

DOI: 10.20103/j.stxb.202404190876

付玮, 陈槐, 王尹佳, 刘建亮, 白银萍, 黄鑫, 杨刚. 不同水位泥炭地铁、铝矿物复合体及有机碳形态分布特征. 生态学报, 2025, 45(5): 2200-2208.

Fu W., Chen H., Wang Y. J., Liu J. L., Bai Y. P., Huang X., Yang G. Distribution characteristics of iron and aluminum mineral complexes and organic carbon forms in peatlands with different water levels. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2200-2208.

# 不同水位泥炭地铁、铝矿物复合体及有机碳形态分布特征

付 玮<sup>1</sup>, 陈 槐<sup>3,4</sup>, 王尹佳<sup>1</sup>, 刘建亮<sup>3,4</sup>, 白银萍<sup>2</sup>, 黄 鑫<sup>1</sup>, 杨 刚<sup>1,2,\*</sup>

1 西南科技大学生命科学与工程学院, 绵阳 621000

2 陕西科技大学环境科学与工程学院, 西安 710069

3 中国科学院四川若尔盖湿地生态研究站, 红原 624400

4 中国科学院成都生物研究所山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 成都 610041

**摘要:** 铁铝矿物影响着土壤有机碳稳定性和积累。为评估不同水位泥炭地中不同形态铁铝矿物复合体对有机碳积累和稳定性的影响, 以红原县三处不同水位泥炭地(泥炭沼泽: S1 (-1.9cm)、沼泽草甸: S2 (-10cm)、高寒草甸: S3 (-19cm)) 为研究对象。采用选择性提取法测定泥炭地中晶质金属氧化物(DH)、短程有序矿物(HH)、有机金属络合物(PP)的碳和铁铝含量。结果表明, 提取剂提取的碳含量及其占有机碳的百分比在各泥炭地中均表现为 PP>DH>HH。总铁铝结合碳、PP 提取的碳含量在 S3 中最高, S1 最低, 这种显著差异主要表现在表层土中。提取的金属(Al+Fe)含量在各泥炭地中均表现为: PP>DH>HH, 且 C/M 均大于 1, 说明铁铝矿物以共沉淀和络合作用与有机碳结合形成有机金属络合物主导着泥炭地中有机碳的积累, 并且主要表现在土壤表层和亚表层, 而晶体铁铝和短程有序铁铝矿物与有机碳的相互作用积累效应较弱, 并且这种差异在 S3 的表层和亚表层土壤中更加显著。相关分析表明, S1 中有机碳的积累受晶质铁铝矿物与有机碳相互作用和有机金属络合物驱动; S2 中有机碳的积累仅受到有机金属络合物的驱动; 铁铝矿物对 S3 中有机碳的积累没有决定性作用。可见, 泥炭地不同水位对矿物与有机碳结合方式及有机碳分布有显著影响, 且有机金属络合物含量的增加在一定程度上驱动泥炭地有机碳的稳定和积累。鉴于泥炭地在全球碳循环中的关键作用, 研究结论对矿物与有机物相互作用如何响应水位变化, 预测湿地生态系统中的碳储存动态至关重要。

**关键词:** 泥炭地; 水位; 有机碳稳定性; 选择性溶解; 铁铝矿物

## Distribution characteristics of iron and aluminum mineral complexes and organic carbon forms in peatlands with different water levels

FU Wei<sup>1</sup>, CHEN Huai<sup>3,4</sup>, WANG Yinjia<sup>1</sup>, LIU Jianliang<sup>3,4</sup>, BAI Yinping<sup>2</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>, YANG Gang<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Life Sciences and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China

2 School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710069, China

3 Zoige Wetland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Hongyuan 624400, China

4 Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Chengdu Institute of Biology, Chengdu 610041, China

**Abstract:** Iron and aluminum minerals influence the stability and sequestration of soil organic carbon. To assess the effects of various forms of iron and aluminum mineral complexes on the accumulation and stability of organic carbon in peatlands across varying water levels, this study focused on three peatlands in Hongyuan County with distinct water levels: peat swamp (S1, -1.9cm), swamp meadow (S2, -10cm), and alpine meadow (S3, -19cm). The carbon and iron-aluminum

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42430715, 42077038); 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0758)

**收稿日期:** 2024-04-19; **网络出版日期:** 2025-02-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanggang903@163.com

contents within crystalline metal oxides (DH), short-range ordered minerals (HH), and organometallic complexes (PP) in the peatlands were ascertained using the selective extraction method. The results showed that the carbon contents extracted by the different extractants and their proportions relative to the total organic carbon followed the sequence PP>DH>HH in each peatland. The total carbon bound to iron-aluminum and the carbon content extracted by PP peaked in S3 and reached the minimum in S1, with this notable difference primarily evident in the topsoil. The contents of the extracted metals (Al+Fe) in each peatland were in the order of PP>DH>HH, and the C/M ratios were all greater than 1. This finding indicated that iron and aluminum minerals primarily interacted with soil organic carbon through coprecipitation and complexation, forming organometallic complexes that dominated soil organic carbon accumulation in peatlands. This effect was most pronounced in the surface and subsurface soil layers. In contrast, the interaction and accumulation effects of crystalline iron-aluminum minerals and short-range ordered iron-aluminum minerals with soil organic carbon were relatively weak. This difference was particularly evident in the surface and subsurface soils of S3, where organometallic complexes played a more significant role in soil organic carbon stabilization and accumulation. The correlation analysis revealed that the accumulation of organic carbon in S1 was influenced by the interactions among crystalline iron-aluminum minerals, organic carbon, and organometallic complexes; the accumulation in S2 was solely influenced by organometallic complexes; and iron-aluminum minerals exerted no decisive impact on the organic carbon accumulation in S3. It can be seen that different water levels in peatlands had significant impacts on the combination modes of minerals and organic carbon and the distribution of organic carbon, and the increase in the content of organometallic complexes drove the stabilization and accumulation of organic carbon in peatlands to a certain extent. Given the critical role of peatlands in the global carbon cycle, this conclusion is essential for understanding how mineral-organic interactions respond to water level fluctuations and for predicting carbon storage dynamics in wetland ecosystems.

