

DOI: 10.5846/stxb201906131251

杜显元, 陈宏坤, 黄丽, 张心昱, 吴骞, 郭宇. 油田外排水对干旱戈壁区人工湿地土壤微生物生物量的影响. 生态学报, 2020, 40(15): 5388-5396.
Du X Y, Chen H K, Huang L, Zhang X Y, Wu Q, Guo Y. Effects of oilfield discharged water on soil microbial biomass in constructed wetland in arid Gobi region. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5388-5396.

油田外排水对干旱戈壁区人工湿地土壤微生物生物量的影响

杜显元¹, 陈宏坤¹, 黄丽², 张心昱^{2,3,*}, 吴骞⁴, 郭宇⁵

1 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室/中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

4 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025

5 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866

摘要:为研究油田外排水对干旱戈壁区人工湿地土壤微生物生物量的影响,选择干旱戈壁区某油田外排水形成的湿地内坝内、内外坝间、外坝边缘土壤,及不受排水影响的对照土壤,采用磷脂脂肪酸(PLFA)方法,分析外排水对土壤细菌、真菌、放线菌生物量的影响。结果表明:湿地内坝内、内外坝间、外坝边缘土壤与对照土壤的 pH 和容重均无显著差异,内外坝间的土壤含水量、电导率、溶解性全盐和全碳含量最高,显著高于内坝内土壤;除含水量外,对照土壤的主要物理性质和养分特征与湿地内坝内、内外坝间、外坝边缘的土壤无显著差异。土壤总微生物量、细菌和真菌生物量从湿地内坝内至外坝边缘逐渐增加。土壤总微生物量、细菌、真菌、放线菌与全氮含量均呈显著正相关,丛枝菌根真菌与全碳呈显著正相关,真菌、丛枝菌根真菌与总石油烃呈显著正相关。研究结果表明,油田外排水增加了湿地外坝边缘的土壤微生物量。

关键词:油田外排水;人工湿地;土壤理化性质;土壤微生物量;磷脂脂肪酸

Effects of oilfield discharged water on soil microbial biomass in constructed wetland in arid Gobi region

DU Xianyuan¹, CHEN Hongkun¹, HUANG Li², ZHANG Xinyu^{2,3,*}, WU Qian⁴, GUO Yu⁵

1 State Key Laboratory of Petroleum Pollution Control, China National Petroleum Corporation Research Institute of Safety and Environment Technology, Beijing 102206, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

4 College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

5 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: We chose wetland soils in inner-dams, between-dams, outer dam edges, and control (soils unaffected by drainage) to investigate the effects of oilfield discharged water on soil microbial biomass in constructed wetland in arid Gobi region. The phospholipid fatty acid (PLFA) analysis was used to study the effects of oilfield discharged water on biomass of soil bacteria, fungi and actinomycetes. The results show that pH and soil bulk density had no significant differences among

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05040002-005-001, 2016ZX05040002-001-004); 中国石油天然气集团公司重大科技专项(2016E-1205)

收稿日期: 2019-06-13; 网络出版日期: 2020-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxy@igsrr.ac.cn

the soils from inner-dams, between-dams, outer-dam-edges, and the control. Soil water content, electrical conductivity, total soluble salt content, and total carbon content were all highest in the between-dam soils and were remarkably higher than those in the inner-dam soils. Except water content, the physical properties and nutrient contents had no significant differences between the control and other three soils. Soil bacteria, fungi and total microbial biomass increased from the inner-dams to outer dam edges. The soil total PLFA, bacteria, fungi and actinomycete biomass were positively correlated with the soil total nitrogen content. The soil arbuscular mycorrhizal fungi biomass was positively correlated with the soil total carbon content. The fungi and arbuscular mycorrhizal fungi biomass were positively correlated with the total petroleum hydrocarbon content. The study showed that oilfield discharged water increased soil microbial biomass in the outer dam edges.

Key Words: oilfield discharged water; constructed wetland; soil physical and chemical properties; soil microbial biomass; phospholipid fatty acid

我国油田平均含水率已超过 85%。绝大部分油田采出水经过处理后,回注回油层,其中有部分为无效回注。这在一定程度上是一种能源和水资源的浪费,尤其是缺水的干旱半干旱地区。不能被油田循环利用的采出水处理达到国家排放标准^[1]后外排,称之为油田外排水。人工湿地处理油田外排水是近年来逐步发展起来的处理油田采油外排水的新模式,是一种有效的生态外排水处理工艺,利用湿地基质、芦苇等耐盐碱植物及微生物群落组成的复合系统对外排水中的低浓度残余石油类相关物质进行进一步转化和吸收处理,具有类似生态系统的综合降解功能,且方便人为监督控制^[2-4]。项玮等^[5]人工湿地系统的含油废水净化效果的研究表明,人工湿地对含油废水具有较好的净化效果,石油类物质平均去除率在 96%以上。马尧等^[2]以新疆油田外排水为研究对象,建立了含油含盐采油外排水人工生态湿地模拟试验,试验表明人工湿地可以实现处理后外排水的达标排放。

