

地膜的水热效应与麦田土壤 N_2O 排放

白红英¹, 孙 华¹, 李世清², 高 翔¹

(1.西北大学城市与资源学系, 陕西 西安 710127; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过两个小麦生长期田间试验,研究了地膜覆盖对耕层土壤 N_2O 排放的影响。结果表明,无论是否耕种小麦,地膜覆盖均能明显提高耕层土壤含水量,且对休耕地的保水作用高于小麦田。小麦田覆膜后增温幅度小于休耕地,但在孕穗期前和成熟期后增温效果大,而小麦生长中期小;尤其能显著提高 0~5 cm 耕层土壤温度,甚至 10 cm 深土壤温度。地膜覆盖后小麦田耕层土壤中 NO_3^--N 平均含量增加 $5.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且小麦生长旺盛期增加量明显。覆膜使大多数小麦生育期土壤 N_2O 排放通量高于常规耕作,其增排效应与土壤水分、温度、 NO_3^--N 含量、有机质增加量存在较好的线性关系;小麦田土壤 N_2O 增排的最大影响因子是耕层 5 cm 处土壤温度的变化,其次与土壤养分有效性增加密切相关;而休耕地土壤 N_2O 的增排作用主要受控于覆膜对水热条件及微生物能量供给的改善。

关键词: N_2O 排放;地膜覆盖;水温效应;麦田土壤

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)10-2111-08

Effects of Film Mulching on Soil Water and Temperature and N_2O Emissions in Wheat Fields

BAI Hong-ying¹, SUN Hua¹, LI Shi-qing², GAO Xiang¹

(1.Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2.College of Resource and Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Global warming affects the soil greenhouse gas emission in croplands. The effect of film mulching on soil water and temperature and N_2O emissions was explored in two trials conducted on winter wheat. The results showed that film mulching could significantly improve soil water contents at the cultivated layer, and such effects on soil moisture in the fallow lands was better than that in wheat fields. Film mulching also increased soil temperature at 0~5 cm depth significantly, even at 5~10 cm layer. The warming effect in wheat fields was less than that in fallow lands, and mainly occurred before crop booting and after entering the mature stage. After being mulched, soil NO_3^--N content in the cultivated layer of wheat field increased by $5.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ on average, remarkably in the quick-growing stage of wheat. In most wheat growing period, film mulching increased soil N_2O flux when compared with the conventional tillage. Linear correlations were found between soil N_2O flux and soil moisture, temperature, NO_3^--N and organic matter. In wheat fields, the increasing effect of film on soil N_2O emission was mainly influenced by the temperature changes in the topsoil of 5 cm, followed by the increased soil nutrient availability. In the fallow lands, however, such effect was mainly by the improvements of the film mulching on soil hydro-thermal conditions and micro-organisms energy supply.

Keywords: N_2O flux; film mulching; effect on soil water and temperature; wheat field soil

农田土壤作为一个复杂多变的生态系统,受气温、降水、光照、栽种作物种类、施肥量、施肥种类、耕作管理方式等多种自然因子和人为因子的影响,农田

土壤 N_2O 排放不仅季节性差异明显而且在空间上多变,这给 N_2O 排放机理的研究、排放量估算带来不便和不准确性,预测全球变化对土壤 N_2O 排放的影响作用就更加困难。我国是世界上最大的地膜生产和使用国,约占全国总面积 41.4 % 的半干旱地区,由于水资源缺乏,农业生产的主要水源为天然降水,提高降水利用效率已成为本地区农田管理的关键环节。由于地膜覆盖能有效地改善水、热、肥等土壤生态条件,因

收稿日期:2009-07-07

基金项目:国家科技基础性工作专项重点项目(2007FY110800);教育部科技重点项目(209123)

作者简介:白红英(1962—),女,博士,教授,主要从事环境化学和全球变化生态学研究。E-mail: hongyingbai@163.com

此,对地膜覆盖的保温、保水及增产作用已进行了大量研究^[1-4],并使这一技术得到了大面积的推广。

为观测因温度、水分微弱变化对土壤 N₂O 排放的影响,预测气候变暖对农田土壤温室气体排放的影响,本试验特选择了西北地区常用的保水保温耕作措施——地膜覆盖,来研究小麦田土-气界面水热波动的环境效应及其对土壤 N₂O 排放的影响。

1 试验材料与方法

1.1 供试土壤

试验在位于黄土高原南部旱作区的西北农林科技大学试验站内进行,共进行了两个小麦生育期。该区位于东经 108°38',北纬 34°42',海拔 520 m 左右,属大陆性季风气候,年平均温度 11~14℃,冬小麦生育期>5℃的平均积温为 1 200℃;年降水量 500~800 mm,主要集中于 7、8、9 三个月,冬春易旱,年蒸发量达 1 400 mm,属半湿润易旱区。土壤为石灰性土壤,是典型的旱耕人为土。第二试验期无论是降雨量还是温度均高于第一试验期。

