

不同前茬冬小麦土壤呼吸特征及影响因子分析

郝旺林¹, 梁银丽^{1,2*}, 吴兴¹, 林兴军², 朱艳丽¹, 罗安荣¹

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 以不同蔬菜前茬处理的冬小麦田为对象, 研究土壤呼吸变化特征、各影响因子对土壤呼吸的响应的通径分析以及计算全生长季农田碳汇强度。结果表明: ①温度对土壤呼吸速率的响应随深度增加具有滞后性; 土壤呼吸与土壤水分呈显著二次相关。②有效磷、速效钾、土壤脲酶、土壤温度、土壤水分对土壤呼吸变化的贡献较大, 为主要影响因子。5 种主要因子中土壤温度对土壤呼吸的作用最强, 速效钾的作用最弱。③4 种不同前茬处理的冬小麦田平均碳排放速率为: 辣椒茬 > 芹菜茬 > 玉米茬 > 茄子茬。而碳“汇”强度表现: 茄子茬 > 芹菜茬 > 玉米茬 > 辣椒茬。就本研究而言, 虽然辣椒茬的冬小麦田平均土壤呼吸速率较大, 但其农田碳固定量也较大, 净初级生产力(NPP)与土壤碳释放量(Rs)的比值 NPP/Rs 最大, 表现为碳“汇”强度也最大, 按照增“汇”减排的宗旨安排轮作种植, 辣椒茬是比较适宜的前茬, 其次是玉米茬、芹菜茬、茄子茬。

关键词: 前茬处理; 冬小麦; 土壤呼吸速率; 影响因子; 通径分析; 碳循环

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3167-07

Soil Respiration Variations in Winter Wheat Field in Different Previous Crops and Its Influencing Factors

HAO Wang-lin¹, LIANG Yin-li^{1,2}, WU Xing¹, LIN Xing-jun², ZHU Yan-li¹, LUO An-rong¹

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This study was to define the Variations of soil respiration, the response of influence factors to soil respiration and carbon sink in the total growing season, in winter wheat field of different previous crops. The results showed that: ①as soil depth increases, the response of temperature to soil respiration rate also increased with a lag; ②the soil respiration rate was quadric to soil moisture, phosphorus, potassium, soil urease activity, soil temperature, soil moisture as the main factors had an effect on soil respiration rate; soil temperature had the stronger effect on soil respiration rate when potassium had the weaker effect on soil respiration rate; ③the average carbon emission rate in wheat filed of different previous crops showed as follow: Pepper of previous crops > celery of previous crops > corn of previous crops > eggplant of previous crops. The intensity of carbon “sink” displayed as follow: eggplant of previous crops > celery of previous crops > corn of previous crops > pepper of previous crops. As for the trials of this study, although the soil respiration rate is highest in the winter wheat filed of previous pepper, the amount of carbon fixed is the most. Its ratio of net primary productivity (NPP) and soil carbon release quantity was highest, so carbon sink was the strongest. If rotation planting was arranged according to the purpose of increasing carbon sink and reducing carbon emissions, pepper was relatively appropriate stubbles crop, followed by corn crop, celery and eggplant.

Key words: previous crops treatment; winter wheat; soil respiration rate; impact factor; path analysis; carbon cycle

土壤呼吸主要是指土壤中微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸和含碳矿物质的化学氧化作用产生释放二氧化碳的过程。土壤呼吸是陆地生态系统中土壤与大气之间 CO₂ 交换的主要输出途径^[1-4]。土壤呼吸是全球碳循环的重要组成部分,也是全球气温变化的重要影响因素之一。土壤呼吸的研究已成为全球气温变化研究不可或缺的一部分。

土壤呼吸的研究现在已经涉及到各种生态系统,研究地域也开始进一步拓展。但是,大多数集中对森林和草地生态系统的研究,农田生态系统作为陆地上最活跃、人为因素干扰最强的生态系统,土壤呼吸存在不确定性,但在对全球碳循环研究是不可缺少的部分。目前,农田生态系统土壤呼吸研究主

要涉及以下 4 个方面: 农田耕作管理措施对土壤呼吸的影响^[5]; 肥料施用水平对农田土壤呼吸的影响^[6,7]; 水、热、气象因子对农田土壤呼吸影响的研究^[8,9]; 复合农田系统土壤呼吸特征研究^[10]。冬小麦是重要的农田生产作物,作为农田土壤呼吸的研究对象有重要的意义。在关中平原地区,为了适应商品经济背景下食物生产的需要,单一的粮食轮作体系已经开始被多元化轮作体系代替。本研究引入不同

