

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.

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

吴健利, 刘梦云*, 赵国庆, 虞亚楠, 刘丽雯, 刘欢

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

摘要:以黄土台塬区耕地、天然草地、灌木林地、乔灌混交林和乔木林地为研究对象,采用静态箱-气相色谱法、室内密闭培养法对其土壤温室气体及有机碳矿化动态进行了监测和分析。结果表明:土壤总有机碳和各种活性碳组分含量分布规律一致,均表现为草地显著高于林地,林地显著高于耕地($P<0.05$);土壤有机碳矿化量趋势为培养初期增长迅速,后期增速缓慢,0~5 cm 土层草地土壤有机碳矿化累积量是林地的 1.26~1.34 倍,是耕地的 1.82 倍,5~20 cm 土层较 0~5 cm 土层有所降低,耕地降幅高达 48%;不同土地利用土壤矿化碳潜力 C_p 值在 0.81~2.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间且差异显著($P<0.05$),而不同土地利用土壤有机碳分解速率常数 k 差异不显著;五种土地利用方式的土壤可矿化碳累计分配比例表明,耕地土壤有机碳矿化能力最高,固存量最小,而草地土壤有机碳矿化能力最低,固存量最多;耕地土壤释放的主要温室气体 CO_2 和 N_2O 强度显著高于其他用地类型,而 CH_4 的吸收强度为林地>天然草地>耕地。综上,退耕还林还草极大地推动了该区土壤有机碳的固定,减弱了土壤向大气排放温室气体的潜力。

关键词:黄土台塬;土地利用;矿化;活性碳;温室气体

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)05-1006-10 doi:10.11654/jaes.2016.05.027

Effects of land-use types on soil organic carbon mineralization and greenhouse gas emissions in Loess tableland

WU Jian-li, LIU Meng-yun*, ZHAO Guo-qing, YU Ya-nan, LIU Li-wen, LIU Huan

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: The present study was to investigate soil organic carbon (SOC) mineralization and greenhouse gas emissions under different land-use types. Five vegetation types, cultivated land, natural grassland, mixed forests, shrub land, shrubbery, and arboreal land, were chosen in Xianyang City in the Loess tableland area. SOC mineralization dynamics were examined by indoor airtight culture method and greenhouse gas emissions were determined by manually-closed static chamber technique. Results showed that soil total organic carbon (TOC) distribution pattern was consistent with that of active carbon component, which decreased in order of grassland > forest land > cultivated land. The SOC mineralization was faster at the early stage while became slower at the later stage. Cumulative SOC mineralization in grassland at the 0~5 cm depth was 1.26~1.34 times greater than that of woodland, and 1.82 times higher than that of cultivated land, whereas at the 5~20 cm soil SOC mineralization showed a decreased tendency compared to the 0~5 cm soil depth. A decrease of 48% was observed in cultivated land. The potential of soil SOC mineralization (C_p) under different land use types was between 0.81 and 2.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, with significant difference between different land use types ($P<0.05$). No differences in SOC decomposition rate constant k were found under different land use types. The ratios of soil carbon mineralization potential C_p to SOC showed that the cultivated land had the highest SOC mineralization but the

收稿日期:2015-10-29

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

作者简介:吴健利(1989—),女,陕西延安人,硕士研究生,主要研究领域为土地资源监测与评价。E-mail:wjl1053@163.com

*通信作者:刘梦云 E-mail:lmy471993@163.com

lowest carbon sequestration, whereas the grassland had the lowest SOC mineralization but and the highest carbon sequestration. The emissions of CO_2 and N_2O were significantly higher in cultivated land than in other land use types. The CH_4 absorption intensity was forest land> natural grassland>cultivated land. In conclusion, returning cultivated land to forestland and grassland could greatly promote organic carbon sequestration in soil and slow down emissions of greenhouse gases from soil into the atmosphere.

Keywords: Loess tableland; land use; carbon mineralization; active carbon; greenhouse gas (GHG)

土壤是温室气体产生的重要来源之一,其产生与呼吸排放温室气体是陆地生态系统碳氮循环的一个重要过程,也是土壤碳氮库的主要输出途径^[1],全球土壤碳库约 2.5×10^{15} kg, 是大气碳库的 3.3 倍和全球生物体碳库的 4.5 倍^[2]。由于土壤碳的库容巨大,土壤有机碳较小的变化将会对大气中二氧化碳的浓度和全球碳循环产生深远的影响。最为易变的有机碳是土壤可矿化碳,土壤有机碳矿化是土壤生物通过自身活动、分解和利用土壤中活性有机组分来完成自身代谢,同时释放 CO_2 的过程^[3],它是土壤中重要的生物化学过程,直接关系到土壤养分元素的释放与供应, CO_2 、 N_2O 、 CH_4 等气体的排放以及土壤质量的维持^[4]。

土壤总有机碳(TOC)是土壤中一切生物残体及其转化、降解的有机化合物,可分为活性有机碳和惰性有机碳。其中活性有机碳组分有可溶性有机碳(DOC)、易氧化态有机碳(ROC)、颗粒有机碳(POC)和轻组有机碳(LFOC)等^[5]。土壤活性有机碳是对微生物有较高活性的那部分碳素,是矿化过程中重要的碳源物质,容易被分解利用,变成 CO_2 ,其含量及组分影响着有机碳的矿化特征^[6]。因此,土壤有机碳矿化必将受到土壤活性有机碳库的影响^[7]。当前人类活动带来的土地利用的变化,是全球碳循环动力的主要驱动因子。不同土地利用方式下,有机物质输入和输出的不同导致土壤理化和生物学性状的差异,根系和土壤动物呼吸的来源也发生显著变化,影响土壤有机碳的组成和微生物对有机碳的矿化过程^[8]。土地利用方式的改变对土壤有机碳矿化速率的增加或减少,直接决定土壤在全球碳收支过程中的碳源/汇作用^[9]。

