

# 侵蚀黑土逐层沉积结构异质性及其对温室气体排放的影响

王馨瑶<sup>1</sup>, 袁心皓<sup>1</sup>, 胡亚鲜<sup>2</sup>, 李凡<sup>1</sup>, 陈俊英<sup>1</sup>, 栗现文<sup>1\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 为探究沉积区不同沉积层次结构及理化性质差异对温室气体排放的影响, 该研究取典型侵蚀黑土进行粒级沉降分选, 将颗粒由粗到细分成6个粒级(L1~L6), 并按不同泥沙迁移情景, 将粗细颗粒依次逐层沉积, 形成6种不同深度和层次结构的沉积土柱(S1~S6): S1仅由最粗粒级L1组成, S6则由L1~L6从粗到细、自下而上依次逐层沉积而成。将不同土层结构土柱进行恒温恒湿培养, 并监测CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放速率。结果表明: 1) 不同沉积土层孔隙度由L2层的23.79%减少至L6层的1.00%, 而含水率则由L2层的11.16%增加到L6层的41.02%。2) 碳氮含量集中分布在L2~L4层。3) 7d培养期间, 温室气体平均释放速率总体随沉积层数增加而显著降低(P<0.05), 也表现为气体通量并未随着沉积土层增厚而增加。逐层沉积过程使得粗细颗粒分离, 粗疏颗粒在下层优先沉积, 而细密颗粒在上层堆叠, 致使孔隙度和气体相对扩散系数随颗粒自下而上随逐层沉积而逐渐降低, 仅1.5cm厚的细密沉积层便可有效抑制温室气体向土表排放。该研究通过颗粒沉降分选和逐层沉积, 从微观过程刻画沉积分层和掩埋效应对温室气体排放的影响, 对深化沉积环境温室气体排放机理具有重要意义。

**关键词:** 温室气体; 排放; 土壤; 黑土粒级; 沉降速度; 沉积层次; 孔隙度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302111

中图分类号: TV149; P512.4<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-14-0136-09

王馨瑶, 袁心皓, 胡亚鲜, 等. 侵蚀黑土逐层沉积结构异质性及其对温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 136-144. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302111 <http://www.tcsae.org>

WANG Xinyao, YUAN Xinhao, HU Yaxian, et al. Heterogeneous settling and bedding of black soil particles and their impacts on greenhouse gas emissions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 136-144. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302111 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

东北黑土区土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量丰富, 地力肥沃, 是中国的重要的粮食基地<sup>[1-2]</sup>, 但目前水土流失问题日益严峻<sup>[3-4]</sup>, 对黑土区的农业可持续发展造成严重影响。黑土区坡耕地长而缓, 坡长一般500~2 000 m, 最长可达4 000 m, 汇水面积大, 是导致其水土流失严重的主要原因之一。但黑土团聚结构良好, 沉降速度快, 悬移质比例相对较小, 致使超过80%的侵蚀泥沙并未迁移至下游水体, 而更易在邻近坡脚沉积<sup>[5]</sup>, 沉积区广阔, SOC富集形成一个巨大的沉积区碳库<sup>[6-7]</sup>。现有研究普遍认为沉积区是一个碳汇区域<sup>[8-10]</sup>, 如van den BYGAART等<sup>[11]</sup>利用<sup>14</sup>C分析土壤有机质(soil organic matter, SOM)发现沉积区埋藏SOM不易被分解而被保存下来形成净汇, BILLINGS等<sup>[12]</sup>量化沉积剖面SOC矿化程度发现沉积碳汇强度随侵蚀速率增加而增加。而泥沙颗粒经侵蚀分选和沉积后, 常形成下层粗颗粒-上层细颗粒的非均质结构<sup>[9]</sup>, 沉积非均质土层结构对

温室气体传输和排放的影响尚未取得系统认识。且目前有关沉积区的研究多集中于黄土丘陵沟壑区<sup>[5,8,10,13]</sup>, 关于东北黑土沉积区的研究还相对较少<sup>[7]</sup>。因此, 厘清不同沉积土层结构变化对沉积区富集有机碳稳定性的影响<sup>[14]</sup>, 对黑土区域碳循环具有重要意义。

侵蚀泥沙颗粒因粒径大小和沉降速度不同, 会在迁移搬运过程中发生分选, 经不同迁移距离后沉积<sup>[15-17]</sup>, 在沉积位置形成与天然成土截然不同的土层结构<sup>[18-20]</sup>, 主要表现为粗颗粒先沉积, 在下层聚集, 细颗粒后沉积, 在上层聚集。分层沉积土层颜色、粒径分布、土层厚度等存在明显的层级分异<sup>[13]</sup>, 致使各层之间的孔隙度、含水率、容重等基本物理性质在沉积过程中表现出异质性<sup>[21]</sup>, 进而影响沉积区不同类型温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>)的传输效率和排放特征<sup>[22-25]</sup>。如王震等<sup>[26]</sup>通过对8 m深沉积土层进行分层采集和培养后发现, 沉积剖面旋回层次分异明显, 各沉积层土壤理化特性与天然成土存在极大差异, 而自上而下的氧气条件和CO<sub>2</sub>传输效率差异也决定了沉积区域表土碳排放效应。而WIAUX等<sup>[27]</sup>在野外坡面不同侵蚀沉积位置进行全剖面CO<sub>2</sub>浓度和通量监测后发现, 沉积区表层10 cm对土表CO<sub>2</sub>的贡献超过90%, 而深层有机碳矿化对土表碳排放的贡献非常有限。这说明, 需要深入研究沉积区表层特殊土层结构的CO<sub>2</sub>贡献机理, 但传统泥沙采样因单次采集厚度粗放, 且易对土层结构产生扰动, 无法精细刻画沉积区各沉积薄层粒径和孔隙非均质差异<sup>[28-29]</sup>, 更无法准确反映沉积土层

收稿日期: 2023-02-20 修订日期: 2023-03-23

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”项目(XAB2020YN03); 国家自然科学基金面上项目(52279049)

