

黄河三角洲石油烃污染下芦苇营养器官中 5种重金属的富集和迁移

邹艳梅^{1,2}, 李沅蔚^{1,2}, 孙志高³, 王传远¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要:为了研究黄河三角洲胜利油田的油气开采对当地芦苇(*Phragmites australis*)营养器官中重金属富集和迁移的影响,于2018年7月22~28日,采集新、老油田区和非油田区内芦苇根、茎、叶样品和表层(0~10 cm深度)土壤样品,测定芦苇各营养器官中的5种重金属(Pb、Mn、Co、Ni和Zn)含量以及表层土壤样品中的5种重金属含量和总石油烃含量,分析土壤中的总石油烃对芦苇营养器官内重金属富集和迁移的影响。研究表明,在新、老油田区,表层土壤中的石油烃主要对芦苇根部富集Pb、Mn、Co和Ni的能力产生影响;在新油田区,当表层土壤中总石油烃质量比为214 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇根中的Co、Mn和Pb质量比最大,分别为3.14 mg/kg、206.59 mg/kg和9.10 mg/kg,当表层土壤中总石油烃质量比为283 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇根中的Ni质量比最大,为27.16 mg/kg;在老油田区,当表层土壤中总石油烃质量比为262 $\mu\text{g/g}$ 时,重金属Co、Mn、Ni和Pb含量都达到最大值,分别为3.28 mg/kg、166.74 mg/kg、18.60 mg/kg和4.27 mg/kg;在新油田区,当表层土壤中总石油烃质量比为283~385 $\mu\text{g/g}$ 时,石油烃促进了芦苇营养器官中的Pb、Co和Mn向上迁移,当表层土壤中总石油烃质量比小于283 $\mu\text{g/g}$ 时,石油烃的影响可以忽略不计;当新、老油田区表层土壤中总石油烃含量相近时,新油田区芦苇对土壤中重金属的去除效果优于老油田区。

关键词:重金属;石油烃;芦苇;富集;迁移;黄河三角洲

中图分类号: X173; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2019)04-485-08

黄河三角洲受海陆的交互作用影响较大,生态环境敏感脆弱且复杂多变^[1-2]。同时,黄河三角洲分布着以胜利油田为主的众多油田,并蕴含着大量的油气资源,是中国重要的油气开采区。但是,油井钻探、开采、运输和加工过程会对周围环境造成污染。近几十年来,大规模的石油开发、农业围垦等人类活动,使黄河三角洲湿地出现一定程度的退化^[3]。研究表明,土壤石油污染往往可能会伴生土壤重金属污染^[4]。重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆转性的特点,不能被生物降解,且能通过食物链在生物体内不断富集^[5]。因此,石油烃—重金属复合污染已经成为黄河三角洲湿地生态系统保护、修复和管理过程中需要注意的问题。

去除土壤中的重金属有很多方法,其中通过种植植物去除土壤中重金属的方法具有高效、经济、无污染等特点^[6-7]。芦苇(*Phragmites australis*)是黄河三角洲滨海湿地优势植物,同时也是构建人工湿地的常用植物^[8],并且芦苇对重金属具有良好的耐受性和富集能力^[9-13],被较多地应用于去除湿地中的重金属。芦苇不仅对单一的重金属有较好的富集能力,而且对多种重金属混合污染也表现出良好的抗性和富集效果^[14]。

目前,对石油烃—重金属复合污染情况下重金属在芦苇器官内的富集和迁移的研究较少。本研究主要分析了黄河三角洲非油田区和新、老油田区芦苇营养器官(根、茎、叶)中重金属含量的分布规律,揭示了石油烃对芦苇吸收土壤中重金属

收稿日期:2019-01-15; 修订日期:2019-06-11

基金项目:烟台市科技发展计划项目(2018ZHGY079)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-127)资助。

作者简介:邹艳梅(1994-),女,山东省烟台人,硕士研究生,主要从事溢油污染和重金属污染研究。E-mail: zouyanmei17@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者:王传远,副研究员。E-mail: cywang@yic.ac.cn

能力及其迁移规律的影响, 以期为选择修复黄河三角洲石油烃—重金属复合污染土壤的植物提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区

黄河三角洲(36°35'N~38°12'N, 118°7'E~119°18'E)位于山东省东北部。该区气候属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温为11.7~12.6℃, 年降水量为530~630 mm。该区优势植物主要有芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和怪柳(*Tamarix chinensis*)等。黄河三角洲湿地类型多样。该区水源充足、植物丰富, 具有咸水、淡水交汇的独特的水文条件, 是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙重要的越冬地和繁殖地。

