

云南景洪热带森林红壤的活性铁分布特征及其影响因素

胡静远, 李海侠, 李刚强, 陈宇东

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650031)

摘要: 土壤中 Fe_0 含量及其分布与土壤的理化性质关系密切。本研究选择云南省景洪市热带森林土壤为研究对象, 测定 4 条土壤剖面的 Fe_0 含量及其理化参数, 探究森林红壤 Fe_0 的分布特征及其影响因素。结果表明: 总体上, 土壤 Fe_0 含量随深度增加而减小; SWC、SOC、TN、S、TP、Eh、Ba、CIA 与土壤 Fe_0 含量呈显著正相关 ($P < 0.01$), BD、pH 与土壤 Fe_0 含量呈显著负相关 ($P < 0.01$); 同时对 0~40 cm、40~80 cm 和 80~140 cm 的土层进行 PCA 分析, 结果显示, 0~40 cm 土壤样点的主要影响因子为 Eh、SWC、 Fe_0 、SOC、TP、S、TN, 40~80 cm、100~140 cm 的土壤样点的主要影响因子为 Ba、BD、pH、CIA。本研究为了解云南热带森林红壤 Fe_0 的分布特征及其影响因素研究提供了参考, 也为土壤生态环境保护提供了数据和理论支持。

关键词: 活性铁; 土壤理化性质; 分布特征; 红壤

中图分类号: P642.15; S15; P642.13⁺2 **文献标识码:** A

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS AND INFLUENCING FACTORS OF ACTIVE IRON IN RED SOIL OF JINGHONG TROPICAL FOREST IN YUNNAN PROVINCE

HU Jing-yuan, LI Hai-xia, LI Gang-qiang, CHEN Yu-dong

(School of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China)

Abstract: The content and distribution of Fe_0 in soil are closely related to the physical and chemical properties of soil. In this study, the tropical forest soil of Jinghong city, Yunnan province was selected as the research object, and the Fe_0 content and physicochemical parameters of 4 soil profiles were determined to explore the distribution characteristics and influencing factors of Fe_0 in forest red soil. The results showed that the Fe_0 content in soil decreased with increasing depth. SWC, SOC, TN, S, TP, Eh, Ba, CIA were significantly positively correlated with soil Fe_0 content ($P < 0.01$), BD and pH were negatively correlated with soil Fe_0 content ($P < 0.01$); At the same time, PCA analysis was performed on 0~40 cm, 40~80 cm and 80~140 cm soil layers. The results showed that the main influencing factors of 0~40 cm soil samples were Eh, SWC, Fe_0 , SOC, TP, S and TN. The main influencing factors of 40~80 cm and 100~140 cm soil samples were ba, BD, pH and CIA. This study provides a reference for understanding the distribution characteristics and influencing factors of Fe_0 in Yunnan tropical forest red soil, and also provides data and

theoretical support for soil ecological environment protection.

Key words: active iron; soil physical and chemical properties; distribution characteristics; red soil

0 引言

土壤总铁包括硅酸盐铁和游离铁,游离铁又包括结晶铁和活性铁^[1]。其中,活性铁也被称为无定形铁或者非晶质铁,指的是土壤中不能发生 X 射线衍射的氧化铁。有研究表明,土壤 pH、氧化还原电位、土壤水分、有机质、成土母质、气候、地形、植物以及人类活动对土壤中活性铁含量及其分布有显著影响^[2,3,4]。在固定地点的森林系统中,虽然气候、成土母质和地形条件基本一致,但是由于活性铁具有活性较高、比表面积较大以及对土壤环境变化敏感等特点,使得其在土壤中更容易受到各种土壤理化参数的影响^[5]。所以我们的研究重点集中在土壤理化性质对活性铁的影响上。