**Key Words:** peatlands; water level; organic carbon stability; selective dissolution; iron and aluminum minerals

泥炭地作为一种特殊的湿地生态系统,约占全球陆地面积的3%,却储存了全球陆地土壤有机碳的1/3<sup>[1]</sup>。泥炭地频繁低温、淹水和缺氧条件有效抑制有机物质的分解,是重要“碳汇”,可有效缓解全球变暖<sup>[2]</sup>。由于人类活动和气候变化的影响,泥炭地土壤有机碳(SOC)遭受严重干扰,逐渐从“碳汇”转变为“碳源”<sup>[3]</sup>。因此,准确评估泥炭地SOC的稳定性和动态变化趋势,对深刻理解全球碳循环过程至关重要。SOC成分复杂,循环转化过程多样。早期的研究认为,顽固性植物残体碳是土壤的主要碳源,对有机碳的积累和稳定性起着调控作用<sup>[4-5]</sup>。然而近年来研究表明,其他机制也可能影响有机碳组分的持久性。例如进入土壤的不稳定组分的碳具有较高的碳利用效率,可有效转化为微生物生物量,与矿物表面的功能基团结合,促进其在土壤中的长期保存<sup>[6]</sup>。此外,矿物结合物还可以物理或化学方式来阻止微生物的进入,赋予SOC抵抗降解的能力<sup>[7-9]</sup>。可见,土壤矿物影响着有机碳稳定性。

铁铝氧化物是土壤有效吸附剂,对SOC稳定性具有重要意义。铁、铝矿物普遍分布于土壤中,结晶范围广,从铁、铝离子到弱结晶的水铁矿和完全结晶的针铁矿、三水铝石<sup>[10]</sup>。几乎所有的铁铝矿物均能以静电作用、配体交换、范德华力和疏水作用等吸附有机碳形成复合体来免受微生物酶的攻击,阻止有机碳矿化<sup>[9, 11]</sup>。另一方面,氧化还原波动条件下,铁铝氧化物通过溶解-再沉淀与可溶性有机碳能发生共沉淀和螯合作用,进一步促进沉淀物中有机碳的保存<sup>[12-13]</sup>。短程有序矿物的丰度通常与土壤有机碳的分解率呈负相关,并与土壤碳浓度或储量直接相关<sup>[14]</sup>。另外,低结晶度矿物和可溶性铁、铝与有机物结合形成有机金属沉淀物也被证明驱动着土壤有机碳的稳定<sup>[15]</sup>。近年来关于土壤铁、铝矿物对有机碳储存的研究吸引了越来越多的关注,然而多数研究侧重于热带氧化土、火山土等风化程度较高的区域,对于高寒泥炭地不同形态铁、铝矿物对有机碳稳定的影响研究较少。

若尔盖高原位于青藏高原东北部,介于北纬32°—34°,东经101°—103°之间,该地区气候寒冷湿润,潜育

化程度高,有机质氧化缓慢,形成了我国最大的泥炭沼泽。但目前该区域由于气候变暖、干旱少雨、水土流失和过度放牧等原因导致泥炭地退化日益严峻<sup>[16-17]</sup>,进而影响土壤矿物与有机碳的结合。因此对该区域泥炭地的研究对于理解有机碳循环和气候变化响应具有重要意义。本研究选取红原县日干乔三种不同水位泥炭地为研究对象,采用连续选择提取法对不同水位泥炭地中不同形态铁、铝矿物及其结合态有机碳组分进行定量分析,旨在研究泥炭地不同水位对不同形态铁铝矿物复合体分布的影响,探讨不同形态铁、铝矿物对土壤有机碳的贡献,为泥炭地土壤有机碳循环和气候变化响应提供科学数据和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

试验地位于四川省阿坝藏族羌族自治州红原县日干乔国家湿地公园附近(33°06'N,102°39'E),该区域属高原寒温带湿润季风气候,生长季(5—9月)短暂。年平均气温为1.5℃,昼夜温差大,年日照达2000h以上。年平均降水量为600—800mm,约占全年降雨量的85%。自1970年以来该区域由于持续的增温和降雨减少,造成泥炭地不同水位差异,导致大量泥炭湿地逐步退化甚至消失<sup>[18]</sup>。

