

不同覆盖措施对黄土高原旱作 农田 N₂O 通量的影响

刘全全¹, 王 俊¹, 付 鑫¹, 刘文兆², Upendra M. Sainju³
(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. USDA – ARS Northern Plains Agricultural Research Laboratory Sidney MT 59270 USA)

摘 要: 为研究秸秆和地膜覆盖条件下旱作冬小麦田 N₂O 通量变化及水热状况, 在中国科学院长武农业生态试验站采用静态箱 – 气相色谱法测定了冬小麦种植期间无覆盖处理(CK)、地膜覆盖处理(PM)、全年覆盖秸秆处理 4 500 kg·hm⁻²(M₄₅₀₀)和全年覆盖秸秆 9 000 kg·hm⁻²处理(M₉₀₀₀)土壤 N₂O 排放通量, 并同步测定了土壤水分、土壤温度和气温。研究表明: CK、PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理生育期内 N₂O 通量范围分别为 17.24 ~ 321.86、19.03 ~ 388.00、21.57 ~ 344.53 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 24.77 ~ 348.42 μg·m⁻²·h⁻¹, 生育期内 N₂O 平均排放通量分别为 110.64、146.48、131.31 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 142.26 μg·m⁻²·h⁻¹, 与 CK 相比, PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理 N₂O 平均排放通量分别提高了 32.29%、18.68% 和 28.57%, 其中, PM 和 M₉₀₀₀ 处理与 CK 之间差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。PM 处理 N₂O 累积排放量 (7.25 kg·hm⁻²) 较 CK 处理 (5.18 kg·hm⁻²) 提高了 40% ($P < 0.05$), 秸秆覆盖处理 M₄₅₀₀ (6.30 kg·hm⁻²) 和 M₉₀₀₀ (7.17 kg·hm⁻²) N₂O 累积排放量较 CK 处理分别提高 23% 和 38% ($P < 0.05$), PM 和 M₉₀₀₀ 处理 N₂O 累积排放量显著高于 M₄₅₀₀, PM 和 M₉₀₀₀ 处理之间无显著差异。不同覆盖条件下生育期 N₂O 通量表现出明显的季节变化特征, 小麦生长季始末期较高中期较低, N₂O 排放受降水影响明显。生育期 N₂O 累积通量主要源于冬小麦拔节期至收获期, PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理拔节期至收获期 N₂O 排放量分别占整个生育期的 41%、40% 和 43%, 均高于 CK (38%) 处理。土壤温度变化可以解释 69% ~ 76% 土壤 N₂O 通量变化, 土壤水分仅解释了 37% ~ 51% 的土壤 N₂O 通量变化。回归分析表明无覆盖时, 土壤水分是影响土壤 N₂O 排放的关键因子, 秸秆覆盖和地膜覆盖条件下土壤温度是影响土壤 N₂O 排放的关键因子。覆盖秸秆 4 500 kg·hm⁻² 是黄土旱塬区较为适宜的冬小麦栽培模式。

关键词: 冬小麦; 旱作农田; 覆盖; N₂O 通量; 土壤温度; 土壤水分
中图分类号: S154.1; S512.1⁺1 **文献标志码:** A

Effects of different mulching measures on soil N₂O flux in rainfed winter wheat fields in the Loess Plateau of China

LIU Quan-quan¹, WANG Jun¹, FU Xin¹, LIU Wen-zhao², Upendra M. Sainju³
(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 3. USDA – ARS Northern Plains Agricultural Research Laboratory, Sidney, MT 59270, USA)

Abstract: Soil N₂O flux and its responses to soil moisture and soil temperature under different mulching measures during the period of winter wheat growth were investigated at Changwu Agro-Ecological Research Station in the Loess Plateau of Changwu County, Shaanxi Province, China. The soil N₂O flux rate, soil moisture and soil temperature were determined by the static chamber technique in the winter wheat field, with four mulching practices, including the control without mulching (CK), plastic film mulching (PM), two rates of 4 500 kg·hm⁻² and 9 000 kg·hm⁻² with straw mulching (M₄₅₀₀ and M₉₀₀₀) year-round. The results showed that the range of N₂O flux during growth period for CK, PM, M₄₅₀₀ and M₉₀₀₀ were 17.24 ~ 321.86, 19.03 ~ 388.00, 21.57 ~ 344.53 μg·m⁻²·h⁻¹ and 24.77 ~ 348.42 μg·m⁻²·

收稿日期: 2015-07-30
基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270484, 41171033); 西北大学研究生自主创新项目 (YZZ13006)
作者简介: 刘全全 (1988—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事农田温室气体排放研究。E-mail: lqqedu@163.com。
通信作者: 王 俊 (1974—), 男, 教授, 主要从事农业生态学研究。E-mail: wangj@nwu.edu.cn。

h^{-1} , respectively. The average N_2O flux rates were 110.64, 146.48, 131.31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ and 142.26 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ for the CK, PM, M_{4500} and M_{9000} treatments during the growth period, respectively. Compared to the CK treatment, the average N_2O flux rates were increased by 32.39% for PM, 18.68% for M_{4500} and 28.57% for M_{9000} . The cumulative N_2O emissions for PM (7.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), M_{4500} (6.30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and M_{9000} (7.17 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) treatments were increased by 40%, 23% and 38% compared to CK (5.18 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), respectively, and PM and M_{9000} treatments significantly ($P < 0.05$) increased the cumulative N_2O emissions compared to M_{4500} . No significant difference was found between PM and M_{9000} . The obvious seasonal variation characteristics in the N_2O flux were observed under all mulching measures, and the N_2O flux was relative higher at the beginning and the end of the winter wheat growth period than that in the middle of the growth period. The cumulative N_2O emission from jointing stage to harvest accounted for 41%, 40% and 43% of the total emission for PM, M_{4500} and M_{9000} treatments, which were higher than that in CK. Soil temperature itself could explain more than 69% ~ 76% ($R^2 > 0.43$) variations in soil N_2O flux, and soil water content only explained 37% ~ 51% variations in soil N_2O flux. The regression models including both soil temperature and soil moisture demonstrate that soil moisture is the dominant factor affecting soil N_2O flux under the control without mulching, and soil temperature was the dominant factor affecting soil N_2O flux under plastic film mulching and straw mulching. Straw mulching at a rate of 4 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ might be an appropriate way in the Loess Plateau.