作者简介: 王馨瑶, 研究方向为土壤侵蚀-沉积与温室气体排放。

Email: wangxinyao228@163.com

\*通信作者: 栗现文, 博士, 副教授, 研究方向为水土冻融过程与环境效应。Email: lixianwen@nwfufu.edu.cn

结构对温室气体排放特征及传输规律的影响。

综上所述，沉积土层结构与天然成土剖面截然不同，但传统粗放取样方式无法准确刻画颗粒分层沉积非均质结构及其对温室气体传输和排放的影响。因此，为探究黑土沉积区不同分层异质性对温室气体排放的作用，本研究以东北黑土区典型侵蚀土壤为对象，通过颗粒沉降分选和逐层沉积模拟不同沉积情景形成 6 种逐层沉积土层结构，对比非均质沉积土层垂直剖面结构特征及理化性质差异，监测并计算不同温室气体排放速率，揭示逐层沉积结构对温室气体传输排放的控制机制，以期为完善沉积区碳循环定量评价体系提供一定的理论和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黑龙江省嫩江市鹤山农场鹤北小流域（48°59'N~49°03'N，125°16'E~125°21'E）地处典型漫川漫岗地带，流域内坡耕地以长缓坡为主，坡度为 1°~5°，坡长 500~1 000 m<sup>[7]</sup>。该地区属于寒温带大陆性季风气候，夏季短暂炎热，冬季漫长寒冷且干燥。多年平均降水量在 476~510 mm 之间，其中 6—8 月的降水量占降水总量的 65%~70%<sup>[30]</sup>，降雪集中在 10 月一次年 5 月降水较少，仅占降水总量的 12%。多年平均气温在 2~4 °C，无霜期 115~120 d<sup>[31]</sup>，冬季平均冻深是 1.8~2 m。该区域土壤类型为典型黑土，有机质 4%~6%，含砂粒 6.1%，粉粒 56.92%，黏粒 36.97%<sup>[7]</sup>，其呈弱酸性，pH 值约 5.67。鹤北小流域总面积 28 km<sup>2</sup>，平均土壤侵蚀模数 1 649.3 t/(km<sup>2</sup>·a)，年平均土壤侵蚀厚度为 1.05 mm，大量侵蚀泥沙经过长距离搬运坡脚沉积，平均沉积速率为 1.1 kg/m<sup>2</sup>，形成面积广阔、土层较厚的沉积区域，平均厚度约 30 cm，占流域总面积的 1/10 左右。于 2021 年 10 月采集鹤北小流域长缓坡农耕地表层 0~20 cm 的土样，运回实验室风干，去除根系和石块，过 5 mm 筛备用。

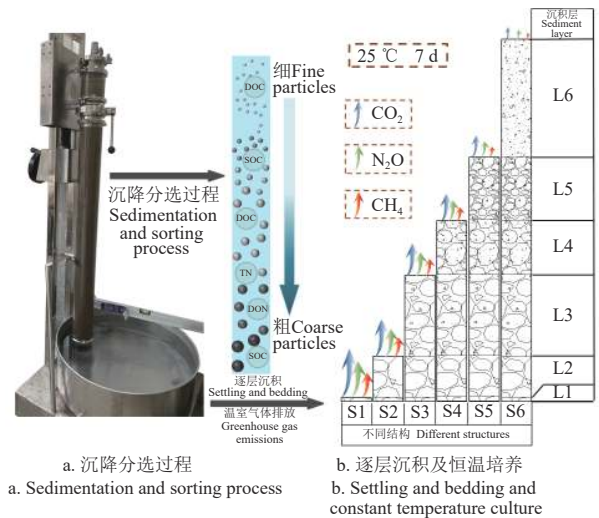
### 1.2 土壤颗粒逐层沉积模拟及恒温培养

为探究黑土颗粒侵蚀分选后的逐层沉积过程对温室气体排放的影响规律，本试验分为土壤颗粒沉降分选、土壤颗粒逐层沉积、沉积结构培养 3 个部分进行。具体而言，沉降分选部分依据斯托克定律（式（1））计算不同粒径沉降速度<sup>[16]</sup>与沉降时间关系（表 1），将 400 g 润湿至饱和状态的黑土投入沉降管装置（图 1a）进行粒级沉降分选，获取的土样风干后用于测定各粒级基本土壤理化性质，一组重复得到 6 个粒级颗粒，共 3 组重复；同样，按照每次投入 400 g 饱和状态黑土，在沉降管底部放置直径和高度均为 10 cm 的有机玻璃容器用于收集土体，而后按照表 1 所示的沉积时间，各粒级按不同沉降速度，经过沉降分选作用后形成沉积厚度不等、粒级结构不同的沉积层（L1~L6），各粒级层逐层沉积后构成 6 种不同层次的沉积结构（S1~S6）（图 1b）。每进行一次沉积过程形成一种沉积结构，依次形成 6 种沉积结构（S1~S6），一组重复进行 6 次沉积，共 3 组重复，形成 18 个土柱，试验过程中，用直尺测量各层累积沉积前后的总高度，二者相减得到该层厚度，精度为 0.1 cm（图 1b）。所形成的沉积结构用于恒温培养及温室气体

采集（图 1b）。沉降和沉积试验过程中通过温度计监测水体温度，变化范围维持在 23~25 °C。

表 1 土壤颗粒沉降速度及沉降时间

土壤团聚体粒径 Soil aggregate particle size $D/\mu\text{m}$	沉积层 Sediment layer	沉降速度 Settling velocity $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	沉降/沉积时间 Settling or deposition time $t/\text{min}$
$D \geq 500$	L1	$v \geq 0.23$	$t \leq 0.089$
$250 \leq D < 500$	L2	$5.6 \times 10^{-2} \leq v < 0.23$	$0.089 < t \leq 0.366$
$125 \leq D < 250$	L3	$1.5 \times 10^{-2} \leq v < 5.6 \times 10^{-2}$	$0.366 < t \leq 1.367$
$63 \leq D < 125$	L4	$3.0 \times 10^{-3} \leq v < 1.5 \times 10^{-2}$	$1.367 < t \leq 6.833$
$32 \leq D < 63$	L5	$1.0 \times 10^{-3} \leq v < 3.0 \times 10^{-3}$	$6.833 < t \leq 20.500$
$D < 32$	L6	$v < 1.0 \times 10^{-3}$	$t > 20.500$



注：S1=L1，S2=L1+L2，以此类推。  
Note: S1=L1, S2=L1+L2, and so on.

图 1 逐层沉积过程 6 种结构特征及温室气体排放示意图  
Fig.1 6 structural characteristics of layer-by-layer deposition process and schematic diagram of greenhouse gas emissions

本研究沉降管为自制，由有机玻璃制成，内径 10 cm，管长 105 cm（图 1a），具体沉降分选原理及操作步骤参见笔者前期研究<sup>[15]</sup>，各粒径沉降速度与沉降时间关系由式（1）计算获得。

$$v = \frac{h}{t} = \frac{D^2 g (D_g - D_f)}{18\eta} \quad (1)$$

式中  $v$  为沉降速度，m/s； $h$  为沉降距离（即沉降管长度与投放器内悬浮液高度之和），m； $t$  为沉降时间，s； $D$  为土壤粒径，mm； $g$  为重力加速度，约为 9.81 N/kg； $\eta$  为 20 °C 时的水体黏度，约为  $1 \times 10^{-3}$  (N·s)/m<sup>2</sup>； $D_g$  为土壤颗粒平均密度，约为  $2.65 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>； $D_f$  为水体密度，约为  $1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。依据本试验所用沉降管尺寸计算出实际沉降时间如表 1 所示。

本研究采用沉降管进行土壤颗粒分选和沉积模拟，综合考虑了颗粒大小、形状、孔隙度以及密度等因素对其运动规律的影响，相比传统干/湿筛依赖团聚体粒径这一单一分选指标能更好地反映土壤颗粒在侵蚀迁移过程中真实的运动状态<sup>[16]</sup>。同时，沉降管通过土壤颗粒在水中自然沉积，不仅能实现不同粒级土壤颗粒逐层沉积，还可极大减少团聚体破损，最大限度保存团聚体完整性<sup>[15,32]</sup>。