### 1.2 样地选择及样品采集

从日干乔泥炭地中心到边缘选择了3个采样地。S1样地地表常年积水,被定义为泥炭沼泽;S2样地由于季节性和阶段性积水形成了沼泽化草甸,草丘地貌散布,被定义沼泽草甸;S3样地位于泥炭地边缘,地下水位较低,地势较高,被定为高寒草甸。3个样地土壤理化性质如表1所示,该结果来自于先前的研究<sup>[19-21]</sup>。在多样地中分别设置一个50m×50m的样方。在样方内用泥炭钻钻入得到90cm的泥炭土柱,用刀按0—30cm、30—60cm、60—90cm进行分层(重复三次)。将泥炭土带回实验室自然晾干,过10目筛,用于分析铁、铝矿物及矿物结合态有机碳。

表1 土壤基本理化性质及植被群落结构

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil and vegetation community structure

理化指标 Physical and chemical properties	S1	S2	S3
pH	5.52±0.01c	5.93±0.02a	5.67±0.03b
总碳 Total carbon/%	9.14±1.28b	26.84±0.70a	25.17±2.78a
总氮 Total nitrogen/%	0.66±0.08b	1.99±0.02a	1.75±0.19a
可溶性有机碳 Dissolved organic carbon/(mg/kg)	195.08±22.18c	348.63±22.80ab	445.04±81.30a
优势物种 Dominant species	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i> 、 三裂碱毛茛 <i>Halerpestes tricuspis</i>	乌拉草 <i>Carex meyeriana</i> 、 节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>	木里薹草 <i>Carex muliensis</i> 、 发草 <i>Deschampsia cespitosa</i> 、 薹草 <i>Scirpus triquetter</i>

同行不同小写字母表示不同水位泥炭地间差异显著( $P<0.05$ ); S1: 样地1 Site1 泥炭沼泽 Peat swamp; S2: 样地2 Site2 沼泽草甸 Swamp meadow; S3: 样地3 Site3 高寒草甸 Alpine meadow

### 1.3 样品分析测定

传统上使用DCB法提取土壤不同形态铁、铝矿物相,但使用的提取剂含有有机化合物(如草酸盐、柠檬酸盐),不适用于量化矿物溶解过程中释放的有机碳含量。采用完全无机试剂则能较好地解决这个问题,因此本研究选择Heckman等<sup>[10]</sup>改进的连续选择提取法来提取不同铁铝矿物及矿物结合态有机碳含量,其中焦磷酸钠溶液(Na-pyrophosphate, PP)能与腐殖质及其铁、铝离子发生不可逆交换,以焦磷酸钠盐的形态存在于溶液中,因此主要用于提取土壤中络合态铁铝及有机碳;盐酸羟胺溶液(hydroxylamine-HCl, HH)作为传统上提取短程有序矿物(SRO)的无机替代试剂,主要以络合作用来溶解非晶质的SRO矿物,因此其提取滤液用于测定与短程有序铁、铝矿物结合有机碳以及金属含量;连二亚硫酸钠溶液(dithionite-HCl, DH)提取的滤液用于测定与晶体态的铁、铝氧化物及其所结合的有机碳以及金属的含量。具体方法如下:分别加入40mL

0.1mol/L的 PP、HH 试剂于 1g 泥炭土中,震荡 16h 后 2000 RCF 离心 20min。上清液过 0.45 $\mu$ m 的滤膜后得到相应提取液。此外,加入 30mL 0.1mol/L 的 DH 试剂于 1g 泥炭土中,进行上述步骤后得到提取液。

C/N 分析仪 (Mulit N/C 2100, Germany) 测定滤液中的有机碳含量;电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-MS, Thermo, MA, USA) 测定其铁、铝含量。

#### 1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 进行数据处理分析;用 Origin 2021 软件进行绘图。单因素方差分析 (One-way ANOVA) 来分析同一水位不同土层和同一土层不同水位间矿物和有机碳差异,用 Duncan 检验对各指标分别在水位和土层间进行差异显著性比较 ( $P < 0.05$ )。双因素方差分析来分析水位和土层及其交互作用对不同提取剂提取的碳、金属及摩尔比分布的影响。采用 Spearman 检验法对可提取碳、金属和土壤有机碳进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水位泥炭地中铁铝矿物复合体中有机碳分布规律

由图 1 可知,铁铝矿物结合碳含量在各泥炭地中均表现为 PP>DH>HH。三种提取剂提取的总碳含量在 S3 中最高,在 S1 中最低,并且这种差异主要表现在表层土中 (图 1)。PP 提取的碳在不同泥炭地的分布与总碳一致,HH 提取的碳在 S2 样地具有最高值,DH 提取的碳则无明显变化。方差分析显示泥炭地水位对铁铝矿物复合体中的碳含量以及 PP 和 HH 提取的碳含量具有显著影响 (表 2)。这些结果表明不同水位泥炭地碳含量差异主要来源于 PP 和 HH 提取的碳。土层对有机碳含量也有显著影响,总碳和 PP 提取碳在 S1 均表现为表层<亚表层 $\approx$ 深层,而在 S2、S3 各土层间无显著差异。HH 提取的碳含量在 S1 样地各土层无显著变化,在 S2 和 S3 则随土层深度增加而显著减少。DH 提取的碳含量在各土层间均无显著差异。