收稿日期: 2010-12-30; 修订日期: 2011-04-18

基金项目: 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-443-3); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B05)

作者简介: 郝旺林(1984-),男,硕士,主要研究方向为农业生态及作物生理生态, E-mail: haowang2000@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liangyl@ms.iswc.ac.cn

的蔬菜前茬,通过对不同蔬菜前茬冬小麦土壤呼吸及影响因子的分析,探讨土壤呼吸的变化规律和温室气体排放特点,以期建立合理的轮作体系提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在陕西杨凌西北农林科技大学水土保持研究所试验场进行。试验场位于渭河流域关中平原腹地,北纬 34.26°,东经 108.08°,海拔 403.2~530.1 m,平均气温:12.9℃,年降水约 660 mm,属大陆性暖温带季风气候,一年两熟。试验地土壤为黑垆土,肥力状况为有机质含量 15.4 g·kg⁻¹,土壤全氮 0.78 g·kg⁻¹,碱解氮 0.54 g·kg⁻¹,全磷为 0.70 g·kg⁻¹,速效磷 27.2 mg·kg⁻¹,pH 8.2。

1.2 试验设计

试验设计 4 个前茬处理:玉米(*Zea mays*)-小麦(*Triticum aestivum*) (MW);茄子(*Solanum melongena*)-小麦(EW);辣椒(*Capsicum*)-小麦轮作(PW);芹菜(*Apium graveolens*)-小麦(CW),3 次重复。小区面积 2.4 m × 6 m = 14.4 m²。前茬作物辣椒、茄子和芹菜于 2009 年 5 月 20 日移栽,玉米于 2009 年 6 月 3 日种植,2009 年 9 月下旬全部收获。小麦于 2009 年 10 月 6 日种植,2010 年 5 月 30 日收获,小麦为传统条播,行距 25 cm;辣椒(双苗)密度为 25 cm × 60 cm;茄子密度为 60 cm × 60 cm;芹菜密度为 5 cm × 30 cm;玉米种植密度为 30 cm × 60 cm。小区在种植前施磷肥 P₂O₅ 125 kg·hm⁻²(磷酸二铵)、氮肥 N 75 kg·hm⁻²(尿素)和钾肥 K₂O 75 kg·hm⁻²(硫酸钾)。根据小麦的生长状况追施氮肥和钾肥,每次每个小区都追施 N 肥 75 kg·hm⁻²和钾肥 K₂O 75 kg·hm⁻²,全生育期总计追施 2 次肥。根据土壤水分状况适时进行灌溉,保证作物的正常需水,定期对麦田进行人工除草。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率测定(2009 年 10 月上旬至 2010 年 5 月下旬):每小区选取代表性的 3 个测点,用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400-09 土壤呼吸室测定。测前 24 h 将内径为 10.5 cm、高 4.5 cm 的 PVC 环压入土壤 2 cm,压实外圈土壤以防漏气。之后 PVC 环长期定位放置。上午 09:00~11:00 测定。取 3 个测点平均值作为小区 CO₂ 通量 [μmol·(m²·s)⁻¹],即土壤呼吸速率。全生育期每月测定 3 次,在气候寒

冷月份减少测定次数。

1.3.2 环境因子的测定

土壤温度、湿度,土壤表层气体温度、湿度利用 Li-6400-09 土壤呼吸室自带的温度探针和湿度传感器测定。土壤水分利用烘干法测定,每次测定土壤呼吸的同时采集 PVC 环周围土样进行测定。

土壤速效养分测定:在小麦生长前期(2009-10-06~2010-03-17 由播种至拔节)、中期(2010-03-17~2010-04-26 由拔节至抽穗)、末期(2010-04-26~2010-05-30 由抽穗至成熟)每小区 S 形多点法采集土样,混合、风干。有机质的测定利用稀释法^[11];速效磷的测定利用 0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃ 法^[11];速效钾的测定利用 NH₄OAc 浸提,火焰光度法^[11];碱解氮的测定利用碱解氮扩散法^[11]。

土壤酶测定:在小麦生长前期(2009-10-06~2010-03-17 由播种至拔节)、中期(2010-03-17~2010-04-26 由拔节至抽穗)、末期(2010-04-26~2010-05-30 由抽穗至成熟)每小区 S 形多点法采集土样,混合新鲜样。土壤脲酶测定利用苯酚-次氯酸法测定^[12];土壤过氧化氢酶测定利用 KMnO₄ 滴定法^[12];土壤蔗糖酶测定利用水杨酸比色法测定^[12]。

