

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171124

刘欢, 刘梦云, 刘丽雯, 赵国庆, 张杰, 张萌萌, 李笑然. 黄土台塬不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 通量特征及主控因子分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 937-947

LIU H, LIU M Y, LIU L W, ZHAO G Q, ZHANG J, ZHANG M M, LI X R. CH<sub>4</sub> flux characteristics and influencing factors in six land use patterns in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(7): 937-947

## 黄土台塬不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 通量特征 及主控因子分析\*

刘欢<sup>1,2</sup>, 刘梦云<sup>1,2\*\*</sup>, 刘丽雯<sup>1,2</sup>, 赵国庆<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>, 张萌萌<sup>1,2</sup>, 李笑然<sup>1,2</sup>

(1. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室/西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100;

2. 农业部农业环境重点实验室 北京 100081)

**摘要:** 土地利用转变会导致土壤微环境及生理生化过程发生改变, 继而影响土壤温室气体的产生和排放。目前关于土地利用转变对温室气体通量的研究主要集中于 CO<sub>2</sub>, 而对 CH<sub>4</sub> 研究甚少。本文以黄土台塬为研究区, 重点分析不同土地利用方式的土壤 CH<sub>4</sub> 通量特征与其影响因素的关系, 并明确其关键影响因子, 为预测整个黄土台塬土地利用方式转变对温室效应的贡献提供基础数据。以陕西省永寿县马莲滩林场为研究对象, 于 2015 年 4 月—2016 年 3 月, 采用静态箱-气相色谱法, 对耕地、天然草地、灌木林地、乔灌混交林地、乔木林地和果园的 CH<sub>4</sub> 通量特征进行研究, 并分析土壤 CH<sub>4</sub> 通量与土壤温度、地表温度、含水量及全氮的关系。不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 平均通量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但表现相似的季节变化, 呈现夏秋季高于冬春季特征。林地、园地、耕地土壤均为 CH<sub>4</sub> 吸收汇, 其吸收能力(平均值)为乔灌混交林 ( $51.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > 乔木林 ( $44.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > 灌木林 ( $31.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > 草地 ( $25.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > 果园 ( $18.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > 耕地 ( $14.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )。不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤温度、全氮和地表大气温度均呈正相关; 与土壤含水量呈负相关。其土壤表层(0~20 cm)温度是 6 种土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的主要影响因素。总之, 自然条件下的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收率明显高于农业土壤 CH<sub>4</sub> 吸收率, 耕地转变为林地后土壤的 CH<sub>4</sub> 吸收能力增强, 土壤对减缓温室效应的贡献增大。

**关键词:** 黄土台塬; 土地利用方式; 土壤 CH<sub>4</sub> 通量; CH<sub>4</sub> 汇; 耕地; 林地

中图分类号: S152.6 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)07-0937-11

## CH<sub>4</sub> flux characteristics and influencing factors in six land use patterns in the Loess Plateau \*

LIU Huan<sup>1,2</sup>, LIU Mengyun<sup>1,2\*\*</sup>, LIU Liwen<sup>1,2</sup>, ZHAO Guoqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Mengmeng<sup>1,2</sup>, LI Xiaoran<sup>1,2</sup>

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

\* 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306)和农业部农业环境重点实验室开放基金项目资助

\*\* 通信作者: 刘梦云, 研究方向为土地资源利用及地理信息系统研究。E-mail: lmy471993@qq.com

刘欢, 研究方向为资源环境监测与评价。E-mail: 1220992824@qq.com

收稿日期: 2017-12-03 接受日期: 2018-02-18

\* This study was supported by the Key Project of Chinese Academy of Sciences (KFZD-SW-306) and the Open Fund of Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agricultural Environment.

\*\* Corresponding author, E-mail: lmy471993@qq.com

Received Dec. 3, 2017; accepted Feb. 18, 2018

**Abstract:** Change in land use can influence soil micro-environment along with microbial, physiological and biochemical processes, significantly affecting the generation and emission of greenhouse gases. At present, researches on greenhouse gas flux from land use transformation have mainly focused on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), largely neglecting methane (CH<sub>4</sub>) generation and emission. This study determined the characteristics of soil CH<sub>4</sub> fluxes and the influencing factors, also highlighting the critical factors of different land use patterns (cultivated land, natural grassland, shrub land, arbor and shrub land, arbor land and orchard). The study laid the basis for predicting the contribution of land-use-driven transformation to greenhouse effects in the Loess Plateau region. The study was conducted in Malian Forest Farm of Yongshou County, Shaanxi Province. In the study, soil CH<sub>4</sub> fluxes in different land use types were measured during the period from April 2015 to March 2016 using static chamber chromatograph techniques. The related environmental factors were recorded, including soil temperature, soil moisture, surface temperature and soil total nitrogen content. The results indicated that soils were CH<sub>4</sub> sink under different land use types. There were significant differences ( $P < 0.05$ ) in CH<sub>4</sub> uptake fluxes in different land use types. Soil CH<sub>4</sub> fluxes in six land use types had similar seasonal variations, higher in summer and autumn than in winter and spring. Average soil CH<sub>4</sub> uptake was in the order of arbor and shrub land ( $51.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > arbor land ( $44.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > shrub land ( $31.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > natural grassland ( $25.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > orchard ( $18.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) > cultivated land ( $14.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Soil CH<sub>4</sub> uptake fluxes in different land use types were positively correlated with soil temperature, surface temperature and total nitrogen, and negatively correlated with soil moisture. Soil temperature at the 0–20 cm soil layer was the main layer of production of soil CH<sub>4</sub> fluxes in six land use types. The uptake CH<sub>4</sub> under natural soil conditions was significantly higher than that in agricultural soils. The transformation of cultivated land to forest land increased CH<sub>4</sub> uptake, enhancing the mitigation of greenhouse effect of soil.

**Keywords:** Loess Plateau; Land use type; Soil CH<sub>4</sub> flux; CH<sub>4</sub> sink; Cultivated land; Forest land

温室效应造成气温升高、冰川融化、生物多样性锐减等环境问题。由于空气中甲烷(CH<sub>4</sub>)含量远低于 CO<sub>2</sub>, 导致对其温室效应贡献的关注度较少。但 CH<sub>4</sub> 温室效应极强, 在百年尺度上, 单位质量 CH<sub>4</sub> 全球增温潜势(global warming potential, GWP)是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍<sup>[1]</sup>。世界气象组织发布的《2011 年 WMO 温室气体公布》显示, 空气中 CH<sub>4</sub> 比工业革命前增加了 159%, 且目前仍持续增长<sup>[2]</sup>, 随着 CH<sub>4</sub> 浓度增加, 必将导致其温室效应增强。据统计, 2011 年 CH<sub>4</sub> 对温室效应的贡献率已达到 18%<sup>[3]</sup>。

