

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.028

砾石覆盖条件下土壤水热效应对冬小麦田 CO₂ 排放的影响

王冬林¹ 冯浩^{1,2} 李毅^{1,3} 张阿凤^{3,4}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过2年田间试验,采用静态暗箱-气象色谱法监测冬小麦田 CO₂ 排放速率和通量,并计算了生态系统净交换和收获指数。试验设置无覆盖对照(CK)、无覆盖补灌对照(WCK)、砾石覆盖(GM)和砾石覆盖补灌(WGM)4个处理。结果表明:2个生长季内砾石覆盖补灌处理各阶段土壤含水率和温度平均最高,其次为砾石覆盖处理,说明砾石覆盖的保水保温效果明显;土壤温度的变化规律与 CO₂ 排放规律相同,土壤含水率变化规律与 CO₂ 排放规律相反,土壤温度和含水率变化对 CO₂ 排放具有显著的交互作用($P < 0.05$);对影响农田生态系统 CO₂ 排放的冬小麦生长参数和土壤理化特性进行相关矩阵和主成分分析,CO₂ 排放的分布与 CK 和 WCK 对照处理分布相似度较高,与 GM 和 WGM 砾石覆盖处理则完全相反;产量、收获指数、生态系统净交换的分布与 WGM 处理最为接近,其次为 GM 处理,说明砾石覆盖处理提高了产量,促进了生态系统净交换,降低了 CO₂ 排放量。砾石覆盖结合关键生育期补充灌水的田间管理方式能有效改善土壤水热状况,减少农田生态系统 CO₂ 排放。

关键词: 砾石覆盖; 水分; 温度; CO₂ 排放; 生态系统净交换; 主成分分析

中图分类号: S512.1⁺1; S154.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0223-08

Impacts of Soil Water and Temperature Effects on CO₂ Emissions
in Winter Wheat Field under Gravel Mulching Condition

WANG Donglin¹ FENG Hao^{1,2} LI Yi^{1,3} ZHANG Afeng^{3,4}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Gravel mulching technology, as one of the most important field management techniques, has been long applied by farmers in dry areas to decrease water evaporation and maintain soil temperature, which can also improve crop production in the arid and semi-arid regions. Studying on the influences of gravel mulching on soil water and temperature as well as ecosystem CO₂ emissions will play an important role in assessing farmland ecological effects of gravel mulching. A winter wheat field experiment over two-year periods was carried out and annual CO₂ emission was monitored with a static opaque chamber and chromatography method, and the net ecosystem exchange and harvest index were calculated. In the experiment, four field treatments were applied, including CK (control with no mulching), WCK (supplementary irrigation with no mulching), GM (gravel mulching with no irrigation), and WGM (gravel mulching with supplementary irrigation). Compared with the control treatments, the gravel mulching treatments can significantly increase the soil temperature and moisture, for specific performance, WGM was the largest, and followed by GM. Consequently, gravel mulching exerted greater effect on soil water and temperature. Seasonal dynamics of CO₂ emissions generally followed the change of soil temperature with high peaks of CO₂ fluxes from April to June in both years, whereas CO₂ fluxes went conversely with soil water content change over the two years. Statistical analysis also showed that soil temperature and soil moisture had significant interactions on CO₂ emissions at $P < 0.05$ level. By the

收稿日期: 2016-12-21 修回日期: 2017-02-24
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102904)、国家自然科学基金项目(41301305)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2014YB062_2452015355)
作者简介: 王冬林(1985—),女,博士生,主要从事土壤水热运移研究,E-mail: wangdonglin@nwsuaf.edu.cn
通信作者: 冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: nercwsi@vip.sina.com

correlation matrix and principal component analyses, the distribution of CO₂ emissions was the closest with the two control treatments (CK and WCK), and the farthest with the two gravel mulch treatments (GM and WGM). The gravel mulching practice, particularly the WGM treatment, can significantly influence the distribution of winter wheat growth parameters such as yield, harvest index, net ecosystem exchange and so on. The above mentioned results indicated that the gravel mulching technology had the potential to increase winter wheat yield, promote net ecosystem exchange and reduce CO₂ emissions from ecosystem. All in all, gravel mulching combined with supplemental irrigation in the key growth stages could effectively improve soil hydro-thermal conditions, and reduce CO₂ emissions from farmland ecosystems.

Key words: gravel mulching; moisture; temperature; CO₂ emissions; net ecosystem exchange; principal components analysis

引言

受全球气候变化的影响,温室气体排放已成为国内外专家学者共同关注的热点^[1-4]。作为温室气体排放的较大贡献源,农田生态系统 CO₂ 排放与初级生产力、土壤肥力以及区域和全球的碳循环密切相关。为了有效控制农田生态系统碳释放,有必要研究田间管理方式对农田温室气体排放的影响,从而提出农田固碳减排的主要对策^[5]。目前固碳减排的措施主要从农业耕作方式、覆盖方法、施肥、灌溉等几方面入手。秦晓波等^[6-7]研究了不同耕作方式和稻草还田对温室气体排放的影响以及生物质炭添加对稻田碳排放强度的影响,认为免耕高茬还田、适量的生物质炭回田能显著降低温室气体排放,是农田固碳减排、增加产量的可行途径。马艳芹等^[8]研究了不同施氮水平对农田温室气体排放的影响,与常规施氮量相比,减氮 40% 对水稻产量并无显著影响,但能显著降低温室气体排放总量,有利于节能减排。CHEN 等^[9]研究认为秸秆还田和塑料覆膜均能显著降低冬小麦、夏玉米田温室气体碳排放强度,连续的覆膜可使农田温室气体排放减少和产量增加两者之间达到稳定平衡。刘晶晶等^[10]开展不同灌溉量对土壤温室气体排放规律的影响,研究认为适量灌溉有利于农田节水及固碳减排。

