

黄土丘陵区不同土地利用类型土壤 CO_2 , N_2O 通量特征

孙文浩¹, 杨世伟³, 高晓东^{2,3}, 李陆生¹, 凌强¹, 李虹辰¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以黄土丘陵区园则沟小流域农地、撂荒草地、红枣林 3 种土地利用类型为单元,采用静态箱—气象色谱法对生长季土壤 CO_2 , N_2O 两种温室气体进行定位监测,研究退耕还林(草)工程实施后不同土地利用类型土壤 CO_2 , N_2O 排放通量特征。结果表明:生长季农地、撂荒草地、红枣林土壤 CO_2 排放通量均值分别为 300.39, 273.31, 173.80 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 季节变化均呈单峰型;农地、撂荒草地、红枣林 N_2O 通量均值分别为 7.08, 9.26, 0.52 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 土地利用类型未明显改变 N_2O 通量的季节特征,各处理均于 6—7 月出现较大值,其他时期均较低或出现负排放并呈现较为复杂的源汇特征。土壤 10 cm 温度与土壤 CO_2 , N_2O 相关关系高于土壤水分,而 3 种土地利用类型下 N_2O 通量与土壤水分均不相关,二元线性回归结果显示水热双因子解释了 54%~78% 的土壤 CO_2 通量变异。综合分析表明黄土丘陵区退耕还草后土壤 CO_2 未有显著变化,土壤 N_2O 则随土壤基质条件的改善呈现上升趋势($p < 0.01$);坡耕地改为经济林后土壤 CO_2 , N_2O 通量均有一定程度减少(42.1%~92.7%),且更容易出现 N_2O 的负排放。

关键词:土壤; CO_2 ; N_2O ; 温室气体; 退耕还林(草); 土地利用变化

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0068-07

Characteristics of CO_2 and N_2O Emissions Under Different Land-use Types in Loess Hilly Region of China

SUN Wenhao¹, YANG Shiwei³, GAO Xiaodong^{2,3}, LI Lusheng¹, LING Qiang¹, LI Hongchen¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of

China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Investigation of the effects of land-use change on soil CO_2 and N_2O fluxes under the conversion of cropland to forest and grassland in loess hilly region would be helpful to understand the context of global warming. Using static chambers method, soil CO_2 and N_2O fluxes were investigated during the growing season under three land-use types (cropland, jujube orchard and abandoned grassland) in the study area in 2014. Additionally, soil temperature and moisture at 10 cm depth were monitored using mercurial thermometer and portable time domain reflectometry respectively to explore the correlations between environmental factors and soil gas emissions. During the growing season, the emission rates of CO_2 in cropland, jujube orchard and abandoned grassland were 110.66~531.79 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 74.01~437.27 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and 52.56~267.20 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively, which peaked in summer and were correlated with soil temperature in all land-use types. Soil N_2O under different land-use types followed similar seasonal patterns which were related to vegetative growth, the higher emission rate occurred in June and July compared with other growing period when negative fluxes frequently occurred, and the values varying -3.82~19.78 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, -4.21~28.10 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, -8.77~16.76 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in cropland, jujube orchard and abandoned grassland, respectively. Linear correlation analysis showed that, for both land-use types, relationship between soil CO_2 (N_2O) fluxes and soil temperature at 10 cm depth was better than the relationship between soil CO_2 (N_2O) fluxes and soil moisture, while no relationship was found between soil N_2O flux and soil moisture due to the complicated

收稿日期: 2016-01-21

修回日期: 2016-03-02

资助项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL02-25); 中央高校基础科研业务费(2452015056)

第一作者: 孙文浩(1990—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土工程。E-mail: sunwenhao-1@163.com

通信作者: 杨世伟(1974—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业水土资源利用研究。E-mail: yshw007@163.com

mechanism of nitrification and denitrification processes. Moreover, binary linear regression analysis on the relationship of soil temperature and soil moisture could explain 54%~78% of soil CO₂ seasonal variations. Our research results showed that soil N₂O increased ($p<0.01$) with the better substantial condition after converting cropland into grassland, however, no statistics difference was observed in the case of CO₂ emissions, which were probably caused by the low temperature in grassland. The conversion of cropland to orchard led to the lower soil CO₂ and N₂O emission rates (42.1%~92.7%) due to intensive field management which may also contribute to more negative flux of N₂O in economic forest.