目前,针对我国不同土地利用条件下土壤有机碳矿化特征的研究较多^[10-14],而关于不同土地利用方式土壤温室气体排放的研究报道较少^[15-16]。本研究通过对黄土台塬植被恢复过程中的土壤温室气体排放和土壤有机碳矿化进行动态监测,综合分析了耕地、天然草地、灌木林地、乔灌混交林地和乔木林地五种典型土地利用方式对研究区土壤有机碳矿化及主要温室气体 CO_2 、 NO_2 和 CH_4 排放特征的影响,探讨了植被恢复过程中不同土地利用方式下土壤碳、氮的变异

状况,以期为研究区土壤温室气体减排提供数据支持,为正确理解植被恢复对陆地生态系统碳氮循环的作用提供科学依据。

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,林场所属区域是国家科技攻关项目“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”试验基地。该区位于黄土高原渭北台塬沟壑区,海拔高度 900~1300 m,塬面地形波状起伏,沟坡崎岖破碎,沟谷深切,水土流失严重,气候属温带大陆季风性气候,干旱指数为 1.73~1.80,平均气温 10.8 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 210 d,平均降水量 601.6 mm,年均风速 2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该区总面积 26.27 km^2 ,其中山地、沟壑面积 8.20 km^2 ,塬面 10.87 km^2 ,耕地开垦年限在 1000 年以上,农田为一年一熟制,常规管理方式,植被恢复前均为农地,造林后采用封山禁牧、自然恢复的管理措施。该区主要土壤类型为黑垆土。

1.2 土壤样品采集

本研究包括耕地、天然草地、灌木林地、乔灌混交林地和乔木林地 5 种土地利用方式,遵循典型性及恢复阶段相近两个原则,在所选样地内选取长势具有代表性、恢复阶段相近的采样区域。选取 17 个具有代表性的采样点,除去地表凋落物后,用不锈钢锹采集 0~5 cm 和 5~20 cm 土层土样并分层混合,每层为 1 个土样,每个采样点做三次重复,0~5 cm 和 5~20 cm 土层的土样分别有 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。去除混入土样中的凋落物和根系,一部分土样风干至约 40%的饱和含水量,保存在冰箱中用于可矿化碳的培养;一部分土样阴干后,去除根系、可见植物残体和石块,研磨过 2 mm 和 0.25 mm 的筛以供测定土壤有机碳组分。具体采样环境见表 1。

1.3 气体样品采集与分析

土壤温室气体采集用静态箱-气相色谱法,关于箱的大小、形状细节和实验过程参考文献[17]。箱体是

表 1 土壤采样点基本情况
Table 1 Basic situations of soil sampling sites

用地类型 Land use types	样本数 Sample number	采样地点 Sampling site	植被类型 Vegetation type	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude
耕地	2	马莲滩林场梁顶	冬小麦	1251	108°05'24.2"E	34°48'22.0"N
		马莲滩林家沟梁顶	冬小麦	1267	108°05'36.4"E	34°48'42.7"N
天然草地	2	马莲滩林场北梁顶	白羊草、芨芨、铁杆蒿	1225	108°05'22.6"E	34°48'20.8"N
		林家沟北坡	白羊草、芨芨、铁杆蒿	1265	108°05'39.3"E	34°48'31.6"N
灌木林地	5	林家沟南坡	纯沙棘林	1258	108°05'38.6"E	34°48'31.4"N
		马莲滩林场东北路西	纯沙棘林	1259	108°05'29.0"E	34°48'21.0"N
		马莲滩林场北	过熟沙棘林	1246	108°05'25.0"E	34°48'32.2"N
		林家沟西坡	黄刺玫	1249	108°05'38.4"E	34°48'16"N
		马莲滩林场东北路西	纯沙棘林	1251	108°05'28.4"E	34°48'21.1"N
		马莲滩三岔路西	侧柏、刺槐混交林	1239	108°05'35.6"E	34°48'07.5"N
		林场北 100 米路东	油松、沙棘、枫树混交林	1258	108°05'28.5"E	34°48'15.9"N
乔灌混交林地	5	马莲滩林场梁顶路西	油松、沙棘、刺槐混交林	1247	108°05'19.5"E	34°47'19.3"N
		林场西公路上	刺槐~沙棘混交林	1230	108°05'25.4"E	34°47'58.4"N
		林场梁顶路东	百榆、油松、沙棘混交林	1251	108°05'24.5"E	34°48'20.3"N
		林家沟西面山梁东北方向	油松	1254	108°05'38.2"E	34°48'32.6"N
		马莲滩三岔路东	侧柏纯林	1218	108°05'35.0"E	34°48'11.1"N
乔木林地	3	林场西公路下	刺槐纯林	1225	108°05'26.9"E	34°47'59.5"N

由 PVC 材料制成的直径 15 cm、高 25 cm 的圆柱体,箱盖中心为橡皮塞,便于针管插入采集气体样品。安置前将基座内绿色植物齐地剪掉,尽可能不扰动地表凋落物,降低对土壤表层的破坏。安置时,将箱体插入地下 10 cm,地上部分保留 15 cm 左右,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、10、30、60、90、120 min 抽取气室内的空气样品,在抽取气体之前,将箱盖拧紧,并在橡皮塞周围加水密封。待气体样品采集完成后,带回实验室用气相色谱仪 7890A 测定其中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度。CO₂、CH₄ 和 N₂O 的通量计算公式参考文献[18]。

