

黄土丘陵区不同植被类型间土壤CO₂释放与模型模拟及敏感性分析

徐万恒¹, 李广^{1*}, 杨传杰², 刘帅楠², 杜佳团², 刘兴宇¹

(1. 甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探究黄土丘陵区3种典型植被(文冠果(*Xanthocera ssorbifolium*)林地、冰草(*Agropyron cristatum*)荒草地、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)灌丛)覆盖下土壤CO₂排放规律及影响因素, 比较不同植被类型覆盖土壤CO₂排放的差异, 为该地区减少土壤CO₂排放选择合适的退耕还林还草植被提供依据。【方法】基于DNDC模型模拟, 结合实际土壤CO₂排放通量及土壤影响因子, 检验该模型对不同植被类型间土壤CO₂排放模拟的适宜性, 并对其进行敏感性分析。【结果】黄土丘陵区3种典型植被覆盖土壤CO₂排放季节变化趋势均呈单峰曲线, 与土壤表层(5 cm)温度、含水量变化趋势相似, 并且该地区不同植被类型间土壤CO₂排放通量与土壤表层(5 cm)温度、含水量均呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 说明土壤温度、含水量是影响CO₂排放的关键因素; 文冠果林地土壤年均CO₂排放通量最少, 分别比冰草荒草地、沙棘灌丛低40.785%、40.835%; DNDC模型对不同植被类型间土壤CO₂排放的模拟结果与实测结果较为一致, 文冠果林地 $R=0.928$ ($P < 0.01$), 荒草地 $R=0.932$ ($P < 0.01$), 沙棘灌丛 $R=0.983$ ($P < 0.01$)。【结论】DNDC模型可以用来模拟该地区3种典型植被覆盖土壤CO₂的排放; 土壤表层SOC含量是模拟该地区3种典型植被覆盖土壤CO₂排放的敏感因子, 其变化程度对模型模拟结果影响最大。文冠果为黄土丘陵区退耕还林还草首选植被。

关键词: 土壤; CO₂排放通量; 温度; 含水量; DNDC模型

中图分类号: S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2023)01-0029-09

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2023.01.004



全球变暖是人类社会目前面临的重要环境问题之一, 并且受到全世界的高度关注和重视^[1]。目前大多数研究表明, 温室气体的过量排放是导致全球变暖的主要原因。而CO₂作为温室气体的重要组成部分, 对全球变暖的增温贡献率高达56%^[2]。森林生态系统是陆地生态系统的主体, 约占陆地总面积的1/3

($4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$), 且森林生态系统碳储量占陆地生态系统的57%, 在维持全球碳平衡、减缓全球气候变化等方面起到重要的作用^[3-4]。而且森林土壤呼吸也是全球土壤碳循环的重要组成部分, 其动态变化将对全球土壤碳循环产生深远的影响^[5]。近年来, 有研究发现^[6-7]植被不仅可以改善土壤质量, 还会对土壤温室气体排放产生影响。因此, 关注植被类型对土壤CO₂排放的影响具有重要意义。

DNDC模型是目前国际上应用十分广泛的生物地球化学模型之一。自1992年首次发表此方面文章以来, 经过20多年的不断研究改进, DNDC模型从最初的只适用于农田生态系统N₂O的模拟, 逐步发展到如今能对草地、湿地、森林等多种生态系统进行模拟, 并且在森林生态系统的温室气体排放过程模拟方面

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-03-07

基金项目: 甘肃省重点人才项目(LRYCZ-2020-1); 甘肃省重点研究发展计划(20YF8NA135); 甘肃省财政专项(GSCZZ 20160909)

作者简介: 徐万恒(1997-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生。

E-mail: 627307420@qq.com

*通信作者。E-mail: lig@gsau.edu.cn

取得了较好的效果^[8]。柯韵^[9]以川中丘陵区农田与森林生态系统为研究对象,研究土壤主要环境因子对CO₂及N₂O排放的影响,并运用观测数据对DNDC模型进行验证,发现农田和森林土壤呼吸的主要驱动因子是土壤温度和湿度。叶舒等^[10]以长白山阔叶红松林土壤为研究对象,基于DNDC模型模拟了土壤碳氮温室气体的动态变化,发现在夏季土壤CO₂排放通量出现峰值。杨黎等^[11]运用DNDC模型研究东北地区春玉米农田固碳减排措施,发现优化施氮的措施可以有效降低温室气体排放。朱相成等^[12]对影响稻田甲烷排放的因子的敏感性分析发现,平均气温是影响不同稻作区甲烷排放的最大因子。

