

张杰, 刘梦云, 张萌萌, 等. 黄土台塬不同林型土壤主要温室气体通量特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 944–956.
ZHANG Jie, LIU Meng-yun, ZHANG Meng-meng, et al. Characteristics of soil greenhouse gas fluxes under different forest types in the Loess Plateau tableland, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(4): 944–956.

黄土台塬不同林型土壤主要温室气体通量特征

张杰^{1,2,3}, 刘梦云^{1,2,3*}, 张萌萌^{1,2,3}, 杨静涵^{1,2,3}, 曹润珊^{1,2,3}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要:为研究纯林、混交林土壤二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放特征,有效评估不同林型组成所产生的温室气体差异。本文以黄土台塬7种典型纯林及其混交林为研究对象,采用静态箱-气相色谱法,比较各林型土壤CO₂、CH₄和N₂O的排放规律及其对环境因子的响应。结果表明:研究区各林型土壤均为CO₂、N₂O的排放源,CH₄的吸收汇。不同林型土壤温室气体排放差异显著,在土壤CO₂年均排放中,沙棘刺槐混交林最高(130.73 mg·m⁻²·h⁻¹),油松最低(51.33 mg·m⁻²·h⁻¹);在土壤CH₄年均吸收中,油松最高(60.82 μg·m⁻²·h⁻¹),侧柏最低(36.67 μg·m⁻²·h⁻¹);在土壤N₂O年均排放中,沙棘刺槐混交林最高(4.42 μg·m⁻²·h⁻¹),油松最低(-0.06 μg·m⁻²·h⁻¹)。各林型土壤CO₂与土壤温度呈正相关,与土壤含水量呈负相关;侧柏和沙棘刺槐混交林土壤CH₄吸收与土壤温度呈正相关,随0~5 cm土壤含水量的增加呈先增加后减少的规律;刺槐和油松土壤N₂O与土壤温度为显著正相关,其他林型与土壤温度及含水量无明显相关性。研究表明:土壤温室气体排放与林型组成有关,受环境因子影响,各温室气体表现出不同的排放特征。

关键词:纯林;混交林;温室气体;环境因子;黄土台塬

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)04-0944-13 doi:10.11654/jaes.2018-0826

Characteristics of soil greenhouse gas fluxes under different forest types in the Loess Plateau tableland, China

ZHANG Jie^{1,2,3}, LIU Meng-yun^{1,2,3,*}, ZHANG Meng-meng^{1,2,3}, YANG Jing-han^{1,2,3}, CAO Run-shan^{1,2,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3. Key Laboratory of Agri-Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: The study of characteristics of CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in soils of pure forest and mixed forest has great significance for evaluating the differences in greenhouse gas fluxes under different forest types. In this study, the flux laws and major influential factors of CO₂, CH₄, and N₂O were compared using a static chamber and gas chromatography method based on seven typical pure forests and their mixed forests in the Loess Plateau tableland. The results showed that all forest types were sources of CO₂ and N₂O and sinks of CH₄, and the differences in greenhouse gas fluxes among different forest soils were significant. Among the annual fluxes of soil CO₂ and N₂O, the mixed forest of *Hippophae rhamnoides* and *Robinia pseudoacacia* had the highest fluxes (130.73 mg·m⁻²·h⁻¹ and 4.42 μg·m⁻²·h⁻¹, respectively), while the *Pinus tabulaeformis* pure forest (51.33 mg·m⁻²·h⁻¹ and -0.06 μg·m⁻²·h⁻¹, respectively) had the lowest. For the fluxes of soil CH₄ uptake, the absorption flux of the *P. tabulaeformis* pure forest was higher (60.82 μg·m⁻²·h⁻¹) than that of any other forest, and that of the *Biota orientalis* pure forest (36.67 μg·m⁻²·h⁻¹) was the lowest. The soil CO₂ flux was positively correlated with soil temperature and negatively correlated

收稿日期:2018-06-26 录用日期:2018-08-10

作者简介:张杰(1992—),女,山东寿光人,硕士研究生,主要研究资源环境监测与评价。E-mail:zhangjie6076@163.com

*通信作者:刘梦云 E-mail:lmy471993@163.com

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JZ008);国家重点研发计划项目(2016YFC0501703);农业部农业环境重点实验室开放基金

Project supported: Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(2017JZ008); National Key R&D Plan Program(2016YFC0501703); Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, China

ed with soil moisture content. Soil CH_4 uptakes of the *B. orientalis* pure forest and mixed forest of *H. rhamnoides* and *R. pseudoacacia* were significantly positively correlated with temperature, and first increased and then decreased with the increase in 0~5 cm soil water content. Only the *R. pseudoacacia* pure forest and *P. tabuliformis* pure forest soil N_2O fluxes were positively correlated with soil temperature. The results showed that the fluxes of greenhouse gases in soil were related to forest type, and that the flux characteristics were different under the influence of environmental factors.

Keywords: pure forest; mixed forest; greenhouse gas; environmental factors; Loess Plateau tableland

气候变暖是当今人类生存面临的重大环境问题,其首要原因归因于温室气体排放。二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)作为3种主要温室气体,其排放量对温室效应的贡献十分明显^[1]。有研究^[2-3]指出,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,土壤中的微生物将有机质分解为无机态的碳和氮,在好氧条件下无机碳多以 CO_2 形式进入大气,而在严格厌氧条件下则以 CH_4 形式排向大气。全球一半以上的 N_2O 来自于土壤的硝化与反硝化过程^[4-6]。森林作为地球上分布最广的陆地生态系统^[7],其植被可以通过改变土壤温湿度、根系呼吸、光合产物及小气候等途径影响土壤呼吸及各种温室气体的排放,但该效应在不同植被尤其是不同林型组成之间差异很大^[8],因此,探究区域内不同林型组成之间土壤温室气体排放量的动态变化特征和及其对各环境因子的响应,对于合理预测植被的C、N排放源或吸收汇功能以及对大气碳氮循环的影响具有重要的科学意义。

黄土台塬毗邻西北黄土高原南部边缘地带,生态环境脆弱,水土流失严重,为防止土壤侵蚀,历年来塬坡防护林一直以水土保持、发挥生态效益为主要目标,从二十世纪六七十年代开始当地大面积种植刺槐纯林,随后引入松类,但由于纯林遗传性单一,林分结构呈不稳定状态,对外界环境适应性差,因此具有很大的弊端,为了解决这一问题,当地相继引进了针叶或阔叶等乔木以及沙棘等灌木林,开展了营造混交林试验研究,因此,黄土台塬区现存树种多为人工纯林或混交林。为了探明该区域不同林型组成下土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的时间变化特征以及对各类因素的响应,本研究以黄土台塬4种典型林地及其混交林共7种林型为研究对象,采用静态箱-气相色谱法对 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量进行测定,分析不同林型组成下土壤温室气体排放差异,阐明土壤温室气体与土壤温度和土壤含水量之间的关系,以期评价和预测我国黄土台塬地区不同林型组成碳、氮的源/汇功能提供实测数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于陕西省咸阳市永寿县马莲滩林场($108^\circ 05' 22.6'' \text{E} \sim 108^\circ 05' 39.3'' \text{E}$; $34^\circ 47' 58.4'' \text{N} \sim 34^\circ 48' 42.7'' \text{N}$)进行,该林场属于国家科技攻关项目“黄河中游黄土高原区(永寿)水土保持型植被建设技术与示范”实验基地,试验区占地面积为26.27 km^2 ,其中,山地、沟壑面积8.20 km^2 ,塬面10.87 km^2 ,该区主要土壤类型为黑垆土,属温带大陆性季风气候,干旱指数为1.73~1.80,平均气温10.8 $^\circ\text{C}$,极端最高温38.8 $^\circ\text{C}$,平均降水量601.6 mm。由于研究区以台塬、沟壑区为主,生态环境极端脆弱,为解决当地恶劣的生态问题,该林场实行了封山育林政策,进行不同植被类型、不同混交方式与栽培模式的试验研究,并采用自然恢复的管理措施,后期人为干预较少。目前,林场森林植被以天然次生林(侧柏等)、人工林(刺槐、油松等)以及灌木(沙棘等)为主。

