

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.028

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.028

夏彬,张佐源,郝旺林,等.黄土丘陵区典型层状结构土壤剖面CO₂分布特征及其影响因素[J].水土保持学报,2026,40(1):290-296.

XIA Bin, HAO Wanglin, ZHANG Zuoyuan, et al. CO₂ distribution characteristics and their influencing factors of typical layered soil profiles in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):290-296.

黄土丘陵区典型层状结构土壤剖面 CO₂分布特征及其影响因素

夏彬^{1,2,3}, 张佐源⁴, 郝旺林^{1,2,3,5}, 许明祥^{1,2,3,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5.吕梁学院生物与食品工程系, 山西 吕梁 033000)

摘要: [目的] 为揭示层状土壤剖面的CO₂垂直分布规律及其影响因素。[方法] 选取典型层状结构土壤剖面为研究对象, 基于土壤剖面构型特征, 通过气井法对土壤剖面CO₂浓度进行野外监测, 并根据菲克定律计算CO₂累积通量。[结果] 1) 层状结构主导CO₂浓度的剖面分布格局。草地土壤中, CO₂在剖面不同时期的旋回淤积层中浓度分别为2 449.2、6 201.9、2 736.9、5 284.9 μmol/mol, 显示出波动趋势; 农地土壤中, CO₂在耕层、犁底层、底土层中浓度分别为1 792.3、3 661.4、5 294.7 μmol/mol, 呈递增趋势; 林地土壤中, CO₂在剖面中均匀分布, 浓度为1 442.9~1 474.4 μmol/mol。2) 剖面CO₂浓度影响因素受土地利用调控。农地土壤CO₂浓度与土层深度、土壤体积质量、黏粉粒质量分数、孔隙、温度、土壤水分体积分数、SOC显著相关; 林地土壤CO₂浓度与土壤温度显著负相关; 草地土壤CO₂浓度受各因素耦合作用的非线性影响, 与单一因素间无显著相关性。3) 现有模型在预测层状土壤CO₂累积通量时存在不确定性。[结论] 明确层状土壤剖面CO₂分布特征及其影响因素, 为理解土壤碳排放过程、改进碳通量模型、制定温室气体管理策略提供科学依据。

关键词: 剖面构型; 层状结构; CO₂分布; 累积CO₂通量; 气体井法

中图分类号: S154.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0290-07

CO₂ Distribution Characteristics and Their Influencing Factors of Typical Layered Soil Profiles in Loess Hilly Region

XIA Bin^{1,2,3}, ZHANG Zuoyuan⁴, HAO Wanglin^{1,2,3,5}, XU Mingxiang^{1,2,3,4}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Department of Biological and Food Engineering, Lyuliang University, Lyuliang, Shanxi 033000, China)

Abstract: [Objective] To reveal the vertical distribution pattern of CO₂ in layered soil profiles and its influencing factors. [Methods] Typical layered soil profiles were selected as the research object. Based on the configuration characteristics of the soil profiles, field monitoring of CO₂ concentration was conducted using the gas well method, and the cumulative CO₂ flux was calculated according to Fick's law. [Results] 1) The layered structure dominated the vertical distribution pattern of CO₂ concentration. In grassland soil, CO₂ concentrations in the cyclic depositional layers at different periods were 2 449.2, 6 201.9, 2 736.9, and 5 284.9 μmol/mol, showing a fluctuating trend. In farmland soil, CO₂ concentrations in the plough layer, plough pan, and subsoil layer were 1 792.3, 3 661.4, and 5 294.7 μmol/mol, respectively, exhibiting an increasing trend. In forest soil, CO₂ was

收稿日期: 2025-07-12

修回日期: 2025-09-30

录用日期: 2025-10-08

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177345)

第一作者: 夏彬(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤碳排放、碳循环研究。E-mail: 18687031742@163.com

通信作者: 许明祥(1972—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤质量演变及调控研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

uniformly distributed within the profile, with concentrations ranging between 1 442.9 and 1 474.4 $\mu\text{mol/mol}$. 2) The factors influencing profile CO₂ concentration were regulated by land use. In farmland soil, CO₂ concentration showed significant correlations with soil depth, soil bulk density, silt-clay content, porosity, temperature, volumetric soil water content, and SOC. In forest soil, CO₂ concentration was significantly negatively correlated with soil temperature. No significant correlations were found between CO₂ concentration and any factor in grassland soil due to nonlinear coupling effects of various factors. 3) Existing models exhibited uncertainty in predicting cumulative CO₂ flux in layered soil. [Conclusion] Clarifying the distribution characteristics of CO₂ within layered soil profiles and their influencing factors provides a scientific basis for understanding soil CO₂ emission processes, improving CO₂ flux models, and formulating greenhouse gas management strategies.