此外,不同类型的土壤中影响活性铁的因素各有差异,在湿地土壤中氧化还原作用有较大影响^[6],而在喀斯特石漠化地区土壤的有机质含量、含水率以及 pH 值等对活性铁也有较大的影响^[7]。水稻土在含水率较高的环境下会导致活性铁含量增加^[8]。在旱地农田中土壤有机碳含量与活性铁含量密切相关^[9]。尽管如此,针对森林土壤中活性铁含量及其影响因素的研究,特别是在垂直剖面上不同土壤深度的影响因素的研究还比较薄弱。

森林是云南地区植被的主要类型,占总面积超过 60%。大渡岗地区广泛发育的红壤是湿热气候环境下经过强烈风化作用形成的产物,氧化还原反应较为剧烈,非常适合研究该地区的土壤活性铁。本文以云南省西双版纳大渡岗乡森林红壤为研究对象,探讨大渡岗森林土壤活性铁在垂直方向上的分布特征及其与各种土壤理化参数的关系,以期为云南地区森林土壤活性铁的分布特征及其影响因素提供更为翔实的理论依据,并为相关农林生态管理提供数据支撑,也可以为制定相关环境保护政策和措施提供科学依据,有利于可持续土地利用和生物多样性的保护。

1 样品采集与测试

1.1 研究区概况

研究区位于云南省西双版纳大渡岗乡周边(100°43'E~101°12'E,22°20'N~22°30'N)。该区域

属于北亚热带气候,年平均气温 18℃,年平均降水量 1 200~1 700 mm。土壤类型是红壤,母岩为砂岩,土壤表层松软干燥,底层致密且湿润。

1.2 土壤样品采集

在云南景洪大渡岗自然发育的常绿季风阔叶林中布置有代表性的剖面 4 条(编号依次为 F1, F2, F3, F4)(图 1)。在每个采样点内将土壤表层枯落物清理,0~80 cm 土壤采集间隔为 10 cm,80~140 cm 土壤采集间隔为 20 cm。每个样点的土壤样品分成两部分,一部分土壤样品送入实验室完成活性铁含量测定;另一部分土壤样品风干后去除石块、残根等杂物,研磨过 100 目筛,测定各土壤理化参数。

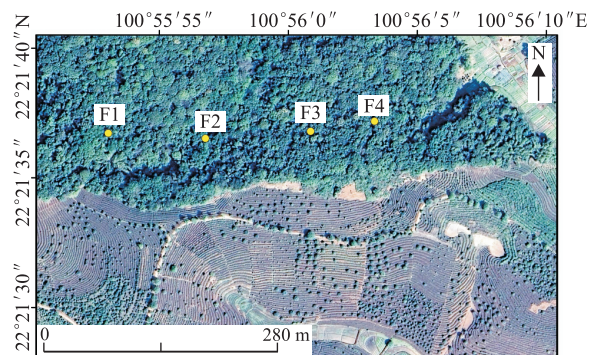


图 1 研究区剖面样点分布图

1.3 土壤样品分析及数据处理

土壤活性铁(F_{e0})采用酸性草酸铵浸提-邻菲罗啉分光光度法测定;土壤有机碳含量(SOC)采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定^[10];使用 CO_2 去离子水作为萃取剂,并通过 pH 计在土壤和蒸馏水的混合物中测量 pH(土壤与水的比例 1:2.5)^[11];土壤电导率(Eh)采用电导率仪进行测定(土水比为 1:5);土壤水分含量(SWC)是通过测量新鲜土壤样品在 105℃ 的烘箱中干燥 12 h 后的重量损失来确定的,并表示为土壤水分占干土重量的百分比^[12]。土壤容重(BD)采用环刀法测量^[13]。土壤全氮(TN)测定采用 HJ 717-2014 标准完成;通过 X 射线荧光光谱法测定了土壤全磷(TP)、硫(S)、铝(Al)、硅(Si)、钾(K)、钠(Na)、钙(Ca)、镁(Mg)的元素含量^[14]。

土壤风化淋溶系数(Ba) = $(Na_2O + K_2O + CaO + MgO) / Al_2O_3$; 化学风化系数(CIA) = $(Al_2O_3 / Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ 。