1.2 采样点设置和样品采集

于2018年7月22~28日, 在黄河三角洲油井区和非油井区(图1), 采集芦苇和土壤样品。共选取5个油井, 其中2个位于老油井区(37°46'N~37°48'N, 118°41'E~119°44'E), 3个位于新油井区(37°31'N~37°32'N, 118°57'E~119°58'E)。以油井为圆心, 以5 m为半径, 在油井周围设置采样点。其中, 在新油井区的每个油井周围设置3个采样点, 共设置9个采样点(采样点X1~采样点X9); 在老油井区的每个油井周围设置4个采样点, 共设置8个采样点(采样点L1~采样点L8)。山东黄河三角洲国家级自然保护区内无油井分布, 受溢油污染影响较小, 在保护区内随机设置3个采样点(采样点F1~采样点F3), 作为非油井区采样点。

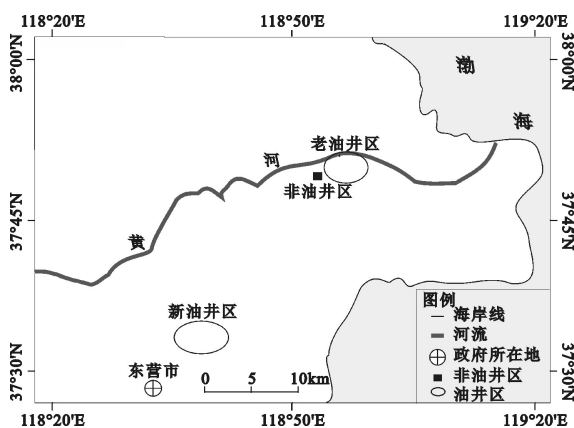


图1 采样区位置示意图

Fig.1 Location of sampling areas

在每个采样点, 利用T型土壤取样器, 采集表层(0~10 cm深度)土壤样品, 重复采样3次, 共得到60份土壤样品。同时, 在每个采样点设置1 m×1 m的样方, 在每个样方内采集7株或8株完整的芦苇样品。

1.3 样品处理与测定

1.3.1 重金属含量的测定

将土壤样品风干后, 研磨, 过100目筛; 称取约0.1 g土样, 在聚四氟乙烯消解罐中, 加入5 mL氢氟酸、2 mL硝酸和1 mL高氯酸, 放入高压罐中, 置于180℃的密闭环境中, 高温消解12 h; 将消解罐于140~150℃电热板上赶酸; 加入4 mL的1:1的硝酸+水溶液, 定容至50 mL, 待测。

将采集的芦苇样品用自来水冲洗干净, 然后用去离子水冲洗3遍; 用不锈钢剪刀, 将芦苇样品分割为根、茎和叶; 将分割后的芦苇样品放入75℃的烘箱中, 烘干48 h, 取出冷却, 将样品用粉碎机粉碎; 取0.3~0.5 g粉碎的样品, 放入聚四氟乙烯消解罐中, 加入5 mL硝酸, 在电热板120℃预消解2 h, 加入5 mL硝酸、1.5 mL高氯酸和0.5 mL氢氟酸, 放入高压罐置于180℃的密闭环境中, 高温消解4 h; 将消解罐置于140~150℃电热板上赶酸, 待样品剩余2 mL时, 加入2 mL的1:1的硝酸+水溶液, 定容至50 mL, 待测。

利用ELAN DRC II型电感耦合等离子体质谱仪(Perkin Elmer, Hong Kong), 测定芦苇和土壤样品中的5种重金属(Pb、Mn、Co、Ni和Zn)的含量。

1.3.2 总石油烃含量的测定

采用重量法, 测定土壤中总石油烃的含量。将土壤样品冷冻干燥后, 研磨过100目筛, 取10 g土壤样品, 加入20 mL的1:1的正己烷+二氯甲烷溶液, 超声提取20 min, 将上清液取出。重复上述步骤, 将两次上清液合并。根据石油天然气行业标准(SY/T5119—2008)^[15], 采用层析技术, 将其中的烷烃、芳香烃和极性物质分离。用恒质量为 m_0 的称量瓶, 收集烃类组分, 并在40℃条件下, 挥干溶剂至恒质量为 m_1 , 两个质量之差即为总石油烃含量。

1.4 数据处理

利用Excel 2016软件和OriginPro 8.0软件, 对所有数据进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 表层土壤中总石油烃和5种重金属含量