Keywords: winter water; dryland farming; mulching; N_2O flux; soil temperature; soil moisture

秸秆覆盖和地膜覆盖作为农业生产活动中常见的耕作方式,不仅具有蓄水稳温保墒的作用^[1-2],亦可提高土壤营养物质可用性^[3],优化生育条件,延长生长期进而促进作物生长、提高作物产量和质量^[4],近年来应用广泛^[4-6]。另外,秸秆覆盖和地膜覆盖还能改变土壤环境,影响土壤生态过程,在全球变化背景下,其对农田土壤温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O)排放的影响备受关注。

氧化亚氮(N_2O)既是重要的温室气体,又是破坏平流层中臭氧的化学物质之一,对 N_2O 关注和研究正逐年增加^[7-8]。大气中 N_2O 的 80% 与农业相关^[9],65% 来源于土壤微生物的硝化和反硝化作用^[10]。土壤水分和温度是影响 N_2O 产生、传输、消耗和排放的主要因子^[11,12],而秸秆和地膜覆盖对土壤水分和温度的显著影响必将对土壤 N_2O 通量产生深刻的影响^[13]。研究表明地表覆盖后土壤 N_2O 的释放通量显著增加^[14-15],但也有学者^[4,16]发现塑料膜(聚乙烯)覆盖和免耕结合秸秆覆盖均显著降低了土壤 N_2O 通量。

黄土高原属典型的雨养农业区,降水少,有限水分利用效率不高是该区农业可持续发展的主要限制因素^[17],秸秆和地膜覆盖技术因其良好的保水稳温增产效应在该区应用广泛。为深入了解覆盖措施对土壤 N_2O 排放的影响和进一步优化田间管理,作者在黄土高原旱作冬小麦田进行了长期秸秆覆盖和地膜覆盖试验,并系统观测了不同覆盖条件下冬小麦地 N_2O 通量特征,旨在明确黄土高原冬小麦田 N_2O

通量季节变化规律,探讨秸秆和地膜覆盖对旱作农田土壤 N_2O 排放的调控机理。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院长武农业生态试验站(107°44.70'E,35°12.79'N)进行。试验站属温带半湿润大陆性季风气候,典型的雨养农业区,年平均气温 9.2℃,年平均降水量 581 mm,主要集中于夏季。该站海拔 1 220 m,坡度 0.07%,平均无霜期为 194 d,开放式蒸发皿蒸发量为 1 440 mm。供试土壤类型为黄盖黏黑垆土,田间持水量为 20.8% ~ 22.4%^[18-19],土壤肥力中等。

1.2 试验设计

覆盖种植试验开始于 2008 年 9 月,试验共设置 4 种处理:冬小麦种植期间无覆盖处理(CK)、全年覆盖秸秆 4 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理(M_{4500})、全年覆盖秸秆 9 000 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理(M_{9000})和地膜覆盖处理(PM),其中 M_{4500} 和 M_{9000} 处理在播种后将上年收获秸秆剪切至 5 ~ 10 cm 进行覆盖,持续至次年翻耕前清除。各处理重复 3 次,共 12 组,随机排列区组,小区面积 66.7 m^2 ,区/组间距分别为 0.5 m/1 m。四周保护带宽 1 m。

供试冬小麦品种为‘长武-134’,每年 9 月下旬播种,次年 6 月下旬收获。播种之前用圆盘耙机松土蓄墒,并施基肥尿素(含氮量大于 46.6%)135 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和过磷酸钙(颗粒)(总磷(P_2O_5) $\geq 46\%$,有效磷

(P₂O₅)≥43%)90 kg·hm⁻²。试验在旱地进行,作物生长完全依靠自然降水,无灌溉,人工除草。在试验期间,土壤表面以下地下水埋深 60 m,根区向上流动的水和排水造成的水损失忽略不计,无地下水补给。

1.3 气体采集及测定方法

采用静态箱-气相色谱法^[20-21]监测了 2013 年 10 月 1 日到 2014 年 6 月 30 日黄土高原冬小麦地 N₂O 排放通量,采样频率为每月一次(15 日),在冬小麦返青后加大采样频率大约 10 天一次,采样时间均在上午 9:00—11:00^[22-23]。静态箱由两部分组成:一个置于地下 8 cm 地上 4 cm 的固定基座和一个带有通风口和采样口的气室。静态箱由聚乙烯化合物(PVC)制成(直径 25 cm、高 12 cm),外层用反光锡纸包裹作为隔热层,底部设有一层软橡胶在采样时可以与基座密封。为避免测定土壤受到扰动,每年播种后在各小区内行间随机放置测定基座后整个生育期内不再移动,并齐地去除基座内动植物活体,首次采样在基座安装后 48 h,取样时将箱体罩在事先安置的基座上分别在密闭 0、20 min 和 40 min 后用注射器(30 mL)收集气体样品。气体样品使用装有 ECD 检测器的安捷伦(7890A)气相色谱仪分析,测定时 N₂O 的浓度与时间呈线性相关($R^2\geq 0.95$),色谱柱为 ParkQ15 m×0.53 mm×25 μm,高纯 N₂ 作载气,检测器温度 220℃,进样口温度 220℃,柱温 55℃,辅助气流量(N₂)20 ml·min⁻¹。采用 Hutchinson 和 Mosier(1981)提出的 HM 模型^[24]计算气体通量。N₂O 的累积排放量将不同时段 N₂O 排放量加起来,每两个相邻采样时间之间的 N₂O 排放量 X_n 用公式(1)计算:

$$X_n = \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \times (d_{n+1} - d_n) \tag{1}$$