农业管理方式主要通过改变农田土壤理化性质,间接影响温室气体的产生和排放过程^[11-12]。砾石覆盖是一种较为常见的旱作农业覆盖技术,国内外均开展了大量研究。LI 等^[13-14]研究了砂石粒径和覆盖方式对土壤水热的影响,研究表明表面砂石覆盖的方法对于减少蒸发、提高土壤温度、提高土壤肥力和增加产量有很大影响。冯浩等^[15]研究轮作条件下不同砾石覆盖量对农田水分和耗水特征的影响,表明砾石覆盖能降低作物耗水系数、提高作物产量。余海龙等^[16]研究表明,砾石覆盖能增加土壤孔隙并促进水分入渗,改善了土壤水文循环和水文生态功能。关红杰等^[17]研究不同粒径和厚度砂石覆

盖对土壤蒸发的影响,表明其可以明显减少土壤蒸发,为作物生长提供良好的水分条件。关于砾石覆盖对土壤水热条件改变影响的研究较为常见,但是目前关于砾石覆盖条件下温室气体排放的研究则很少,因此有必要开展砾石覆盖对农田土壤水分、温度、CO₂ 排放通量以及作物产量等的相关研究,并对其固碳减排作用及实际生产影响作出评价。本文设置 2 个灌水水平和 2 个砾石覆盖水平,共形成 4 个田间试验处理,分析 2 个生长季冬小麦田的土壤水热变化规律和 CO₂ 排放规律,对土壤水热效应和农田生态系统 CO₂ 排放进行回归分析,并结合作物生长指标和土壤理化特征进行主成分分析,以评估砾石覆盖减少温室气体排放和改善农田生态效应的作用,为丰富旱区农业节水和固碳减排技术提供基础研究案例。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013—2015 年在陕西杨凌西北农林科技大学教育部农业水土工程重点实验室的灌溉试验站(108°24'E、34°20'N, 海拔高度 521 m)进行。该试验地属大陆暖温带湿润季风气候,多年平均气温 12.9℃,年日照时数 2 163.8 h,多年平均降水量 635.1 mm(集中在 7—10 月份),年蒸发量 993.2 mm。土壤为中壤土,砂、粉、黏粒质量比例为 8: 74: 18, 0~1 m 土壤平均田间持水量 23.5%,播种前土壤平均干容重为 1.44 g/cm³。

试验共设置 4 个处理,分别为无覆盖对照(CK)、无覆盖补灌(WCK)、砾石覆盖(GM)、砾石覆盖补灌(WGM),每个处理重复 3 次,完全随机区组设计。小区长 5 m,宽 3 m,两边设有保护行。小区田埂边缘 1 m 深土层竖直铺一层塑料薄膜,避免各小区土壤水分侧向入渗。营造砂田的方式为:冬小麦播种后,按照 8 kg/m²的砾石覆盖量在植株行间均匀铺设,收获时进行清理,第 2 季播种前重新整地并按试验要求铺设砾石,覆盖所用砾石采自渭河河滩,

粒径范围在 2 ~ 3 cm。灌水处理分别在越冬期和返青期对农田进行补灌(灌水量为 50 mm),其他生育期为雨养。

供试小麦品种为小偃 22 号,2013 年播种时间为 10 月 19 日,2014 年播种时间为 10 月 17 日,分别于 2014 年 6 月 7 日和 2015 年 6 月 5 日收获。小麦播种前将基肥一次性施入,生育期内不追肥,全生育期 N、P₂O₅的施入量分别为 150、100 kg/hm²。锄草方式为定期人工锄草,耕作方式为免耕,等待期种植玉米。所有处理施肥量一致,田间管理措施相同。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 气体样品采集与测定

冬小麦生育期内每 10 d 左右采集一次气体样品。采用静态暗箱-气相色谱法进行气体排放通量观测,试验采样箱为本课题组定制。采样箱由箱体和底座组成,箱体采用 PVC 材料,覆有泡沫和反光材料,尺寸为 50 cm × 50 cm × 50 cm,箱内安装搅匀气体的风扇和抽气接口,接口连三通阀。底座用不锈钢制成,规格与箱体配套,安放在每个小区中间位置,底座内有作物。采样之前底座凹槽内需注水密封以隔绝外界空气。气体采集时间 09:00—11:00,扣箱后立即用 60 mL 注射器采集样品,10、20、30 min 后各取样 1 次。采样结束后立即带回实验室用气相色谱仪(Agilent 7890A 型)进行分析,测定 CO₂ 的检测器为 FID,检测器温度 200℃,柱温 60℃,载气为氮气,流速 350 mL/min。比较样品与标准气的总峰面积,将检测器输出(mV)转换成土壤 CO₂ 浓度。气体排放通量的计算式^[18]为

$$F = H \frac{Mp}{R(273 + T)} \frac{dc}{dt} \tag{1}$$

式中 F ——单位时间平均排放通量,mg/(m²·h)
 H ——静态箱高度,m
 M ——温室气体的摩尔质量,g/mol
 p ——采样点大气压力,通常视为标准大气压,即 1.013 × 10⁵ Pa
 R ——普适气体常数,取 8.314 J/(mol·K)
 T ——采样时箱内平均气温,℃
 $\frac{dc}{dt}$ ——温室气体排放速率,μL/(L·min)