1.2 试验设计

该试验于2015年4月至2016年3月进行,选取晴朗天气作为采集日,时间间隔为一个月左右,选取当天11:00—15:00采集气体,以降低早晚温差对土壤呼吸速率的影响^[9],将研究区7种林型分成3个实验小组,a组为灌木林(沙棘)、乔木林(刺槐)及乔灌混交林(沙棘刺槐混交林),b组为阔叶林(刺槐)、针叶林(侧柏)及针阔混交林(刺槐侧柏混交林),c组为灌木林(沙棘)、阔叶林(刺槐)、针叶林(油松)及乔灌-针阔组合型混交林(沙棘刺槐油松混交林),各林型林龄约为16~20 a,林下植被以关中地区自然恢复典型植被(蒿类、赖草、羊茅、蔷薇、悬钩子等)为主,每种林型选择3个样本作为对照,取其平均值作为当月该林型土壤的土壤呼吸速率。采样点情况如表1所示。

1.3 土壤基本理化性质测定

土壤全氮(TN)采用开氏法消解,K2300型全自动定氮仪测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-硫酸消化法测定;溶解性有机碳(DOC)采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

K₂SO₄溶液浸提过筛风干土,经振荡机振荡后过滤,滤液用TOC自动分析仪测定有机碳,即为DOC;碱解氮采用碱解扩散法测定;NH₄⁺-N、NO₃⁻-N采用KCl溶液浸提新鲜土样,经振荡机振荡后过滤,滤液用流动分析仪测定;土壤pH采用pH计测定;土壤容重采用环刀法测定。

1.4 土壤温室气体排放通量测定

本实验采用静态箱(箱体材质为PVC,直径15 cm,桶高25 cm)气相色谱法收集温室气体,在安置箱体前将基座内的地表植物齐地剪掉,最大程度减少对地表凋落物的扰动,降低对土壤表层的破坏。将静态箱置于地下10 cm左右,防止因土壤松动造成气体泄

漏,依序在第0、10、30、60、90、120 min采集气体,将10 mL医用针管插入带有橡皮塞箱盖的静态箱中采集气体,在此期间,用地温计测定采样点地下5 cm和20 cm处的土壤温度;同时,采集0~5、5~20 cm土壤样品用于土壤湿度的测定,用气相色谱仪7890A测定气体中CO₂、CH₄和N₂O的体积分数,温室气体排放速率计算公式为^[10]:

$$F = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot H \quad (1)$$

式中: F 为温室气体通量,mg·m⁻²·h⁻¹;dc/dt为气体浓度随时间变化的斜率(c 为 t 时刻被测气体浓度, t 是时间); M 为被测气体的摩尔质量,g·mol⁻¹;V₀为标准状

表1 7种林型组成基本情况

Table 1 Basic status of sampling sites under different forest types

林型 Forest types	采样地点 Sampling sites	经度 Longitude	纬度 Latitude	高程 Altitude/m	胸径 Diameter/cm	郁闭度 Canopy closure/%	林下植被 Understory vegetation
纯沙棘林	马莲滩林场东北	108°5'39"	34°48'32"	1240	7.70	90	林下杂草茂盛
刺槐纯林	马莲滩林场西	108°5'27"	34°48'02"	1239	7.20	83	林下植被茂盛,夹杂幼年油松
侧柏林	马莲滩三岔口东	108°5'35"	34°48'12"	1217	5.80	72	有较大根系,林下植被较好
油松	马莲滩林家沟山梁西坡	108°5'38"	34°48'33"	1254	8.90	86	林下植被稀少,枯枝落叶层很厚
沙棘刺槐混交林	马莲滩林场西	108°5'26"	34°48'02"	1230	7.45	80	林下植被茂盛,表层有大根系
刺槐侧柏混交林	马莲滩三岔口西	108°5'36"	34°48'10"	1224	6.50	80	林下植被较好,根系较多
沙棘刺槐油松混交林	马莲滩林场梁顶	108°5'25"	34°48'13"	1247	8.18	75	植被茂盛,地表枯枝落叶层很厚

表2 不同林型土壤表层(0~5、5~20 cm)基本理化指标

Table 2 The basic physical and chemical properties at 0~5 cm and 5~20 cm soil depths for the seven forests

项目	土层深度 Soil depth/cm	纯沙棘林 <i>Hippophae reamnoides</i> forest	刺槐纯林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	侧柏林 <i>Biota orientalis</i> forest	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	沙棘刺槐混交林 Mixed forest of <i>Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia</i>	刺槐侧柏混交林 Mixed forest of <i>Robinia pseudoacacia-Biota orientalis</i>	沙棘刺槐油松混交林 Mixed forest of <i>Hippophae reamnoides-Robinia pseudoacacia-Pinus tabulaeformis</i>
全氮 TN/ g·kg ⁻¹	0~5	1.98	2.10	1.92	1.11	3.04	1.68	1.41
	5~20	1.52	0.88	1.07	0.81	1.15	0.80	1.04
有机碳 SOC/ g·kg ⁻¹	0~5	25.29	13.76	20.73	10.59	21.82	46.28	14.10
	5~20	14.27	10.04	9.63	6.30	13.76	11.28	9.02
C/N	0~5	12.77	6.55	10.80	9.54	7.18	27.55	10.00
	5~20	9.39	11.41	9.00	7.78	11.97	14.10	8.67
溶解性有机碳 DOC/mg·kg ⁻¹	0~5	391.82	296.03	336.09	269.66	352.07	809.15	389.13
	5~20	228.06	168.73	196.80	159.34	257.37	188.95	208.57
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	0~5	137.46	237.58	135.14	111.03	194.95	114.58	56.25
	5~20	68.62	52.00	67.54	59.28	25.79	31.22	33.85
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹	0~5	4.01	4.03	3.17	3.19	5.36	3.53	3.80
	5~20	2.76	3.49	3.78	3.58	4.44	4.46	4.75
pH	0~5	7.97	8.11	7.99	7.93	8.05	7.84	7.97
	5~20	8.21	8.24	8.21	7.97	8.21	8.16	8.20
容重 Bulk density/g·cm ⁻³	0~5	0.97	1.24	1.09	1.15	1.13	1.13	1.27
	5~20	1.19	1.36	1.22	1.34	1.25	1.15	1.42

态下的气体摩尔体积, $22.41 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$; P 为采样点的大气压; P_0 为标准大气压, 101.325 kPa ; T 为箱内温度, K ; T_0 为绝对温度, 273.15 K ; H 为采样箱的高度, cm 。

1.5 温度敏感性指数(Q_{10})

用 Q_{10} 值表示温度增加 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时土壤呼吸速率增加的倍数, 并采用指数关系模型进行计算^[8]:

$$R_s = a \cdot e^{bT_i}, Q_{10} = e^{10b}$$

式中: R_s 为土壤呼吸速率, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, T_i 为土壤温度, $^\circ\text{C}$; a, b 为待定参数。

1.6 数据分析与处理

所有数据均在 Excel 2010 和 SPSS 21.0 统计分析软件中进行, 利用 Pearson 相关分析和单因素方差分析计算不同林型和季节土壤温室气体的差异, 绘图均在 Origin 8.1 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同林型土壤温度和土壤含水量的季节性动态特征

森林土壤温湿度季节变化明显(图1), 各林型土壤温度均表现为夏高冬低的规律, 不同林型组成之间土壤温度差异很小, 对比发现, 冬季混交林的土壤温度普遍高于纯林, 这是因为冬季混交林枯枝落叶多, 对土壤起到一定的保温作用, 且各林型上层土壤温度普遍低于下层土壤温度, 这种现象与当地冰雪覆盖周期有关, 而夏季则正好相反, 这与夏季混交林郁闭度高, 抵挡了部分太阳辐射到达地面有关。不同于土壤温度的变化规律, 各林型土壤含水量在生长季(5—10月)变化平缓, 而非生长季(11—来年4月)土壤含水

