization treatments included no fertilization (CK), inorganic fertilizer (INF), inorganic fertilizer + organic fertilizer (INF+M), inorganic fertilizer + organic fertilizer + straw turnover (INF+M+S) and organic fertilizer + straw turnover (M+S), and all treatments had been conducted since 2011. Based on those observation data, we made an analysis of R_s and its temperature sensitivity (Q_{10}) in the five different fertilization treatments. The results showed that no significant temporal change in R_s among the five treatments was found. No significant difference was found in R_s between the CK and INF treatments. Compared with the values of R_s in CK and INF, the R_s values in INF+M, M+S, and INF+M+S treatments increased by 28.2%-39.1%, 47.9%-76.0%, and 46.2%-50.8%, respectively. This indicated that use of organic fertilization and straw application increased R_s. Both the T_s and W_s showed 14%-96% and 6%-37% in R_s seasonal variations, respectively. Among the treatments, the correlation coefficient of the fitted equations between R_s and T_s was higher in the INF+M, INF+M+S and M+S treatment than in CK and INF, but was not between R_s and W_s. For the relationship between R_s and vegetation indexes we found that the correlation coefficients between R_s and the difference vegetation index (DVI), ratio vegetation index (RVI), and enhanced vegetation index (EVI), respectively, were higher than that of R_s and the normalized differential vegetation index (NDVI); and that the correlation coefficients between R_s and the red edge slope (D_{red}) and red edge area (S_{red}) were higher than between R_s and the red edge position (λ_{red}). This indicated that the treatments in INF+M+S increased the correlation coefficient between R_s and the spectrum characteristics index. The determination coefficient of the fitted equations including the feature spectral parameters, T_{10}, and W_s variables was higher than that of the equations only including both T_{10} and W_s variables, or a single variable of T_{10} or W_s. Compared with CK, the Q_{10} value increased by 26%, 39%, 21%, and 37% for the INF, INF+M, INF+M+S, and M+S treatments, respectively. This indicated that temperature sensitivity Q_{10} increased under the condition of fertilization treatments. The Shannon diversity index, bulk density, and soil organic matter were the main factors causing the difference in R_s, Q_{10}, and R_{10}, i.e., R_s at a temperature of 10℃, in the different treatments, which could explain the 97.6%, 78.2%, and 92.8% variations in R_s, Q_{10}, and

收稿日期:2019-05-18;**修订日期**:2019-06-26

基金项目:国家现代农业高粱产业技术体系建设专项(CARS-06-02-03);高等学校服务产业创新学科建设计划项目

作者简介:严俊霞(1976~),女,博士,副教授,主要研究方向为生态系统碳循环,E-mail:yjx422@sxu.edu.cn

* 通信作者,E-mail:xiaoyan_jiao@126.com

R_{10}, respectively.

Key words: fertilization treatment; environmental factors; soil respiration; temperature sensitivity; sorghum

土壤是陆地生态系统最大的碳库,其含碳量是大气的2倍[1]. 每年从土壤中释放的碳是年化石燃料燃烧碳释放量的10倍以上,在全球碳循环研究中起着关键作用[2],其微小变化会显著影响大气中的CO_2浓度,从而影响全球气候变化[3]. 农田生态系统是全球碳库中最活跃的部分,每年通过土壤呼吸向大气排放CO_2 640 $g\cdot m^{-2}$[4],极易受到施肥、灌溉、耕作等人为管理措施的影响,使得农田土壤呼吸的时空变化更加复杂. 因此,阐明人为管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响机制,对精确评估CO_2排放量、缓解温室效应有重要意义.

施肥是农业生产活动中提高作物产量最常用的方法. 施肥不仅会改变土壤的理化性质、保水和通气能力,而且也会影响土壤微生物的群落结构及其活性[5~8],进而影响土壤呼吸. 然而,施肥对土壤呼吸的影响尚没有统一结论. 土壤初始肥力水平[9]、施肥种类[10,11]和施肥量[12]等都会对土壤呼吸造成影响. 很多研究表明有机肥或有机无机肥配施都会使土壤呼吸速率显著增加[10],而单施无机肥的结果则不尽相同[13].

高粱(*Sorghum bicolor*)是世界第五大作物,具有抗旱、抗涝、耐盐碱、耐瘠薄、耐高温和耐寒冷等诸多特性,是干旱及半干旱地区的主要粮食作物和工业原料. 目前,前人就施肥对玉米、小麦等农作物地土壤呼吸的影响已经做了大量的报道[9,10,14],很少有研究关注不同培肥措施对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响. 基于此,本研究依托山西省农业科学院东阳试验基地高粱农田培肥的长期定位试验,对不同施肥处理下的土壤呼吸以及环境因子(土壤温度、水分、光谱植被指数以及微生物生物量、土壤酶活性等)进行了测定,分析不同培肥措施对土壤呼吸及其温度敏感性的影响机制,通过明确不同培肥措施下高粱地的固碳效应, 以期为之后的研究提供科学依据和数据支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验依托山西省农业科学院东阳试验基地开展,该基地位于山西省晋中市榆次区东阳镇(112°40′E,37°32′N),海拔804.6 m. 该区域属于暖温带半干旱大陆季风气候. 年均气温9.7℃,年降水量440.7 mm,降水70%以上集中在6~9月,年日照数不低于2 535 h. 供试土壤的基本理化性质见表1.