实验于 2015 年 4—5 月进行,气体样品采集时间为晴朗天气的 11:00—15:00 之间,此时间段温度变化最小^[19-20],采样频率为每月一次。

1.4 土壤有机碳矿化培养

采用室内恒温培养、碱液吸收法测定。称取新鲜土样 50 g,与盛放 10 mL NaOH 溶液的小培养皿共同放入大培养皿中,上面倒扣同样大的培养皿,并密封大培养皿相接触的缝隙,同时设置 4 个空白,于 28 °C 恒温下培养。分别于培养第 0.5、1.5、3、5、15、39、111、159、327、399、519、1215、1575 h 进行可矿化碳测定。密封前通入新鲜空气,以满足土壤好氧微生物的呼吸需要,维持整个培养过程中土壤水分状况近似。用浓

度为 0.5 mol·L⁻¹ 的硫酸测定 NaOH 吸收的有机碳分解释放 CO₂ 的量。培养过程中 CO₂-C 的释放量计算参考文献[21]。

1.5 供试土壤基本理化性质测定

土壤总有机碳的测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法;全氮用开氏法消解,K2300 型全自动定氮仪测定。

可溶性有机碳测定:取过 1 mm 筛风干土 12.5 g,加 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液浸提,在振荡机上以 180 r·min⁻¹ 振荡 30 min 后过滤,用 TOC 仪测定滤液中有有机碳,即为可溶性有机碳;土壤轻组有机碳测定参照徐尚起等^[22]的方法;土壤颗粒有机碳的测定参考刘梦云等^[23]的测定方法;土壤易氧化有机碳测定方法参考文献[5]。

1.6 数据分析

因为土壤培养时间较短(仅 1575 h),土壤有机碳矿化主要是活性有机碳分解,所以应用一级动力学方程分析土壤有机碳矿化动态^[3,12]:

$$y=C_p(1-e^{-kx})$$

式中: C_p 表示土壤有机碳矿化潜力, g·kg⁻¹; k 表示有机碳矿化速率常数, h⁻¹; y 表示培养时间为 x 时土壤有机碳矿化累积 CO₂-C 量, g·kg⁻¹; x 表示培养时间, h。

采用 SPSS 19.0 和 Excel 2007 进行数据处理。用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),

判断不同土地利用方式和土层深度对土壤有机碳矿化量的影响。不同土地利用土壤有机碳累计矿化量、矿化率和 C_p 的多重比较采用 Duncan 新复极差法,然后经过 t 检验 ($P=0.05$ 和 $P=0.01$)。用 Pearson 法对土壤有机碳矿化参数与其他碳组分进行相关性分析,绘图均采用 Origin 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用土壤有机碳矿化累积量

土壤有机碳矿化累积释放的 CO_2-C 量是指在一定时间内土壤有机碳矿化为无机碳后所释放的 CO_2 数量(以每千克干土释放 CO_2-C 的毫克数计),它是土壤有机碳矿化速率的表征之一。如图 1 所示,在土壤矿化培养的前 519 h,土壤矿化累积的 CO_2-C 量增长迅速;随着培养时间的延长,土壤矿化累积的 CO_2-C 量增长速度急剧下降;培养 1215 h 之后,增长速度又呈略微增加趋势。0~5 cm 和 5~20 cm 土层土壤在室内培养 519 h 时,各利用方式土壤累积矿化碳含量分别占总矿化碳量的 79.43%~86.81%、80.59%~86.80%,由此可知,土壤有机碳矿化主要发生在培养的前 519 h。

土地利用方式对土壤有机碳矿化累积 CO_2-C 量的影响较大,0~5 cm 土层土壤可矿化碳累积量表现为天然草地>乔木林地>乔灌混交林地>灌木林地>耕地。天然草地在培养结束时矿化碳累积量达到 3 063.14 $mg \cdot kg^{-1}$,是耕地的 1.82 倍;林地矿化累积 CO_2-C 量在 2200~2400 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间。5~20 cm 土层土壤有机碳矿化累积 CO_2-C 量以天然草地与灌木林地最高,均在 2200 $mg \cdot kg^{-1}$ 以上,且差异不明显;乔灌混交林地和乔木林地次之,耕地最少,为 879.01 $mg \cdot kg^{-1}$,是天然草地的 38%。这五种土地利用 5~20 cm 土层土壤有机碳矿化累积 CO_2-C 量较 0~5 cm 土层均有不同程度的下降,其中乔木林地下降幅度最大(下降了 848.77 $mg \cdot kg^{-1}$),而灌木林地下降幅度最小(下降了 29.54 $mg \cdot kg^{-1}$)。

2.2 不同土地利用土壤有机碳累计矿化分配比例

土壤有机碳累计矿化分配比例是指在一定时间内土壤有机碳累计矿化量占土壤有机碳含量的比例,能在一定程度上反映土壤的固碳能力^[24]。培养 1575 h 的 0~5 cm 土层耕地土壤累计矿化分配比例显著高于其他用地类型(图 2),而其他四种土地利用类型差异不显著($P>0.05$)。说明耕地较其他用地类型土壤有机碳分解能力强,固碳作用差。5~20 cm 土层耕地的土

壤有机碳累计矿化分配比显著低于林地 31%~39% ($P<0.05$),三种不同林型之间差异不显著($P>0.05$)。除耕地(5~20 cm 土层土壤有机碳累计矿化分配比例

