

辽河口湿地土壤中铁和锰元素含量的分布特征

刘学^{1,2}, 杨继松^{1,2,3*}, 王志康^{1,2}, 桑变^{1,2}, 杨云斐^{1,2}, 孙丹丹^{1,2},

刘玥^{1,2}, 于君宝^{1,2}, 于洋^{1,2}, 栗云召^{1,2}, 宁凯³

(1. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 山东 烟台 264025; 2. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025;

3. 东营市农业科学研究院, 山东 东营 257091)

摘要:于2018年4月,在辽河口天然芦苇(*Phragmites australis*)盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)盐沼、滩涂和稻田中,设置采样点,采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度的土壤样品,测定土壤样品中的铁和锰元素含量,研究辽河口湿地土壤中铁和锰元素含量的分布特征。研究结果表明,辽河口天然芦苇盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼、滩涂和稻田的24个采样点0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素质量比的平均值分别为31.82 g/kg和624.5 mg/kg;油田区芦苇盐沼、天然芦苇盐沼和稻田0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素含量较大,退化芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼和滩涂0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素含量较小;辽河口湿地0~10 cm深度土壤中的铁元素含量主要受全磷含量的影响;10~20 cm深度土壤中的铁元素含量主要受总有机碳含量和电导率的影响;20~30 cm深度土壤中的铁元素含量主要受总有机碳含量、全氮含量、全磷含量和电导率的影响;30~40 cm深度土壤中的锰元素含量主要受全磷含量的影响。

关键词:土壤;铁;锰;盐沼;滩涂;稻田;辽河口

中图分类号:X14

文献标识码:A

文章编号:1672-5948(2022)03-435-08

辽河口湿地处于咸水与淡水交汇、陆地与海洋相接的地带,在维持生态平衡和保护生物多样性方面具有重要意义^[1-2]。铁元素是地壳中含量较多的金属元素,也是环境中主要的具有氧化还原活性的元素。在元素周期表中,锰元素的位置与铁元素相邻,二者具有许多相似的性质。湿地是铁和锰元素重要的“汇”。湿地土壤中铁和锰元素的迁移、转化是湿地生态系统物质循环中的关键环节^[3],土壤中的铁和锰元素含量不仅对河口湿地植被演替、生物多样性和生态系统健康都有重要影响^[4],而且对于土壤中碳、硫、磷和其它金属元素的循环具有重要作用。因此,铁和锰元素在湿地土壤中的含量、分布特征和动态都是生物地球化学研究中备受关注的问题^[5]。

湿地土壤中铁和锰元素的迁移、转化主要受土壤有机质含量、氧化还原电位和含盐量等的影

响^[6-10]。铁和锰元素是氧化还原敏感性元素,在还原条件下,铁和锰元素以溶解态的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 形式存在^[11],迁移性较强,此时,土壤有机质对其的保护可以促进铁和锰络合物的稳定性;但是,在强氧化作用下,铁和锰元素也会以 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 的高价态存在,并易形成难溶的氢氧化物而沉淀,影响其在沉积物中的迁移^[12]。铁和锰等重金属元素在土壤中富集,能通过影响土壤中微生物的活性及其对有机质的分解速度,来减小有机质的矿化速率,从而有利于有机质在土壤中的积累^[13]。土壤盐分较高时,氯离子含量对铁和锰离子的形成起主导作用,氯离子含量越大,铁和锰元素的迁移越显著^[14]。此外,人类活动通过对湿地生态系统的影响,扰动湿地生态系统的生物地球化学过程,进而影响铁和锰元素的分布和迁移^[14]。

辽宁辽河口国家级自然保护区在国际珍稀动

收稿日期:2021-07-29; 修订日期:2021-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41871087、U1806218和31800011)和黄河三角洲学者人才工程项目资助。

作者简介:刘学(1997-),山东省淄博人,硕士研究生,主要从事土壤物质循环研究。E-mail: liuxue199703@163.com

*通讯作者:杨继松,教授。E-mail: yangjisong@ldu.edu.cn

物保护和生物多样性维护方面具有重要地位^[15]。辽河口是中国重要的石油生产基地之一,伴随着人类对河流及其周边地区的开发利用,辽河口近70%的淤泥质海岸转化为港口、盐田和养殖围堤^[16]。人类活动干扰了河口区域的水文动力条件、沉积环境和生态功能,并深刻影响着湿地生态系统生物地球化学过程,带来了湿地退化和湿地功能衰退等生态问题^[17]。