生育期内温室气体排放总量计算式为

$$\omega = 2.4 \times 10^{-3} \sum_{i=1}^k F_i d_i \tag{2}$$

式中 ω ——全生育期排放总量,kg/hm²
 F_i ——第 i 次测得的温室气体排放通量,mg/(m²·h)
 d_i ——第 $i-1$ 次到第 i 次测量的时间间隔,d

1.2.2 土壤温度、含水率及辅助变量测定

用地温计测定土壤 5 cm 土层温度,气密闭箱内的空气温度测定时间为密闭箱置于底座 20 min 后。用 TDR 土壤水分速测仪测定土壤体积含水率,每个小区随机测 3 个采样点后取均值。

观测的辅助变量包括冬小麦生长参数和土壤理化特征。小麦生长参数包括:株高(Height,直尺和游标卡尺测量),叶面积指数(LAI,冠层分析仪),干物质(Dry biomass,水洗法和烘干法),产量(Yield,人工测产),收获指数(HI,收获时单位面积产量与地上部干物质质量的比值)。土壤理化特征:每季冬小麦收获时测定土壤容重、有机质含量。还需计算阶段末的土壤贮水量和整个生长季大于等于 0℃ 的正积温^[15,19],其计算式为

$$W = \frac{hd\theta}{10} \tag{3}$$

式中 W ——土壤贮水量,mm
 h ——土层厚度,cm
 d ——土壤容重,g/cm³
 θ ——土壤含水率,cm³/cm³

$$GDD = \sum_{i=1}^k T_i d_i \tag{4}$$

式中 GDD ——生育期土壤累积温度,℃·d
 T_i ——第 i 次测量的平均土壤温度,℃

1.2.3 生态系统净交换

生态系统净交换定义为生态系统吸收与释放的 CO₂ 差值。生态系统净交换 NEE 的计算公式^[4,20]为

$$NEE = NPP - R_H \tag{5}$$

其中 $NPP = 0.446 W_{\max} - 0.000 67$ (6)

式中 NPP ——初级生产力,kg/hm²
 $W_{\max}$ ——作物收获后地上部分和地下部分生物量的总和,kg/hm²
 R_H ——土壤微生物的异养呼吸量,kg/hm²

本文所提到的生态系统净交换均指生态系统 CO₂ 净交换。

1.3 数据统计分析

利用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理和回归分析,用 Duncan 新复极差法检验差异显著性($P < 0.05$),利用 R 语言(R, Version 3.3.2)程序包“vegan”和“FactoMineR”进行 CO₂ 排放、生态系统净交换、产量、收获指数、生长参数和土壤理化特性等的主成分分析。所有图由 Origin 9.0 和 R 程序绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤水热动态变化规律

2 个生长季各处理土壤含水率和温度随时间的

动态变化趋势基本相同(图 1)。地表砾石覆盖和关键生育期补灌措施改变了土壤的水热平衡,各阶段土壤含水率砾石覆盖处理高于无覆盖处理,灌水处理高于无灌水处理,总的来说砾石覆盖和灌水共同作用下的土壤含水率最高。在越冬期和拔节期进行补灌,使得土壤含水率显著增加,由大到小表现为 WGM、WCK、GM、CK 处理,随后逐渐降低并趋于相同,拔节至灌浆期雨水丰富,各处理间效果差异不明显。试验期间,农田土壤表面温度表现出与土壤含水率变化相反的趋势,随着土壤温度的升高,土壤含水率逐渐降低。砾石覆盖表现出良好的保温效果,CK 处理对气温变化的敏感性大于其他处理。

2.2 不同处理农田生态系统 CO₂ 排放特征

在冬小麦整个生育期,各处理的 CO₂ 排放通量随生长季节的变化而变化(图 2)。两季冬小麦出苗至返青期 CO₂ 排放通量较少,4 个处理的 CO₂ 排放通量变化范围为 52.2 ~ 117.4 mg/(m²·h);拔节至成熟灌浆期小麦植株生长旺盛,呼吸作用增强,CO₂ 排放通量显著增加;成熟后各处理 CO₂ 排放通量均处于较低水平。2013—2014 年冬小麦播后 180 ~ 190 d 之间 CO₂ 排放通量先后出现峰值,CK、WCK、GM 和 WGM 处理分别为 309.5、276.7、193.7、180.1 mg/(m²·h),2014—2015 年小麦播后 170 ~ 180 d 4 个处理先后出现峰值,峰值分别为 305.7、271.4、183.1、199.2 mg/(m²·h),总体上较第 1 季高峰值有所降低。由以上分析可知,冬小麦田 CO₂ 排