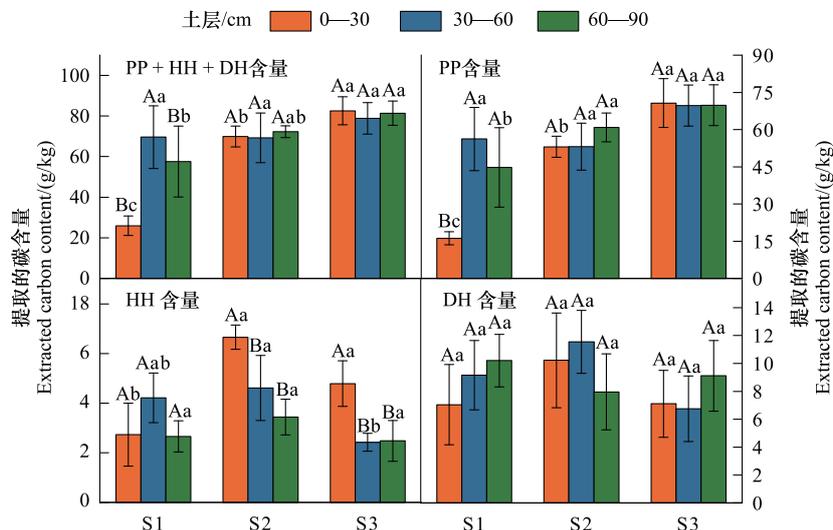


图 1 无定形 (PP)、非晶态 (HH)、结晶态 (DH) 铁铝碳在不同水位泥炭地中的分布

Fig.1 Distribution of amorphous (PP), non-crystalline (HH) and crystalline (DH) iron aluminum carbon in peatlands with different water levels

PP: 焦磷酸钠 Na-pyrophosphate; HH: 盐酸羟胺 Hydroxylamine-HCl; DH: 连二亚硫酸钠-盐酸 Dithionite-HCl; S1: 样地 1 Site1 泥炭沼泽 Peat swamp; S2: 样地 2 Site2 沼泽草甸 Swamp meadow; S3: 样地 3 Site3 高寒草甸 Alpine meadow; 不同大写字母表示同一水位不同土层显著差异, 不同小写字母表示同一土层不同水位显著差异 ( $P < 0.05$ )

由图 2 可知,泥炭地不同水位和土壤层次对 3 种提取剂提取的碳含量占有有机碳均表现为 PP>DH>HH,在 S1、S2 和 S3 中的比值为 42.66%、23.30% 和 44.25%。其中,PP 提取碳占有有机碳的百分比表现为 S3>S1>S2, HH 和 DH 提取碳占有有机碳之比则表现为 S1>S2  $\approx$  S3。就土层而言,3 种提取剂提取的碳含量占有有机碳的百

百分比在各泥炭地中均表现为深层<亚表层≈表层。在 S1、S2 和 S3 中,HH 和 DH 提取的碳含量占有机碳的百分比均表现为表层>亚表层>深层,而 PP 提取的碳占有机碳的百分比则表现为亚表层>表层>深层。

表 2 水位和土层对 3 种提取剂提取的碳含量和其占有机碳的百分比的双因素方差分析

Table 2 Two factor ANOVA of water level and soil layer on carbon content extracted by three extractants and its percentage in organic carbon

处理 Treat	提取碳含量 Extracted carbon content				提取碳占有机碳的百分比 Extracted carbon as a percentage of organic carbon			
	PP	HH	DH	PP+HH+DH	PP	HH	DH	PP+HH+DH
水位 Water level	***	*	NS	***	***	***	***	***
土层 Soil layer	*	*	NS	*	**	***	*	*
水位×土层 Water level×Soil layer	***	*	NS	***	NS	NS	*	NS

PP: 焦磷酸钠 Na-pyrophosphate; HH: 盐酸羟胺 Hydroxylamine-HCl; DH: 连二亚硫酸钠-盐酸 Dithionite-HCl; NS: 不显著 Not Significant;  $P > 0.05$ ; \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$

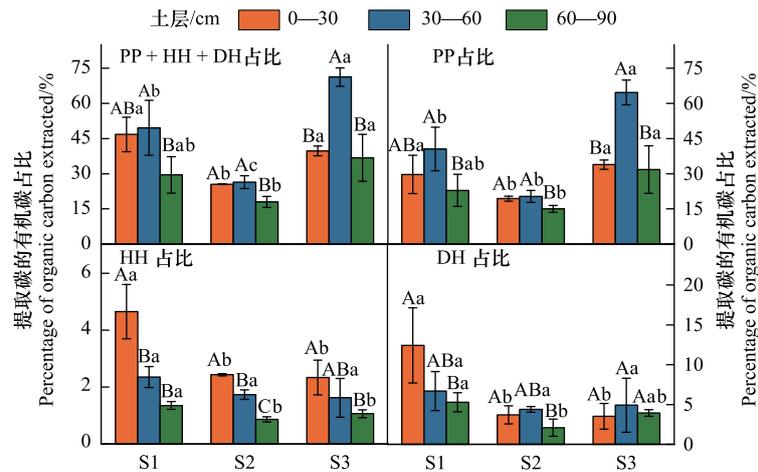


图 2 不同组分提取碳与 SOC 之比在不同水位泥炭地中的分布

Fig.2 Distribution of extracted carbon to SOC ratios of different fractions in peatlands with different water levels