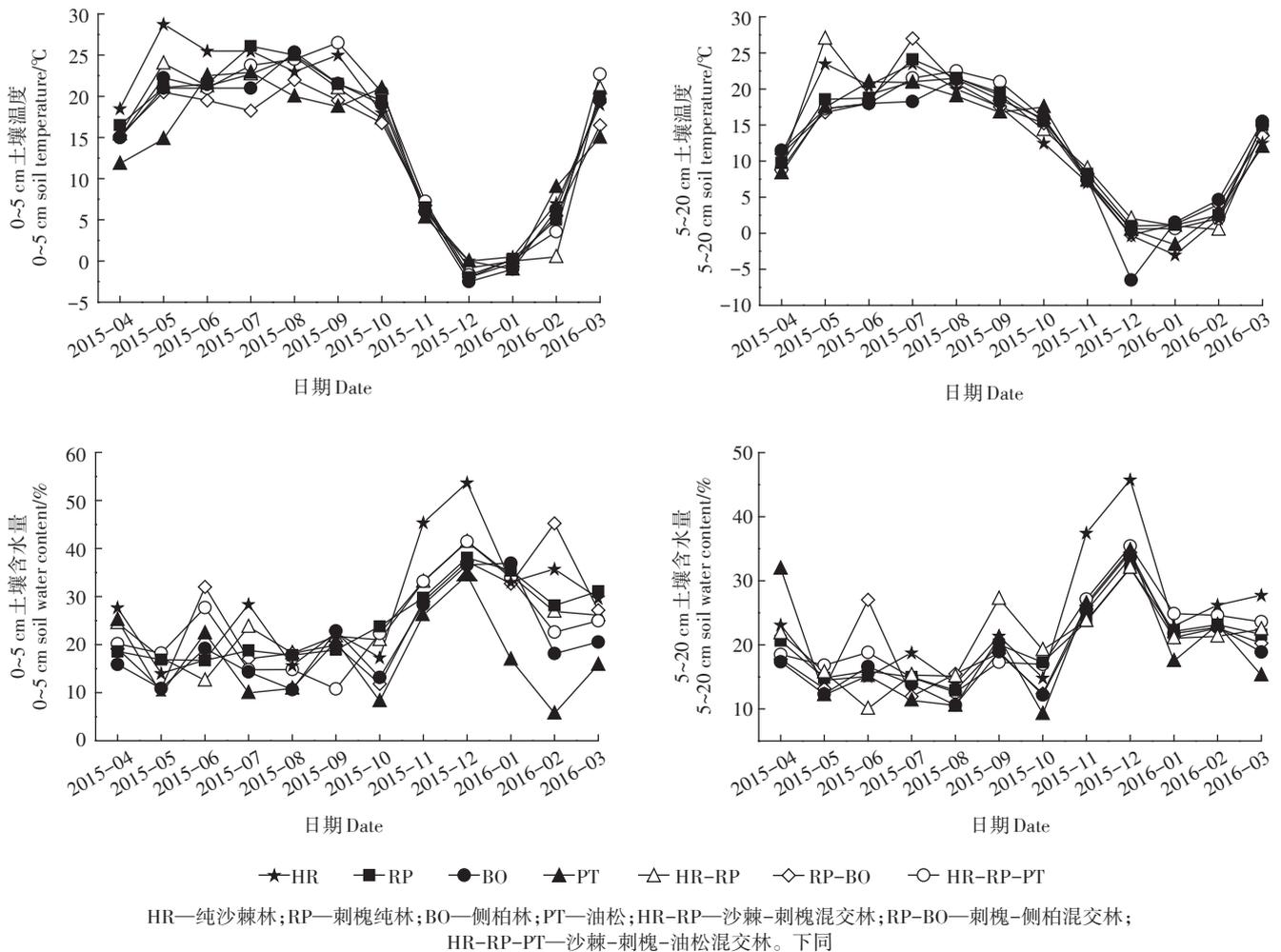


图1 7种林型0~5、5~20 cm土壤温度和土壤含水量的变化

Figure 1 Seasonal changes in soil temperature and soil water content at 0~5 cm and 5~20 cm depths for the seven forests

量波动明显。7种林型之间土壤含水量较土壤温度差异明显,其中,沙棘年均土壤含水量在各林型中居于首位,而其他几种纯林则普遍低于混交林。

2.2 不同林型土壤CO₂通量的季节变化特征

研究期间,各林型土壤CO₂排放通量夏季高、冬季低(图2),与土壤温度的变化趋势相似,且每年3月份随冻结土壤解冻,各林型土壤CO₂通量会出现短暂回升;同时,混交林土壤CO₂排放峰值在时间上往往晚于纯林1~2个月,这可能与各林型对土壤温湿度的适应范围有关。不同林型年均CO₂排放通量表现为:

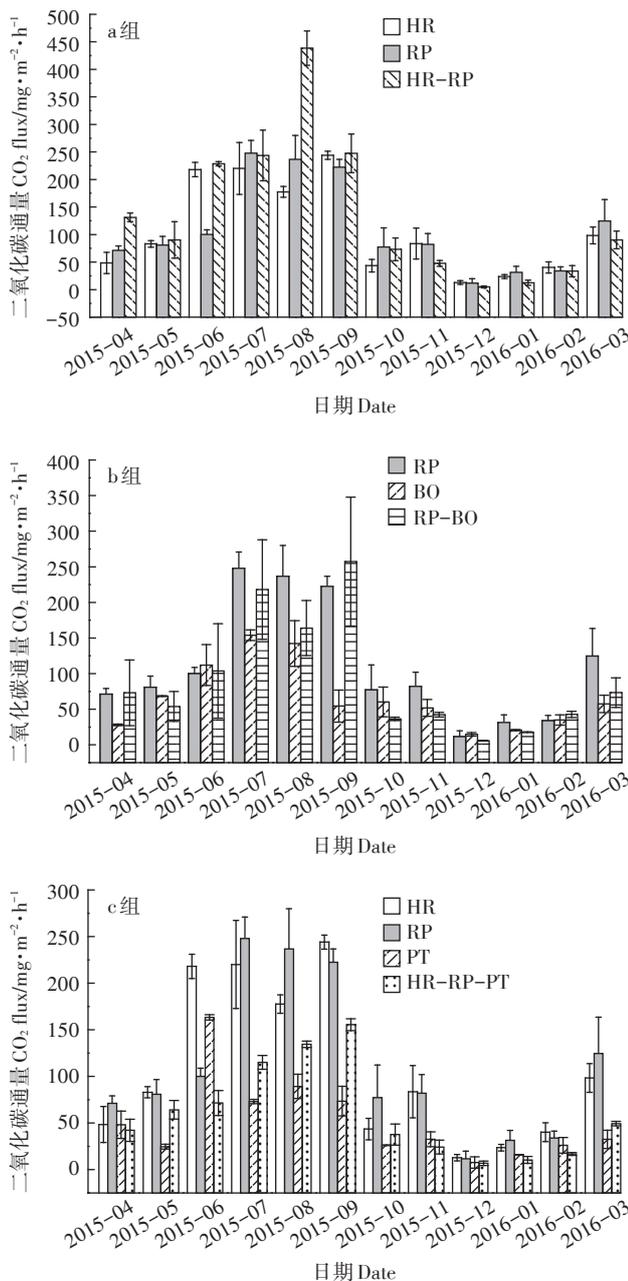


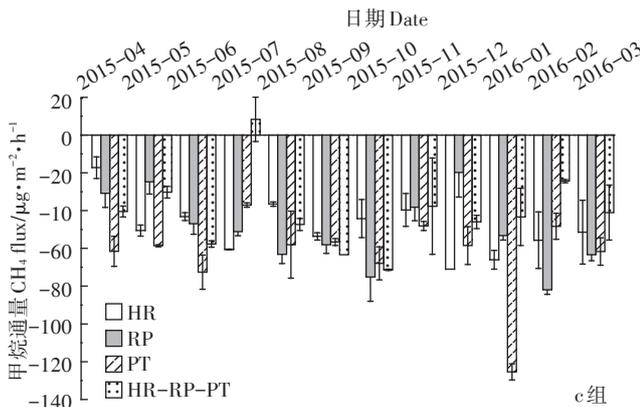
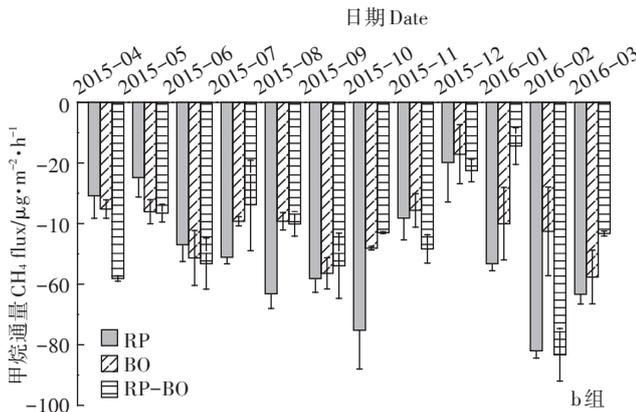
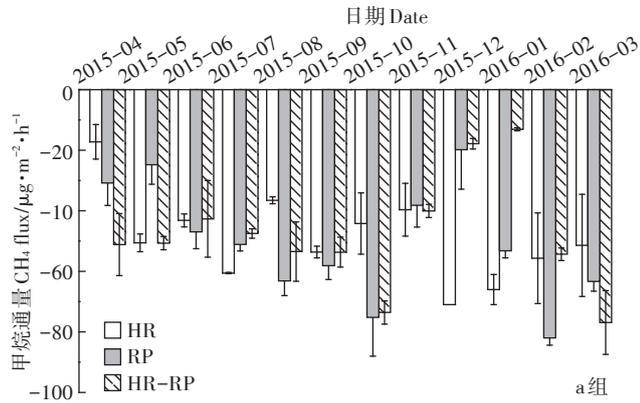
图2 不同林型土壤CO₂通量的变化特征