各小区在每次测定土壤呼吸同时采样进行土壤速效养分和土壤酶活性的测定。

小麦生物量测定:分为地上和地下两部分进行采样。地上部指土壤表面以上植物体部分,地下部指土层表面至地下 30 cm 处植物根系部分,将样品用烘箱 105℃ 杀青,80℃ 下烘到恒重。

1.4 数据分析

1.4.1 土壤呼吸各影响因子途径分析

鉴于土壤呼吸与各影响因子以及各因子之间的复杂关系,对某一因子与土壤呼吸的单因素回归有一定局限,途径分析可将土壤呼吸与各影响因子进行标准多元线性回归:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + e$$

式中, b_1, b_2, \dots, b_k 分别是 y 对 x_1, x_2, \dots, x_k 的偏回归系数, e 为随机误差,为了比较 x_i 对 y 的直接影响程度,对偏回归系数进行标准化处理,求出不带单位并且变异度相同的偏回归系数,即标准偏回归系数。标准偏回归系数定义为直接途径系数,不同变量 x_i, x_j 存在相关关系则还存在 x_i 通过 x_j 作用于 y 的间接影响,其影响程度可用间接途径系数表示。各影响因子的途径系数通过相关系数矩阵和直接途径系数计算可得。

1.4.2 碳平衡计算

采用净初级生产力(NPP)与土壤碳释放量

(R_s) 的比值来表示碳平衡, NPP/R_s 比值 > 1 , 表示农田系统为大气 CO_2 吸收“汇”, 反之则为大气 CO_2 排放“源”, 其中 NPP 为小麦生长季和生长后季作物地上部分和地下部分生物量的总和, 作物地上部分和地下部分的碳含量取 45%, 土壤碳释放量为 4 种不同前茬冬小麦田生长季和生长后季碳的排放总量。

各因子的差异及与土壤呼吸相关分析利用 SAS 8.0 软件进行, LSR 法多重比较。

2 结果分析

2.1 不同前茬冬小麦全生育期土壤呼吸速率的变化特征

不同前茬冬小麦土壤呼吸速率在全生育期呈增长趋势, 局部出现多个峰值(图 1)。在小麦播种后各处理土壤呼吸速率相差较小。随着生长发育及气象条件的改变, 各处理土壤呼吸速率出现先降低后增长趋势。1 月上旬出现最低值, 这是此时土壤温度急剧降低引起的。从 1 月下旬开始, 各处理土壤呼吸速率总体表现出波浪式上升趋势。玉米茬和辣椒茬全生育期的土壤呼吸速率较高, 其次是芹菜茬, 茄子茬的土壤呼吸低于其他前茬。

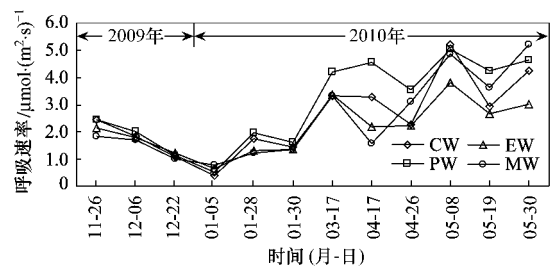


图 1 不同前茬冬小麦土壤呼吸速率
Fig. 1 Soil respiration of winter wheat filed in different previous Crops

为了进一步研究不同前茬冬小麦田土壤呼吸的变化, 不仅对小麦生长季对农田土壤呼吸进行观测, 在小麦的生长季后也对农田土壤呼吸进行监测(表 1)。通过对 4 种不同前茬小麦生长季和生长季后土壤呼吸差异显著性测验, 芹菜冬小麦和辣椒茬冬小麦土壤呼吸差异不显著, 茄子茬和玉米茬冬小麦土壤呼吸差异也不显著, 但是芹菜茬冬小麦和辣椒茬冬小麦土壤呼吸与茄子茬和玉米茬冬小麦土壤呼吸差异显著。4 种茬口冬小麦田土壤呼吸总体表现为: $PW > CW > MW > EW$ 。

表 1 不同前茬冬小麦田生长季和生长季后土壤呼吸的变化¹⁾ / $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

Table 1 Soil respiration of winter wheat filed in different previous crops during and after the growing season / $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