本研究在辽河口湿地中的天然芦苇(*Phragmites australis*)盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)盐沼、滩涂和稻田中,设置采样点,采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度的土壤样品,测定土壤样品中的铁和锰元素含量,研究辽河口湿地土壤中铁和锰元素含量的分布特征,分析土壤中铁和锰元素含量与土壤化学指标间的关系,以为辽河口湿地的保护与生态恢复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

本研究在位于辽河下游入海口的辽河口湿地(40°40'N~41°28'N, 121°5'E~122°26'E)中的天然芦苇(*Phragmites australis*)盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)盐沼、滩涂和稻田中,分别设置了6个(采样点1至采样点6)、6个(采样点7至采样点12)、5个(采样点13至采样点17)、2个(采样点18和采样点19)、3个(采样点20至采样点22)和2个(采样点23和采样点24)采样点(图1)。

辽河口湿地的气候属温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温为8.3℃,年降水量为557~682 mm;年蒸发量为1392~1705 mm。辽河口湿地的水源补给主要为大气降水、地表径流和周期性潮汐补给,大气降水以海洋输送的水汽为主^[18]。在辽河口湿地,由海岸向陆地方向依次分布着芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼和滩涂,芦苇盐沼的面积占辽河流域面积的70%。

1.2 土壤样品采集

2018年4月,在每个采样点,首先,去除土壤表面的凋落物;然后,利用不锈钢土钻,分别采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度的土壤样品各1份,在采样现场,将土壤样品中的植物根系和凋落物挑出;最后,将所有土壤样品

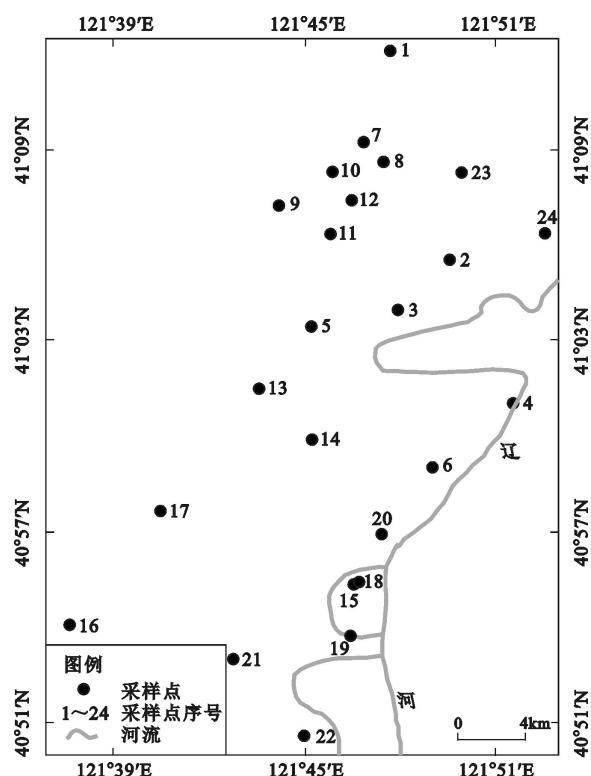


图1 辽河口湿地土壤采样点分布示意图

Fig.1 Sketch map of soil sampling sites in Liaohe River estuary wetland

运回实验室。

在实验室中,将土壤样品自然风干,研磨;将部分样品过18目筛,用于测定土壤样品的电导率;将部分样品过100目筛,用于测定铁元素、锰元素、总有机碳、全氮和全磷含量。每个采样点的土壤样品设置3个重复。

1.3 土壤样品分析测试

利用电感耦合等离子原子发射光谱仪(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES),测定土壤样品中的铁元素和锰元素含量。

参照文献[19],采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,测定土壤样品中的总有机碳含量;采用凯氏定氮法,测定土壤样品中的全氮含量;经过高氯酸-硫酸消解,利用连续流动分析仪,测定土壤样品中的全磷含量;利用电导率仪,测定土壤样品的电导率(水土比为5:1)。

1.4 数据分析与处理方法

利用SPSS 20.0软件,对实验数据进行统计分析。

采用Pearson相关分析方法,分析土壤中的铁

元素含量、锰元素含量分别与总有机碳含量、全氮含量、全磷含量、电导率之间的关系。

利用 Origin 9.1 软件和 Surfer 17 软件, 绘图。

2 结果与分析

2.1 各采样点土壤中的鉄元素和锰元素含量

由表 1 可知, 天然芦苇盐沼 6 个采样点的 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 深度土壤中的鉄元素质量比分别变化在 25.07~36.05 g/kg、30.68~42.32 g/kg、29.92~39.71 g/kg 和 27.75~40.30 g/kg 之间, 其锰元素质量比分别变化在 327.4~431.8 mg/kg、385.5~1 081.6 mg/kg、512.4~787.4 mg/kg 和 556.5~860.7 mg/kg 之间。采样点 1、采样点 2 和采样点 5 的 10~40 cm 深度土壤中的鉄和锰元素含量较大。