式中, t_n 表示第 n 次采样时 N₂O 排放量, t_{n+1} 表示第 $n + 1$ 次采样时 N₂O 排放量, d_n 为第 n 次采样时间, d_{n+1} 为第 $n + 1$ 次采样时间。

1.4 土壤水分和温度测定

气样采集同时分别用便携式土壤水分速测仪(TDR100,美国 Spectrum 公司)测量基座边缘 0~10 cm 土壤体积含水量(% ,v/v),用数字温度传感器(TP3001,中国北京温岭仪器有限公司)测量基座边缘 0~5 cm 土壤温度(℃)和气温(℃)。气象数据来自于试验站自动气象站记录数据。

1.5 土壤理化性质测定

采用环刀法测定土壤容重。采用“S”形采样方法分别采集 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的土样,每层取 5 钻混匀,将风干土样分别过 0.25 mm 筛和 2 mm 筛后,采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳,凯氏定氮法测定土壤全氮,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷^[25]。

1.6 数据处理

采用 EXCEL 2010 对数据进行处理并制图。用 SPSS 20.0(SPSS INC., USA)对数据进行回归分析、Pearson 相关分析和方差分析,差异显著性水平($P < 0.05$)通过最小显著差数法(LSD)进行检验。

2 结果与分析

2.1 试验区降水状况和土壤基本性质

2013 年 7 月—2014 年 6 月降水总量为 645 mm,冬小麦生育期内降水 253 mm,与多年平均值相比生育期减少了 7.3%,而降水量多集中于几次强降水事件,如 4 月 21—26 日 63.2 mm 的连续降水和 6 月 19 日 20 mm 的降水。4 月份降水量(83 mm)是同期多年平均降水量(40.8 mm)的 2 倍,而 5 月降水量(29 mm)仅有多年平均降水量的 0.53%。

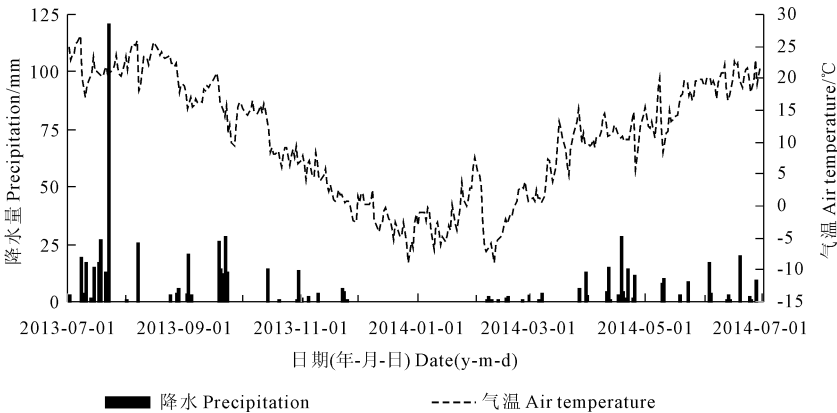


图 1 2013—2014 年长武农业生态试验站降雨和日平均气温

Fig.1 Daily mean air temperature and precipitation in Changwu Agri-ecological Station

连续 5 年的地膜和秸秆覆盖对土壤性质产生了显著的影响(表 1),不同覆盖条件下土壤有机碳、土壤全氮和容重差异显著。CK 处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤有机碳含量显著低于 M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理,高于 PM 处理。PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 表层土壤(0~10 cm)全氮显著高于 CK,10~20 cm 土壤全氮无显著差异。PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 表层土壤(0~10 cm)容重显著低于 CK。不同处理同一土层的土壤速效磷和 pH 差异则不显著。

2.2 冬小麦生育期 N₂O 排放通量变化

2013—2014 年 CK、PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理生育期内 N₂O 通量范围分别为 17.24~321.86、19.03~388.00、21.57~344.53 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 24.77~348.42 μg·m⁻²·h⁻¹,冬小麦生育期 N₂O 排放通量在

时间上的变化受施肥、翻耕和降水的影响显著,表现出明显的季节变化特征(图 2)。受施肥和翻耕的影响播种后出现了 N₂O 排放高峰,PM 处理的 N₂O 峰值高于 M₄₅₀₀、M₉₀₀₀ 和 CK 处理($P < 0.05$)。峰值后 N₂O 排放通量逐步降低,CK 处理的递减幅度大于 PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理。越冬期后 N₂O 的排放通量进入低谷,且处理间差异逐步减小。次年气温回升,冬小麦进入返青期,N₂O 的排放通量提高。受降水的影响,在 4 月 21—26 日的连续降雨和 6 月 19—20 日降雨后分别出现了 N₂O 排放峰值。CK、PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 生育期 N₂O 平均排放通量分别为 110.64、146.48、131.31 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 142.26 μg·m⁻²·h⁻¹,其中 CK 显著低于 PM、M₉₀₀₀ 和 M₄₅₀₀ 处理,PM 和 M₉₀₀₀ 处理显著高于 M₄₅₀₀ 处理,PM 和 M₉₀₀₀ 处理之间无显著差异。

表 1 土壤基础理化性质
Table 1 The main physiochemical characteristics of the soil at the study sites

处理 Treatment	土层 Soil layer /cm	土壤有机碳 Soil organic carbon /(g·kg ⁻¹)	土壤全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(g·kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	容重 Bulk density /(g·m ⁻³)
CK	0~10	11.34b	0.94b	14.77a	8.09b	1.35a
	10~20	10.58b	0.95b	10.81b	8.23a	1.37a
PM	0~10	11.13b	1.00a	13.83ab	8.13ab	1.28b
	10~20	10.22b	0.89b	11.14b	8.26a	1.37a
M ₄₅₀₀	0~10	12.69a	1.07a	14.68a	8.06b	1.23b
	10~20	11.02a	0.95b	12.85b	8.18a	1.32ab
M ₉₀₀₀	0~10	12.05a	1.01a	15.99a	8.05b	1.30b
	10~20	11.05a	0.96b	11.45b	8.19a	1.37a

注:CK:无覆盖对照;M₄₅₀₀:全年覆盖秸秆 4 500 kg·hm⁻²;M₉₀₀₀:全年覆盖秸秆 9 000 kg·hm⁻²;PM:地膜覆盖处理。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著,下同。

Note: CK: without mulching; M₄₅₀₀ and M₉₀₀₀: two rates of 4 500 kg·hm⁻² and 9 000 kg·hm⁻² with straw mulching; PM: plastic film mulching. Different small letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below.