1.2 试验设计

为观测小麦生长期温度、水分及作物对土壤 N₂O 排放的影响,田间试验选择了西北地区常用的保水保肥耕作措施(地膜覆盖)和常规耕种,耕种小麦与休闲,共 4 个处理:分别为:覆膜种小麦(MW)、无膜种小麦(NW)、覆膜休闲(MF)、无膜休闲(NF)。每个处理设 3 个平行试验,随机布设,共 12 个小区,小区面积 20 m²(4 m×5 m)。

播种时,将氮肥(225 kg 氮·hm⁻²)和磷肥(150 kg 磷(P₂O₅)·hm⁻²)作基肥,一次施入耕层并混合均匀、耙平,覆膜处理进行覆膜后,用穴播机穴播。覆膜措施为全程覆膜。试验于每年 10 月中旬播种小麦,次年 6 月 3 日左右收获。供试小麦为小偃 503。整个生育期不进行人为灌水。在小麦生长的出苗、分蘖、拔节、开花和成熟等生育期测定土壤 N₂O 排放通量;同时,在箱内放置 4 支地温计于 0、5、10、20 cm 土壤深处,测定箱内气温和 5、10、20 cm 土层处温度;并采集 0~5、5~10、10~15、10~20 cm 土层土壤样品,分析土壤理化性质。

1.3 土壤 N₂O 排放通量测定方法

土壤 N₂O 通量采用封闭箱收集法^[5-7]。分别于冬小麦的苗期、分蘖期、孕穗期、开花期和成熟期等小麦生长季节及收获后,采集、测定土壤 N₂O 通量。

大田气体样品采集时间均固定在 14:00—16:00

时,气体收集时间为 1 h。测定时,将由 PVC 材料制作的箱体放于田间,箱体开口一端埋入土体 4 cm,外部用泥土密闭固定,以防漏气,箱盖上有一个用橡胶塞塞紧的采气孔,采集气样时,将 100 mL 注射器注射头从橡胶塞扎入箱内,来回抽取和推排气 5 次,以混匀箱内气体,减少采样误差,然后用 2 mL 注射器从旁边抽取气样。每次从封闭箱内抽取气体样品后,立即用橡胶塞封住注射器针头,以防止漏气。每一处理,重复取样 5 次。

气体样品采集后迅速带回实验室用美国造 Varian GC3 800 气相色谱分析,从样品采集至上机分析一般要求在 6 h 内完成。

1.4 田间土壤 N₂O 排放通量计算

N₂O 排放通量指单位时间内单位面积上农田土壤排放或吸收 N₂O 的量:

$$Flux = \Delta m / (A \times \Delta t)$$

则通量的计算公式为:

$$Flux = d \times h \times \Delta c / \Delta t$$

$$Flux = d_0 \times h \times (\Delta c / \Delta t) \times (273/T)$$

式中,Flux 为排放通量,Δm 为箱内气体在测定前后质量的变化,A 为箱内土壤面积,Δt 为测定时间;h 为箱内有效空间的高,d 为采气箱内气温气压下 N₂O 的密度,d₀ 为标准状况下 N₂O 气体的密度(1.25 kg·m⁻³),Δc/Δt 为箱内气体浓度随时间的变化率,T 为采气箱内温度(绝对温度 K)。

2 结果与讨论

2.1 地膜覆盖的温室效应

2.1.1 地膜覆盖的保水效应

有地膜覆盖和无地膜覆盖情况下,无论是小麦田还是休耕地耕层土壤含水量都存在明显的差异(图 1)。小麦田覆膜(MW)耕层土壤比未覆膜(NW)耕层土壤两年平均含水量提高了 17.02%;休耕地覆膜(MF)耕层土壤比未覆膜(NF)耕层土壤平均含水量增加了 21.22%。第一试验期与第二试验期相比,小麦田耕层土壤含水量只增加了 3.47%;休耕地土壤含水量增量为 9.17%,覆膜与不覆膜引起的水分增加量差异不显著,而第二试验期处理 MW 比处理 NW 耕层土壤含水量提高了 26.23%;处理 MF 比处理 NF 水分含量增加了 31.26%,无论是小麦田还是休耕地覆膜与不覆膜处理间差异显著($P=0.030\ 7<0.05$),即第二试验期地膜覆盖的保水效果高于第一试验期。这是因为在第一个小麦生长生育期内总降雨量只有 104.2

mm,而第二个生长生育期内总降雨量为 167.15 mm,比第一个小麦生长生育期总降雨量多 62.95 mm,此结果表明,地膜覆盖的保水作用在供试土壤上亦存在在丰水年作用明显,缺水年作用不明显现象。由此可见,麦田覆膜后由于土壤水分与近地层空气中水分交换通道减少,膜下相对湿度增加,有效地抑制了土壤水分的蒸发损失,总蒸发量大幅度下降,并保证耕层土壤有较高的含水量,全生长期可减少蒸发 100 mm 以上。覆盖地膜后上层土壤含水量相对稳定,变幅减小。