不同的土地管理措施以及土地利用方式等均会改变土壤作为 CH<sub>4</sub> 源或汇的作用, 且自然条件的土壤 CH<sub>4</sub> 通量特征差别也很大。如温带地区森林生态系统土壤全年大都表现为 CH<sub>4</sub> 吸收汇<sup>[4]</sup>, 而热带亚热带地区农田系统大都表现为 CH<sub>4</sub> 排放源<sup>[5]</sup>。我国对土壤 CH<sub>4</sub> 源汇研究主要集中于森林、农田及草地生态系统的土壤。如北京低山区<sup>[6]</sup>、华南丘陵<sup>[7]</sup>、华北平原冬麦田<sup>[8]</sup>、天然草地土壤 CH<sub>4</sub> 吸收等<sup>[9]</sup>, 而对地处暖温带的黄土台塬不同土地利用土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的研究尚少见报道。

随着对温室效应的重视, 众多学者对黄土台塬不同土地利用方式温室气体的变化及其环境因子也做了相关研究<sup>[10-12]</sup>, 但均停留在 CO<sub>2</sub> 排放所引起的温室效应, 对仅次于 CO<sub>2</sub> 的 CH<sub>4</sub> 研究却鲜有报道, 因此, 开展对黄土台塬土壤 CH<sub>4</sub> 通量的研究就显得

尤为重要。揭示不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 通量特征与其影响因素的关系, 并初步明确其关键的影响因子, 可为预测整个黄土台塬土地利用方式转变对温室效应的贡献提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省咸阳市永寿县马莲滩林场 (34°47'58.4"~34°48'42.7"N, 108°05'22.6"~108°05'39.3"E), 属典型的黄土台塬沟壑区。气候为暖温带半湿润偏干旱类型, 夏季炎热少雨, 冬季寒冷干燥; 年均温 10.8 °C, 年均降雨量 601.6 mm, 干旱指数 1.73~1.80, 无霜期 210 d, 2015 年 4 月—2016 年 3 月气温与降雨量的季节性变化如图 1 所示。典型土壤为黑垆土。样区内的耕地曾经为主要的用地类型, 但目前除小部分农地被保留, 其余已被改为林地、撂荒草地和核桃园地。耕地为一年 1 熟制, 主要种植小麦(*Triticum aestivum*); 林地植被以油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus spach*)、刺槐(*Robonia pseudoacacia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主; 果园为幼龄(<10 a)核桃树(*Juglans regia*)。

### 1.2 气体样品采集与分析

选用研究区 6 种用地类型进行布点, 遵循典型性及恢复阶段相近的两个原则, 选取 17 个具有代表性的样点, 每个样点做 3 次重复, 具体信息见表 1 和表 2。试验于 2015 年 4 月—2016 年 3 月进行, 采样时间选每月中旬天气晴朗时候, 于当日 10:00—

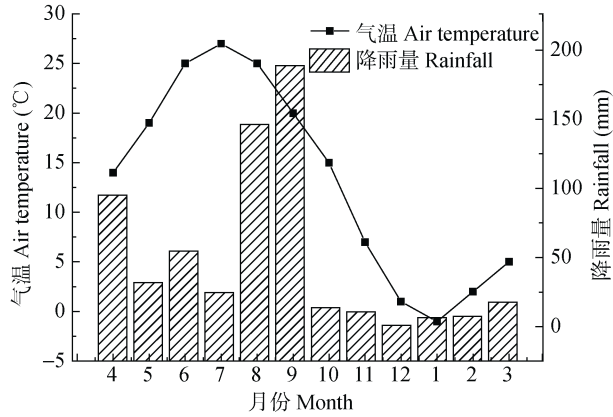


图 1 研究区试验期间(2015 年 4 月—2016 年 3 月)气温和降雨量的季节性变化

Fig. 1 Seasonal variations of air temperature and rainfall during the experiment period (from April 2015 to March 2016) in the study area

12:00 进行气体收集, 此时间段内温度变化最小, 并假定此阶段内测定值能够代表当日气体交换通量<sup>[13]</sup>。其具体实施方法为静态箱-气相色谱法<sup>[14]</sup>。样点选取平坦均匀分布的植被或作物间, 安置前将基座内绿色植物齐地剪掉, 尽可能不破坏表层土壤特性。安置时, 将箱体垂直安放在基座上, 注意防止因周围土壤松动而造成气体泄漏, 气体采集用 10 mL 医用针管分别在安置好箱体后的 0 min、10 min、30 min、60 min、90 min 及 120 min 抽取, 在抽取样品之前, 注意箱盖橡胶圈周围加水密封。待气体样品采集完成, 带回实验室在 24 h 内用气相色谱仪(Agilent, 7890A)测定 CH<sub>4</sub> 浓度, CH<sub>4</sub> 检测器均为 FID(火焰原子化检测器), 检测温度为 250 °C, 载气是高纯氮气(99.99%), 柱箱温度为 60 °C。FID 最低检测限为<1.8 pg(C)·s<sup>-1</sup>[15]。

表 1 不同土地利用方式采样点的基本信息

Table 1 Basic information of sample plots in different land use types

土地利用方式 Land use type	样点代表数 Sample number	植被类型 Vegetation type	平均海拔 Altitude (m)	地理位置 Geographical position
耕地 Cultivated land	2	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	1 240	108°05'24.2"E、34°48'22.0"N
		冬小麦 <i>T. aestivum</i>	1 267	108°05'36.4"E、34°48'42.7"N
天然草地 Natural grassland	2	白羊草-芨芨群落 Community of <i>Bothriochloa ischaemum</i> and <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	1 237	108°05'22.6"E、34°48'20.8"N
		白羊草-芨芨-铁杆蒿群落 Community of <i>B. ischaemum</i> , <i>A. lavandulaefolia</i> , and <i>Artemisia gmelini</i>	1 265	108°05'39.3"E、34°48'31.6"N
灌木林地 Shrub land	3	过熟沙棘林 Postmature forest of <i>Hippophae rhamnoides</i>	1 252	108°05'29"E、34°48'21.0"N
		纯沙棘(<10 年) <i>H. rhamnoides</i> forest (younger than 10 years)	1 258	108°05'38.6"E、34°48'31.4"N
		过熟沙棘林 Postmature forest of <i>H. rhamnoides</i>	1 246	108°05'25.0"E、34°48'32.2"N
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	3	油松、沙棘、刺槐混交林 Mixed forest of <i>Pinus tabulaeformis</i> , <i>H. rhamnoides</i> and <i>Robinia pseudoacacia</i>	1 248	108°05'19.5"E、34°47'19.3"N
		刺槐、沙棘混交林刺槐 Mixed forest of <i>R. pseudoacacia</i> and <i>H. rhamnoides</i>	1 258	108°05'25.4"E、34°47'58.4"N
		白榆、油松、沙棘混交林 Mixed forest of <i>Ulmus pumila</i> , <i>P. tabulaeformis</i> and <i>H. rhamnoides</i>	1 267	108°05'24.5"E、34°48'20.3"N
乔木林地 Arbor land	4	侧柏纯林 <i>Platycladus orientalis</i> forest	1 218	108°05'35.0"E、34°48'11.1"N
		刺槐纯林 <i>R. pseudoacacia</i> forest	1 225	108°05'26.9"E、34°47'59.5"N
		油松纯林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	1 250	108°05'38.2"E、34°48'32.6"N
		油松纯林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	1 254	108°05'23.0"E、34°48'20.8"N
果园 Orchard	3	核桃园 <i>Juglans regia</i> garden	1 222	108°05'48.0"E、34°47'59.5"N
		核桃园 <i>J. regia</i> garden	1 222	108°05'48.0"E、34°47'59.5"N
		核桃园 <i>J. regia</i> garden	1 222	108°05'48.0"E、34°47'59.5"N