Keywords: soil; CO₂; N₂O; greenhouse-gas; grain for green project; land-use change

气候变暖是当今世界面临的重大全球性问题,大气中温室气体浓度的持续增长是其主要原因^[1-3]。大气中 CO₂ 浓度水平自工业革命以来已经增长了超过 40%;大气中 N₂O 浓度虽然仅为 CO₂ 的 1%,但因综合增温潜势高于 CO₂ 297 倍^[1],其温室效应也十分显著。土壤作为陆地生态系统中最主要的碳库和氮库,是决定大气中温室气体浓度变化的重要源汇,因此轻微的扰动也会引起两种温室气体排量巨大的不确定性^[4-5]。IPCC 报告指出,土地利用变化是导致大气中温室气体浓度变化的主要因素之一^[1],土地利用变化会对土壤温室气体排放特征产生巨大影响^[5-6],从而影响温室气体排放量估算的准确性,影响全球气候变化预测和减排政策的制定。

国家实施退耕还林(草)工程以来黄土丘陵区土地利用方式发生了巨大变化,大量低产低效坡耕地转化为撂荒草地、经济林、生态林^[7]。特别是红枣作为一种优良的经济树种在黄土丘陵区大面积推广种植,2010 年陕西榆林地区种植面积已达 6.67 万 hm²,成为当地农民脱贫致富的主导产业之一^[8]。土地利用方式差异显著影响了该地区水热状况^[7,9-10],进而改变 CO₂ 和 N₂O 等温室气体的排放特征^[5,9]。李红生等^[10]以黄土高原侧柏、柠条、沙棘和油松人工植物群落为对象,发现不同植被类型间土壤 CO₂ 通量、水热因子及其之间的关系均存在显著差异,并且具有明显的季节变化。高亚琴等^[11]以农田为对照,对陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤 CO₂、N₂O 通量进行研究,发现退耕后两种温室气体排放通量随土壤碳、氮含量的增加而呈现不同程度的升高趋势。齐丽彬等^[12]对黄土高原水蚀风蚀交错区 5 种土地利用类型进行研究,发现生长季前期不同土地类型间土壤 CO₂ 通量出现了与植物生长相关的显著差异,退耕后草地和沙棘地土壤 CO₂ 通量的升高和降低分别与植被因素和土壤基质条件有关。周小刚等^[9]在黄土高原沟壑区相邻农田和草地开展试验,发现水热因素变化是两生态系统土壤 CO₂ 排放通量间出现显著差异的主要原因。但是,以上研究主要针对农地和退耕灌草地或生态林,而针对农地和退耕经济林土壤温室

气体排放特征的研究鲜有报道,特别是将农地、退耕草地和退耕经济林对比分析的研究较为缺乏;而且,对 CO₂ 和 N₂O 同时考虑的研究相对不足。

因此,本研究选择黄土丘陵区典型小流域农地、撂荒草地、红枣林三种典型土地利用类型,对其生长季土壤 CO₂、N₂O 排放通量及土壤水热因子进行连续监测,研究不同土地类型下两种主要温室气体排放通量动态特征及其与水热因子之间的关系,以期为该区域土壤温室气体排放估算和退耕还林(草)工程环境效应评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然环境概况

研究区位于榆林市清涧县园则沟小流域(37°15'N, 118°18'E),地处黄土高原中部偏北,该区属温带大陆性季风气候,年均温度 8.6℃,月均温度极值分别出现在 1 月和 7 月,分别为 -6.5℃ 和 22.8℃;年平均降水量 505 mm,但年内分布不均,70%集中在 7—9 月份。小流域面积 0.58 km²,流域内海拔 876~1 082 m,相对高差超过 200 m,为典型黄土丘陵沟壑地形。流域内土壤类型主要为黄绵土,属于砂壤土或粉壤土,具有较强的入渗能力,田间持水量和凋萎湿度分别为 25%和 7%(体积含水量);土壤肥力较差,土壤有机碳和全量养分含量较低,0—20 cm 土壤基本物理性质以及养分含量见表 1。坡耕地曾为小流域内主要的土地利用类型,目前除小部分农地被保留外,流域内多数坡耕地已改为旱作红枣林和撂荒草地,目前撂荒草地休耕年限为 6~20 a,主要植物有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和狗尾草(*Setaria viridis* Beauv)等,地表具有明显生物结皮;红枣林种植年限 6~15 a,种植密度为 1 650 株/hm²,每年年初施少量农家肥及尿素 0.2~0.3 kg/株,定期人工除草;农地耕种年限在 30 a 以上,耕作制度一年一熟,主要作物包括谷子(*Setaria Italica*)、玉米(*Zea mays*)、绿豆(*Vigna radiata*)和马铃薯(*Solanum tuberosum*)等,化肥施用量较小或不施肥。