## 2.2 不同有机铁、铝矿物复合体中的金属在不同水位泥炭地中的分布

由表 3 可知,3 种不同水位泥炭地的有机铁、铝矿物复合体中的金属(Fe+Al)含量分布一致,均表现为 PP>DH>HH,表明 PP 提取的铁、铝在各泥炭地中占主要地位。方差分析表明,水位对各组分有机铁、铝矿物复合体中铁、铝含量影响显著,其中 PP 提取的铁、铝含量表现为 S3>S2>S1,而 HH 和 DH 提取的铁、铝含量则相反,这些结果表明低水位泥炭地促进 PP 提取的铁、铝含量的增加。而除 PP 和 DH 提取的 Al 外,土层对各组分有机铁、铝矿物复合体中金属的含量均有显著影响。S1 中 PP 和 HH 提取的金属均表现为亚表层含量最高,而在 S2 和 S3 中则表现为表层>亚表层>深层。DH 提取的铁、铝分布则没有规律。

由表 3 可知,仅 S1 表层中 HH 的 C/M 小于 1,其余各泥炭地不同组分的 C/M 均大于 1。就不同形态矿物而言,三种泥炭地不同组分有机铁、铝矿物复合体的 C/M 均表现为 PP>DH>HH。3 种提取剂的提取结果均显示 C/M 随泥炭地水位下降呈增加趋势。此外,除 S3 中 HH 的 C/M 值外,三种提取剂的 C/M 均随土层加深而增加。

## 2.3 不同有机铁、铝矿物复合体中提取的有机碳与金属和总有机碳的相关性分析

如表 4 所示,相关分析表明 S1 中 PP 和 HH 提取的碳与其对应的金属含量呈显著正相关( $P < 0.05$ )。S2 中 HH 和 DH 提取的碳与其对应提取金属含量呈显著正相关( $P < 0.01$ )。S3 中 PP 和 HH 提取的碳与其对应金属含量呈显著正相关( $P < 0.05$ )。此外,S2 中 HH 提取的碳含量与 PP 中提取的金属含量以及 DH 提取的碳与 HH 提取的金属含量也呈显著正相关。3 种提取剂提取的碳含量与 SOC 的相关分析显示,S1 中 PP 和 DH

表 3 不同铁、铝矿物复合体在不同水位泥炭地中的分布  
Table 3 Distribution of different Fe and Al mineral complexes in peatlands with different water levels

水位 Water level	土层 Soil layer	PP			HH			DH		
		Fe/ (g/kg)	Al/ (g/kg)	C/M	Fe/ (g/kg)	Al/ (g/kg)	C/M	Fe/ (g/kg)	Al/ (g/kg)	C/M
S1	0—30cm	3.91±0.70Bb	0.77±0.23Bb	3.48±0.46Ba	2.28±1.17Ba	0.45±0.18Aa	0.77±0.24Bb	4.43±1.22Aa	1.82±0.56Aa	1.10±0.28Aa
	30—60cm	7.65±0.60Aa	2.24±0.49Aa	5.64±0.86Aa	3.08±1.14Aa	0.67±0.19Aa	1.43±0.41Aa	3.07±0.94Aa	1.41±0.24Aa	2.07±0.56Aa
	60—90cm	4.46±0.92Ba	1.82±0.47Ab	7.62±0.62Aa	1.39±0.50Ba	0.67±0.19Aa	1.40±0.19Aa	2.38±0.36Aa	1.60±0.23Aa	1.84±1.02Aa
S2	0—30cm	8.60±2.04Aa	2.04±0.15Aa	5.08±0.72Ba	3.16±0.08Aa	0.52±0.04Aa	1.81±0.18Aa	4.47±1.68Aa	1.57±0.51Aa	1.75±0.65Aa
	30—60cm	7.12±1.18Aa	2.20±0.77Aa	5.40±1.77Ba	2.71±1.33Ba	0.61±0.02Aa	1.43±0.20Aa	3.64±3.10Ba	1.64±0.53Aa	2.09±1.62Aa
	60—90cm	5.22±0.25Ba	2.38±0.15Aa	7.58±0.88Aa	1.45±0.34Ba	0.54±0.04Aa	1.72±0.12Aa	1.98±0.51Ba	1.37±0.27Aa	1.68±1.11Aa
S3	0—30cm	11.90±2.18Aa	2.76±0.17Aa	4.77±0.45Ba	2.08±0.69Aa	0.51±0.19Aa	2.02±0.31Aa	3.45±0.46Aa	1.22±0.14Aa	1.14±0.73Aa
	30—60cm	7.96±5.19Ba	2.93±0.47Aa	7.33±2.60Aa	1.17±0.22Ab	0.53±0.07Aa	1.45±0.35Ba	1.85±0.39Aa	1.15±0.12Aa	2.11±1.09Aa
	60—90cm	7.33±2.43Ba	3.07±0.51Aa	6.55±1.11Aa	1.15±0.41Aa	0.55±0.15Aa	1.44±0.10Ba	2.17±0.34Aa	1.30±0.01Aa	2.44±1.11Aa
双因素方差分析		*	***	NS	*	NS	***	NS	NS	NS
Two factors analysis of variance		*	*	***	*	NS	NS	*	NS	NS
水位×土层		NS	NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	NS