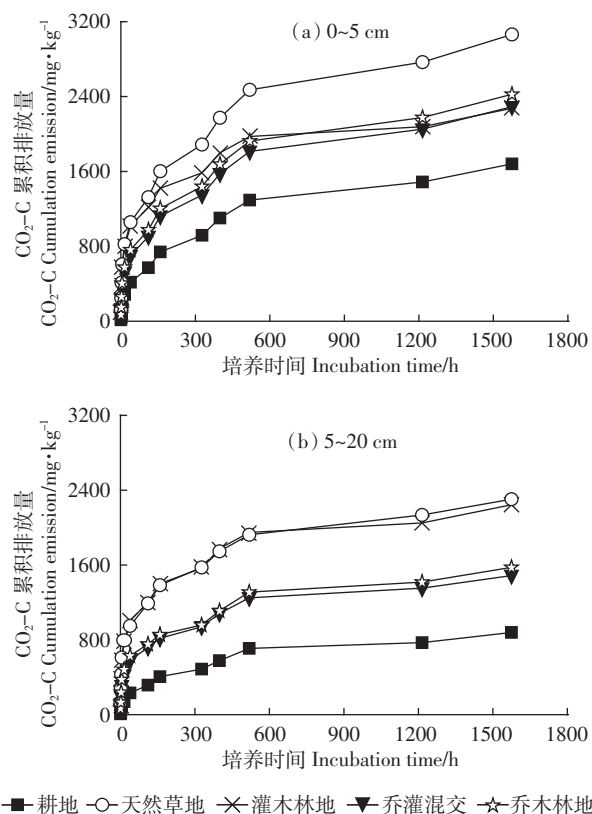
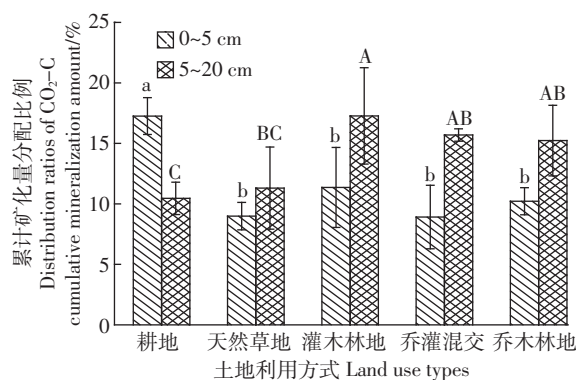


图 1 不同土地利用方式土壤可矿化碳累积量

Figure 1 Cumulative amount of mineralizable soil carbon under different land use types



不同大、小写字母分别表示 5~20 cm 和 0~5 cm 土层不同土地利用之间差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase and capital letters represent significant differences between different land uses for 0~5 cm and 5~20 cm soil depths, respectively ($P<0.05$)

图 2 不同土地利用土壤有机碳累计矿化量分配比例

Figure 2 Percentages of cumulative carbon mineralization to soil organic carbon content under different land use types

低于0~5 cm土层39%)外,其他用地类型土壤有机碳累计矿化分配比例在5~20 cm土层较0~5 cm土层有所增加,增加幅度在25%~76%之间。

2.3 不同土地利用土壤有机碳矿化模拟

用一级动力学方程拟合土壤有机碳矿化动态均达到较好效果($R^2>0.80$)^[25]。如表2所示,黄土台塬不同土地利用方式土壤矿化碳潜力 C_p 值存在较大差异,供试土壤 C_p 值在0.811~2.704 g·kg⁻¹之间,草地的 C_p 值在1.90~2.70 g·kg⁻¹之间,显著高于林地和耕地。但5~20 cm土层土壤有机碳矿化潜力较0~5 cm土层有不同程度的降低。不同土地利用土壤有机碳矿化速率常数 k 差异不显著($P>0.05$)。各利用方式土壤有机碳矿化速率常数 k 除灌木林地外均表现为5~20 cm土层高于0~5 cm土层。

不同土地利用土壤有机碳矿化潜力与土壤有机碳含量的比值(C_p/SOC 值)能够反映土壤有机碳的固存能力,该值越高,土壤有机碳矿化能力越强,有机碳的固存量越小^[4]。土地利用方式对土壤 C_p/SOC 值有显著影响,整体上耕地最高(0~5 cm土层为林地和草地的近2倍),灌木林地与乔灌混交林地次之,草地和乔木林地最低,说明耕地土壤有机碳矿化能力高,有机碳的固存量小;而草地和乔木林地土壤有机碳矿化能力较低,有机碳的固存量较大。林地和草地土壤 C_p/SOC 值表现为5~20 cm土层相较于0~5 cm土层土壤有机碳矿化能力提高,而固碳能力降低。

2.4 土地利用对土壤不同碳组分含量的影响

如表3所示,不同土地利用土壤各种碳组分含量之间差异明显。0~5 cm土层土壤各种活性碳组分和

表2 不同土地利用土壤有机碳分解一级反应方程拟合参数

Table 2 Fitting parameters of soil organic carbon decomposition by first-order reaction equation under different land use types

用地类型 Land use types	土层 Soil depth	拟合参数 Fitting parameters			C_p/SOC
		$C_p/g \cdot kg^{-1}$	$k/10^{-3} \cdot h^{-1}$	R^2	
耕地	0~5 cm	1.56±0.09c	3.47±0.57a	0.95	15.98%
	5~20 cm	0.81±0.05B	3.78±0.66A	0.95	9.21%
草地	0~5 cm	2.70±0.22a	5.64±1.56a	0.86	7.84%
	5~20 cm	1.90±0.15A	12.83±4.57A	0.80	8.70%
灌木林地	0~5 cm	1.86±0.13bc	16.80±5.84a	0.83	7.56%
	5~20 cm	1.84±0.13A	16.68±5.78A	0.83	13.58%
乔灌混交林	0~5 cm	2.07±0.15abc	4.46±1.01a	0.90	8.64%
	5~20 cm	1.27±0.10AB	7.70±2.31A	0.85	11.99%
乔木林地	0~5 cm	2.18±0.16ab	4.65±1.10a	0.90	8.23%
	5~20 cm	1.31±0.11AB	8.23±2.82A	0.80	8.68%

注:同列数据后不同大、小写字母分别表示5~20 cm和0~5 cm土层不同土地利用之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase and capital letters within a column represent significant differences between different land uses for 0~5 cm and 5~20 cm soil depths, respectively ($P<0.05$). The same below.