Keywords: profile configuration; layered structure; CO₂ distribution; cumulative CO₂ flux; gas well method

Received: 2025-07-12

Revised: 2025-09-30

Accepted: 2025-10-08

Online(www.cnki.net): 2025-10-31

全球气候变暖背景下,CO₂浓度升高对全球生态系统的结构和功能产生影响,现已成为人类面临的最严峻挑战之一^[1]。土壤CO₂排放作为陆地生态系统最大碳源,其微小波动可能对大气CO₂浓度产生深刻影响^[2]。因此,解析土壤CO₂的排放过程在全球碳循环研究中至关重要^[3]。

土壤CO₂的产生源于剖面各层微生物、动物、植物根系呼吸及有机物生化反应的共同结果^[4-5]。然而,由于土壤垂直剖面的复杂性,导致CO₂浓度分布及通量预测仍有较大不确定性^[6-7]。有研究^[8-9]发现,因土地管理方式引起的土壤水分体积分数和有机碳质量分数差异,不仅直接影响土壤孔隙度比例,而且参与有机碳分解调控,进而改变剖面CO₂浓度分布。例如,农地土壤由于耕作压实形成的犁底层,其较低的土壤孔隙度抑制土壤CO₂由下方向上方各土层传输及排放,形成局部的CO₂浓度富集^[10-11]。已有研究^[12]尝试利用气体扩散模型解释CO₂的剖面变化,但普遍假设土壤为均质介质,忽略自然界中普遍存在的层状结构,必然限制土壤CO₂通量的准确预测。

现有研究^[13-14]仍存在若干不足,首先,多数研究集中于表层土壤CO₂排放,缺乏对剖面垂直分布规律的系统认识;其次,对土地利用和不同季节条件下的CO₂分布差异缺乏认识;再次,忽视层间异质性在气体扩散与积累过程中的调控作用,导致CO₂通量预测存在较大不确定性。因此,层状土壤剖面的CO₂垂直分布规律及其影响因素亟待揭示。本研究以不同土地利用类型下的典型层状土壤剖面为对象,揭示CO₂浓度在土地利用类型和季节变化影响下的垂直分布规律,以期明确层状土壤CO₂浓度分布影响机制,进而为优化土壤管理和提升通量预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区(36°30'45"~37°19'03"N,108°05'44"~109°26'18"E),总面积约为2 950 km²。地貌以黄土丘陵沟壑为特征,平均海拔1 200 m。该区属于暖温带半干旱季风气候,近5 a平均气温10.8℃,年降水量147.2~812.7 mm,其中7—9月的降水量占全年降水的60%以上,年蒸发量大于1 463 mm。土壤类型主要为黄绵土,抵抗侵蚀能力较差。在黄土高原,草地、农地和林地是主要的土地类型,其面积占比分别为39.6%、30.0%、20.2%^[15]。

1.2 样地选取及样品采集

通过走访调查、查阅资料和前期试验积累,选取研究区具有典型层状结构的农地、林地、草地进行监测。其中,农地剖面形成由耕层-犁底层-底土层组成的层状结构;经过撂荒后转变为草地的淤地坝,其剖面形成由旋回淤积层组成的层状结构;林地剖面形成由具有腐殖现象的疏松表层-母质层组成的层状结构。最终选择农地、草地和人工刺槐林地,分别代表耕作、淤积及生态恢复过程形成的层状结构土壤剖面,并依据不同利用年限设置重复样地,选取种植玉米的农地(36°47'41"N,109°16'12"E;36°50'09"N,109°04'27"E);自然撂荒草地(36°53'30"N,109°13'25"E;36°53'13"N,109°13'12"E;36°47'49"N,109°15'33"E);人工刺槐林地(36°51'30"N,109°19'30"E)进行监测。

根据土壤剖面实际分层特征及横向比较需求,农地土壤剖面按耕作层(0~20 cm)、犁底层(20~50 cm)和底土层(50~100、100~150 cm)划分,于10、20、50、100、150 cm处进行采样;草地土壤剖面按不同时期回旋淤积的沉积层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~100、100~200 cm)划分,于10、

20、30、40、50、100、150、200 cm 处进行采样;林地土壤剖面按弱淋溶层(0~10、10~20、20~50 cm)和弱淀积层(50~150、150~200 cm)划分,于 10、20、50、150、200 cm 处进行采样。根据实际分层情况使用小土钻在剖面同一水平深度不同部位重复 6~8 次取样,并测定温度。土壤样品测定指标包括体积质量、土壤水分体积分数、充气孔隙度、机械组成和 SOC 质量分数。各土地利用类型土壤剖面理化属性见表 1。