处理	小麦生长季土壤呼吸速率						小麦生长季后土壤呼吸速率						平均值
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	
CW	2.47	1.47	1.19	1.45	3.33	2.78	4.12	6.83	4.11	4.30	2.72	2.30	3.09 ± 1.11a
PW	2.43	1.59	1.37	1.63	4.20	4.03	4.64	5.57	3.54	3.52	2.59	2.20	3.11 ± 0.97a
EW	2.14	1.52	1.10	1.37	3.38	2.20	3.17	5.86	3.95	3.80	2.87	1.86	2.77 ± 1.01b
MW	1.82	1.38	1.12	1.37	3.34	2.35	4.58	6.32	3.17	3.61	2.88	1.75	2.81 ± 1.05b

1) 同列数据后标的不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著

2.2 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

小麦全生育期土壤表面温度(图 2)和耕层 5 cm

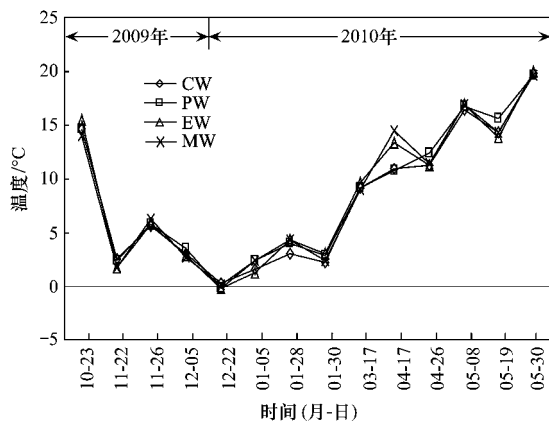


图 2 土壤表层温度
Fig. 2 Temperature of soil surface

深的土壤温度(图 3) 随时间推移呈现先降低后增高趋势; 土壤表面的温度低于耕层 5 cm 深度的土壤温

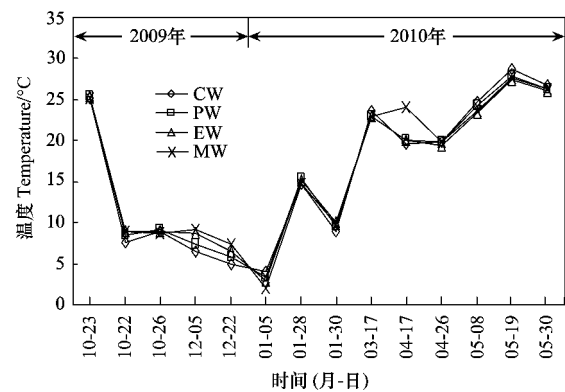


图 3 5 cm 土层温度
Fig. 3 Temperature of soil in 5 cm depth

度 并且耕层 5 cm 深度的土壤温度变化的峰值相对于土壤表面的温度变化的峰值具有一定的滞后性. 土壤温度与土壤呼吸速率的变化呈现出一定的相关性. 采用指数模型拟合土壤呼吸 (e) 与土壤温度 (t) 的关系, 并计算温度敏感系数 $Q_{10}^{[13]}$ (表 2). 模型拟合极显著相关 ($P < 0.01$). 对不同深度土壤温度与土壤呼吸的拟合模型相关系数 R 值进行比较, 土壤表层拟合模型相关系数为: $PW > EW > MW > CW$; 5 cm 深度拟合模型相关系数为: $MW > EW > PW > CW$. 对温度敏感系数 Q_{10} 进行比较, 土壤表层 Q_{10} : $CW > PW > EW > MW$; 5 cm 深度 Q_{10} : $CW > MW > PW > EW$. 分析发现芹菜茬的土壤温度与土壤呼吸的相关性比其他 3 种前茬低; 各处理土壤表层温度对土壤呼吸的相关性要高于 5 cm 耕层温度对土壤

呼吸的相关性; 芹菜和茄子茬的土壤呼吸对温度敏感性高于辣椒和玉米茬的土壤呼吸对温度敏感性; 土壤呼吸对土壤表层温度敏感性要低于 5 cm 耕层温度敏感性.

2.3 土壤呼吸速率与土壤水分的关系

对冬小麦生育期土壤呼吸与土壤水分进行拟合, 结果表明土壤呼吸与土壤水分呈二次函数关系. 不同前茬下冬小麦土壤呼吸与土壤水分拟合模型呈极显著相关 ($P < 0.01$) (表 3). 对相关性的比较: $EW > MW > PW > CW$. 茄子茬土壤呼吸对水分的响应强于其他 3 种前茬.