表 1 不同土地利用类型土壤基本物理性质与养分含量

土地类型	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 孔隙度/%	饱和导水率/ (cm·d ⁻¹)	有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)
农地	1.17±0.15b	58.9±5.6a	74.2±20.6a	3.34±0.24b	0.29±1.9a
撂荒草地	1.26±0.11b	55.1±4.2ab	55.6±10.4b	5.12±0.79a	0.30±3.4a
红枣林	1.31±0.12a	51.7±4.5b	36.55±9.55c	3.64±0.85b	0.31±6.0a

注:a,b,c 表示显著性差异组别($p<0.01$)。

1.2 研究方法

选择流域内典型坡耕地、9 龄旱作红枣林、休耕 10 a 撂荒草地为研究单元, 布设温室气体采样点, 每种土地利用类型 3 次重复。采样点均选在坡面中部、立地条件相对一致的位置并沿坡向排列, 两采样点间相距 6 m, 其中坡耕地采样点布设于作物行间, 红枣林采样点设于相邻两树连线中点处。气体通量测量采用静态箱—气相色谱法, 具体采样器材及方法参考美国农业部农业研究组织(USDA-ARS)GRACEnet 项目协议文件^[13], 以确保采样结果的精确度及可比性。静态箱基座于 2013 年 8 月插入地下 5 cm 并尽量避免对表层土壤的扰动, 在整个试验期间不进行移动。2014 年 3—10 月间每月至少进行一次气体采样, 选择晴朗无风天作为采样日, 于上午 9:00—11:00 内完成采样, 已有研究^[14]显示此时段内的气体通量观测值可近似代表日均值。静态箱采用不透明聚乙烯材料制作(直径 30 cm×高 10 cm), 采样时罩于基座上并用弹性橡胶带密封接缝。罩箱后于 0, 10, 20, 30 min 在箱顶取样口用真空玻璃瓶采集箱内气体样品 10 ml, 采样同时用温度计记录箱内气温, 用地温计和便携式时域反射仪(TDR)测量采样点附近 10 cm 土层温度、水分。气体样品于 2 日内送实验室并用 Aglient-7890 高效气相色谱仪检测 CO₂, N₂O 浓度。气体排放通量用以下公式计算:

$$F=\rho\cdot h\cdot dC/dt\times 273/(T+273)$$
 (1)

式中: F 为 CO₂ 排放通量[mg/(m²·h)]和 N₂O 排放通量[μg/(m²·h)]; ρ 为标况下目标气体的密度(kg/m³); h 为采样箱内气室高度(m); dC/dt 为采样箱内目标气体浓度变化率; T 为采样时箱内温度(℃)。

1.3 数据处理

试验数据处理由 SPSS 16.0 和 Origin 8.1 完成。生长季平均土壤 CO₂, N₂O 通量采用线性内插法计算^[15], 不同土地利用类型气体排放通量月均值和生长季均值采用 t 检验比较, CO₂, N₂O 通量与土壤温度、水分之间的关系采用一元线性回归方法分析, 采用二元线性回归方法分析水热因子对气体通量的协同影响。CO₂ 通量温度敏感性指标(Q_{10})代表温度每增加 10℃土壤 CO₂ 通量增加的倍数, 计算公式为^[9]:

$$F=ae^{bT}$$
$$Q_{10}=e^{10b}$$
 (2)

式中: F 为 CO₂ 通量[mg/(m²·h)]; T 为温度(℃); a, b 是待定参数。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型下土壤温度、水分动态特征

生长季各土地类型土壤 10 cm 温度季节变化规律基本一致(图 1A), 观测期最高温和最低温分别出现在夏季和生长季末期, 农地、撂荒草地、红枣林温度变化范围分别为 5.1~27.7℃, 6.5~26.1℃, 6.99~30.4℃。由于不同土地利用类型地表植被盖度存在一定差异, 平均温度红枣林>农地>草地, 夏季(6—8 月)各处理土壤温度出现显著性差异($p<0.01$), 其中红枣林由于定期人工除草使地表几乎完全裸露, 在 6 月出现了生长季各处理最高温(30.4℃)。除此之外, 生长季内较低的植被盖度导致农地、红枣林土壤温度变化幅度较大(39.7%和 38.4%), 高于撂荒草地(35.7%)。各土地利用类型土壤表层水分变化较为剧烈, 受降雨和地表蒸散影响上下波动(图 1B)。农地、撂荒草地、红枣林表层 10 cm 含水率(体积含水率, 下同)变化范围分别为 10.5%~19.8%, 9.7%~18.8%, 7.0%~16.6%, 其中 6 月初由于前期降雨较少, 各处理土壤水分均达到最低值, 7 月初极端降雨事件(7 月 9 日, 降水量 73.8 mm)之后以及秋季连续降水期间, 土壤水分均处于较高水平。平均土壤含水率表现为撂荒草地>农地>红枣林, 其中红枣林地表裸露土壤蒸发强烈, 土壤水分均值显著($p<0.05$)低于另两处理, 季节变幅最大(28.3%)。以上研究表明, 土地利用类型明显改变了研究区表层土壤水热状况。