除了采样点 2 外, 天然芦苇盐沼的其它 5 个采样点的 0~10 cm 深度土壤中的鉄元素含量都小于 20~40 cm 深度土壤。除了采样点 1 外, 天然芦苇盐沼的其它 5 个采样点的 0~10 cm 深度土壤中的锰元素含量都明显小于 20~40 cm 深度土壤。

油田区芦苇盐沼 6 个采样点的 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 深度土壤中的鉄元素质量比分别变化在 29.83~36.06 g/kg、27.60~44.09 g/kg、34.55~41.27 g/kg 和 19.83~41.06 g/kg 之间, 其锰元素质量比分别变化在 397.3~832.4 mg/kg、346.9~856.1 mg/kg、544.7~888.1 mg/kg 和 433.2~855.0 mg/kg 之间(表 2)。采样点 8 和采样点 10 的 10~40 cm 深度土壤中的鉄元素含量较大; 采样点 8 的 10~40 cm 深度土壤和采样点 10 的 0~30 cm 深度土壤中的锰元素含量

表 1 天然芦苇盐沼不同深度土壤中的鉄元素和锰元素含量

Table 1 Contents of iron and manganese elements in the soil at different depths of natural *Phragmites australis* salt marshes

土壤深度(cm)	鉄元素质量比(g/kg)					
	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	采样点 5	采样点 6
0~10	25.72	36.05	25.07	27.10	28.15	26.70
10~20	36.98	42.29	30.68	31.62	42.32	32.61
20~30	38.34	35.88	29.92	31.30	39.71	34.82
30~40	33.73	35.59	27.75	33.16	40.30	37.22

土壤深度(cm)	锰元素质量比(mg/kg)					
	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	采样点 5	采样点 6
0~10	413.0	431.8	340.3	415.1	327.4	422.8
10~20	385.5	1 081.6	671.2	513.5	904.1	541.7
20~30	787.4	742.8	651.2	512.4	763.2	646.1
30~40	750.1	645.3	587.7	556.5	786.3	860.7

表 2 油田区芦苇盐沼不同深度土壤中的鉄元素和锰元素含量

Table 2 Contents of iron and manganese elements in the soil at different depths of *Phragmites australis* salt marshes in oilfields

土壤深度(cm)	鉄元素质量比(g/kg)					
	采样点 7	采样点 8	采样点 9	采样点 10	采样点 11	采样点 12
0~10	29.83	32.20	36.06	31.87	36.05	32.51
10~20	27.60	40.38	37.82	44.09	33.51	37.01
20~30	38.71	40.37	36.74	41.27	36.20	34.55
30~40	36.90	41.06	36.64	19.83	37.85	34.93

土壤深度(cm)	锰元素质量比(mg/kg)					
	采样点 7	采样点 8	采样点 9	采样点 10	采样点 11	采样点 12
0~10	479.5	401.9	614.8	832.4	817.1	397.3
10~20	387.9	827.3	698.7	856.1	346.9	671.7
20~30	718.5	888.1	551.2	750.1	559.5	544.7
30~40	759.2	855.0	515.3	433.2	668.4	639.4

较大。

退化芦苇盐沼5个采样点的0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度土壤中的铁元素质量比分别变化在15.22~41.38 g/kg、11.19~42.51 g/kg、21.48~39.36 g/kg和18.19~37.50 g/kg之间,其锰元素质量比分别变化在299.1~558.9 mg/kg、286.6~867.6 mg/kg、346.4~899.8 mg/kg和354.1~878.5 mg/kg之间(表3)。采样点14和采样点15的10~40 cm深度土壤中的铁和锰元素含量较大。

盐地碱蓬盐沼2个采样点的0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度土壤中的铁元素质量比分别变化在24.14~26.76 g/kg、25.34~26.09 g/kg、24.83~24.90 g/kg和21.88~25.36 g/kg之间,其锰元素质量比分别变化在508.4~552.8 mg/kg、577.4~607.9 mg/kg、486.8~557.9 mg/kg和470.8~561.8 mg/kg之间(表4)。

滩涂3个采样点的0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度土壤中的铁元素质量比分别变化在28.75~30.14 g/kg、26.13~29.37 g/kg、27.25~29.70 g/kg和29.63~31.10 g/kg之间,其锰