新油井区各采样点表层土壤中Pb、Mn、Co、Ni和Zn质量比分别为10.88~18.93 mg/kg、307.29~373.57 mg/kg、5.90~7.43 mg/kg、14.16~16.80 mg/kg和36.26~45.42 mg/kg(表1)。老油井区各采样点表层土壤中Pb、Mn、Co、Ni和Zn质量比分别为10.28~14.91 mg/kg、282.23~425.46 mg/kg、5.25~9.03 mg/kg、12.18~21.36 mg/kg和30.91~48.08 mg/kg。非油井区表层土壤中Pb、Mn、Co、Ni和Zn质量比分别为10.17~12.25 mg/kg、341.23~379.10 mg/kg、6.67~8.81 mg/kg、15.46~20.92 mg/kg和38.31~46.12 mg/kg。各采样点表层土壤中重金属含量差异不显著($n=20, p>0.05$),这表明研究区表层土壤中5种重金属含量分布比较均匀。

2.2 石油烃污染下芦苇各营养器官中5种重金属含量

在新、老油井区,芦苇茎、叶中Pb、Mn、Co和Ni的含量较小,并且随着表层土壤中总石油烃含量增大,其小幅度波动变化(图2);芦苇根中Pb、Mn、Co和Ni的含量远大于茎、叶。

在新油井区,当表层土壤中总石油烃质量比

为214 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇根中的Co、Mn和Pb质量比最大,分别为3.14 mg/kg、206.59 mg/kg和9.10 mg/kg;当表层土壤中总石油烃质量比为283 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇根中的Ni质量比最大,为27.16 mg/kg;在老油井区,当表层土壤中总石油烃质量比为262 $\mu\text{g/g}$ 时,重金属Co、Mn、Ni和Pb质量比都达到最大值,分别为3.28 mg/kg、166.74 mg/kg、18.60 mg/kg和4.27 mg/kg。石油烃对植物的生长具有两方面的影响,一方面总石油烃会对植物根部的呼吸作用和迁移作用产生影响,当其含量过大时,会产生毒害作用;另一方面总石油烃中的轻组分烃类可以为植物生长提供一定的碳源,在一定程度上促进植物生长^[16-17]。因此,表层土壤中总石油烃含量不同会对芦苇产生不同的影响。

在新油井区,当表层土壤中总石油烃质量比小于200 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇营养器官中5种重金属含量变化很小,表明此含量的总石油烃对芦苇生长的影响较小;当表层土壤中总石油烃质量比为214~283 $\mu\text{g/g}$ 时,随着总石油烃含量增大,芦苇根中的Pb和Co含量都减小,但茎和叶中的含量略有升高,此时总石油烃可能作为碳源,对植物的生长起促进作用,使芦苇呼吸作用提高,蒸腾作用增强,蒸腾作用可以带动重金属随水分迁移至根际表

表1 油井区、非油井区表层土壤中总石油烃和5种重金属含量

Table 1 Contents of petroleum hydrocarbons and 5 kinds of heavy metals in the surface soil of area of oil wells and non-oil wells

采样区	采样点	重金属质量比(mg/kg)					总石油烃质量比($\mu\text{g/g}$)
		Pb	Mn	Co	Ni	Zn	
新油井区	X1	16.13	337.51	6.42	16.12	43.17	214
	X2	11.34	342.51	6.04	14.45	40.09	151
	X3	12.13	314.60	6.37	14.45	37.58	193
	X4	14.06	322.77	6.24	14.16	36.62	213
	X5	12.44	349.16	7.13	16.40	37.30	317
	X6	10.88	341.52	5.90	16.27	30.28	283
	X7	18.93	369.32	6.63	15.42	43.72	385
	X8	14.76	307.29	6.25	14.35	36.26	558
	X9	17.76	373.57	7.43	16.80	45.42	326
老油井区	L1	13.60	383.66	7.92	18.61	40.86	284
	L2	13.30	386.00	7.89	18.99	41.09	199
	L3	12.84	366.09	7.26	16.71	38.57	235
	L4	11.97	415.43	8.18	18.96	42.53	286
	L5	14.91	425.46	9.03	21.36	48.08	5 154
	L6	11.74	364.13	7.58	16.77	39.74	262
	L7	10.28	320.38	6.48	15.09	34.09	268
	L8	10.33	282.23	5.25	12.18	30.91	410
非油井区	F1	11.40	345.17	6.67	15.46	38.31	123
	F2	12.25	379.10	8.81	20.92	46.12	143
	F3	10.17	341.23	7.56	16.34	38.31	126