在监测样点根据剖面实际分层情况布设土壤温度和湿度探头(Em 50, Decagon, 美国),通过多通道自动记录仪记录数据,并定时下载数据、维护仪器。气体采集装置在水热监测探头的同一层错位

布设,布设方法参考经典气体井法^[16]。布设完毕后,按原土层回填土壤,待恢复稳定后开始监测及采样工作。雨季期间集中降水导致的土壤淹水对 CO₂ 浓度的影响,采样分别在 2022 年、2023 年的 4 月(生长季)、11 月(非生长季)进行。2 次采样均位于当地降水量较少的时段,能够有效排除短时积水造成的 CO₂ 富集效应。每个采样月份内均开展 6 次重复采样,采样间隔 3~5 d,并避开降雨过程。气体样品 CO₂ 浓度用气相色谱仪(GC 7 980 B, Agilent, USA 美国)测定,同时利用碳通量自动测量系统(LI-8 100 A, Li-Cor Inc, 美国)进行表层 CO₂ 通量观测。

表 1 不同层状结构土壤剖面理化属性特征

Table 1 Characteristics of physicochemical properties in different layered soil profiles

土地利用	土层/cm	体积质量/(g·cm ⁻³)	充气孔隙度/%	SOC/(g·kg ⁻¹)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
农地	10	1.2±0.1Ac	45.5±0.0Aa	9.9±4.1Aa	22.3±8.9Aa	58.6±0.4Aa	19.1±8.5Ba
	20	1.5±0.1Aab	28.7±0.1Cb	5.7±0.9Ab	16.4±0.4Ab	60.5±0.5Aa	23.1±0.1Ba
	30	—	—	—	—	—	—
	40	—	—	—	—	—	—
	50	1.4±0Ab	28.4±0.1Bb	3.2±1.1Ac	14.0±3.8Ab	58.7±2.0Aa	27.3±5.8Ba
	100	1.5±0Aa	25.0±0.1Bc	2.9±0.8Ac	15.9±2.6Ab	57.2±3.1Aa	26.9±5.7Ba
林地	150	1.5±0Aa	21.0±0.1Ac	2.4±1.3Ac	14.7±3.4Ab	62.3±1.6Aa	23.0±5.0Ba
	10	1.1±0Bc	44.0±0.1Aa	6.7±0.9Ba	11.2±0.7Ba	22.8±1.9Bb	66.0±2.5Aa
	20	1.2±0.1Bb	44.2±0Aa	4.5±0.4Ab	12.4±1.7Ba	25.2±2.1Ba	62.4±3.7Ab
	30	—	—	—	—	—	—
	40	—	—	—	—	—	—
	50	1.2±0Bb	46.0±0.4Aa	4.3±1.5Ab	11.9±1.0Aa	25.9±2.2Ba	62.3±3.2Ab
草地	100	1.3±0Ba	40.3±0Aa	2.4±0.4Ac	11.4±1.0Ba	27.4±2.8Ba	61.2±3.8Ab
	150	—	—	—	—	—	—
	10	1.0±0.1Cb	41.2±0.1Ba	8.2±2.7Aa	13.2±6.7Ba	22.2±10.0Bab	64.7±16.7Ab
	20	1.1±0.1Cab	35.5±0.1Ba	1.8±0.4Bb	13.9±3.2Ba	22.9±5.2Bab	63.2±8.4Ab
	30	1.0±0b	38.2±0.1a	2.0±0.8b	18.1±7.5a	28.1±13.1a	53.8±20.6c
	40	1.1±0ab	34.5±0.1a	1.9±0.5b	10.0±0.3a	15.8±0.9b	74.2±1.2a
	50	1.2±0.1Ba	24.2±0.1Ba	2.9±1.1Bb	14.0±6.4Aa	19.7±7.4Bb	66.3±13.7Ab
	100	1.1±0.1Cab	28.8±0.1Ba	1.8±0.9Bb	11.3±2.5Ba	20.0±5.0Cb	68.8±7.4Aab
	150	1.2±0Ba	27.0±0.1Aa	2.6±1.2Ab	11.9±2.0Aa	19.0±4.3Bb	69.1±6.2Aab

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示同一土层深度不同土地利用类型间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示不同土层深度同一土地利用类型间差异显著($p<0.05$)。

1.3 土壤 CO₂ 通量计算

浓度梯度法测量 CO₂ 通量基于菲克定律进行计算,具体方法为:

$$F = -\frac{D_s \Delta C(z)}{\Delta z} \quad (1)$$

式中: F 为 CO₂ 通量, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C 为深度 z m 处土壤中 CO₂ 浓度, $\mu\text{mol}/\text{mol}$; D_s 为土壤中 CO₂ 扩散系数, m^2/s 。