Figure 2 Seasonal changes in soil CO₂ fluxes for the seven forests

沙棘刺槐混交林(130.73 mg·m⁻²·h⁻¹)>刺槐(108.31 mg·m⁻²·h⁻¹)>沙棘(107.78 mg·m⁻²·h⁻¹)>刺槐侧柏混交林(81.95 mg·m⁻²·h⁻¹)>侧柏(63.71 mg·m⁻²·h⁻¹)>沙棘刺槐油松混交林(61.52 mg·m⁻²·h⁻¹)>油松(51.33 mg·m⁻²·h⁻¹)。此外,土壤CO₂排放通量与林型有关(表3),其中,a组沙棘刺槐混交林的土壤CO₂通量在生长季显著($P<0.05$)高于沙棘(34.01%)和刺槐(37.04%),而在非生长季则显著($P<0.05$)低于沙棘(19.52%)和刺槐(26.29%);b组刺槐侧柏混交林的年均土壤CO₂排放通量居于两种纯林之间,尤其在生长季显著($P<0.05$)低于刺槐(13.56%)且高于侧柏(40.97%);c组沙棘刺槐油松混交林在生长季/非生长季均显著($P<0.05$)低于沙棘(41.36%/47.95%)和刺槐(40.03%/52.33%),与油松差异不明显($P>0.05$)。由此看来,不同林型组成之间土壤CO₂排放通量存在一定程度的差异,在本研究中,沙棘刺槐混交林的土壤CO₂通量大小在生长季和非生长季表现出相反的规律,刺槐侧柏混交林由于种间矛盾的存在,中和了其纯林的土壤CO₂排放特征,而作为乔灌混交和针阔混交组合型的复杂林型,沙棘刺槐油松混交林土壤CO₂排放量明显降低。

2.3 不同林型土壤CH₄通量的季节变化特征

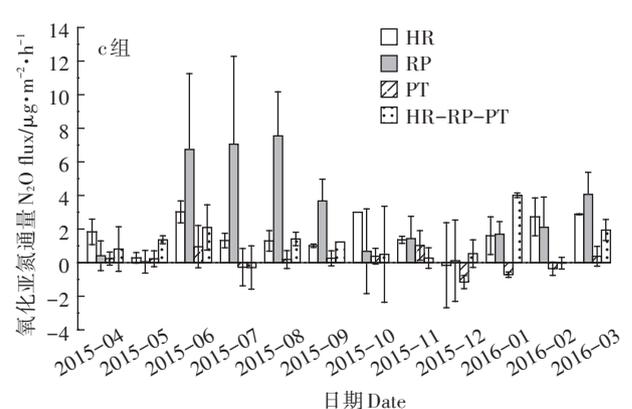
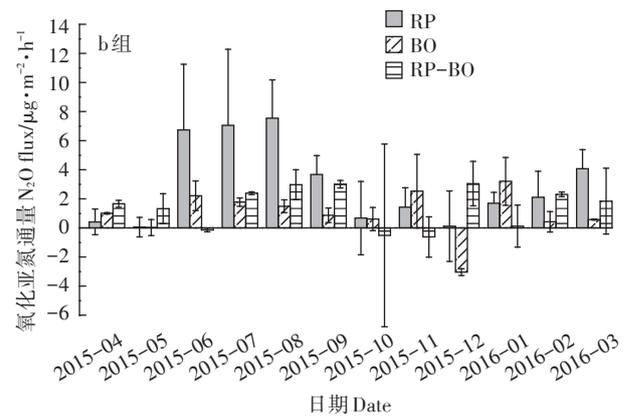
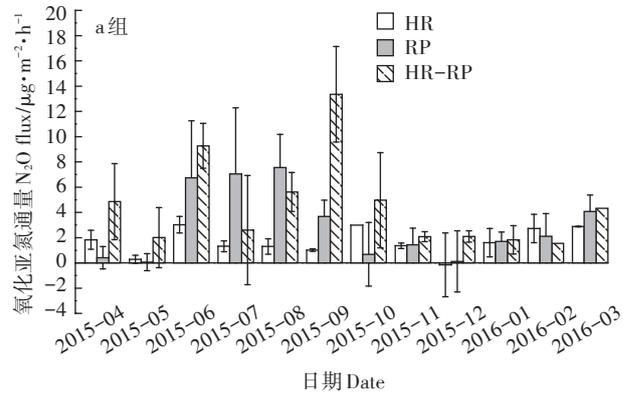
7种林型土壤CH₄通量均为负值(图3,表3),表明研究区各林型土壤对CH₄主要起吸收作用。从季节变化来看,各林型土壤CH₄吸收生长季略高于非生长季,同时,在非生长季期间各林型的土壤CH₄通量波动明显。研究中各林型年均CH₄吸收通量表现为:油松(60.82 μg·m⁻²·h⁻¹)>沙棘(56.74 μg·m⁻²·h⁻¹)>刺槐(53.23 μg·m⁻²·h⁻¹)>沙棘刺槐混交林(47.44 μg·m⁻²·h⁻¹)>刺槐侧柏混交林(47.12 μg·m⁻²·h⁻¹)>沙棘刺槐油松混交林(38.23 μg·m⁻²·h⁻¹)>侧柏(36.67 μg·m⁻²·h⁻¹)。各混交林土壤CH₄吸收通量在生长季略低于相应纯林,但差异并不显著($P>0.05$);对比非生长季各林型土壤CH₄吸收通量可以看出,a组沙棘刺槐混交林土壤CH₄吸收通量低于刺槐(3.50%),且显著($P<0.05$)低于沙棘(28.70%);b组中刺槐侧柏混交林与刺槐的土壤CH₄吸收通量差异不大($P>0.05$),但显著($P<0.05$)高于侧柏(79.65%),出现这种现象的原因可能与侧柏的浅根性、土壤易氧化有关;c组沙棘刺槐油松混交林土壤CH₄吸收通量显著($P<0.05$)低于沙棘(48.11%)、刺槐(37.00%)和油松(47.98%)。综合对比3组不同林型之间土壤CH₄通量变化特征可以发现,混交林与纯林相比,其土壤对CH₄的吸收作用

图3 不同林型土壤CH₄通量的变化特征Figure 3 Seasonal changes in soil CH₄ fluxes for the seven forests

较弱;但3种组合形式的混交林土壤CH₄吸收能力依次为:沙棘刺槐混交林>刺槐侧柏混交林>沙棘刺槐油松混交林。

2.4 不同林型土壤N₂O通量的季节变化特征

各林型土壤N₂O通量水平较低(图4),夏高冬低是几种林型土壤N₂O排放通量变化的普遍规律,在个别月份出现N₂O的净吸收现象。各林型土壤年均N₂O通量表现为:沙棘刺槐混交林(4.42 μg·m⁻²·h⁻¹)>刺槐(4.00 μg·m⁻²·h⁻¹)>刺槐侧柏混交林(1.55 μg·m⁻²·h⁻¹)>

图4 不同林型土壤N₂O通量的变化特征Figure 4 Seasonal changes in soil N₂O fluxes for the seven forests

沙棘(1.52 μg·m⁻²·h⁻¹)>沙棘刺槐油松混交林(1.05 μg·m⁻²·h⁻¹)>侧柏(0.72 μg·m⁻²·h⁻¹)>油松(-0.06 μg·m⁻²·h⁻¹)。不同林型之间N₂O通量差异显著(表3),从a组来看,沙棘刺槐混交林在生长季显著($P<0.05$)高于沙棘(407.26%),略高于刺槐(10.35%);而在非生长季,3种林型N₂O通量差异并不显著($P>0.05$)。其次,通过b组比对发现,刺槐侧柏混交林土壤N₂O通量居于刺槐和侧柏之间,生长季显著($P<0.05$)低于刺槐(73.68%),非生长季则显著($P<0.05$)高于侧柏

表3 不同林型土壤CO₂、CH₄和N₂O通量比较(平均值±标准差)Table 3 Comparison for the soil fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in seven forests (Mean±SD)

林型 Forest type	CO ₂ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹		CH ₄ /μg·m ⁻² ·h ⁻¹		N ₂ O/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	
	生长季	非生长季	生长季	非生长季	生长季	非生长季
	Growing season	Non-growing season	Growing season	Non-growing season	Growing season	Non-growing season
纯沙棘林	164.37±7.68b	51.18±6.68a	-50.23±9.17a	-63.25±8.77c	1.24±0.1b	1.8±0.43ab
刺槐纯林	160.73±15.97b	55.88±9.97a	-54.32±3.26a	-52.14±7.52bc	5.7±2.77a	2.29±0.87a
侧柏林	98.55±11.03d	28.86±0.22c	-45.07±10a	-28.26±9.97a	1.16±0.24b	0.27±0.94cd
油松	75.01±4.39e	27.64±1.18c	-58.48±5.04a	-63.15±4.37c	0.28±0.56b	-0.4±0.21d
沙棘刺槐混交林	220.27±14.94a	41.19±2.81b	-49.77±2.24a	-45.1±4.25b	6.29±3.62a	2.55±0.33a
刺槐侧柏混交林	138.93±18.21c	24.96±0.87c	-43.46±0.47a	-50.77±3.25b	1.5±1.05b	1.6±0.24ab
沙棘刺槐油松混交林	96.39±6.51de	26.64±0.59c	-43.61±1.6a	-32.85±1.82a	1.05±0.94b	1.05±0.37bc

注:不同小写字母表示不同林型相同季节差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant difference in the same season in different forest types ($P<0.05$).