表 3 不同前茬处理下麦田土壤呼吸 (e) 与土壤水分 (m) 的拟合模型¹⁾

Table 3 Regression equations between soil respiration (e) and soil moisture content (m) under different growth stages

处理	拟合模型	R^2
CW	$e = 3\ 179.8m^2 - 1\ 102.6m + 98.32$	0.39**
PW	$e = 419.41m^2 - 135.38m + 14.99$	0.43**
EW	$e = 323.72m^2 - 107.19m + 11.39$	0.71**
MW	$e = 1\ 337.60m^2 - 470.27m + 43.96$	0.63**

1) **表示在 1% 水平上差异显著

表 2 不同前茬处理下麦田土壤呼吸 (e) 与土壤温度 (t) 的拟合模型¹⁾

Table 2 Regression equations between soil respiration (e) and soil temperature content (t) under different growth stages

处理	土层深度	拟合模型	R^2	Q_{10}
CW	土壤表层	$e = 0.7315e^{0.0623t}$	0.64**	1.80
	5 cm 耕层	$e = 0.9713e^{0.0866t}$	0.62**	2.46
PW	土壤表层	$e = 0.8327e^{0.0645t}$	0.70**	1.61
	5 cm 耕层	$e = 1.1604e^{0.0822t}$	0.63**	1.63
EW	土壤表层	$e = 0.8747e^{0.0471t}$	0.67**	1.45
	5 cm 耕层	$e = 1.1369e^{0.0581t}$	0.63**	1.39
MW	土壤表层	$e = 0.7889e^{0.056t}$	0.65**	1.43
	5 cm 耕层	$e = 1.0287e^{0.0761t}$	0.69**	1.80

1) **表示在 1% 水平上差异显著

2.4 不同前茬小麦土壤速效养分、土壤酶特征和冬小麦生物量

分别在小麦生育前期 (I)、中期 (II)、末期 (III) 对土壤速效养分进行比较 (图 4), 芹菜茬在 3 个时期有机质含量最高, 有机质消耗少, 其他 3 种前茬有机质消耗较多; 4 种前茬麦田的有效磷含量在 3

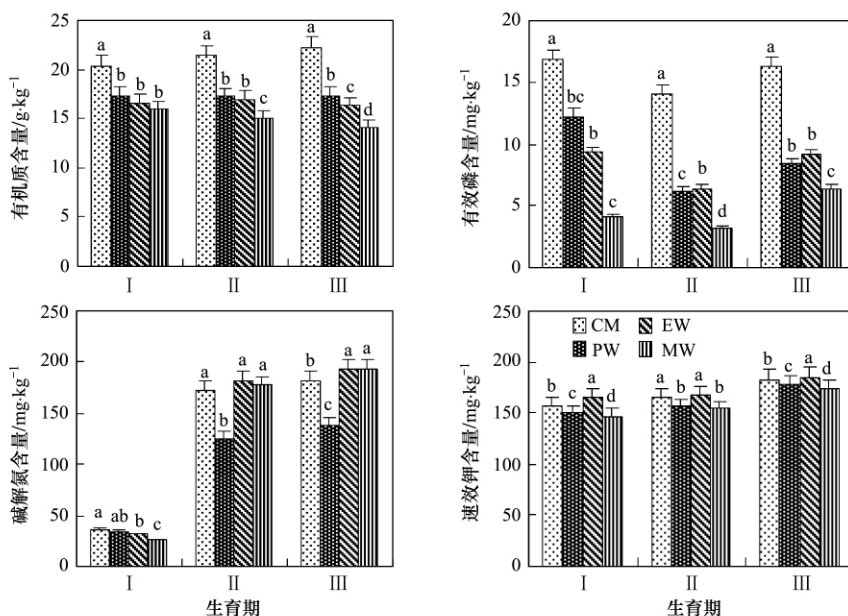


图 4 冬小麦不同生长期土壤速效养分特征

Fig. 4 Characteristics of available nutrient in different growth period of winter wheat

个时期呈明显下降趋势;碱解氮在生长前期明显低于后期和末期,生长前期小麦消耗的氮量较大.4种处理碱解氮含量存在一定的差异性;速效钾含量随生长时间增加而增加,各前茬之间差异显著.综合分析,玉米茬小麦田速效养分含量在各个生长时期相对较低.

土壤呼吸与土壤生物活性和土壤肥力有关^[14-16].对3种酶活性的比较(表4)发现:生长前

期、中期4种处理土壤脲酶差异明显,均呈现出 MW > CW > PW > EW.不同时期脲酶的活性呈现先增后减的趋势;全生育期处理间土壤蔗糖酶差异显著,EW > MW > CW > PW.不同时期脲酶的活性呈现先减后增的趋势;全生育期4种处理的土壤过氧化氢酶差异显著,EW > MW > CW > PW.不同时期脲酶的活性呈现减小的趋势.土壤生物活性总体表现为:玉米茬和芹菜茬的冬小麦土壤总生物活性较高.