2.2 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 通量特征

各处理土壤 CO₂ 排放通量季节变化均呈单峰型, 变化趋势与土壤温度曲线基本一致(图 2)。农地、撂荒草地、红枣林土壤 CO₂ 通量变化范围分别为 110.66~531.79, 74.01~437.27, 52.56~267.20 mg/(m²·h)。生长季初期和末期由于土壤温度较低, 土壤微生物呼吸和植物根系呼吸较弱, 各处理 CO₂ 通量均处于较低水平。生长季前期随着土壤温

度的升高及植物的生长,各处理土壤 CO₂ 通量均呈上升趋势。7 月份,73.8 mm 次降雨之后,由于土壤湿度增大和适宜的土壤温度增强了土壤呼吸速率,各处理 CO₂ 通量均达到最大值。生长季末期各处理土壤 CO₂ 通量随着土壤温度下降持续降低,最终基本达到生长季初期水平。三处理土壤 CO₂ 通量变异幅度较为接近,农地、撂荒草地、红枣林研究期间时间变异系数分别为 51.7%,49.0%,50.3%。但不同土地利用类型间土壤 CO₂ 通量存在显著差异,且生长季

前期和中期差异更为明显:5—8 月红枣林土壤 CO₂ 通量均显著低于另两处理($p<0.05$),且 5 次达到极显著差异水平($p<0.01$);生长季初期和末期农地草地间 CO₂ 通量差异较小,但 7—8 月农地土壤 CO₂ 排放通量大于红枣林土壤,其中 7 月差异达显著水平。生长季平均 CO₂ 通量农地>撂荒草地>红枣林[300.39>273.31>173.80 mg/(m²·h)],红枣林 CO₂ 通量与另两处理间差异均达极显著水平($p<0.01$),撂荒草地与农地间差异不显著。