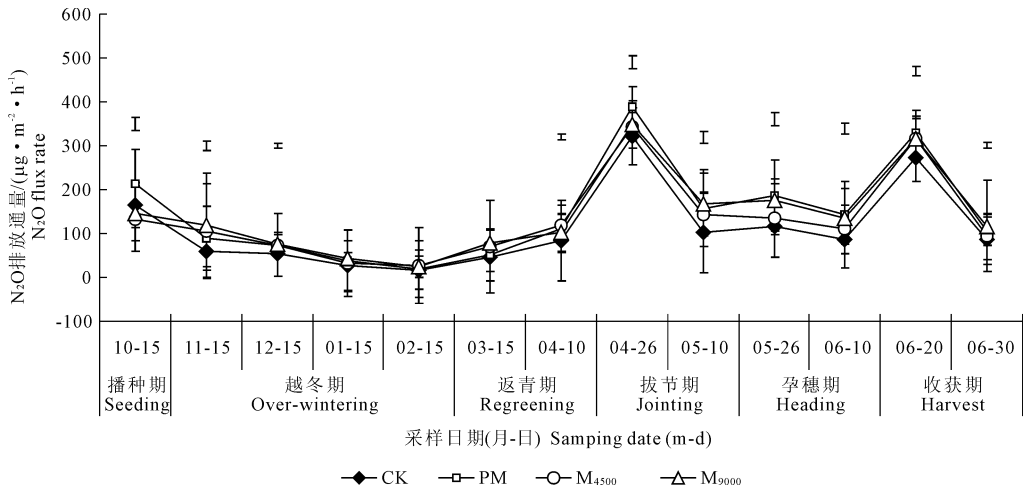


图 2 2013 年 9 月—2014 年 6 月不同覆盖处理麦田土壤 N₂O 通量变化
Fig.2 Dynamic of soil N₂O flux under different mulching treatments from Sep. 2013 to Jun. 2014

生育期内 N₂O 累积排放量依次为 PM(7.25 kg·hm⁻²) > M₉₀₀₀ (7.17 kg·hm⁻²) > M₄₅₀₀ (6.30 kg·hm⁻²) > CK(5.18 kg·hm⁻²)(图 3),地表覆盖均提高了作物生育期内 N₂O 累积排放量。与 CK 相比,PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 提高了 40%、23% 和 38% ($P < 0.05$) 的 N₂O 排放量,PM 和 M₉₀₀₀ 处理显著高于 M₄₅₀₀,PM 和 M₉₀₀₀ 处理之间无显著差异。受播种时翻耕、施肥和返青后气温回升和降水增多的影响,N₂O 排放量在播种后和小麦返青后出现了快速的释放。N₂O 排放量主要集中于冬小麦生育后期,PM、M₄₅₀₀ 和 M₉₀₀₀ 处理 N₂O 生育后期排放量分别占整个生育期的 41%、40% 和 43%,均高于 CK(38%) 处理。

2.3 冬小麦生育期土壤温度和水分变化

对照和覆盖处理土壤温度和土壤水分的季节变化规律明显(图 4)。整个生育期内,土壤温度均值表现为 CK(8.59℃) < M₄₅₀₀(8.82℃) < PM(9.03℃) < M₉₀₀₀(9.46℃),其中返青期前 M₄₅₀₀、M₉₀₀₀ 和 PM 处理平均土壤温度较 CK 分别提高了 0.35℃、0.61℃ 和 1.76℃,秸秆覆盖和地膜覆盖处理具有良好的保温作用,且返青期之前覆盖处理的增温效果优于返

青期后。M₄₅₀₀、M₉₀₀₀ 和 PM 生育期内平均土壤体积含水量分别为 26.5%、26.1% 和 27.0%,均高于 CK 处理(25.0%),处理间差异显著 ($P < 0.05$)。秸秆覆盖和地膜覆盖表现出良好的蓄水保墒作用,土壤含水量受降水影响在返青期后波动明显,降水后土壤水分含量升高结束后逐步降低,各处理土壤水分含量的峰值出现在 4 月 21—26 日连续降水期间(63.2 mm)。降水后处理间土壤水分差异减小。

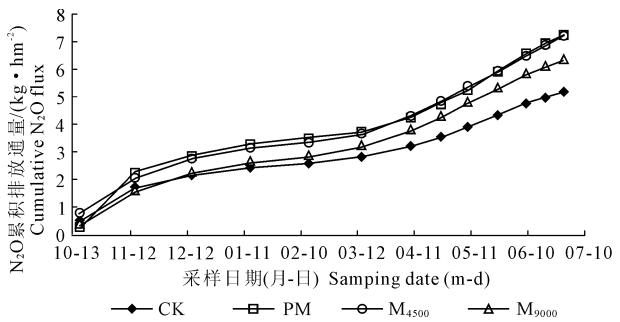


图 3 2013—2014 年冬小麦生长季累积 N₂O 排放量
Fig.3 The cumulative N₂O emission in cornfield
from Sep. 2013 to Jun. 2014