S1~S6 土体排出表层积水后，再通过盛土容器多孔

底板自然沥水 24 h, 模拟田间自然排水过程, 至容器底部不再有水滴落, 达到各沉积结构总体田间持水量 (35.7%~41.2%)。用硅胶密封套从底部密闭, 防止气体从底部泄露, 为模拟研究区夏季水蚀温度条件, 根据研究区白天平均气温, 设置培养温度为 25 °C, 而后将不同沉积结构土层置于 25 °C 恒温培养箱 (HWS-150, 中国宁波普朗特仪器有限公司), 保持培养箱内空气环境湿度为 60%, 敞口避光状态连续培养 7 d 后达到相对稳定状态, 于每日收集并测定温室气体 (CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>) 排放速率。具体做法如下: 于每日 06:00 和 18:00, 分别将容器顶部密闭 1 h, 待气体在容器顶空聚集后, 抽取顶空气体储至容量 20 mL 西林瓶中, 而后使用气相色谱仪 (7890A-03030623, 安捷伦) 测定出峰面积并计算不同气体类型浓度, 进而求得单位时间气体释放速率。培养期间, 为尽量减少日间土壤含水率变化造成的土壤呼吸脉冲, 根据含水率变化情况 (水分损失约 2.1%), 每隔 1 d 进行晚间补水, 维持各沉积结构土体含水率稳定保持在各自田间持水量。

### 1.3 土壤颗粒其他理化性质测定

不同粒级土壤颗粒质量分布及含水率由烘干法测定; 可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 使用总碳分析仪 (TOC-L03030135, 岛津) 进行测定; 可溶性有机氮 (dissolved organic nitrogen, DON) 使用紫外分光光度计 (UV1900i, 岛津) 测定; 有机碳 (soil organic carbon, SOC) 和全氮 (total nitrogen, TN) 用 Thermo Scientific™ FlashSmart™ NC SOIL 元素分析仪测定。

为表现不同沉积结构 SOC、TN、DOC、DON 含量差异, 利用式 (2) 计算各指标在不同粒级层数叠加后各沉积结构中的绝对累积含量。

$$N_j = \sum_{i=1}^6 \delta_i C_i (i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

式中  $N_j$  为 S1~S6 沉积结构各指标的绝对累积含量, g 或 mg;  $\delta_i$  为各粒级的绝对质量, g;  $C_i$  为各指标在不同粒级的含量, g/kg 或 mg/kg。

对于不同逐层沉积结构, 在培养结束后分别测量各土柱的湿质量和干质量, 计算充气孔隙度及气体相对扩散系数, 具体计算方法如下<sup>[23-24]</sup>:

$$\theta_g = (m_w - m_d) / m_d \quad (3)$$

$$\theta_v = \rho_b \theta_g \quad (4)$$

$$A = \Phi - \theta_v = (1 - \rho_b / \rho_s) - \theta_v \quad (5)$$

$$D_s / D_0 = \varepsilon^{10/3} / \Phi^2 (\varepsilon = A) \quad (6)$$

式中  $\theta_g$  为各层质量含水率, %;  $m_w$  和  $m_d$  为各层湿质量和干质量, g, 分别在湿润和烘干状态下通过逐层沉积结构依次相减得到;  $\theta_v$  为体积含水率, %;  $\rho_b$  为容重, g/cm<sup>3</sup>;  $A$  为充气孔隙度, %;  $\Phi$  为总孔隙度, %;  $\rho_s$  为土粒密度, g/cm<sup>3</sup>;  $D_s / D_0$  为气体相对扩散系数。为减小计算误差, 本研究在计算容重、含水率、孔隙度等指标时, 只统计  $D < 500 \mu\text{m}$  的粒级。

为估算沉降过程土壤 SOC、TN、DOC、DON 的流失情况, 将 4 种物质相对于原土中的含量变化定义为流失百分比  $R$ , 计算式如下所示:

$$R = (C_0 - \sum_{i=1}^n \omega_i C_i) / C_0 \times 100\% (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (7)$$

式中  $R$  为各物质的流失百分比, %;  $\omega_i$  为各粒级的质量占比, %;  $C_i$  为各物质在不同粒级的含量, mg/kg 或 g/kg;  $C_0$  为原土中各物质的含量, g/kg 或 mg/kg。

### 1.4 温室气体排放相关计算

1) 根据顶空体积及浓度差计算气体单位时间释放速率

$$X = M(C_2 - C_1) \cdot V_j \cdot \lambda / 2.45 \times 10^3 W_j \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (8)$$

式中  $X$  为日内单位时间气体释放速率,  $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ;  $C_2$  为时段末气体体积分数,  $10^{-6}$ ;  $C_1$  为时段初气体体积分数,  $10^{-6}$ ;  $M$  分别为 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 分子量;  $V_j$  为各土柱培养容器顶部留空空间体积, L;  $\lambda$  分别为 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 中 C、N 的摩尔质量占比;  $W_j$  为各沉积结构土样的干质量, kg。

2) 温室气体平均释放速率

$$F = \sum_{k=1}^K X_k / 7 \quad (k = 1, 2, \dots, 7) \quad (9)$$

式中  $F$  为 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的 7 d 平均释放速率,  $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$  (以每 g 土 CO<sub>2</sub>-C 计, 下同);  $X_2$  为时段末气体浓度,  $\mu\text{g}/\text{L}$ ;  $X_1$  为初始气体浓度,  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

3) 土壤温室气体通量

$$Q = \sum_{k=1}^K 24 X_k W_j / 78.5 X_k (k = 1, 2, \dots, 7) \quad (10)$$

式中  $Q$  为实际 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的单位面积通量,  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ; 78.5 为各沉积结构表面积。

### 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行数据处理与计算, 利用 Origin 2021 软件绘图, 采用 SPSS 22 进行单因素方差分析, 并用多重比较检验方法最小显著法 (least significant difference, LSD) 进行均值比较,  $P < 0.05$  表示显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑土颗粒沉降分选及逐层沉积结构特征

黑土经过沉降管沉降分选过后各粒级质量分布如表 2 所示。总体来看, 黑土团聚结构良好, 粗颗粒含量较多而细颗粒含量较少。其中,  $\geq 250 \mu\text{m}$  的颗粒达 24.5%, 而  $< 32 \mu\text{m}$  的颗粒占 23.1%, 其余颗粒 ( $32 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$ ) 的质量占比范围为 14.0%~19.6%。

将沉降分选后的颗粒按照其自身沉降速度, 由粗到细、自下而上逐层沉积后, S1~S6 这 6 种沉积层次结构累积质量分布如表 2 所示。土壤颗粒经过逐层沉积后形成了 S1~S6 不同的沉积结构, 且每种沉积结构均表现为下粗上细、粗薄细厚的层级差异 (表 2), 虽然每个粒级层较薄, 但层间仍存在显著差异 ( $P < 0.05$ , 表 2), 其中,  $D \geq 500 \mu\text{m}$  的 L1 最粗粒级沉积土层最薄, 厚度仅 0.20 cm, L2~L5 沉积土层厚度在 0.40~0.80 cm 范围内变化,  $D < 32 \mu\text{m}$  的 L6 最细粒级沉积土层最厚, 厚度为 1.50 cm。本研究各粒级沉积层的厚度差异是由各沉降粒级的质量分布决定, 不能用于代表某次或所有沉积过程的层次结构, 但突出强调了不同粒级先后沉积过程中土层重构和粒径孔隙差异对温室气体排放的影响。

表 2 各粒级质量分布及逐层沉积结构累积质量

Table 2 Mass distribution by grain level and cumulative mass of deposited structures layer by layer

粒径 Particle size / $\mu\text{m}$	沉积层 Sediment layer		逐层沉积结构 Layer-by-layer deposition of structures			
	编号 Label	厚度 Thickness/cm	质量占比 Mass fraction/%	编号 Label	累积厚度 Cumulative thickness/cm	累积质量 Cumulative mass/g
$D \geq 500$	L1	0.20±0.23 d	3.5	S1	0.20±0.23 d	29.25±2.11 f
$250 \leq D < 500$	L2	0.40±0.14 cd	21.0	S2	0.60±0.09 d	93.14±16.21 e
$125 \leq D < 250$	L3	0.80±0.06 b	18.8	S3	1.40±0.08 c	151.98±27.44 d
$63 \leq D < 125$	L4	0.60±0.06 bcd	19.6	S4	2.00±0.05 c	204.08±14.68 c
$32 \leq D < 63$	L5	0.80±0.21 bc	14.0	S5	2.80±0.23 b	246.85±3.96 b
$D < 32$	L6	1.50±0.40 a	23.1	S6	4.30±0.61 a	375.21±1.97 a

注：不同小写字母表示随层数增加显著差异， $P < 0.05$ 。

Note: Different lowercase letters indicate differences as soil layers increase,  $P < 0.05$ .