现有研究提出的气体扩散系数 D_s 经验模型大多是在均质土体假设下建立的,并未明确区分层状与均质结构,本研究选择目前应用最广泛的 6 种经验模型^[17-22],对不同土地利用条件下的层状土壤进行对比检验,旨在评估这些模型在层状环境中的适用性及

其局限性。

1) Buckingham 模型:

$$\frac{D_s}{D_0} = (\phi - \theta)^2 \quad (2)$$

2) Penman 模型:

$$\frac{D_s}{D_0} = 0.66(\phi - \theta) \quad (3)$$

3) MQ-1 691 模型:

$$\frac{D_s}{D_0} = \frac{(\phi - \theta)^{\left(\frac{10}{3}\right)}}{\phi^2} \quad (4)$$

4) Deepagoda 模型:

$$\frac{D_s}{D_0} = \frac{\phi - \theta}{\phi} \quad (5)$$

5) Moldrup-2000 模型:

$$\frac{D_s}{D_0} = \frac{(\phi - \theta)^{2.5}}{\phi} \quad (6)$$

6) SWLR 模型:

$$\frac{D_s}{D_0} = (\phi - \theta)^{(1+C_m\phi)} \frac{(\phi - \theta)}{\phi} \quad (7)$$

式中: ϕ 为土壤孔隙度,%; $\phi = 1 - \frac{\rho b}{\rho m}$,其中 ρb 为土壤体积质量, g/cm^3 ; ρm 为土壤密度, $2.65 g/cm^3$; θ 为土壤水分体积分数, cm^3/cm^3 ; C_m 为土壤类型因子,取1。

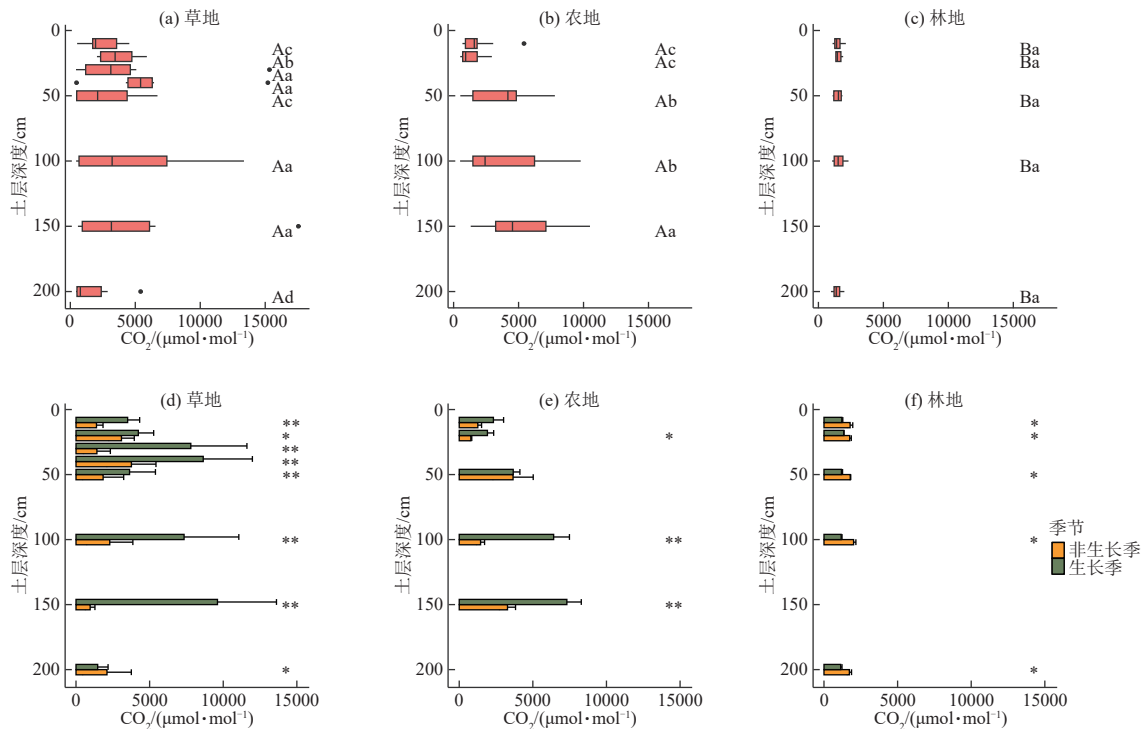
1.4 数据计算与分析

用R(3.6.1)软件进行数据处理和分析绘图。首先对各变量进行正态性检验(Shapiro-Wilk),结果显示大部分变量基本符合正态分布,但个别变量偏离正态。为保证稳健性,对于不同土地利用类型下分层厚度不一致的情况,采用非参数检验进行差异性分析,并采用最小显著差异法(least significant difference method, LSD)比较不同土地利用类型、深度下 CO₂浓度的差异。Spearman 相关分析用于确定不同季节及土地利用类型下剖面 CO₂分布特征与各土层土壤属性的相关关系。为更直观地反映数据分布情况,采用箱线图展示 CO₂浓度的剖面分布情况。