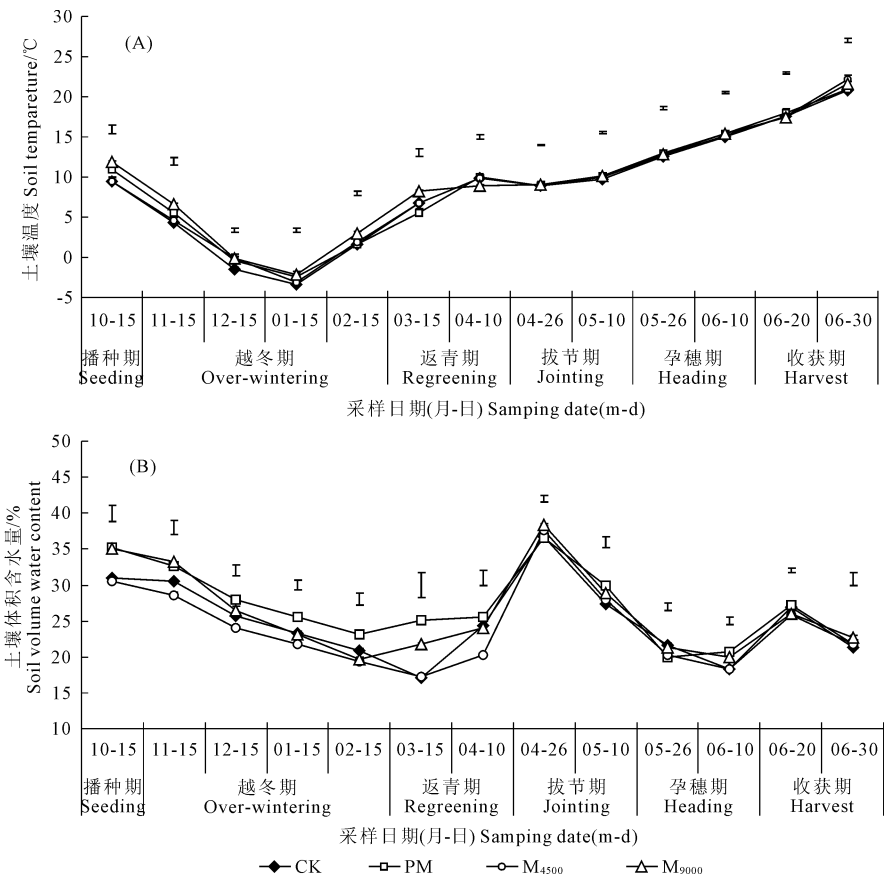


图 4 不同覆盖处理土壤温度(A)和土壤体积含水量(B)变化

Fig.4 Dynamic of soil temperature (A) and soil volume water content (B) under different mulching treatments

相关性分析结果表明(表 2),土壤 N₂O 通量与土壤温度之间呈显著正相关关系,土壤温度变化可以解释 69% ~ 76% 土壤 N₂O 通量变化。土壤水分仅解释了 37% ~ 51% 的土壤 N₂O 通量变化。除

M₉₀₀₀处理土壤 N₂O 通量和土壤水分之间没有显著的相关关系外,其余处理的土壤 N₂O 通量与水分之间均呈显著正相关关系。

表 2 不同覆盖处理 N₂O 通量(*Y*)与土壤水分(*SWC*)、土壤温度(*ST*)间的回归方程

Table 2 Regressin equations between soil N₂O fluxes (*Y*) and soil moisture (*SWC*), temperature (*ST*) under different mulching treatments

环境因子 Environment factor	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	<i>R</i> ²	<i>P</i>	样本数 Sample number
土壤含水量 Soil water content	CK	$Y = 6.99SWC + 33.98$	0.51	< 0.05	39
	PM	$Y = 6.79SWC + 50.50$	0.42	< 0.05	39
	M ₄₅₀₀	$Y = 7.27SWC + 38.83$	0.39	< 0.05	39
	M ₉₀₀₀	$Y = 5.84SWC + 51.44$	0.37	> 0.05	39
土壤温度 Soil temperature	CK	$Y = 13.06ST + 81.26$	0.69	< 0.05	39
	PM	$Y = 14.02ST + 95.00$	0.76	< 0.01	39
	M ₄₅₀₀	$Y = 14.34ST + 89.55$	0.69	< 0.01	39
	M ₉₀₀₀	$Y = 14.27ST + 87.06$	0.71	< 0.01	39

注:ST:土壤温度(℃);SWC:土壤含水量(% , v/v) . *P* < 0.05 表示方程显著; *P* < 0.01 表示方程极显著,下同。
Note: ST: Soil temperature (℃); SWC: Soil water content (% , v/v) . *P* < 0.05 indicates that the equation is significant; *P* < 0.01 indicates that the e-
quation is very significant, and hereinafter.

3 讨 论

3.1 长期地表覆盖对土壤性质的影响

秸秆和地膜覆盖可以削弱土壤与大气间的气体交换,从而有效地抑制土壤水分蒸发,具有显著的稳温保水效应^[1-2],与秸秆覆盖相比地膜覆盖保水效应更好。本试验表明秸秆覆盖和地膜覆盖在生育前期均表现出良好的增温和保水作用。5 年秸秆覆盖不同程度地提高了 0 ~ 20 cm 土层土壤有机碳和 0 ~ 10 cm 土层全氮含量,降低了 0 ~ 10 cm 土层土壤容重,而地膜覆盖降低了 0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳含量和 10 ~ 20 cm 土层全氮含量,这和以往的研究结果一致^[26-27]。与以往的研究结果不同的是,与对照相比地膜覆盖处理增加了 0 ~ 10 cm 土层全氮含量。秸秆覆盖对土壤的长期影响源于秸秆腐解增加了土壤腐殖质含量,利于土壤有机质的积累,增强土壤氮的转化能力,促进土壤氮含量的增加^[28]。此外,秸秆覆盖对土壤温度和水分的调节作用有利于形成土壤微生物和菌类适宜的土壤环境,增强其活性。卜玉山等^[29]研究发现秸秆和地膜覆盖都不同程度地增加了土壤三大种群微生物数量,覆盖对微生物的影响导致覆盖对土壤有机质和养分的影响增大。地膜覆盖对土壤水分和温度的改善,促进作物对土壤养分的吸收利用,从而使覆膜处理土壤的有机碳含量低于无覆盖处理^[30]。宋秋华等^[31]研究表明地膜覆盖加速了土壤有机质和氮的损耗。秸秆覆