表 2 不同土地利用类型样地不同土层土壤基本性质

Table 2 Basic properties of sample plots of different soil layers in different land use types

土地利用方式 Land use type	有机碳 Total organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )		全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )		容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	
	0~5 cm	5~20 cm	0~5 cm	5~20 cm	0~5 cm	5~20 cm
耕地 Cultivated land	9.040±0.010	8.790±1.120	0.926±0.163	0.830±0.160	1.300±0.035	1.252±0.045
天然草地 Natural grassland	34.480±3.760	21.850±6.570	2.495±0.340	1.690±0.510	1.170±0.026	1.220±0.056
灌木林地 Shrub land	24.650±0.780	13.550±3.270	2.078±0.069	1.517±0.460	1.180±0.038	1.230±0.064
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	24.030±6.430	10.610±1.270	1.830±0.377	0.765±0.410	1.201±0.054	1.183±0.032
乔木林地 Arbor land	26.540±2.380	15.17±6.520	1.864±0.290	1.210±0.560	1.230±0.080	1.202±0.048
果园 Orchard	9.390±0.139	8.318±0.237	1.003±0.199	0.770±0.030	1.291±0.023	1.261±0.067

### 1.3 土壤样品采集

在采样点周围, 去除凋落物, 用不锈钢铁锹采集 0~5 cm 和 5~20 cm 土层土样并分层混合, 每层为 1 个土样, 每个采样点做 3 次重复, 0~5 cm 和 5~20 cm 土层土样分别有 51 个样品, 共计 102 个土壤样品。用四分法取足样品后装入密封的塑料袋中带回实验室, 备用测定其理化性质。

### 1.4 土壤理化因子测定

土壤 5 cm 和 20 cm 处含水量(简写  $W_5$ 、 $W_{20}$ )采用实验室烘干法测定, 土壤地表大气温度( $t$ )、静态箱内气温在采集气体时用便携式温度计测定, 土壤地表以下 5 cm 处、20 cm 处土壤温度(简写  $T_5$ 、 $T_{20}$ )同步采用地温计测定; 土壤全氮采用凯氏定氮法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾-FeSO<sub>4</sub> 滴定法测定; 土壤容重采用环刀法测定。

### 1.5 数据统计和分析

#### 1.5.1 气体通量计算

通量是指单位时间通过某单位面积界面输送的物理量。箱体内的气体通量计算公式如下<sup>[16]</sup>:

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

式中:  $F$  为待测气体通量,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $dc/dt$  为静态箱内 CH<sub>4</sub> 浓度在单位时间内的变化速率;  $M$  为气体的摩尔质量,  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $P$  为采样点气压, Pa;  $T$  为采样时的静态箱中温度, K;  $V_0$ 、 $P_0$ 、 $T_0$  分别为标准状态下的气体摩尔体积 ( $22.41 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$ )、大气压 ( $1013.25 \text{ hPa}$ ) 和绝对温度 ( $273.15 \text{ K}$ );  $H$  为地面以上采样箱高度, m。气体通量( $F$ ) 为负值时, 表示土壤从大气中吸收该气体, 正值时表示土壤向大气排放该气体, 通量结果以样点重复的平均值表示。每月测定的  $F(\text{CH}_4)$  代表该月的平均值, 通过累

加计算求得土壤 CH<sub>4</sub> 年通量<sup>[14]</sup>。经数据运算 6 种用地类型均为 CH<sub>4</sub> 的吸收汇, 下文以吸收值进行分析。

#### 1.5.2 数据处理

采用对数函数建立土壤 CH<sub>4</sub> 通量与土壤温度的关系(式 2), 用线性回归建立土壤 CH<sub>4</sub> 通量与土壤水分、地表大气温度、土壤全氮的关系; 利用多元逐步回归法探讨观测期内影响土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的主要因子, 模型见式(3)。

$$Y = b_0 + b_1 \ln T \quad (2)$$

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad (3)$$

式中:  $Y$  为土壤 CH<sub>4</sub> 通量,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $T$  为土壤温度, °C;  $b_0$ 、 $b_1$ 、...、 $b_k$  为待定系数;  $x_{(1, 2, \dots, k)}$  代表各种环境因子, 包含  $T_5$ 、 $T_{20}$ 、 $W_5$ 、 $W_{20}$  及  $t$  等。

数据整理利用 Office Excel 2013; 采用 SPSS 21.0 完成数据统计分析, 采用单因素方差分析和 Duncan 多重比较各土地利用土壤 CH<sub>4</sub> 吸收通量差异, 利用 Origin 9.0 软件进行全文绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 吸收通量

土壤 CH<sub>4</sub> 平均吸收通量耕地、果园较低, 分别为  $14.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $18.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 草地、灌木林次之, 分别为  $25.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $31.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 乔灌混交林最高, 为  $51.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。土壤的 CH<sub>4</sub> 年累计吸收值依次为: 乔灌木林地 > 乔木林地 > 灌木林地 > 草地 > 果园 > 耕地。分析不同用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收能力的差异性(表 3) 表现为乔灌木混交林与乔木林的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收差异不显著, 天然草地和果园、灌木林土壤的 CH<sub>4</sub> 吸收差异亦不显著, 其余用地类型间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

表 3 不同土地利用方式下土壤 CH<sub>4</sub> 通量  
Table 3 Soil CH<sub>4</sub> fluxes of different land use types

土地利用方式 Land use type	变化范围 Range of variation ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	平均通量 Average flux ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )	年通量 Annual cumulative flux ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	变异系数 Coefficient of variation (%)
耕地 Cultivated land	-4.30--32.30	-14.89±8.76e	-1.30	58.83
天然草地 Natural grassland	-12.77--49.93	-25.89±12.52cd	-2.26	48.36
灌木林地 Shrub land	-14.63--63.52	-31.52±15.89c	-2.76	50.41
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	-27.95--69.14	-51.24±12.81a	-4.48	25.00
乔木林地 Arbor land	-23.60--65.18	-44.80±12.03ab	-3.92	26.85
果园 Orchard	-4.50--31.17	-18.97±8.95de	-1.66	47.18

同列不同小写字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters in the same column mean significant differences ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 季节动态

对 6 种土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤温度、含水量的变化趋势进行分析, 结果显示, 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收值与土壤温度的变化趋势相近, 但与土

壤含水量的变化趋势却大致相反(图 2)。土壤 CH<sub>4</sub> 吸收均表现出相似的季节变化特征, 除果园外, 其余用地类型的土壤均在 2015 年 8—9 月中旬左右出现较高的吸收峰值, 而在 2016 年 1—2 月中旬