元素质量比分别变化在615.4~678.4 mg/kg、553.7~746.6 mg/kg、557.9~599.4 mg/kg和687.1~710.9 mg/kg之间(表5)。

稻田2个采样点的0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm和30~40 cm深度土壤中的铁元素质量比分别变化在37.03~38.59 g/kg、37.00~37.41 g/kg、37.06~43.62 g/kg和37.03~40.14 g/kg之间,其锰元素质量比分别变化在599.9~750.1 mg/kg、600.1~672.2 mg/kg、618.9~764.8 mg/kg和659.0~660.4 mg/kg之间(表6)。

辽河口天然芦苇盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼、滩涂和稻田的24个采样点0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素质量比的平均值分别为31.82 g/kg和624.5 mg/kg,与中国土壤铁元素和锰元素含量的背景值(分别为30.00 g/kg和646.0 mg/kg)接近。

2.2 各层土壤中的铁元素含量、锰元素含量与土壤化学指标之间的关系

Pearson相关分析结果表明,0~10 cm深度土壤中的铁元素含量与全磷含量显著正相关($n=24$, $r=0.878$, $p<0.05$)。10~20 cm深度土壤中的铁元

表3 退化芦苇盐沼不同深度土壤中的铁元素和锰元素含量

Table 3 Contents of iron and manganese elements in the soil at different depths of degraded *Phragmites australis* salt marshes

土壤深度(cm)	铁元素质量比(g/kg)				
	采样点13	采样点14	采样点15	采样点16	采样点17
0~10	15.22	27.30	29.19	41.38	36.46
10~20	11.19	36.88	34.99	42.51	25.46
20~30	21.48	39.36	34.40	23.98	23.61
30~40	23.34	37.50	36.90	30.76	18.19
土壤深度(cm)	锰元素质量比(mg/kg)				
	采样点13	采样点14	采样点15	采样点16	采样点17
0~10	480.3	299.1	308.9	467.2	558.9
10~20	286.6	706.1	758.8	867.6	465.2
20~30	425.3	899.8	754.0	346.4	480.5
30~40	552.2	674.1	878.5	444.4	354.1

表4 盐地碱蓬盐沼不同深度土壤中的铁元素和锰元素含量

Table 4 Contents of iron and manganese elements in the soil at different depths of *Suaeda salsa* salt marshes

土壤深度(cm)	铁元素质量比(g/kg)		锰元素质量比(mg/kg)	
	采样点18	采样点19	采样点18	采样点19
0~10	26.76	24.14	552.8	508.4
10~20	26.09	25.34	577.4	607.9
20~30	24.83	24.90	486.8	557.9
30~40	21.88	25.36	470.8	561.8

表5 滩涂不同深度土壤中的铁元素和锰元素含量
Table 5 Contents of iron and manganese elements in the soil at different depths of tidelands

土壤深度(cm)	铁元素质量比(g/kg)			锰元素质量比(mg/kg)		
	采样点 20	采样点 21	采样点 22	采样点 20	采样点 21	采样点 22
0~10	29.22	28.75	30.14	678.4	666.8	615.4
10~20	27.18	29.37	26.13	553.7	746.6	563.8
20~30	28.59	29.70	27.25	599.4	686.4	557.9
30~40	31.10	29.63	30.49	710.9	698.0	687.1

表6 稻田不同深度土壤中的铁元素和锰元素含量
Table 6 Contents of iron and manganese elements in the soil at different depths of rice fields

土壤深度(cm)	铁元素质量比(g/kg)		锰元素质量比(mg/kg)	
	采样点 23	采样点 24	采样点 23	采样点 24
0~10	37.03	38.59	750.1	599.9
10~20	37.00	37.41	672.2	600.1
20~30	43.62	37.06	764.8	618.9
30~40	37.03	40.14	659.0	660.4

素含量与总有机碳含量显著正相关($n=24, r=0.863, p<0.05$), 与电导率显著负相关($n=24, r=-0.836, p<0.05$)。20~30 cm 深度土壤中的铁元素含量与总有机碳含量显著正相关($n=24, r=0.868, p<0.05$), 与全氮含量显著正相关($n=24, r=0.878, p<0.05$), 与全磷含量显著正相关($n=24, r=0.812, p<0.05$), 与电导率显著负相关($n=24, r=-0.848, p<0.05$)。30~40 cm 深度土壤中的锰元素含量与全磷含量显著正相关($n=24, r=0.952, p<0.01$)。