随着黑土粒级不断叠加，容重从粗到细自下而上整体呈减小趋势，变化范围为  $0.80 \sim 1.68 \text{ g/cm}^3$  (表 3)。含水率随黑土粒级减小整体呈不断增大趋势，从 L2~L6 含水率由 11.16% 增加至 41.02%，L5 层质量含水率最大达 68.78%。L2~L6 孔隙度变化具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )，L2 为 23.79%，L3 层 ( $125 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$ ) 对应的孔隙度最大，为 44.27%， $D < 125 \mu\text{m}$  时，孔隙度

自下而上随粒径减小呈降低趋势； $D < 32 \mu\text{m}$  黑土颗粒沉积到最上层 L6，呈现光滑且黏密的状态，此时孔隙度最小，仅为 1.00%，相较于 L2 降低 22.8%。气体相对扩散系数随孔隙度的变化而变化，L3 层 ( $125 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$ ) 的相对扩散系数最大，为 0.14；当粒径  $D < 125 \mu\text{m}$  后 (即 L4~L6 层)，气体相对扩散系数随粒径减小趋近于 0。

表 3 逐层沉积各土层基本物理性质

Table 3 Basic physical properties of each soil layer deposited layer by layer

粒径分布 Particle size distribution ( $\mu\text{m}$ )	容重 Soil bulk density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	质量含水率 Moisture content/%	孔隙度 Porosity/%	气体扩散系数 Relative diffusion coefficient of gas
$D < 32$ (L6)	1.08±0.31 b	41.02±1.22 ab	$1.00 \pm 2 \times 10^{-3}$ d	$7 \times 10^{-7} \pm 1 \times 10^{-8}$ b
$32 \leq D < 63$ (L5)	0.80±0.10 b	68.78±14.66 a	12.33±0.54 c	$2 \times 10^{-3} \pm 3 \times 10^{-3}$ b
$63 \leq D < 125$ (L4)	1.11±0.20 b	36.78±18.94 ab	19.54±0.18 b	$0.01 \pm 5 \times 10^{-3}$ b
$125 \leq D < 250$ (L3)	0.95±0.21 b	31.26±19.91 ab	44.27±4.10 a	0.14±0.07 a
$250 \leq D < 500$ (L2)	1.68±0.34 a	11.16±7.33 b	23.79±0.52 b	0.08±0.06 ab

注：不同小写字母表示各粒级间理化性质的差异性， $P < 0.05$ 。下同。

Note: Different lowercase letters indicate the difference in physical and chemical properties between particle sizes,  $P < 0.05$ . Same below.

## 2.2 黑土沉降和沉积后碳氮含量分布及流失特征

黑土各粒级碳氮含量分布如表 4 所示。不同粒级的 SOC 和 TN 含量随粒径由大到小呈先增大后减小又增大的变化趋势，类似“S”型 (表 4)，在  $125 \mu\text{m} \leq D < 500 \mu\text{m}$  时 SOC 和 TN 含量最大，约为 27 和 2.3 g/kg；在  $32 \mu\text{m} \leq D < 63 \mu\text{m}$  时，SOC 和 TN 含量最低，仅为 19.25 和

1.59 g/kg； $D < 32 \mu\text{m}$  时，SOC 和 TN 含量又分别增加至 23.27 和 2.05 g/kg。各粒级土壤颗粒的 DOC 含量也大体呈“S”型变化，在  $125 \mu\text{m} \leq D < 250 \mu\text{m}$  时达到最大值，为 519.31 mg/kg；当  $32 \mu\text{m} \leq D < 63 \mu\text{m}$  时黑土颗粒中的 DOC 含量最低，为 424.04 mg/kg。DON 含量各粒级差异不大 (表 4)，各粒径含量范围为 12.16 ~ 19.69 mg/kg。

表 4 黑土各粒级土壤碳氮含量分布特征

Table 4 Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen content at various grain levels of black soil

粒径分布 Particle size distribution/ $\mu\text{m}$	有机碳 Soil organic carbon (SOC)/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮 Total nitrogen (TN)/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (DOC)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen (DON)/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$D < 32$ (L6)	23.27±0.46 c	2.05±0.001 b	443.79±40.46 bc	18.91±7.99 a
$32 \leq D < 63$ (L5)	19.25±0.55 d	1.59±0.06 c	424.04±11.83 c	12.16±3.17 a
$63 \leq D < 125$ (L4)	23.40±0.47 c	1.95±0.03 b	493.96±20.91 ab	19.69±4.77 a
$125 \leq D < 250$ (L3)	26.88±0.75 a	2.29±0.05 a	519.31±33.73 a	17.73±7.11 a
$250 \leq D < 500$ (L2)	27.34±0.53 a	2.35±0.08 a	471.73±29.61 abc	13.54±5.43 a
$D \geq 500$ (L1)	24.90±0.75 b	2.31±0.16 a	441.79±38.65 bc	19.09±12.59 a

黑土逐层沉积结构碳氮含量也存在明显差异 ( $P < 0.05$ ，表 5)，S1~S6 沉积结构绝对累积 SOC、TN、DOC、DON 总量随沉积层数增加呈显著增加趋势，且 DOC 和 DON 的总量低于 SOC 和 TN。其中，SOC 和 TN 的总量分别从 S1 的 0.73 和 0.07 g 增加到 S6 的 9.08 和 0.79 g，DOC 和 DON 的总量从 S1 的 12.92 和 0.56 mg 增加到 S6 的 174.44 和 6.44 mg。

黑土经过沉降分选后 SOC、TN、DOC 和 DON 均有不同程度的流失，各组分的流失百分比如表 6 所示。总

体而言，相比碳含量，黑土颗粒中的氮流失较多，其中，DON 流失百分比高达 75.93%，TN 的流失百分比为 13.95%，SOC 的流失量与 TN 相差不大，流失百分比为 11.74%，DOC 流失程度最小，为 6.75%。经与初始投样的质量对比，沉降分级后各粒级总和回收率可达 93.5%，而有机质流失量偏大的主要原因可能是沉降分选所用水量较大 (约 45 L)，而沉降速度最慢且有机碳含量较高的  $< 32 \mu\text{m}$  粒级仅有 23.1% (表 2)，将该级颗粒从水体中回收可能会导致有机质损失较多。

表5 黑土逐层沉积结构土壤碳氮含量分布

Table 5 Distribution of soil carbon and nitrogen content in layer-by-layer sedimentary structure of black soil

逐层沉积结构 Layer-by-layer deposition structures	SOC/g	TN/g	DOC/mg	DON/mg
S1	0.73±0.02 f	0.07±0.004 f	12.92±1.13 f	0.56±0.37 c
S2	2.47±0.05 e	0.22±0.01 e	43.06±1.34 e	1.42±0.69 c
S3	4.04±0.04 d	0.35±0.01 d	73.36±2.85 d	2.46±1.08 bc
S4	5.27±0.03 c	0.45±0.01 c	99.34±3.94 c	3.49±0.83 b
S5	6.10±0.04 b	0.52±0.01 b	117.48±3.57 b	4.01±0.94 b
S6	9.08±0.09 a	0.79±0.01 a	174.44±8.32 a	6.44±1.66 a

注:不同小写字母表示沉积结构间碳氮分布特征的差异性, ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate differences in carbon and nitrogen distribution characteristics between sedimentary structures, ( $P<0.05$ ).