表3 不同土地利用土壤各组分有机碳含量

Table 3 Content of soil organic carbon components under different land use types

用地类型 Land use types	土层 Soil depth	总有机碳 TOC/g·kg ⁻¹	可溶性有机碳 DOC/g·kg ⁻¹	轻组有机碳 LFOC/g·kg ⁻¹	粗颗粒有机碳 CPOC/g·kg ⁻¹	细颗粒有机碳 FPOC/g·kg ⁻¹	易氧化有机碳 EOC/g·kg ⁻¹
耕地	0~5 cm	9.04±0.01c	0.22±0.02c	0.71±0.00c	0.27±0.00c	0.44±0.00b	2.22±0.00c
	5~20 cm	8.79±1.12C	0.19±0.03BC	0.34±0.13C	0.35±0.02C	0.71±1.15C	2.48±1.57C
天然草地	0~5 cm	34.48±3.76a	0.61±0.15a	6.81±1.22a	8.73±0.23a	8.15±0.50a	12.21±0.67a
	5~20 cm	21.85±6.57A	0.33±0.09A	2.57±1.18A	6.63±1.22A	3.76±1.59A	7.80±2.07A
灌木林地	0~5 cm	24.65±0.78b	0.30±0.11bc	3.64±0.24b	4.91±1.61b	6.00±0.75a	8.49±0.37b
	5~20 cm	13.55±3.27BC	0.14±0.05C	1.72±0.72B	1.31±0.94C	2.55±1.10B	5.07±1.12B
乔灌混交	0~5 cm	24.03±6.43b	0.38±0.12b	4.15±1.62b	5.11±2.07b	6.24±3.06a	8.48±2.18b
	5~20 cm	10.61±1.27BC	0.25±0.07B	1.35±0.67B	1.31±0.88C	1.49±0.30B	3.62±0.53C
乔木林地	0~5 cm	26.54±2.38b	0.39±0.14ab	4.53±1.28b	5.70±2.97b	6.47±2.46a	9.93±0.81b
	5~20 cm	15.17±6.52B	0.20±0.11BC	1.97±1.30A	1.74±1.12B	2.30±1.53B	5.48±2.86B

总有机碳含量均表现为草地>灌木林地>乔灌混交林地>乔木林地>耕地,天然草地、灌木林地、乔灌混交林地、乔木林地土壤总有机碳含量分别是耕地的3.52、2.71、2.52、2.45 倍,且 5~20 cm 土层土壤有机碳各组分含量均低于 0~5 cm 土层土壤。

2.5 土壤有机碳矿化参数与其他碳组分的关系

如表 4 所示,土壤有机碳矿化碳潜力 C_p 值与可溶性有机碳和轻组有机碳之间极显著正相关($P<0.01$),与土壤总有机碳、全氮、粗颗粒有机碳、细颗粒有机碳、易氧化有机碳显著正相关($P<0.05$),土壤有机碳矿化碳潜力 C_p 值与土壤可溶性有机碳含量的相关系数最大,高达 0.996,而土壤有机碳矿化速率常数 k 与各碳组分之间的相关性均未达到显著水平($P>0.05$)。

2.6 土地利用对土壤温室气体排放速率的影响

如图 3 所示,土地利用对黄土台塬土壤主要温室气体 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放量影响较大。耕地土壤 CO_2 排放最高,达 $0.55 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,显著高于林地和草地 26%~67%;其次为灌木林地、乔木林地、天然草地,乔灌混交林地最低,为 $0.29 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。灌木林地、乔木林地、天然草地三种利用方式土壤 CO_2 排放量差异不显著,而与耕地和乔灌混交林地之间差异显著($P<0.05$)。耕地土壤 N_2O 的排放强度最高,为 $16.13 mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,乔灌混交林地次之,二者差异不显著;其次为灌木林地、乔木林地;草地最低,为 $2.71 mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,分别是耕地、乔灌混交林地、灌木林地、乔木林地的 16.79%、17.76%、28.19%、44.37%。 CH_4 的排放通量均为负值,土壤 CH_4 的吸收强度为林地>天然草地>耕地,且各土地利用之间差异不显著。

3 讨论

3.1 土地利用对土壤有机碳矿化的影响

本研究中,土壤有机碳矿化累积量呈现出两个阶段,培养初期增长迅速,后期缓慢。土地利用方式的改变,造成土壤理化性质尤其是土壤有机碳含量的改变,加之其他生物要素和非生物要素以及人类干扰方式的差异,从而对土壤有机碳的矿化过程和矿化速率