纵观DNDC模型关于温室气体排放的研究,大多都集中在农田、野生森林生态系统的温室气体排放模拟,对于退耕还林还草植被间土壤CO₂排放以及敏感性分析的研究相对较少。本研究以干旱半干旱的黄土丘陵区常见的典型植被为研究对象,基于DNDC模型模拟研究,结合实际土壤CO₂排放通量及影响因子,检验该模型对不同植被类型间土壤CO₂排放模拟的适宜性,并对其进行敏感性分析。明确影响土壤CO₂排放的主要因素,探究该地区人工林常见典型植被覆盖土壤CO₂排放规律及其重要影响因子,为该地区减少土壤CO₂排放、选择合适的退耕还林还草植被提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

研究区位于甘肃省定西市安定区(E 103°52′~105°13′, N 34°26′~35°35′),地处黄土高原丘陵沟壑区。该区属温带大陆性半干旱气候,气象要素特征主要为干旱、光富、热欠,年平均气温7.2℃,年均太阳辐射141.6×1.48 kJ/cm²,年均日照时数2 476.6 h,年无霜期140 d。多年的年均降水量390.99 mm,降水季节分配不均,主要集中在7—9月,降水量低,年际变化很大。该区为典型的黄绵土,土质绵软,抗侵蚀能力差。该地区主要为退耕还林试验区,主要人工植被有文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)、沙棘(*Hippophae hamnoides*)、锦鸡儿(*Caragana sinica* Rehder)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)。

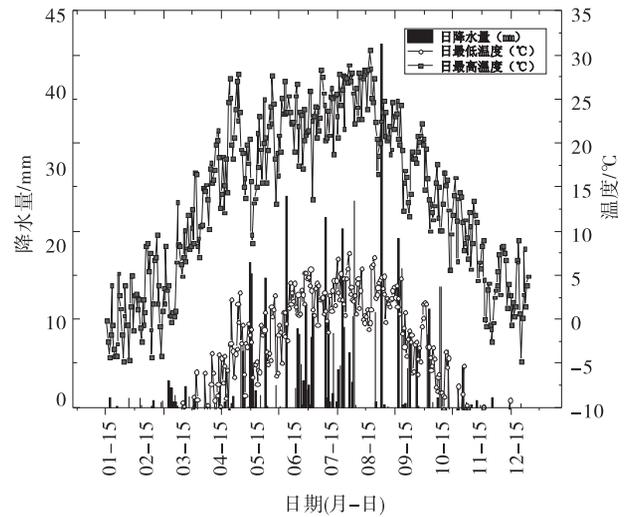


图1 试验地2019年日均降水量、日均温度

Fig. 1 Average daily precipitation and average daily temperature in the experimental site in 2019

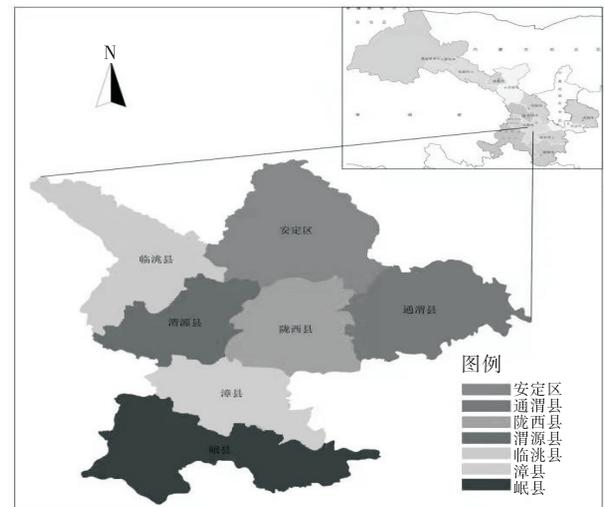


图2 研究区地理位置

Fig 2 Pilot location

1.2 试验设计与采样

试验于2019年1—12月,在甘肃省定西市水土保持科学研究所试验区进行。在试验区域内,以冰草荒草地为对照组,选择文冠果林地、沙棘林地作为不同植被类型(表1),每种植被类型随机设置3个样方(8 m×8 m),每个样方之间至少有5 m的缓冲区。

1.2.1 CO₂气体采集与测定 采用静态暗箱—气相色谱法测定土壤CO₂排放,静态箱顶箱尺寸为50 cm×50 cm×50 cm,在箱顶壁安装有2个搅拌风扇,箱侧面安装有电源插头、取气体样品接口以及温度测量传感器用来测量箱内温度。采气管线与箱体有过壁接头方便接通风扇电源以及抽取气箱内气体。静态箱底座尺寸为50 cm×50 cm×20 cm,上端有密封条,

表 1 样地植被特征

Table 1 Vegetation characteristics of sample plots

植被类型	丰富度	优势种组成	植被覆盖度/%
文冠果林地(W)	4	文冠果+冰草+柴胡(<i>Bupleurum chinenses</i>)	60
冰草荒草地(H)	9	冰草+冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)+大针茅(<i>Stipa greadis</i>)	>90
沙棘林地(S)	3	沙棘+冰草	85