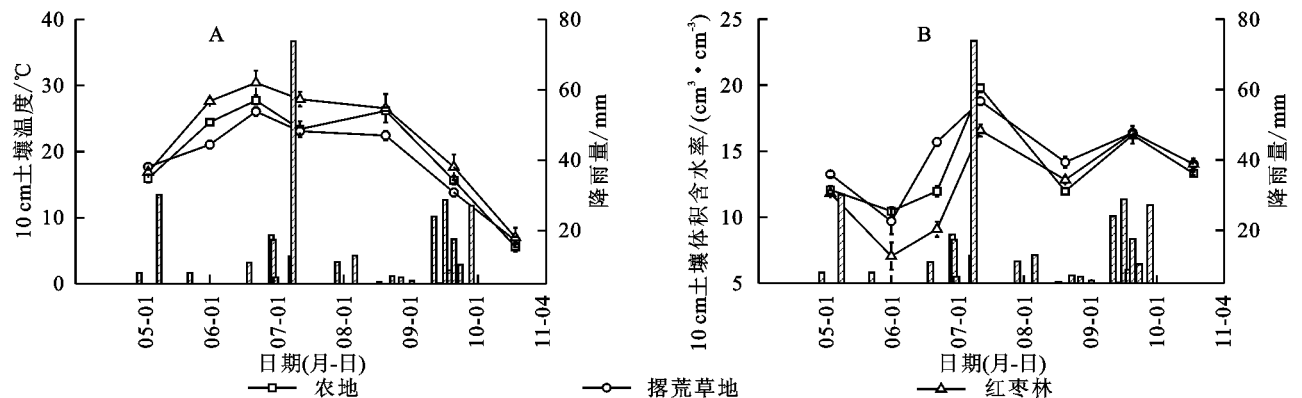


图 1 2014 年不同土地利用类型下 10 cm 土壤温度、水分动态特征

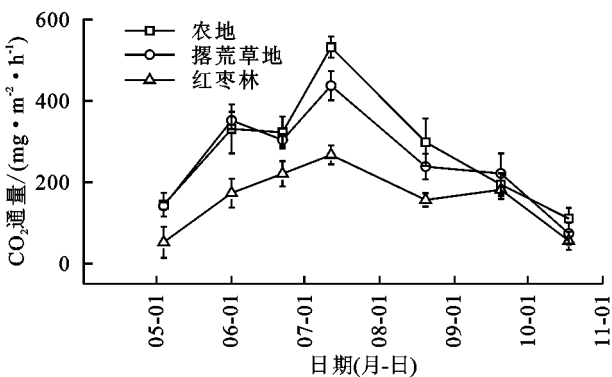


图 2 不同土地利用类型下土壤 CO₂ 通量季节变化特征

2.3 不同土地利用类型下土壤 N₂O 通量特征

由图 3 可知,土壤 N₂O 通量整个生长季均较低,但季节变化趋势明显,各处理通量均在 6—7 月达到最大值,之后逐渐降低,并在其他时期均处于较低水平或呈负值,这可能是与地表植物生长及生长季中土壤底物含量被逐渐消耗有关。有研究指出,土壤养分含量较低时,施肥措施和秋季凋落物输入成为土壤主要矿物质来源,并在一年中温度水分条件适宜时被植物、微生物逐渐消耗^[16],本研究也从侧面印证了这个理论。农地、撂荒草地、红枣林土壤 N₂O 通量变化范围分别为-3.82~19.78, -4.21~28.10, -8.77~16.76 μg/(m²·h)。各处理 N₂O 通量时间变异幅度均较大,农地、撂荒草地、红枣林时间变异系数分别为 116.6%,114.5%,372.7%,其中红枣林变异幅度明显大于另两处理。值得注意的是红枣林 5 月、7 月、

10 月,农地 5 月、10 月,撂荒草地 8—9 月 N₂O 均出现负排放,表现出较大的源汇变异性。各处理间 N₂O 通量季节变化显示出一定差异,撂荒草地 5 月、9 月 N₂O 源汇性质与另外两处理相反,6 月显著高于红枣林和撂荒草地,体现了不同下垫面土壤 N₂O 通量对环境因子的响应差异。生长季 N₂O 通量均值撂荒草地>农地>红枣林(9.26>7.08>0.52 μg/(m²·h)),其中撂荒草地土壤 N₂O 通量显著($p<0.05$)高于农地,但红枣林与农地之间的差异未达到显著性水平,各处理土壤均表现为 N₂O 的弱源。

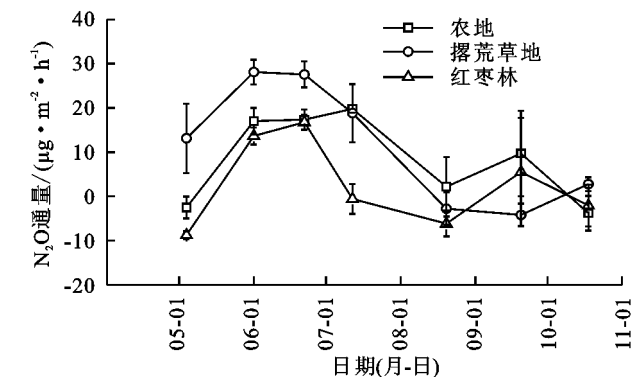


图 3 不同土地利用类型下土壤 N₂O 通量季节变化特征

3 讨论

3.1 土壤温度、水分对 CO₂、N₂O 通量的影响

一元线性相关分析显示,CO₂ 排放通量均与土壤 10 cm 温度、水分呈正相关(表 2),3 种土地利用类型下土壤温度和水分平均分别解释了 44%~57%和

4%~27%的 CO₂ 通量变异,其中各处理与温度之间的相关关系达到极显著水平($p<0.01$),与水分间的相关关系除红枣林外均达显著水平($p<0.05$)。相比土壤水分,各处理 10 cm 温度均对土壤 CO₂ 排放量影响作用更明显,二者决定系数负相关,这是可能由于生长季土壤温度平均变异幅度(38%)大于土壤水分(24%),土壤温度及其他环境因子变化削弱了土壤水分对土壤 CO₂ 排放的影响^[9,17];另外,土壤水分除 6 月干旱期内较低外其他时期均高于 10%,适宜根系和微生物呼吸的土壤环境使水分未能成为限制