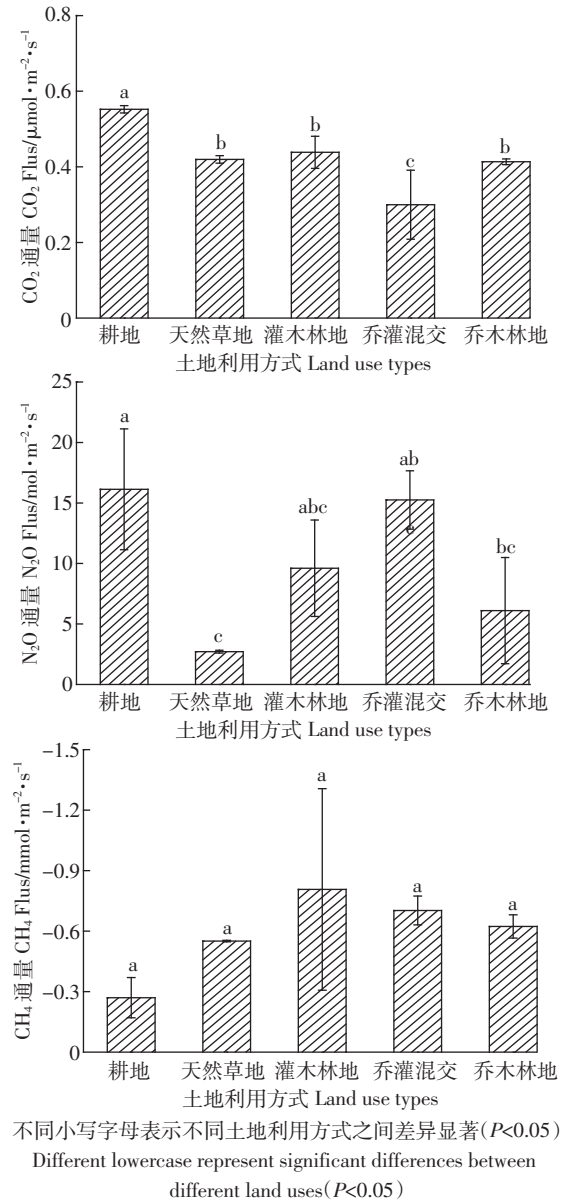


图 3 不同土地利用土壤 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放通量
Figure 3 Soil CO_2 , N_2O and CH_4 emissions under different land use types

产生影响^[24]。在矿化培养初期(519 h 内),不同土地利用土壤有机碳矿化累积 CO_2 -C 量较高,达到总矿化量的 79.43%~86.81%,与张鹏等^[11]的研究结果一致。这主要是因为矿化培养早期,分解的土壤有机碳主

表 4 土壤有机碳矿化参数 C_p 、 k 与土壤各理化性质的相关系数
Table 4 Correlations of C_p and k with soil physical and chemical properties

项目 Item	总有机碳 TOC	全氮 TN	可溶性有机碳 DOC	轻组有机碳 LFOC	粗颗粒有机碳 CPOC	细颗粒有机碳 FPOC	易氧化有机碳 EOC
C_p	0.928*	0.893*	0.996**	0.969**	0.951*	0.906*	0.915*
k	0.183	0.250	-0.141	0.057	0.128	0.222	0.162

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。
** indicates significant correlation at 0.01 level(bilateral); * indicates significant correlation at 0.05 level(bilateral).

要来源于由大部分植物残体、相当数量的微生物和周转迅速的微小动物碎片等组成的活性碳,这些易分解组分快速分解,其中大量养分迅速释放,促进了微生物活性,因此土壤中碳的矿化速率和矿化量增长迅速。随着培养时间的延长,土壤中易分解组分被微生物完全利用后,开始转向较难分解的木质素和纤维素等成分,释放给微生物的能源物质缓慢,微生物活动也相应缓和,矿化速率随之减缓,碳分解量随之下降^[13]。

土壤有机碳分解速率常数 k 介于 $3.47 \times 10^{-3} \sim 12.80 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 之间,土壤 C_p 值在 $0.81 \sim 2.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Moscatelli 等^[26]发现土地利用方式的改变能对土壤有机碳矿化产生较大影响,农田的矿化累积 $\text{CO}_2\text{-C}$ 量比草地高。也有研究认为土地利用方式影响了黑土有机碳的分解速率,但有机碳分解速率常数与有机碳含量之间并没有呈现明显的规律性^[27]。本研究结果表明,土地利用方式对黄土台塬区土壤有机碳矿化有较大影响,但有机碳分解速率常数与有机碳含量之间并没有呈现明显的相关性,与 Parton 等^[27]的研究结果一致。整体来看,土壤有机碳矿化潜力 C_p 、有机碳分解速率常数 k 和固碳能力表现为草地>林地>耕地,且 5~20 cm 土层较 0~5 cm 土层土壤有机碳矿化累积量有所降低,其中耕地的降幅最大,高达 48.2%,可能是由于土壤表层有机碳含量较高、活性有机碳含量所占比例较高所致^[28]。土壤有机碳矿化累积量、矿化潜力均随土层的加深而降低,而土壤有机碳矿化分配比例和有机碳矿化速率常数则随着土层加深而增加(耕地与林地、草地刚好相反)。这与其他研究结果不一致,可能与本研究中土地利用方式的差异有关。本研究中,林地和草地封闭管理,0~5 cm 土层积累了大量的有机物质,为微生物的繁殖和生长提供了有利条件,因而增加了可矿化碳的含量,但由于占有有机碳比例低,与耕地相比,总体上增加了碳的固定。5~20 cm 土层回归土壤的腐殖物质减少,微生物活性减弱,降低了其对土壤碳的矿化能力,但矿化碳占总有机碳的比例有所增加,因而 5~20 cm 土层林地和草地固碳能力较 0~5 cm 土层有所降低;而耕地由于采用传统耕作方式,0~20 cm 不断深耕及农产品回归土壤的量少,所以微生物活性强,可矿化碳占有有机碳比例高,有机碳固定能力弱。5~20 cm 与 0~5 cm 土层相比,碳的矿化程度减少反而使其固碳能力增加。

3.2 土地利用对土壤温室气体排放的影响

土壤产生 CO_2 是土壤呼吸的结果。土壤呼吸是一

个复杂的生物学过程,受到土壤温度、湿度、有机质以及人为活动等多种生物和非生物因素的综合影响,不同土地利用方式土壤温度、微生物数量及酶活性等的不同导致土壤呼吸的差异^[29]。陈书涛等^[30]研究认为土地利用方式对土壤呼吸的影响作用大于土壤温度、湿度等环境因子。Larionova 等^[31]研究发现林地土壤 CO_2 释放速率显著高于草地和农田,并且认为造成林地土壤呼吸速率显著高于草地和农田的主要原因是林地土壤与草地和农田土壤碳密度之间的差异。本研究发现耕地土壤 CO_2 排放强度显著高于林地和天然草地,草地有机碳含量显著高于林地,耕地土壤有机碳含量最低。这与土壤 CO_2 排放速率的变化规律不一致,可能是由于土壤质地以及人为活动对耕地土壤结构造成干扰,使得土壤孔隙度变大,有利于土壤微生物及土壤动物的呼吸。