低温时出现较低的吸收值。观测期内, 不同用地类型的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收离散程度(平均差)为: 乔木林

地>灌木林地>天然草地>乔灌木混交林地>果园>耕地。

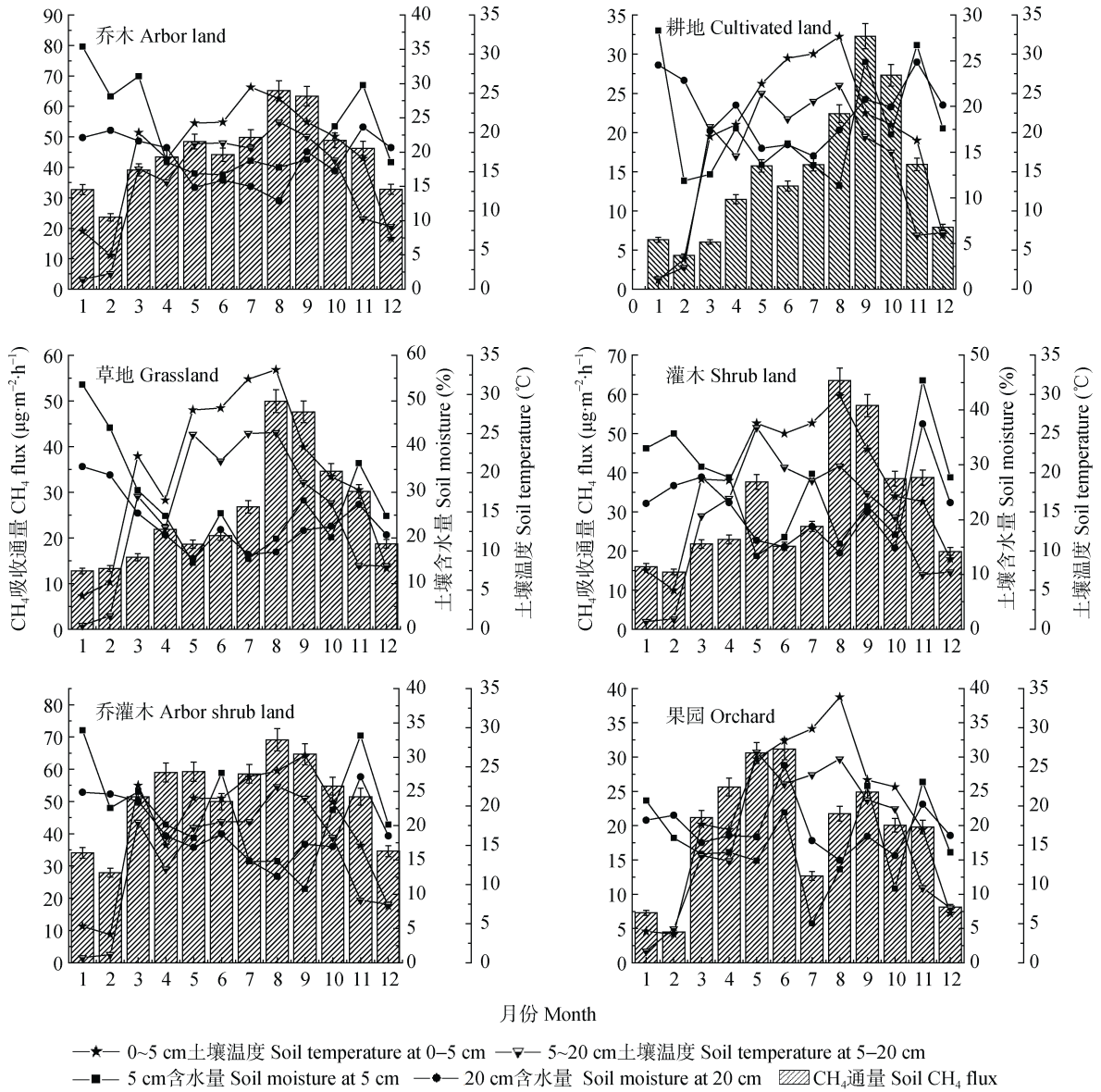


图 2 不同土地利用方式下土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的季节性变化  
Fig. 2 Seasonal variations of soil CH<sub>4</sub> fluxes of different land use types

### 2.3 温度和水分对土壤 CH<sub>4</sub> 的影响

#### 2.3.1 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤温度

不同用地类型的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收均与表层土壤温度呈对数函数关系(表 4), 即由式(2)函数的增减性判断, CH<sub>4</sub> 吸收通量随着温度升高而呈对数形式增加, 温度在 CH<sub>4</sub> 吸收通量的变化中具有一定的正效应, 且无论是林地、耕地还是园地的土壤, CH<sub>4</sub> 吸收通量都与土壤 5 cm 温度相关性较高。其中, 乔灌木林、乔木林和果园的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤表层温度(5 cm、20 cm)的相关性达极显著水平( $P < 0.01$ )。耕地和草地与土壤温度无

显著的相关性。

#### 2.3.2 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤含水量

不同用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与含水量拟合方程表明(表 5), 除耕地和果园与 5 cm 土壤含水量相关性不显著, 其他 4 种用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤含水量均呈负相关; 对于 5~20 cm 土壤含水量, 除果园呈正相关, 其余均为负相关。不同土层含水量相关性对比发现, 除耕地、灌木外, 其余 4 种用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与 5~20 cm 土壤含水量的拟合系数更高, 且乔木林地和乔灌木混交林的拟合方程达显著水平( $P < 0.05$ )。

表 4 不同土地利用方式下土壤 CH<sub>4</sub> 吸收(Y)与 5 cm 和 20 cm 土壤温度(T)的关系  
Table 4 Correlation between soil CH<sub>4</sub> flux (Y) and soil temperature (T) at 5 cm and 20 cm in different land use types

土地利用类型 Land use type	样本量 Sample number	5 cm 土温 Soil temperature at 5 cm		20 cm 土温 Soil temperature at 20 cm	
		相关方程 Correlated equation	R <sup>2</sup>	相关方程 Correlated equation	R <sup>2</sup>
耕地 Cultivated land	72	$Y=1.831+4.889\ln T$	0.322	$Y=12.714+4.928\ln T$	0.294
天然草地 Natural grassland	72	$Y=-3.020+10.257\ln T$	0.314	$Y=13.597+5.291\ln T$	0.262
灌木林地 Shrub land	108	$Y=-16.556+17.155\ln T$	0.373*	$Y=14.005+7.650\ln T$	0.269
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	108	$Y=5.575+17.078\ln T$	0.838**	$Y=31.088+9.080\ln T$	0.703**
乔木林地 Arbor land	144	$Y=-1.144+16.941\ln T$	0.687**	$Y=21.878+9.781\ln T$	0.574**
果园 Orchard	108	$Y=-6.114+9.163\ln T$	0.640**	$Y=-0.232+7.650\ln T$	0.558**

\*\*表示 0.01 水平极显著相关( $R \geq 0.6835$ ), \*表示 0.05 水平显著相关( $R \geq 0.5529$ ), \*\* indicates significant relation at 0.01 level ( $R \geq 0.6835$ ); \* indicates significant correlation at 0.05 level ( $R \geq 0.5529$ ).

