

地膜覆盖与施加 γ -HCH对农田土壤温室气体排放的影响

邹 茜¹, 王 森^{1,2,3}, 丁柳屹¹, 李 娇¹, 肖 丹¹

1. 西北大学 陕西省地表过程与环境承载力重点实验室, 西安 710127

2. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127

3. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站, 西安 710127

摘要: 采用地膜覆盖和施加 γ -HCH ($0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 双因素处理进行紫苜蓿 (*Medicago sativa L.*) 盆栽培养试验, 通过静态箱-气相色谱法研究了地膜覆盖与施加 γ -HCH 对土壤温室气体 (N_2O 、 CH_4 和 CO_2) 排放的影响。结果表明: (1) 供试土壤是 N_2O 的排放源和 CH_4 的弱吸收汇。(2) 土壤 N_2O 和 CO_2 排放通量与土壤含水率和土壤温度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。(3) 地膜覆盖显著抑制了无植物处理组第 28—35 d 土壤 N_2O 的排放 ($P < 0.05$), 以及无植物处理土壤施加 γ -HCH 时土壤对 CH_4 的吸收峰值 ($P < 0.05$); 且地膜覆盖极显著促进了 CO_2 的排放 ($P < 0.01$)。(4) 高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 处理组 N_2O 排放通量显著高于低浓度 γ -HCH 处理组 ($P < 0.05$), 施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 极显著促进无植物处理和种植苜蓿时无覆盖土壤对 CH_4 的吸收峰值 ($P < 0.01$); 施加 γ -HCH 会抑制 CO_2 的排放 ($P > 0.05$)。

关键词: 地膜覆盖; γ -HCH; 温室气体; 全球增温潜势 (GWP); 农田土壤

Responses of soil greenhouse gas emissions to plastic film mulching and γ -HCH addition

ZOU Qian¹, WANG Sen^{1,2,3}, DING Liuyi¹, LI Jiao¹, XIAO Dan¹

1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an, 710127, China

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

3. Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Xi'an 710127, China

Abstract: **Background, aim, and scope** Increased concentrations of greenhouse gases exacerbate the greenhouse effect, with the resulting climate change posing threat to human society and ecosystems. Soil acts as an important source and sink of the main greenhouse gases (N_2O , CH_4 and CO_2). As a global agricultural method, plastic film mulching had a certain impact on greenhouse gas emissions. γ -HCH caused global concern due to their high

收稿日期: 2020-04-15; 录用日期: 2020-09-21; 网络出版: 2020-10-08

Received Date: 2020-04-15; **Accepted Date:** 2020-09-21; **Online first:** 2020-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31570440); 陕西省青年科技新星计划项目 (2016KJXX-83); 陕西省自然科学基础研究计划青年人才项目 (2015JQ4101); 陕西省教育厅科学的研究项目 (14JK1731)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (31570440); Shaanxi Province Youth Science and Technology New Star Plan (2016KJXX-83); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province (Young Talent Project) (2015JQ4101); Scientific Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education (14JK1731)

通信作者: 王森, E-mail: wangsen@nwu.edu.cn

Corresponding Author: WANG Sen, E-mail: wangsen@nwu.edu.cn

引用格式: 邹茜, 王森, 丁柳屹, 等. 2021. 地膜覆盖与施加 γ -HCH对农田土壤温室气体排放的影响 [J]. 地球环境学报, 12(3): 301–312.

Citation: Zou Q, Wang S, Ding LY, et al. 2021. Responses of soil greenhouse gas emissions to plastic film mulching and γ -HCH addition [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(3): 301–312.

toxicity, persistence, and significant adverse effects on ecosystems. In this study, the influence of γ -HCH on soil greenhouse gas emissions under mulching was investigated by measuring the emission flux of soil greenhouse gas (N_2O , CH_4 and CO_2) and soil physical and chemical properties. **Materials and methods** The experiment was conducted by the static chamber technique. Twelve treatments (CK 0, CK 50, CK 500, CK 0', CK 50', CK 500', NM 0, NM 50, NM 500, PM 0, PM 50, PM 500) were designed with plastic mulching and without plastic mulching under different concentrations of γ -HCH ($0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, $50\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, $500\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), and control treatment (without plant). Each treatment was repeated for 3 times. Soil temperature and moisture, greenhouse gases were measured and collected once a week. N_2O , CH_4 and CO_2 emission fluxes were determined by GC. **Results** (1) Soil was the emission source of N_2O and the weak absorption sink of CH_4 . (2) The N_2O and CO_2 emission flux were positively correlated with soil moisture content and temperature ($P<0.05$). (3) Plastic film mulching significantly inhibited N_2O emissions in soils without plant treatment from 28 d to 35 d ($P<0.05$), and the absorption peak of CH_4 in soils without plant treatment under the application of γ -HCH ($P<0.05$), whereas CO_2 emissions ($P<0.01$) were significantly increased. (4) N_2O emission flux under high concentration of γ -HCH ($500\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) was significantly higher than that under low concentration of γ -HCH ($P<0.05$); high concentration of γ -HCH ($500\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) significantly promoted the peak absorption of CH_4 in alfalfa planting ($P<0.01$), with CO_2 emissions inhibited by applying γ -HCH ($P>0.05$). **Discussion** Under plastic film mulching, γ -HCH affected the emissions of CH_4 , N_2O and CO_2 through nitrification, denitrification and soil microorganisms. Plastic film mulching significantly increased soil moisture and CO_2 emissions. The application of γ -HCH enhanced the carbon metabolism of the rhizosphere soil under mulching, as well as the absorption of CH_4 . Meanwhile, γ -HCH had a certain inhibitory effect on soil respiration with bacteria involved in carbon degradation in rhizosphere soil to reduce CO_2 . The high concentration of γ -HCH ($500\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) inhibited nitrification, and enhanced the denitrification process, promoting N_2O emission. **Conclusions** (1) N_2O and CO_2 emission flux was positively correlated with soil moisture content and soil temperature ($P<0.05$). (2) The soil was the emission source of N_2O and the weak absorption sink of CH_4 . (3) Plastic film mulching exhibited an inhibition effect on N_2O emissions in soils without plant treatment, and the absorption peak of CH_4 in soil without plant treatment under the application of γ -HCH, while promoting CO_2 emission. (4) High concentration of γ -HCH ($500\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) significantly promoted N_2O emission flux ($P<0.05$), and the peak absorption of CH_4 in the soil without plant treatment and in the alfalfa soil without plastic film mulching treatment ($P<0.01$). **Recommendations and perspectives** The results are conducive to understanding of the impact of different agricultural practices on soil greenhouse gas emissions.