表 2 土壤 CO₂ 和 N₂O 通量与 10 cm 土壤温度和水分的线性相关分析

气体类型	土地类型	土壤温度/℃			土壤水分/(cm ³ ·cm ⁻³)		
		线性方程	R ²	P-value	线性方程	R ²	P-value
CO ₂	农地	$F=16.318+13.091T$	0.47	<0.01**	$F=-5.382+20.573w$	0.27	0.02*
	撂荒草地	$F=-14.088+14.283T$	0.54	<0.01**	$F=110.691+9.740w$	0.20	0.05*
	红枣林	$F=-6.974+7.510T$	0.57	<0.01**	$F=127.316+2.476w$	0.04	0.64
N ₂ O	农地	$F=-8.552+0.860T$	0.25	0.01*			
	撂荒草地	$F=-10.652+1.225T$	0.24	0.01*			
	红枣林	$F=-9.985+0.575T$	0.10	0.08			

注:表内*代表相关性显著($p<0.05$),**代表相关性极显著($p<0.01$)。

温度敏感性指标(Q₁₀)被广泛用于描述土壤 CO₂ 通量对温度变化响应的敏感程度。本研究中农地、撂荒草地、红枣林 Q₁₀ 值分别为 1.66,1.82,1.73,均低于全球 Q₁₀ 平均值(2.4)。由于长期受干旱胁迫和底物条件制约,半干旱和干旱地区土壤 CO₂ 通量温度敏感性往往较低^[14],本研究结果中较低的 Q₁₀ 也符合这一结论。但与王建国等^[18]的研究结论不同,本研究中三处理的 Q₁₀ 值撂荒草地>红枣林>农地,即草地 CO₂ 排放对温度变化最为敏感,红枣林土壤次之,农地最不敏感,这可能是由于研究区植被和土壤条件有所不同所致。生物因子和环境因子的不同均会造成土地利用类型间 Q₁₀ 的差异^[19],本研究中不同土地类型 Q₁₀ 变化趋势与地表覆被情况和土壤 SOC 含量基本一致,与 Zeng 等^[20]的研究结果一致。

农地、撂荒草地 N₂O 通量与土壤温度显著相关($p<0.01$),温度可分别解释两处理通量变异的 24.7%和 24.1%,但红枣林土壤 N₂O 通量与土壤温度的相关性未达到显著性水平。大量研究显示了土壤温度对土壤 N₂O 通量的控制作用^[3,6,21],这是由于土壤温度通过影响土壤微生物活性进而影响硝化反应和反硝化反应产物 N₂O 的通量^[2]。本研究中不同土地利用类型下土壤 N₂O 通量与土壤水分均不相关,与部分已有研究结果一致^[2,21],体现了水分对土壤 N₂O 影响的复杂性。土壤水分通过影响硝化反应和反硝化反应所占比例,进而控制反应产物 N₂O 的

因子。土壤 CO₂ 通量与水分关系仅撂荒草地和农地达显著水平,由于观测期内土壤含水率均低于已有研究中水分对 CO₂ 通量的正效应区间(<20%)^[14],故各处理均未出现水分对 CO₂ 通量的抑制现象。双因子相关分析得出农地、撂荒草地、红枣林的决定系数分别为 0.76,0.54,0.78,较之前单因素相关分析均有不同程度的提高(5%~73%),反映了土壤温度、水分对 CO₂ 排放通量的共同影响。因此在对本研究区内土壤 CO₂ 排放量进行估算时,水热双因子模型可能会得到更好的模拟效果。

通量^[22],当土壤含水率较低时,硝化反应是 N₂O 的主要来源,但当含水率较高时反硝化作用更为强烈,并产生大量 N₂O,目前学术界多将 60%~75%含水率区间作为 N₂O 通量产生的最适环境条件^[5-6],此时硝化反应和反硝化反应的叠加效应往往会产生较大的 N₂O 排量。但由于本研究期间各土地类型土壤充水孔隙度(WFPS)均较低(13.6%~34.1%),故土壤季节变化未随水分变化并出现明显的峰值。另外由于条件所限,本试验中较小的观测频次可能忽略了部分短历时 N₂O 排放峰,因此在未来研究中应进一步加大观测频率,以深入揭示 N₂O 排放特征与机理。

3.2 土地利用变化对 CO₂,N₂O 通量的影响
土地利用方式的变化改变了地表植被类型、土地管理方式^[18],进而通过土壤质地、土壤养分条件、根系生物量、微生物组成以及下垫面水热条件的变化直接或间接影响土壤 CO₂ 通量^[23]。除短期效应^[24]和生态系统特殊性^[23]造成的 CO₂ 通量变化缺乏显著差异外,大量研究均观测到退耕还林后土壤 CO₂ 通量的增加,且随造林年限增加呈上升趋势^[25-26]。但本研究发现退耕后红枣林土壤 CO₂ 通量显著低于农地 42.1%($p<0.01$),较低的土壤 CO₂ 通量水平在黄土高原苹果园的研究中也有发现^[15],而黄土高原林草交错带次生林和人工林的研究结果则较高[437.2~582.9 mg/(m²·h)]^[27],这可能是由于经济林与生态林管理方式差异导致。人工生态系统高强度的土