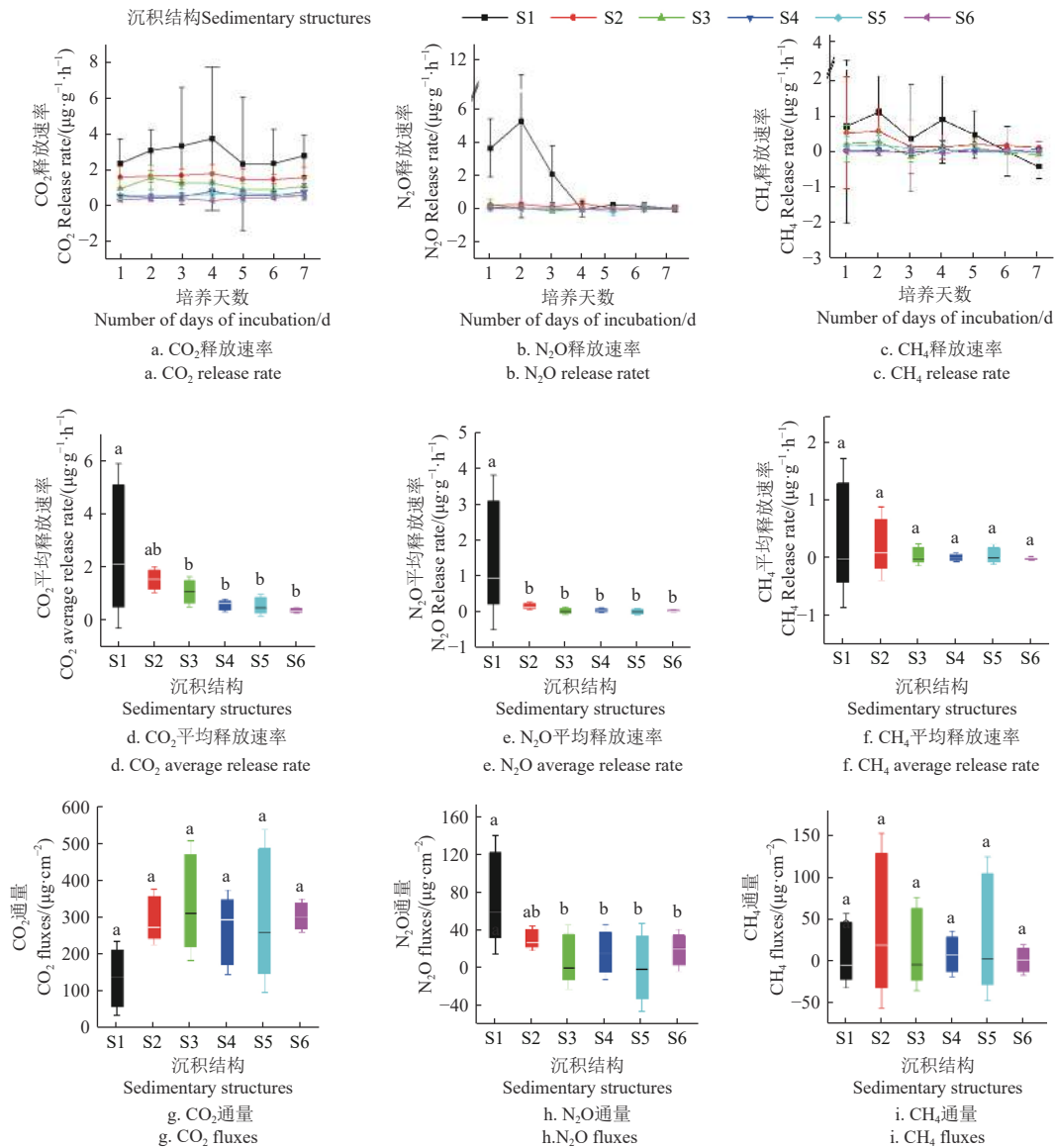
表6 黑土碳氮流失百分比

Table 6 Percentage of carbon and nitrogen loss in black soil

有机质类型 Organic matter types	SOC/%	TN/%	DOC/%	DON/%
原土 Original soil	27.56±0.05	2.42±0.04	506.63±49.07	68.98±1.30
沉降后 After settling	24.33±0.17	2.08±0.02	470.67±23.73	16.64±3.52
流失量 Loss of organic matter	3.23±0.16	0.34±0.03	35.95±32.73	52.34±2.29
流失百分比 Percentage loss of soil organic matter/%	11.74±0.58	13.95±0.87	6.75±6.19	75.93±4.71

### 2.3 不同逐层沉积情景下温室气体释放特征

各土柱在恒温恒湿培养7 d时呼吸特征如图2所示。



注:不同小写字母表示随沉积气体排放的差异性, ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters denote the difference in emissions with deposition, ( $P<0.05$ ).

图2 逐层沉积CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>释放速率随时间变化及7日累积气体通量Fig.2 Change of layer-by-layer deposition of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> release rate with time and 7-day gas flux

随时间变化, S1结构CO<sub>2</sub>释放速率显著较大,且在4 d释放速率达到峰值,但随后呈下降趋势, S2~S6中CO<sub>2</sub>释放速率随时间变化较为平稳(图2a); CO<sub>2</sub>平均释放速率随S1~S6逐层沉积显著降低( $P<0.05$ ),

S1在7 d内平均释放速率为2.72 μg/(g·h), S6平均释放速率最小,为0.38 μg/(g·h),较S1减少85.90%(图2d)。N<sub>2</sub>O在S1时释放明显,且2 d达到峰值后释放速率迅速减少,到后期几乎没有N<sub>2</sub>O释放, S2~S6释放速率接近

于 0 (图 2b); 同时, S1 沉积结构的  $N_2O$  平均释放速率最大, 为  $1.59 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ , 与 S2~S6 表现显著性差异 ( $P<0.05$ ), S2~S6 平均  $N_2O$  释放速率较低 (图 2c)。S1~S6 逐层沉积结构中  $CH_4$  释放速率较低且随时间变化不稳定 (图 2c), 同时,  $CH_4$  平均释放速率随 S1~S6 沉积结构变化不显著且整体较小 (图 2f)。

为分析温室气体释放是否与颗粒沉积质量和碳氮含量累积有直接的关系, 计算了每个沉积结构的表观温室气体通量。由图 2g~图 2i 可以看出, S1~S6 沉积结构 7 d 温室气体通量整体随沉积层数增加表现为,  $CO_2$  在 S1 时通量较小, 为  $130.60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , S2~S6 随沉积层数增加,  $CO_2$  通量并未增加;  $N_2O$  在 S1 和 S2 时通量较大, S3~S6 通量相对较小;  $CH_4$  通量在 S1~S6 结构中整体较小。