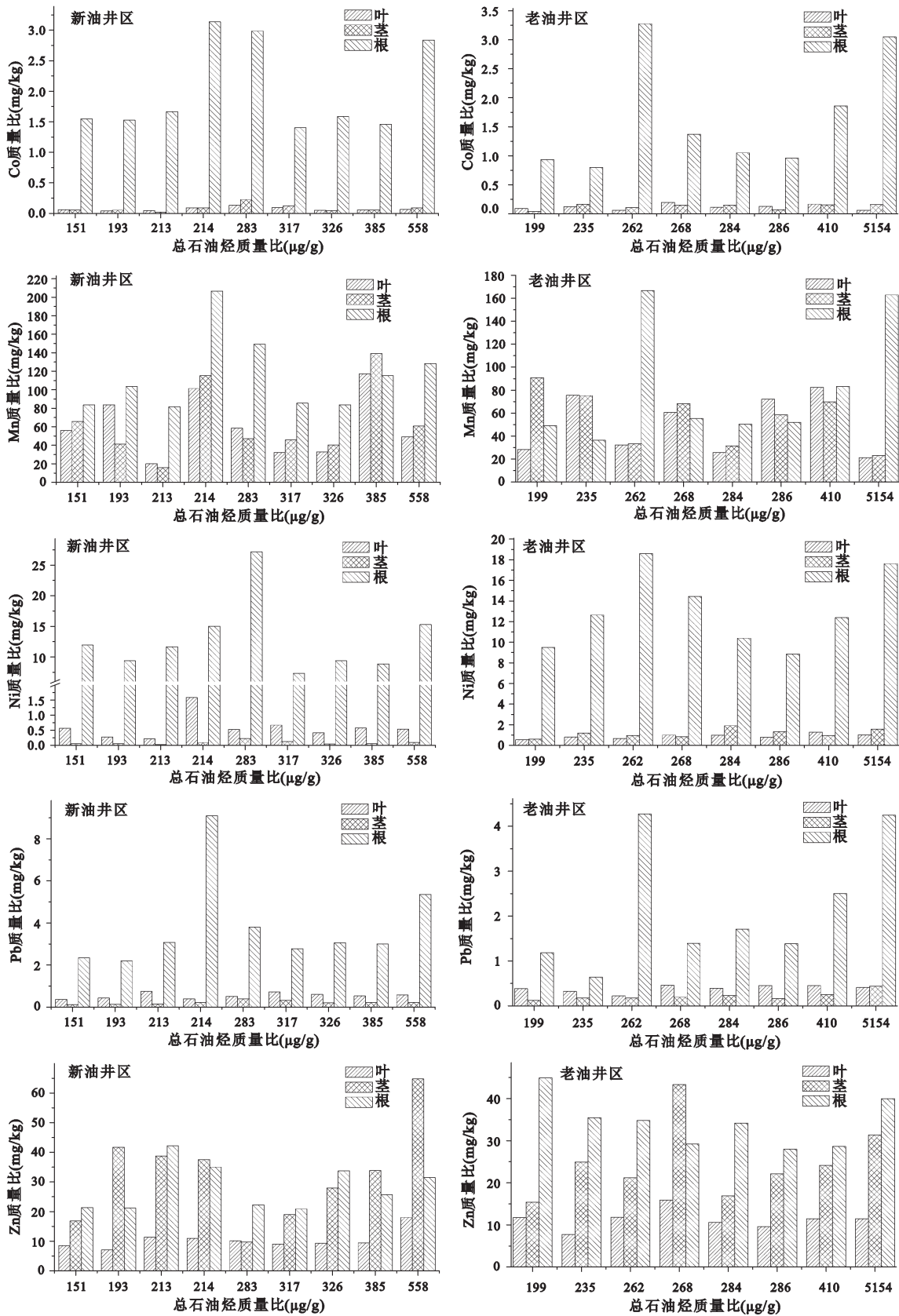


图2 不同总石油烃含量下芦苇各营养器官中5种重金属含量

Fig.2 Contents of 5 kinds of heavy metals in vegetative organs of *Phragmites australis* under different total petroleum hydrocarbons concentrations

面,被根部吸收,从而促进向地上部分迁移^[18];当表层土壤中总石油烃质量比为317~558 $\mu\text{g/g}$ 时,随着总石油烃含量增大,芦苇根中的Mn、Co和Ni含量也增大(见图2)。

在老油井区,当表层土壤中总石油烃质量比为286~410 $\mu\text{g/g}$ 时,随着总石油烃含量增大,芦苇根中的Pb、Mn、Co和Ni含量增大。一方面由于石油本身含有一定量的重金属,石油烃在根际微生物的作用下,部分轻量组分降解,释放出重金属,造成根中的重金属含量快速增大^[19];另一方面当总石油烃含量高时,石油中存在的大分子黏度较大,会吸附在根系表面,对芦苇正常呼吸作用和蒸腾作用产生影响,一些脂溶性的污染物可以通过与微生物细胞膜中的脂溶性成分进行作用,从而改变细胞膜的通透性^[20]。因此,当土壤中总石油烃含量过高时,其中的有机成分可能会破坏芦苇细胞膜,改变细胞膜的通透性,使重金属可以更容易地通过细胞膜进入植物体内,对植物体造成更大的危害。