2.1.2 地膜覆盖的增温效应

在测定土壤 N_2O 排放量时,对田间土壤 5、10、20 cm 深处的温度进行了测定,结果如图 2,发现第一个小麦生长生育期小麦田和休耕地覆膜后增温效果较第二个小麦生长生育期明显,小麦田 5、10、20 cm 深处增温分别为:2.05、1.65、0.60 $^{\circ}C$;休耕地覆膜后增温分别为:4.48、4.67、3.45 $^{\circ}C$,处理间差异显著($P_{5\text{cm}}=0.002\ 2$, $P_{10\text{cm}}=0.017\ 9$),但 20 cm 处增温未达到显著性水平($P_{20\text{cm}}=0.070\ 6$)。而第二个小麦生长生育期小麦田 5、10、20 cm 深处土壤增温仅分别为:1.00、0.67、0.22 $^{\circ}C$;休耕地增温分别为:2.05、2.67、1.00 $^{\circ}C$ 。

由于植物体对阳光的阻挡等作用,小麦田覆膜后增温幅度比休耕地增温幅度小,且在孕穗期前和成熟期以后增温效果大,而小麦生长中期增温效果小,从两季观测均值看,5、10、20 cm 深处小麦田土壤温度平均仅增加了 1.41、1.06、0.37 $^{\circ}C$,而休耕地增加了 3.02、3.47、2.04 $^{\circ}C$ (表 1)。即地膜覆盖对土壤的增温效果与日照时数、土壤含水量和露地土壤温度有关:日照时数越长,土壤含水量越大,露地土壤温度越低,则地膜

表 1 覆膜后不同处理土壤温度平均增量($^{\circ}C$)

Table 1 Average soil temperature increment after being mulched under different treatments($^{\circ}C$)

	深度/cm	第一试验期	第二试验期	两季均增量
小麦田	5	2.05	1.00	1.53
	10	1.65	0.67	1.16
	20	0.6	0.22	0.41
休耕地	5	4.48	2.05	3.27
	10	4.67	2.667	3.67
	20	3.45	1.1	2.28

覆盖的增温效果越显著^[1,3-4]。总之,地膜覆盖提高了土壤温度,特别是能显著提高 0~5 cm 耕层土壤温度^[8],甚至 10 cm 深土壤温度。

2.1.3 地膜覆盖对土壤养分有效性的影响

地膜覆盖显著的水热效应和生物效应,必然会影响土壤养分的有效性。地膜覆盖后土壤有机氮的矿化速率、矿化量和 NO_3^-N 增加。李世清等^[2]在甘肃定西的测定结果表明,春小麦地膜覆盖,特别是全生育期覆盖,收获后 0~100 cm 土层中的 NO_3^-N 累积量显著大于不覆膜处理。本试验结果显示,地膜覆盖后小麦田耕层土壤中 NO_3^-N 平均含量增加了 5.34 $mg \cdot kg^{-1}$,处理间存在差异($P=0.183\ 6$),且小麦生长旺盛期增加量明显;而休耕地覆膜后耕层土壤中 NO_3^-N 平均含量反而减少,尤以低温时明显,而后期随着气温的增加, NO_3^-N 含量高于未覆膜小区,见图 3,处理间差异较显著($P=0.097\ 0<0.10$)。