3 讨 论

土壤中各种元素的含量与分布是在长期的表生地球化学演变过程中母岩中的各种元素伴随着风化和成土过程, 在溶解、沉淀、氧化、还原、淋溶、淀积等作用下, 发生重新分配和组合的综合体现^[20-23]。在本研究中, 辽河口天然芦苇盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼、滩涂和稻田的24个采样点0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素含量的平均值大于辽河平原土壤中铁元素和锰元素含量的背景值(分别为24.40 g/kg和423.8 mg/kg^[24])。辽河口湿地土壤中的铁元素和锰元素含量较大的原因主要是辽河上游的风化产物经过河流搬运在河口沉积, 进而发生氧化还原过程和生物富集作用, 而使得铁元素和锰元素在土壤中逐渐淋溶和淀积。

铁元素和锰元素的迁移、转化和富集与土壤性质密切相关。本研究发现, 天然芦苇盐沼和稻田0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素含量较大, 而退化芦苇盐沼和盐沼土壤的较小, 这与天然芦苇盐沼和稻田土壤中的有机质含量和营养元素含量较大有关。河口湿地土壤是重要碳库, 活性金属氧化物对有机碳的保护作用是土壤有机碳重要的稳定机制之一^[25-26]。作为常见的活性矿物之一, 铁(氢)氧化物在隔离、分馏和稳定有机质方面发挥着关键作用^[27]。铁(氢)氧化物的循环与有机碳的循环密切相关, 因此, 土壤有机质含量及其周转对湿地土壤中铁元素的迁移和转化具有显著影响^[28]。土壤有机质含量也是影响锰元素有效性的重要因素, 有机质对土壤中锰的形态、迁移、沉积和成矿作用都有重要影响, 有机质含量的增加能够使锰向有效态转化^[29-30]。有机质是土壤微生物最易利用的组分, 其含量的高低影响着微生物的活性, 进而影响植物和微生物对土壤中锰元素的吸收和利用^[29]。在黄河三角洲湿地和闽江河口湿地土壤中的铁元素和锰元素含量都与有机质含量显著正相关^[30-31]。

湿地土壤中磷元素的化学行为与铁元素和锰元素迁移和转化关系密切。在本研究中, 辽河口湿地10~20 cm和20~30 cm深度土壤中的铁元素含量与总有机碳含量显著正相关, 20~30 cm深度土壤中的铁元素含量与全磷含量显著正相关。

土壤中的磷多以磷酸盐的形态在铁氧化物上吸附,铁和锰氧化物对水体和土壤中磷的固定起着重要作用^[32-34],随着铁氢氧化物(Fe^{3+} 到 Fe^{2+})的还原,磷元素的流动性增加,氧化铁和二氧化锰结合产生的铁锰二元氧化物具有吸附磷酸盐的潜力^[35-36]。

通过影响土壤有机质的周转和阳离子交换能力等,土壤盐度可能影响盐沼土壤中铁元素和锰元素的含量与分布^[37-39]。在本研究中,辽河口湿地10~20 cm和20~30 cm深度土壤中的铁元素含量与电导率显著负相关,说明土壤电导率也是影响土壤中铁元素含量与分布的重要因素。由于潮汐的周期性变化,沿岸海水携带大量盐分入侵辽河口湿地^[5],经过蒸发作用,滩涂土壤的电导率显著大于其它类型湿地,滩涂土壤中的铁元素和锰元素含量相对较小;淡水芦苇沼泽和稻田土壤的电导率明显小于盐沼,其铁元素和锰元素含量较大。随着海水入侵加剧,水盐失衡导致淡水芦苇沼泽遭受盐胁迫^[18]。辽河口湿地处于咸水与淡水交汇区,海水中的盐离子浓度越高,土壤中微生物的活性越小,直接或间接地影响了土壤中铁元素和锰元素的生物有效性^[7,39-40]。

不同植物对铁元素和锰元素的吸收和富集能力存在差异,生长不同植物的湿地土壤中的铁元素和锰元素含量的迁移也存在差异^[31]。湿地中植物的根际长期淹水,根际土壤处于缺氧环境,为铁元素和锰元素提供了良好的还原场所^[41]。在本研究中,芦苇盐沼表层土壤中的铁元素和锰元素含量多小于下层土壤,这可能与芦苇对铁元素和锰元素的吸收能力有关。芦苇是辽河口湿地的优势植物,由于湿地长期淹水,在缺氧和土壤中厌氧微生物的作用下,高价态的铁和锰离子被还原为 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ,表层土壤中的铁元素和锰元素被芦苇根系运往植株的地上部分^[42]。与此同时,氧气通过芦苇植株体内的通气组织向深层土壤输送,导致深层土壤中的铁元素和锰元素被氧化,形成铁斑或铁锰环^[43],从而被固定在土壤中。稻田土壤中的铁元素和锰元素含量较大,这可能与稻田土壤处于微氧状态有关,由于铁的氧化作用,植物根部形成大量铁膜,这些铁氧化物对金属有较强的吸附作用,导致铁元素和锰元素的迁移变慢^[44]。