Key words: plastic film mulching; γ -HCH; greenhouse gas; global warming potential (GWP); farm soil

温室气体的增加使温室效应加剧，其引起的气候变化将对人类社会和生态系统造成一定影响（IPCC, 2013, 2014; Chen et al, 2014）。土壤是温室气体（ N_2O 、 CH_4 和 CO_2 等）的重要排放源，对全球气候变化起着重要的作用。据估计，大气中每年有 5%—20% 的 CO_2 、15%—30% 的 CH_4 、80%—90% 的 N_2O 来源于土壤（Hansen et al, 1990），而土壤温室气体的排放主要受土壤理化性质、微生物、环境等多方面因素的影响（武岩等, 2018）。因此，科学合理地改善土壤性质将具有巨大的增汇减排潜力（周际海等, 2019），如何通过有效的农田管理措施降低温室气体排放成为当前应对气候变化研究的热点之一（王勤花

等, 2007）。

塑料地膜因其立竿见影的经济效益已成为一种全球应用的农业生产方式。地膜可以改变土壤的微生物群落（丁柳屹等, 2019），加速碳氮代谢，最终耗尽土壤有机质储量，增加土壤的斥水性，促进温室气体的释放（Kasirajan and Ngouajo, 2012; Steinmetz et al, 2016）。地膜覆盖还可以通过改善旱地土壤的温度和湿度条件增加 N_2O 和 CH_4 等温室气体的排放，并使全球增温潜势总量增加（Cuello et al, 2015; Nawaz et al, 2017）。Cuello et al (2015) 在韩国典型温带山地土壤的研究发现，塑料地膜在很大程度上增加了 CH_4 和 N_2O 的排放，且使全球增温潜势（global warming

potential, GWP) 增加了 12%—82%。Nan et al (2016) 在陕西长武进行的田间试验研究表明, 地膜覆盖显著增加了玉米农田土壤 CO₂ 和 N₂O 的潜在排放, 促进了土壤对 CH₄ 的吸收。但也有研究表明, 覆膜会降低旱地 N₂O 或水田 CH₄ 的排放 (张怡等, 2013; Berger et al, 2013; Gao et al, 2014), 具体机理有待进一步探究。

林丹 (hexachlorocyclohexane gamma-isomer, 简称 γ -HCH) 具有良好的杀虫性, 曾是世界上产量与使用量最高的有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 之一, 是一类典型的持久性有机污染物, 因其具有使用量巨大、难降解、半挥发性、毒性和易被生物体富集等特点 (安琼等, 2005; 刘佳等, 2018), 引起全球广泛关注。OCPs 进入到土壤环境后, 会影响土壤微生物群落的数量和多样性, 从而间接地影响到土壤中的各种生物化学转化过程 (Johnsen et al, 2001), 这可能成为驱动土壤温室气体 (N₂O、CH₄ 和 CO₂) 排放的重要因素。

综上所述, 作为农田生态系统常见的田间管理方式, 地膜覆盖和施加 γ -HCH 农药均会直接影响土壤温室气体排放过程, 然而关于二者的相互作用尚鲜有报道。本研究以紫苜蓿为模式植物, 采用静态箱盆栽试验研究了地膜覆盖与施加 γ -HCH 对土壤温室气体 (N₂O、CH₄ 和 CO₂) 排放通量和土壤理化性质的影响, 旨在进一步加深地膜覆盖与施加有机氯农药对农田土壤碳氮循环的理解, 为农业生产中土壤温室气体的排放与有机氯农药使用的监管提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

以紫苜蓿为模式植物, 设置地膜覆盖和无地膜覆盖处理、 γ -HCH 不同浓度处理 (0 ng·g⁻¹、50 ng·g⁻¹、500 ng·g⁻¹), 以及无植物种植的对照处理 (表 1), 每个处理重复 3 次, 共计 36 盆。试验每盆装土 0.75 kg, 加入基肥 9.5 g (N:P:K=14:16:15), 浇纯水至田间持水量的 40%。制备 γ -HCH 污染土壤需要先分别将相应处理应添加的 γ -HCH 与 500 g 土壤样品混合均匀 (制备 10 份), 将 10 份土壤样置于通风橱下 24 h 后充分混匀后再均分为 10 份, 每份与干净土样混匀制成 9 kg 土样, 将 90 kg 土样充分混匀后均分为 12 份土样装入花盆中老化一周。用农用地膜将

盆口密封, 室内平衡 1 周。试验在室内进行, 苗期于 2018 年 6 月种植, 2018 年 11 月收获。采用钠灯进行光照, 白天光照 12 h, 植物位置随机摆放, 每天更换一次位置以保证光照均匀。每天定量浇水, 试验开始时及试验前期定时向土壤中施加营养液。收获前一天停止浇水。

表 1 实验设计
Tab.1 Experimental design

覆盖处理 Mulching treatments	施用 γ -HCH 浓度 The concentration of HCHs (ng·g ⁻¹)	种植植物处理 Plant treatments	未种植植物处理 Control treatments
No mulching	0	NM 0	CK 0
	50	NM 50	CK 50
	500	NM 500	CK 500
Plastic film mulching	0	PM 0	CK 0'
	50	PM 50	CK 50'
	500	PM 500	CK 500'

1.2 土壤温湿度分析

自播种之日起, 每周采集温室气体时使用便携式土壤温湿度计测定土壤温湿度。

1.3 气体采集与分析

每周采集一次气体样品, 测定时间限于 09:00—10:00, 采用静态箱气相色谱法 (Liebig et al, 2010; 刘全全等, 2016) 测定气体通量。气体排放通量利用 HM 模型进行计算 (Hutchinson and Mosier, 1981)。年度累计排放量以相邻两次采样平均通量乘以间隔时间然后累加得出 (王金龙等, 2018), 即:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i)/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (1)$$

式中: M 为土壤温室气体累积排放总量; F 为 CH₄、N₂O 或 CO₂ 排放通量; i 代表采样次数; $t_{i+1} - t_i$ 表示两个相邻测定日期的间隔。

选取 100 a 尺度来计算土壤温室气体排放的全球增温潜势 (GWP) (IPCC, 2007) :

$$GWP = 25 \times [CH_4] + 298 \times [N_2O] + [CO_2] \quad (2)$$

式中: 25 和 298 分别为 CH₄ 和 N₂O 在 100 a 尺度上相对于 CO₂ 的 GWP 倍数, [CH₄]、[N₂O] 和 [CO₂] 分别代表土壤 CH₄、N₂O 和 CO₂ 的累积排放总量。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 处理数据, 运用 SPSS 25.0 对数据进行统计分析, 覆膜及对照处理下 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的排放通量差异显著性采