2 结果与分析

2.1 层状土壤剖面 CO₂浓度分布特征

不同土地利用类型及季节下的剖面 CO₂变化情况见图 1。农地土壤剖面中,CO₂气体浓度在临近大气的表层较为稳定,并随着土层深度增加呈递增趋势($p < 0.05$)。在 10、20、50、100、150 cm 土层深度平均 CO₂浓度分别为(1 792.3±1 337.7)、(1 352.4±919.5)、(3 661.4±2 381.4)、(3 931.8±3 171.1)、(5 294.7±2 803.4) $\mu mol/mol$ 。农地土壤剖面不同季节间 CO₂浓度仅在 20、100、150 cm 处存在显著差异($p < 0.05$)。对于林地而言,其剖面内不同深度的 CO₂浓度无显著性差异,CO₂浓度在 0~200 cm 剖面内为 1 442.8~1 474.3 $\mu mol/mol$ 。生长季时,林地剖面 CO₂浓度为 1 052.7~1 192.6 $\mu mol/mol$,显著低于非生长季时 1 748.3~1 852.7 $\mu mol/mol$ 的剖面 CO₂浓度($p < 0.05$)。CO₂浓度在草地剖面中呈一定波动性,在 10~40 cm 土层内随深度增加,CO₂浓度逐渐升高,由上至下浓度分别为(2 449.2±1 542.1)、(3 660.1±1 614.6)、(4 608.9±5 534.7)、(6 201.9±4 884.9) $\mu mol/mol$,50、100、150、200 cm 深度处的 CO₂浓度分别为(2 736.9±2 649.2)、(4 816.9±5 214.0)、(5 284.9±6 467.7)、(1 788.6±1 998.4) $\mu mol/mol$ 。草地剖面平均 CO₂浓度在生长季时为(5 779.5±4 870.7) $\mu mol/mol$,显著高于非生长季时(2 108.1±1 970.0) $\mu mol/mol$ 的平均浓度($p < 0.05$)。



注:大写字母表示同一土层深度不同土地利用类型间差异显著($p < 0.05$);小写字母表示不同土层深度同一土地利用类型间差异显著($p < 0.05$).
*、**分别表示不同季节间 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 。

图 1 不同土地利用类型及季节下的剖面 CO₂变化

Fig. 1 Variations in soil profile CO₂ under different land use types and seasons

2.2 层状土壤剖面 CO₂ 浓度分布影响因素

土层深度、土壤体积质量、土壤质地、孔隙度、充气孔隙度、水热环境及 SOC 质量分数与剖面 CO₂ 浓度间的相关性见图 2。在生长季,剖面内 CO₂ 浓度与土壤水分体积分数呈显著正相关($p < 0.05$),相关系数为 0.46,与充气孔隙及 SOC 质量分数间呈显著负相关($p < 0.05$),相关系数分别为 -0.22 和 -0.37;在非生长季,剖面内 CO₂ 浓度与各因素间均无显著相关性。在农地中,剖面 CO₂ 浓度与土层深度、土壤体积质量、土壤粉粒质量分数及土壤水分体积分数间呈显著正相关($p < 0.05$),相关系数分别为 0.52、0.29、0.15、0.56,与土壤黏粒质量分数、土壤孔隙度、充气孔隙、土壤温度、SOC 呈显著负相关($p < 0.05$),相关系数分别为 -0.24、-0.07、-0.19、-0.06、-0.06;在林地中,土壤温度与林地土壤剖面内的 CO₂ 浓度呈显著负相关($p < 0.05$);而草地土壤剖面内的 CO₂ 浓度与各因素间均无显著相关性。若不区分土地利用类型和季节,土壤剖面内 CO₂ 浓度在总体上与土壤水分体积分数间呈显著正相关($p < 0.05$),相关系数为 0.30,但与 SOC 质量分数呈显著负相关($p < 0.05$),相关系数为 -0.17。

2.3 剖面 CO₂ 累积通量估算差异

本研究区分不同土地利用类型、季节计算土壤累积碳通量,并与 Li-8 100 测得的土壤表层通量比较(表 2)。

表 2 不同土地利用类型(剖面构型)和季节下土壤累积碳通量与表层通量

Table 2 Soil cumulative CO₂ flux and surface CO₂ flux under different land use types (profile configuration) and seasons $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