地管理措施被认为是影响土壤 CO₂ 通量的主要因素^[4],本研究红枣林除草措施不但削弱了土壤碳源,表层土壤因缺乏植被覆盖更易受降水击打而板结,较差的通气条件抑制了土壤呼吸和 CO₂ 的排放^[28],与试验结果中红枣林表层土壤较低的孔隙度相符(表 1)。虽然我们也观测到可能由除草导致的土壤升温效应,但受限于上述原因未出现前人研究中显著的 CO₂ 排放^[3]。

退耕还草对土壤 CO₂ 通量的影响因研究地点和生态系统不同而异:Raich 等^[23]分析已有研究结果显示草地土壤 CO₂ 通量高于临近农田 25%,但差异未达显著性水平,吴建国等^[25]采用两种方法对宁夏六盘山林区几种土地利用方式下的土壤 CO₂ 通量进行估算,结果均显示草地年通量显著高于农田;Lyuri 等^[26]对北针叶林带农田退耕后的自然演替过程进行研究,发现草本植物群落阶段土壤 CO₂ 通量为农田土壤的 1.51~1.7 倍,认为碳排放量的增加与退耕后土壤碳库变化和较高的矿化速率紧密相关。本研究中退耕后撂荒草地土壤有机碳含量也出现一定程度升高(51.9%),且较高的土壤孔隙度为根系、微生物呼吸提供了适宜的环境,但我们未发现农地与撂荒草地土壤 CO₂ 通量间出现显著差异,与黄土高原水蚀风蚀区研究结果较为吻合^[18]。这可能是由于研究区内撂荒草地较低的土壤温度一定程度上抑制了根系及根际微生物活性,但同时我们也观测到撂荒草地较高的土壤呼吸敏感性,因此在未来全球气候变暖格局下,该区退耕还草后土壤碳库可能向大气排放更多 CO₂,进而对气候变暖产生正反馈效应^[20]。

氮肥施用是农田生态系统土壤 N₂O 排放的主要原因,但本研究区内低水平的施肥管理措施和强烈的水土流失使土壤养分含量偏低,甚至低于黄土高原其他区域^[7],这可能是各处理土壤 N₂O 通量低于已有研究^[21,29]的主要原因,而本研究结果显示退耕后撂荒草地 N₂O 排放通量显著高于农地($p < 0.01$),一定程度上反映了退耕措施对土壤养分的蓄持和恢复作用^[7]。与退耕还草相反,本研究观测到农地转化为经济林后土壤 N₂O 通量的明显下降(92.7%),低于临近地区果园观测结果^[21],这可能与人为管理下果园表层土壤较差的通气条件有关。Stehfest 和 Bouwman^[30]研究发现土壤 N₂O 通量与土壤容重存在负相关关系,且在容重大于 1 g/cm³ 时其对 N₂O 的抑制效应显著增加,认为较高的土壤容重除了限制 N₂O 向大气的扩散过程外,N₂O 在土体传输过程中更易被反硝化作用消耗。Horrocks 等^[31]观测到在低土壤含水率条件下土壤对 N₂O 的吸收现象,认为是由

于土体中氧气扩散速率低于消耗速率而产生厌氧环境所致。本研究中红枣林土壤较其他处理更易出现 N₂O 负排放也与这个理论相符。

4 结 论

(1) 生长季农地、撂荒草地、红枣林土壤 CO₂ 通量均值分别为 300.39,273.31,173.80 mg/(m²·h),季节变化特征与土壤 10 cm 温度变化趋势一致。生长季农地、撂荒草地、红枣林土壤 N₂O 通量均值分别为 7.08,9.26,0.52 μg/(m²·h),呈现出较大源汇变异,但总体上仍表现为 N₂O 的源。

(2) 土壤 10 cm 水分、温度以及水热双因子模型对土壤 CO₂ 通量的解释度分别为 4%~27%,44%~57%和 54%~78%,水热双因子模型显示出较好的适用性。土壤 N₂O 通量与土壤 10 cm 温度线性相关,与土壤水分不相关,体现了 N₂O 产生及排放过程的复杂性,对此未来应加大观测频率进行更加深入的研究。

(3) 退耕还林还草过程中的地表植被种类、人为管理措施改变及由此引发的生物、非生物因子变化均会影响土壤 CO₂、N₂O 排放。退耕还草后土壤 CO₂ 并未有显著变化,土壤 N₂O 则随土壤基质条件的改善呈现上升趋势;对于经济林,退耕后土壤 CO₂、N₂O 通量均有一定程度减少(42.1%~92.7%),并且更易出现 N₂O 的负排放。