用多因素方差分析进行检验, 显著性水平为 $P < 0.05$, 利用 Origin 2017 作图。

2 结果与分析

2.1 地膜覆盖和施加 γ -HCH 处理下土壤水分和温度的变化趋势

地膜覆盖、 γ -HCH 对土壤水分和温度有一定影响(表 2), 其中地膜覆盖极显著增加了土壤水

分含量 ($P < 0.01$)。与不施加 γ -HCH 相比, 施加 γ -HCH 减少了土壤水分的消耗, 提高了土壤温度。施加低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 使土壤水分和温度分别平均提高了 3.89%、1.31%, 低于施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) (6.07%、1.47%), 但二者无显著差异 ($P > 0.05$, 表 2)。种植苜蓿使土壤水分极显著降低 ($P < 0.01$), 且地膜覆盖与植物具有显著的交互作用 ($P < 0.05$, 表 3)。

表 2 地膜覆盖和施加 γ -HCH 对土壤温室气体排放、土壤温度及土壤水分的影响

Tab. 2 Effects of plastic film mulching and γ -HCH on greenhouse gas flux, soil temperature and soil water content

处理 Treatments			N_2O 日均排放通量 N_2O daily mean emission flux $/(g \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1})$	CH_4 日均排放通量 CH_4 daily mean emission flux $/(g \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1})$	CO_2 日均排放通量 CO_2 daily mean emission flux $/(kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1})$	土壤含水率 Soil water /%	土壤温度 Soil temperature /°C
地膜覆盖 Plastic film mulching	植物 Plant	12.92	-0.45	1.41	31.35	23.77	
	无植物 Control	10.89	-0.51	-0.24	41.93	23.61	
无覆盖 No mulching	植物 Plant	8.77	-0.44	-0.36	21.00	23.71	
	无植物 Control	20.04	-0.52	-1.59	23.51	23.43	
γ -HCH 浓度 γ -HCH concentration $/(ng \cdot g^{-1})$	0	10.81	-0.53	0.05	28.45	23.41	
	50	5.46	-0.33	-0.53	29.60	23.72	
	500	23.20	-0.57	-0.10	30.29	23.76	
地膜覆盖 Plastic film mulching		NS	NS	***	***	NS	
显著性 Significance		(M)					
γ -HCH 浓度 γ -HCH concentration (γ -HCH)		*	NS	NS	NS	NS	NS

*, ** 和 *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著相关, NS 表示无差异性, 下同。

*, ** and *** mean significant at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively, NS means not significant, the same below.

表 3 地膜覆盖、施加 γ -HCH 以及植物间的交互作用
Tab. 3 γ -HCH and plant interactions under plastic film mulching

土壤温室气体日均排放通量 和土壤温湿度 Soil greenhouse gases daily mean emission flux and soil temperature and humidity	地膜覆盖 \times γ -HCH 浓度 (M \times γ -HCH)	植物 Plant	地膜覆盖 \times 植物 (M \times plant)	γ -HCH 浓度 \times 植物 γ -HCH \times plant	地膜覆盖 \times γ -HCH 浓度 \times 植物 M \times γ -HCH \times plant
N_2O 日均排放通量 N_2O daily mean emission flux $/(g \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1})$	NS	NS	NS	NS	NS
CH_4 日均排放通量 CH_4 daily mean emission flux $/(g \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1})$	NS	NS	NS	NS	NS
CO_2 日均排放通量 CO_2 daily mean emission flux $/(kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1})$	NS	***	NS	NS	NS
土壤含水率 Soil water /%	NS	***	*	NS	NS
土壤温度 Soil temperature / °C	NS	NS	NS	NS	NS

2.2 地膜覆盖和施加 γ -HCH处理下土壤温室气体(N_2O 、 CH_4 和 CO_2)排放通量的变化

2.2.1 N_2O

地膜覆盖使种植苜蓿的土壤 N_2O 排放增加且对一段时间内无植物处理土壤 N_2O 排放具有显著的抑制作用($P<0.05$)，不同浓度 γ -HCH处理间 N_2O 排放通量具有显著性差异($P<0.05$, 表2)，且 N_2O 排放通量与土壤含水率和土壤温度呈极显著正相关($P<0.01$)。从整体来看，地膜覆盖使种植苜蓿的土壤 N_2O 日均排放通量增加了32.12% (表2, $P>0.05$)。 N_2O 排放通量随时间均大致呈现单峰型的变化趋势(图1)。地膜覆盖显著抑

制了无植物处理土壤第28—35 d N_2O 的排放($P<0.05$) (图1a、1b)。种植苜蓿时，地膜覆盖增加了第28—35 d 土壤 N_2O 总量的排放(图1c、1d, $P>0.05$)。高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)处理下 N_2O 排放通量显著高于低浓度($50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) γ -HCH ($P<0.05$)。与不施加 γ -HCH相比，施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)显著促进了 N_2O 在第28—35 d的排放($P<0.05$)，其中对苜蓿处理土壤的促进效果极显著(图1c、1d, $P<0.01$)。此外，施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)推迟了无植物处理土壤中覆膜处理时 N_2O 排放通量峰值的出现时间，推迟了7 d(图1b)。