盖降低了 0 ~ 10 cm 土层土壤容重,对土壤表层的物理性结构改善有明显作用,朱钟麟等^[32]研究也发现秸秆覆盖可使土壤总孔隙度增加 21.88% ~ 51.76%,且对土壤团粒结构形成具有较大促进作用。地表覆盖改变了土壤理化性质和水分温度,而这些变化必然会影响到土壤 N₂O 排放。

与地膜覆盖相比,长期的秸秆覆盖可以有效增加土壤有机碳和氮含量,改善土壤理化性质,且 M₄₅₀₀处理对有机碳和氮的提高要优于 M₉₀₀₀处理,因而从覆盖对土壤性质的影响角度来看适量的秸秆覆盖是该区较为适宜的覆盖管理措施。

3.2 地表覆盖对农田 N₂O 排放的影响

本文研究表明,冬小麦田地膜覆盖使土壤 N₂O 排放增加了 40%,这与 Nishimura 等^[14]和白红英等^[33]的研究结果一致,Berger 等^[4]则认为地膜覆盖抑制了 32% 的 N₂O 排放。关于地膜覆盖对土壤 N₂O 通量影响研究结果的差异源于土壤类型、气候条件和覆盖方式等的差异,Berger 的试验在沙土地进行,地膜覆盖的蓄水保墒作用在沙土地受限,且该试验年份降水少、土壤干旱,而 N₂O 主要是源于微生物在低氧的环境下的硝化作用和反硝化作用,土壤含水量小一定程度上抑制了消化和反硝化作用,减少了 N₂O 排放。相反,本试验中地膜覆盖显著地提高了土壤水分和温度(图 2),且水分和温度可以很好地解释土壤 N₂O 通量变化。可见地膜覆盖主要通过改变土壤温度和水分状况来影响 N₂O 排放^[34]。

N₂O 在地膜下水平方向上的渗透可能是造成研究结果的差异^[14]。

本试验中覆盖 4 500 kg·hm⁻²和 9 000 kg·hm⁻² 秸秆分别增加了 15%和 39%的 N₂O 排放量,且秸秆覆盖量越大增加的 N₂O 排放量越多。土壤 N₂O 的排放主要是源于土壤中硝化作用和反硝化作用,地表覆盖秸秆一方面可以增加硝化作用和反硝化作用的底物供给,进而提高土壤 N₂O 的排放量;另一方面,秸秆覆盖的保水蓄墒稳温作用,对旱作农田微生物群落及其活性有着积极的影响。分析认为秸秆覆盖增加了 N₂O 排放量是因为:(1) 从 2008 年起地表覆盖秸秆,秸秆腐解后进入土壤增加了土壤有机质的输入,使得有机物质进入土壤并得以累积,增加土壤中碳源,提高土壤矿质养分的生物有效性改变了土壤性质^[35],使本来受碳源限制的土壤硝化-反硝化细菌活性增强^[36]。我们之前的研究也表明生育期秸秆覆盖能够提高表层土壤有机碳、潜在矿化碳、微生物量碳的含量^[37],增加土壤硝化-反硝化作用的底物。(2) 秸秆覆盖的稳温保湿效应可以提高硝化作用和反硝化作用中微生物的活性^[38],进一步促进土壤的硝化-反硝化作用。多数研究表明秸秆覆盖通过影响土壤湿度和土壤养分状况来改变土壤

N₂O 排放速率^[39-40],相反,Liu 等^[13]和 Setiyono 等^[41]认为覆盖的增产效应会提高作物对 N 的吸收,减少土壤中矿质氮的含量,很有可能会限制 N₂O 排放。

秸秆和地膜覆盖均提高了土壤 N₂O 的排放量,然而与 PM 和 M₉₀₀₀相比,M₄₅₀₀处理增加的 N₂O 排放量最少,因而从农田温室气体减排的角度来看 M₄₅₀₀处理也是该区较为适宜的覆盖管理措施。降水和施肥后均观测到明显的 N₂O 排放,说明 N₂O 季节变化受到这些短期事件的显著影响^[42]。降水后土壤水分进入土壤,溶解土壤中可溶性物质,提高氮的矿化速率,进而促进土壤微生物活性并进一步促进氮的矿化速率^[43-44],增加土壤 N₂O 排放。另一方面,连续降水和暴雨后水分下渗形成的局部厌氧环境有利于反硝化作用。梁东丽等^[45]研究也表明降雨后土壤 N₂O 通量呈现上升趋势,且这种变化趋势与同时期降雨量的变化趋势相同。

3.3 冬小麦农田土壤 N₂O 排放的水热控制作用

为阐明不同覆盖条件下影响生育期土壤 N₂O 排放的关键因子,从土壤体积含水量(SWC)、土壤温度(ST)和气温(AT)等变量中挑选出和土壤 N₂O 排放(Y)相关性最大的变量,对数据作了逐步回归分析,结果如表 3。

表 3 不同覆盖条件下土壤 N₂O 通量的逐步回归模型
Table 3 Stepwise regression models of soil N₂O corresponding to different treatments

处理 Treatments	模型 Model	复决定系数 R ²	显著性 Significance
CK	$Y = 9.95 (\pm 3.21) SWC + 7.01 (\pm 1.86) AT - 90.56 (\pm 72.12)$ $t_0 = -1.254 t_{SWC} = 3.092 \quad t_{AT} = 3.775$	0.817	0.004
PM	$Y = 67.50 (\pm 3.28) ST + 71 (\pm 2.06) SWC - 47.37 (\pm 77.91)$ $t_0 = -0.608 t_{ST} = 2.287 \quad t_{SWC} = 3.256$	0.873	0.009
M ₄₅₀₀	$Y = 8.63 (\pm 3.37) ST + 0.626 (\pm 2.36) SWC - 123.47 (\pm 31.87)$ $t_0 = -0.326 t_{ST} = 2.559 \quad t_{SWC} = 3.475$	0.646	0.008
M ₉₀₀₀	$Y = 8.63 (\pm 3.15) ST + 6.57 (\pm 1.91) SWC - 51.86 (\pm 67.63)$ $t_0 = -0.767 t_{ST} = 2.736 \quad t_{SWC} = 2.736$	0.795	0.006

注:AT 为气温(℃),t 为各回归系数检验统计量。
Note: AT: Air temoerature (℃). t: the test statistics of regression coefficient.