C/M: 碳和金属(Fe+Al)的摩尔比

提取的有机碳与 SOC 呈显著正相关, S2 中 PP 提取的有机碳与 SOC 呈显著正相关, 而在 S3 中 3 种提取剂提取的有机碳与 SOC 均无显著相关性。

表 4 不同水位泥炭地 PP、HH、DH 碳组分与金属 (Fe+Al) 和土壤有机碳的相关性

**Table 4 Correlation analysis of PP, HH, DH carbon components with metals (Fe+Al) and soil organic carbon with different water levels**

样地 Site	碳组分 Carbon fraction	金属组分 Metal component (Fe+Al)			总有机碳 SOC
		PP	HH	DH	
S1	PP	0.833 **	0.219	-0.418	0.749 *
	HH	0.623	0.728 *	0.100	0.234
	DH	0.325	0.306	-0.217	0.700 *
S2	PP	-0.153	-0.383	-0.033	0.817 **
	HH	0.723 *	0.855 **	0.455	-0.633
	DH	0.628	0.667 *	0.817 **	-0.395
S3	PP	0.755 *	-0.627	0.273	-0.431
	HH	0.400	0.814 **	0.655	0.183
	DH	-0.624	0.472	0.012	0.038

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机铁、铝矿物复合体中金属与有机碳的关系

相关分析显示,除 S1 中 DH、S2 中 PP 和 S3 中 DH 提取结果外,3 种提取剂提取的碳含量均和其对应提取的金属丰度呈显著正相关(表 4)。这与之前的研究结果一致<sup>[22-25]</sup>,表明铁、铝丰度直接影响土壤有机铁、铝矿物复合体中的碳含量。有研究指出 PP 试剂不仅能够溶解有机金属络合物中的铁、铝,还能促进氧化铁铝碳的分散作用<sup>[26]</sup>,因此可能导致结果的高估。本研究中 PP 提取的碳含量最高(图 1),S1 和 S3 中 PP 提取碳与金属含量呈显著相关性(表 4),说明提取物质的主要来源于有机金属络合物<sup>[10, 23, 25]</sup>。

采用提取的碳和金属 (Fe+Al) 的摩尔比 (C/M) 来评估矿物吸附有机碳的能力以及有机-矿物复合结构<sup>[22]</sup>。大量研究表明<sup>[13, 22-23]</sup>,C/M 小于 1 时,有机碳与铁铝矿物以吸附作用结合;而 C/M 大于 1 时,金属和有机物以共沉淀或络合作用紧密连接。在本研究中,除 S1 表层 HH 的 C/M 值<1 外,其余各不同组分 C/M 均>1(表 3),说明泥炭地中有机碳和金属矿物主要以共沉淀和络合作用为主,吸附作用占据极少部分。此外,各泥炭地中 C/M 值均表现为 PP>DH>HH,表明随着铁铝矿物结晶度的增加,金属与有机碳相互作用从共沉淀、络合向吸附作用转变。而以往的研究表明低结晶度的 HH 的 C/M 值大于高结晶度的 DH,具有更强吸附有机碳能力<sup>[10, 22]</sup>,与本研究结果存在差异。这可能是由于泥炭地水相中有机金属络合物的形成并长期存在使矿物的发展轨道复杂化,抑制了 SRO 矿物的形成,导致矿物与有机碳之间的结合作用相应减弱<sup>[27]</sup>。这与 HH 提取的 SRO 铁铝含量较低的结果一致。

方差分析显示 C/M 值在土层间差异显著。PP 和 DH 的 C/M 值均表现为深层>亚表层>表层,说明随土壤深度的增加,矿物与有机碳的相互作用由吸附向共沉淀、络合作用转变。这可能是由于矿物结合有机碳在表层形成后经淋溶作用进入深层,淹水缺氧条件限制微生物活性,导致深层铁铝矿物能够吸附更多的有机碳。此外,S1 表现出表层土壤 PP 提取碳含量显著低于亚表层和深层土壤,而 HH 提取碳含量在 S2 和 S3 中表现出亚表层、深层显著低于表层(图 1)。这可能是由于较低水位泥炭地植被群落结构及生物量增加<sup>[21]</sup>,有机碳大量输入<sup>[28]</sup>,与泥炭地中的晶体矿物及短程有序矿物竞争铁、铝离子,导致 S2 和 S3 泥炭地亚表层和深层的晶体矿物和短程有序矿物丰度显著低于表层土壤,而增加了有机金属络合物含量。

#### 3.2 不同水位泥炭地中有机铁、铝矿物复合体的分布特征

泥炭地中铁铝矿物结合碳均以有机金属络合物态为主,表明泥炭地独特的淹水厌氧环境导致土壤发育程度低,土壤风化较弱,导致土壤中主要存在着无定形态和游离结晶态铁铝矿物<sup>[29]</sup>。其次,泥炭地的淹水特性