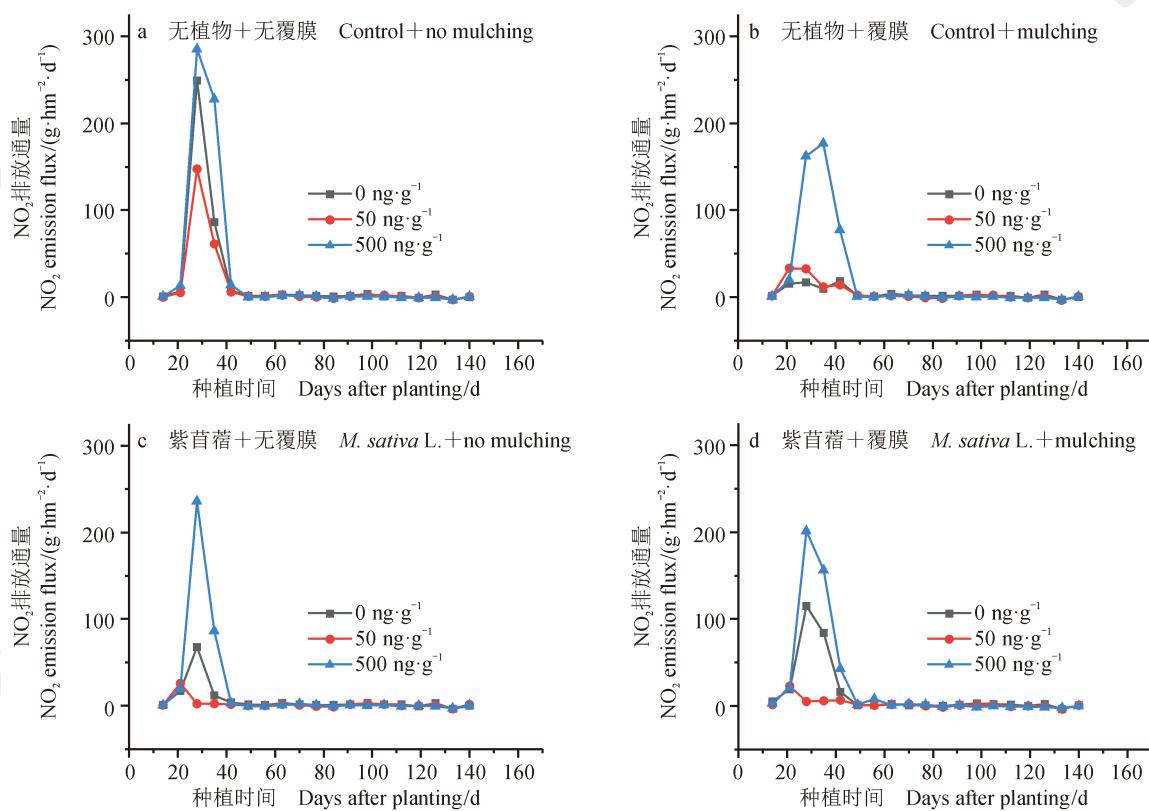


图1 地膜覆盖与施加 γ -HCH处理下土壤 N_2O 排放通量的变化
Fig. 1 Variation of N_2O emission flux under γ -HCH and film plastic mulching treatment

2.2.2 CH_4

与 N_2O 排放情况不同，土壤 CH_4 排放通量大多呈负值，说明土壤是大气 CH_4 的吸收汇。地膜覆盖和 γ -HCH对 CH_4 排放通量没有显著影响($P>0.05$, 表2)。平均来看，地膜覆盖处理的 CH_4 日均吸收量与无覆盖相比变化不显著($P>0.05$)；从土壤 CH_4 排放通量动态来看波动也较小(图

2)。种植苜蓿时，地膜覆盖对不施加和施加低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)时土壤 CH_4 的吸收峰值有极显著的促进作用(图2c、2d, $P<0.01$)；但是地膜覆盖抑制了无植物处理土壤施加 γ -HCH时土壤对 CH_4 的吸收峰值($P<0.05$)。与不施加 γ -HCH相比，施加 γ -HCH使土壤对 CH_4 的吸收通量峰值增加，在无植物处理土壤中施加高浓度 γ -HCH

($500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 时这种促进效果更明显 (图 2a、2b, $P < 0.01$) ; 种植苜蓿时, 施加高浓度 γ -HCH

($500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 极显著地增加了无地膜覆盖的情况下土壤对 CH_4 的吸收峰值 ($P < 0.01$)。

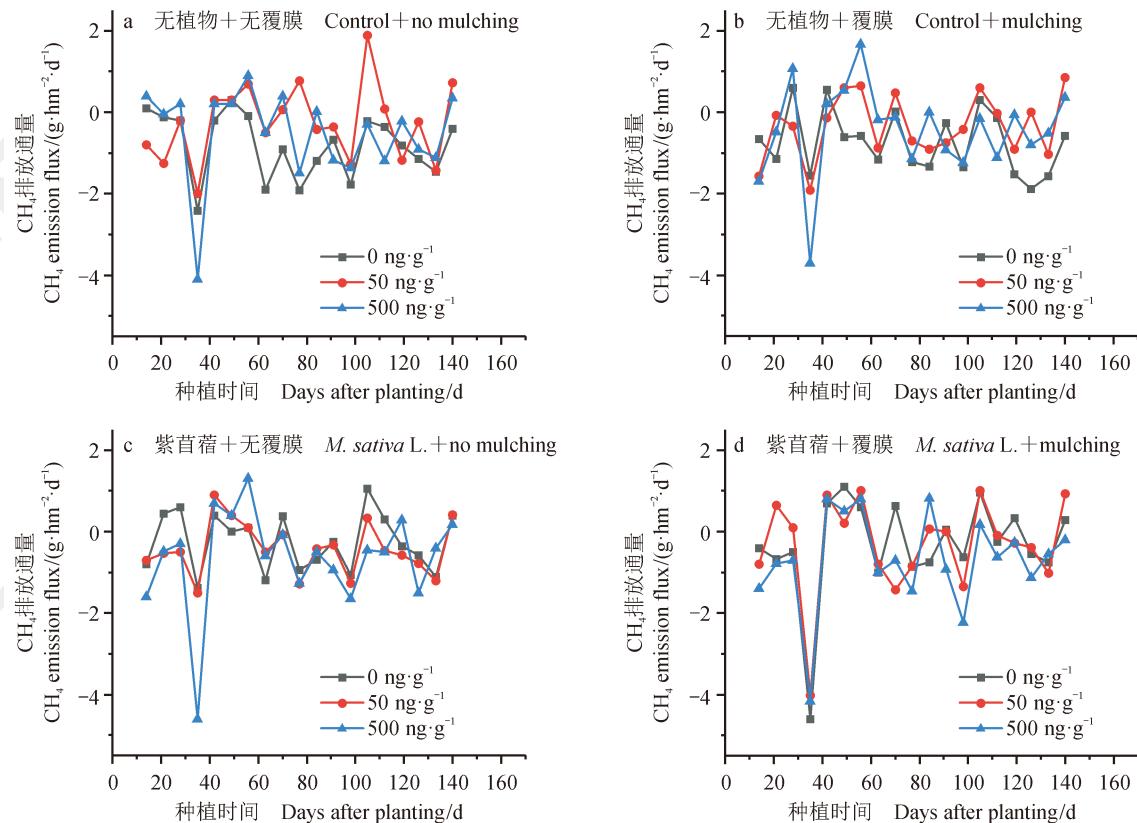


图 2 地膜覆盖与施加 γ -HCH 处理下土壤 CH_4 排放通量的变化
Fig. 2 Variation of CH_4 emission flux under γ -HCH and film plastic mulching treatment