### 3 讨论

#### 3.1 侵蚀黑土逐层沉积过程及分层特性差异

土壤颗粒经过逐层沉积后形成了 S1~S6 不同的沉积结构, 且每种沉积结构均表现为下粗上细、粗薄细厚的层级差异 (表 2), 总体来看, 顶层 L6 细粒层较下层粗粒层孔隙度减少约 22.8%, 而含水率则相对较大 (表 3), 说明 S1~S6 的沉积结构及孔隙特性主要由土壤颗粒沉降速度和粒径大小决定 (表 1), 具体而言, 粗颗粒沉降速度大于细颗粒<sup>[32-34]</sup>, 优先沉积, 而细颗粒沉降速度较慢, 覆于粗颗粒之上 (图 1)。当仅有 L1 粗颗粒层沉积形成 S1 结构时, 厚度仅为 0.20 cm (表 2)。此时, 粗颗粒粒径较大, 内部大孔隙数量相对较多 (图 1b), 持水能力弱。而当所有粒级均沉积时形成 S6 沉积结构, L1 粗颗粒优先沉积于底层, 而 L6 细颗粒覆于顶层 (图 1b)。并且,  $D<32 \mu\text{m}$  细颗粒最多, 约占 23.1%, 致使上层 L6 层最厚 (1.50 cm) (表 2)。此时, 随着逐层沉积粒径逐渐减小, 质地逐层细密, 且比表面积逐渐增大, 沉积结构由下而上颗粒孔隙空间变得狭小 (图 1b), 保水能力不断增强<sup>[21-22]</sup>, 孔隙度和气体相对扩散速率均在最上层 L6 达到最低值 (表 3)。

需要指出的是, 颗粒沉降速度分级仅能反映各颗粒在流动水体中的可迁移性, 并非模拟某次具体的侵蚀沉积过程。在野外实际情况下, 每经历一次降雨事件后所形成的沉积层厚度随降雨事件大小变化而不同, 但每个沉积过程均遵循粗颗粒先沉积, 细颗粒后沉积的自然规律。本研究模拟的沉积结构土层累积厚度最大为 4.30 cm, 符合野外自然沉积层厚度变化范围。如, TIAN 等<sup>[35]</sup> 获取 2001—2014 年的 24 个洪水事件的单次沉积厚度在 1.5~34.5 cm 范围内变化, 且单次沉积包含多层粒级结构。事实上各颗粒具体的迁移距离和沉降地点受不同降雨强度、历时和水流速度的影响<sup>[13,36-37]</sup>, 且经多次侵蚀沉积过程后, 沉积区还可形成旋回结构, 沉积层粒径、层厚、含水率、孔隙度和碳氮含量等均可能出现交错特征, 而层级突变可进一步影响气体在沉积剖面的传输与扩散。因此, 未来研究还应结合不同水动力条件、多次逐层旋回沉积结构等多情境下的沉积规律与分层特性开

展系统研究。

#### 3.2 沉积逐层结构对温室气体传输排放的影响

总体来看, 经过 7 d 恒温恒湿培养后, 各类型温室气体的平均释放速率均随着 S1~S6 逐层沉积而降低 (图 2a), 表明逐层沉积过程中的土层掩埋对温室气体排放产生抑制作用, 这可能因为 6 种沉积结构不同层位碳氮含量、孔隙度和气体相对扩散速率 (表 3) 可对温室气体在各层的产生和传输造成影响<sup>[26,38]</sup>。比如, S1 沉积结构仅由 L1 ( $D\geq 500 \mu\text{m}$ ) 的粗颗粒组成, 孔隙空间较大 (图 1b), 更有利于微生物生长代谢<sup>[39-40]</sup>, 且 L1 层颗粒 SOC 和 TN 含量较高 (表 4), 碳氮可被快速分解, 所释放的温室气体也可迅速由土表排出 (图 2a)。随着颗粒逐层沉积形成 S1~S6 结构, 孔隙度随着沉降速度慢的细小颗粒逐层叠加而不断减小, 同时气体相对扩散系数逐层降低 (表 3), 导致孔隙连通性随着沉积层增厚而变差。具体而言, 孔隙度和气体相对扩散系数均在  $D<125 \mu\text{m}$  的各粒级均显著减小 (表 3), 有效减缓了下伏各层碳氮矿化<sup>[41-42]</sup>, 抑制了  $CO_2$  的传输和释放, 致使 S4、S5 和 S6 的  $CO_2$  平均释放速率显著低于以粗疏颗粒为表层的 S1、S2 和 S3 (图 2d)。同时, 前期黑土相关研究已表明<sup>[43-44]</sup>, 当各粒级单独培养而不逐层沉积情况下, 小粒级中微生物生物量碳含量较高, 其微生物基础呼吸的  $CO_2$  释放速率也高于其他粒级<sup>[43-44]</sup>。而在本研究中, 随着颗粒逐层沉积, 以 L6 ( $D<32 \mu\text{m}$ ) 细粒级沉积层为最上层的 S6 沉积结构的温室气体释放量最低 (图 2d~图 2f), 说明沉积土层结构中细粒层的掩埋效应是抑制温室气体排放的关键因素。同时, 土柱表观温室气体通量并不随沉积土层增厚 (图 1, 表 2) 和有机碳累积含量增加 (表 5) 而增加 (图 2g~图 2i), 综合各沉积结构的含水率和孔隙特征 (表 3), 说明表观温室气体通量是各沉积结构温室气体产生和有效传输耦合的结果。

本研究模拟结果不仅符合沉积区由浅层有氧到深层厌氧条件变化下, 有机碳分解速率逐渐降低的普遍认识<sup>[26]</sup>, 更从土壤颗粒逐层沉积细观过程证实了逐层沉积掩埋可对温室气体排放有明显的抑制作用。WIAUX 等<sup>[27]</sup> 在野外沉积区的观测结果已发现, 由于表层细密沉积颗粒的掩埋作用, 上层 10 cm 对表观  $CO_2$  的贡献超过 90%; 而本研究结果进一步表明, 仅 1.5 cm 厚的细密沉积层 ( $D<32 \mu\text{m}$ , L6) 便可达到显著掩埋抑制效果。这不仅明确了沉积结构异质性对于温室气体排放贡献的影响 (图 2), 还说明野外沉积区形成的层位交错的沉积结构中, 极薄的细颗粒土层便可能会对温室气体的排放产生强烈的抑制作用。只有综合考虑沉积区剖面土层结构, 量化各层层厚、含水率、孔隙度和碳氮含量等多方面因素对有机碳矿化和  $CO_2$  传输释放的影响, 才能准确评估侵蚀-沉积地貌下土壤-大气界面温室气体通量。

本研究通过逐层沉积形成不同沉积土层结构, 能够从细观尺度清晰获得不同沉积层之间理化性质的差异, 揭示随沉积层位的变化温室气体排放过程, 突破了传统采样监测方法无法反映细观分层特性的局限<sup>[45-46]</sup>。需要

指出的是, 本研究所测温室气体的释放速率是在每一层叠加后所测, 而每一层具体对温室气体的贡献尚不可知。此外, 不同温室气体随逐层沉积的抑制程度不同, 这可能是由于不同气体对沉积土层孔隙度和气体传输效率的敏感程度不同。未来工作应进一步从细观分层角度有效区分每个沉积层位对于整个沉积区的不同温室气体排放贡献率。