Zn是植物生长必需的元素,其并不是主要累积在根部,而是一部分迁移到茎和叶,正常情况下植物对Zn的吸收是受代谢过程影响的主动吸收过程^[21]。在新油井区,当表层土壤中总石油烃质量比为283~558 $\mu\text{g/g}$ 时,随着总石油烃含量增大,芦苇根中的Zn含量波动变化,芦苇茎中的Zn含量增大(见图2),这表明在这一含量范围内,总石油烃对主要对芦苇茎中富集的Zn产生影响。当表层土壤中总石油烃质量比为213~283 $\mu\text{g/g}$ 时,随着总石油烃含量增大,芦苇根、茎和叶中Zn的含量都减小,此时石油烃作为碳源供给植物生长。

2.3 油井区芦苇营养器官中的5种重金属含量百分比

由表2可以看出,在新、老油井区,芦苇根中的Pb、Mn、Co和Ni含量占营养器官中各重金属总含

量的百分比都明显高于茎、叶,而根中的Zn含量百分比与其在茎、叶中的含量差距较小。研究表明,芦苇根中的Pb和Ni含量较大^[22],而Zn是植物生长必需的元素,其在茎和叶中的蓄积量较大,有利于芦苇的生长发育。

2.4 石油烃污染下芦苇对5种重金属的富集系数

2.4.1 芦苇营养器官对5种重金属的富集系数

在油井区和非油井区,芦苇根对Pb、Mn、Co和Ni的富集系数远大于茎、叶对其的富集系数(表3)。芦苇根和茎对Zn的富集系数相差较小,但大于叶对其的富集系数。

2.4.2 不同采样区芦苇营养器官对重金属的平均富集系数

新油井区芦苇营养器官对Mn和Co的平均富集系数分别为0.364~1.254和0.226~0.517,大于非油井区(表4),这表明本研究中表层土壤中的总石油烃可以促进芦苇营养器官对这两种重金属的富集。在新油井区,当表层土壤中总石油烃含量较大时,抑制了芦苇营养器官对Pb和Ni的富集,当其含量较低时,促进了富集作用。在老油井区,表层土壤中的总石油烃抑制了芦苇营养器官对Pb、Ni、Mn和Co的富集,这可能是由于经年累积和风化,老油井区土壤中沥青质含量高,其粘附在芦苇根部,可能阻碍芦苇根部富集重金属。不论在新油井区还是老油井区,芦苇营养器官对Zn的平均富集系数都与非油井区相近,说明大部分情况下芦苇营养器官对Zn的富集不受总石油烃影响。

新油井区芦苇营养器官对重金属富集系数大于老油井区,这可能是新、老油井区表层土壤中石油烃的组分不同导致的,老油井区表层土壤中难降解的烃类化合物组分百分含量高,而易降解的轻组分含量少,导致其不易被植物吸收利用,芦苇营养器官富集的重金属含量少。因此,可以推测

表2 芦苇各营养器官中5种重金属含量百分比

Table 2 Percentages of heavy metals contents in vegetative organs of *Phragmites australis*

采样区	芦苇器官	Pb含量百分比(%)	Mn含量百分比(%)	Co含量百分比(%)	Ni含量百分比(%)	Zn含量百分比(%)
新油井区	根	82.16	46.27	91.41	89.15	43.22
	茎	5.77	27.34	4.72	6.45	41.28
	叶	12.07	26.39	3.87	4.40	15.50
老油井区	根	78.10	45.09	87.26	86.28	46.55
	茎	7.93	27.55	6.58	7.88	38.17
	叶	13.97	27.36	6.16	5.84	15.28

表3 油井区、非油井区芦苇营养器官对5种重金属的富集系数

Table 3 Enrichment coefficients of 5 kinds of heavy metals in vegetative organs of *Phragmites australis* in areas of oil wells and non-oil wells