使用 Origin 2021 软件绘制土壤活性铁垂直分布盒须图、土壤活性铁含量与理化参数之间的相关性图和热点图,并进行主成分分析(PCA)。

2 测试结果分析

2.1 研究区土壤活性铁分布特征

研究区森林土壤的上层(0~40 cm)活性铁含量范围是 2.17~7.07 g/kg, 平均值为 4.31 g/kg; 中层(40~80 cm)活性铁含量范围是 1.69~4.25 g/kg, 平均值为 2.83 g/kg; 下层(80~100 cm)活性铁含量范围是 1.41~2.8 g/kg, 平均值为 2.07 g/kg。0~40 cm 土层活性铁含量最高, 40~80 cm 土层其次, 80~100 cm 土层最低(图 2), 这可能是由于表层活性铁能与有机质、TN、TP 等元素结合, 阻止了活性铁向品质铁的转换, 以及大渡岗森林气候温暖湿润, 表层土壤生物作用和植物生长较为丰富, 使得土壤中的品质铁在土壤发育的作用下转化为 Fe_0 ^[15], 所以土壤剖面活性铁含量整体上表现出上层高、中、下层低的趋势(图 2)。

2.2 研究区土壤理化特征

研究区土壤剖面基本理化参数从数值上分析, 随着深度的增加, 土壤 SOC、TN、S、TP、Ca、Si、Eh

这 7 种理化参数平均值整体上呈减小趋势, 最大平均值均出现在 0~40 cm 土层, 最小平均值出现在 40~80 cm 和 80~100 cm 土层; 土壤 SWC、Na 这 2 种理化参数平均值变化不显著, 土壤 pH、Al、K、BD、Mg 这 5 种理化参数平均值整体上呈增加的趋势, 最大平均值均出现在 80~100 cm 土层, 最小平均值出现在 0~40 cm 土层(表 1)。

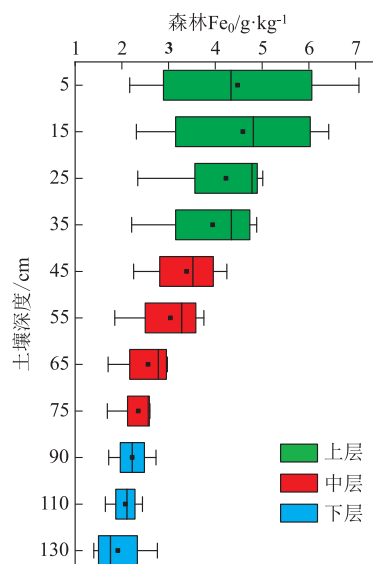


图 2 土壤 Fe_0 剖面特征图

表 1 土壤基本理化参数平均值

深度 /cm	SOC /g · kg ⁻¹	BD /g · cm ⁻³	SWC /%	pH	Eh /mv	TN /g · kg ⁻¹	TP /g · kg ⁻¹	S /%	Al /%	Si /%	K /%	Na /%	Ca /%	Mg /%
0~10	29.01	0.96	30.04	4.35	430.25	1.90	0.04	0.03	9.15	27.19	1.05	0.06	0.02	0.55
10~20	21.96	1.09	27.81	4.39	411.75	1.43	0.03	0.02	9.40	27.24	1.07	0.07	0.02	0.58
20~30	16.90	1.21	27.61	4.43	416.75	1.15	0.03	0.02	10.19	25.90	1.12	0.07	0.01	0.61
30~40	12.08	1.34	26.34	4.38	416.00	0.91	0.03	0.02	10.19	25.84	1.15	0.06	0.01	0.64
40~50	8.83	1.37	26.98	4.46	416.00	0.74	0.03	0.01	10.64	25.44	1.18	0.07	0.01	0.66
50~60	6.95	1.36	27.76	4.44	402.50	0.65	0.03	0.01	10.89	25.07	1.24	0.08	0.01	0.68
60~70	5.97	1.39	28.45	4.46	407.50	0.48	0.02	0.01	10.97	24.78	1.23	0.07	0.01	0.69
70~80	5.37	1.36	28.26	4.52	388.75	0.55	0.02	0.01	11.15	24.50	1.22	0.07	0.01	0.69
80~100	4.29	1.38	28.19	4.43	412.75	0.49	0.02	0.01	11.39	24.68	1.31	0.07	0.01	0.71
100~120	4.35	1.42	27.43	4.60	403.00	0.47	0.03	0.01	11.19	23.79	1.39	0.07	0.01	0.71
120~140	3.61	1.41	27.71	4.63	407.00	0.42	0.02	0.01	11.42	24.20	1.43	0.07	0.01	0.73