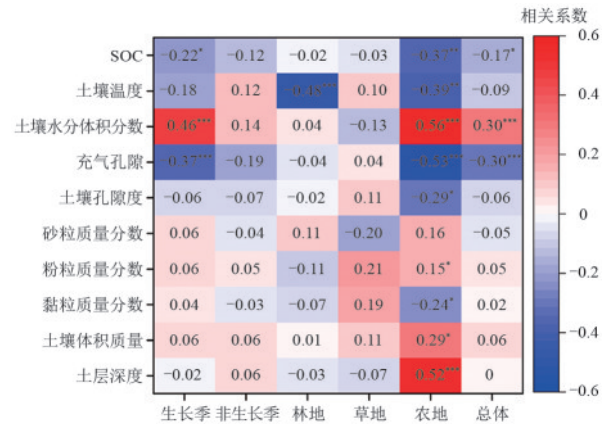
土地利用类型	剖面构型	季节	土壤累积碳通量计算值						土壤表层通量
			Buckingham 模型	Penman 模型	Millington 模型	Deepagoda 模型	Moldrup 2000 模型	SWLR 模型	
林地	松-紧渐变型	生长季	3.0±0.4	4.0±0.3	3.9±0.7	0.2±0	3.8±0.6	3.6±0.5	1.4±0.3
	层状结构	非生长季	3.8±0.6	6.1±1.2	3.7±0.5	0.1±0	4.3±0.7	4.0±0.6	0.4±0.1
草地	松-紧-松波动型	生长季	15.2±6.5	24.9±10.8	12.8±5.7	1.7±0.9	15.8±6.9	14.3±6.3	2.0±0.5
	层状结构	非生长季	4.6±2.6	7.8±3.6	3.6±2.3	0.8±0.4	4.6±2.7	4.1±2.4	0.7±0.1
农地	松-紧-紧突变型	生长季	2.3±0.2	4.8±0.1	2.3±0.1	0.7±0.1	2.7±0.2	2.7±0.1	1.8±0.3
	层状结构	非生长季	1.5±0.7	2.6±1.3	1.8±0.7	0.1±0.1	1.9±0.8	1.9±0.8	0.7±0.2

3 讨论

3.1 影响土壤剖面 CO₂ 浓度的因素

土壤剖面 CO₂ 浓度分布是评估土壤碳循环动态的关键指标,受土壤物理结构、水热条件及 SOC 质量分数等多因素综合调控^[23-24]。本研究发现,不同土地利用类型及季节下,剖面 CO₂ 浓度分布特征存在显著差异。草地剖面土壤 CO₂ 浓度随土层深度增加而波动,该波动性与草地淤积过程形成的层状结构密切相关。不同层位因水文历史特征导致土壤体积质量、孔隙度、有机质等土壤性质存在显著差异,在剖面中形成非线性的分布规律^[7,25]。同时,CO₂ 的扩散过程受多因子的耦合调控,而非仅依赖于单一理化属性,综合导致草地

在 6 种模型中, Penman 模型计算的土壤累积碳通量最大, Deepagoda 模型计算结果最小,而剩下 4 种模型的计算值较为接近,但在不同处理下表现出不同规律。各模型计算的土壤累积碳通量均有草地最大、农地最小的规律,并在草地和农地中表现出生长季较非生长季有更大的累积碳通量,而在林地中相反。土壤表层通量在不同土地利用类型间呈草地 > 农地 > 林地的趋势,且均表现出在生长季较非生长季大。



注: *表示在 0.05 水平差异显著; **表示在 0.01 水平差异显著; ***表示在 0.001 水平差异显著。

图 2 不同季节及土地利用类型下剖面 CO₂ 分布特征与土壤理化性质及 SOC 相关性

Fig. 2 Correlation of profile CO₂ distribution characteristics with soil physicochemical properties and SOC under different seasons and land use types

剖面土壤 CO₂ 浓度分布规律性差,与单一物理性质的相关性较弱^[7,25]。农地剖面 CO₂ 浓度在表层(0~20 cm)相对稳定,在深层(50~150 cm)随土层深度加深而显著升高。耕作导致表层土壤疏松,通气性增强,有利于 CO₂ 扩散;深层土壤则因压实作用,孔隙度和通气孔隙度降低,阻碍气体向上扩散^[10,26]。因此,深层 CO₂ 的富集正是气体扩散受限的结果,也解释农地土壤体积质量、孔隙度和充气孔隙度等物理性质与其剖面 CO₂ 浓度分布呈现强相关性的原因。林地的 CO₂ 浓度在整个剖面内波动较小,层间差异不显著是由于自然恢复过程改善林地土壤的孔隙结构,导致 CO₂ 在剖面一定深度内均匀分布。同时,相对均匀的土壤属性