(492.59%); c组沙棘刺槐油松混交林的土壤N₂O通量与沙棘之间差异不显著($P>0.05$),但显著($P<0.05$)低于刺槐(生长季/非生长季:81.15%/54.15%),与油松的差异仅表现在非生长季,油松的土壤N₂O排放通量较低但季节变化明显,尤其在冬季油松的土壤N₂O通量出现负值,此时其土壤明显作为N₂O的库,因此显著($P<0.05$)低于其混交林(138.1%),其他几种林型仅在极低气温的月份出现负值但并不持久。总体来看,各林型土壤N₂O通量表现出与土壤CO₂相似的规律,即沙棘刺槐混交林土壤N₂O排放量在3种组合形式的混交林中居于首位,刺槐侧柏混交林居中,而沙棘刺槐油松混交林土壤N₂O排放量最低。

2.5 温室气体通量与土壤温度和土壤含水量的关系

各林型土壤CO₂排放与土壤温度均呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)指数正相关(图5),但不同林型及不同土层深度的相关性存在差异。其中,沙棘刺槐混交林和刺槐侧柏混交林土壤CO₂与土壤温度的相关性与其纯林相比较低,而沙棘刺槐油松混交林土壤CO₂与温度的相关性则高于其纯林;同时,5~20 cm深度的土壤CO₂与土壤温度的相关性整体高于0~5 cm土层。各林型土壤表面CH₄通量与土壤温度呈线性负相关,但相关性较低,仅侧柏的土壤CH₄通量与土壤温度具有极显著($P<0.01$)相关性,且在0~5 cm深度上的相关性高于5~20 cm土层;沙棘刺槐混交林仅在0~5 cm土层深度上与土壤温度呈显著($P<0.05$)相关,其他林型无明显相关性。在土壤N₂O排放中,仅刺槐和油松与土壤温度呈线性显著($P<0.05$)正相关,且刺槐土壤N₂O在5~20 cm深度上与土壤温度的相关性高于0~5 cm,而油松土壤N₂O仅在5~20 cm深度上与土壤温度相关,在0~5 cm深度上未表现出相关性。

土壤含水量与各林型土壤CO₂表现为负相关性(图6)。其中,沙棘刺槐油松混交林土壤CO₂与土壤含水量相关性最高,且在5~20 cm深度上相关性高于0~5 cm土层;刺槐和油松的土壤CO₂与土壤含水量的相关性在0~5 cm深度上高于5~20 cm土层;而沙棘刺槐混交林土壤CO₂仅在0~5 cm深度上与土壤含水量显著($P<0.05$)相关,其他林型土壤CO₂与土壤含水量相关性不显著($P>0.05$)。各林型土壤CH₄通量与土壤含水量的关系相对复杂,其拟合曲线是开口向上的抛物线,即随土壤含水量的增加,土壤对CH₄的吸收量先增加后减少,且这种现象只在侧柏和沙棘刺槐混交林0~5 cm土层深度中表现显著($P<0.05$)。而各林型土壤N₂O对土壤含水量的响应较弱($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 不同林型土壤表面CO₂通量排放特征

在土壤温湿度的影响下,土壤呼吸速率具有明显的季节变化^[11-13]。本研究中,各林型土壤CO₂通量均为夏高冬低,这是因为夏季土壤温度高,水分条件适宜,植被生长旺盛,而冬季与之相反,且黄土台塬冬季降雪频繁,温度比同纬度其他区域更低,冰雪覆盖下表层土壤易形成季节性冻土,阻碍土壤中CO₂向大气扩散。研究表明,针叶林、乔灌-针阔组合型混交林土壤CO₂排放量较低,其次为针阔混交林,而乔灌混交林及其纯林土壤CO₂通量较高。这与Raich等^[14]的研究结果相符。各林型土壤CO₂排放特征与不同森林类型之间凋落物数量、有机质含量、氮素数量、pH及土壤容重等差异有关^[15],在本研究中,针叶林(油松)土壤全氮、有机碳含量均低于其他林型(表2),相关分析显示(表4),土壤CO₂通量与土壤有机碳呈显

著 ($R_{\text{SOC}5-20}=0.85, P<0.05$) 正相关, 与全氮呈极显著 ($R_{\text{TN}0-5}=0.90, P<0.01$) 正相关, 这与耿远波等^[16]的研究一致, 土壤有机碳为异氧呼吸提供物质基础, 而土壤呼吸与反硝化作用有较好的相关性, 这与氮能刺激植物初级生产为土壤呼吸提供更多底物有关^[13], 同时, 氮含量的高低又会影响 C/N, 但目前对于 C/N 与土壤

CO_2 的关系还不明确, 本研究中, 两者有一定的正相关关系, 但未达显著性水平 ($P>0.05$)。在本文中, 土壤 pH 对土壤 CO_2 的影响并不显著 ($P>0.05$), 有研究^[17]指出 pH 并不是造成土壤温室气体排放差异的原因, 而是通过酸化累计过程影响土壤碳、氮等养分从而间接影响 CO_2 排放。此外, 通过枯枝落叶的分解向大气