可能使水相有机金属络合物的形成和长期存在对矿物的发展轨迹复杂化,抑制 SRO 矿物的形成<sup>[27]</sup>,进而降低对有机碳的吸附。此外,本研究结果显示,总铁铝结合碳含量在低水位泥炭地中显著增加,并主要受到有机金属络合物碳的调控。这是由于泥炭地较低水位导致土壤频繁处于氧化还原波动状态,增加了土壤铁铝矿物含量,但其结晶度无确定的转变趋势<sup>[30]</sup>,导致无定形铁铝矿物含量逐渐占据优势。采用不同碳组分占总有机碳的百分比来评估有机铁、铝复合体对有机碳的贡献。结果显示,3 种提取剂提取的碳含量占总有机碳的百分比表现为 S3(44.25%)>S1(42.66%)>S2(23.3%)。这远低于热带森林土壤的研究结果(约 80%)<sup>[22]</sup>,这是因为土壤中铁铝矿物复合体中的有机碳主要来自于微生物对植物残体的分解<sup>[31]</sup>,而泥炭地低温、淹水环境等限制微生物活性及其功能。另一方面,泥炭地土壤的风化作用较弱,导致泥炭地铁铝矿物含量较低,进而影响矿物与有机碳的吸附<sup>[32]</sup>。

### 3.3 泥炭地水位下降过程中有机矿物复合体对土壤有机碳的积累与稳定

相关分析表明,在 S1 中 PP 和 DH 提取的碳与 SOC 呈显著正相关,说明有机铁铝络合物和晶质铁铝矿物驱动着泥炭沼泽土壤有机碳的积累。在 S2 中仅 PP 提取的碳含量与 SOC 的碳含量呈显著正相关,说明有机金属络合物驱动着沼泽草甸土壤有机碳的积累。随着泥炭地下降,S3 中虽然有机金属络合物含量有所增加,但其碳含量与 SOC 含量之间的相关性不显著,表明水位下降过程中有机金属络合物在泥炭地 SOC 积累中的作用逐渐减弱,这与大多数研究结果一致<sup>[10, 33]</sup>。铁、铝矿物对泥炭地有机碳的积累起到促进作用,但并非决定性因素。这可能是由于水位下降使泥炭地中植被群落和生物量的增加导致大量有机碳输入<sup>[21]</sup>,但泥炭地中的铁铝矿物含量较低,无法大量形成矿物结合态有机碳,而是以不稳定的颗粒有机碳(POC)等其它形式保存在土壤中。此外,有机金属络合物在土壤中可充当粘黏剂的作用与土壤粘粒结合,促进微团聚体的形成,进而阻止微生物对有机质的分解<sup>[7-9]</sup>。

## 4 结论

本研究结果表明,不同水位泥炭地中 PP 提取的碳是其主要的有机碳组分,并且在低水位泥炭地表层土中积累尤为显著。不同形态复合体中的铁、铝含量及其提取的碳与金属的摩尔比均表现为 PP>DH>HH,且不同形态铁、铝主要以共沉淀和络合作用与有机碳相结合。泥炭沼泽中有机碳主要集中在亚表层和深层,而沼泽草甸和高寒草甸中的有机碳在各土层分布较为一致。有机金属络合物是三种泥炭地土壤有机碳积累的重要组分,而晶体铁铝和短程有序铁铝矿物与有机碳的相互作用积累效应较弱,并且这种差异在低水位的高寒草甸表层和亚表层土壤中更加显著。与山地森林土壤中有有机铁、铝矿物复合体含量相比较,PP、DH 和 HH 提取的碳占有有机碳的比例(42.66%、23.30%、44.25%)均较低。综上所述,土壤有机铁铝矿物复合体含量的增加仅在一定程度上促进泥炭地有机碳的稳定和积累,但仍有大量有机碳以其他形式储存在土壤中。

### 参考文献(References):

- [1] Cong J X, Gao C Y, Han D X, Li Y H, Wang G P. Stability of the permafrost peatlands carbon pool under climate change and wildfires during the last 150 years in the northern Great Khingan Mountains, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136476.
- [2] Chen H, Yang G, Peng C H, Zhang Y, Zhu D, Zhu Q A, Hu J, Wang M, Zhan W, Zhu E X, Bai Z Z, Li W, Wu N, Wang Y F, Gao Y H, Tian J Q, Kang X M, Zhao X Q, Wu J H. The carbon stock of alpine peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau during the Holocene and their future fate. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 151-158.
- [3] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟. 若尔盖高原退化湿地土壤有机碳储量. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 27-32.
- [4] Ekschmitt K, Liu M Q, Vetter S, Fox O, Wolters V. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability—why is dead organic matter left over in the soil? *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 167-176.
- [5] Ellerbrock R H, Kaiser M. Stability and composition of different soluble soil organic matter fractions—evidence from  $\delta^{13}C$  and FTIR signatures. *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 28-37.
- [6] He M, Fang K, Chen L Y, Feng X H, Qin S Q, Kou D, He H B, Liang C, Yang Y H. Depth-dependent drivers of soil microbial necromass carbon across Tibetan alpine grasslands. *Global Change Biology*, 2022, 28(3): 936-949.
- [7] Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, Guggenberger G, Klumpp E, Knief C, Lehndorff E, Mikutta R, Peth S, Prechtel A, Ray N, Kögel-