使得温度成为 CO₂浓度分布的主要影响因素,层间温差驱动 CO₂由温度较高土层向温度较低土层扩散,从而改变其浓度分布格局^[27]。

3.2 土地利用类型及季节对 CO₂浓度的影响

对于不同土地利用类型而言,土壤中的 CO₂浓度分布主要由土壤中的 SOC 和水分等共同决定。SOC 质量分数对土壤 CO₂浓度的影响有双重作用,一方面, SOC 的增加提供更多的土壤呼吸底物,有利于 CO₂生成;另一方面, SOC 通过改善土壤孔隙度和充气孔隙度,促进 CO₂扩散^[9]。在 SOC 质量分数较高的土层中,尽管 CO₂生成量较大,但气体得以有效扩散, CO₂浓度反而不升高。相反,在 SOC 质量分数较低的土层,由于充气孔隙度低,气体扩散受阻, CO₂容易在此土层中富集,也是剖面 CO₂浓度与 SOC 质量分数呈负相关的原因。土壤水分体积分数对剖面 CO₂浓度的影响也类似,不仅直接影响土壤呼吸,而且间接改变充气孔隙度,通过阻塞气体扩散使 CO₂浓度升高。在生长季尤为明显,土壤水分体积分数与 CO₂浓度呈正相关,表明土壤水分的增加限制气体扩散^[28]。相反,在非生长季,由于土壤呼吸、根系呼吸和动物呼吸等强度较小,剖面内的 CO₂浓度整体较低,因此, CO₂浓度与各因素间的相关性较弱。季节性变化对土壤剖面 CO₂浓度具有显著影响,在非生长季,受 CO₂生成量较低的限制,其浓度在土壤剖面中均较低,其分布与各因素间无显著相关性。相反,生长季 CO₂生成量较高,其分布则更多地受水分或充气孔隙度的影响。土壤体积质量、孔隙度及 SOC 的层状结构(如农地犁底层突变、草地淤积层波动等)直接破坏气体扩散的连续性,导致 CO₂在低孔隙度区域内富集。该种空间分布异质性因土地利用类型而异,并表现出明显的季节性差异。

3.3 层状土壤 CO₂累积通量估算的不确定性

通过现有模型的估算,草地的 CO₂累积通量普遍高于农地和林地(表 2),可能源于草地土壤较高的 SOC 质量分数及其在水分和温度调控上的优势,而农地和林地则受到管理措施及土壤养分状况的限制。值得注意的是,基于气体扩散系数模型的 CO₂通量预测值通常高于气室法观测值,且差异显著。此差异被认为与土壤的层状结构有关,因为扩散法基于浓度梯度计算,而层状结构导致的 CO₂浓度空间分布不均匀,导致模型预测值存在偏差^[29]。不同模型间的估算差异则与参数的选取有关,如 Buckingham 和 Penman 模型仅以土壤充气孔隙度为参数,因而对充气孔隙度的变化高度敏感^[17,22]。其余模型则进一步强调土壤类型对气体扩散的作用,提出同时考虑充气孔隙度和总孔隙度的计算公式,在一定程度上

能够反映土地利用方式差异带来的通量差别^[18-21]。本研究结果强调土壤层状结构对 CO₂排放的复杂影响,以及现有通量模型在预测层状结构土壤通量的局限性。未来需将土壤剖面构型参数纳入模型框架,以提高通量预测的准确性。

4 结论

1)土地利用类型通过塑造层状土壤剖面的构型特征,主导土壤 CO₂浓度的垂直分布格局。具体而言,农地剖面 CO₂浓度呈耕层、犁底层至底土层递增的趋势;草地剖面 CO₂浓度呈现波动性变化;而林地剖面 CO₂浓度分布则相对均匀。

2)剖面 CO₂浓度分布的关键驱动因子具有土地利用类型依赖性。在农地中,其变化主要受土层深度、体积质量、粉/黏粒质量分数、水热条件及 SOC 质量分数的影响;在林地中,土壤温度是主导因子,与剖面 CO₂浓度呈显著负相关;而在草地中,剖面 CO₂浓度变化因多因素耦合作用的非线性影响,未与单一因素呈现出显著相关性。

3)现有模型在预测层状结构土壤的 CO₂累积通量时存在显著不确定性,其中 Penman 模型预测的累积碳通量普遍较高,而 Deepagoda 模型的预测值较低。其核心在于未能有效整合表征层状剖面构型特征的关键参数。因此,未来模型开发亟须纳入此类异质性参数,以提升对层状土壤碳通量预测的准确性。

参考文献:

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304 (5677):1623-1627.
- [2] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, 464(7288):579-582.
- [3] 郝旺林.黄土丘陵区土壤 CO₂排放对水蚀的响应及模拟研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2022.
HAO W L. Response of soil CO₂ emission to water erosion in loess hilly region and its simulation study[D].Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [4] XU L, BALDOCCHI D D, TANG J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature[J].*Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18:GB4002.
- [5] RYAN M G, LAW B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73 (1):3-27.
- [6] 盛浩,罗莎,周萍,等.土壤 CO₂浓度的动态观测、模拟和