放规律受砾石覆盖和灌水处理的影响较大,砾石覆盖处理的 CO₂ 排放通量在整个生育期内基本低于对照处理,灌水处理则表现为补灌初期排放通量明显增大,灌水的影响随时间减弱,随后 CO₂ 排放通量逐渐减小直至与其他处理无异甚至低于其他处理。

2.3 不同处理水热效应对 CO₂ 排放通量的影响

比较图 1 和图 2 可知,CO₂ 排放规律与土壤温度的变化规律相同,与土壤含水率的变化规律相反。土壤含水率、温度作为单因子变量分析时,二者与 CO₂ 排放通量的相关系数分别为 0.399 和 0.491 ($P < 0.05$),为了进一步分析二者交互作用对农田生态系统 CO₂ 排放的影响,对 2 年冬小麦田土壤含水率、温度、CO₂ 排放通量进行了回归分析。表 1 为 4 个处理分别对应的回归方程及参数,各处理间参数差异不大。曲线方程拟合的 R^2 值均在 0.85 以上, P 值均小于 0.05,说明该曲线方程对试验结果的拟合效果较好。

2.4 不同处理 CO₂ 排放总量与产量、水热因子的关系

由表 2 可以看出,砾石覆盖处理可以降低 CO₂ 排放总量,增加冬小麦产量,促进生态系统净交换。2 个生长季结束时,冬小麦的穗粒数、干物质质量、净初级生产力、产量等生长指标基本表现为砾石覆盖处理高于对照处理,各生长指标在砾石覆盖和补灌共同作用下达到最大。用收获指数代替各项生长指

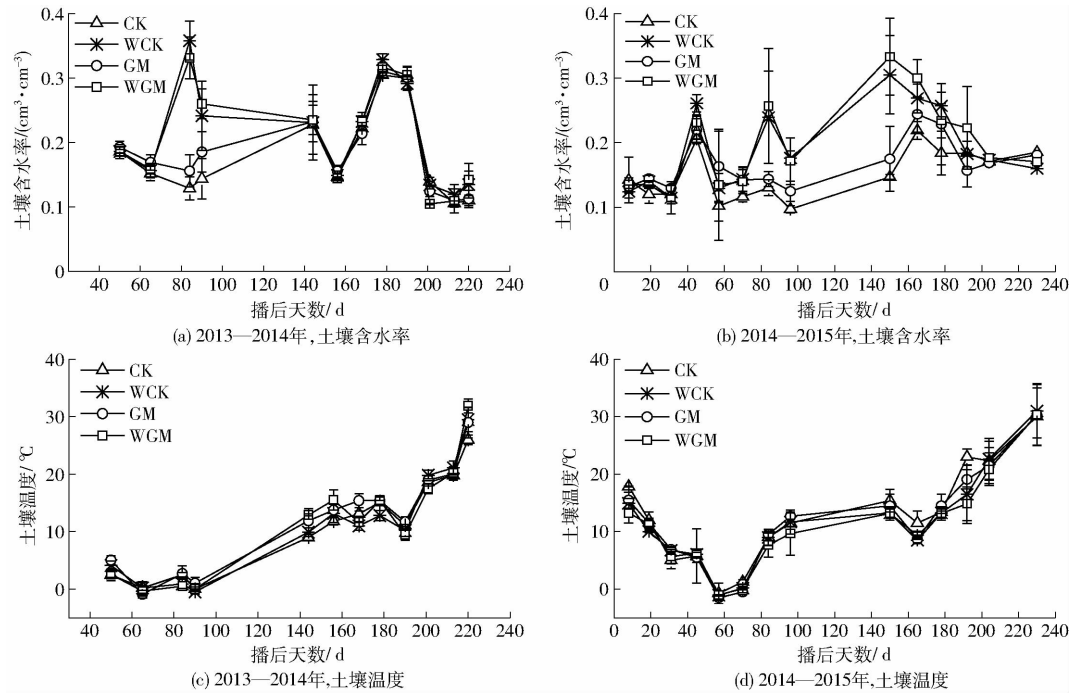


图 1 不同砾石覆盖和灌水处理下冬小麦生育期内土壤含水率与地温变化(2013—2015 年)
Fig.1 Soil moisture and temperature dynamics at different growth stages under gravel mulching and irrigation treatments during 2013—2015

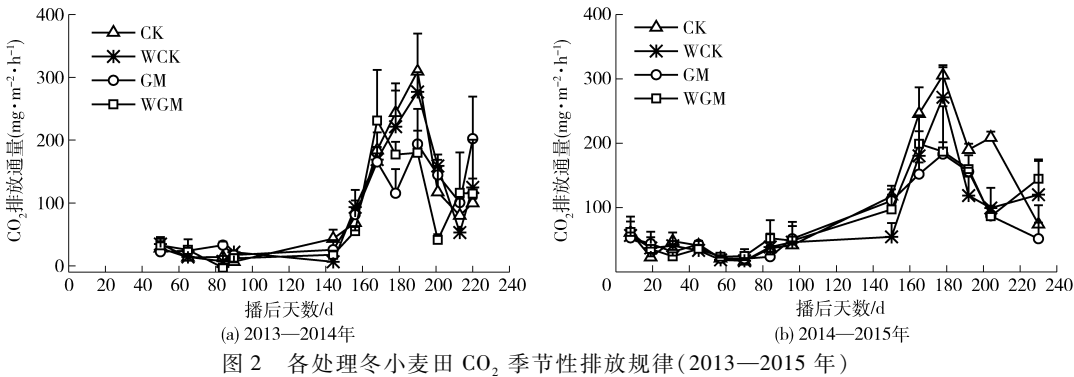


Fig. 2 Dynamics of CO₂ emissions in winter wheat field under different treatments during 2013—2015