图 3 表明,地膜覆盖除影响氮素有效性外,还影响磷的有效性及土壤有机质含量。覆膜后无论是小麦

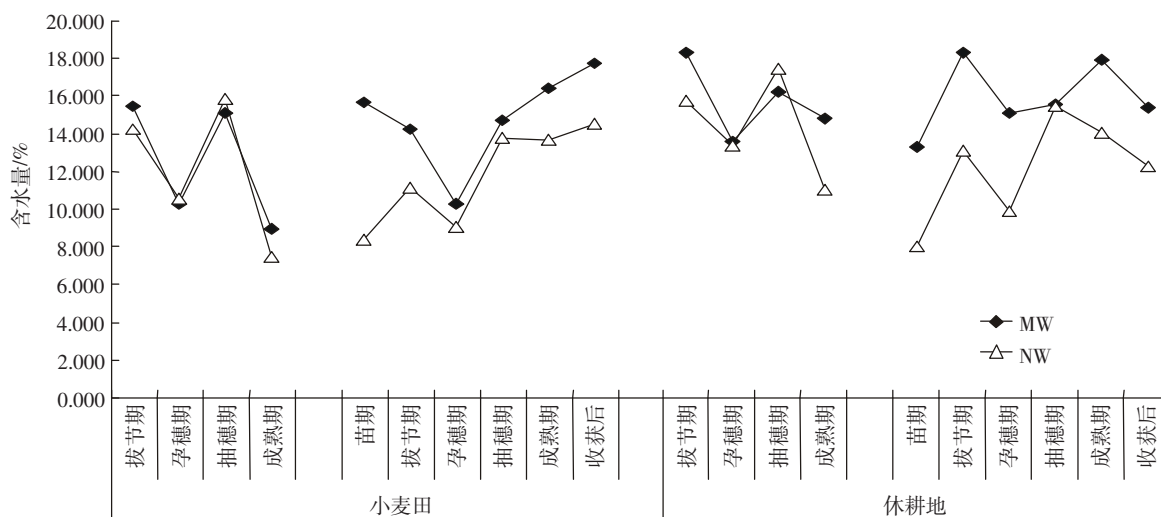


图 1 不同处理耕层土壤含水量变化

Figure 1 Soil moisture at the cultivated layer