#### 4 结 论

本文通过沉降管实现逐层沉积模拟, 并对不同沉积结构土层进行恒温培养试验, 从细观尺度刻画侵蚀-沉积模式下典型黑土区不同沉积情景分层物理结构及有机质分布特征, 揭示沉积区在逐层沉积时的温室气体排放规律, 并探讨分层沉积结构及理化性质特性对温室气体扩散的影响机制, 得出以下主要结论:

1) 侵蚀黑土沉积区不同沉积环境, 泥沙颗粒可逐层累积形成沉积结构 S1~S6。每种沉积结构均典型表现为下粗上细, 且 S1~S6 分层粒级质量和碳氮含量随沉积层数增加而增加。

2) 分选沉积土层的粒径分布是造成沉积结构理化性质差异的主要原因。沉积层 L1~L6 典型表现为下粗上细, 且含水率整体上随沉积层粒级变细有增加趋势, L5 沉积层的含水率最高。而土壤孔隙度由粗至细, 自下而上呈现逐渐减少趋势。L1~L6 碳氮含量随沉积分层变化呈“S”型趋势, 整体在 L3~L4 (63~250  $\mu\text{m}$ ) 时出现峰值。

3) 土层的不断掩埋会对温室气体排放产生比较明显的抑制作用, 致使温室气体通量并未随沉积层数增加和沉积层加厚而增加。CO<sub>2</sub> 在 S1~S6 沉积过程中平均释放速率显著降低, S6 较 S1 减小达 85.90%; N<sub>2</sub>O 在 S1 时释放明显, S2~S6 释放速率接近于 0, CH<sub>4</sub> 在 S1~S6 结构平均释放速率均较小。仅 1.5 cm 厚的细密沉积层 (土壤粒径小于 32  $\mu\text{m}$ , L6), 便可达到显著掩埋抑制效果。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 17-24.  
ZHANG Keli, LIU Hongyuan. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王子龙, 王凯, 姜秋香, 等. 黑土表层有效养分含量和酶活性对雪被去除的季节性响应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 111-118.  
WANG Zilong, WANG Kai, JIANG Qiuxiang, et al. Seasonal response of available nutrient content and enzyme activity in black soil surface to snow removal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 111-118. (in Chinese with English abstract)
- [3] 左小锋, 郑粉莉, 张加琼, 等. 典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 45-53.  
ZUO Xiaofeng, ZHENG Fenli, ZHANG Jiaqiong, et al. Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 45-53. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何彦星, 张凤宝, 杨明义. <sup>137</sup>Cs 示踪分析东北黑土坡耕地土壤侵蚀对有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 60-68.  
HE Yanxing, ZHANG Fengbao, YANG Mingyi. Effects of soil erosion on organic carbon fractions in black soils in sloping farmland of northeast China by using <sup>137</sup>Cs tracer measurements[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 60-68. (in Chinese with English abstract)
- [5] 童莉莎. 侵蚀-沉积环境下土壤有机碳动态变化及其对无机碳的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.  
TONG Lisha. Dynamic Changes of Soil Organic Carbon and Its Effect on Soil Inorganic Carbon in Erosion-Deposition Conditions[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [6] HU Y, LI X, GUO S, et al. On-site soil dislocation and localized CNP degradation: the real erosion risk faced by sloped cropland in northeastern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 302: 107088.
- [7] HE Y, HU Y, GAO X, et al. Minor topography governing erosional distribution of SOC and temperature sensitivity of CO<sub>2</sub> emissions: Comparisons between concave and convex to posequence[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 1906-1919.
- [8] YAO Y, SONG J, WEI X. The fate of carbon in check dam sediments[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 224: 103889.
- [9] TANG Q, WANG S, FU B, et al. Check dam infilling archives elucidate historical sedimentary dynamics in a semiarid landscape of the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2018, 118: 161-170.
- [10] WANG Z, LIU Y, YANG M Y, et al. Characteristics and factors influencing organic carbon decomposition in sediment in check dams[J]. The Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2635-2643.
- [11] van den BYGAART A J, GREGORICH E G, HELGASON B L. Cropland C erosion and burial: Is buried soil organic matter biodegradable?[J]. Geoderma, 2015, 239: 240-249.
- [12] BILLINGS S A, RICHTER D B, ZIEGLER S E, et al. Distinct contributions of eroding and depositional profiles to land-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange in two contrasting forests[J]. Frontiers in Earth Science, 2019, 7: 36.
- [13] 李勉, 杨二, 李平, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 161-167.  
LI Mian, YANG Er, LI Ping, et al. Characteristics of sediment deposition in check dam in small watershed in Loess Hilly Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2017, 33(3): 161-167. (in Chinese with English abstract)
- [14] van den BYGAART A J, KROETSCH D, GREGORICH E G, et al. Soil C erosion and burial in cropland[J]. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1441-1452.
- [15] 胡亚鲜, Nikolaus J K. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1115-1124.