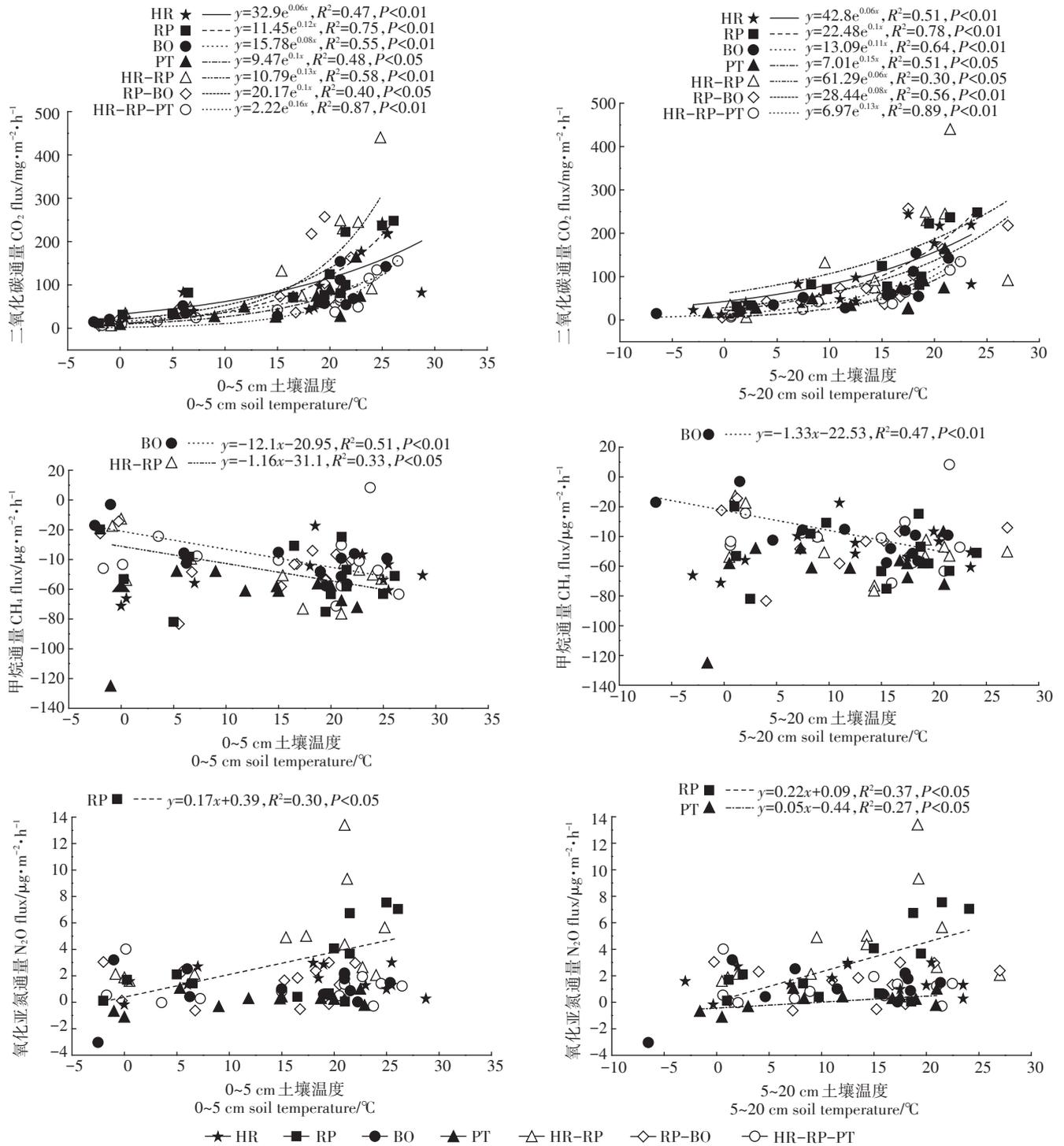


图5 温室气体与0~5、5~20 cm土壤温度的关系

Figure 5 Relationship between soil greenhouse gases and soil temperature at 0~5 cm and 5~20 cm depths for the seven forests

释放 CO₂ 是土壤碳循环的一个重要环节^[15], 与其他林型相比, 针叶分解速度较慢。有研究^[18]指出刺槐和油松之间存在异株克生现象, 刺槐作为速生大冠阔叶树种, 当用其作油松的伴生树种时, 超过一定的比例会压制油松的生长, 因而沙棘刺槐油松混交林具有明显的低 CO₂ 排放特征。而乔灌混交林及其纯林土壤养分含量较高, 又具备较低的土壤容重, 故其土壤 CO₂ 排放速率较快。针阔混交林因其合理的林分结构, 土

壤肥力较好, 土壤呼吸速率在各林型中处于中等水平。进一步分析混交林及其构成纯林之间土壤 CO₂ 排放差异可能与土壤温湿度有关, 土壤温度和水分是森林土壤呼吸的重要环境因子, 但两者的影响机制有所差异^[12, 19], 以研究区刺槐侧柏混交林为例, 植被在生长季温度条件适宜的情况下, 土壤含水量极易成为土壤呼吸的限制因素, 研究表明, 刺槐侧柏混交林在生长季土壤含水量显著 ($P < 0.05$) 低于刺槐且高

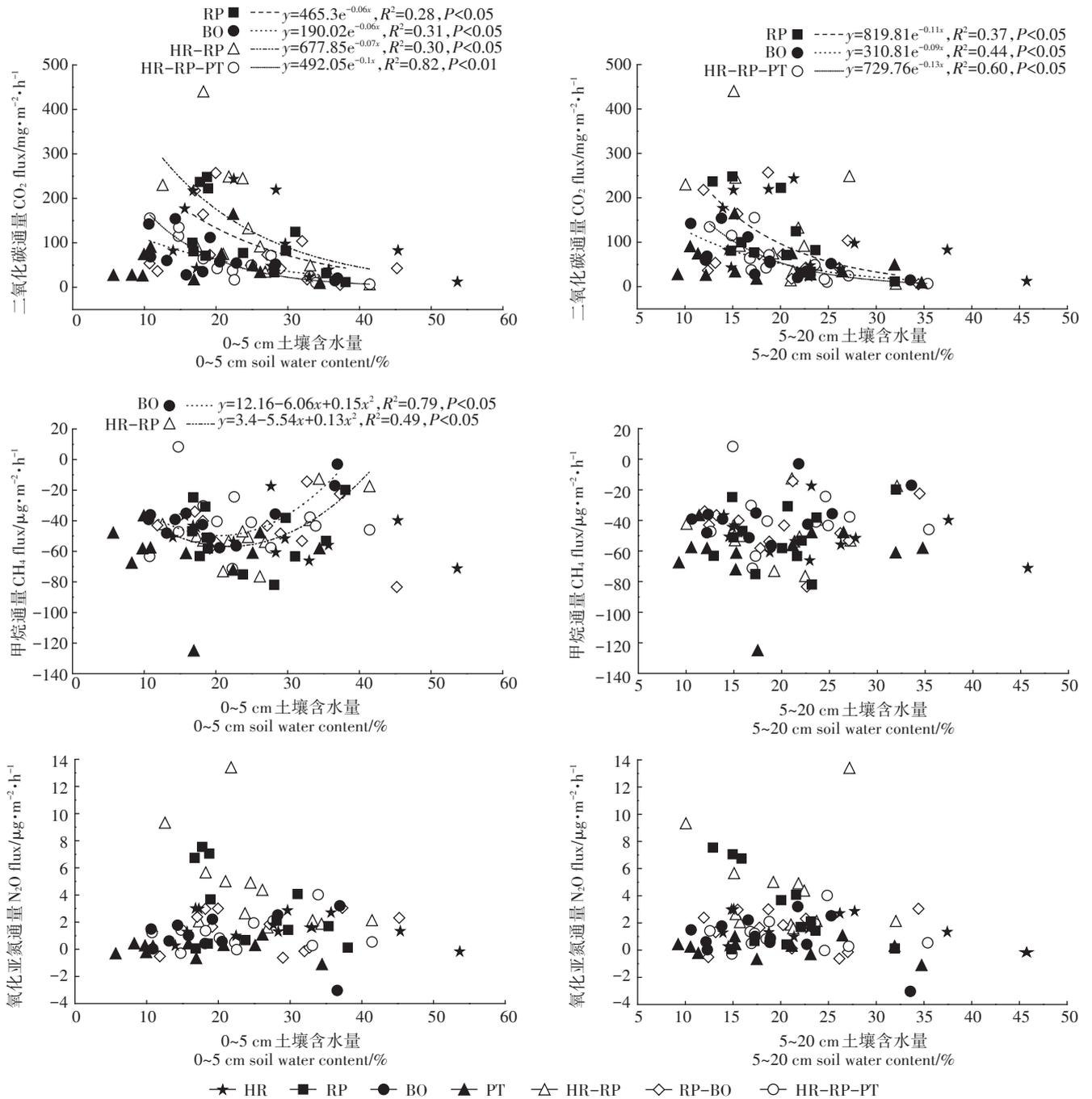


图6 温室气体与0~5、5~20 cm土壤水分的关系

Figure 6 Relationship between soil greenhouse gases and soil water content at 0~5 cm and 5~20 cm depths for the seven forests

表4 森林温室气体排放速率与土壤理化性质的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between greenhouse gas fluxes rate and physicochemical properties at different soil depths

项目	全氮 TN		有机碳 SOC		碳氮比 T/N		溶解性有机碳 DOC		硝态氮 NO ₃ ⁻ -N		铵态氮 NH ₄ ⁺ -N		pH		容重 Bulk density	
	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20
CO ₂	0.90**	-0.38	0.27	0.85*	-0.09	0.7	0.08	0.62	0.74	-0.32	0.86*	-0.09	0.47	0.58	-0.25	-0.35
CH ₄	0.25	0.14	0.37	0.33	0.24	0.01	0.35	0.41	-0.18	-0.21	0.04	0.42	-0.02	0.75	0.03	-0.23
N ₂ O	0.94**	-0.61	0.06	0.67	-0.29	0.83*	-0.07	0.79*	0.73	-0.5	0.94**	0.17	0.63	0.59	0.06	-0.09

注:**代表在0.01水平(双侧)上显著相关;*代表在0.05水平(双侧)上显著相关。0~5,5~20为土层深度,单位cm。

表5 不同林型土壤呼吸的温度敏感性指数(Q₁₀)Table 5 Temperature-sensitive index(Q₁₀) of soil respiration at different soil depths for the seven forests

	纯沙棘林	刺槐纯林	侧柏林	油松	沙棘刺槐混交林	刺槐侧柏混交林	沙棘刺槐油松混交林
0~5 cm 土壤温度	1.88	3.24	2.28	2.81	3.67	2.63	5
5~20 cm 土壤温度	1.91	2.74	3	3.62	1.75	2.2	3.84