2.2.3 CO_2

地膜覆盖极显著地促进了 CO_2 的排放 ($P < 0.01$), 施加 γ -HCH 使 CO_2 排放受到抑制 ($P > 0.05$, 表 1), CO_2 的排放与土壤湿度呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与土壤温度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。与不施加 γ -HCH 相比, 施加低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 使 CO_2 排放通量降低 ($P > 0.05$) 作用比施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 更明显 (图 3)。

2.3 地膜覆盖和施加 γ -HCH 处理下全球增温潜势 (GWP) 的变化

根据公式(2)计算了各处理的全球增温潜势 (GWP) (表 4), CH_4 的 GWP 均为负值, CO_2 的 GWP 值大多为负值, 说明土壤主要作为 CH_4 和 CO_2 的吸收汇。所有处理的 GWP 总量都主要取决于 N_2O 排放通量, 而 CH_4 排放通量对 GWP 的贡献较小, 这与 Cuello et al (2015) 研究结论相似。

地膜覆盖使无植物处理土壤中不施加、施加低浓度 ($50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 和施加高浓度 ($500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 的 γ -HCH 时 GWP 分别降低了 87.04%、56.12% 和 0.69%, 使种植苜蓿时分别升高了 57.63%、86.78% 和 28.81%, 且地膜覆盖显著降低了无植物处理土壤的 GWP ($P < 0.05$)。

从整体来看, 与不施加 γ -HCH 相比, 在无植物不覆膜处理以及种植苜蓿覆膜处理和无覆膜处理的情况下, 施加低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 使 GWP 分别降低了 61.10%、63.26% 和 88.54%, 施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 使 GWP 分别增加了 89.78%、21.69%、32.34% 和 59.73%。

3 讨论

3.1 地膜覆盖和 γ -HCH 对土壤温湿度的影响

水是农业生产的主要动力 (Hanjra and Qureshi, 2010)。本研究发现地膜覆盖极显著提高了土壤水

分含量($P<0.01$)，这是因为地膜覆盖可以减少水分的蒸发，有利于蓄保水分，进而提高了土壤含水量(李华等, 2011; Liu et al, 2014; Ma et al, 2018)。土壤温度是影响土壤微生物活性、田间

土壤呼吸速率和根系伸长的重要因素(Tan et al, 2017)，大量研究表明，地膜覆盖具有使土壤增温的作用(彭超等, 2014; 程宏波等, 2015)。本研究也发现地膜覆盖使各处理土壤温度有所升高。

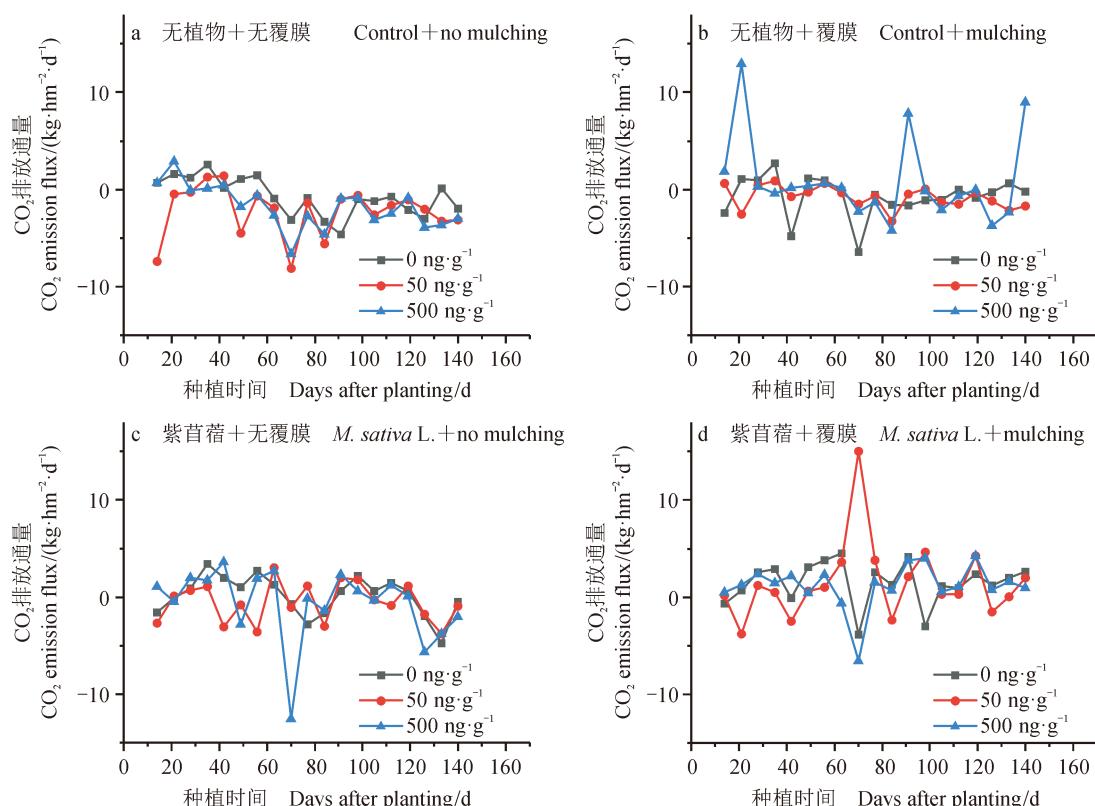


图3 地膜覆盖与施加 γ -HCH处理下土壤 CO_2 排放通量的变化
Fig. 3 Variation of CO_2 emission flux under γ -HCH and film plastic mulching treatment

表4 地膜覆盖和施加 γ -HCH对GWP的影响
Tab. 4 Effects of plastic film mulching and γ -HCH on GWP

处理	Treatments	CH_4	N_2O	CO_2	GWP/($10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
CK 0		-70.16	26204.35	-1893.13	24241.06
CK 50		-23.82	16070.38	-6616.42	9430.14
CK 500		-42.53	36547.01	-5547.58	30956.90
CK 0'		-62.16	4996.39	-1793.72	3140.51
CK 50'		-28.06	6816.32	-2650.70	4137.56
CK 500'		-28.74	27836.61	2934.45	30742.33
NM 0		-19.79	8341.89	1099.86	9421.97
NM 50		-37.09	2568.73	-1451.73	1079.91
NM 500		-49.59	24833.95	-1390.39	23393.97
PM 0		-31.30	16696.66	5570.59	22235.96
PM 50		-25.79	3203.36	4991.61	8169.18
PM 500		-57.07	28694.31	4225.16	32862.40
显著性	M γ -HCH	NS	NS	***	NS
Significance		NS	*	NS	*