表1 样地土壤理化性质

Table 1 Soil physico-chemical properties of plot

土壤类型	土壤质地	有机质/$g\cdot kg^{-1}$	全氮/$g\cdot kg^{-1}$	有效磷/$mg\cdot kg^{-1}$	速效钾/$mg\cdot kg^{-1}$
潮土	黏土	11.13	1.16	17.81	177.65

1.2 试验设计

高粱培肥试验从2011年开始,采用大田分区的方法,每小区采用相同的管理措施,小区面积75 m^2(5 m×15 m),每种处理均为3个重复,随机区组排列设计. 播种前灌水900 $m^3\cdot hm^{-2}$,生育期间根据土壤水分状况进行灌溉. 试验品种为晋杂34号高粱. 每年5月上旬播种,同年10月上旬收获. 试验共设5个处理:CK(对照)、INF(无机肥)、INF+M(无机肥+有机肥)、INF+M+S(无机肥+有机肥+秸秆)和M+S(有机肥+秸秆). 对照组CK做不施肥处理;INF为无机肥处理,分别由N、P和K组成,其中氮肥用尿素,磷肥用磷二铵,钾肥用硫酸钾,在播种前将全部的钾肥、磷肥和一半的氮肥施入,剩余另一半的氮肥在高粱拔节期追施,氮肥、钾肥、磷肥的施入量分别为225、75和75 $kg\cdot hm^{-2}$;M为有机肥处理,在播种前将牛粪作为基肥全部一次性施入,施入量为45 $m^3\cdot hm^{-2}$;S为秸秆还田处理,在前一年收获时,将秸秆直接粉碎,全部均匀还田,还田量为500 $kg\cdot hm^{-2}$.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤呼吸、土壤温度和土壤水分的测定

使用LI-COR 8100土壤碳通量自动测量系统测定土壤呼吸速率(R_s),测定时间为2016年和2017年的5~10月,每月测定两次. 根据天气情况测定时间提前或推后1~2 d. 每年测定前,在每个培肥小区中随机放置3个直径19 cm、高5 cm的PVC环,间隔2 m左右. 所有PVC环一直保留到当年测定结束. 测定时每个PVC环测定3个循环,取平均值作为该处理的土壤呼吸速率. 土壤温度由LI-COR 8100碳通量自动测量系统自带的土壤温度探针测定,在测定R_s的同时,将温度探针插入土体10 cm深度测量土壤温度(T_{10}). 采用TDR法和传统烘

干法测定 0 ~ 10 cm 深度的土壤水分(W_s).

1.3.2　土壤理化因子的测定

土壤容重、饱和含水量、田间持水量采用环刀法测定,每年高粱收获前测定一次;土壤 pH 值采用土水比为 1∶2.5 的溶液进行测定;采用 Rovira 和 Vallejo 酸水解法测定土壤活性炭 1 和活性炭 2(LC1 和 LC2);用马尔文粒度仪(Mastersizer 3000)测定土壤的机械组成;根系的测定主要采用 WinRHIZO 根系形态分析系统;土壤微生物多样性用 BIOLOG 微平板分析法;土壤酶活性测定采用高锰酸钾滴定法、硫代硫酸钠滴定法、靛酚蓝比色法和磷酸苯二钠比色法;土壤养分测定的方法采用了凯氏定氮法、0.5 $mol \cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$ 法、NH_4OAC 浸提-火焰光度计法和重铬酸钾容量法. 测定的具体方法详见文献[15]. 土壤总空隙度采用如下公式计算:

$$土壤总空隙度 = (d_s - r_s)/d_s \times 100\%$$

式中,d_s 为土粒密度,本研究中为 2.65 $g \cdot cm^{-3}$,r_s 为土壤容重,$g \cdot cm^{-3}$.

1.3.3　光谱数据获取与处理

采用 ASD FieldSpec HandHeld 2 便携式地物光谱仪采集高粱冠层反射光谱. 2016 年光谱仪损坏没有观测,仅在 2017 年高粱生长季进行了观测,采集日期同土壤呼吸. 选取归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)、比值植被指数(RVI)、增强植被指数(EVI)和红边参数(λ_{red}:红边位置,D_{red}:红边斜率,S_{red}:红边面积)用于分析生物因子与土壤呼吸的相关性,冠层反射光谱的测定方法和植被指数的具体计算方法见文献[16].

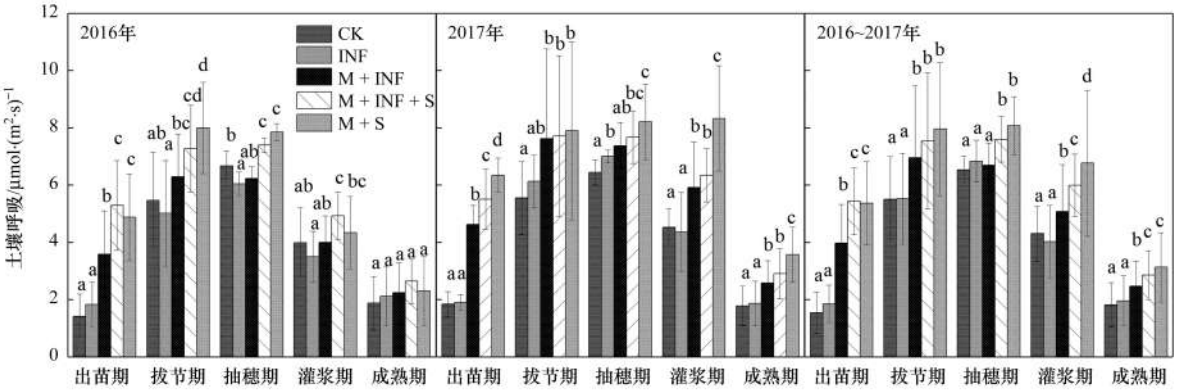
1.4　数据处理与分析

方差分析用于检验 5 种培肥模式下土壤呼吸速率(R_s)、土壤温度(T_{10})和土壤水分(W_{10})的均值差异是否显著. 用线性或非线性方程分析 R_s 与 T_{10} 或 R_s 与 W_s 之间的单因素关系;用 R_s 与 T_{10} 的指数方程的拟合系数计算 Q_{10} 和土壤基础呼吸[R_{10}, $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$];用线性方程拟合 R_s 与 T_{10}、W_s、植被指数的双因子或三因子模型;具体分析方法参见文献[17]. 用相关分析法分析根系生物量、产量、土壤微生物多样性、高光谱参数、土壤酶活性、土壤养分等因子与土壤呼吸的相关关系. 数据分析基于 SPSS 19.0 完成,所有图件用 Sigmaplot 12.5 绘制.