表 5 不同土地利用方式下的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收(Y)与 5 cm 和 20 cm 土壤含水量(W<sub>5</sub>、W<sub>20</sub>)的关系  
Table 5 Correlation between soil CH<sub>4</sub> flux (Y) and soil moisture at 5 cm (W<sub>5</sub>) and 20 cm (W<sub>20</sub>) soil layers in different land use types

土地利用方式 Land use type	样本量 Sample number	5 cm 含水量 Soil water content at 5 cm		20 cm 含水量 Soil water content at 20 cm	
		相关方程 Correlated equation	R <sup>2</sup>	相关方程 Correlated equation	R <sup>2</sup>
耕地 Cultivated land	72	$Y=0.233W_5+10.794$	0.025	$Y=-0.386W_{20}+22.426$	0.023
天然草地 Natural grassland	72	$Y=-0.440W_5+38.281$	0.166	$Y=-0.903W_{20}+46.835$	0.213
灌木林地 Shrub land	108	$Y=-0.693W_5+49.605$	0.170	$Y=-0.644W_{20}+45.529$	0.075
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	108	$Y=-1.015W_5+73.536$	0.318*	$Y=-1.894W_{20}+88.273$	0.436*
乔木林地 Arbor land	144	$Y=-0.965W_5+66.869$	0.276	$Y=-2.071W_{20}+84.118$	0.392*
果园 Orchard	108	$Y=0.136W_5+16.604$	0.009	$Y=0.302W_{20}+13.083$	0.046

\*表示 0.05 水平显著( $R \geq 0.5529$ ), \* indicates significant correlation at 0.05 level ( $R \geq 0.5529$ ).

### 2.3.3 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与地表气温

不同用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与地表气温均呈正相关,林地拟合精度较高,其相关系数大于果园与耕地,不同用地类型地表气温对土壤 CH<sub>4</sub> 吸收解释率介于 15.3%~64.5%(表 6)。乔灌混交林土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与地表气温相关性达到极显著水平( $P < 0.01$ );乔木林与地表气温的相关性达到显著水平( $P < 0.05$ );耕地、草地及灌木林的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与地表气温的相关性不显著( $P > 0.05$ )。

表 6 不同土地利用方式下的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收(Y)与地表温度(t)的关系

Table 6 Correlation between soil CH<sub>4</sub> flux (Y) and surface soil temperature (t) in different land use types

土地利用方式 Land use type	相关方程 Correlated equation	R <sup>2</sup>
耕地 Cultivated land	$Y=0.315t+7.396$	0.200
天然草地 Natural grassland	$Y=0.506t+13.900$	0.289
灌木林地 Shrub land	$Y=0.527t+17.724$	0.153
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	$Y=0.991t+30.896$	0.645**
乔木林地 Arbor land	$Y=0.706t+28.967$	0.461*
果园 Orchard	$Y=0.443t+8.925$	0.413

\*\*表示 0.01 水平极显著相关( $R \geq 0.6835$ ), \*表示 0.05 水平显著相关( $R \geq 0.5529$ ), \*\* indicates significant relation at 0.01 level ( $R \geq 0.6835$ ); \* indicates significant correlation at 0.05 level ( $R \geq 0.5529$ ).

### 2.3.4 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与物理环境因子多元回归

采用逐步回归分析法进行土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的多因素影响评估并建立多元线性回归模型  $Y=b_0+b_1x_1+\dots+b_kx_k$ 。模型均通过回归方程统计学意义的检验和变量系数的显著性检验,模型中将未通过相关系数显著性检验的变量已剔除(表 7)。结果表明,草地、灌木林和乔灌木林的土壤 CH<sub>4</sub> 吸收通量与土壤 5 cm 温度相关,其相关性分别达显著或极显著水平;而耕地、果园和乔木却与土壤 20 cm 温度相关性达显著或极显著水平,并且,耕地与土壤 20 cm 水分的相关性也达到了显著水平。通常研究将土壤水分与土壤温度作为土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的主要影响因素。但是笔者的多元回归分析结果中未发现土壤水分与土壤 CH<sub>4</sub> 吸收均有着显著的相关性(除耕地),这表明影响土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的因素多而复杂,在不同的条件下,其主要控制因素可能不同,也进一步证实了在本研究区土壤温度是影响各种土地利用土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的最主要因素,对土壤 CH<sub>4</sub> 吸收有着重要的贡献。

### 2.4 土壤全氮对土壤 CH<sub>4</sub> 的影响

本文通过对不同用地类型的土壤表层全氮与 CH<sub>4</sub> 吸收通量的相关性分析表明,土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤全氮呈正相关(图 3),且与土壤 5 cm 全氮的相关性

表 7 6 种土地利用方式下的土壤 CH<sub>4</sub> 通量与环境因子的逐步回归方程

Table 7 Regression equations between soil CH<sub>4</sub> flux and environmental factors under different land use types

土地利用方式 Land use type	回归方程 Regression equation	F	显著性 Sig.	R <sup>2</sup>
耕地 Cultivated land	$Y=-71.683+3.162W_{20}+1.580T_{20}$	7.321	0.013	0.619
天然草地 Natural grassland	$Y=13.131+0.930T_5$	5.375	0.043	0.350
灌木林地 Shrub land	$Y=8.314+1.247T_5$	6.628	0.028	0.399
乔灌混交林地 Arbor and shrub land	$Y=26.365+1.453T_5$	46.249	0.000	0.822
乔木林地 Arbor land	$Y=24.834+1.481T_{20}$	24.307	0.001	0.709
果园 Orchard	$Y=-7.350+0.737T_{20}$	8.368	0.016	0.523

T<sub>5</sub>、T<sub>20</sub>、W<sub>20</sub> 分别表示 5 cm、20 cm 土壤温度和 20 cm 土壤水分。T<sub>5</sub>、T<sub>20</sub> and W<sub>20</sub> are soil temperature at 5 cm and 20 cm, and soil moisture at 20 cm.