标,不同处理间差异表现为:整个生育期 CO₂ 排放总量与收获指数和生态系统净交换变化趋势相反。

结合小麦生长参数和土壤环境改变两大类因子,进行其与 CO₂ 排放总量、生态系统净交换的相关矩阵和主成分分析,所有数据均为 2 个季节阶段末的平均值。小麦各生长参数、土壤环境因子与 CO₂、生态系统净交换的相关矩阵见表 3。通过主成分分析(图 3,土壤环境因子包括:1. 贮水量(*W*)、2. 蒸发(*ET*₀)、3. 作物耗水量(*ET*_c)、4. 导热率(λ)、5. 积温(*GDD*)、6. 土壤容重(*BD*)、7. 有机质(*SOM*);生长参数包括:8. 分蘖数(*Tiller*)、9. 叶面积

表 1 冬小麦田 CO₂ 排放通量与土壤含水率、温度的关系方程及参数

Tab.1 Fitted equation and parameters of CO ₂ flux with soil moisture and temperature							
处理	$R_e = a\theta + b\theta^2 + c(\theta + d)^2 e^{0.094T}$						样本数
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>	
CK	5.23	0.07	0.12	-16.28	0.919	0.002	26
WCK	4.46	0.01	0.05	3.12	0.852	0.037	26
GM	3.82	0.08	0.00	-2.87	0.896	0.004	26
WGM	3.29	0.02	0.06	0.37	0.906	0.012	26

注:*R_e* 为生态系统 CO₂ 排放通量,mg/(m²·h);*T* 为土壤温度,℃;*a*、*b*、*c*、*d* 为回归分析中估算出的经验系数。

表 2 冬小麦产量与 CO₂ 排放总量及生态系统净交换的对比

Tab.2 Comparison of winter wheat yield, CO ₂ flux and net ecosystem exchange under different treatments								
年份	处理	穗粒数	干物质量/ (kg·hm ⁻²)	NPP/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	收获指数	ω/ (t·hm ⁻²)	NEE/ (kg·hm ⁻²)
2013—2014	CK	455 ± 32 ^a	13 415 ± 4 152 ^a	5 983 ± 1 851 ^a	2 999 ± 1 003 ^a	0.23 ± 0.07 ^a	3.74 ± 0.33 ^a	2 241 ± 1 533 ^a
	WCK	503 ± 11 ^b	13 509 ± 1 068 ^a	6 025 ± 476 ^a	3 640 ± 959 ^{ab}	0.27 ± 0.07 ^a	3.61 ± 0.73 ^a	2 634 ± 482 ^a
	GM	601 ± 30 ^c	14 484 ± 933 ^a	6 460 ± 416 ^b	4 290 ± 649 ^{ab}	0.30 ± 0.06 ^a	3.39 ± 0.51 ^a	2 847 ± 504 ^a
	WGM	625 ± 8 ^c	14 699 ± 2 400 ^a	6 556 ± 1 070 ^b	5 079 ± 96 ^b	0.35 ± 0.05 ^a	2.96 ± 0.75 ^b	3 597 ± 1 812 ^b
2014—2015	CK	586 ± 204 ^a	12 955 ± 720 ^a	5 778 ± 1 321 ^b	3 738 ± 372 ^a	0.33 ± 0.05 ^a	3.93 ± 0.79 ^a	1 841 ± 667 ^a
	WCK	611 ± 41 ^a	13 058 ± 200 ^b	5 823 ± 1 079 ^a	4 647 ± 1 377 ^{ab}	0.36 ± 0.10 ^a	3.84 ± 0.75 ^a	1 984 ± 816 ^{ab}
	GM	653 ± 49 ^a	14 821 ± 973 ^c	6 610 ± 434 ^b	5 921 ± 468 ^b	0.39 ± 0.03 ^a	3.61 ± 0.49 ^a	3 001 ± 924 ^{ab}
	WGM	775 ± 86 ^a	14 973 ± 211 ^c	6 678 ± 178 ^{ab}	5 982 ± 552 ^b	0.40 ± 0.04 ^a	3.37 ± 0.53 ^a	3 310 ± 608 ^b

注:不同字母表示处理间差异显著(*P* < 0.05)。

指数(LAI)、10. 株高(*H*)、11. 地上部生物量(*Bio*)、12. 穗粒数(*NGP*)、13. 收获指数(*HI*)、14. 产量(*Yield*);生态系统指标包括:15. 二氧化碳排放总量(CO₂)、16. 净初级生产力(*NPP*)、17. 生态系统净交换(*NEE*)可以看出,生态系统净交换几乎与净初级生产力重合,而与 CO₂ 分异较大。小麦的生长参数(株高、叶面积指数、产量等)均与 CO₂ 分异较大,呈负相关。土壤环境因子中,蒸发蒸腾量 *ET*₀ 分布与 CO₂ 最为接近(二者相关系数 *r* = 0.683, *P* < 0.05),而其他因子(贮水量 *W*、作物耗水量 *ET*_c、土壤导热率 λ 、积温 *GDD*、土壤有机质含量 *SOM*)与 CO₂ 分布相反,相关系数均为负值。对于土壤容重