2　结果与分析

2.1　不同培肥模式土壤呼吸动态变化特征

从苗期到成熟期,R_s 呈现先增加后降低的趋势,最高值出现在拔节期或抽穗期(图 1). 各生育期 CK 和 INF 差异不显著($P > 0.05$),除抽穗期 INF + M 与 CK 和 INF 差异不显著外,其他生育期 INF + M、INF + M + S 和 M + S 处理显著高于 CK 和 INF($P < 0.05$). 5 个处理 R_s 的平均速率表现为:M + S[5.19 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > INF + M + S[5.13 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > INF + M[4.50 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > CK[3.68 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > INF[3.51 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$](2016 年);M + S[6.44 和 5.81 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > INF + M + S[5.52 和 5.33 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > INF + M[5.09 和 4.79 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > INF[3.66 和 3.58 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$] > CK[3.46 和 3.57 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$][2017 年和两年(2016 和 2017)],见表 2. INF(单施无机肥)与 CK 无显著差异. 与单施无机肥相比,有机 + 无机肥配施使 R_s 增加了 28.21% ~ 39.07%,有机肥 + 秸秆还田提高了 47.86% ~ 75.96%,有机肥 + 无机肥 + 秸秆提高了 46.15% ~ 50.82%,表明施有机肥和秸秆还田均可以促进 R_s.



图中不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)

图 1　不同培肥处理下土壤呼吸生育期动态变化

Fig. 1　Seasonal variation of soil respiration under different fertilization treatments

2.2 环境因子对土壤呼吸时间动态变化的影响

2.2.1 土壤温度

除 2017 年 CK 未达到显著水平外,其余处理的 R_s 与 T_{10} 呈显著或极显著的指数关系,与 CK 相比,施肥的 4 个处理都提升了拟合方程的解释度(表 3). 用 2 年测定的数据分析表明,与 CK 相比,施肥处理后的 Q_{10} 均有不同程度地提高,INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 处理分别提高了 19.60%、39.65%、18.53% 和 44.05%;5 个处理(CK、INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S)的 R_{10} 分别为 1.64、1.44、1.78、2.45 和 2.11 μmol·(m²·s)⁻¹,表明施有机肥均提高了土壤基础呼吸.

表 2 不同施肥处理土壤呼吸比较[1)]/μmol·(m²·s)⁻¹

Table 2 Comparison of soil respiration under different fertilization treatments/μmol·(m²·s)⁻¹

年份	处理	平均值[1)]	标准差	95 置信区域		最小值	最大值	变异系数/%
				下界	上界			
2016	CK	3.68a	2.11	2.33	5.02	0.74	6.90	57.34
	INF	3.51a	1.84	2.34	4.67	0.85	6.69	52.42
	INF + M	4.50a	2.38	2.99	6.01	1.03	9.76	52.89
	INF + M + S	5.13a	2.12	3.78	6.47	1.83	8.57	41.33
	M + S	5.19a	2.59	3.54	6.83	0.99	10.21	49.90
	总计	4.40	2.26	3.82	4.98	0.74	10.21	51.36
2017	CK	3.46a	2.06	2.15	4.76	1.03	6.88	59.54
	INF	3.66a	2.28	2.21	5.11	0.95	7.36	62.30
	INF + M	5.09ab	2.65	3.40	6.77	2.02	11.27	52.06
	INF + M + S	5.52ab	2.52	3.92	7.12	2.32	10.98	45.65
	M + S	6.44b	2.72	4.70	8.17	2.90	11.53	42.24
	总计	4.83	2.63	4.15	5.51	0.95	11.53	54.45
2016 ~ 2017	CK	3.57a	2.04	2.71	4.43	0.74	6.90	57.14
	INF	3.58a	2.03	2.73	4.44	0.85	7.36	56.70
	INF + M	4.79ab	2.48	3.75	5.84	1.03	11.27	51.77
	INF + M + S	5.33b	2.28	4.36	6.29	1.83	10.98	42.78
	M + S	5.81b	2.68	4.68	6.94	0.99	11.53	46.13
	总计	4.62	2.45	4.17	5.06	0.74	11.53	53.03

1) 不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)

表 3 不同施肥处理及年份下土壤呼吸与土壤温度拟合结果

Table 3 Fitting results of soil respiration and soil temperature under different fertilization treatments and years