2.3 研究区土壤理化参数与活性铁的关系

根据土壤 Fe_0 含量与理化参数的相关性热点图可知, 土壤 Fe_0 含量与 SOC、SWC、Eh、TN、TP、S、Ba 呈显著正相关($P < 0.01$, 图 3), 与 BD、pH、CIA 呈显著负相关($P < 0.01$, 图 3), 与 K、Ca、Al、Mg、Sa、Si 均无显著相关性。

2.3.1 土壤剖面 Fe_0 含量与土壤 Eh 的关系

氧化还原电位与土壤 Fe_0 含量呈显著正相关(图 4f), 氧化还原电位能反映土壤的氧化还原作用, 氧化还原电位越高, 氧化能力越强, 氧化还原电位的包裹作用阻碍晶核的生长, 并抑制土壤中铁氧

位越低, 还原能力越弱^[16]。Eh 的降低会导致铁氧化物因还原作用发生溶解, 土壤 Fe_0 含量也会减少, 高 Eh 会提高 $FeOB(Fe^{2+}$ - oxidizing bacteria, 二价铁氧化菌)的活性, 从而促进活性铁的生成^[17]。所以 Eh 可能是影响土壤中 Fe_0 含量的重要因素。

2.3.2 土壤剖面 Fe_0 含量与土壤 SOC 含量的关系

土壤 Fe_0 含量与 SOC 呈显著正相关(图 4a), 这可能是由于有机质中的有机物官能团占据铁氧化物的配位键, 阻碍铁氧化物的结晶作用, 从而促进铁的活化, 增加 Fe_0 含量^[18]; 也可能是土壤 SOC 通过氧化物的老化^[19]。因此, 土壤 SOC 含量高的土壤, 其