底座的四周侧板下四边制成刀口以便于插入土壤中,底座侧板靠近下半部分开有 2 排圆孔,其目的是让植物的根系可以穿过。密封条用来阻断箱内外空气的自由交换。顶箱外面包有泡沫板,以防止太阳辐射下采样箱壁温度和箱内空气温度升高,影响观测结果。

在选定的 9 个样方内各随机设置一个 0.5 m×0.5 m 的固定采样区用来定期采集 CO₂ 气体。CO₂ 采集从 1 月开始,采样频率为 2 周 1 次,采样时间为 9:00~11:00,并以此阶段测定值来代表日均交换通量。扣箱 50 min,每隔 10 min 采集气体 1 次,各 100 mL,为不影响植物正常生长,每次采样结束后打开顶箱。CO₂ 用气相色谱仪进行测定。测定条件为:ECD 检测器温度 250 °C,色谱柱温度 50 °C,载气为高纯度氮气气体,流速 40 mL/min。用下式计算 CO₂ 排放通量。

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

式中:M 为其摩尔质量,P₀和 T₀为理想气体标准状态下的空气压力和气温(分别为 1 013.25 hPa 和 273.15 K),V₀为目标化合物在标准状态下的摩尔体积(22.4 L/mol),H 为正方体或长方体采样箱内气室高度,P 和 T 为采样时箱内的实际气压和气温,d_c/d_i为箱内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。

1.2.2 土壤数据的采集与测定 土壤样品每月采集 1 次,在 9 个样方内按对角线五点法取 0~10 cm 土壤样品,测定有机碳、铵态氮含量、硝态氮含量、pH 值、容重。其中,用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机碳含量;土壤铵态氮、硝态氮用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提后,通过凯氏定氮仪测定含量;pH 值采用电位法(水土比为 2.5:1);容重采用环刀法测定^[13]。土壤数据用于 DNDC 模型校正和参数输入^[14]。

1.2.3 气象数据的采集 研究所需气象数据由试验点气象站自动测定并收集。

1.3 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整合,通过 SPSS 25 对 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 排放通量实测值与模拟值进行 Pearson 相关性分析,采用相关性分析探讨土壤 CO₂ 排放通量与土壤温度(5 cm 处)、含水量(0~10 cm)之间的关系。运用 DNDC 模型模拟 3 种典型植被覆盖土壤 2019 年 1—12 月 CO₂ 排放通量。使用 Origin 2018 绘图。

1.4 DNDC 模型

1.4.1 DNDC 模型概述 DNDC 模型可应用于不同类型土壤生态系统的生物地球化学过程的研究,该模型由 2 部分构成:第 1 部分 土壤气候、作物生长发育和土壤有机质分解 3 个子模型,其作用是利用输入的环境因素和人类活动来反映土壤环境因子的动态变化和模拟预测生态驱动因子的变化情况;第 2 部分 硝化作用模型、反硝化作用模型以及发酵作用模型 3 个子模型,用来模拟微生物在不同土壤环境的含量和状况,估算生态系统中 N₂O、CH₄、CO₂ 气体的排放量^[15]。

1.4.2 模型参数 本研究使用 DNDC 模型 9.5 版本,根据 DNDC 模型模拟运行要求,需要输入试验地土壤数据(容重、pH 值、表层 SOC 含量等)及植被管理措施等数据,并建立气象数据库(日最高气温、日最低气温、日降雨量等)以及待模拟点位的地理位置。

1.4.3 模型验证 模型验证是利用实测数据与模型模拟值进行对比分析,来确定模型模拟是否符合实际。目前,对比分析的指标主要是均方根误差(RMSE)和决定系数(R²)^[17]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(M_i - \bar{M}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中:n 为实际观测次数,O_i为模拟值,M_i为实测

表2 DNDC模型参数
Table 2 Parameters used in DNDCmodel

因子	参数	数据来源
气候	日最高气温、日最低气温、日降水量等	气象站实测
土壤	容重、土壤SOC、硝态氮、铵态氮含量、pH	实测
地理位置	模拟地点的名称、经纬度	文献资料 ^[16]
植被	植被种类、生长类型、有效积温、需水量、最大高度	实测及调查