施肥处理	年份	拟合方程	R^2	P	Q_{10}/μmol·(m²·s)⁻¹	R_{10}/μmol·(m²·s)⁻¹
CK	2016	$R_s = 0.818\,2e^{0.064\,5T_{10}}$	0.45	0.017	1.91	1.56
	2017	$R_s = 1.191\,4e^{0.039T_{10}}$	0.14	0.232	1.48	1.76
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.977\,6e^{0.051\,5T_{10}}$	0.28	0.008	1.67	1.64
INF	2016	$R_s = 0.789\,1e^{0.069\,4T_{10}}$	0.57	0.005	2.00	1.58
	2017	$R_s = 0.541\,8e^{0.077\,8T_{10}}$	0.42	0.022	2.18	1.80
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.716\,9e^{0.069\,4T_{10}}$	0.46	< 0.001	2.00	1.44
INF + M	2016	$R_s = 0.708\,6e^{0.088\,9T_{10}}$	0.85	< 0.001	2.43	1.72
	2017	$R_s = 0.840\,5e^{0.080\,1T_{10}}$	0.70	0.001	2.23	1.87
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.762\,5e^{0.084\,9T_{10}}$	0.79	< 0.001	2.34	1.78
INF + M + S	2016	$R_s = 1.352\,2e^{0.065\,5T_{10}}$	0.78	0.001	1.93	2.60
	2017	$R_s = 1.059\,5e^{0.074\,4T_{10}}$	0.75	< 0.001	2.10	2.23
	2016 ~ 2017	$R_s = 1.236\,3e^{0.068\,5T_{10}}$	0.76	< 0.001	1.98	2.45
M + S	2016	$R_s = 0.675\,7e^{0.098\,1T_{10}}$	0.96	< 0.001	2.67	1.80
	2017	$R_s = 1.361\,6e^{0.069\,9T_{10}}$	0.71	0.001	2.01	2.74
	2016 ~ 2017	$R_s = 0.874\,8e^{0.088T_{10}}$	0.85	< 0.001	2.41	2.11

2.2.2 土壤水分

采用 4 种模型(线性、指数、幂函数和二次函数模型)分析 R_s 与 W_s 的关系, 5 种处理的二次函数模型解释度明显高于其他 3 种模型. 采用所有的测定数据分析表明,不同施肥处理下,土壤水分对土壤呼吸变异的解释度分别为 28%(CK)、38%(INF)、29%(INF + M)、37%(INF + M + S)和 28%(M + S),与对照组相比,不同施肥处理并未提升土

壤水分对土壤呼吸变异的解释度(表4).

2.2.3　生物因子

4 种植被指数中,CK 的 R_s 与 DVI 呈极显著正相关,与 EVI 呈显著正相关,与 NDVI、RVI 相关不显著;INF 的 R_s 与 DVI、EVI 呈极显著正相关,与 NDVI、RVI 呈显著正相关;INF + M 和 INF + M + S 的 R_s 与 DVI、RVI 和 EVI 呈显著正相关,与 NDVI 相关不显著;M + S 的 R_s 与 RVI 的相关系数最高为 0.64,但未达到显著水平;用所有测定数据做相关分析结果表明:R_s 与 4 种植被指数都呈极显著相关,其中 DVI 和 EVI 的相关系数最高为 0.69(表5). 3 个红边参数中,R_s 与 D_{red}、S_{red}的相关性好于 λ_{red}的,除 M + S 的相关系数没有达到显著水平外,CK 和 INF 的都达到极显著水平,INF + M、INF + M + S 的达到显著水平. 用所有测定的数据做相关分析表明,3 个红边参数与 R_s 的相关性都达到了极显著水平,D_{red}、S_{red}和 λ_{red}的相关系数依次为 0.70、0.69 和 0.52(表5).

表4　不同施肥处理下土壤呼吸与土壤水分拟合结果

Table 4　Fitting results of soil respiration and soil moisture under different fertilization treatments

施肥处理	年份	拟合方程	R^2	P
CK	2016	$R_s = -0.072\,3\ W_s^2 + 1.779\,7\ W_s - 5.8269$	0.49	0.050
	2017	$R_s = -0.011\,2\ W_s^2 + 0.108\,3\ W_s + 4.405\,8$	0.23	0.319
	2016 ~ 2017	$R_s = -0.038\,6\ W_s^2 + 0.908\,6\ W_s - 0.906\,6$	0.28	0.031
INF	2016	$R_s = -0.061\,2\ W_s^2 + 1.578\ W_s - 5.397\,1$	0.57	0.023
	2017	$R_s = -0.027\ W_s^2 + 1.184\,5\ W_s + 14.732$	0.57	0.022
	2016 ~ 2017	$R_s = -0.035\,3\ W_s^2 + 0.751\,1\ W_s + 0.772\,8$	0.38	0.007
INF + M	2016	$R_s = -0.048\,7\ W_s^2 + 1.350\,3\ W_s - 3.572$	0.44	0.074
	2017	$R_s = -0.011\ W_s^2 + 0.116\,7\ W_s + 6.530\,2$	0.28	0.233
	2016 ~ 2017	$R_s = -0.031\,2\ W_s^2 + 0.830\,1\ W_s + 0.315\,9$	0.29	0.029
INF + M + S	2016	$R_s = -0.053\,2\ W_s^2 + 1.613\,3\ W_s - 5.589\,9$	0.57	0.022
	2017	$R_s = -0.022\,4\ W_s^2 + 0.597\,5\ W_s + 2.551$	0.30	0.195
	2016 ~ 2017	$R_s = -0.033\,9\ W_s^2 + 1.004\,8\ W_s - 1.055\,9$	0.37	0.008
M + S	2016	$R_s = -0.053\ W_s^2 + 1.307\,6\ W_s - 1.103\,4$	0.49	0.049
	2017	$R_s = -0.035\,1\ W_s^2 + 0.993\,6\ W_s + 0.509\,9$	0.31	0.193
	2016 ~ 2017	$R_s = -0.033\,4\ W_s^2 + 0.868\ W_s + 1.340\,5$	0.28	0.033

表5　高粱地土壤呼吸与各类高光谱参数的相关系数1)

Table 5　Correlation coefficients between hyperspectral parameters and soil respiration of sorghum