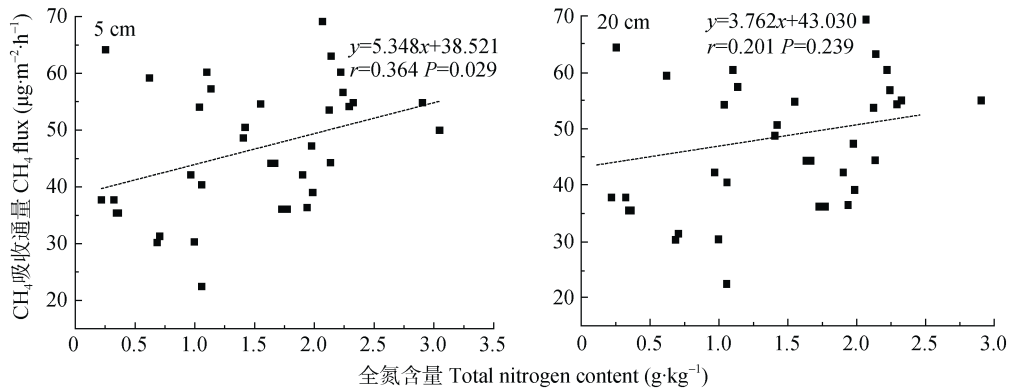


图 3 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与不同土层土壤全氮含量的相关性

Fig. 3 Correlation between soil CH<sub>4</sub> flux and total nitrogen content in different soil layers

达到显著性水平( $P<0.05$ ), 而与土壤 20 cm 全氮相关性不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 吸收季节变化

6 种用地类型土壤在研究期间表现为大气 CH<sub>4</sub> 的吸收汇, 最大值出现于夏末秋初, 最小值出现于冬季。这与温带地区 CH<sub>4</sub> 通量研究结论一致<sup>[17]</sup>。一般认为土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的季节特征与气温和降雨有关, 适宜的温湿度有利于土壤 CH<sub>4</sub> 氧化菌的活性, 能加速土壤 CH<sub>4</sub> 氧化消耗<sup>[18]</sup>。研究区多年气象资料显示(数据来源于咸阳市气象局气象资料), 8—9 月份降雨集中, 平均气温在 25 °C 左右, 土壤表层温度在 20~30 °C, 期间较活跃的甲烷氧化菌群促进了土壤 CH<sub>4</sub> 的吸收, 且其吸收强度及出现时间因利用方式而异, 即草地、林地 CH<sub>4</sub> 吸收在 8 月份达峰值; 而耕地在 9 月份达到峰值, 这与匡艳华等<sup>[19]</sup>研究的华北落叶松林(*Larix principis-rupprechtii*)土壤 CH<sub>4</sub> 吸收峰值及出现时间略有不同, 可能由于土壤的类型、经纬度和气候因子等不同。研究区的果园土壤 CH<sub>4</sub> 吸收波动范围较大, 介于 4.50~31.17 µg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 间, 且与其他 5 种用地类型的季节变化规律较不一致, 可能原因是果园为 3~4 年幼龄核桃树, 属尚未成熟

林, 裸露面积较大。以水热条件看, 土壤在 6 月含水量介于 21.95%~28%, 温度处于 20~25 °C, 适宜的温湿度有利于氧化菌活动, 并促进土壤 CH<sub>4</sub> 的吸收。而 7 月气温高, 降雨少(比 6 月少 54.94%), 故在水分和温度的综合影响下土壤 CH<sub>4</sub> 吸收速率可能受到抑制。以土壤结构和性质来看, 黄土台塬植被恢复过程中, 部分耕地变为果园(未成熟园林), 相比较于其他用地类型, 土壤肥力较低, 且表层结构紧实, 透气和保水性较差, 其对温度和水分的敏感性强。因此, 在缺水高温的 7 月, 温度和水分成为土壤氧化 CH<sub>4</sub> 的主要限制因素。

#### 3.2 不同土地利用方式土壤 CH<sub>4</sub> 吸收量差异

土地利用转变影响地表植被类型、土地管理方式, 并通过土壤质地、土壤养分条件、根系生物量、微生物组成及下垫面的水热条件来直接或间接作用于土壤温室气体。如 Goulding 等<sup>[20]</sup>研究得出由林地转变为农田(耕种 150 a)后, 其土壤 CH<sub>4</sub> 吸收率与邻近相同的林地相比, 降低了 85%; Steudler 等<sup>[21]</sup>也发现不同用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收强度表现为林地>草地>耕地。本研究 6 种用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收表现为乔灌木林与乔木林较高, 灌木林和草地次之, 而果园和耕地较低。其中, 乔灌木林的年吸收通量为耕地的 3.44 倍, 与 Dobbie 等<sup>[22]</sup>发现林地吸收 CH<sub>4</sub> 比农

田  $\text{CH}_4$  吸收量高 3~4 倍的结论相一致。黄土台塬不同植被覆盖下的土壤  $\text{CH}_4$  吸收迥异的原因归咎于两方面。从管理方式来看, 农业土壤(耕地与果园)的人为参与性强, 如耕作、定期灌溉、施肥等活动, 土壤透气性差, 有机质含量低(表 2); 而非农业土壤(林地或草地)采用无人干扰、自然恢复的管理措施, 土壤透气性良好、有机碳含量丰富, 微生物种群活跃。从土壤质地来看, 土壤的透气性通常取决于土壤的容重或孔隙度。耕地的容重最大, 灌木林和混交林次之, 草地的容重最小。耕地的吸收能力最弱, 可能的原因: 1) 耕地受到人为强烈扰动(如施肥), 土壤结构遭受破坏、板结严重, 土壤的非毛管孔隙度少, 抑制了  $\text{CH}_4$  和氧气扩散, 也降低了甲烷氧化菌的活性, 从而限制了其氧化吸收能力; 2) 频繁的施肥使得土壤酸化严重, 而甲烷氧化菌生长的最适 pH 为 6.6~6.8, 当  $\text{pH}<5.75$  时,  $\text{CH}_4$  吸收受限制<sup>[23]</sup>。草地容重最小, 这与其地表覆盖植被茂密、根系主要集于表层分布有关, 但草地土壤  $\text{CH}_4$  吸收能力仅次于林地而强于耕地也说明了土壤透气性虽是通过作用于土壤微生物活性来影响其氧化能力的一个因子, 但并不是关键因子, 还应包括其他一些因子的复杂的交互作用, 例如温度、水分及土壤微生物、养分等。土壤丰富的有机质、良好的透气性以及适宜的水热条件均为土壤微生物活动提供了充足的准备, 从而促进  $\text{CH}_4$  的氧化吸收。因此, 自然条件的非农业土壤  $\text{CH}_4$  吸收能力明显高于农业土壤, 这与 Peterjohn 等<sup>[24]</sup>认为天然植被土壤  $\text{CH}_4$  吸收率一般高于耕作土壤  $\text{CH}_4$  吸收率的结论相一致。

### 3.3 土壤 $\text{CH}_4$ 吸收与温度水分关系

6 种用地类型土壤  $\text{CH}_4$  吸收与土壤表层温度呈正相关, 且与 5 cm 土壤温度的相关系数显著高于 20 cm, 其相关性大小为乔灌木>乔木>果园>耕地>灌木>草地。董云社等<sup>[25]</sup>发现森林土壤在 0~30 °C 范围时, 对大气中的  $\text{CH}_4$  消耗与温度表现为明显正相关; Liu 等<sup>[26]</sup>对丘陵山区林地的研究和 Iqbal 等<sup>[27]</sup>对农田、林地的研究结果也与本文结论基本相符。耕地和草地与土壤 5 cm 温度相关性不明显, 可能解释为这两种用地类型植被较单一, 土壤温度和气温变化幅度大, 影响  $\text{CH}_4$  氧化菌活性。 $\text{CH}_4$  氧化菌在适宜的温度范围内作用较强。Nesbit 等<sup>[28]</sup>发现土壤吸收  $\text{CH}_4$  的最佳温度在 20~30 °C。观测期内 6—9 月, 土壤平均温度介于 19.37~29.14 °C, 处于土壤吸收  $\text{CH}_4$  的较佳温度范围内, 各用地类型的土壤  $\text{CH}_4$  于此间先后达到峰值, 而翌年的 2 月前后, 样区地表