值, \bar{O}_i 为各模拟值的平均值, \bar{M}_i 为各实测值的平均值。

1.4.4 模型敏感性分析 为研究DNDC模型中部分参数变化导致的CO₂排放速率的变化,寻找众多不确定性因素中对CO₂排放有着重要影响的敏感性因素^[18]。将2019年模拟CO₂排放总量作为基础情景,使用模型进行敏感性分析,并且参考前人的研究结果,温度、水分、土壤SOC含量是影响土壤CO₂排放的重要因素^[19-21]。选择年平均温度、土壤表层SOC含量、年降水量3个参数作为敏感因子。在一定范围(年均温度±3℃;土壤表层SOC含量、年降水量±30%)运行DNDC模型并收集CO₂排放的模拟结果进行定量比较,使用敏感度指数(SI)量化CO₂排放对所选输入因子变化的敏感性。

$$SI = \frac{(O_{\max} - O_{\min}) / \bar{O}}{(F_{\max} - F_{\min}) / \bar{F}} \quad (4)$$

式中: O_{\max} 、 O_{\min} 分别为相对应模拟结果的最大值、最小值; \bar{O} 为 O_{\max} 和 O_{\min} 的平均值; F_{\max} 、 F_{\min} 分别为检验情景中输入参数的最大值和最小值; \bar{F} 为 F_{\max} 和 F_{\min} 的平均值。SI值越大,表明模拟结果对该敏感因子的敏感性越高,且当 $SI > 0$ 时,模拟结果与给定参数呈正相关;当 $SI < 0$ 时,模拟结果与给定输入参数呈负相关^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型覆盖土壤CO₂排放特征

3种典型植被覆盖土壤CO₂排放通量与土壤表层(5 cm深处)的温度变化趋势相似,随时间变化均表现为单峰曲线,其峰值均出现在夏季7月下旬与8月上旬之间、最小值均出现在12月下旬与翌年1月上旬之间。3种典型植被覆盖土壤CO₂排放具有相同的季节变化趋势(图3)。文冠果林地、冰草荒草地、沙棘灌丛土壤CO₂排放通量分别为0.862~195.473、3.214~362.647、5.885~357.049 mg/(m²·h),年均土壤CO₂

排放通量分别为51.420、86.837、86.910 mg/(m²·h)。2019年3种典型植被覆盖下年均土壤CO₂排放通量大小依次为S>H>W。

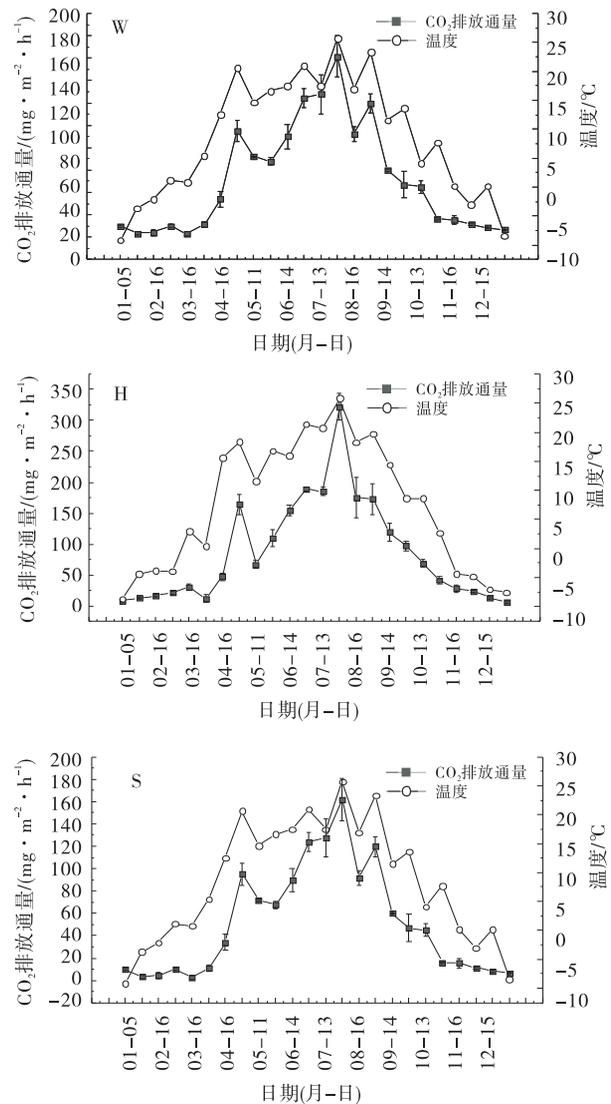


图3 土壤CO₂排放通量与土壤温度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil CO₂ emission flux and soil temperature

注:W:文冠果林地;H:荒草地;S:沙棘灌丛;

2.2 土壤温度、含水量对土壤呼吸的影响

利用2019年试验地土壤CO₂排放通量、温度(5 cm处)、含水量(0~10 cm土层)实测数据,检验土

壤温度、含水量对 CO₂ 排放通量的影响。通过相关性分析得出 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 排放通量均与土壤温度、含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 3 种典型植被土壤温度与含水量之间也均呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (表 3)。

表 3 土壤 CO₂ 排放通量与土壤 (5cm 处) 温度、含水量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil CO₂ emission flux with soil temperature and water content