处理	CK	INF	INF + M	INF + M + S	M + S	所有
NDVI	0.62	0.77 *	0.54	0.57	0.52	0.56 **
DVI	0.84 **	0.90 **	0.73 *	0.68 *	0.55	0.69 **
RVI	0.53	0.74 *	0.70 *	0.74 *	0.64	0.68 **
EVI	0.79 *	0.90 **	0.71 *	0.70 *	0.57	0.69 **
λ_{red}	0.50	0.66	0.60	0.33	0.48	0.52 **
D_{red}	0.85 **	0.91 **	0.70 *	0.71 *	0.60	0.70 **
S_{red}	0.86 **	0.91 **	0.74 *	0.70 *	0.55	0.69 **

1) NDVI:归一化植被指数;DVI:差值植被指数;RVI:比值植被指数;EVI:增强植被指数;λ_{red}:红边位置;D_{red}:红边斜率;S_{red}:红边面积; * 表示 $P < 0.05$, * * 表示 $P < 0.01$

2.2.4　基于生物因子和非生物因子的土壤呼吸模型构建

由于光谱仪故障,高粱冠层光谱反射率只在 2017 年生长季测定. 用 2017 年每次测定的 T_{10}、W_s 以及光谱特征参数数据进行分析. 根据前面分析的结果,高光谱参数选择与呼吸相关性最好的 DVI、EVI,红边参数选择 D_{red}、S_{red}参与复合模型的构建. 结果表明,用光谱特征参数、T_{10}和 W_s 做自变量的 3 因子 R_s 模型的回归模型均达到了 99% 的极显著水平,模型的决定系数 R^2 都高于双因子和单因子模型,均能很好地预测高粱地的土壤呼吸(表6).

2.3　环境因子对不同处理土壤呼吸的影响

分别对每个样地土壤呼吸的年均值(R_{av})、温度敏感性(Q_{10})和基础呼吸速率(R_{10})与环境因子进行皮尔逊相关分析,结果见表 7. 从中可以看出,R_{av}与根表面积、Shannon 多样性指数、碳源利用丰富度指数呈极显著正相关,与根体积、蔗糖酶、全氮、速效钾、有效磷、pH、砂粒和土壤水分呈显著正相关,与容重、黏粒含量和粉砂含量呈显著负相关;土壤温度敏感性 Q_{10}与容重呈显著负相

关,与其他因子的相关性都不显著;R_{10}与有机质呈极显著正相关,与根表面积、根体积和碳源利用丰富度指数、红边面积、蔗糖酶、全氮、有效磷、速效钾和土壤水分呈显著正相关. 逐步回归分析表明,决定不同处理土壤呼吸均值、Q_{10}、R_{10}差异的主要因子分别为 Shannon 多样性指数、容重和土壤有机质,可以解释 97.6%、78.2% 和 92.8% 的变异.

表 6 土壤呼吸与生物因子和非生物因子的回归模型[1)]

Table 6 Regression models of soil respiration with biotic and abiotic factors

模型	自变量	回归方程	R^2	RMSE	MAE
三因子	DVI、T_{10}、W_s	$R_s = -8.922 + 8.111\ \mathrm{DVI} + 0.336T_{10} + 0.289\ W_s$	0.63**	1.566	1.161
	EVI、T_{10}、W_s	$R_s = -8.934 + 5.246\ \mathrm{EVI} + 0.335T_{10} + 0.275\ W_s$	0.63**	1.575	1.187
	D_{red}、T_{10}、W_s	$R_s = -9.025 + 387.189D_{red} + 0.319T_{10} + 0.312\ W_s$	0.66**	1.514	1.142
	S_{red}、T_{10}、W_s	$R_s = -8.960 + 8.972S_{red} + 0.328T_{10} + 0.299\ W_s$	0.63**	1.559	1.156
双因子	T_{10}、W_s	$R_s = -9.380 + 0.516T_{10} + 0.233\ W_s$	0.51**	1.790	1.373
	DVI、T_{10}	$R_s = -0.668 + 6.687\ \mathrm{DVI} + 0.182T_{10}$	0.52**	1.783	1.420
	EVI、T_{10}	$R_s = -0.933 + 4.548\ \mathrm{EVI} + 0.179T_{10}$	0.52**	1.774	1.414
	D_{red}、T_{10}	$R_s = -0.284 + 302.930D_{red} + 0.165T_{10}$	0.53**	1.765	1.429
	S_{red}、T_{10}	$R_s = -0.521 + 7.124S_{red} + 0.176T_{10}$	0.52**	1.787	1.423
单因子	T_{10}	$R_s = -2.401 + 0.360\ T_{10}$	0.44**	1.931	1.538
	T_{10}	$R_s = 0.783e^{0.083\ T_{10}}$	0.54**	1.965	1.544
	W_s	$R_s = 8.048 - 0.171\ W_s$	0.08*	2.461	1.983
	DVI	$R_s = 2.043 + 10.502\mathrm{DVI}$	0.47**	1.870	1.531
	EVI	$R_s = 1.592 + 7.042\mathrm{EVI}$	0.48**	1.861	1.522
	D_{red}	$R_s = 2.269 + 450.891D_{red}$	0.49**	1.838	1.519
	S_{red}	$R_s = 2.119 + 11.107S_{red}$	0.47**	1.866	1.524

1) ** 表示在 0.01 水平上显著;$n = 45$

表 7 土壤呼吸、温度敏感性、基础呼吸速率与环境因子的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between soil respiration, temperature sensitivity, base respiration rate, and environmental factors