土壤中 N_2O 的产生主要是在微生物的参与下,通过硝化和反硝化作用完成,而土壤基本性质的改变影响了土壤微生物硝化和反硝化过程,最终使得土壤的 N_2O 排放量在不同土地利用方式下存在一定的差异^[32]。林杉等^[33]研究认为 N_2O 年排放通量为菜地>果园>旱地>水改旱地>林地,并且认为此结果主要是由果园有较高的施肥量而林地不施肥,以及林地土壤温度较低造成的。本研究区土壤 N_2O 的排放强度为耕地最高 ($16.13 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),林地次之,草地最低 ($2.71 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),说明耕地是黄土台塬区土壤 N_2O 的主要排放源。这可能是因为耕地长期增施氮肥增加了农田中氮素含量,从而促进了 N_2O 的排放,而且耕地经过系统翻耕能够促进矿化作用,进而生成铵态氮及硝态氮,增加土壤氮素的积累,待土壤温度、湿度等条件适宜情况下, N_2O 会大量释放^[31]。这与 Dheri 等^[34]的研究结果一致。

CH_4 是仅次于 CO_2 的温室气体,土壤产生 CH_4 主要分为两个步骤:首先,在厌氧环境中厌氧细菌将土壤中有有机物质分解为简单的小分子化合物;其次,产甲烷细菌进一步将小分子化合物转化为 CH_4 ^[32]。土壤 CH_4 的吸收汇强度为林地>天然草地>耕地,且各土地利用之间差异不显著 ($P < 0.05$),与刘慧峰等^[16]的研究结果一致。目前关于 CH_4 产生和排放的影响机制报道较少且不一致,有待于进一步研究和讨论。

3.3 不同土地利用土壤有机碳矿化潜力 C_p 值与其他碳组分之间的相关性

土壤活性有机碳是易被土壤微生物分解矿化,对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳,如植物

残茬、根类物质、真菌菌丝、微生物及其渗出物(如多糖)等。本研究测定了黄土台塬不同土地利用土壤总有机碳和活性有机碳组分含量,结果表明土壤各种活性碳组分和总有机碳含量均表现为草地>林地>耕地的趋势,且5~20 cm土层土壤有机碳各组分含量低于0~5 cm土层。

已有研究表明,土壤有机碳的矿化速率动态与可溶性有机碳含量的变化趋势一致,特别是黄泥土二号,可溶性有机碳含量与土壤有机碳日均矿化量达到极显著相关水平^[35]。另外,土壤有机碳矿化也受活性有机碳组分初始含量的影响,土壤有机碳中活性较高的那部分易被微生物分解利用,是潜在的可矿化有机碳^[7]。本研究发现,土壤 C_p 值与可溶性有机碳、轻组有机碳极显著正相关($P<0.01$),这是由于水溶性的有机碳较易为微生物利用。一般认为,有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件,有机碳在转化为 CO_2 、 CH_4 前必须先进入溶液中,因此可溶性有机碳的含量动态和周转应与土壤有机碳的矿化有密切关系。土壤 C_p 值与土壤总有机碳、全氮、易氧化态有机碳之间的相关性显著($P<0.05$)。通过回归分析发现,尽管不同土地利用土壤有机碳组分含量差别很大(表3),但土壤有机碳矿化潜力 C_p 值与土壤轻组有机碳之间的一元回归方程 $y=1.081+0.242x$ 的决定系数 R^2 为0.818,达到了极显著水平($P<0.01$),这说明土壤轻组有机碳可解释有机碳矿化的81.8%。二元回归方程 $y=1.183-0.001x_1+0.293x_2$ 中,在保留土壤轻组有机碳含量的同时,引入变量土壤可溶性有机碳含量,回归方程的决定系数 R^2 增加到0.824,也达到了极显著水平($P<0.01$),表明土壤轻组有机碳含量和可溶性有机碳含量共同解释土壤有机碳矿化的82.4%的变异。因此,黄土台塬区土壤矿化碳潜力受土壤中轻组有机碳和可溶性有机碳共同作用的影响。

4 结论

(1)土壤有机碳矿化总量表现为草地最高,林地次之,耕地最低,0~5 cm土层土壤可矿化碳含量显著高于5~20 cm土层。

(2)土壤总有机碳含量与其他各种活性碳组分含量分布规律一致:草地显著高于林地,林地显著高于耕地,0~5 cm土层明显高于5~20 cm土层,可溶性有机碳和轻组有机碳与土壤有机碳矿化潜力 C_p 值存在极显著正相关关系,总有机碳、全氮、大中颗粒态有机碳、易氧化态有机碳与土壤有机碳矿化潜力 C_p 值存

在显著正相关关系。

(3)土地利用方式对黄土台塬区土壤主要温室气体 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的释放速率具有重要影响,土壤温室气体通量表现为 CO_2 、 N_2O 的排放和 CH_4 的吸收。耕地 CO_2 和 N_2O 的排放强度明显高于其他利用方式,各利用方式 CH_4 的吸收强度差异不明显。

参考文献:

- [1] 李海防, 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(6): 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.
- [2] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1494-1500.
CHEN Tao, HAO Xiao-hui, DU Li-jun, et al. Effects of long-term fertilization on paddy soil organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1494-1500.
- [3] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 117-122.
LUO You-jin, ZHAO Guang, GAO Ming, et al. Organic carbon distribution in aggregates and soil organic carbon mineralization in different vegetation covering[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 117-122.
- [4] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.
LI Shun-ji, QIU Li-ping, ZHANG Xing-chang. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [5] 吴秀坤, 李永梅, 李朝丽, 等. 纳版河流域土地利用方式对土壤总有机碳以及活性有机碳的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 6-11.
WU Xiu-kun, LI Yong-mei, LI Chao-li, et al. Effects of land use type on soil total organic carbon and soil labile organic carbon in Naban River watershed[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 6-11.
- [6] 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1053-1059.
ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, et al. Effects of Chinese prickly ash orchard on soil organic carbon mineralization and labile organic carbon in karst rocky desertification region of Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1053-1059.
- [7] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 1918-1923.
WANG Qing-kui, WANG Si-long, YU Xiao-jun, et al. Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broad leaved forest and Chinese fir plantation[J]. *Chinese*