植被类型	CO ₂ 排放通量	土壤温度	土壤含水量
W	CO ₂ 排放通量	1.000	
	土壤温度	0.904**	1.000
	土壤含水量	0.530**	0.653**
H	CO ₂ 排放通量	1.000	
	土壤温度	0.895**	1.000
	土壤含水量	0.581**	0.570**
S	CO ₂ 排放通量	1.000	
	土壤温度	0.860**	1.000
	土壤含水量	0.532**	0.605

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)

2.3 DNDC 模型验证及误差分析

模型模拟与实测数据的季节变化趋势相似, 而且模型可以捕捉到明显的天气变化, 从而进行响应 (图 4)。如 4 月 27 日有一次明显的升温以及 7 月 13 日和 7 月 29 日各有一次降水都引起了土壤 CO₂ 排放通量增大。

结果表明, 文冠果林地、冰草荒草地、沙棘灌丛实测值与模型模拟值之间的皮尔逊 (Pearson) 相关系数分别为 $R=0.928$ 、 $R=0.932$ 、 $R=0.983$, 相关性均达到显著水平 ($P < 0.01$)。3 种典型植被 (W、H、S) 覆盖土壤 CO₂ 排放通量的实测值与模型模拟值的均方根误差 (RMSE) 分别为: 6.247; 7.757; 8.667, 决定系数 (R^2) 分别为 0.983; 0.991; 0.991 (表 4)。上述指标都表明 DNDC 模型能较好地模拟 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 排放。

2.4 模型敏感性分析

由表 5 可见, 土壤表层 SOC 含量以 9.441 g/kg 为基础情景, 从 70% 增加到 130% 时, 每增加 10%, 文冠果林地、冰草荒草地、沙棘灌丛 CO₂ 模拟值分别增加 4.22%、4.28%、4.31%, SI 指数分别为 0.425、0.428、

表 4 土壤 CO₂ 排放通量与模拟值分析结果

Table 4 Soil CO₂ emission flux and simulation value analysis results

植被类型	相关系数	均方根误差	决定系数	显著性
W	0.928	6.247	0.983	$P < 0.01$
H	0.923	7.757	0.991	$P < 0.01$
S	0.983	8.667	0.991	$P < 0.01$

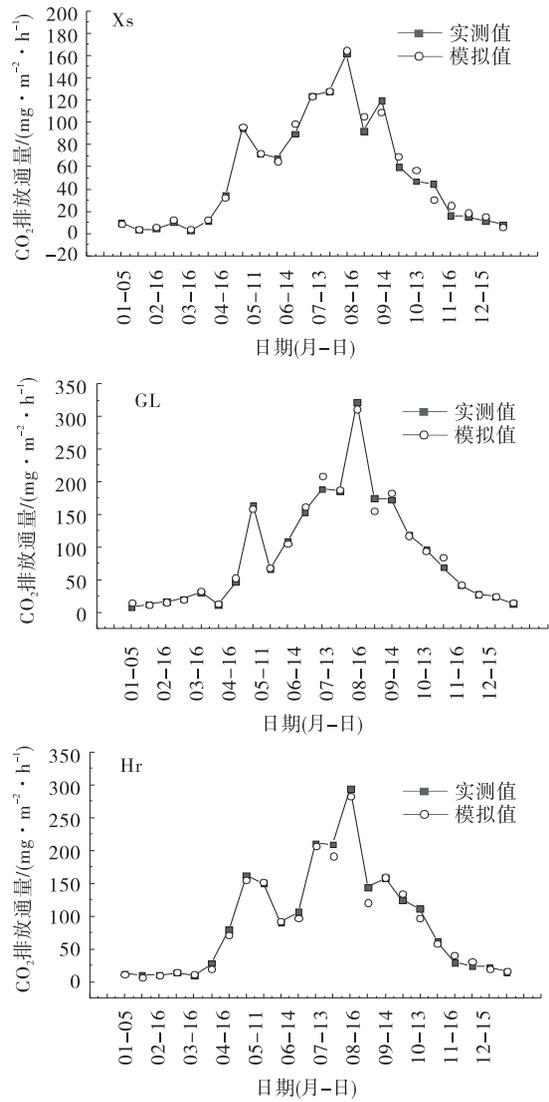


图 4 土壤 CO₂ 排放通量模型模拟

Fig. 4 simulation of soil CO₂ emission flux model

0.432。年均温度以 7.2 °C 为基础情景, ± 3 °C 时, 温度每增加 1 °C, 文冠果林地、荒草地、沙棘灌丛 CO₂ 模拟值分别增加 2.78%、2.85%、2.51%, SI 指数分别为 0.205、0.210、0.186。年降水量以 485.9 mm 为基础情景, 当降水量从 70% 增加到 130% 时, 每增加 10%, 文冠果林地、荒草地、沙棘灌丛 CO₂ 模拟值平均增加 1.89%、2.18%、2.02%, SI 指数分别为 0.193、0.224、0.108。3 种植被类型的 SI 指数大小均表现为土壤表