表4 不同前茬处理下冬小麦田3种土壤酶活性的变化¹⁾

Table 4 Variation trend of soil enzyme activity under different growth stages

处理	土壤脲酶/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			土壤蔗糖酶/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$			过氧化氢酶/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$		
	前期	中期	后期	前期	中期	后期	前期	中期	后期
CW	43.18 ± 0.19b	50.98 ± 0.47b	24.01 ± 0.19a	54.12 ± 0.68c	50.54 ± 0.82b	53.87 ± 1.22c	1.45 ± 0.01b	1.36 ± 0.0b	1.28 ± 0.01b
PW	38.14 ± 0.83c	47.55 ± 1.29c	25.06 ± 0.82a	48.30 ± 1.55d	46.63 ± 1.70c	47.12 ± 2.09d	0.81 ± 0.07c	0.75 ± 0.06c	0.69 ± 0.19c
EW	36.31 ± 0.86d	46.48 ± 1.35c	26.89 ± 0.86a	58.31 ± 1.61a	51.01 ± 1.78a	56.23 ± 2.18a	1.61 ± 0.07a	1.58 ± 0.07a	1.52 ± 0.20a
MW	45.01 ± 0.88a	62.87 ± 1.38a	24.38 ± 0.89a	56.76 ± 1.65b	51.14 ± 1.82a	55.54 ± 2.22b	1.51 ± 0.07b	1.47 ± 0.07ab	1.45 ± 0.20a

1) 同列数据后标的不同小写字母表示在5%水平上差异显著

在小麦收获期,不同前茬小麦地上和地下部分生物量不同(图5).4种前茬冬小麦地上部分生物量差异并不明显,而4种前茬的地下部分生物量差异显著:茄子茬 > 玉米茬 > 芹菜茬 > 辣椒茬.地上部分生物量差异不显著.小麦的地下部分生命活动是影响土壤呼吸的重要因素,地下部分的生物量差异对研究不同处理冬小麦土壤呼吸的差异性有一定作用.

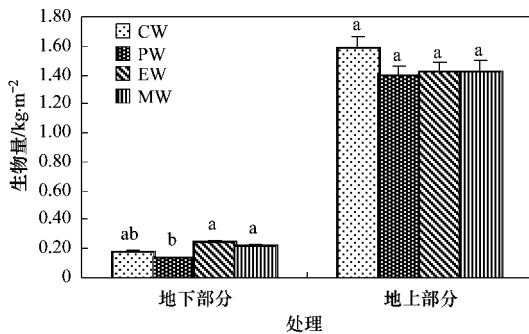


图5 不同前茬冬小麦地上部分和地下部分生物量
Fig.5 Wheat biomass of aboveground and underground part under different growth stages

2.5 冬小麦土壤呼吸速率各影响因子贡献率分析

综合分析冬小麦土壤呼吸与各影响因子的关系,以有机质(X_1),有效磷(X_2),碱解氮(X_3),速效钾(X_4),土壤过氧化氢酶(X_5),土壤蔗糖酶(X_6),土壤脲酶(X_7),根系生物量(X_8),土壤温度(X_9),土壤水分(X_{10})为自变量,土壤呼吸(Y)为

因变量进行多元逐步回归,得回归方程: $Y = 14.367 + 0.070X_2 - 0.090X_4 + 0.025X_7 + 0.229X_9 - 7.538X_{10}$ (决定系数 $R^2 = 0.754$, $P = 0.05$).由回归方程可知,环境因子中有效磷、速效钾、土壤脲酶、土壤温度、土壤水分为影响冬小麦土壤呼吸的主要因素.

对影响土壤呼吸的因子逐步回归,剔除次要因子,并对主要因子有效磷、速效钾、土壤脲酶、土壤温度和土壤水分进行途径分析.结果显示(表5),有效磷、速效钾、土壤脲酶、土壤温度、土壤水分这5个环境因子及其各因子间的互作效应对土壤呼吸速率的决定系数为0.754,对土壤呼吸速率的影响占重要地位,剩余途径系数为0.496.土壤温度对土壤呼吸速率的直接作用最大,其途径系数为0.746,表明温度每升高一个标准单位,土壤呼吸速率将提高0.746个标准单位,而其通过有效磷,土壤脲酶对土壤呼吸有负向的间接作用,间接途径系数分别为-0.006和-0.118;通过速效钾,土壤水分对土壤呼吸有正向的间接作用,间接途径系数分别为0.032和0.001.有效磷和土壤脲酶对土壤呼吸直接作用较小,其直接途径系数分别为0.270和0.280;速效钾和土壤水分对土壤呼吸的直接作用成负相关,其直接途径系数分别为-0.503和-0.143.对土壤呼吸速率的其他影响因子(如土壤微生物活性,土壤物理性状等)在本研究中未涉及,有待以后进一步研究.