研究表明,受淋溶沉积作用的控制,土壤中铁元素和锰元素含量的垂向分异显著^[45-46]。表层土

壤中铁元素和锰元素的富集是铁锰氧化物和氢氧化物的还原作用引起的^[47]。在本研究中,天然芦苇盐沼和油田区芦苇盐沼土壤中的铁元素和锰元素总体上在下层土壤积聚。这主要与淡水沼泽中水文状况相对稳定、持续的淹水条件导致铁元素和锰元素向土壤下层淋溶和淀积有关。在周期性潮汐作用的影响下,盐沼土壤干湿交替频繁,导致土壤氧化还原环境转换强烈,加之潮汐的冲蚀和扰动,不利于铁元素和锰元素在土壤中有规律的积累。

辽河三角洲是中国重要的商品粮基地,稻田面积约占辽河三角洲湿地总面积的32.44%^[48]。人类活动通过扰动元素化学行为、改变土壤理化性质和氧化还原条件等,影响土壤中元素的转化和迁移的过程与速率,进而影响土壤中各种元素的含量和分布^[49-52]。在本研究中,稻田土壤中的铁元素和锰元素含量相对较大,在一定程度上说明了人类活动对铁元素和锰元素含量的影响,而且稻田土壤中的铁元素和锰元素含量在垂向上无明显差异,这可能与稻田的管理制度有关。定期排水使得稻田表层土壤处于间歇性的好氧环境,表层土壤易形成铁锰(氢)氧化物,并向下淋溶,但是由于周期性的土壤翻耕,不仅破坏了土壤的团聚体结构,而且还可能扰动了土壤的重金属空间分布特征^[8],使得稻田各层土壤中铁元素和锰元素含量相差不大。

4 结 论

辽河口天然芦苇盐沼、油田区芦苇盐沼、退化芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼、滩涂和稻田的24个采样点0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素质量比的平均值分别为31.82 g/kg和624.5 mg/kg。

油田区芦苇盐沼、天然芦苇盐沼和稻田0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素含量较大,退化芦苇盐沼、盐地碱蓬盐沼和滩涂0~40 cm深度土壤中的铁元素和锰元素含量较小。

辽河口湿地0~10 cm深度土壤中的铁元素含量主要受全磷含量的影响;10~20 cm深度土壤中的铁元素含量主要受总有机碳含量和电导率的影响;20~30 cm深度土壤中的铁元素含量主要受总有机碳含量、全氮含量、全磷含量和电导率的影响;30~40 cm深度土壤中的锰元素含量主要受全磷含量的影响。