影响因子	R_{av}	R_{10}	Q_{10}	影响因子	R_{av}	R_{10}	Q_{10}
根系生物量/g	0.869	0.742	0.719	全氮/g·kg^{-1}	0.886*	0.940*	0.492
根表面积/cm^2	0.967**	0.942*	0.527	有效磷/mg·kg^{-1}	0.882*	0.936*	0.487
根体积/cm^3	0.889*	0.896*	0.567	速效钾/mg·kg^{-1}	0.894*	0.955*	0.470
产量/kg·hm^{-2}	0.674	0.553	0.696	有机质/g·kg^{-1}	0.817	0.964**	0.335
EVI	0.861	0.869	0.565	pH	0.957*	0.668	0.874
红边位置	0.697	0.537	0.724	容重/g·kg^{-1}	−0.880*	−0.566	−0.884*
红边斜率	0.819	0.817	0.576	饱和含水量/%	0.861	0.606	0.835
红边面积	0.795	0.905*	0.403	田间持水量/%	0.758	0.622	0.680
Shannon 多样性指数	0.988**	0.870	0.677	孔隙度/%	0.874	0.567	0.870
碳源利用丰富度指数	0.980**	0.895*	0.622	黏粒	−0.886*	−0.837	−0.608
过氧化氢酶/mL·g^{-1}	0.656	0.637	0.557	粉砂	−0.892*	−0.789	−0.705
脲酶/mg·g^{-1}	0.718	0.623	0.673	砂粒	0.892*	0.793	0.695
蔗糖酶/mg·g^{-1}	0.942*	0.904*	0.591	土壤温度/%	−0.828	−0.671	−0.778
碱性磷酸酶/mg·g^{-1}	0.718	0.623	0.673	土壤水分/%	0.885*	0.879*	0.588

1) ** 表示在 0.01 水平上显著, * 表示在 0.05 水平上显著;$n = 5$

3 讨论

3.1 环境因子对土壤呼吸时间动态变化的影响

本研究中,高粱地的土壤呼吸随土壤温度/高粱生长阶段的不同有明显的季节变化,最高值出现在拔节期或抽穗期,变化范围(以 CO_2 计)为 0.74 ~ 11.53 μmol · (m^2 · s)$^{-1}$(图 1),与高会议等[14]对黄土旱塬区冬小麦土壤呼吸的研究结果相一致. 有许多研究表明,在没有水分或其他环境因子胁迫的情况下,土壤呼吸与温度有显著的相关关系. 本研究表明,土壤温度能解释 R_s 季节变化的 14% ~ 96%,除 2017 年 CK 处理的 R_s 与 T_{10}未达到显著水平外,其余处理呈显著或极显著的指数关系,与大多数研究相一致. 与 CK 相比,INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 处理的 T_{10}解释 R_s 季节变化的能力分别提高了 18%、51%、46% 和 57%(2 年数据),表明施肥处理显著提高了土壤温度的解释能力. 土壤水分通过影响土壤通气状况、微生物活性等进而影响土壤呼吸速率,很多研究认为土壤水分只有在最低或最高时才会对土壤呼吸速率产生影响[17]. 本

研究中，5 种施肥处理的土壤呼吸速率和土壤水分之间采用二次函数拟合效果最好，表明随着土壤水分的增加，土壤呼吸速率先增加后减低，与吴瑞娟等[18]对东北中部春玉米农田土壤呼吸的研究结果相一致. 5 种处理中，采用 2 a 的数据分析，土壤水分对土壤呼吸变异的解释度分别为 28%（CK）、38%（INF）、29%（INF + M）、37%（INF + M + S）和 28%（M + S），与对照组相比，不同施肥处理并未显著提升土壤水分对土壤呼吸变异的解释度. 当土壤水分分别超过 11.77%（CK）、10.64%（INF）、13.30%（INF + M）、14.82%（INF + M + S）和 12.99%（M + S）时，土壤呼吸速率可能呈现下降趋势. 生物因子是影响土壤呼吸时空变化的关键因素之一[19]，植被指数是植物光合能力的指示指标[20]，影响土壤呼吸的底物供应，与土壤呼吸相关关系显著. 本研究中，采用所有的数据分析表明，土壤呼吸与 4 个植被指数都呈显著的正相关，与 Huang 等[21]对青藏高原草地和 Wu 等[22]对加拿大北方黑云杉林的研究结果相一致. 土壤呼吸与 DVI、RVI、EVI 的相关系数高于与 NDVI 的，可能是因为高粱作物拔节期后植被盖度较高，NDVI 达到了饱和，不能很好地反映出植被盖度间的空间差异. Huang 等[23]也指出玉米和冬小麦农田生态系统土壤呼吸与 EVI 的相关性强于与 NDVI 的，原因可能是当叶面积指数大于 3 时，NDVI 显示的季节变化幅度较小，与本研究的结果相一致. 红边是植物所特有的光谱特征，常被用来对植物营养状况、长势情况、水分含量、叶面积等指标进行监测. 采用所有测定的数据分析表明，高粱地的土壤呼吸与 3 个红边参数都呈极显著正相关，相关系数从大到小依次为红边斜率（0.70）、红边面积（0.69）、红边位置（0.52），表明红边参数可以用来模拟土壤呼吸的季节变化，与武江星[16]对生物炭和覆膜处理高粱的研究结果相一致.