参考文献:

- [1] Solomon S. Climate change 2007: the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge University Press, 2007.
- [2] 胡宜刚,冯玉兰,张志山,等.沙坡头人工植被固沙区生物结皮—土壤系统温室气体通量特征[J].应用生态学报,2014,25(1):61-68.
- [3] 李海防,张杏锋.剔除灌草和添加翅荚决明对厚荚相思林土壤温室气体排放的影响[J].应用生态学报,2010,21(3):563-568.
- [4] 刘慧峰,伍星,李雅,等.土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展[J].生态学杂志,2014(7):1960-1968.
- [5] Merino A, Pérez-Batallón P, Macías F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004,36(6):917-925.
- [6] van Lent J, Hergoualc'H K, Verchot L V. Soil N₂O and NO emissions from land use and land-use change in the tropics and subtropics: a meta-analysis[J]. Biogeosciences Discussions, 2015,12(15):12783-12821.

- [7] Zhao X, Wu P, Gao X et al. Soil Quality Indicators in Relation to Land Use and Topography in a Small Catchment on the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2015,26(1):54-61.
- [8] 李虹辰,赵西宁,高晓东,等. 鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2014,25(8):2297-2303.
- [9] 周小刚,张彦军,南雅芳,等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. 环境科学,2013,34(3):1026-1033.
- [10] 李红生,刘广全,王鸿喆,等. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2008,28(9):4099-4106.
- [11] 高亚琴,黄高宝,王晓娟,等. 退耕土壤的碳、氮固存及其对 CO₂, N₂O 通量的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3):1071-1076.
- [12] 齐丽彬,樊军,邵明安,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及其环境驱动[J]. 生态学报, 2008,28(11):5428-5436.
- [13] Parkin T B, Venterea R T. USDA-ARS GRACEnet project protocols, chapter3. Chamber-based trace gas flux measurements[M]. Beltsville, MDp: Sampling Protocols. , 2010:1-39.
- [14] 王胜,樊军,王建国,等. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸特征及其对水热因子的响应[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1770-1781.
- [15] 王蕊,郭胜利,刘庆芳,等. 苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1915-1921.
- [16] Moyano F E, Kutsch W L, Schulze E D. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007,39(4):843-853.
- [17] Wang B, Zha T S, Jia X, et al. Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem[J]. Biogeosciences, 2014,11(2): 259-268.
- [18] 王建国,樊军,王力,等. 退耕还林还草过程中不同土地利用方式土壤呼吸作用及其碳收支评估[J]. 农业环境科学学报, 2011,30(10):2024-2032.
- [19] Peng S, Piao S, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009,41(5):1008-1014.
- [20] Zeng X, Zhang W, Shen H, et al. Soil respiration response in different vegetation types at Mount Taihang, China[J]. Catena, 2014,116:78-85.
- [21] Pang J, Wang X, Mu Y, et al. Nitrous oxide emissions from an apple orchard soil in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009,46(1):37-44.
- [22] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, et al. Soils, a sink for N₂O: A review[J]. Global Change Biology, 2007,13(1):1-17.
- [23] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):71-90.
- [24] Saurette D D, Chang S X, Thomas B R. Land-use conversion effects on CO₂ emissions: from agricultural to hybrid poplar plantation[J]. Ecological Research, 2008,23(3):623-633.
- [25] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局[J]. 环境科学, 2003,24(6):23-32.
- [26] Lyuri D I, Karelin D V, Kudikov A V, et al. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone [J]. Eurasian Soil Science, 2013,46(9):935-947.
- [27] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, et al. Seasonal and diurnal dynamics of soil respiration fluxes in two typical forests on the semiarid Loess Plateau of China: Temperature sensitivities of autotrophs and heterotrophs and analyses of integrated driving factors[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,52:99-107.
- [28] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature, and bulk density [J]. Applied Soil Ecology, 1995,2(2):95-109.
- [29] Ri X, Wang Y, Zheng X, et al. A comparison between measured and modeled N₂O emissions from Inner Mongolian semi-arid grassland[J]. Plant and Soil, 2003, 255(2):513-528.
- [30] Stehfest E, Bouwman L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006,74(3):207-228.
- [31] Horrocks C A, Dungait J A J, Heal K V, et al. Comparing N₂O fluxes from recently created extensive grasslands and sites remaining under intensive agricultural management[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015,199:77-84.