BD,其主成分分布于土壤有机质含量 *SOM* 和土壤蒸发量 *ET*₀之间,与 CO₂ 相关系数 *r* = -0.06,说明土壤紧实度间接影响了 CO₂ 排放。关于各个处理,砾石覆盖补灌处理 *WGM* 与产量、*HI*、*NEE*、*GDD* 和 *SOM* 等分布最为接近,其次为砾石覆盖处理 *GM*,说明砾石覆盖和关键生育期补灌共同作用下的土壤环境更适宜小麦生长。对于土壤容重 *BD*,其主成分分布于土壤有机质 *SOM* 和土壤蒸发量 *ET*₀之间,与 CO₂ 相关系数 *r* = -0.06,说明土壤紧实度间接影响了 CO₂ 排放。土壤容重 *BD* 分布与砾石覆盖补灌处理 *WGM* 相反,4 个处理测得的 2 个生长季阶段末 0~20 cm 土层平均土壤容重分别为 1.467、1.433、

1.410、1.383 g/cm³,WGM 处理较 CK 处理的土壤容重平均降低了 5.72%。CK 和 WCK 两对照处理分布与 CO₂ 排放相似度极高但与产量、NEE 等完全相

反。以上分析说明砾石覆盖改变了冬小麦生长的土壤环境,有利于作物生长,能稳定增产并降低 CO₂ 排放。

表 3 CO₂ 排放与生长参数和土壤环境因子的相关系数

Tab.3 Correlation coefficients between winter wheat growth parameters and soil environment change factors																	
	贮水量	ET ₀	ET _C	导热率	积温	容重	有机质	分蘖数	LAI	株高	生物量	穗粒数	产量	HI	ω	NPP	NEE
贮水量	1																
ET ₀	-0.316	1															
ET _C	0.317	-0.493	1														
导热率	0.169	-0.430	0.506	1													
积温	0.374	-0.630 *	0.626 *	0.803 **	1												
容重	0.158	-0.040	-0.267	-0.289	-0.358	1											
有机质	-0.080	-0.379	0.388	0.456	0.526	0.007	1										
分蘖数	-0.552	0.003	0.141	0.500	0.365	-0.405	0.507	1									
LAI	0.071	-0.488	0.338	0.708 **	0.707 *	-0.325	0.619 *	0.537	1								
株高	-0.045	-0.347	0.365	0.224	0.587 *	-0.546	0.191	0.457	0.485	1							
生物量	-0.491	-0.146	0.212	0.449	0.279	-0.227	0.731 **	0.623 *	0.523	0.074	1						
穗粒数	0.194	-0.652 *	0.622 *	0.624 *	0.918 **	-0.295	0.689 *	0.460	0.750 **	0.730 **	0.392	1					
产量	-0.149	-0.321	0.510	0.358	0.597 *	-0.460	0.594 *	0.564	0.696 *	0.804 **	0.379	0.803 **	1				
HI	0.154	-0.242	0.388	0.063	0.424	-0.302	0.174	0.193	0.360	0.779 **	-0.254	0.578 *	0.795 **	1			
ω	-0.362	0.683 *	-0.150	-0.467	-0.461	-0.060	-0.156	0.085	-0.530	-0.111	-0.032	-0.366	-0.280	-0.220	1		
NPP	-0.484	0.225	0.216	0.043	0.231	-0.422	0.274	0.559	0.073	0.548	0.197	0.377	0.642 *	0.552	0.018	1	
NEE	-0.484	0.225	0.216	0.043	0.231	-0.422	0.274	0.559	0.073	0.548	0.197	0.377	0.642 *	0.552	0.018	1 **	1

注：* 表示相关性在 P<0.05 水平上显著；**表示相关性在 P<0.01 水平上显著。

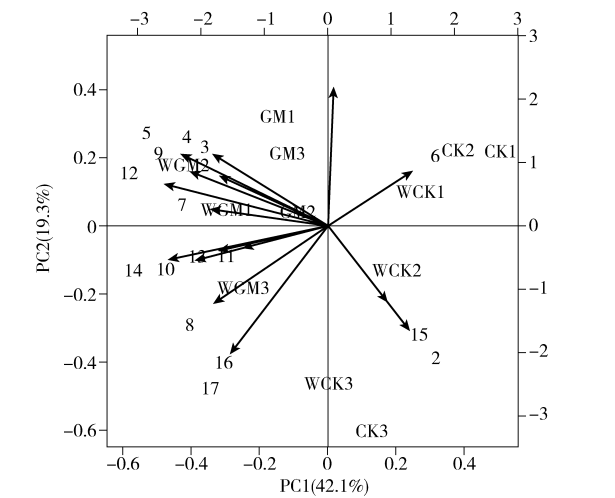


图 3 各处理 CO₂ 排放、生态系统净交换和土壤环境因子及小麦生长参数间的主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of CO₂ flux, NEE, soil environment factors and winter wheat growth parameters