采样区	芦苇器官	Pb 富集系数	Mn 富集系数	Co 富集系数	Ni 富集系数	Zn 富集系数
新油井区	根	0.265	0.338	0.307	0.805	0.813
	茎	0.019	0.198	0.016	0.056	0.771
	叶	0.040	0.191	0.013	0.039	0.295
老油井区	根	0.188	0.224	0.227	0.774	0.875
	茎	0.019	0.143	0.018	0.069	0.729
	叶	0.034	0.142	0.017	0.054	0.293
非油井区	根	0.230	0.251	0.207	0.518	0.825
	茎	0.012	0.065	0.007	0.043	0.526
	叶	0.033	0.068	0.006	0.052	0.234

表4 新、老油井区和非油井区芦苇营养器官对重金属的平均富集系数

Table 4 Mean heavy metal enrichment coefficients of vegetative organs of *Phragmites australis* in the areas of new and old oil wells and non-oil wells

重金属	芦苇营养器官对重金属的富集系数		非油井区芦苇营养器官对重金属的富集系数平均值
	新油井区	老油井区	
	Pb	0.198~0.602	
Mn	0.364~1.254	0.280~0.834	0.384
Co	0.226~0.517	0.136~0.455	0.220
Ni	0.537~1.809	0.571~1.206	0.613
Zn	1.162~3.152	1.404~2.596	1.585

促进芦苇营养器官富集重金属的应该是轻组分的石油烃,种植芦苇对开采时间较长的老油井区表层土壤中的重金属的去除效果不如新油井区。

2.5 石油烃污染下表层土壤中5种重金属的迁移

重金属在植物体内的迁移影响着植物对重金属的吸收和耐受性^[23-24]。转运系数是某种金属元素在植株地上部分含量与地下部分含量的比值,通常用来评价植物对某种重金属的转运能力^[25]。转运系数越大,表明该种重金属向地上部分的运输能力越强。

在非油井区,芦苇营养器官对Pb、Mn、Co、Ni和Zn的转运系数为0.248、0.682、0.076、0.196和0.944。当新、老油井区表层土壤中总石油烃质量比为558 μg/g和5 154 μg/g时,芦苇营养器官中的Co、Ni和Pb的转运系数分别为0.055和0.072、0.091和0.047、0.150和0.199,其都小于非油井区(表5和表6),这表明表层土壤中总石油烃含量过高抑制了Pb、Co和Ni向上迁移。结合重金属的富

表5 不同总石油烃含量下新油井区芦苇营养器官中重金属转运系数

Table 5 Heavy metal transport coefficients of vegetative organs of *Phragmites australis* at different total petroleum hydrocarbons concentrations in area of new oil wells

总石油烃质量比(μg/g)	芦苇营养器官中重金属转运系数				
	Pb	Mn	Co	Ni	Zn
151	0.206	1.454	0.074	0.098	1.185
193	0.250	1.683	0.053	0.093	1.059
213	0.291	0.439	0.038	0.021	1.188
214	0.066	1.049	0.057	0.217	1.386
283	0.235	0.707	0.120	0.084	0.887
317	0.376	0.911	0.154	0.205	1.342
326	0.266	0.876	0.060	0.081	1.104
385	0.247	2.222	0.076	0.136	1.682
558	0.150	0.857	0.055	0.091	2.629

表6 不同总石油烃含量下老油井区芦苇营养器官中重金属转运系数

Table 6 Heavy metal transport coefficients of vegetative organs of *Phragmites australis* at different total petroleum hydrocarbons concentrations in area of old oil wells

总石油烃质量比(μg/g)	芦苇营养器官中重金属转运系数				
	Pb	Mn	Co	Ni	Zn
199	0.440	1.420	0.152	0.141	1.189
235	0.779	4.144	0.358	0.157	0.921
262	0.093	0.392	0.052	0.087	0.949
268	0.468	2.320	0.251	0.127	2.026
284	0.364	1.135	0.248	0.279	0.805
286	0.448	2.511	0.206	0.238	1.133
410	0.281	1.830	0.173	0.180	1.244
5 154	0.199	0.272	0.072	0.147	1.070

集情况,在该总石油烃含量下,芦苇对重金属的富集系数较大,且重金属主要集中在芦苇根部,这可能是芦苇根部细胞被破坏,对重金属不是主动吸收,而是由于内外浓度差造成的被动吸收,芦苇根中重金属含量高、毒性强,导致其不能向上转移。

当表层土壤中总石油烃质量比为283~385 $\mu\text{g/g}$ 时,新油井区芦苇中Pb、Co和Mn的转运系数大于非油井区的,表明此总石油烃含量对这3种重金属的迁移有促进作用;当表层土壤中总石油烃质量比小于283 $\mu\text{g/g}$ 时,其转运系数较平稳并接近非油井区,这表明此含量的石油烃对芦苇营养器官中重金属迁移的影响可以忽略。老油井区表层土壤中的石油烃对芦苇营养器官中重金属迁移没有明显的促进作用。