表 5 主要环境因子对冬小麦田土壤呼吸途径分析¹⁾

Table 5 Path-coefficient analysis of major environment factors to soil breathing rate in the wheat field

环境因子	直接效应	间接效应				
		$\rightarrow X_2$	$\rightarrow X_4$	$\rightarrow X_7$	$\rightarrow X_9$	$\rightarrow X_{10}$
X_2	0.270	—	-0.295	-0.017	-0.017	-0.006
X_4	-0.503	0.158	—	-0.040	-0.048	0.009
X_7	0.280	-0.016	0.070	—	-0.313	0.087
X_9	0.746	-0.006	0.032	-0.118	—	0.001
X_{10}	-0.144	0.120	0.033	-0.171	-0.007	—

1) 决定系数 $R^2 = 0.754$, 剩余通径系数 $b_e = 0.496$

2.6 各前茬冬小麦田碳平衡

各前茬冬小麦田碳平衡结果见表 6。4 种前茬冬小麦田净初级生产力与农田土壤呼吸碳排放量的比值 NPP/R_s 均大于 1, 表明 4 种不同前茬的冬小麦田均表现为碳“汇”。在冬小麦的全生育期以及生长后季, CO_2 的排放总量表现为 $PW > CW > MW > EW$, 而从碳“汇”来评估: $EW > CW > MW > PW$ 。辣

椒茬冬小麦田初级生产力最低, 芹菜茬和茄子茬的小麦田净初级生产力虽然高于其他 2 种前茬, 但是不同前茬对于土壤微生物的以及土壤矿化作用的影响不同, 碳释放量表现为: $PW > CW > MW > EW$, 因而不同麦田碳“汇”表现为茄子茬冬小麦田最强, 其次是芹菜茬和玉米茬冬小麦田, 辣椒茬的冬小麦碳“汇”相对最弱。

表 6 不同前茬冬小麦农田碳循环

Table 6 Carbon cycle of winter wheat filed under different growth stages

项目	CW	PW	EW	MW
小麦生长季农田生物量/ $kg \cdot hm^{-2}$	18 361.65	15 295.41	16 577.48	16 478.02
小麦生长后季农田生物量/ $kg \cdot hm^{-2}$	13 072.54	11 112.90	12 290.44	10 673.43
净初级生产力 $NPP/kg \cdot hm^{-2}$	31 434.19	26 408.31	28 867.92	27 151.45
净初级生产力 $NPP/kg \cdot hm^{-2}$	14 145.38	11 883.74	12 990.56	12 218.15
土壤碳排放总量 $R_s/kg \cdot hm^{-2}$	11 690.40	11 766.08	10 476.26	10 624.48
NPP/R_s	1.21	1.01	1.24	1.15

3 讨论

本研究将不同前茬冬小麦在生长季和小麦生长后季的土壤呼吸进行了系统观测, 旨在较为全面了解冬小麦田的碳排放规律。土壤呼吸在冬小麦生长季和生长后季呈现先减后增再减的趋势, 从小麦生长发育时间段观察, 引起这一变化的主要因素是土壤温度的季节变化, 通过土壤呼吸与温度相关模型, 验证了土壤温度的季节性变化对土壤呼吸影响。

4 种前茬小麦生育期土壤呼吸与地表温度及耕层 5 cm 温度的关系表现为: 耕层 5 cm 温度的峰值比地表温度相对要高, 耕层 5 cm 温度对土壤呼吸的响应相对于地表温度对土壤呼吸的响应表现出滞后性, 这一结果与文献 [17, 18] 的结果基本一致。土壤呼吸与土壤水分的关系呈现二次函数模型, 与孙小花等^[19]的“土壤呼吸与土壤水分呈抛物线相关”一致。本研究中结合 3 种蔬菜前茬与粮食作物玉米前茬比较, 得出较准确描述农田温度和水分对土壤呼吸的响应程度的拟合模型; 同时也为校正温度和水