- HU Yaxian, NIKOLAUS J K. Using settling velocity to investigate the patterns of sediment transport and deposition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1115-1124. (in Chinese with English abstract)
- [16] LOCH R J. Settling velocity—a new approach to assessing soil and sediment properties[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31(3): 305-316.
- [17] 周一杨, 王恩姮, 陈祥伟. 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 176-179. ZHOU Yiyang, WANG Enheng, CHEN Xiangwei. Splash erosion and selective characteristics of aggregate for typical black soil under artificial rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 176-179. (in Chinese with English abstract)
- [18] WANG Y, CHEN L, FU B, et al. Check dam sediments: an important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(7): 4275-4287.
- [19] 刘琼, 罗冲, 孟祥添, 等. 典型黑土区耕作土壤质地遥感时间窗口及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 122-129. LIU Qiong, LUO Chong, MENG Xiangtian, et al. Time window and influencing factors analysis of tillage soil texture remote sensing in the typical black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 122-129. (in Chinese with English abstract)
- [20] ZOU Y, CHEN X. Granular sediment deposition and aggregation upstream of a check dam: A discrete element study[J]. *Powder Technology*, 2017, 307: 90-98.
- [21] 王云强, 张兴昌, 韩凤朋. 黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨[J]. *环境科学*, 2008, 29(4): 1020-1026. WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, HAN Fengpeng. Profile variability of soil properties in check dam on the Loess Plateau and its functions[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 1020-1026. (in Chinese with English abstract)
- [22] JUAREZ S, NUNAN N, DUDAY A C, et al. Effects of different soil structures on the decomposition of native and added organic carbon[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 58: 81-90.
- [23] DÍAZ M A, BOWN H E, FUENTES J P, et al. Soils act as sinks or sources of CH<sub>4</sub> depending on air-filled porosity in sclerophyllous ecosystems in semiarid central Chile[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130: 13-20.
- [24] MILLINGTON R J, QUIRK J P. Permeability of porous solids[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1961, 57: 1200-1207.
- [25] ABAGANDURA G O, BANSAL S, KARSTETER A, et al. Soil greenhouse gas emissions, organic carbon and crop yield following pinewood biochar and biochar–manure applications at eroded and depositional landscape positions: A field trial in South Dakota, USA[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1): 487-502.
- [26] 王震, 刘颖, 杨明义, 等. 坝地剖面泥沙有机碳分解特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2635-2643. WANG Zhen, LIU Ying, YANG Mingyi, et al. Characteristics and factors influencing organic carbon decomposition in sediment in check dams[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2635-2643.
- [27] WIAUX F, VANCLOOSTER M, VAN Oost K. Vertical partitioning and controlling factors of gradient-based soil carbon dioxide fluxes in two contrasted soil profiles along a loamy hillslope[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(15): 4637-4649.
- [28] DOU Y, YANG Y, AN S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2020, 185: 104294.
- [29] 鄂馨卉, 汪亚峰, 王林华, 等. 黄土典型坝系流域碳沉积特征及其源解析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 645-654. E Xinhui, WANG Yafeng, WANG Linhua, et al. Characteristics of the soil carbon content and its carbon sources in deposition area at a watershed with check-dam in Loess Plateau China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 645-654. (in Chinese with English abstract)
- [30] LIU H, HU Y, HAO Y, et al. Progressive freeze-thaw redistributes water, solute and CO<sub>2</sub> emissions across soil layers—The role of soil particle size[J]. *Catena*, 2022, 219: 106614.
- [31] 张瑞, 苟晓敏, 赵玉珍, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 62-65. ZHANG Rui, GOU Xiaomin, ZHAO Yuzhen, et al. Influence of soil erosion on soil water capacity in the black soil area of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [32] XIAO L, HU Y, GREENWOOD P, et al. The use of a raindrop aggregate destruction device to evaluate sediment and soil organic carbon transport[J]. *Geographica Helvetica*, 2015, 70(2): 167-174.
- [33] HU Y, KUHN N J. Aggregates reduce transport distance of soil organic carbon: Are our balances correct?[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(22): 6209-6219.
- [34] 吴思南, 符素华. 土壤团聚体对泥沙沉降速度的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(6): 78-84. WU Sinan, FU Suhua. Effects of soil aggregates on settling velocity of sediment[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(6): 78-84. (in Chinese with English abstract)
- [35] TIAN P, AN Z, ZHAO G, et al. Assessing sediment yield and sources using fingerprinting method in a representative catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 1-11.
- [36] 申震洲, 亢晨波, 张宁宁, 等. 黄土丘陵区小流域坝地沉积泥沙颗粒分布特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 1-6. SHEN Zhenzhou, KANG Chenbo, ZHANG Ningning, et al. Profile characteristics of sediment particle size at check dam in small watershed of Loess Hilly Area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [37] ZHANG X, WALLING D E, HE X, et al. Use of landslide-dammed lake deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century[J]. *Catena*, 2009, 79(3): 205-213.
- [38] RUAMPS L S, NUNAN N, POUTEAU V, et al. Regulation of soil organic C mineralisation at the pore scale[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, 86(1): 26-35.
- [39] GUENET B, LENHART K, LELOUP J, et al. The impact of long-term CO<sub>2</sub> enrichment and moisture levels on soil microbial community structure and enzyme activities[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 331-336.
- [40] 莫帅豪, 郑粉莉, 冯志珍, 等. 典型黑土区侵蚀-沉积对土

- 壤微生物数量空间分布的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 685-693.
- MO Shuaihao, ZHENG Fenli, FENG Zhizhen, et al. Effects of soil erosion and deposition on the spatial distribution of soil microbial quantity in Mollisol area of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 685-693. (in Chinese with English abstract)
- [41] XIAO H, LI Z, CHANG X, et al. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 73-81.
- [42] SMITH S V, SLEEZER R O, RENWICK W H, et al. Fates of eroded soil organic carbon: Mississippi basin case study[J]. *Ecological Applications*, 2005, 15(6): 1929-1940.
- [43] 贺瑶. 黑土长缓坡微地形对土壤颗粒空间异质性和有机碳矿化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- HE Yao. Effects of Microtopography on Spatial Heterogeneity of Soil Particles and Mineralization of Organic Carbon on Long Gentle Slope in the Black Soil Area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.(in Chinese with English abstract)
- [44] 袁心皓. 冻融作用对侵蚀黑土沉降粒级分布及碳排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- YUAN Xinhao. Influence Of Freeze-Thaw On The Distribution Of Settling And Fractionating Particle Size And Carbon Emission Of Eroded Black Soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.(in Chinese with English abstract)
- [45] ZHANG J, YANG M, ZHANG F, et al. Revealing soil erosion characteristics using deposited sediment sources in a complex small catchment in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geoderma*, 2020, 379: 114634.
- [46] 蒋凯鑫, 于坤霞, 李鹏, 等. 砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 47-53.
- XUE Kaixin, YU Kunxia, LI Peng, et al. Sediment characteristics and sources analysis of typical check dam in Pisha Sandstone Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 47-53. (in Chinese with English abstract)

## Heterogeneous settling and bedding of black soil particles and their impacts on greenhouse gas emissions

WANG Xinyao<sup>1</sup>, YUAN Xinhao<sup>1</sup>, HU Yaxian<sup>2</sup>, LI Fan<sup>1</sup>, CHEN Junying<sup>1</sup>, LI Xianwen<sup>1\*</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Particle heterogeneity is one of the key indicators to estimate the variability in the soil properties and compositions. This study aims to explore the effects of the soil particles settling and bedding on the greenhouse gas emissions from the depositional area. The layer-specific physicochemical properties were also considered during this time. Specifically, one type of Mollisol (local people named as the black soil) was sampled from a typical eroding slope in the northeastern China. Then six classes were fractionated by their respective settling velocities. Six structures were obtained to bed the differently-sized soil particles in sequence: S1 was the thinnest structure with only > 500  $\mu\text{m}$  particles L1, whereas S6 was the thickest structure with the six particle classes being layered in sequence from the coarsest particles L1 at the bottom to the finest particles L6 on top. The emissions of greenhouse gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  were finally collected from the incubated structures on a daily basebasis. The results showed that: 1) The coarse particles settled first (L1) on the bottom, whereas, the fine particles settled the last and then covered on the top (L6). The porosity gradually decreased from 23.79% of coarse layer L1 to 1.0% of fine layer L6. By contrast, the soil water content increased generally at the highest moisture content of 68.78%, as the soil particles were settled with the L5. 2) Carbon and nitrogen were rich in the L2-L4 layer, where the soil organic carbon and total nitrogen were peaked in the L2 layer (with 27.34 and 2.35 g/kg, respectively), and the maximum dissolved organic carbon and nitrogen appeared in the L3 and L4 layer (with 519.31, and 19.69 mg/kg, respectively). 3) The average greenhouse gas emission rates decreased significantly during the seven incubation days, as the sedimentary layers were thicker ( $P < 0.05$ ). Correspondingly, there was no increase in the gas flux with the thickening of the sedimentary soil layer. The layer-by-layer deposition process was separated from the coarse and fine particles, where the coarse particles were preferentially deposited as the lower layers, while the fine ones were stacked over forming upper layers. Consequently, there was a gradual decrease trend of the porosity and relative diffusion coefficient of gas from the bottom to the top. As such, it is expected to effectively inhibit the transfer of greenhouse gases via the depositional profile. Overall, the layer-by-layer settling and bedding can be used to reconstruct the deposition process in the field, and then to effectively capture the potential impacts of depositional layer structure on greenhouse gas emissions. The finding can overcome the limitations of traditional sampling, indicating the outstanding variations of small-scale layers and bedding. The settling and bedding patterns can also be characterized to quantify the greenhouse gas emissions from different depositional settings.

**Keywords:** greenhouse gas; emissions; soils; black soil particles grade; settling velocity; depositional layers; porosity