在 CK 模型中,SWC 最先进入方程,变量 AT 次之,且两变量均和自变量显著相关,这说明土壤体积含水量和气温都与土壤 N₂O 排放呈显著正相关。土壤含水量先于气温进入模型,所以,在无覆盖处理的条件下,土壤水分的变化超过气温,土壤温度是影响土壤 N₂O 排放的首要因子。在 PM、M₄₅₀₀和 M₉₀₀₀模型中,ST 和 SWC 依次进入方程,表明土壤温度和水分与土壤 N₂O 排放显著相关,与 CK 模型不同的是,秸秆覆盖和地膜覆盖处理方程土壤温度先于土壤水分进入方程,土壤温度对 N₂O 通量影响最大。

方程模拟结果表明土壤温度和土壤水分相互交

叠共同影响着土壤 N₂O 排放。无覆盖时,土壤水分改变是影响土壤 N₂O 排放的关键因子,温度的影响居于次要位置。秸秆覆盖和地膜覆盖的蓄水保墒作用可以提高土壤水分含量(图 4),相对降低了土壤水分对土壤 N₂O 排放限制。此时,覆盖的保温作用使得土壤温度成为影响土壤 N₂O 排放的关键因子。

4 结 论

地膜和秸秆覆盖是黄土高原旱作农业区常用的保墒增产措施,不同地表覆盖条件下 N₂O 排放存在明显的季节变化特征,小麦生长季始末期较高中期

较低, N₂O 排放主要源于冬小麦拔节期至收获期, 受降水影响明显。地膜覆盖对土壤温度和水分的影 响是其增加土壤中 N₂O 排放通量的主要原因, 长期 秸秆覆盖主要是通过对土壤性质的影响及其稳温保 水作用显著增加 N₂O 排放。不同地表覆盖条件下 土壤温度和水分共同影响着土壤 N₂O 排放, 当无 覆盖时, 土壤水分变化是影响土壤 N₂O 排放的关 键因子, 当秸秆覆盖和地膜覆盖时土壤温度是影 响土壤 N₂O 排放的关键因子。综合覆盖对土壤性 质和 N₂O 排放的影响来看, 覆盖秸秆 4 500 kg·hm⁻² 是黄土旱塬区较为适宜的冬小麦栽培模式。地膜和 秸秆覆盖对 N₂O 排放机理复杂, 需要进一步研究 典型区域及不同耕作措施影响下农田土壤 N₂O 的排放。

参 考 文 献:

[1] Ma J, Li X L, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field [J]. Soil Research, 2007, 45(5):359-367.

[2] Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2):362-367.

[3] Li F M, Wang J, Xu J Z, et al. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(1): 9-20.

[4] Berger S, Kim Y, Ketterring J, et al. Plastic mulching in agriculture: Friend or foe of N₂O emissions? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 167:43-51.

[5] Ruidisch M, Bartsch S, Ketterring J, et al. The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 169:21-32.

[6] Tanveer S K. 黄土高原雨养区不同耕作方式、氮肥水平及秸秆覆盖对小麦生产力及温室气体(CO₂、N₂O)的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013:45-46.

[7] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century [J]. Science, 2009, 326:123-125.

[8] Wuebbles D J. Nitrous Oxide: No Laughing Matter[J]. Science, 2009, 326(5949):56-57.

[9] Bouwman A F. Environmental science: Nitrogen oxides and tropical agriculture[J]. Nature, 1998, 392(6679):866-867.

[10] Smith K A, Conen F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases[J]. Soil Use and Management, 2004, 20(2):255-263.

[11] 黄 耀, 蒋静艳. 农业土壤 N₂O 排放的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(1):51-54.

[12] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1):1-8.

[13] Liu J L, Zhu L, Lou S H, et al. Response of nitrous oxide emission

to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 188:20-28.

[14] Nishimura S, Komada M, Masako T, et al. Nitrous oxide evolved from soil covered with plastic mulch film in horticultural field[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(7):787-795.

[15] 朱咏莉, 吴金水, 韩建刚. 地膜覆盖对土壤中 N₂O 释放的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3):222-225.

[16] 汪 婧, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对温带半干旱地区土壤温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6):125-130.

[17] 高 飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 秸秆覆盖量对土壤水分利用及春玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(01):104-112.

[18] 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.

[19] Wang J, Liu W Z, Dang T H, et al. Nitrogen fertilization effect on soil water and wheat yield in the Chinese Loess Plateau[J]. Agronomy, Soils & Environmental Quality, 2013, 105(1):143-149.

[20] Wang J, Sainju U M, Barsotti J L. Residue placement and rate, crop species, and nitrogen fertilization effects on soil greenhouse gas emissions[J]. Journal of Environmental Protection, 2012, 3(9):1238-1250.

[21] Liebig M A, Tanaka D L, Gross J R. Gross. Fallow effects on soil carbon and greenhouse gas flux in central north dakota[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(2):358-365.

[22] 张 贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3):653-659.

[23] 胡 腾, 同延安, 高鹏程, 等. 黄土高原南部旱地冬小麦生长期 N₂O 排放特征与基于优化施氮的减排方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9):1038-1046.

[24] Hutchinson G L, Mosier A R. Improved soil cover method for filed measurement of nitrous oxide flues[J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45: 311-316.

[25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-35, 76-78.

[26] 张志国, 徐 琪. 长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(3):384-391.

[27] 蔡祖聪, 李世朋, 杨 浩, 等. 长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2489-2498.

[28] 李 涵. 秸秆覆盖还田对渭北旱塬土壤理化性质及春玉米生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.