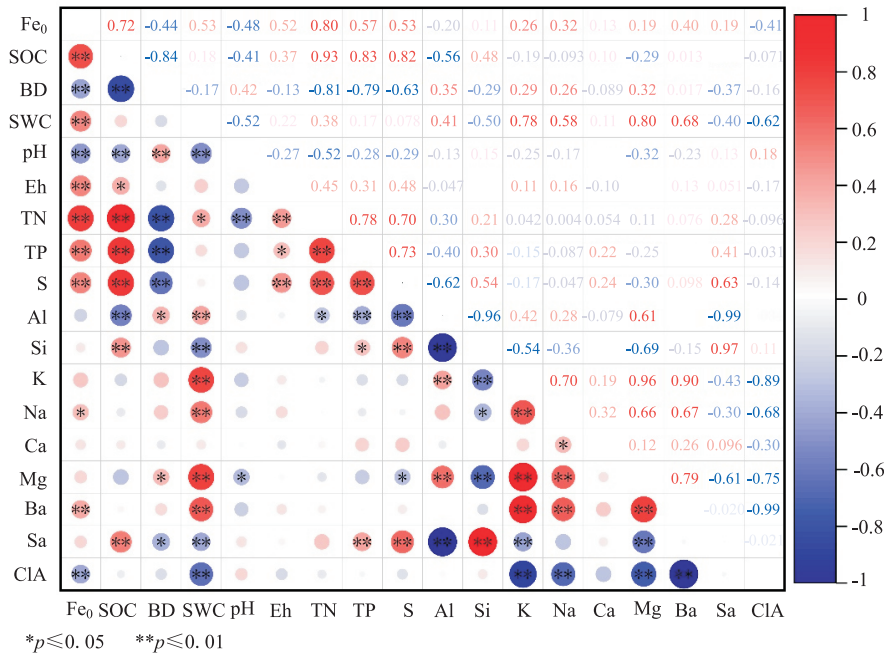


图 3 土壤 Fe₀ 与理化参数相关性热点图

铁氧化物的活化度相对较高,随着氧化铁活化度的提高,土壤 Fe₀ 含量增加^[20]。

2.3.3 土壤剖面 Fe₀ 含量与土壤 SWC 含量的关系

土壤 Fe₀ 含量与 SWC 呈显著正相关(图 4c),这可能是因为土壤若是在淹水状态,则会处于厌氧环境,铁对氧化还原环境非常敏感,因此导致土壤中的三价铁离子被还原,结晶态氧化铁向无定形氧化铁转换,无定形氧化铁增加^[21,22];也有研究表明,土壤 SWC 增加会导致土壤中 Fe_d 发生了还原溶解^[23],从而含量降低,而 Fe₀ 含量增高;同时,土壤 SWC 能通过影响土壤 SOC 的含量从而间接影响土壤 Fe₀ 的含量^[24]。因为表层土壤 SWC 容易受环境影响,所以 0~40 cm 土壤 Fe₀ 含量与 SWC 的正向影响更好(图 5)。

2.3.4 土壤剖面 Fe₀ 与土壤 TP 的关系

土壤 Fe₀ 含量与 TP 呈显著正相关(图 4e),这可能是因为 Fe₀ 含量高的土壤对磷的吸附固定作用强^[25];森林中众生物捕获和富集 TP,腐解过程中会释放自身储存的 TP 到表层土壤中;同时,腐解过程中会产生大量有机酸,有机酸释放的质子有利于增强土壤对 TP 的吸附能力^[26],因为这一过程发生在地表,所以会增加表层土壤 TP 的含量;导致 0~40 cm 土壤与 TP 的正向影响更好(图 5)。

2.3.5 土壤剖面 Fe₀ 含量与土壤 TN、S 含量的关系

土壤 Fe₀ 含量与 TN 呈显著正相关可能是因为土壤中氮铁耦合过程也会间接促进铁的活化^[27,28]

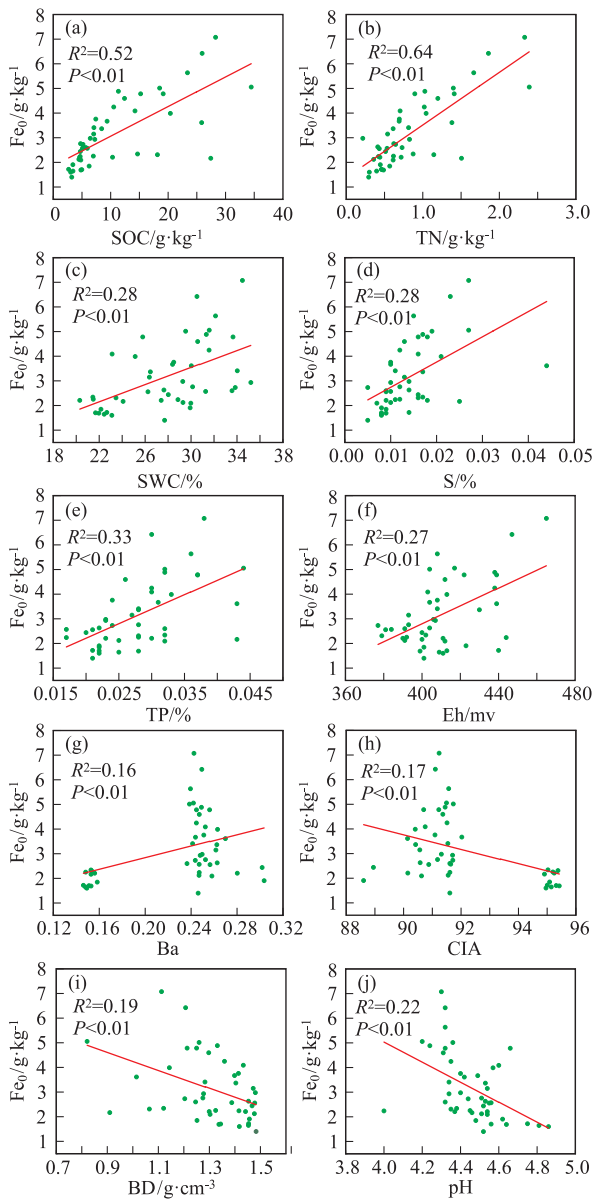
(图 4b);与 S 呈显著正相关可能是因为在土壤 Fe₀ 含量较高的情况下会增强对硫酸盐的吸收,并且抑制硫酸盐的还原^[29](图 4d)。同时,N、S 是 SOC 的组成部分,因此,土壤中的 TN、S 能通过组成 SOC 从而间接地促进 Fe₀ 的生成。