under different treatments

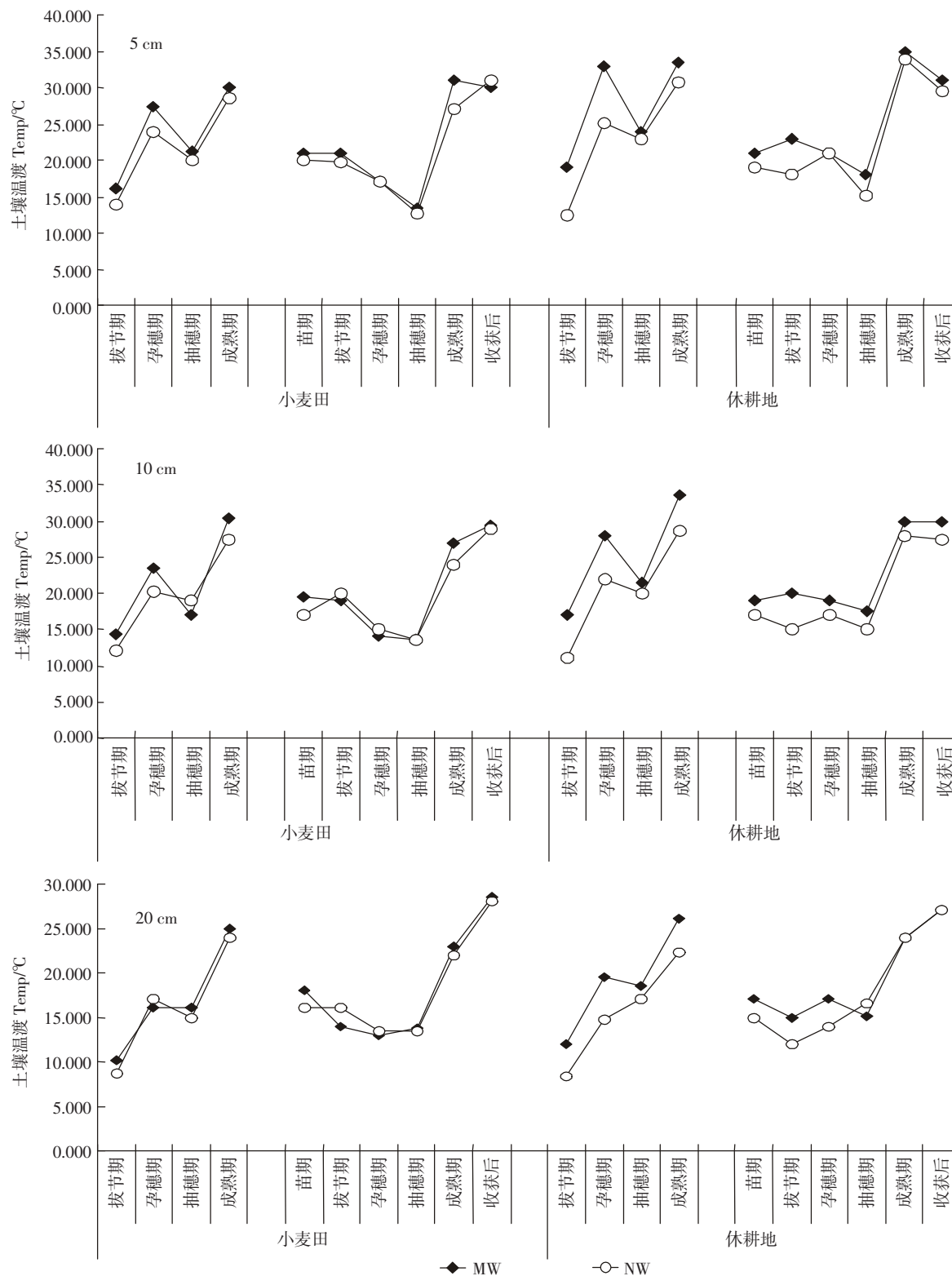
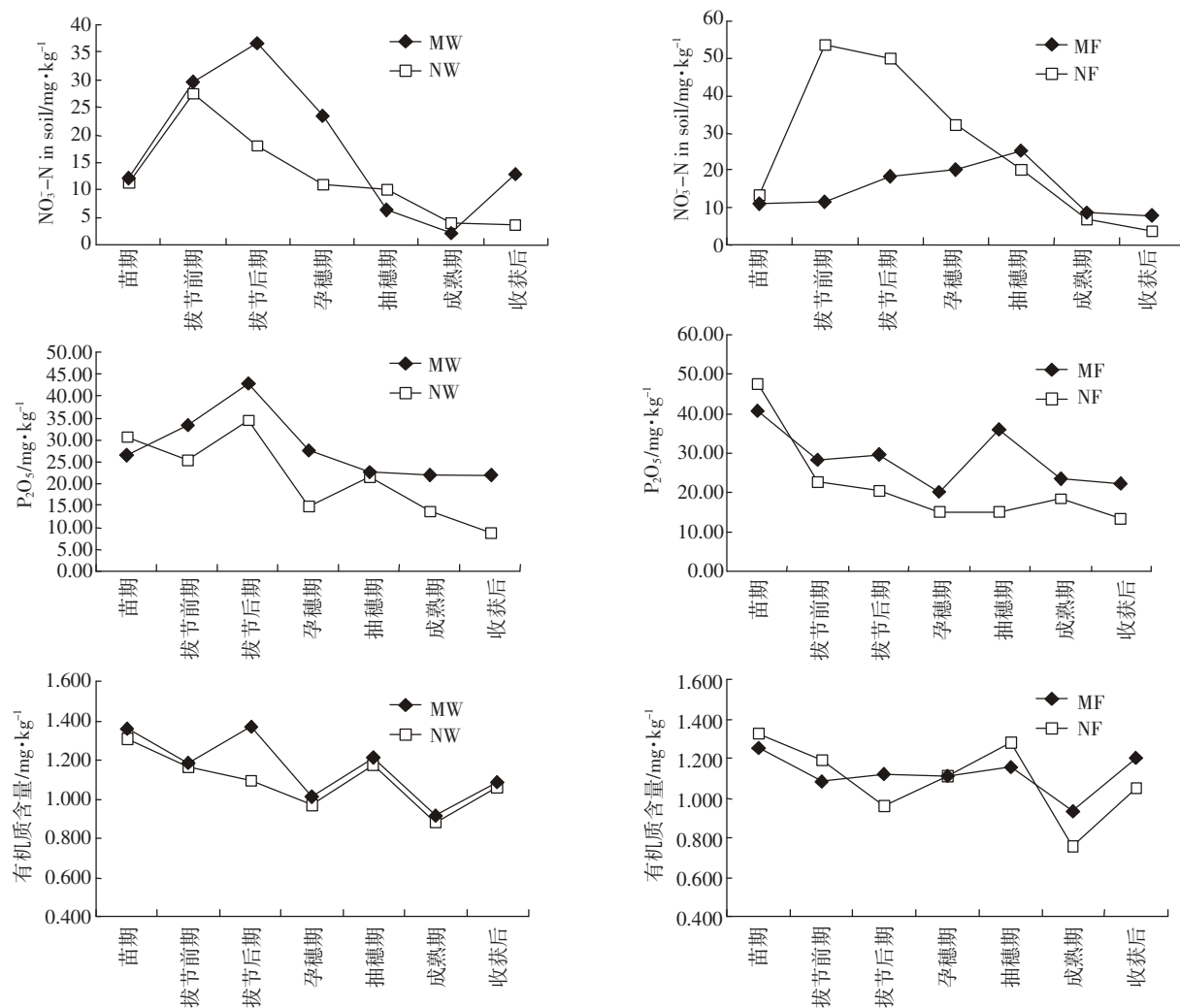
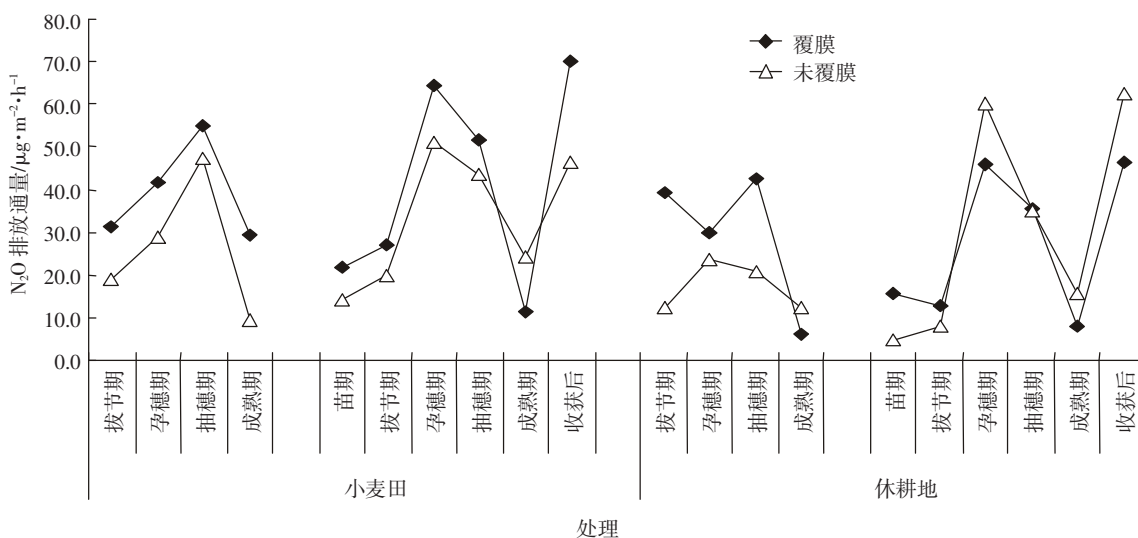