层SOC含量>年均气温>年均降水量,表明土壤表层SOC含量是模拟该地区3种典型植被覆盖土壤CO₂排放的最敏感因子。

3 讨论

3.1 林地土壤CO₂排放及其影响因素

研究表明,冰草荒草地、沙棘灌丛的土壤CO₂年均排放通量略高于文冠果林地,造成这种差异的原因可能是荒草地、沙棘灌丛平均土壤温度高于文冠果林地,因为土壤CO₂排放对土壤温度变化比较敏感^[23]。此外,土壤CO₂排放通量与土壤表层(5 cm)温度、含水量呈极显著正相关,与已有研究结果一致^[24-25]。3种典型植被覆盖土壤CO₂排放通量均呈现相同的季节变化,夏季高于其他3个季节。原因在于相较夏季,春、秋、冬3季的土壤温度、含水量较低,土壤微生物和土壤根系活性下降,土壤CO₂释放处于抑制状态,导致CO₂排放通量下降^[26-27]。

3.2 DNDC模型模拟及敏感性分析

本研究将实际观测数据与模型模拟值进行对比分析, DNDC模型可以较好的模拟黄土丘陵区3种典型植被覆盖土壤CO₂的排放,并且也可以较好地模拟出CO₂排放的季节动态变化。在观测期间,模型对于升温以及降水事件的发生也有较好的响应,且与实际测量出现峰值的时间一致。但是模型模拟峰值与实际测得峰值间具有一定的差异,文冠果林地、冰草荒草地、沙棘灌丛土壤模型模拟峰值与实际测得峰值之间的差异分别为14.21%、12.61%、20.68%。说明DNDC模型也会出现一定的误差,出现这种误差的原因可能有两个方面:(1)模型输入参数在实测过程中存在一定误差^[28]。(2)DNDC模型虽然被大量检验是有效的,但是该模型对温室气体的产生及排放过程是基于假设的^[29-30],并且在模型中存在一定程度的误差^[31]。

DNDC模型敏感性分析结果表明:在年均温度、土壤表层SOC含量、年降水量3种敏感因子中,土壤

表5 林地土壤CO₂排放模拟值对年降水量、年均温度、土壤表层SOC含量变化的敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis of simulated values of forest soil CO₂ emission to changes in annual precipitation, annual temperature and SOC content in soil surface

植被类型	参数	基础情景	测试变化幅度	模拟值变化幅度/%	SI
W	年降水量*/mm	485.9	-30%; -20%; -10%; +10%; +20%; +30%	-8.25; -4.32; -0.98; 1.23; 2.52; 3.12;	0.193
	年均温度**/°C	7.2	-3; -2; -1; +1; +2; +3	-11.23; -7.82; -3.12; 1.24; 2.72; 5.47;	0.205
	土壤表层SOC含量*/(g·kg ⁻¹)	9.441	-30%; -20%; -10%; +10%; +20%; +30%	-13.25; -9.02; -5.27; 5.35; 8.28; 12.11;	0.425
H	年降水量*/mm	485.9	-30%; -20%; -10%; +10%; +20%; +30%	-9.13; -5.22; -2.11; 1.54; 3.02; 3.98;	0.224
	年均温度**/°C	7.2	-3; -2; -1; +1; +2; +3	-10.94; -8.31; -2.98; 1.37; 2.24; 6.20;	0.210
	土壤表层SOC*/(g·kg ⁻¹)	9.441	-30%; -20%; -10%; +10%; +20%; +30%	-12.74; -10.21; -6.24; 5.28; 8.56; 12.98;	0.428
S	年降水量*/mm	485.9	-30%; -20%; -10%; +10%; +20%; +30%	-8.23; -3.96; -1.23; 1.37; 2.64; 3.91;	0.108
	年均温度**/°C	7.2	-3; -2; -1; +1; +2; +3	-10.11; -6.97; -3.09; 1.15; 2.69; 4.99;	0.186
	土壤表层SOC*(g·kg ⁻¹)	9.441	-30%; -20%; -10%; +10%; +20%; +30%	-13.19; -8.98; -5.88; 5.97; 9.06; 12.67;	0.432

注:*表示在基础情景下增减百分比;**表示年平均气温为基础情景±测试变化幅度;模拟值变化是相对于2019年模拟情况下CO₂排放总量的变化;