3.2　施肥对土壤呼吸的影响

从两年的均值比较来看，5 种处理土壤呼吸速率的平均值从高到低依次为 M + S > INF + M + S > INF + M > INF > CK. 与 CK 相比，2016 年 INF 土壤呼吸的均值比 CK 低 0.17 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$、2017 年和 2016 ~ 2017 年的结果比 CK 高 0.20 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ 和 0.01 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$，且均未达到显著水平. 关于无机肥对土壤呼吸的研究已经有很多，但结论却不一致，有增加[12]和抑制[24]、无显著影响[9]这 3 种结论，取决于样地的初始肥力水平和施肥量[9]. Sun 等[9]认为低、高肥力农田施氮肥和磷肥后与各自的对照相比，土壤呼吸分别显著提高了 46% 和 14%. 其原因可能是：一方面，施肥增加了低、高肥力农田的植物碳输入、光合速率、根系生物量和作物产量，进而使土壤自养呼吸增加，另一方面，施氮肥和磷肥增加了低肥力农田的土壤微生物生物量、土壤碳的可利用性和酶活性，进而刺激了土壤微生物呼吸的增加，而高肥力农田的土壤微生物量下降、土壤酶活性增强，因此高肥力农田土壤总呼吸的增加可能主要是由于根系呼吸的增加，而低肥力农田的自养和异养呼吸都增加，因此增加幅度高于高肥力农田. 本研究中，与 CK 相比，INF 的根系生物量、产量和土壤蔗糖酶活性分别增加了 76.3%（$P < 0.05$）、80.6%（$P < 0.05$）和 22.3%（$P > 0.05$），土壤全氮、有效磷、速效钾和有机质增加了 10.3%（$P > 0.05$）、154.2%（$P > 0.05$）、10.7%（$P > 0.05$）和 8.1%（$P > 0.05$），而土壤微生物 Shannon 多样性指数、碳源利用丰富度指数，拔节期减低了 5.2%（$P < 0.05$）和 20.0%（$P < 0.05$）[15]，表明施无机肥后高粱地自养呼吸增加，而异养呼吸有可能减低，因此土壤总呼吸变化不明显，与 Sun 等[9]报道的高肥力农田的结果相同. M + S 处理添加无机肥后（INF + M + S）土壤总呼吸减低了 1.2%（$P > 0.05$，2016 年）、16.7%（$P > 0.05$，2017 年）和 8.3%（$P > 0.05$，2016 ~ 2017 年），其原因可能是添加无机肥后虽然 INF + M + S 的根系生物量、产量、土壤蔗糖酶活性、土壤养分都有所增加，但是其土壤微生物 Shannon 多样性指数和碳源利用丰富度指数都降低[15]. 大量研究表明，有机和无机肥配施可以显著增加土壤呼吸速率[11, 14]，施入有机肥一方面能够增加土壤呼吸的底物供应，另一方面可以显著提高土壤微生物的活性，进而促进土壤有机质的矿化[7, 8]. 本研究中，INF 处理添加有机肥（INF + M）后，根系生物量、土壤养分、微生物多样性和酶活性均有提高[15]，进而使得土壤呼吸增加了 28.2%（$P > 0.05$，2016 年）、39.1%（$P > 0.05$，2017 年）和 33.8%（$P > 0.05$，2016 ~ 2017 年），这一结果与上述结果相一致. 秸秆还田可以有效提高土壤养分以及有机质含量，致使土壤微生物数量增多，同时还可以降低土壤容重、增加土壤通气孔隙，使得土壤的耕层变得疏松，并能影响作物生长发育，促进作物产量提高[7]，因此会促进土壤呼吸. 本研究中，添加秸秆后（INF + M + S）比 INF + M 的土壤呼吸增加了 1.2%（$P > 0.05$，2016 年）、8.4%（$P > 0.05$，2017 年）和 11.27%（$P > 0.05$，2016 ~ 2017 年），表明秸秆还田和其他肥料的配施可以显著促进 R_s，与田冬等[25]和胡发龙等[26]的研究结果相一致.

3.3 施肥对土壤呼吸温度敏感性的影响

不同生态系统类型的 Q_{10} 不尽相同[27,28],从略大于 1 到大于 10,主要受所在区域的环境因子以及生态系统的底物供应影响. 本研究中, 5 种处理的 Q_{10} 在 1.48 ~2.67 之间,位于 Raich 等[29]报道的范围内(1.3 ~3.3). 有研究表明,易降解有机碳的 Q_{10} 低,难降解有机碳的高[30]. 本研究中,相比于 CK,除 INF + M + S 活性碳的含量增加了 0.07 $g \cdot kg^{-1}$ 外,INF、INF + M 和 M + S 分别减少了 0.11、0.06 和 0.08 $g \cdot kg^{-1}$,而顽固性有机碳 INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 分别增加了 0.3、1.6、4.1 和 2.3 $g \cdot kg^{-1}$. 因此,与 CK 相比,INF、INF + M、INF + M + S 和 M + S 的 Q_{10} 分别提高了 26%、39%、21% 和 38%,与 Cusack 等[31]和邵蕊等[32]的研究结果相一致,施肥使土壤温度敏感性增加. Guo 等[24]研究也表明,连续 15a 施氮肥和磷肥后青藏高原草甸的土壤微生物呼吸减低而土壤温度敏感性增加,可能是因为施肥增加了具有高温度敏感性的难降解有机质的含量. 然而,Sun 等[9]报道了长武黄土高原农业生态试验站的低肥力农田施无机肥后 Q_{10} 显著降低了 6.9%,高肥力农田没有明显变化,因此施肥对 Q_{10} 的影响还有待进一步深入研究.

4 结论

(1)施肥处理并没有改变 R_s 的时间动态变化趋势,从苗期到成熟期,R_s 呈现先增加后降低的趋势,峰值出现在拔节期或抽穗期. 单施无机肥并没有使 R_s 明显增加,而有机无机肥配施、有机无机肥配施加秸秆还田、有机肥加秸秆还田使 R_s 增加. 同样,施肥提高了 R_s 的温度敏感性.