有少量积雪, 土壤温度和气温达一年最低值, 且表层有少量冻结, 低温抑制土壤微生物尤其是  $\text{CH}_4$  氧化菌群的活性, 土壤  $\text{CH}_4$  的吸收能力降低, 春后随气温回暖, 土壤微生物群包括甲烷氧化菌的活性增强,  $\text{CH}_4$  氧化能力增强, 吸收通量增加。

水分是影响土壤  $\text{CH}_4$  吸收的又一关键因子, 不同土层深度的土壤含水量与 6 种用地类型的  $\text{CH}_4$  吸收的关系是迥异的。耕地和果园的土壤  $\text{CH}_4$  吸收与 5 cm 含水量表现为正相关, 其余 4 种用地类型均呈负相关, 与已有研究结果基本一致<sup>[29]</sup>。耕地和果园与 5 cm 土壤含水量相关关系的特殊性, 可能原因有两方面: 其一, 果园在 4 年前为耕地, 土地利用转换的年限较短, 其表层土壤结构类型接近于耕地; 其二, 当地气候为半干旱半湿润型, 属旱地, 且土壤有机碳含量低<sup>[14]</sup>、微生物较少, 含水量就成为限制土壤  $\text{CH}_4$  吸收的关键因素。而除果园外, 土壤 20 cm 含水量与其余  $\text{CH}_4$  吸收呈负相关, 且与乔灌木林、乔木林的相关性达显著水平( $P<0.05$ )。土壤水分通过影响土壤通气性来影响土壤  $\text{CH}_4$  氧化速率。适当增加土壤水分有利于促进土壤微生物活性, 增强其吸收  $\text{CH}_4$  能力, 但水分过多则会使土壤  $\text{O}_2$  扩散受阻,  $\text{CH}_4$  氧化菌所需的氧气减少, 活性降低, 而产  $\text{CH}_4$  菌活性升高, 土壤由吸收  $\text{CH}_4$  变为排放  $\text{CH}_4$ 。研究发现<sup>[18]</sup>土壤  $\text{CH}_4$  吸收与土壤水分存在着一定的阈值, 但由于耕作措施、土地利用方式等不同,  $\text{CH}_4$  氧化的最适宜水分范围也不尽相同。本研究中各用地类型最适宜湿度为 16.91%~28.79%, 这与 Torn 等<sup>[30]</sup>认为土壤水分含量为 25%时, 微生物氧化  $\text{CH}_4$  的能力最大; 土壤湿度低于 20%时,  $\text{CH}_4$  氧化能力受到限制, 而土壤水分高于 25%时, 土壤  $\text{CH}_4$  吸收通量会减少的结论不大一致, 这可能与土壤类型、气候海拔以及植被类型等不同有关。

温度和水分是影响土壤  $\text{CH}_4$  的主要影响因素, 当土壤温度在 -5~10 °C 时, 温度为影响土壤  $\text{CH}_4$  通量的主导因子, 当温度高于临界值 10 °C 时, 土壤含水量则成为了主导因子<sup>[31]</sup>。从全年记录的  $\text{CH}_4$  气体与环境变化状况来看与以上结论相符, 在翌年的 2 月份前后, 6 种用地类型的土壤  $\text{CH}_4$  吸收达到最低值, 其温度在 -5~5 °C 左右, 土壤中的微生物活性差, 土壤温度成主导因子。5 月之后, 气温回暖, 地表温度回升至 10 °C 以上, 微生物活性逐渐增强, 吸收通量的幅度开始增大, 土壤含水量则成主导因子。多元回归结果显示, 观测期内, 6 种用地类型的土壤  $\text{CH}_4$  吸收与土壤表层温度呈显著或极显著性相关, 与



土壤水分未呈现显著相关性。这说明影响土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的过程是多而复杂的因素共同作用的结果, 并不是只受温度水分胁迫作用, 在以后研究中, 如土壤碳氮比、pH、土地利用方式、微生物种群等其他影响因素之间的交互作用等均要综合考虑。

### 3.4 土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤氮素

土壤氮素是影响土壤 CH<sub>4</sub> 吸收的又一因素。但众多学者对其影响的结论存在着争议, Singh 等<sup>[32]</sup>认为, 土壤吸收大气 CH<sub>4</sub> 与土壤全氮、碳之间为负相关关系; Steudler 等<sup>[21]</sup>也曾报道, 施用少量氮肥能显著降低森林土壤吸收对流层 CH<sub>4</sub> 的能力; 而耿远波等<sup>[33]</sup>在对草原土壤温室气体通量与土壤碳、氮含量的相关性研究中表明, CH<sub>4</sub> 通量与土壤表层氮含量相关性不明显。本研究中, 6 种用地类型土壤表层全氮含量水平(0~20 cm)存在差异, 表现为草地和林地显著高于耕地(表 2)。土壤 CH<sub>4</sub> 吸收却与土壤全氮呈正相关, 且与 5 cm 全氮的相关性达显著水平; 而与土壤 20 cm 全氮相关性不明显, 这与 Singh 等<sup>[32]</sup>的结论不一致。可能的原因是样区植被恢复年限不长, 期间, 部分外源性氮素或大气氮沉降被植物吸收或被土壤微生物固持, 现有的氮素含量水平未能改变土壤甲烷氧化菌的群落活性, 并未对其产生显著抑制甚至毒害作用, 反而产生正向的促进作用。

土壤 CH<sub>4</sub> 氧化菌群需要氮素作为氮源, 土壤氮含量稀缺时, 一定范围内, 土壤氮素的增加会促进土壤 CH<sub>4</sub> 氧化菌活性, 但是当土壤氮含量足够饱和时, 土壤中的氮, 尤其是无机氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的增加, 会抑制 CH<sub>4</sub> 氧化菌活性。土壤氮素水平存在差异, 可能因为耕地或果园种植经济作物, 人为干扰较大, 土壤表层氮肥(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)施入量较高, 施入土壤中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>会立即被甲烷单氧酶氧化, 直到 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>被消耗殆尽, CH<sub>4</sub> 氧化才得以开始<sup>[34]</sup>; 而林地人为干扰少, 土壤氮素主要来源于土壤表层腐殖质和大气氮沉降, 且林地植物吸收大量养分时, 会把包含甲烷氧化菌在内的土壤微生物从 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>等底物的有害影响中部分解救出来<sup>[35]</sup>。相比较于耕地和果园, 林地土壤 CH<sub>4</sub> 吸收显著高于耕地。

## 4 结论

1) 在试验期间, 研究区用地类型土壤表现为 CH<sub>4</sub> 汇; 土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率有相似的季节性波动特征, 呈现夏秋季高, 冬春季低的特征; 6 种用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收有明显差异, 总体趋势表现为林地>果园>耕地。