- 应用[J].应用生态学报,2012,23(10):2916-2922.
- SHENG H, LUO S, ZHOU P, et al. Dynamic observation, simulation and application of soil CO₂ concentration: A review[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(10):2916-2922.
- [7] 张佐源.黄土高原坝地层状结构土壤剖面CO₂分布特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
- ZHANG Z Y. Study on distribution characteristics of CO₂ in layered soil profile of dam site in Loess Plateau[D].Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2023.
- [8] DILUSTRO J J, COLLINS B, DUNCAN L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests [J]. Forest Ecology and Management,2005,204(1):87-97.
- [9] CROWTHER T W, VAN D H J, WAN J, et al. The global soil community and its influence on biogeochemistry[J].Science,2019,365(6455):eaav0550.
- [10] KUNCORO P. H, KOGA K, SATTA N, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices[J]. Soil and Tillage Research,2014,143:180-187.
- [11] BALL B C, RITCHIE R M. Soil and residue management effects on arable cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland 1. Soil and crop responses[J].Soil and Tillage Research,1999,52(3/4):177-189.
- [12] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. Geoderma,2018,314:122-137.
- [13] 李同川.黄土高原土壤大孔隙特征及其对土壤水分的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- LI T C. Characteristics of soil macropores in Loess Plateau and their effects on soil moisture [D]. Yangling, Shaanxi:Northwest A&F University,2017.
- [14] BERISSO F E, SCHJONNING P, KELLER T, et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil[J].Soil and Tillage Research,2012,122:42-51.
- [15] SHI P, FENG Z, GAO H, et al. Has "Grain for Green" threaten food security on the Loess Plateau of China?[J]. Ecosystem Health and Sustainability,2020,6(1):e1709560.
- [16] HAO W L, XIA B, LI J, et al. Deep soil CO₂ flux with strong temperature dependence contributes considerably to soil-atmosphere carbon flux[J].Ecological Informatics, 2023,74:e101957.
- [17] KING F H. Contributions to our knowledge of the aeration of soils[J].Science,1905,22(564):495-499.
- [18] MOLDRUP P, OLESEN T, GAMST J, et al. Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil water-induced linear reduction model[J].Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1588-1594.
- [19] DEEPAGODA T K K C, MOLDRUP P, SCHJØNNING P, et al. Density-corrected models for gas diffusivity and air permeability in unsaturated soil[J]. Vadose Zone Journal,2011,10(1):226-238.
- [20] MOLDRUP P, CHAMINDU D T K K, HAMA-MOTO S, et al. Structure-dependent water-induced linear reduction model for predicting gas diffusivity and tortuosity in repacked and intact soil [J]. Vadose Zone Journal,2013,12(3):1-11.
- [21] ALLAIRE S, LAFOND J, CABRAL A, et al. Measurement of gas diffusion through soils: Comparison of laboratory methods[J].Journal of Environmental Monitoring,2008,10(11):1326-1336.
- [22] PENMAN H L. Gas and vapour movements in the soil: I. The diffusion of vapours through porous solids[J].The Journal of Agricultural Science,1940,30(3):437-462.
- [23] LI T, SHAO M, JIA Y, et al. Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau, China[J].Catena,2018,171:460-468.
- [24] NAN W, YUE S, LI S, et al. The factors related to carbon dioxide effluxes and production in the soil profiles of rain-fed maize fields[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2016,216:177-187.
- [25] 周仕轩.黄土高原坝地土壤有机碳稳定性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- ZHOU S X. Study on stability of soil organic carbon in dam area of Loess Plateau[D].Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2022.
- [26] KUNCORO P. H, KOGA K, SATTA N, et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity [J]. Soil and Tillage Research, 2014,143:172-179.
- [27] MASON E A, MALINAUSKAS A P. Gaseous diffusion in porous media. IV. Thermal diffusion[J].The Journal of Chemical Physics,1964,41(12):3815-3819.
- [28] 王旭,闫玉春,闫瑞瑞,等.降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响[J].生态学报,2013,33(18):5631-5635.
- WANG X, YAN Y C, YAN R R, et al. Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe[J].Acta Ecological Sinica,2013,33(18):5631-5635.
- [29] 王超,杨智杰,陈光水,等.土壤垂直剖面的CO₂通量研究[J].亚热带资源与环境学报,2010,5(4):85-92.
- WANG C, YANG Z J, CHEN G S, et al. Research on the flux of carbon dioxide in soil vertical profile [J].Journal of Subtropical Resources and Environment,2010,5(4):85-92.