- Knabner I. Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(1): 104-136.
- [ 8 ] Han L F, Sun K, Jin J, Xing B S. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94: 107-121.
- [ 9 ] Mikutta R, Mikutta C, Kalbitz K, Scheel T, Kaiser K, Jahn R. Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(10): 2569-2590.
- [ 10 ] Heckman K, Lawrence C R, Harden J W. A sequential selective dissolution method to quantify storage and stability of organic carbon associated with Al and Fe hydroxide phases. *Geoderma*, 2018, 312: 24-35.
- [ 11 ] 陈小红, 段争虎. 土壤碳素固定及其稳定性对土壤生产力和气候变化的影响研究. *土壤通报*, 2007, 38(4): 765-772.
- [ 12 ] 赵彬, 姚鹏, 于志刚. 有机碳—氧化铁结合对海洋环境中沉积有机碳保存的影响. *地球科学进展*, 2016, 31(11): 1151-1158.
- [ 13 ] Lalonde K, Mucci A, Ouellet A, Gélinas Y. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron. *Nature*, 2012, 483(7388): 198-200.
- [ 14 ] Kramer M G, Chadwick O A. Controls on carbon storage and weathering in volcanic soils across a high-elevation climate gradient on Mauna Kea, Hawaii. *Ecology*, 2016, 97(9): 2384-2395.
- [ 15 ] Porras R C, Hicks Pries C E, McFarlane K J, Hanson P J, Torn M S. Association with pedogenic iron and aluminum: effects on soil organic carbon storage and stability in four temperate forest soils. *Biogeochemistry*, 2017, 133(3): 333-345.
- [ 16 ] Yang G, Chen H, Wu N, Tian J Q, Peng C H, Zhu Q A, Zhu D, He Y X, Zheng Q Y, Zhang C B. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH<sub>4</sub> emissions from the Zoige peatland in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 83-89.
- [ 17 ] 杨永兴, 王世岩. 人类活动干扰对若尔盖高原沼泽土、泥炭土资源影响的研究. *资源科学*, 2001, 23(2): 37-41.
- [ 18 ] Sun G. A study on the mineral formation law, classification and reserves of the peat in the ruoergai plateau. *Journal of Natural Resources*, 1992, 7(4): 334-346.
- [ 19 ] Zeng J, Chen H, Bai Y P, Dong F Q, Peng C H, Yan F, Cao Q, Yang Z N, Yang S Z, Yang G. Water table drawdown increases plant biodiversity and soil polyphenol in the Zoige Plateau. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107118.
- [ 20 ] Liu L F, Chen H, Jiang L, Hu J, Zhan W, He Y X, Zhu D, Zhong Q P, Yang G. Water table drawdown reshapes soil physicochemical characteristics in Zoige peatlands. *Catena*, 2018, 170: 119-128.
- [ 21 ] 曾嘉, 陈槐, 刘建亮, 杨随庄, 严飞, 曹芹, 杨刚. 青藏高原泥炭地水位下降促进土壤碳积累的影响机制. *生态学报*, 2022, 42(2): 625-634.
- [ 22 ] Coward E K, Thompson A T, Plante A F. Iron-mediated mineralogical control of organic matter accumulation in tropical soils. *Geoderma*, 2017, 306: 206-216.
- [ 23 ] Wagai R, Mayer L M, Kitayama K, Shirato Y. Association of organic matter with iron and aluminum across a range of soils determined via selective dissolution techniques coupled with dissolved nitrogen analysis. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1): 95-109.
- [ 24 ] 车明轩, 吴强, 方浩, 康成芳, 吕宸, 许蔓菁, 宫渊波. 川西高寒山地土壤有机碳与铁、铝矿物复合体分布特征. *地理学报*, 2022, 77(1): 93-105.
- [ 25 ] 李一, 林敦梅, 魏培, 邹翠, 赵洋, 沈蓉, 蔡肖凌, 王尘辰, 朱广宇, 郭劲松. 三峡库区马尾松林土壤铁、铝对有机碳的影响. *中国环境科学*, 2024, 44(1): 251-260.
- [ 26 ] Rennert T. Wet-chemical extractions to characterise pedogenic Al and Fe species—a critical review. *Soil Research*, 2019, 57(1): 1.
- [ 27 ] Lawrence C, Harden J, Maher K. Modeling the influence of organic acids on soil weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 139: 487-507.
- [ 28 ] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards—dissolved organic matter in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 29-32.
- [ 29 ] Bhattacharyya A, Schmidt M P, Stavitski E, Martínez C E. Iron speciation in peats: Chemical and spectroscopic evidence for the co-occurrence of ferric and ferrous iron in organic complexes and mineral precipitates. *Organic Geochemistry*, 2018, 115: 124-137.
- [ 30 ] Winkler P, Kaiser K, Thompson A, Kalbitz K, Fiedler S, Jahn R. Contrasting evolution of iron phase composition in soils exposed to redox fluctuations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 235: 89-102.
- [ 31 ] Wagai R, Kajiura M, Asano M. Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: organo-metallic glue hypothesis. *Soil*, 2020, 6(2): 597-627.
- [ 32 ] Slessarev E W, Chadwick O A, Sokol N W, Nuccio E E, Pett-Ridge J. Rock weathering controls the potential for soil carbon storage at a continental scale. *Biogeochemistry*, 2022, 157(1): 859.
- [ 33 ] Rasmussen C, Torn M S, Southard R J. Mineral assemblage and aggregates control carbon dynamics in a California conifer forest. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1711-1721.