图 2 不同处理土壤 5、10、20 cm 深处的温度

Figure 2 Soil temperature at 5,10,20 cm depth under different treatments

地还是休耕地土壤中速效磷含量均提高,即地膜覆盖提高了土壤磷的有效性^[9]。地膜覆盖后并未导致土壤有机物质大量分解,反而略有提高,即高温、高湿有利

于上季作物根系、枯枝落叶的分解,从而增加了土壤中有机质的含量。另外,地膜覆盖会影响土壤微生物及酶活性^[10-11];并有利于促进根系早期生长,增加根

图3 第二小麦生长期不同处理土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 P_2O_5 、有机质含量变化Figure 3 Soil $\text{NO}_3\text{-N}$, P_2O_5 and organic matter content under different treatments in the second growth season图4 小麦田及休耕地在覆盖耕种和常规耕种时土壤 N_2O 排放通量Figure 4 Soil N_2O flux in wheat fields and fallow land with and without film mulching

长、根数和根重,增加根系活性和吸收能力及根系对氮素的吸收能力和根系合成能力^[12-13]。

2.2 地膜覆盖对土壤 N₂O 排放的影响

2.2.1 地膜覆盖对土壤 N₂O 排放通量的影响

图 4 为小麦田及休耕地,在覆盖耕种和常规耕种时土壤 N₂O 排放情况。从图 4 可知,无论小麦田还是休耕地,覆膜使大多数小麦生育期土壤 N₂O 排放通量高于常规处理,从观测值的平均值看,覆膜处理(MW)N₂O 排放通量比未覆膜处理(NW)增加了 33.04%,处理间差异显著($P=0.012\ 7$);覆膜处理(MF)N₂O 排放通量比未覆膜处理(NF)增加了 10.53%,但差异未达到显著水平($P=0.061\ 8$)。从观测值增量幅度看,小麦地覆膜后 N₂O 排放通量增加了-53.42%~211.03%;休耕地覆膜后 N₂O 排放通量增加了-48.10%~234.26%。即覆膜对小麦地土壤 N₂O 排放的增排效应高于休耕地。这种现象除与覆盖改变了土壤中局部氧的浓度,增加了厌氧环境或半好氧环境,使反硝化作用增强,从而引起了土壤 N₂O 排放增加有关外,与覆盖引起土壤温度、水分、养分有效性等因子的变化有密切的关系,而土壤 N₂O 排放与土壤温度、水分存在着显著的相关性^[14-20]。

2.2.2 覆膜的温室作用与土壤 N₂O 排放

表 2 为地膜覆盖后土壤湿度、温度、速效养分、有机质等土壤性状增量及土壤 N₂O 排放通量变化情况。为分析地膜覆盖农耕措施下土壤基本性质变化对土壤 N₂O 排放通量的影响,将土壤中 N₂O 排放通量增量与土壤水分、温度、NO₃⁻-N 含量、有机质量等的增量进行了回归分析。结果表明,地膜覆盖后土壤中 N₂O 排放通量增量与土壤水分(W)、土壤温度(T)、NO₃⁻-N 含量、有机质量(OM)等土壤基本性质的变化有较好的线性关系,将回归方程和偏回归系数进行显著性检验,去掉偏回归系数不显著影响因子后,得小麦田土壤中 N₂O 排放通量增量(ΔY_{N_2O-w})与影响因子增量间的数学模型为:

$$\Delta Y_{N_2O-w} = 34.04 + 2.68 \Delta W - 8.60 \Delta T_{5\text{ cm}} - 5.86 \Delta T_{20\text{ cm}} - 0.90 \Delta(\text{NO}_3\text{-N}) - 2.02 \Delta(\text{OM})$$

$$(R^2 = 0.938\ 5^{**}, P = 0.015\ 5) \quad (1)$$

休耕地土壤中 N₂O 排放通量增量(ΔY_{N_2O-f})与影响因子增量间的数学模型为:

$$\Delta Y_{N_2O-f} = 53.09 + 16.91 \Delta T_{5\text{ cm}} - 29.16 \Delta T_{10\text{ cm}} - 3.50 \Delta(\text{OM}) + 2.00 \Delta W \Delta T_{10\text{ cm}}$$

$$(R^2 = 0.855\ 5^{**}, P = 0.024\ 9) \quad (2)$$

表 2 覆膜后土壤理化性质和 N₂O 排放通量的增量

Table 2 Soil physical and chemical properties changes and N₂O flux increment after being filmed