3 讨论

3.1 砾石覆盖对土壤水热条件的改变

砾石覆盖不同于其他农业覆盖技术,其土壤水热条件的形成也必然有所不同,关于秸秆及塑料覆膜增温保墒的研究较多^[21-23]。本试验对 2 年砾石覆盖条件下冬小麦田土壤水热条件的改变进行研究,各处理土壤温度和含水率变化具有明显的季节性规律,即夏季高冬季低。小麦出苗至拔节期降雨极少,生长环境干旱且寒冷,该时期砾石覆盖条件下

的土壤温度和土壤含水率明显高于对照处理,且砾石覆盖和补灌共同作用效果最好。在雨水充足的拔节期至成熟期,各处理间土壤温度和含水率差异不明显,但仍表现为砾石覆盖高于对照。农田表面的砾石覆盖层可以吸收阳光中的长波辐射并转化为热能而提高土壤温度,通过改变土壤水分再分布而减少水分散失,进而改变土壤的水热条件。砾石覆盖具有提高地温、保持土壤水分的作用,这与文献[24-26]的研究结果一致。

3.2 砾石覆盖对 CO₂ 排放的影响

砾石覆盖对农田 CO₂ 排放的影响归根结底是通过改变土壤水热环境等主要因子来实现的。从 CO₂ 排放规律可以看出,两季冬小麦田 CO₂ 排放规律和土壤水热改变具有一致的季节性规律。在不同的生育阶段,土壤温度的升高和 CO₂ 排放趋于同步,土壤含水率变化规律则与 CO₂ 排放规律相反,这与陈慧等^[27]和刘全全^[28]的研究结果一致。对砾石覆盖条件下土壤水热与 CO₂ 排放曲线方程的验证表明,该方程对试验结果拟合效果很好,可对生育期内 CO₂ 排放通量进行简单预报,进一步说明土壤水热因子交互影响了农田 CO₂ 的排放。该方程数学结构和物理含义与 JACOBUS^[29]、LAVIGNE 等^[30]提出的经验公式相似。

农田管理方式、土壤水文、土壤温度、土壤有机质含量等都是影响 CO₂ 排放的重要因素。砾石覆盖改变了土壤环境和作物生长状况,影响了农田

CO₂ 排放,进而影响了农田生态效应。对影响农田生态系统 CO₂ 排放的冬小麦生长参数和土壤理化特性进行相关矩阵和主成分分析发现,产量、收获指数、生物量等作物生长参数分布均与砾石覆盖和砾石覆盖补灌处理接近,CO₂ 排放主要分布在无覆盖对照处理区域,这说明砾石覆盖处理条件下的水热改变更有利于作物增产,并能减少 CO₂ 排放。土壤环境因子中的 GDD、SOM 与砾石覆盖处理分布接近,而土壤容重 BD 分布则与砾石覆盖处理相反。土壤容重是土壤重要的物理性质,砾石覆盖对土壤容重有较大影响^[31-34]。本研究中砾石覆盖降低了土壤容重 BD,这可能是由于砾石覆盖减少了雨水对表土的冲蚀,还可消除阳光曝晒引起的土壤硬结,较好地保持砾石覆盖层下土壤的良好结构,降低了土壤容重,这与 CERDA^[32] 的研究结果基本一致。逢蕾等^[33] 和李卓等^[35] 也得到相似的结论。此外,CO₂ 排放与 ET₀ 二者分布几乎重合,说明减少蒸发很大程度上能减少 CO₂ 排放,关于砾石覆盖抑制蒸发的文献有很多,这也间接解释了砾石覆盖是减少 CO₂

排放的途径之一。目前砾石覆盖对水热条件的改变以及 CO₂ 排放影响的机理尚不明晰,仍有待进一步研究。

4 结论

(1)与对照处理 CK 相比,砾石覆盖能有效改善土壤水热条件,减少蒸发,保水保温效果明显,有利于提高小麦各项生长指标和增加产量,有效抑制了两季冬小麦田 CO₂ 排放(WGM 处理和 GM 处理分别较 CK 处理平均降低 16% 和 9%),促进了生态系统净交换(WGM 处理和 GM 处理分别较 CK 处理平均增加 20% 和 34%)。砾石覆盖可以有效改善土壤水热状况,促进作物生长发育,提高作物产量并降低农田 CO₂ 排放,促进农田生态系统净交换。

(2)相关矩阵和主成分分析表明在砾石覆盖层的影响下,冬小麦田 CO₂ 排放分布与砾石覆盖处理完全相反,而产量、生态系统净交换与砾石覆盖补灌处理极为接近。说明砾石覆盖结合关键生育期补充灌水的种植方式能实现农田生态系统减排增产的目的。