在大多数污染情况下,新、老油井区芦苇营养器官中Zn的转运系数都与非油井区的相近,这表明总石油烃对芦苇营养器官中Zn迁移的促进作用较小。新、老油井区芦苇营养器官中Zn的转运系数为0.805~2.629,向上迁移效果好,这可能是由于Zn与其它重金属不同,作为植物生长所必需的矿物元素,其在植物体内的迁移具有特定的方式和通道,因此,芦苇营养器官吸收Zn后,为了供给芦苇的正常生长和繁殖,大部分Zn会向上迁移,并且特定的通道使其受到外界的影响较小。

当表层土壤中总石油烃含量相近时,老油井区芦苇营养器官中Pb、Mn、Co、Ni和Zn的转运系数大于新油井区,这可能是由于新油井区芦苇根部富集重金属含量高于老油井区,但高浓度重金属对芦苇茎和叶的毒害作用较大,因此重金属主要累积在芦苇根部但不易向上迁移。由此表明,在新油井区的石油烃有利于芦苇营养器官对重金属的富集,但不利于其向上迁移。

3 结 论

2018年7月22~28日,在黄河三角洲胜利油田的油气开采区,表层土壤中的石油烃主要对芦苇根部富集Pb、Mn、Co和Ni的能力产生影响。在新油井区,当表层土壤中总石油烃质量比为214 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇根中的Co、Mn和Pb质量比最大,分别为3.14 mg/kg、206.59 mg/kg和9.10 mg/kg,当表层土壤中总石油烃质量比为283 $\mu\text{g/g}$ 时,芦苇根中的Ni质量比最大,为27.16 mg/kg。在老油井区,当表层土壤中总石油烃质量比为262 $\mu\text{g/g}$ 时,重金属Co、Mn、Ni和Pb质量比都最大,分别为3.28

mg/kg、166.74 mg/kg、18.60 mg/kg和4.27 mg/kg。

在新油井区,当表层土壤中的总石油烃质量比为283~385 $\mu\text{g/g}$ 时,其促进了芦苇营养器官中的Pb、Co和Mn向上迁移;当总石油烃质量比小于283 $\mu\text{g/g}$ 时,石油烃对芦苇营养器官中重金属含量的影响可以忽略不计。

在表层土壤中总石油烃含量相近的条件下,新油井区土壤中的重金属更易进入芦苇根部,但向上迁移的能力较弱,新油井区芦苇对重金属的去除效果优于老油井区。

参考文献

- [1]黎静,孙志高,孙万龙,等.黄河尾间河段和河口区沉积物中重金属污染及潜在生态毒性风险评价[J].湿地科学,2018,16(3): 407-416.
- [2]罗先香,田静,杨建强,等.黄河口潮间带表层沉积物重金属和营养元素的分布特征[J].生态环境学报,2011,20(5): 892-897.
- [3]徐东霞,章光新.人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策[J].湿地科学,2007,5(3): 282-288.
- [4]Ming N, Xian N X, Fu X H, et al. The interactive effects of petroleum-hydrocarbon spillage and plant rhizosphere on concentrations and distribution of heavy metals in sediments in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3): 156-161.
- [5]Zhang X, Li M, Yang H H, et al. Physiological responses of *Suaeda glauca* and *Arabidopsis thaliana* in phytoremediation of heavy metals[J]. Journal of Environment Management, 2018, 233(1): 132-139.
- [6]Ahmadpour P, Ahmadpour F, Mahmud T M M, et al. Phytoremediation of heavy metals: A green technology[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(76): 14036-14043.
- [7]聂亚平,王晓维,万进荣,等.几种重金属(Pb、Zn、Cr、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J].生态科学,2016,35(2): 174-182.
- [8]赵善道,赵雪琴,左平,等.湿地植物芦苇(*Phragmites australis*)的重金属富集能力与评价[J].海洋环境科学,2014,33(1): 60-65.
- [9]黄永杰,刘登义,王友保,等.八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J].生态学杂志,2006,25(5): 541-545.
- [10]吴双桃,吴晓英,胡曰利,等.铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J].生态环境,2004,13(2): 156-160.
- [11]孙海燕,万书波,李林,等.洞庭湖芦苇湿地不同水期土壤一植被重金属分布特征[J].水土保持学报,2015,29(5): 289-293.
- [12]Zhang S, Bai J H, Wang W, et al. Heavy metal contents and transfer capacities of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2018, 104(2): 3-8.
- [13]杨金红.芦苇修复重金属污染土壤研究进展[J].北方园艺,2017(4): 171-176.
- [14]董志成,鲍征宇,谢淑云,等.湿地芦苇对有毒重金属元素的抗性吸收和累积[J].地质科技情报,2008,27(1): 80-84.
- [15]国家发展和改革委员会.岩石中可溶有机物及原油族组分分析SY/T5119—2008[S].北京:石油工业出版社,2008.