参考文献

- [1]宋晓林, 吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J]. 湿地科学, 2009, **7**(4): 379-384.
- [2]JIANG Y X, WANG Y Z, ZHOU D M, *et al.* The impact assessment of hydro- biological connectivity changes on the estuary wetland through the ecological restoration project in the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **758**(4): 143706.
- [3]万国江, 陈振楼. 湖泊沉积物—水界面鉄-锰循环研究新进展[J]. 地质地球化学, 1996, **24**(2): 5-8.
- [4]周鑫, 张靖宜. 辽河口湿地生态环境研究综述[J]. 环境保护与循环经济, 2019, **39**(9): 50-53.
- [5]于君宝, 董洪芳, 王慧彬, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤金属元素空间分布特征[J]. 湿地科学, 2011, **9**(4): 297-304.
- [6]RICHARD R, FRANCES R P. Changes in dissolved and total Fe and Mn in a young constructed wetland: Implications for retention performance[J]. Ecological Engineering, 2001, **17**(4): 373-384.
- [7]刘学军, 廖晓勇, 张扬珠, 等. 不同稻作制对红壤性水稻土中锰剖面分布的影响[J]. 生态学报, 2002, **22**(9): 1440-1445.
- [8]KAPPLER A, BENZ M, SCHINK B, *et al.* Electron shuttling via humic acids in Microbial iron (III) reduction in a freshwater sediment[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, **47**(1): 85-92.
- [9]姜明, 吕宪国, 杨青, 等. 湿地鉄的生物地球化学循环及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, **43**(3): 493-499.
- [10]张仲胜, 吕宪国, 宋晓林. 三江平原不同土地利用方式下土壤锰含量研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3429-3434.
- [11]姜欣, 朱林, 许士国, 等. 水源水库季节性分层及悬浮物行为对鉄锰迁移的影响——以辽宁省碧流河水库为例[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 73-83.
- [12]雷万荣, 唐春梅, 江凌云. 浅谈地下水中鉄、锰质的迁移与富集规律[J]. 江西科学, 2006, **24**(1): 80-82.
- [13]章明奎, 王丽平. 重金属污染对土壤有机质积累的影响[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7): 1479-1483.
- [14]WANG Z, MAO D, LI L, *et al.* Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992-2012 in the Sanjiang Plain of China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **514C**: 119-130.
- [15]樊玉清, 王秀海, 孟庆生. 辽河口湿地芦苇群落退化过程中土壤营养元素和含盐量变化[J]. 湿地科学, 2013, **11**(1): 35-40.
- [16]王建步, 张杰, 陈景云, 等. 近30余年辽河口海岸线遥感变迁分析[J]. 海洋环境科学, 2015, **34**(1): 86-92.
- [17]崔保山, 蔡燕子, 谢焱, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, **52**(6): 738-746.
- [18]贾庆宇, 周莉, 于文颖, 等. 辽河三角洲芦苇沼泽植物冠层内外大气中水汽的稳定同位素组成[J]. 湿地科学, 2021, **19**(3): 295-303.
- [19]刘玥, 杨继松, 于洋, 等. 辽河口不同类型湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(9): 3011-3020.
- [20]范世华, 于学敏, 张桂兰, 等. 辽河平原土壤环境中若干元素的地球化学分布[J]. 应用生态学报, 1993, **4**(2): 156-160.
- [21]MURRAY G Y P, HENDERSHOT W H. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils[J]. Environmental Pollution, 2000, **107**(1): 137-144.
- [22]张秀芝, 鲍征宇, 马忠社, 等. 土壤生态系统微量元素的生物有效性研究现状[J]. 地球与环境, 2006(3): 15-22.
- [23]王昌全, 李冰, 龚斌, 等. 西昌市土壤Fe、Mn、Cu、Zn有效性评价及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2010, **41**(2): 447-451.
- [24]吴燕玉, 李彤, 谭方, 等. 辽河平原土壤背景值区域特征及分布规律[J]. 环境科学学报, 1986, **6**(4): 420-438.
- [25]XIAO D, DENG L, KIM D G, *et al.* Carbon budgets of wetland ecosystems in China[J]. Global Change Biology, 2019, **25**(6): 2061-2076.
- [26]WANG S M, JIA Y F, LIU T, *et al.* Delineating the role of calcium in the large-scale distribution of metal-bound organic carbon in soils[J]. Geophysical Research Letters, 2021, **48**(10): 1-11.
- [27]ZOU Y C, LU X G, YU X F, *et al.* Migration and retention of dissolved iron in three mesocosm wetlands[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(11): 1630-1637.
- [28]YU C X, XIE S R, SONG Z L, *et al.* Biogeochemical cycling of iron (hydr-) oxides and its impact on organic carbon turnover in coastal wetlands: A global synthesis and perspective[J]. Earth-Science Reviews, 2021, **218**: 103658.
- [29]郝瑞霞, 关广岳. 有机质在锰成矿过程中的作用[J]. 冶金地质动态, 1995(8): 14-16.
- [30]王维奇, 王纯, 曾从盛, 等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(13): 4087-4093.
- [31]孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 等. 黄河口新生湿地土壤Fe和Mn元素的空间分布特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4411-4419.
- [32]MUSTAFA S, ZAMAN M I, KHAN S. Temperature effect on the mechanism of phosphate anions sorption by β - MnO_2 [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **141**(1-3): 51-57.
- [33]LU J B, LIU H J, ZHAO X, *et al.* Phosphate removal from water using freshly formed Fe-Mn binary oxide: Adsorption behaviors and mechanisms[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, **455**(1): 11-18.
- [34]郝艳玲, 常庆露, 屈奥运. 鉄锰氧化物/硅藻土复合物的制备及其对磷的吸附性能研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2019, **38**(2): 131-136.
- [35]ZHANG G, LIU H, LIU R, *et al.* Removal of phosphate from water by a Fe-Mn binary oxide adsorbent[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, **335**(2): 168-174.
- [36]KEHLER A P, HAYGARTH P M, TAMBURINI F, *et al.* Cycling of reduced phosphorus compounds in soil and potential impacts of climate change[J]. European Journal of Soil Science, 2021, doi: 10.1111/ejss.13121.
- [37]QU W, LI J, HAN G, *et al.* Effect of salinity on the decomposition of soil organic carbon in a tidal wetland[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **19**: 609-617.
- [38]WILLIAMS T P, BUBB J M, LESTER J N. Metal accumulation