3.2 地膜覆盖和施加 γ -HCH 对土壤温室气体排放 (N_2O 、 CH_4 和 CO_2) 的影响

3.2.1 N_2O

土壤主要通过硝化和反硝化过程产生 N_2O ，且与土壤水分密切相关 (Vilain et al, 2014)，当土壤具有较高的湿度时，增强了硝化和反硝化过程 (Okuda et al, 2007; Cuello et al, 2015)，使 N_2O 排放增加。本研究发现 N_2O 排放通量与土壤含水率和土壤温度呈极显著正相关 ($P<0.01$)，这与相关学者结论相似 (陈优阳等, 2019; 韩佳乐等, 2019)。地膜覆盖显著抑制了无植物处理土壤第 28—35 d N_2O 的排放 ($P<0.05$)，可能是因为无植物种植的土壤虽然在地膜覆盖下水热条件较好，但由于缺少植物根系的激发作用，土壤硝化和反硝化过程维持在较低的水平， N_2O 排放量相对较低 (白红英等, 2003)。杀虫剂的施用对土壤微生物活性会产生一定的影响，从而影响土壤中温室气体的排放 (Ekundayo, 2003)。 γ -HCH 可通过作用于土壤微生物而影响土壤的硝化与反硝化作用，从而影响 N_2O 的排放。本研究中高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 处理下 N_2O 排放通量显著高于低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) ($P<0.05$)；且与不施加 γ -HCH 相比，施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 显著促进了 N_2O 在第 28—35 d 的排放 ($P<0.05$)，施加低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 对第 28—35 d N_2O 排放通量具有一定的抑制作用，这可能是因为在覆膜处理时，施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 使参与硝化作用的亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 的相对丰度显著低于无 γ -HCH 及施加低浓度 γ -HCH ($50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 的根际土壤 ($P<0.05$)，从而抑制了硝化作用同时增加了土壤的反硝化进程 (Blanco-Jarvio et al, 2011; 丁柳屹, 2019)，减少了 N_2O 的氧化从而增加了其产生，促进其排放。施加高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 使无植物处理土壤中覆膜处理时 N_2O 排放通量峰值的出现时间推迟了 7 d，这与郑祥洲等 (2014) 的研究结论相似，杀虫剂吡虫啉和毒死蜱分别使土壤 N_2O 的排放高峰推迟了 4 d 和 8 d。

3.2.2 CH_4

土壤 CH_4 的产生主要是由于土壤中产甲烷菌的存在，在厌氧的环境中，产甲烷菌可以通过利用土壤微生物分解的有机酸来产生 CH_4 ，然而土壤产生的 CH_4 并不会全部排放到大气中，其中一部分会

在土壤或者水层被氧化 (李晓莎, 2016; 倪雪等, 2019)， CH_4 氧化过程与土壤温度、水分等因子密切相关 (孙向阳, 2000)，同时微生物也介导了碳循环中碳固定、甲烷代谢等基本过程 (Madigan et al, 2010)。本研究发现土壤是 CH_4 的汇，这与相关研究结论一致 (Li et al, 2014; 刘建粲等, 2018)，值越小表明土壤对 CH_4 的吸收越强烈 (戈小荣等, 2018)。当 CH_4 的消耗超过其产生时，环境就是一个 CH_4 的汇，土壤中的甲烷被微生物氧化所消除，从而氧化了大气中的 CH_4 (Mer et al, 2001)。地膜覆盖抑制了无植物处理土壤施加 γ -HCH 时土壤对 CH_4 的吸收峰值 ($P<0.05$)，这与相关学者 (Cuello et al, 2015; 倪雪等, 2019) 研究相似，这可能是因为地膜覆盖形成的厌氧环境创造了有利于产甲烷菌活动的土壤条件，限制了甲烷氧化菌的活动 (丁柳屹, 2019)，从而抑制了 CH_4 的吸收。高浓度 γ -HCH ($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 极显著促进了无植物处理土壤和种植苜蓿时无覆盖土壤 CH_4 的吸收峰值 ($P<0.01$)，说明高浓度 γ -HCH 改变了土壤对 CH_4 的吸收。

3.2.3 CO_2

地膜覆盖通过改善土壤水热环境及土壤中气体排放的途径，微生物群落和活性也继而发生改变，从而影响土壤中 CO_2 的排放 (张凯莉, 2018)。本研究发现 CO_2 的排放与土壤温湿度呈显著正相关 ($P<0.05$)，地膜覆盖极显著促进了 CO_2 的排放 ($P<0.01$)；地膜覆盖可能通过增加土壤温湿度，从而提高土壤微生物和土壤根系呼吸作用强度，增加 CO_2 排放量 (张前兵等, 2012; Chen et al, 2017)。施加 γ -HCH 对 CO_2 的排放产生了一定抑制作用 ($P>0.05$)，可能是因为 γ -HCH 会对土壤的呼吸有一定的抑制作用，从而减少 CO_2 的排放，有研究表明杀虫剂吡虫啉对土壤的呼吸有强烈的抑制作用 (刘慧君等, 2001)。且课题组研究也发现 γ -HCH 可显著减少根际土壤中部分参与碳降解的细菌 (丁柳屹, 2019)，这可能是 CO_2 排放减少的原因之一。

3.3 地膜覆盖与施加 γ -HCH 对土壤全球增温潜势 (GWP) 的影响

全球增温潜势 (GWP) 通常被用来定量衡量不同温室气体对全球变暖的影响，常以 CO_2 当量来衡量 (Whiting and Chanton, 2001)。在 100 a 时间尺度上，1 分子 CH_4 排放到大气中相当于 25

分子CO₂的辐射影响, 而1分子N₂O的辐射影响是CO₂的298倍(IPCC, 2007)。总体来说, 地膜覆盖和施加高浓度 γ -HCH(500 ng·g⁻¹)都使种植苜蓿土壤的GWP上升, 且N₂O贡献较大, 表明农业生产中地膜覆盖和较高浓度的 γ -HCH会加剧温室效应, 这与相关学者的研究结果相似, 地膜覆盖会使全球增温潜势增加, 这主要是由于N₂O排放的增加(Cuello et al., 2015)。因此, 追求农业产量最大化的同时, 地膜的合理使用和有机氯农药使用量的监管具有重要意义。