项目		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
		ΔW	$\Delta T_{5\text{ cm}}$	$\Delta T_{10\text{ cm}}$	$\Delta T_{20\text{ cm}}$	$\Delta \text{NH}_4^+-\text{N}$	$\Delta \text{NO}_3^--\text{N}$	ΔOM	$\Delta X1 * \Delta X2$	$\Delta X1 * \Delta X3$	$\Delta \text{N}_2\text{O}$
小麦田	拔节期	1.22	2.10	2.20	1.40	0.195	-3.150	0.168	2.56	2.68	12.54
	孕穗期	-0.37	3.40	3.30	-1.00	0.340	-0.700	0.415	-1.26	-1.22	12.92
	抽穗期	-0.75	1.10	-2.00	1.00	-0.740	5.775	0.273	-0.82	1.50	7.86
	成熟期	1.57	1.50	3.10	1.00	-0.057	-0.800	-0.082	2.36	4.87	19.90
	苗 期	7.28	1.00	2.50	2.00	-0.717	0.870	12.312	7.28	18.20	7.86
	拔节期	3.1	1.20	-1.00	-2.00	0.156	10.270	11.656	3.72	-3.10	7.18
	孕穗期	1.16	0.00	-1.00	-0.50	-0.035	12.560	9.031	0.00	-1.16	13.20
	抽穗期	0.94	0.80	0.00	0.30	0.197	-3.570	10.967	0.75	0.00	8.30
	成熟期	2.77	4.00	3.00	1.00	0.096	-1.980	8.214	11.08	8.31	-12.97
	收获后	3.26	-1.00	0.50	0.50	-0.267	8.960	9.687	-3.26	1.63	23.55
休耕地	拔节期	2.49	6.60	6.00	3.70	-0.870	-5.200	0.125	16.43	14.94	26.78
	孕穗期	0.23	7.80	6.10	4.80	-0.305	-3.275	-1.037	1.79	1.40	6.45
	抽穗期	-1.19	0.90	1.50	1.60	-0.300	-1.270	-0.227	-1.07	-1.78	21.69
	成熟期	3.74	2.60	5.10	3.70	-0.197	-3.775	-1.535	9.72	19.07	-5.82
	苗 期	5.26	2.00	2.00	2.00	3.897	-2.230	11.731	10.52	10.52	11.01
	拔节期	5.21	5.00	5.00	3.00	-0.177	-36.940	10.215	26.05	26.05	4.49
	孕穗期	5.22	0.00	2.00	3.00	0.573	-12.030	8.558	0.00	10.44	-14.50
	抽穗期	0.12	2.80	2.50	-1.40	-0.667	5.100	10.476	0.34	0.30	0.40
	成熟期	3.86	1.00	2.00	0.00	0.250	1.740	8.042	3.86	7.72	-7.40
	收获后	3.08	1.50	2.50	0.00	-0.009	3.990	9.507	4.62	7.70	-16.24

方程(1)表明,在小麦生长期中,地膜覆盖引起小麦田耕层土壤 5 cm 深处土壤温度变化对土壤 N_2O 排放通量增加所起的作用最大($P=0.0025$),其次为有机质($P=0.0073$)、20 cm 深处土壤温度($P=0.0224$)、水分($P=0.0437$)、耕层土壤中 NO_3^--N 含量($P=0.0578$)的变化。其中,除水分增量对土壤 N_2O 排放通量具正效应外,其他因子皆为负效应。覆膜与不覆膜引起的 N_2O 排放通量的差值($\Delta Y_{\text{N}_2\text{O}}$)与影响因子温度、 NO_3^--N 、有机质的差值(ΔX)出现负相关,可能与本区土壤营养物质极其贫乏有关,覆膜后土壤水热大小及其在其空间分配上均发生了变化,导致 C、N 等营养物质有效性增加,温度、 NO_3^--N 、有机质增加量越多,则作物、微生物利用 N 素的能力就越强,即 N 素利用率就越高。利用率的提高导致土壤 N_2O 排放减少,即覆膜与不覆膜引起的增量($\Delta Y_{\text{N}_2\text{O}}$)也随之减少。

方程(2)表明,地膜覆盖引起休耕地 5 cm 深处土壤温度增量对土壤 N_2O 排放通量增加所起的作用最大($P=0.0051$),其次为 10 cm 深处土壤温度增量($P=0.0076$)、有机质增量($P=0.0084$)及耕作层土壤水分的增加与 10 cm 深处土壤温度增量的耦合作用($P=0.0199$),即地膜覆盖对休耕地土壤 N_2O 排放通量增量的影响,主要受控于地膜覆盖对土壤耕作层水热条件及微生物能量供给的影响。而地膜覆盖对小麦田土壤 N_2O 排放通量增量的影响作用除受控于地膜覆盖对土壤耕作层水热的影响外,还与地膜覆盖对土壤养分有效性的影响密切相关。

3 结论

试验表明无论是否耕种小麦,地膜覆盖均能明显提高耕层土壤含水量,且休耕地覆膜的保水作用较高于小麦田覆膜;供试土壤上存在丰水年保水作用明显,缺水年作用不明显现象。但无论是小麦田还是休耕地覆膜后,其增温效果缺水年较丰水年明显;小麦田覆膜后增温幅度比休耕地增温幅度小,但在孕穗期前和成熟期以后增温效果大,而小麦生长中期增温效果小,特别是能显著提高 0~5 cm 耕层土壤温度,甚至 10 cm 深土壤温度。地膜覆盖后小麦田耕层土壤中 NO_3^--N 平均含量增加了 $5.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且小麦生长旺盛期增加量明显,并影响着磷的有效性及土壤有机质含量,高温、高湿有利于上季作物根系、枯枝落叶的分解,从而增加了土壤中有机质的含量。