于侧柏,这一现象与其土壤CO₂排放特征具有相似性。受地表大气温度影响,0~5 cm土壤温度与土壤CO₂的相关性低于5~20 cm土壤温度,通过计算各林型Q₁₀值发现(表5),灌木林和针叶林土壤呼吸对0~5 cm土壤温度的敏感性低于5~20 cm土层深度,这与众学者^[20-21]的研究一致。相关研究^[22]表明,Q₁₀值与底物供应的季节变化存在正相关性,阔叶林凋落物累积量常常较纯林多,对照0~5 cm土层各林型发现,落叶阔叶林和混交林Q₁₀值高于灌木和针叶林。大量研究^[19,23]表明土壤含水量与土壤CO₂呈正相关,在本研究中,各林型土壤CO₂与土壤含水量为负相关,这与前人研究结果不同,造成本研究结果与以往研究不同的原因可能是研究区气候条件复杂,尤其是水、热不同期,土壤含水量升高时土壤温度反而降低,低温造成土壤微生物活性降低,土壤呼吸作用减弱,同时较高的含水量造成土壤孔隙度变小,进而抑制了土壤CO₂的排放。

3.2 不同林型土壤表面CH₄通量排放特征

研究期间,各林型土壤均为CH₄汇,这与众学者^[24-25]研究结果相符。研究表明,各林型土壤CH₄通量在生长季无显著(P>0.05)差异,但在非生长季差异显著(P<0.05),这是由于研究区在非生长季内土壤含水量较高,而CH₄氧化主要受土壤通气状况的影响,低温高湿的土壤环境不利于土壤CH₄氧化。同时,土壤冻融交替过程也会影响土壤通气状况和氧化还原条件^[26],各林型土壤CH₄吸收能力在2月份急剧下降,这是因为冬季冻结土壤营造的厌氧环境下产生了大量CH₄气体,土壤解冻后会释放其储存的CH₄。有研

究^[27]指出,CH₄排放与易矿化碳存在明显线性关系,DOC作为微生物生长的速效基质,能显著提高CH₄生成量^[16,27],尽管本文中两者相关性并不显著(P>0.05),但相比土壤全氮、有机碳含量及C/N,该土壤养分含量对CH₄通量的解释率较高(R_{DOC/5-20}=0.41)(表4)。pH对土壤CH₄排放通量的影响主要通过改变土壤微生物和酶实现,研究发现森林土壤甲烷氧化菌最适土壤pH约为5.0~6.5^[28],研究区各林型土壤pH值偏弱碱性,对土壤CH₄氧化的影响较低。无机氮对森林土壤CH₄吸收的贡献目前还不明确,很多学者在研究中均指出NH₄⁺浓度对CH₄吸收具有抑制作用,并将其解释为NH₃与CH₄在甲烷单氧化酶上的竞争^[29],但在本研究中土壤CH₄排放与NH₄⁺相关性不显著(P>0.05),这可能与研究区土壤NH₄⁺-N含量较低,植被生长成为氮素竞争的优先者有关。以非生长季乔灌-针阔组合型混交林及其纯林土壤CH₄吸收为例,对比纯林与混交林土壤温度发现,各林型之间非生长季土壤温度差异并不明显(P>0.05),而混交林土壤含水量则在其构成纯林之间浮动,由此可见,土壤湿度对不同林型土壤CH₄吸收具有潜在影响,但其影响机制较复杂,本研究发现,土壤含水量与森林土壤CH₄通量并不是简单的线性关系,在植被生长过程中对土壤水分的生理需求较大,土壤水分的微弱变化就能引起土壤微生物活性的剧烈变化,同时,不同林型在生长过程中所需土壤湿度的最适阈值不同,即当土壤含水量处于植物生长最适区间时,有助于土壤对CH₄的吸收,而当土壤含水量过高或过低时,均会抑制CH₄氧化速率。这与以往研究^[15]结果一致。相关分析显示,土壤温度

对针叶林(侧柏)和乔灌混交林土壤 CH_4 吸收具有促进作用,而其他几种林型土壤 CH_4 通量与土壤温度相关性不显著($P>0.05$),这是因为温度的影响只有在特定水分条件下才能表现出来,而各林型之间土壤含水量存在一定差异;同时,0~5 cm深度的土壤温度与针叶林土壤 CH_4 相关性较高,这可能与0~5 cm深度的土层中能被微生物分解的有机物质含量高有关。Hansen等^[2]在其研究中也证实了 CH_4 氧化作用主要发生在表层土壤之中,随土层深度增加土壤 CH_4 的氧化作用逐渐减弱。

3.3 不同林型土壤表面 N_2O 通量排放特征

各林型土壤 N_2O 排放通量与已有研究^[30]相比排放水平较低,这是由于土壤 N_2O 主要来源于外界人为施氮,而研究对象位于封山育林区,人为影响较小,故土壤 N_2O 排放量较低。崔骁勇等^[19]在其研究中指出,受高温季节的影响,土壤 N_2O 排放会达到高峰,这与本研究中各林型土壤 N_2O 排放整体呈夏季高、冬春低的规律较为一致。不同林型组成之间由于土壤养分、土壤质地及土壤温湿度等理化指标不同,进而影响到土壤硝化和反硝化过程,造成各林型土壤 N_2O 的排放差异^[31]。近年来众学者将氮素水平作为研究土壤 N_2O 的重点,徐慧等^[30]在其研究中指出土壤N含量是影响土壤 N_2O 的重要因素,同时,土壤中DOC及 NO_3^- -N作为土壤硝化和反硝化过程的基质,将明显影响 N_2O 的排放^[32],充足的DOC会刺激土壤中微生物的活性,加快土壤中 O_2 消耗,为反硝化过程创造低氧环境; NO_3^- -N作为反硝化过程的底物,对反硝化强度有直接影响,但存在影响界限,即当 NO_3^- -N浓度大于 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤反硝化速率不受 NO_3^- -N含量的影响,上述研究结果在本研究中也得到了证实(表4),即土壤全氮和DOC与土壤 N_2O 排放呈极显著或显著($R_{\text{TN}0-5}=0.94, P<0.01; R_{\text{DOC}5-20}=0.79, P<0.05$)相关,而 NO_3^- -N与土壤 N_2O 相关性并不显著($P>0.05$);同时,本研究C/N值普遍低于25~30:1(土壤微生物适宜有机质C/N^[33]),微生物活性较强,促进土壤 N_2O 的产生。李海防等^[34]在其研究中曾指出固氮植物能直接通过根瘤菌参与下的硝化、反硝化作用或间接增加N量促进 N_2O 的排放。在本文中,沙棘属于非豆科固氮树种,刺槐属于豆科固氮树种^[35],根部具有固氮作用的根瘤菌,极大提高了混交林的土壤N含量,针阔混交林作为固氮和非固氮树种的混交林,提高了非固氮树种土壤肥力。而针叶林作为非固氮树种,其土壤N含量较低,在非生长季,针叶林(油松)的土壤 N_2O 排放

通量为负值,说明在一定条件下土壤对 N_2O 具有吸收作用,此结论与前人^[7,36]研究结果一致;此外,在冬季冰雪覆盖条件下,厌氧环境的形成也可能使土壤中的 N_2O 继续转化为 N_2 ,进而出现排放负值。土壤pH对硝化和反硝化过程的影响较复杂,在本研究中各林型土壤pH值(7.84~8.24)接近,与土壤 N_2O 之间没有明显的相关性,对研究区各林型土壤 N_2O 排放差异并不构成影响。除刺槐和油松外,各林型土壤 N_2O 通量尽管表现出随温度升高和湿度下降而增大的趋势,但并不显著($P>0.05$),考虑到研究区 N_2O 排放通量水平较低,水热交替变化,无益于硝化和反硝化作用产生 N_2O ,而5~20 cm深处的土壤温度对刺槐和油松土壤 N_2O 的影响较高,这可能与两种植被本身的深根性、喜干冷气候有关。

4 结论

(1)黄土台塬7种林型土壤均为 CO_2 和 N_2O 的排放源, CH_4 的吸收汇。

(2)不同林型土壤温室气体季节排放或吸收存在差异,在生长季,乔灌混交林土壤 CO_2 通量显著高于纯林,针阔混交林土壤 CO_2 通量居于针、阔叶纯林之间,而乔灌-针阔组合型混交林的土壤 CO_2 通量则低于阔叶林高于针叶林,在非生长季,3种混交林均低于其纯林;在土壤 CH_4 吸收中,3种混交林的土壤 CH_4 吸收能力均低于其纯林;在土壤 N_2O 排放中,乔灌混交林土壤 N_2O 排放能力高于其纯林,针阔混交林居于针、阔叶纯林之间,而乔灌-针阔组合型混交林低于阔叶林高于针叶林。3种组合方式的混交林土壤 CO_2 、 N_2O 排放和 CH_4 吸收能力从高到低依次为:乔灌混交林>针阔混交林>乔灌-针阔组合型混交林。