4 结论

地膜覆盖对土壤水分含量具有极显著的促进作用($P<0.01$), 且地膜覆盖与植物具有显著的交互作用($P<0.05$)。N₂O和CO₂排放通量随着土壤温湿度的增加而显著增加($P<0.05$)。土壤主要表现为N₂O的排放源和CH₄的弱吸收汇。地膜覆盖对一段时间内无植物处理土壤N₂O的排放有显著抑制作用($P<0.05$), 但极显著促进了CO₂的排放($P<0.01$)。高浓度 γ -HCH处理下N₂O排放通量显著高于低浓度 γ -HCH($P<0.05$)。与不施加 γ -HCH相比, 施加高浓度 γ -HCH显著促进了N₂O在一段时间内的排放($P<0.05$), 且极显著促进了无植物处理土壤以及种植苜蓿时无覆盖土壤对CH₄的吸收峰值($P<0.01$)。同时, 施加 γ -HCH会对CO₂的排放有一定抑制作用($P>0.05$)。本研究有助于加深认识农业生产中不同农业措施对土壤温室气体排放过程的影响。

参考文献

- 安琼, 董元华, 王辉, 等. 2005. 南京地区土壤中有机氯农药残留及其分布特征[J]. 环境科学学报, 25(4): 470–474. [An Q, Dong Y H, Wang H, et al. 2005. Residues and distribution character of organochlorine pesticides in soils in Nanjing area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(4): 470–474.]
- 白红英, 韩建刚, 张一平. 2003. 覆盖种植措施对农田土壤中N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 22(4): 394–396. [Bai H Y, Han J G, Zhang Y P. 2003. Effects of mulching and planting on N₂O discharge flux from soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 22(4): 394–396.]
- 陈优阳, 陈淑云, 曾从盛, 等. 2019. 螃蟹活动对闽江河口互花米草沼泽湿地土壤温室气体排放通量的影响[J]. 地球环境学报, 10(4): 364–376. [Chen Y Y, Chen S Y, Zeng C S, et al. 2019. Effect of crabs activities on greenhouse gases emission fluxes in *Spartina alterniflora* Loisel marsh from Minjiang River estuary [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(4): 364–376.]
- 程宏波, 柴守玺, 陈玉章, 等. 2015. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J]. 生态学报, 35(19): 6316–6325. [Cheng H B, Chai S X, Chen Y Z, et al. 2015. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(19): 6316–6325.]
- 丁柳屹, 王森, 付鑫. 2019. 覆盖条件下旱作春玉米农田土壤细菌群落结构分析[J]. 地球环境学报, 10(6): 590–600. [Ding L Y, Wang S, Fu X. 2019. Soil bacterial community structure in a dryland spring maize field with mulching [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(6): 590–600.]
- 丁柳屹. 2019. γ -HCH对覆膜苜蓿根际土壤细菌群落结构的影响[D]. 西安: 西北大学. [Ding L Y. 2019. Effects of γ -HCH on bacterial community structure in rhizosphere soil of alfalfa under plastic film mulching [D]. Xi'an: Northwest University.]
- 戈小荣, 王俊, 张祺, 等. 2018. 不同降水格局下填闲种植对旱作冬小麦农田夏闲期土壤温室气体排放的影响[J]. 草业学报, 27(5): 27–38. [Ge X R, Wang J, Zhang Q, et al. 2018. Effect of cover cropping on soil greenhouse gas emissions during summer fallow under manipulated rainfall [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 27(5): 27–38.]
- 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 等. 2019. 黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征[J]. 环境科学, 40(11): 5164–5172. [Han J L, Hao S, Liu Z J, et al. 2019. Characteristics of CO₂ and N₂O emissions under two land use types in the Loess Plateau of China [J]. *Environmental Science*, 40(11): 5164–5172.]
- 李华, 王朝辉, 李生秀. 2011. 旱地小麦地表覆盖对土壤水分硝态氮累积分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 30(7): 1371–1377. [Li H, Wang Z H, Li S X. 2011. Effect of different soil surface treatment on moisture and nitrate nitrogen accumulation and distribution in wheat field soil profiles in dryland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 30(7): 1371–1377.]
- 李晓莎. 2016. 覆膜与施氮对旱作春玉米农田温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学. [Li X S. 2016. Effects of plastic film mulching and nitrogen application on greenhouse gas emissions from dryland spring maize fields [D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University.]

- Effect of plastic film mulching and nitrogen applying on greenhouse gases emissions in dryland maize field [D]. Yangling: Northwest A & F University.]
- 刘惠君, 郑 巍, 刘维屏. 2001. 新农药吡虫啉及其代谢产物对土壤呼吸的影响 [J]. 环境科学, 22(4): 73–76. [Liu H J, Zheng W, Liu W P. 2001. Effects of pesticide imidacloprid and its metabolites on soil respiration [J]. Environmental Science, 22(4): 73–76.]
- 刘 佳, 丁 洋, 邱士华, 等. 2018. 韶江流域土壤中有机氯农药的特征分布 [J]. 环境科学, 39(11): 5127–5134. [Liu J, Ding Y, Qi S H, et al. 2018. Characteristics of organochlorine pesticides (OCPs) in soil samples of Hanjiang River basin, southeast China [J]. Environmental Science, 39(11): 5127–5134.]
- 刘建繁, 王泽林, 岳善超, 等. 2018. 地膜覆盖和施氮量对旱作春玉米农田净温室效应的影响 [J]. 应用生态学报, 29(4): 1197–1204. [Liu J C, Wang Z L, Yue S C, et al. 2018. Effects of plastic film mulching and nitrogen application rate on net global warming potential in semiarid rain-fed maize cropland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 29(4): 1197–1204.]
- 刘全金, 王 俊, 付 鑫, 等. 2016. 不同覆盖措施对黄土高原旱作农田 N_2O 通量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 34(3): 115–122, 178. [Liu Q Q, Wang J, Fu X, et al. 2016. Effects of different mulching measures on soil N_2O flux in rainfed winter wheat fields in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 34(3): 115–122, 178.]
- 倪 雪, 江长胜, 陈世杰, 等. 2019. 地膜覆盖和施氮对菜地 CH_4 排放的影响 [J]. 环境科学, 40(5): 2404–2412. [Ni X, Jiang C S, Chen S J, et al. 2019. Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on CH_4 emissions from a vegetable field [J]. Environmental Science, 40(5): 2404–2412.]
- 彭 超, 陈月华, 吴际友. 2014. 不同地表覆盖对地表温度、湿度和土壤水分的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 34(4): 54–59. [Peng C, Chen Y H, Wu J Y. 2014. Effects of different patterns surface mulching on ground temperature, humidity and soil moisture [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 34(4): 54–59.]
- 孙向阳. 2000. 北京低山区森林土壤中 CH_4 排放通量的研究 [J]. 土壤与环境, 9(3): 173–176. [Sun X Y. 2000. CH_4 emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing [J]. Soil and Environmental Sciences, 9(3): 173–176.]
- 王金龙, 李艳红, 李发东. 2018. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量 [J]. 生态学报, 38(2): 668–677. [Wang J L, Li Y H, Li F D. 2018. Emission fluxes of CO_2 , CH_4 , and N_2O from artificial and natural reed wetlands in Boston Lake, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 38(2): 668–677.]
- 王勤花, 曲建升, 张志强. 2007. 气候变化减缓技术: 国际现状与发展趋势 [J]. 气候变化研究进展, 3(6): 322–327. [Wang Q H, Qu J S, Zhang Z Q. 2007. International climate change mitigation technologies: advances and outreaches [J]. Advances in Climate Change Research, 3(6): 322–327.]
- 武 岩, 红 梅, 林立龙, 等. 2018. 3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 [J]. 环境科学, 39(1): 310–320. [Wu Y, Hong M, Lin L L, et al. 2018. Effects of three soil amendments on greenhouse gas emissions from corn fields in the Hetao irrigation district [J]. Environmental Science, 39(1): 310–320.]
- 张凯莉. 2018. 地膜覆盖和施氮对菜地 CH_4 和 CO_2 排放及土壤有机碳组分的影响 [D]. 重庆: 西南大学. [Zhang K L. 2018. Effect of plastic film mulching and nitrogen application on CH_4 and CO_2 emissions and soil organic carbon components from a vegetable field [D]. Chongqing: Southwest University.]
- 张前兵, 杨 玲, 王 进, 等. 2012. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响 [J]. 中国农业科学, 45(12): 2420–2430. [Zhang Q B, Yang L, Wang J, et al. 2012. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 45(12): 2420–2430.]
- 张 怡, 吕世华, 马 静, 等. 2013. 水稻覆膜节水综合高产技术对稻田 CH_4 排放的影响 [J]. 生态环境学报, 22(6): 935–941. [Zhang Y, Lü S H, Ma J, et al. 2013. Effect of high-yield rice planting technique integrated with plastic mulching for water saving on methane emission from rice fields [J]. Ecology and Environmental Sciences, 22(6):