- Journal of Ecology*, 2007, 26(12):1918–1923.
- [8] 罗友进, 魏朝富, 李渝, 等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(1):257–266.
- LUO You-jin, WEI Zhao-fu, LI Yu, et al. Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1):257–266.
- [9] 郭建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):130–135.
- WU Jian-hong, PAN Jian-jun, GE Xu-juan, et al. Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use type[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):130–135.
- [10] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):530–538.
- WU Jian-guo, ZHANG Xiao-quan, XU De-ying. The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan Mountain forest zone[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4):530–538.
- [11] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁夏旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2518–2525.
- ZHANG Peng, LI Han, JIA Zhi-kuan, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2518–2525.
- [12] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同类型土壤有机碳分解速率的比较[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10):2251–2255.
- YIN Yun-feng, CAI Zu-cong. The comparison of different types of soil organic carbon decomposition rate[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10):2251–2255.
- [13] 宋媛, 赵溪竹, 毛子军, 等. 小兴安岭4种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性[J]. 生态学报, 2013, 33(2):443–453.
- SONG Yuan, ZHAO Xi-zhu, MAO Zi-jun, et al. SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing'an Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2):443–453.
- [14] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8):1712–1721.
- LI Zhong-pei, WU Xiao-chen, CHEN Bi-yun. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8):1712–1721.
- [15] 王海飞, 贾兴永, 高兵, 等. 不同土地利用方式土壤温室气体排放对碳氮添加的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(6):1172–1182.
- WANG Hai-fei, JIA Xing-yong, GAO Bing, et al. Response of greenhouse gas emission to application of carbon and nitrogen in soils different in land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6):1172–1182.
- [16] 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, 33(7):1960–1968.
- LIU Hui-feng, WU Xing, LI Ya, et al. Effects of land use change on greenhouse gas fluxes from soils: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7):1960–1968.
- [17] 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(3):177–185.
- [18] 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.
- [19] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Diurnal and seasonal CO₂-C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1):286–293.
- [20] Benasher J, Cardon G E, Peters D, et al. Determining root activity distribution by measuring surface carbon dioxide fluxes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3):926–930.
- [21] 李媛媛, 齐璐, 刘梦云, 等. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤有机碳分解特性[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(3):346–352.
- LI Yuan-yuan, QI Lu, LIU Meng-yun, et al. Decomposition of soil organic carbon in loess tableland relative to type of land use[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(3):346–352.
- [22] 徐尚起, 崔思远, 陈阜, 等. 耕作方式对稻田土壤有机碳组分含量及其分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):127–132.
- XU Shang-qi, CUI Si-yuan, CHEN Fu, et al. Effect of tillage on content of density fractions of paddy soil organic carbon and its spatial distribution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):127–132.
- [23] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):218–226.
- LIU Meng-yun, CHANG Qing-rui, QI Yan-bing, et al. Soil organic carbon and particulate organic carbon under different land use types on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2):218–226.
- [24] 戴慧, 王希华, 阎恩荣. 浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2007, 26(7):1021–1026.
- DAI Hui, WANG Xi-hua, YAN En-rong. Effects of land use type on soil organic carbon mineralization in Tiantong Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7):1021–1026.
- [25] Hanson P, Edwards N, Garten C, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):115–146.
- [26] Moscatelli M C, Tizio A D, Marinari S, et al. Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 97(1):51–59.
- [27] Parton W J, Schimel D S, Coleand C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5):1173–1179.
- [28] 吴建国, 艾丽, 朱高, 等. 祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. 草地学报, 2007, 15(1):20–28.
- WU Jian-guo, AI Li, ZHU Guo, et al. Mineralization of soil organic carbon and its motivating factors to the dragon spruce forest and alpine

- meadows of the Qilian Mountains[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(1):20–28.
- [29] 郭明英, 朝克图, 尤金成, 等. 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性[J]. 草地学报, 2012, 20(1):42–48.
- GUO Ming-ying, CHAO Ke-tu, YOU Jin-cheng, et al. Soil microbial characteristic and soil respiration in grassland under different use patterns[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(1):42–48.
- [30] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3):1017–1025.
- CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, et al. Spatial variability of soil respiration under different land utilization way influence factors[J]. *Environment Science*, 2013, 34(3):1017–1025.
- [31] Larionova A A, Yermolayev A M, Blagodatsky S A, et al. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by landuse[J]. *Biol Fertil Soil*, 1998, 27(3):251–257.
- [32] 石洪艾, 李禄军, 尤孟阳, 等. 不同土地利用方式下土壤温度与土壤水分对黑土 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2286–2292.
- SHI Hong-ai, LI Lu-jun, YOU Meng-yang, et al. Impact of soil temperature and moisture on soil N_2O emission from mollisols under different land-use types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11):2286–2292.
- [33] 林 杉, 冯明磊, 阮雷雷, 等. 三峡库区不同土地利用方式下土壤氧化亚氮排放及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6):1269–1276.
- LIN Shan, FENG Ming-lei, RUAN Lei-lei, et al. Soil N_2O flux and its affecting factors under different land use patterns in Three Gorges Reservoir Area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6):1269–1276.
- [34] Dheri G S, Lal R, Verma S. Effects of nitrogen fertilizers on soil air concentration of N_2O and corn growth in a greenhouse study[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2015, 29(1):95–105.
- [35] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4):544–552.
- LI Zhong-pei, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Soluble organic carbon content dynamic and its relationship with soil organic carbon mineralization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):544–552.