[29] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5):1069-1075.

[30] 白丽婷. 渭北旱塬不同类型地膜覆盖对土壤环境和冬小麦生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010:33-34.

[31] 宋秋华. 半干旱黄土高原区地膜覆盖春小麦土壤微生物特征与养分转化[D]. 兰州:兰州大学, 2006:91-96.

[32] 朱钟麟, 吴 婕, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 西南农业学报, 2006, 19(2):192-194.

4 结 论

- 1) 铅胁迫(外源铅浓度为 2 000 mg·kg⁻¹)对国槐和紫穗槐抗氧酶活性有激活作用,国槐和紫穗槐都具有一定的耐铅性。
- 2) 铅胁迫下(外源铅浓度为 2 000 mg·kg⁻¹),轻度的干旱胁迫(SRW 87.84%和 SRW 70%)能够提高国槐和紫穗槐的抗氧化能力;但重度的干旱胁迫(SRW 52.16%和 SRW 40%)对国槐幼苗造成了一定程度的伤害,而紫穗槐幼苗的抗氧化酶活性依旧处在较高水平。
- 3) 铅胁迫下紫穗槐对干旱的抗性强于国槐。

参 考 文 献:

[1] 陈红琳,张世熔,李 婷,等.汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究[J].农业环境科学学报,2007,26(2):505-509.

[2] 吴 强,孙录科.矿区土壤重金属污染的植物修复研究进展[J].有色金属,2008,60(1):125-129.

[3] 魏朝丹,周兰英,李端平.利用观赏植物白雪姬修复铅污染的潜力研究[J].环境科学学报,2011,31(10):2290-2297.

[4] 束文圣,叶志鸿,张志权,等.华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J].生态学报,2003,23(8):1629-1639.

[5] 高红真,郭伟珍,毕 君.20 种植物对铅的耐性和富集能力研究[J].中国农学通报,2014,30(19):19-24.

[6] 张好岩,何丽萍,吕 果,等.土壤铅污染对小白菜幼苗保护酶系统的影响[J].中南林业科技大学学报,2010,30(9):173-176.

[7] 刘秀梅,牛俊华,王庆仁,等.6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J].植物生态学报,2002,26(5):533-537.

[8] 伍 欢,王进鑫,张 青,等.水分和铅双重胁迫对紫穗槐苗木叶片抗氧化酶活性的影响[J].水土保持通报,2014,34(1):65-69.

[9] 刘玉英,王三根,徐 泽,等.不同茶树品种干旱胁迫下抗氧化能力的比较研究[J].中国农学通报,2006,22(4):264-268.

[10] Elster E F. Oxygen activation and oxygen toxicity[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1992,43:73-96.

[11] 王玉刚,阿不来提,齐 曼.两狗牙根品种对干旱胁迫反应的差异[J].草业学报,2006,15(4):58-64.

[12] 王 夔.生命科学中的微量元素(上卷)[M].北京:中国计量出版社,1991:140-141.

[13] 王荣华,石 雷,汤庚国,等.渗透胁迫对蒙古冰草幼苗保护酶系统的影响[J].植物学通报,2003,20(3):330-335.

[14] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, et al. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum Demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to accumulation[J]. Chemosphere, 2006,65(6):1027-1039.

[15] 周芙蓉,王进鑫,杨 楠,等.干旱和铅交互作用对侧柏幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J].林业科学,2013,49(6):172-177.

[16] 王 艳,王进鑫,马惠芳,等.干旱和铅胁迫对刺槐和紫穗槐抗氧化酶活性的影响[J].西北林学院学报,2011,26(6):24-29.

[17] 张 青,王进鑫,邹 朋,等.水分和铅交互胁迫对国槐幼苗生理生化特性的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):476-483.

[18] Hisao T C. Plant responses to water stress[J]. Ann Rew Plant Physiology, 1973,24:519-570.

[19] 余新晓,张建军,朱金兆.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].林业科学,1996,32(4):289-296.

[20] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].西安:世界图书出版社,2000:137-202.

[21] 邹 琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.

[22] 魏 炜,赵欣平,吕 辉,等.三种抗氧化酶在小麦抗干旱逆境中的作用初探[J].四川大学学报(自然科学版),2003,40(6):1172-1175.

[23] 李 璇,岳 红,王 升,等.影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J].中国中药杂志,2013,38(7):973-978.

(上接第 122 页)

[33] 白红英,韩建刚,张一平.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,2003,22(4):394-396.

[34] 韩建刚,白红英,曲 东.地膜覆盖对土壤中 N₂O 排放通量的影响[J].中国环境科学,2002,22(2):286-288.

[35] 张仁陟,王新建,毕冬梅,等.保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):115-121.

[36] Cui F, Yan G X, Zhou Z X, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,48(0):10-19.

[37] 梁贻仓,王 俊,刘全全,等.地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):167-161.

[38] Erdeng M, Zhang G B, Ma J, et al. Effects of rice straw returning methods on N₂O emission during wheat-growing season[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010,88(3):463-469.

[39] Narendra K L, Rattan L. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till sys-

tem[J]. Soil and Tillage Research, 2013,126(0):78-89.

[40] Liang W, Shi Y, Zhang H, et al. Greenhouse gas emissions from northeast China rice fields in fallow season[J]. Pedosphere, 2007,17(5):630-638.

[41] Setiyono T D, Walters D T, Cassman K G, et al. Estimating maize nutrient uptake requirements[J]. Field Crops Research, 2010,118(2):158-168.

[42] 庞军柱,王效科,牟玉静,等.黄土高原冬小麦地 N₂O 排放[J].生态学报,2011,31(7):1896-1903.

[43] McIntyre R E, Adams M A, Ford D J, et al. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009,41:92-101.

[44] 胡 腾,同延安,高鹏程,等.黄土高原南部旱地冬小麦生长期 N₂O 排放特征与基于优化施氮的减排方法研究[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1038-1046.

[45] 梁东丽,同延安,Ove E D,等.灌溉和降水对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(3):298-302.