- [16]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.
- [17]李玫, 陈桂珠. 含油废水对秋茄幼苗的几个生理生态指标的影响[J]. 生态学报, 2000, **20**(3): 528-532.
- [18]Shen G, Cao L, Lu Y, *et al.* Influence of Phenanthrene on Cadmium Toxicity to Soil Enzymes and Microbial Growth (5 pp)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2005, **12**(5): 259-263.
- [19]Lin Q X, Mendelssohn I A. Potential of restoration and phytoremediation with *Juncus roemerianus* for diesel-contaminated coastal wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(1): 85-91
- [20]Onojake M C, Frank O. Assessment of heavy metals in a soil contaminated by oil spill: a case study in Nigeria[J]. *Chemistry & Ecology*, 2013, **29**(3): 246-254.
- [21]Luo J, Cai L M, Qi S H, *et al.* A multi-technique phytoremediation approach to purify metals contaminated soil from e-waste recycling site[J]. *Journal of Environment Management*, 2017, **204**(1): 17-22.
- [22]于一雷, 马牧源, 徐卫刚, 等. 碱蓬修复黄河三角洲原油污染土壤试验研究[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(10): 1958-1965.
- [23]努扎艾提·艾比布, 刘云国, 宋华晓, 等. 重金属 Zn、Cu 对香根草生理生化指标的影响及其积累特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(1): 54-59.
- [24]杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态[J]. *中国环境科学*, 1993, **13**(4): 263-268.
- [25]朱鸣鹤, 丁永生, 郑道昌, 等. 潮滩植物翅碱蓬对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 累积及其重金属耐性[J]. *海洋环境科学*, 2005, **24**(2): 13-16.

Accumulation and Migration of 5 Kinds of Heavy Metals in Vegetative Organs of *Phragmites australis* in the Yellow River Delta under Petroleum Hydrocarbons Pollution

ZOU Yanmei^{1,2}, LI Yuanwei^{1,2}, SUN Zhigao³, WANG Chuanyuan¹

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, P.R.China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China; 3. *Key Laboratory of Humid*

Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), Ministry of

Education, Fuzhou 350007, Fujian, P.R.China)

Abstract: In order to study the effect of oil spill pollutions on the accumulation and migration of heavy metals in vegetative organs of *Phragmites australis*, the samples of soil at 0-10 cm depth and roots, stems and leaves of *Phragmites australis* were collected from the area of new and old oil wells and non-oil wells in Shengli Oil-field of the Yellow River Delta on July 22-28, 2018. The contents of heavy metals (Pb, Mn, Co, Ni, Zn) in vegetative organs of *Phragmites australis* and the contents of total petroleum hydrocarbons and 5 kinds of heavy metals in surface soil were measured. The results showed that the effect of petroleum hydrocarbons on the enrichment of Pb, Mn, Co and Ni in vegetative organs of *Phragmites australis* was mainly due to the influence of the roots in areas of new and old oil wells. In area of new oil wells, when total petroleum hydrocarbons content in surface soil was 214 $\mu\text{g/g}$, contents of Co, Mn and Pb were the highest, which were 3.14 mg/kg, 206.59 mg/kg and 9.10 mg/kg. When total petroleum hydrocarbons content in surface soil was 283 $\mu\text{g/g}$, content of Ni was the highest, which was 27.16 mg/kg. In area of old oil wells, when total petroleum hydrocarbons content in surface soil was 262 $\mu\text{g/g}$, contents of Co, Mn, Ni and Pb were the highest, which were 3.28 mg/kg, 166.74 mg/kg, 18.60 mg/kg and 4.27 mg/kg. When contents of total petroleum hydrocarbons were 283-385 $\mu\text{g/g}$, the inhibitory effect turns to a promoting effect on Pb, Co and Mn in vegetative organs of *Phragmites australis*. When contents of total petroleum hydrocarbons were less than 283 $\mu\text{g/g}$, the effect of oil spill pollutants could be neglected in area of new oil wells. Under the similar contents of total petroleum hydrocarbons, removal efficiency of 5 kinds of heavy metals by vegetative organs of *Phragmites australis* in new oil wells were better than those in area of old oil wells.

Keywords: heavy metal; petroleum hydrocarbon; *Phragmites australis*; accumulation; migration; the Yellow River Delta