无论小麦田还是休耕地,覆膜使大多数小麦生育期土壤 N_2O 排放通量高于常规处理,分别平均增加了

33.04 %和 10.53 %,覆膜对小麦地土壤 N_2O 排放的增排效应高于休耕地。地膜覆盖后土壤中 N_2O 排放通量增量与土壤水分、温度、 NO_3^--N 含量、有机质量等土壤基本性质的变化存在较好的线性关系,所得数学模型表明,地膜覆盖后小麦田耕层 5 cm 深处土壤温度变化对土壤 N_2O 排放通量增加的作用最大,其次与土壤养分有效性增加密切相关;而对休耕地土壤 N_2O 排放通量增量的影响主要受控于水热条件及微生物能量供给的改善。

参考文献:

- [1] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖土壤能量平衡及其对土壤热状况的影响[J]. 中国农业气象, 1989, 10(2): 20-24.
WANG Shu-seng, DENG Gen-yun. Soil energy balance of plastic film mulching and its effects on soil thermal conditions[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1989, 10(2): 20-24.
- [2] 李世清, 李凤民, 宋秋华. 半干旱地区不同地膜覆盖时期对土壤氮素有效性的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1519-1526.
LI Shi-qing, LI Feng-min, SONG Qiu-hua. Effects of plastic film mulching periods on the soil nitrogen availability in semiarid areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1519-1526.
- [3] 李凤民, 王 俊, 王同朝. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J]. 中国农业科学, 2001, 33(2): 330-333.
LI Feng-min, WANG Jun, WANG Tong-chao. The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 33(2): 330-333.
- [4] 郭志利, 古世禄. 覆膜栽培方式对谷子(粟)产量及效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 33-39.
GUO Zhi-li, GU Shi-lu. Effect of film-mulching cultivation methods on yield and economic efficiency of millet[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2000, 18(2): 33-39.
- [5] Dutch J, Ineson P. Denitrification of an upland forest site[J]. *Forestry*, 1990, 63: 363-377.
- [6] 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
WANG Geng-chen, WEN Yu-pu. Measurement methods for greenhouse gases concentration and emission and related process[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [7] 王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放(吸收)测量方法简评[J]. 气候与环境研究, 1997, 2(3): 251-263.
WANG Geng-chen. A View on Measurement methods for greenhouse gases emission from terrestrial ecosystem[J]. *Climatic and Environment Research*, 1997, 2(3): 251-263.
- [8] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 21-29.
LI Shi-qing, LI Dong-fang, LI Feng-min, et al. Soil ecological effects of plastic film mulching in semiarid agro-ecological system[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31(5):

- 21-29.
- [9] 王 俊, 李凤民, 贾 宇, 等. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质的变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 439-444.
- WANG Jun, LI Feng-min, JIA Yu, et al. Dynamics of soil nitrogen, phosphorus and organic matter in alfalfa-crop rotated farmland in semiarid area of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 439-444.
- [10] 李阜棣. 土壤微生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 140-179.
- LI Fu-di. Soil microbiology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1996: 140-179.
- [11] 陈锡时, 郭树凡, 汪景宽, 等. 地膜覆盖栽培对土壤微生物种群和生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 435-439.
- CHEN Xi-shi, GUO Shu-fan, WANG Jing-kuan, et al. Effect of mulching cultivation with plastic film on soil microbial population and biological activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(4): 435-439.
- [12] 王 俊, 李凤民, 贾 宇, 等. 半干旱地区播前灌溉和地膜覆盖对春小麦产量形成的影响[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 77-82.
- WANG Jun, LI Feng-min, JIA Yu, et al. Effects of plastic film mulching and pre-sowing Irrigation on yield formation of spring wheat [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 77-82.
- [13] 李凤民, 徐进章, 孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1901-1909.
- LI Feng-min, XU Jin-zhang, SUN Guo-jun. Restoration of degraded ecosystems and development of water-harvesting ecological agriculture in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1901-1909.
- [14] 鲁春霞, 吕 耀, 谢高地, 等. 稻田温室气体排放的时空差异性与精准施肥[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 86-90.
- LU Chun-xia, LV Yao, XIE Gao-di, et al. Different characteristics of greenhouse gas emissions from rice paddy field and precision fertilization[J]. *Resources Science*, 2002, 24(6): 86-90.
- [15] 徐 华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499-515.
- XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effect of soil water regime and soil texture on N₂O emission from rice paddy field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 499-515.
- [16] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499-515.
- YAN Xiao-yuan, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. N₂O emissions from paddy soil as affected by water regime[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 499-515.
- [17] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of temperature on N₂O production and emission[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1997, 18(5): 1-5.
- [18] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 273-279.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impact of soil humidity on N₂O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3): 273-279.
- [19] 路 莉, 白红英, 雒新萍, 等. 黄绵土 N₂O 排放的水分效应及动力学特征[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 569-576.
- LU Li, BAI Hong-ying, LUO Xin-ping, et al. Moisture effects and the kinetics of N₂O flux from loessial soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3): 569-576.
- [20] 雒新萍, 白红英, 路 莉, 等. 黄绵土 N₂O 排放的温度效应及其动力学特征[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1226-1233.
- LUO Xin-ping, BAI Hong-ying, LU Li, et al. The effect of temperature and moisture on N₂O flux kinetics from loessial soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1226-1233.