2.3.6 土壤 Fe₀ 与土壤 pH 的关系

土壤中氧化铁的存在形式与环境中的 pH 值密切相关^[30]。研究区土壤 pH 值(酸碱环境)与土壤 Fe₀ 含量呈显著负相关(图 4j),这可能是因为弱酸性环境有利于根际土壤中结晶态氧化铁向无定形态的转化^[31]。另一方面,来自全球的数据表明在酸性环境下更有利于土壤中铁和有机碳的结合^[32],而活性铁是土壤有机碳结合的主要对象^[33],有机碳的存在会促进弱晶质的活性铁形成^[34]。因此,土壤 pH 值能通过影响土壤有机碳的含量间接的影响土壤 Fe₀ 含量。

2.4 主成分分析

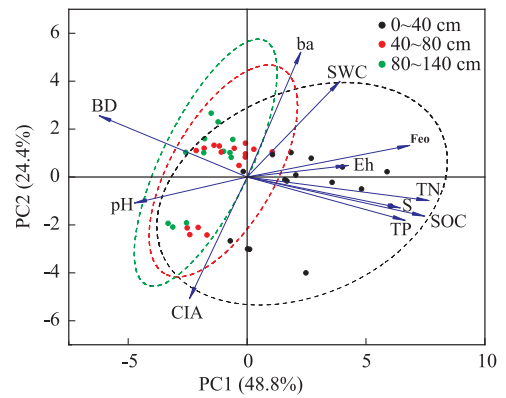
不同土壤深度的理化参数对于活性铁含量的影响分析结果如图 5 所示,PCA 分析所提取的前两个主成分(PC1 和 PC2)的方差累计贡献率为 73.2%,表明提取的前两个主成分是土壤活性铁含量分布特征的主要贡献者。主成分分析(PCA)的得分图中点之间的距离越近代表样本间的相似程度越高,而载荷图中越靠近的变量正相关性越强^[36]。我们对 10 种显著相关的理化参数及土壤 Fe₀ 进行了 PCA 分析,PCA 结果表明,研究区的 Eh、SWC、TN、TP、S、

图4 土壤理化参数与土壤 Fe_0 相关散点图

SOC 含量均对 Fe_0 含量有较好到正向影响, pH、BD 含量对土壤 Fe_0 含量有较好的负向影响。0~40 cm 土壤样点与 40~80 cm、100~140 cm 的土壤样点在 95% 的置信区间内能被显著区分开。其中, 0~40 cm 土壤样点的主要影响因子为 Eh、SWC、 Fe_0 、SOC、TP、S、TN, 40~80 cm、100~140 cm 的土壤样点的主要影响因子为 Ba、BD、pH、CIA。