分测量误差提供一定依据。

土壤呼吸是一个复杂过程, 包括土壤微生物、根系、土壤动物活动和含碳矿物质的化学氧化作用。影响因子很难通过单一某种线性关系或非线性关系对土壤呼吸进行描述, 为了阐明不同潜在因子对土壤呼吸综合作用机制, 引入途径分析说明各因子对土壤呼吸的直接及间接作用。冬小麦土壤呼吸速率各影响因子贡献率分析表明: 环境因子中有效磷、速效钾、土壤脲酶、土壤温度、土壤水分为主要因素。Jiang 等^[8]研究气象因子对土壤呼吸速率的影响, 也阐明了“低温、气温、太阳辐射和水分为主要影响因子。途径分析表明, 除了这些环境因子之外还有其他因素对土壤呼吸有影响。本研究在前人研究基础上加入土壤酶和土壤速效养分以及小麦根系生物量等因子对土壤呼吸的影响分析, 对准确探究影响土壤呼吸的因子有重要意义。土壤呼吸过程较为复杂, 除对无机环境因子进行评价之外, 土壤动物、微生物等生物因子的研究应该进一步加强, 完善环境和生物因子对土壤呼吸影响机制的研究。

本研究针对不同的蔬菜前茬和大宗作物玉米前茬进行比较,明确了不同前茬冬小麦田土壤呼吸的差异性以及各种因子对土壤呼吸的影响,为探索农田粮食轮作向蔬菜粮食轮作转化的多元化种植新思路提供科学依据,从节能减排增汇角度对种植模式安排进行科学指导;同时也为进一步对土壤呼吸的影响因子以及各因子的作用机制细化研究提供一定帮助。

4 结论

(1) 4种前茬的冬小麦田平均排放速率表现为:辣椒茬 > 芹菜茬 > 玉米茬 > 茄子茬。各前茬冬小麦土壤呼吸在小麦生长期呈先增后减趋势,在小麦生长后季各茬口冬小麦土壤呼吸呈现出降低趋势。利用逐步回归对可能影响土壤呼吸的各因子进行综合评价,有效磷、速效钾、土壤脲酶、土壤温度、土壤水分等5个因子对土壤呼吸影响显著,借助通径分析将5种主要因子对土壤呼吸的影响进行计算,温度对土壤呼吸直接影响最大,通径系数达到0.746,速效钾对土壤呼吸的直接影响最小并且为负作用,有效磷、土壤脲酶、土壤水分对土壤呼吸的影响介于温度和速效钾之间,并且5种不同的影响因子之间各自通过其他4种因子对土壤呼吸进行间接作用。

(2) 通过计算不同前茬冬小麦生长季和生长后季碳平衡计算,表明4种不同前茬的冬小麦田表现为大气排放的“汇”,碳“汇”的强度表现:茄子茬 > 芹菜茬 > 玉米茬 > 辣椒茬。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 720.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [3] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 71-90.
- [4] 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 390-396.
- [5] 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.
- [6] 王淑华,赵兰坡,王洪斌. 高产玉米田土壤呼吸强度及其与碳、氮营养的关系[J]. *吉林农业大学学报*, 2010, **32**(1): 62-67.
- [7] 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 390-396.
- [8] Jiang X, Li Y. Path analysis on the meteorological factors impacting Soil Respiration Rate of Wheat Field [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2009, **10**(1): 74-76, 156.
- [9] 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, **24**(3): 183-189.
- [10] 王同朝,卫丽,田原. 冬小麦-夏玉米一体化茬作覆盖下农田土壤呼吸变化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(9): 1970-1974.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [12] 吴金水,林启美,黄巧云. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [13] Van'thoff J H. Lectures on theoretical and physical chemistry. Part I. Chemical dynamics [M]. London: Edward Arnold, 1898. 1.
- [14] 刘建国,张伟,李彦斌,等. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(2): 725-733.
- [15] 马恒亮,占新华,张晓斌,等. 小麦/苜蓿套作对菲污染土壤酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3684-3690.
- [16] 王灿,王建德,孙瑞娟,等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 688-692.
- [17] 孟春,王立海,王俭,等. 5种人工林非主要生长季节土壤呼吸对土壤温度昼夜变化的响应[J]. *东北林业大学学报*, 2009, **37**(11): 77-91.
- [18] 朱强根,张焕朝,单奇华,等. 苏北不同杨树人工林经营模式下土壤呼吸日变化观测与测定方法比较[J]. *安徽农业科学*, 2007, **35**(30): 9518-9521.
- [19] 孙小花,张仁陟,蔡立群,等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(9): 2173-2180.