表层 SOC 含量对 CO₂ 排放通量影响最大, 因为土壤表层 SOC 含量是呼吸作用的碳来源, 对土壤 CO₂ 的产生和排放有直接影响, 所以 SOC 含量的增加势必会导致 CO₂ 排放通量的增长^[32]。其次是年平均气温对土壤 CO₂ 排放的影响较大, 当温度逐渐升高, 土壤中微生物的活性增强, 从而促进有机质分解增强, 影响土壤呼吸强度^[33]。年降水量对土壤 CO₂ 排放影响较小, 随着降水量的增加, 土壤 CO₂ 排放通量缓慢增加, 降水主要通过影响土壤微生物活动、含水量以及温度来影响 CO₂ 排放, 这与王小国等^[34]的研究结果一致。

模型的敏感性分析是检验所有变量中某一变量对模拟结果的影响, 对于模拟结果影响较大的变量在区域模拟中需要仔细考虑。姚瑶等^[23]在对 DNDC 模型敏感性分析时发现, 影响旱作春小麦土壤 CO₂ 排放的最敏感因素为年均气温。李甘霖^[31]在检验 DNDC 模型时发现, 影响旱地农田土壤 CO₂ 排放的最敏感性因素为土壤温度。而在本研究中对 DNDC 模型进行敏感性分析时发现, 影响 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 排放的最敏感因素为土壤表层 SOC 含量, 造成这种差异的原因可能因为研究区域不同或者土地利用方式不同而导致在对 DNDC 模型进行敏感性分析时存在明显不同, 这在朱相成等^[12]利用 DNDC 模型对稻田 CH₄ 排放的敏感性分析中得到了验证, 该研究发现不同区域稻田 CH₄ 排放对相同因素的敏感性存在显著差异。

4 结论

(1) 黄土丘陵区 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 排放均表现出相同的季节变化, 与土壤表层 (5 cm) 温度、含水量变化趋势相似, 并且土壤 CO₂ 排放通量与土壤表层 (5 cm) 温度、含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$) 关系, 说明土壤表层温度与含水量是影响该地区土壤 CO₂ 排放的关键因素。

(2) DNDC 模型可以较好的模拟该地区 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 的排放。模型敏感性分析表明土壤 SOC 含量是模拟该地区 3 种典型植被覆盖土壤 CO₂ 排放的敏感因子, 其变化程度对模型模拟结果影响最大。

(3) 基于实测数据与模型模拟数据发现相较于冰草荒草地和沙棘灌丛, 文冠果林地土壤 CO₂ 排放通量

较少。结合本地区实际生产生活为减少土壤 CO₂ 排放, 推荐选择文冠果树作为退耕还林还草首选植被。

参考文献:

- [1] Michael J Ford. Climate change and its biological consequences [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1994, 23(1): 215.
- [2] 赵苗苗, 邵蕊, 杨吉林, 等. 基于 DNDC 模型的稻田温室气体排放通量模拟 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1057—1066.
- [3] 聂道平, 徐德应, 王兵. 全球碳循环与森林关系的研究——问题与进展 [J]. *世界林业研究*, 1997(5): 34—41.
- [4] 张慧东, 霍常富, 颜廷武, 等. 辽东山区落叶松人工林生态系统碳通量及对气候变化的响应 [J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2020, 40(6): 40—47.
- [5] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC 模型的发展 [J]. *第四纪研究*, 2001(2): 89—99.
- [6] 孙向阳, 徐化成. 北京低山区两种人工林土壤中 N₂O 排放通量的研究 [J]. *林业科学*, 2001, 37(5): 57—63.
- [7] 陈玲, 范会, 蒋静艳. 不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N₂O 排放的关系 [J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3102—3109.
- [8] 张超. 基于 DNDC 模型的草地生态系统碳收支研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.
- [9] 柯韵. 川中丘陵区典型农田和森林土壤 CO₂、N₂O 排放观测与模型模拟 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [10] YE shu, GUO Chuying, HAN Jiayin, *et al.* Modelling soil greenhouse gas fluxes from a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain: forest-DNDC model validation [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(2): 127—136.
- [11] 杨黎, 王立刚, 李虎, 等. 基于 DNDC 模型的东北地区春玉米农田固碳减排措施研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 75—86.
- [12] 朱相成, 白若琦. 基于 DNDC 模型稻田甲烷排放影响因子的敏感性分析 [J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(3): 577—580+583.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146—195.
- [14] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(1): 49—57.
- [15] 巴特·巴克, 彭镇华, 张旭东, 等. 生物地球化学循环模型 DNDC 及其应用 [J]. *土壤通报*, 2007, 38(6): 1208—1212.