(3)不同组合方式的混交林土壤温室气体与土壤温湿度的相关性不同,与纯林、乔灌混交林以及针阔混交林相比,乔灌-针阔组合型混交林土壤 CO_2 与土壤温湿度的相关性最高,其土壤 CO_2 排放量随土壤温湿度的升高而增加;森林土壤对 CH_4 的吸收随土壤温度升高而增加,但对土壤含水量有一定的适应范围,当超过一定的阈值时,土壤对 CH_4 的吸收能力会随之减弱;各林型土壤 N_2O 与土壤温湿度相关性较低,仅针、阔叶纯林土壤 N_2O 表现出与土壤温度的正相关性,其他林型与土壤温湿度均无显著相关性。

参考文献:

[1] 刘实,王传宽,许飞.4种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲

- 烷和氧化亚氮通量[J]. 生态学报, 2010, 30(15):4075-4084.
- LIU Shi, WANG Chuan-kuan, XU Fei. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15):4075-4084.
- [2] Hansen J E, Laci A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(6286):713-719
- [3] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(04):966-975.
- ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):966-975.
- [4] Firestone M K, Davidson E A, Andreae M O, et al. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil[J]. *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems & the Atmosphere*, 1989, 47:7-21.
- [5] Smith K A, Thomson P E, Clayton H, et al. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(19):3301-3309.
- [6] Ambus P, Robertson G P. The Effect of increased N deposition on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes from unmanaged forest and grassland communities in Michigan[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 79(3):315-337.
- [7] 王颖, 王传宽, 傅民杰, 等. 四种温带森林土壤氧化亚氮通量及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5):1007-1012.
- WANG Ying, WANG Chuan-kuan, FU Min-jie, et al. Soil nitrous oxide emission in four temperate forests in northeastern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5):1007-1012.
- [8] 姜艳, 王兵, 汪玉如, 等. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7):1641-1648.
- JIANG Yan, WANG Bing, WANG Yu-ru, et al. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7):1641-1648.
- [9] 吴健利, 刘梦云, 赵国庆, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤有机碳矿化及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):1006-1015.
- WU Jian-li, LIU Meng-yun, ZHAO Guo-qing, et al. Effects of land-use types on soil organic carbon mineralization and greenhouse gas emissions in Loess tableland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):1006-1015.
- [10] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2228-2235.
- LI Xin-hua, ZHU Zhen-lin, DONG Hong-yun, et al. Effects of different return modes of wheat straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration of maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2228-2235.
- [11] 刘惠, 赵平, 孙谷畴, 等. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1):57-62.
- LIU Hui, ZHAO Ping, SUN Gu-chou, et al. Characteristics of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1):57-62.
- [12] 刘颖, 韩士杰. 长白山四种森林土壤呼吸的影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3):1061-1065.
- LIU Ying, HAN Shi-jie. Factors controlling soil respiration in four types of forest of Changbai Mountains, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3):1061-1065.
- [13] 徐洪灵, 张宏, 张伟. 川西北高寒草甸土壤理化性质对土壤呼吸速率影响研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2012, 35(6):835-841.
- XU Hong-ling, ZHANG Hong, ZHANG Wei. Influence of soil physical and chemical properties on soil respiration rate of alpine meadow in the northwestern plateau of Sichuan Province[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 2012, 35(6):835-841.
- [14] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):71-90.
- [15] 菊花, 申国珍, 马明哲, 等. 北亚热带地带性森林土壤温室气体通量对土地利用方式改变和降水减少的响应[J]. 植物生态学报, 2016, 40(10):1049-1063.
- JU Hua, SHEN Guo-zhen, MA Ming-zhe, et al. Greenhouse gas fluxes of typical northern subtropical forest soils: Impacts of land use change and reduced precipitation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(10):1049-1063.
- [16] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性[J]. 地理学报, 2001(1):44-53.
- GENG Yuan-bo, ZHANG Shen, DONG Yun-she, et al. The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlation between their content and fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in Xilin river basin steppe[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001(1):44-53.
- [17] 时秀焕, 张晓平, 梁爱珍, 等. 土壤CO₂排放主要影响因素的研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(3):761-768.
- SHI Xiu-huan, ZHANG Xiao-ping, LIANG Ai-zhen, et al. Advance in the main factors controlling soil carbon dioxide flux[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3):761-768.
- [18] 张鼎华. 森林植物间的异株克生[J]. 林业科技通讯, 1989, 2(2):1-3.
- ZHANG Ding-hua. Heterosis between forest plants[J]. *Forest Science and Technology*, 1989, 2(2):1-3.
- [19] 崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(2):315-325.
- CUI Xiao-yong, CHEN Zuo-zhong, CHEN Si-qing. Progress in research on soil respiration of grasslands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2):315-325.
- [20] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12):6366-6376.
- YAN Jun-xia, QIN Zuo-dong, ZHANG Yi-hui, et al. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeform*

- forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12):6366—6376.
- [21] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed wood forest[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2006, 140(1-4):244-256.
- [22] Janssens I A, Carrar A A, Ceulemans R. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2):161-169.
- [23] 刘跃辉, 艾力·买买提依明, 杨帆, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季土壤呼吸及其驱动因子[J]. *生态学报*, 2015, 35(20):6711-6719.
LIU Yue-hui, AI Li-maimaitiyiming, YANG Fan, et al. Environmental factors driving winter soil respiration in the hinterland of the Taklimakan Desert, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20):6711-6719.
- [24] 孙贇, 林杉, Muhammad Shaaban, 等. 鄂南棕红壤区不同植茶年限茶园 CH_4 通量特征[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10):3995-4003.
SUN Yun, LIN Shan, Muhammad S, et al. Characteristics of CH_4 fluxes in tea field with different planting years in the brown-red soil of southern Hubei[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10):3995-4003.
- [25] 耿世聪, 陈志杰, 张军辉, 等. 长白山三种主要林地土壤甲烷通量[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5):1091-1096.
GENG Shi-cong, CHEN Zhi-jie, ZHANG Jun-hui, et al. Soil methane fluxes of three forest types in Changbai Mountain of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5):1091-1096
- [26] 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2):387-395.
CHEN Zhe, HAN Rui-yun, YANG Shi-qi, et al. Fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):387-395.
- [27] Yahi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields soil[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1990, 36:559-610.
- [28] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等. 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(15):4914-4923.
CHENG Shu-lan, FANG Hua-jun, YU Gui-rui, et al. The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15):4919-4923.
- [29] Chan A S K, Steudler P A. Carbon monoxide uptake kinetics in unamended and longterm nitrogen amended temperate forest soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, 57(3):343-54.
- [30] 徐慧, 陈冠雄, 马成新. 长白山北坡不同土壤 N_2O 和 CH_4 排放的初步研究[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(4):373-377.
XU Hui, CHEN Guan-xiong, MA Cheng-xin. A preliminary study on N_2O and CH_4 emissions from different soils on northern slopes of Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4):373-377.
- [31] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. *土壤学进展*, 1995, 23(6):35-42.
FENG Ke, YIN Shi-xue. Soil factors affecting the formation and fluxes of N_2O [J]. *Progress in Soil Science*, 1995, 23(6):35-42.
- [32] 王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 等. 蚯蚓作用下不同 C/N 秸秆还田对土壤 CO_2 及 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9):1908-1915.
WANG Zheng-yan, LEI Zi-yan, YE Zhi-xiong, et al. Influence of earthworm activity on soil CO_2 and N_2O emissions by incorporating different C/N residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1908-1915.
- [33] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭, 等. 农田土壤 N_2O 生成与排放影响因素及 N_2O 总量估算的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3):124-128.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, DONG Wen-xu, et al. The influencing factors of production and emission of N_2O from agricultural soil and estimation of total N_2O emission[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3):124-128.
- [34] 李海妨, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. *生态环境*, 2007, 16(06):1781-1788.
LI Hai-fang, XIA Han-ping, XIONG Yan-mei, et al. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: A review[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1781-1788.
- [35] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同林分结构土壤有机碳质量分数特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6):1418-1427.
LIU Meng-yun, CHANG Qing-rui, QI Yan-bing, et al. Soil organic carbon under different planting structures on the tablelands of Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6):1418-1427.
- [36] 孙向阳, 徐化成. 北京低山区两种人工林土壤中 N_2O 排放通量的研究[J]. *林业科学*, 2001, 37(5):57-63.
SUN Xiang-yang, XU Hua-cheng. Emission flux of nitrous oxide from forest soils in Beijing[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5):57-63.