3 结论与建议

对大渡岗森林土壤 Fe_0 进行调查得知, 随着土壤剖面深度增加, 土壤 Fe_0 含量呈现出不断减少的趋势, 并且与土壤 SOC、SWC、Eh、TN、TP、S、Ba、CIA、BD、pH 存在显著的相关性; 森林土壤的理化性质对活性铁的含量及分布产生了明显影响, 森林



(黑色圆形代表 0~40 cm 样品, 红色圆形代表 40~80 cm 样品, 绿色圆形代表 80~140 cm 样品, 图中的虚线椭圆代表了 95% 的置信区间)

图5 主成分分析(PCA)图

土壤 Eh、SWC、SOC、TP、S、TN 含量是影响表层 Fe_0 含量的主要因素, 而森林土壤 Ba、BD、pH、CIA 是影响深层 Fe_0 含量的主要因素。

本研究所采集的土壤样品只局限于大渡岗森林地区, 样品的代表性可能会对研究结果造成一定的影响。因此, 结果可能不足以概括云南省或更广泛地区森林土壤 Fe_0 的总体情况。同时, 本研究是在一定时间范围内完成, 无法反映土壤 Fe_0 含量随时间演变的动态过程, 长期变化趋势和周期性波动等方面尚未得到充分探究。因此, 在未来的研究中, 应当增加更多采样点, 包括不同地形、不同气候区的森林土壤, 以提高研究的普适性和准确性。同时, 建立长期的土壤 Fe_0 含量监测网络, 定期采样分析, 以便跟踪其随时间变化的动态规律, 并研究其与气候变化的关系。

参考文献

- [1] Bai J Y, Zong M M, Li S Y, et al. Nitrogen, water content, phosphorus and active iron jointly regulate soil organic carbon in tropical acid red soil forest[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(1): 251-264.
- [2] Azadi A, Baghernejad M, Gholami A, et al. Forms and distribution pattern of soil Fe (Iron) and Mn (Manganese) oxides due to long-term rice cultivation in fars Province Southern Iran[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(16): 1894-1911.
- [3] Yao Y, Wang L, Peduruhewa J H, et al. The coupling between iron and carbon and iron reducing bacteria control carbon sequestration in paddy soils[J]. *Catena*, 2023, 223(1): 42-52.
- [4] 孙丹丹. 退耕还湿土壤铁形态分布对有机碳稳定性的影响[D]. 烟台: 鲁东大学, 2023.
- [5] 刘玉晶, 陆晓辉, 罗丹, 等. 贵州喀斯特山区典型土壤氧化铁特