(2)土壤温度和土壤水分分别能解释 R_s 季节变化的 14% ~96% 和 6% ~37%,施肥处理显著提高了土壤温度对土壤呼吸的解释能力,但施肥处理后土壤水分对呼吸的影响没有明显差异;R_s 与 DVI、RVI、EVI 的相关系数高于与 NDVI 的相关系数,与 D_{red} 和 S_{red} 的相关系数高于 λ_{red},有机肥和秸秆的施用降低了 R_s 与光谱特征参数的相关性;用光谱特征参数、T_{10}、W_s 为自变量的 3 因子模型的决定系数 R^2 都高于双因子和单因子模型.

(3)造成不同施肥处理下 R_s、Q_{10} 和 R_{10} 差异的主要因子分别为 Shannon 多样性指数、容重和土壤有机质,它们分别可以解释其 97.6%、78.2% 和 92.8% 的变异.

参考文献:

[1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. Global Change Biology, 2010, **1**(1): 77-91.

[2] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94[J]. Global Change Biology, 2002, **8**(8): 800-812.

[3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 7-20.

[4] 刘德辉, 陶于祥. 土壤、农业与全球气候变化[J]. 火山地质与矿产, 2000, **21**(4): 290-295.
Liu D H, Tao Y X. Soil, agriculture and global climate change [J]. Volcanology & Mineral Resources, 2000, **21**(4): 290-295.

[5] Ran W B, Wang B, Xun W, *et al*. Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China [J]. Environmental Microbiology, 2016, **18**(6): 1907-1917.

[6] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, *et al*. Effects of 15 years of manure and mineral fertilizers on enzyme activities in particle-size fractions in a North China Plain soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, **60**: 112-119.

[7] Liu E K, Yan C R, Mei X R, *et al*. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 173-180.

[8] Zhang S Q, Huang S M, Li J W, *et al*. Long-term manure amendments and chemical fertilizers enhanced soil organic carbon sequestration in a wheat (*Triticum aestivum* L.)-maize (*Zea mays* L.) rotation system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, **97**(8): 2575-2581.

[9] Sun Q Q, Rui W, Ying W, *et al*. Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: Does soil initial fertility matter? [J]. Geoderma, 2018, **325**: 172-182.

[10] Lai R, Arca P, Lagomarsino A, *et al*. Manure fertilization increases soil respiration and creates a negative carbon budget in a Mediterranean maize (*Zea mays* L.)-based cropping system [J]. Catena, 2017, **151**: 202-212.

[11] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(5): 1445-1451.
Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, *et al*. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years [J]. Acta Ecolcgica Sinica, 2015, **35**(5): 1445-1451.

[12] Iqbal J, Hu R G, Shan L, *et al*. CO_2 emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, **131**(3-4): 292-302.

[13] Zhou LY, Zhou X H, Zhang B C, *et al*. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, **20**(7): 2332-2343.

[14] 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.
Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, *et al*. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau [J]. Acta Ecolcgica Sinica, 2009, **29**(5): 2551-2559.

[15] 董二伟, 王成, 丁玉川, 等. 高粱生长及其土壤环境对不同培肥措施的响应[J]. 华北农学报, 2017, **32**(2): 217-225.
Dong E W, Wang C, Ding Y C, *et al*. Response of different fertilizing on growth and soil environment of sorghum[J]. Acta

Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, **32**(2): 217-225.

[16] 武江星. 生物炭和覆膜对高粱高光谱特征及其土壤呼吸的影响[D]. 太原: 山西大学, 2016.

[17] Li H J, Yan J X, Yue X F, *et al*. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **148**(3): 490-503.

[18] 吴瑞娟, 王迎春, 朱平, 等. 长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(1): 44-52.
Wu R J, Wang Y C, Zhu P, *et al*. Effects of long-term fertilization on soil respiration in spring maize field in the central part of northeast China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, **24**(1): 44-52.

[19] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(7): 778-785.
Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. Advances in Earth Sciences, 2005, **20**(7): 778-785.

[20] Rahman A F, Sims D A, Cordova V D, *et al*. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes [J]. Geophysical Research Letters, 2005, **32**(19): L19404.

[21] Huang N, He J S, Niu Z. Estimating the spatial pattern of soil respiration in Tibetan alpine grasslands using Landsat TM images and MODIS data [J]. Ecological Indicators, 2013, **26**: 117-125.

[22] Wu C Y, Gaumont-Guay D, Black T A, *et al*. Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, **94**: 80-90.

[23] Huang N, Niu Z, Zhan Y L, *et al*. Relationships between soil respiration and photosynthesis-related spectral vegetation indices in two cropland ecosystems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, **160**: 80-89.

[24] Guo H, Ye C L, Zhang H, *et al*. Long-term nitrogen & phosphorus additions reduce soil microbial respiration but increase its temperature sensitivity in a Tibetan alpine meadow [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **113**: 26-34.

[25] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988-2999.
Tian D, Gao M, Huang R, *et al*. Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and Biochar in rape-maize rotation systems[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2988-2999.

[26] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(1): 120-131.
Hu F L, Chai Q, Gan Y T, *et al*. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(1): 120-131.

[27] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(6): 753-760.

[28] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, **8**(3): 315-323.

[29] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, **9**(1): 23-36.

[30] Vanhala P, Karhu K, Tuomi M, *et al*. Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(11): 2967-2970.

[31] Cusack D F, Torn M S, McDowell W H, *et al*. The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(9): 2555-2572.

[32] 邵蕊, 赵苗苗, 赵芬, 等. 施肥对油茶园土壤呼吸和异养呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2315-2322.
Shao R, Zhao M M, Zhao F, *et al*. Effects of fertilization on soil respiration, heterotrophic respiration, and temperature sensitivity in an oil tea plantation[J]. Acta Ecolcgica Sinica, 2018, **38**(2): 2315-2322.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2019

CONTENTS