参 考 文 献

- 1 ESKILD H B, PETE S, JOHN R P. Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions—the major trends over 40 years[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 37: 43–55.
- 2 GALDOS M V, CERRI C C, CARLOS E, et al. Simulation of soil carbon dynamics under sugarcane with the CENTURY model[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 802–811.
- 3 LUO Yiqi, TREVOR F K, MATTHEW S. Predictability of the terrestrial carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(5): 1737–1751.
- 4 邵钧炯. 陆地生态系统 CO₂ 净交换的年际变异及其机制研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
SHAO Junjong. The interannual variability of net ecosystem CO₂ exchange and its underlying mechanisms in terrestrial ecosystems[D]. Shanghai: Fudan University, 2014. (in Chinese)
- 5 李晓密. 小麦-玉米轮作农田温室气体排放及其影响因素分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
LI Xiaomi. Study on greenhouse gas emissions and its influencing factors from the maize-wheat rotation field[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- 6 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 216–224.
QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emission from double rice field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11): 216–224. (in Chinese)
- 7 秦晓波, 李玉娥, WANG Hong, 等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 226–234.
QIN Xiaobo, LI Yu'e, WANG Hong, et al. Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in South China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(5): 226–234. (in Chinese)
- 8 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊2): 128–134.
- 9 CHEN Haixin, LIU Jingjing, ZHANG Afeng, et al. Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: a field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 814–824.
- 10 刘晶晶, 张阿凤, 冯浩, 等. 不同灌溉量对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 169–179.
LIU Jingjing, ZHANG Afeng, FENG Hao, et al. Influences of different irrigation amount on carbon sequestration in wheat-maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 169–179. (in Chinese)
- 11 WANG Bin, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 215(1): 100–109.
- 12 SAPKOTA T B, JAT M L, SHANKAR V, et al. Tillage, residue and nitrogen management effects on methane and nitrous oxide emission from rice-wheat system of Indian Northwest Indo-Gangetic Plains[J]. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 2015, 12(Supp. 1): 31–46.
- 13 LI Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of Northwest China[J]. *CATENA*, 2003, 52(2): 105–127.
- 14 LI Xiaoyan, SHI Peijun, LIU Lianyou, et al. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch[J].

- Journal of Hydrology, 2005, 312(1): 70–78.
- 15 冯浩, 刘晓青, 左亿球, 等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 155–163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160521&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.021.
- FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 155–163. (in Chinese)
- 16 余海龙, 黄菊莹. 砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 284–288.
- YU Hailong, HUANG Juying. Research progress on influence of mulching gravel and sand on soil macropore characteristics and soil hydrological process of gravel-sand mulch field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(4): 284–288. (in Chinese)
- 17 关红杰, 冯浩. 砂石覆盖厚度和粒径对土壤蒸发的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(4): 41–44.
- GUAN Hongjie, FENG Hao. Effects of the thickness and grain size of gravel mulch on soil moisture evaporation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(4): 41–44. (in Chinese)
- 18 ZHANG Afeng, LIU Yuming, PAN Genxing, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant and Soil, 2012, 351: 263–275.
- 19 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 119–126.
- SONG Mingdan, LI Zhengpeng, FENG Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 119–126. (in Chinese)
- 20 RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71–90.
- 21 GOURANGA K, ASHWANI K. Effects of irrigation and straw mulch on water use and tuber yield of potato in eastern India[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1–3): 109–116.
- 22 ZHANG Shulan, 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.
- 23 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氮化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 103–111.
- YU Kun, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 103–111. (in Chinese)
- 24 马育军, 李小雁, 伊万娟, 等. 沟垄集雨结合砾石覆盖对沙棘生长的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊2): 188–194.
- 25 彭红涛. 砂砾覆盖层截留降雨的机理研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
- PENG Hongtao. Study on the mechanism of rain water interception by the pebble and sand mulches[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- 26 赵丹, 李毅, 冯浩. 砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1058–1068.
- ZHAO Dan, LI Yi, FENG Hao. Dynamics of soil water evaporation from soil mulch with sand-gravels in stripe[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(5): 1058–1068. (in Chinese)
- 27 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉对番茄地土壤 CO₂ 排放的调控效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3380–3390.
- CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Effects of aerated irrigation on CO₂ emissions from soils of tomato fields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(17): 3380–3390. (in Chinese)
- 28 刘全全. 降水变化对黄土高原旱作冬小麦农田温室气体排放的影响[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- LIU Quanquan. Effect of simulated precipitation change on greenhouse gases emission in a dryland winter wheat field on the Loess Plateau[D]. Xi'an: Northwest University, 2015. (in Chinese)
- 29 JACOBUS H. Étude de dynamique chimique(studies of chemical dynamics)[J]. Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas, 1884, 3(10): 333–336
- 30 LAVIGNE M, FOSTER R, GOODINE G. Seasonal and annual changes in soil respiration in relation to soil temperature, water potential and trenching[J]. Tree Physiology Victoria, 2004, 24(4): 415–424.
- 31 毛云玲, 邓佳, 陆斌, 等. 不同覆盖方式对云南干热河谷油橄榄园土壤温度、水分和容重的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(1): 150–154.
- MAO Yunling, DENG Jia, LU Bin, et al. Effects of different mulching on soil temperature, moisture and unit weight of *Olea europaea* L. garden in dry and hot Valley of Yunnan[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(1): 150–154. (in Chinese)
- 32 CERDA A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(1): 59–68.
- 33 逢蕾, 肖洪浪, 路建龙, 等. 干旱半干旱地区砂田结构及水分特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 698–704.
- PANG Lei, XIAO Honglang, LU Jianlong, et al. Soil profile structure and moisture character of gravel-sand mulched field in arid and semiarid area of China[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 698–704. (in Chinese)
- 34 POESEN J, LAVEE H. Rock fragments in top soils: significance and processes[J]. CATENA, 1994, 23(1): 1–8.
- 35 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40–45.
- LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 40–45. (in Chinese)