- within salt marsh environments: A review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, **28**(5): 277-290.
- [39] LAING G D, VANDECASTEELE B, GRAUWE P D, *et al.* Factors affecting metal concentrations in the upper sediment layer of intertidal reedbeds along the river Scheldt[J]. *Journal of environmental monitoring*, 2007, **9**(5): 449-455.
- [40] 刘亚男, 李取生, 杜烨峰, 等. 滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2087-2091.
- [41] 杜璟. 水生植被恢复对沉积物重金属迁移转化的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [42] 崔妍. 芦苇对湿地中重金属吸收的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2005.
- [43] 陈晨, 徐延飞, 王金爽. 浅谈土壤对芦苇生长发育的影响[J]. *现代农业*, 2010(5): 55.
- [44] 马焱. 土壤中铁氧化物对重金属的微生物吸附原理及现状分析[J]. *现代园艺*, 2020, **43**(5): 33-35.
- [45] HUANG L, LIU F, WANG M K, *et al.* Factors influencing the elemental distribution in iron-manganese cutans of three subtropical soils[J]. *Soil Science*, 2011, **176**(1): 48-56.
- [46] 杨松, 夏彪, 顾沛, 等. 黄棕壤土柱中铁锰的淋溶淀积及其对 Pb²⁺ 的吸附解吸[J]. *华中农业大学学报*, 2016, **35**(2): 35-40.
- [47] 陈绍勇. 湄洲湾沉积物有机碳、铁和锰的化学成岩过程[J]. *热带海洋*, 1992(3): 24-28.
- [48] 孔德坤. 近 30 年辽河三角洲景观格局演变及生态安全评价[D]. 延吉: 延边大学, 2015.
- [49] 刘红玉, 吕宪国, 刘振乾. 环渤海三角洲湿地资源研究[J]. *自然资源学报*, 2001, **16**(2): 101-106.
- [50] NANOS N, MARTIN R A J. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: Spatial variability in the Duero river basin (Spain) [J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**(6): 554-562.
- [51] MARTIN R J A, RAMOS-MIRAS J J, BOLUDA R, *et al.* Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain) [J]. *Geoderma*, 2013, **200-201**(5): 180-188.
- [52] LV J S, LIU Y, ZHANG Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: Spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. *Ecotoxicol Environ Safety*, 2014, **107**(1): 140-147.

Distribution Characteristics of Iron and Manganese Contents in Soils in the Liaohe River Estuary Wetland

LIU Xue^{1,2}, YANG Jisong^{1,2}, WANG Zhikang^{1,2}, SANG Luan^{1,2}, YANG Yunfei^{1,2}, SUN Dandan^{1,2},
LIU Yue^{1,2}, YU Junbao^{1,2}, YU Yang^{1,2}, LI Yunzhao^{1,2}, NING Kai³

(1. *Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Yantai 264025, Shandong, P.R.China*; 2. *School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, P.R.China*; 3. *Dongying Academy of Agricultural Sciences, Dongying 257091, Shandong, P.R.China*)

Abstract: To investigate the distribution characteristics of iron and manganese contents in Liaohe River estuary wetlands, the soil samples at depths of 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, and 30-40 cm in natural *Phragmites australis* salt marshes, *Phragmites australis* salt marshes in oilfields, degraded *Phragmites australis* salt marshes, *Suaeda salsa* salt marshes, tidelands and rice fields in April 2018 were collected, and the contents of iron and manganese elements were determined, respectively. The results showed that mean contents of iron and manganese elements in the soils at 0-40 cm depth of the Liaohe River estuary wetlands were 31.82 g/kg and 624.5 mg/kg. The contents of iron and manganese elements in the soils at 0-40 cm depth of natural *Phragmites australis* salt marshes, *Phragmites australis* salt marshes in oilfields and rice fields were larger, and these of degraded *Phragmites australis* salt marshes, *Suaeda salsa* salt marshes, tidelands were smaller. The content of iron element in the soils at 0-10 cm depth of the Liaohe River estuary wetlands was mainly affected by total phosphorus content; that at 10-20 cm depth was mainly affected by content of total organic carbon and electrical conductivity; that at 20-30 cm depth was mainly affected by contents of total organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus, and electrical conductivity. The content of manganese element in the soils at 30-40 cm depth of the Liaohe River estuary wetlands was mainly affected by total phosphorus content.

Keywords: soil; iron; manganese; salt marsh; tideland; rice field; Liaohe River estuary