2) 单变量相关分析中, 6 种用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤温度呈对数正相关, 且与 5 cm 土温相关性显著高于 20 cm; 林地与地表温度的拟合精度高于果园和耕地, 达显著或极显著性水平; 6 种用地类型土壤 CH<sub>4</sub> 吸收与土壤全氮呈正相关; 与土壤水分呈线性负相关, 且 20 cm 土壤水分对 CH<sub>4</sub> 吸收的影响更大, 多变量回归分析中, 土壤表层温度为影响各种用地类型 CH<sub>4</sub> 吸收的主要因素。

3) 土地利用转变影响地表植被类型、土地管理方式, 并通过土壤质地、土壤养分条件等直接或间接作用于土壤温室气体。即耕地转变为林地、果园后土壤的吸收能力增强, 土壤对减缓温室效应的贡献增大, 也进一步说明退耕还林工程的实施具有显著的生态和经济效益。

## 参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- [2] 翟洋洋, 程云湘, 常生华, 等. 干旱地区农田生态系统土壤温室气体排放机制[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 231-236  
ZHAI Y Y, CHENG Y X, CHANG S H, et al. Mechanism of greenhouse gas emission from agro-ecosystem soil in arid regions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 231-236
- [3] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 23-24
- [4] BORKEN W, DAVIDSON E A, SAVAGE K, et al. Effect of summer through fall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(6): 1388-1395
- [5] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)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(4): 966-975  
ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975
- [6] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH<sub>4</sub> 排放通量的研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 173-176  
SUN X Y. CH<sub>4</sub> emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(3): 173-176
- [7] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区 2 种土地利用方式下地表 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2008, 16(4): 304-314  
LIU H, ZHAO P, LIN Y B, et al. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from soil surface of 2 land use in a hilly area of South China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2008, 16(4): 304-314

- [8] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 297-307  
SONG L N, ZHANG Y M, HU C S, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 297-307
- [9] 梁晓, 方飞平, 彭义文. 关于天然草地土壤对 CH<sub>4</sub> 吸收的研究[J]. 北方环境, 2011, 23(3): 36-38  
LIANG X, FANG F P, PENG Y W. On CH<sub>4</sub> absorption of soil properties of different reclamation years[J]. Northern Environment, 2011, 23(3): 36-38
- [10] 周小刚, 郭胜利, 车升国, 等. 黄土高原刺槐人工林地凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2150-2157  
ZHOU X G, GUO S L, CHE S G, et al. Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2150-2157
- [11] 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 J L, LIU M Y, ZHAO G Q, 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
- [12] 刘丽雯, 刘梦云, 吴健利, 等. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤呼吸季节性变化及影响因素[J]. 环境科学研究, 2016, 29(12): 1819-1828  
LIU L W, LIU M Y, WU J L, et al. Seasonal variation of soil respiration and affecting factors under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(12): 1819-1828
- [13] SHRESTHA R K, LAL R, RIMAL B. Soil carbon fluxes and balances and soil properties of organically amended no-till corn production systems[J]. Geoderma, 2013, 197/198: 177-185
- [14] 陈匆琼, 杨智杰, 谢锦升, 等. 中亚热带米槠天然林土壤甲烷吸收速率季节变化[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 17-22  
CHEN C Q, YANG Z J, XIE J S, et al. Seasonal variations of soil CH<sub>4</sub> uptake rate in *Castanopsis carlesii* forest in mid-subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 17-22
- [15] 季新华, 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 X H, ZHU Z L, DONG H Y, 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
- [16] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 等. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1093-1098  
LIU S, LI Y E, SUN X H, et al. Effects of temperature and soil moisture on greenhouse gases emission of temperate forest soil[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(7): 1093-1098
- [17] 党旭升, 程淑兰, 方华军, 等. 温带针阔混交林土壤碳氮气体通量的主控因子与耦合关系[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6530-6540  
DANG X S, CHENG S L, FANG H J, et al. The controlling factors and coupling of soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in a temperate needle-broadleaved mixed forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6530-6540
- [18] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 94-97  
DING W X, CAI Z C. Mechanism of methane oxidation by methanotrophs and effect of soil moisture content on their activity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(1): 94-97
- [19] 匡艳华, 张秋良, 弥宏卓, 等. 华北落叶松人工林土壤 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量的时间动态变化[J]. 内蒙古林业科技, 2013, 39(3): 32-36  
KUANG Y H, ZHANG Q L, MI H Z, et al. Temporal variation of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in *Larix principis-rupprechtii* Plantation[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2013, 39(3): 32-36
- [20] GOULDING K W T, WILLISON T W, WEBSTER C P, et al. Methane fluxes in aerobic soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1996, 42(1/2): 175-187
- [21] STEUDLER P A, MELILLO J M, FEIGL B J, et al. Consequence of forest-to-pasture conversion on CH<sub>4</sub> fluxes in the Brazilian Amazon Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D13): 18547-18554
- [22] DOBBIE K E, SMITH K A, PRIEME A, et al. Effect of land use on the rate of methane uptake by surface soils in Northern Europe[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(7): 1005-1011
- [23] 齐玉春, 董云社, 章申. 农业微环境对土壤温室气体排放的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 45-48  
QI Y C, DONG Y S, ZHANG S. Influence of agricultural micro-environment factors on greenhouse gases emission from the soil[J]. Eco-Agriculture Research, 2000, 8(1): 45-48
- [24] PETERJOHN W T, MELILLO J M, STEUDLER P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures[J]. Ecological Applications, 1994, 4(3): 617-625
- [25] 董云社, 彭公炳, 李俊. 温带森林土壤排放 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 时空特征[J]. 地理学报, 1996, 51(S1): 120-128  
DONG Y S, PENG G B, LI J. Seasonal variations of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from temperate forest soil[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(S1): 120-128
- [26] LIU H, ZHAO P, LU P, et al. Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 124(1/2): 125-135
- [27] IQBAL J, LIN S, HU R G, et al. Temporal variability of soil-atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from different land uses in mid-subtropical China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(37): 5865-5875

- [28] NESBIT S P, BREITENBECK G A. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, 41(1): 39–54
- [29] 孙海龙, 张彦东, 吴世义. 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH<sub>4</sub> 吸收和 N<sub>2</sub>O 排放通量[J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5320–5328  
SUN H L, ZHANG Y D, WU S Y. Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5320–5328
- [30] TORN M S, HARTE J. Methane consumption by montane soils: Implications for positive and negative feedback with climatic change[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 32(1): 53–67
- [31] CASTRO M S, STEUDLER P A, MELILLO J M, et al. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 1–10
- [32] SINGH J S, SINGH S, RAGHUBANSHI A S, et al. Effect of soil nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 115–121
- [33] 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, 56(1): 44–53  
GENG Y B, ZHANG S, DONG Y S, et al. The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlativity between their content and fluxes of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in Xilin River basin steppe[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 44–53
- [34] HÜTSCH B W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite, and organic manure with respect to soil pH[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 28(1): 27–35
- [35] 李俊, 同小娟, 于强. 不饱和土壤 CH<sub>4</sub> 的吸收与氧化[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 141–147  
LI J, TONG X J, YU Q. Methane uptake and oxidation by unsaturated soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 141–147