- [16] 吴江琪,马维伟,李广,等. 黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(4):133-138.
- [17] Guo J W, Zou Y C, Lyu X G, *et al.* DNDC model, a model of biogeochemical processes: Research progress and applications[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(2):571-580.
- [18] 王莺. 黑河中游绿洲农业管理措施对农田土壤温室气体排放的影响[D]. 兰州:兰州大学,2012.
- [19] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果比对分析[D]. 北京:中国科学院研究生院(大气物理研究所),2005.
- [20] 李海防,段文军. 华南地区典型人工林土壤二氧化碳和氧化亚氮通量研究[J]. 浙江农林大学学报,2011,28(1):26-32.
- [21] 桑文秀,杨华蕾,唐剑武. 不同土地利用类型土壤温室气体排放对温湿度的响应[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2021(4):109-120.
- [22] Chen H X, Li L C, Luo X Q, *et al.* Modeling impacts of mulching and climate change on crop production and N₂O emission in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,268:86-97.
- [23] 姚瑶,李广,王钧,等. 不同耕作措施下旱作春小麦农田二氧化碳排放模拟及敏感性分析[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(3):171-178.
- [24] WANG H, LIU SR, WANG J X, *et al.* Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical stands in China[J]. For Ecol Manage, 2013,300(4):4-13.
- [25] BORKEN W, BEESE F. Methane and nitrous oxide fluxes of soils in pure and mixed stands of European beech and Norway spruce [J]. Eur J Soil Sci, 2006, 57(5):617-625.
- [26] ZERVA A, MENCUCINI M. Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation [J]. Soil Biol Biochem, 2005, 37(11): 2025 - 2036.
- [27] IRVINE J, LAW B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests [J]. Glob Change Biol, 2002, 8(12):1183 - 1194
- [28] 陈劲丰,岳遥. 田间管理措施及土壤侵蚀对农田温室气体通量的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版),2020,56(3):491-499.
- [29] Li C S, Steve Frolking, Robert Harriss. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils [J]. John Wiley & Sons, Ltd, 1994, 8(3):237-254.
- [30] Zhang Y, Li, C S, Zhou X J, *et al.* A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture[J]. Ecological Modelling, 2002, 151(1): 75-108.
- [31] 李甘霖. 基于DNDC模型的黄土丘陵区旱地农田土壤CO₂排放模拟研究[D]. 兰州:西北师范大学,2015.
- [32] 王新源,李玉霖,赵学勇,等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报,2012,32(15):4890-4901.
- [33] 刘爽,严昌荣,何文清,等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报,2010,30(11): 2919-2924.
- [34] 王小国,朱波,高美荣,等. 川中丘陵区桉柏混交林地土壤CO₂释放与Forest-DNDC模型模拟[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2):27-32.
- [35] 李小龙,曹文侠,张晓燕,等. 划破草皮对祁连山不同地形高寒短蒿草甸土壤呼吸特征的影响[J]. 草原与草坪, 2020,40(2):30-38.

Soil CO₂ release and model simulation among different vegetation types in the Loess hilly region

XU Wanheng¹, LI Guang^{1*}, YANG Chuanjie², LIU Shuainan², DU Jianan²,
LIU Xingyu¹

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The study is aimed to explore the law and influencing factors of soil CO₂ emission under

three typical vegetation (Xanthocarp woodland, barren grass land and seabuckthorn shrub) cover in Loess hilly region, to compare differences of CO₂ emission in soil covered by different vegetation types. It provides the basis for selecting suitable vegetation for returning farmland to forest and grassland to reduce soil CO₂ emission in this area. **【Method】** Based on the DNDC model, combined with the actual soil CO₂ emission flux measured, the suitability of the model to simulate soil CO₂ emission under different vegetation cover was tested, and its sensitivity was analyzed. **【Result】** The results showed that the seasonal variation trend of forest soil CO₂ emission in Loess hilly region had a single-peak curve. The peak value appeared between early July and late August, and the minimum value appeared between late December and early January of the next year. There was a significant positive correlation between soil CO₂ flux and soil surface temperature (5 cm) and soil water content ($P < 0.01$). Soil temperature, moisture content were the key factors affecting CO₂ emissions. The average annual CO₂ emission flux of the soil in the xanthocarp forest was the lowest, which was 40.785% and 40.835% lower than those in the grassy land and seabuckthorn shrub, respectively. The simulation results of soil CO₂ emission among different vegetation types by DNDC model were consistent with the measured results. The $R=0.928$ ($P < 0.01$) in the Xanthocarp fruit forest land, the $R=0.932$ ($P < 0.01$) in the Barren grassland, and $R=0.983$ ($P < 0.01$) in the Seabuckthorn shrub land. The results showed that the model could be used to simulate the CO₂ emission of forest land in this area. **【Conclusion】** The model sensitivity analysis showed that soil surface SOC content was the sensitive factor to simulate the CO₂ emission of three typical vegetation-covered soils in this region, and the change degree of SOC content had the greatest influence on the model simulation results.

Key words: soil CO₂ emission flux; soil temperature; soil moisture content; DNDC model