- 935–941.]
- 郑祥洲, 丁洪, 雷俊杰, 等. 2014. 杀虫剂对土壤温室气体排放的影响 [J]. *生态环境学报*, 23(2): 267–270. [Zheng X Z, Ding H, Lei J J, et al. 2014. Effects of insecticides on greenhouse gas emission in soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 23(2): 267–270.]
- 周际海, 陈晏敏, 袁颖红, 等. 2019. 秸秆与生物质炭施用对土壤温室气体排放的影响差异 [J]. *水土保持学报*, 33(4): 248–254. [Zhou J H, Chen Y M, Yuan Y H, et al. 2019. Effects of biochar and wheat straw returning on soil greenhouse gases emission [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33(4): 248–254.]
- Berger S, Kim Y, Kettering J, et al. 2013. Plastic mulching in agriculture—Friend or foe of N_2O emissions? [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 167: 43–51.
- Blanco-Jarvio A, Chávez-López C, Luna-Guido M, et al. 2011. Denitrification in a chinampa soil of Mexico city as affected by methylparathion: a laboratory study [J]. *European Journal of Soil Biology*, 47(5): 271–278.
- Chen H X, Liu J J, Zhang A, et al. 2017. 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*, 579: 814–824.
- Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. 2014. Producing more grain with lower environmental costs [J]. *Nature*, 514(7523): 486–489.
- Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, et al. 2015. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation [J]. *Applied Soil Ecology*, 91: 48–57.
- Ekundayo E O. 2003. Effect of common pesticides used in the Niger Delta Basin of southern Nigeria on soil microbial populations [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 89(1): 35–41.
- Gao B, Ju X T, Su F, et al. 2014. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study [J]. *Science of the Total Environment*, 472: 112–124.
- Hanjra M A, Qureshi M E. 2010. Global water crisis and future food security in an era of climate change [J]. *Food Policy*, 35(5): 365–377.
- Hansen J E, Lacis A A. 1990. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change [J]. *Nature*, 346(6286): 713–719.
- Hutchinson G L, Mosier A R. 1981. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 45(2): 311–316.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press; 1–587.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: mitigation of climate change. Working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Johnsen K, Jacobsen C S, Torsvik V, et al. 2001. Pesticide effects on bacterial diversity in agricultural soils—a review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 33(6): 443–453.
- Kasirajan S, Ngouajio M. 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(2): 501–529.
- Li Z, Zhang R, Wang X, et al. 2014. Effects of plastic film mulching with drip irrigation on N_2O and CH_4 emissions from cotton fields in arid land [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 152(4): 534–542.
- Liebig M A, Tanaka D L, Gross J R. 2010. Fallow effects on soil carbon and greenhouse gas flux in central North Dakota [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2): 358–365.
- Liu J L, Bu L D, Zhu L, et al. 2014. Optimizing plant density and plastic film mulch to increase maize productivity and water-use efficiency in semiarid areas [J]. *Agronomy Journal*, 106(4): 1138–1146.
- Ma D, Chen L, Qu H C, et al. 2018. Impacts of plastic film

- mulching on crop yields, soil water, nitrate, and organic carbon in northwestern China: a meta-analysis [J]. *Agricultural Water Management*, 202: 166–173.
- Madigan M T, Martinko J M, Stahl D A, et al. 2010. Brock biology of microorganisms [M]. 13th edition. New York: Pearson.
- Mer J L, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 37(1): 25–50.
- Nan W G, Yue S C, Huang H Z, et al. 2016. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO_2 , CH_4 and N_2O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(2): 451–464.]
- Nawaz A, Lal R, Shrestha R K, et al. 2017. Mulching affects soil properties and greenhouse gas emissions under long-term no-till and plough-till systems in alfisol of central Ohio [J]. *Land Degradation & Development*, 28(2): 673–681.
- Okuda H, Noda K, Sawamoto T, et al. 2007. Emission of N_2O and CO_2 and uptake of CH_4 in soil from a Satsuma mandarin orchard under mulching cultivation in central Japan [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 76(4): 279–287.
- Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, et al. 2016. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J] *Science of the Total Environment*, 550: 690–705.
- Tan S, Wang Q J, Xu D, et al. 2017. Evaluating effects of four controlling methods in bare strips on soil temperature, water, and salt accumulation under film-mulched drip irrigation [J]. *Field Crops Research*, 214: 350–358.
- Vilain G, Garnier J, Decuq C, et al. 2014. Nitrous oxide production from soil experiments: denitrification prevails over nitrification [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 98(2): 169–186.
- Whiting G J, Chanton J P. 2001. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 53(5): 521–528.