- 征及其与土壤类型分异关系[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 505-514.
- [6] 于秀丽. 松嫩平原莫莫格湿地土壤不同形态碳转化过程及其与土壤铁耦合关系研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [7] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 喀斯特石漠化地区土壤 Fe 组成及其发生学意义[J]. 地质通报, 2010, 29(5): 745-751.
- [8] 苏玲, 章永松, 林咸永. 干湿交替过程中水稻土铁形态和磷吸附解吸的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 410-415.
- [9] 薛亦康, 柳开楼, 邹磊, 等. 长期不同施肥水田和旱地铁氧化物对红壤团聚体有机碳固持特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(9): 1428-1438.
- [10] Qin Y, Xin Z, Wang D, et al. Soil organic carbon storage and its influencing factors in the riparian woodlands of a Chinese karst area[J]. CATENA, 2017, 153(1): 21-29.
- [11] Yang Ou, Alain N, Rousseau, et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors—A case study of the Black Soil Region of Northeastern China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 245(1): 22-31.
- [12] Zhang Y W, Shangguan Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology, 2016, 91(1): 574-581.
- [13] 覃振凯, 刘润红, 何鹏, 等. 马尾松纯林混交改造对土壤微生物残体碳和有机碳组分的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 141-152.
- [14] Zhang H, Wu P B, et al. Dynamics and driving factors of the organic carbon fractions in agricultural land reclaimed from coastal wetlands in eastern China[J]. Ecological indicators: Integrating, monitoring, assessment and management, 2018, 89(Jun): 639-647.
- [15] 姜熒熒. 中国东北典型黄土-古土壤序列铁组成特征及其环境指示意义[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [16] Yang Y, Peng Y, Ma Y, et al. Effects of aging and reduction processes on Cr toxicity to wheat root elongation in Cr(VI) spiked soils[J]. Environmental Pollution, 2022(Mar), 296(1): 118784.
- [17] Weiss J V, Emerson D, Megonigal J P. Geochemical control of microbial Fe(III) reduction potential in wetlands: comparison of the rhizosphere to non-rhizosphere soil [J]. Fems Microbiology Ecology, 2010, 48(1): 89-100.
- [18] Greathouse J A, Johnson K L, Greenwell H C. Interaction of Natural Organic Matter with Layered Minerals: Recent Developments in Computational Methods at the Nanoscale[J]. Minerals, 2014, 4(2): 519-540.
- [19] Wang M, Zhang Z, Ren J, et al. Microscopic evidence for humic acid induced changes in lead immobilization by phosphate in a counterdiffusion system. Journal of Hazardous Materials[J]. 2017, 330(May): 46-51.
- [20] 李仁友, 任杰, 曹云者, 等. 水分调控下冶金污染土壤铁氧化物相转化研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(8): 98-107.
- [21] 牛犇, 王艳玲. 不同年限稻田红壤发生层土壤磷的固持容量及其释放潜能研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1724-1736.
- [22] 田汝响, 和苗苗, 郑俊萍. 稻田土壤中铁-氮循环耦合体系研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2022, 21(1): 72-81.
- [23] 吴丽蓉, 宫丽娜, 刘俊琢, 等. 周丛生物腐解驱动水稻土溶解性有机质、铁、磷转化及耦合[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(9): 1205-1212.
- [24] 李芳柏, 李勇珠. 稻田体系中铁的生物地球化学过程及铁同位素分馏机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1251-1260.
- [25] 姜倪皓, 张世浩, 张诗函. 袁牢山紫茎泽兰入侵群落主要物种间联结及环境解释[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1370-1382.
- [26] 陈荣枢, 吕媛菲, 王珊, 等. 岩溶湿地不同土地利用类型土壤磷的吸附解吸[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 301-310.
- [27] 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 等. 硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3851-3861.
- [28] 刘彩凤, 王韦现, 马红亮. 外加氮源影响下铁铝氧化物在土壤氮素转化中的作用[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1946-1953.
- [29] Chengfang, Yang, Guining, et al. Spatial and temporal distributions of sulfur species in paddy soils affected by acid mine drainage in Dabaoshan sulfide mining area, South China [J]. Geoderma, 2016, 281(1): 21-29.
- [30] Lindsay W L, Sadiq M. Use of pe + pH to predict and interpret metal solubility relationships in soils[J]. Science of The Total Environment, 1983, 28(1-3): 169-178.
- [31] Li S, Chen S, Wang M, et al. Iron fractions responsible for the variation of Cd bioavailability in paddy soil under variable pe+pH conditions[J]. Chemosphere, 2020, 251(1): 126355.
- [32] Rasmussen C, Hec km an K, Wieder W R, et al. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content[J]. Biogeochemistry, 2018, 137(3): 297-306.
- [33] Zong M, Lin C, Li S, et al. Tillage activates iron to prevent soil organic carbon loss following forest conversion to cornfields in tropical acidic red soils[J]. Science of The Total Environment, 2020, 761(1): 143253.
- [34] Chen C T A. The influence of native soil organic matter and minerals on ferrous iron oxidation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta: Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society, 2021, 292(1): 254-270.
- [35] Jolliffe. Principal component analysis[M]. Springer, 2002.