石油污染物可以影响土壤的物理、化学性质,由于土壤环境变化与污染胁迫作用,导致土壤微生物群落多样性及其群落结构发生改变^[6-11]。磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acid, PLFA)是活体微生物细胞膜的重要组成部分,不同类群的微生物能通过不同的生化途径合成不同的 PLFA,因此通过测定 PLFA 成份可以分析不同群落微生物生物量,是一种快速、可定性和定量分析土壤微生物量的方法^[12-15]。有研究认为,一定浓度的石油污染可以刺激土壤微生物的生长,增加微生物多样性^[11,16];也有研究表明,石油污染将降低土壤微生物的多样性^[6]。高晓奇等^[17]的研究发现,不同开采年限油井土壤总石油烃存在差异,但是土壤微生物群落无显著差异。磷脂脂肪酸对石油污染物敏感^[18-19],能够表征不同群落结构微生物量的动态变化^[20]。总体认为,当土壤中石油物质含量低于一定数量时,是可以增加土壤生物多样性,并促进植物生长的。但其中很多具体特征和机理尚不明确。本研究通过分析土壤 PLFAs,能够反映干旱戈壁区人工湿地接纳油田外排水土壤生物量的变化特征和趋势。

本研究以干旱戈壁区某油田石油生产的外排水形成的人工湿地为对象,分析外排水对湿地生态系统土壤微生物生物量的影响。该区域水资源贫乏,生态环境脆弱,随着石油工业的发展,水的需求量增长很快,油田生产过程中采出的采出水量也急剧增加。在油田开采带来巨大经济效益的同时,会对原本十分脆弱的生态环境产生胁迫^[21]。湿地作为油田外排水最终容纳体,形成生态补水,局部生态环境得到整体显著提升,但目前对湿地接纳油田外排水中是有物质的富集、迁移及对环境的影响机理尚缺乏细致系统研究。其中,对于干旱戈壁区油田开发中采油外排水对土壤微生物群落的影响机制还不清楚。因此,开展油田外排水对人工湿地生态系统土壤微生物生物量及影响机制研究,对预知湿地耐污负荷、指导今后生产实践具有重要的意义。

1 研究区概况

选取干旱戈壁区某油田长期外排水在排放点形成的经过环保部门批准的人工湿地,湿地总面积约

700hm²。该地区属温带干旱荒漠气候,典型的平原戈壁景观,夏季炎热(极端高温可达49.1℃),冬季严寒(极端低温可达-42.0℃),干旱少雨,年均蒸发量3008.9mm,远大于年均降水量108.9mm,多年平均风速3.4m/s,土壤含盐量普遍较高,土壤质地以砂土居多^[22]。该地区海拔差低于5m,西南部略高,为了防止外排水对外部生态系统的影响,在湿地低洼部分建有3—4m高的内圈防水坝(内坝)和2—3m高的外圈防水坝(外坝),并在内圈坝内种植芦苇等耐盐碱植物。

土壤样品采集当月,采集外排水处理站进水口和出水口的水样在当地进行水质检测,检测结果见表1。参考GB8978—1996^[1],除化学需氧量(COD)外,其他项目出水口水质均已达到污水排放的一级标准。

表1 外排水处理站进水口和出水口主要水质指标

Table 1 Chemical properties of inlet and outlet water of the water discharged treatment station

项目 Item	pH	化学需氧量 COD/(mg/L)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg/L)	全氮 Total nitrogen TN/(mg/L)	全磷 Total phosphorus TP/(mg/L)	石油类 Petroleum/ (mg/L)
进水口 Water inlet	6.66	258	3.503	4.24	0.214	4.32
出水口 Water outlet	6.94	206	3.630	4.23	0.202	2.21
排放一级标准 Discharge standard level I	6—9	60	15	/	0.5	5

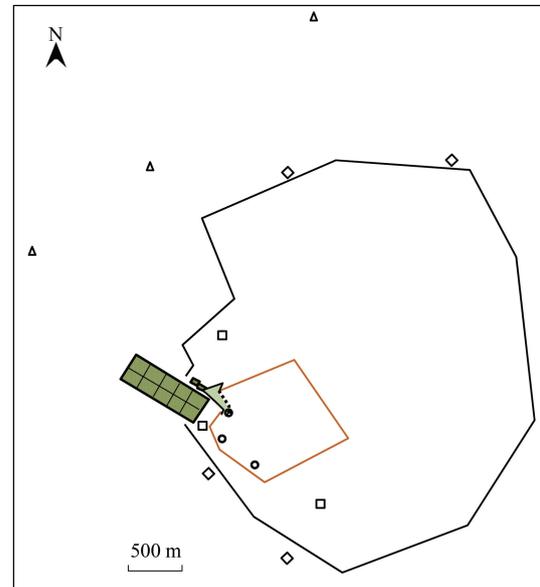
2 研究方法

2.1 土壤样品的采集

图1、图2分别为采样点分布图和景观图。2018年7月在内坝内(inner dam, ID, 靠近排水口)和内外坝间(between dams, BD)各设置3个采样点,在外坝边缘(outer dam edge, OD)设置4个采样点,并在湿地西北方向距离外坝0.5km以外设置3个采样点作为对照(CK)。在每个采样点设置10m×10m的样方,每个样方以S型布设5个点,用土钻取0—20cm土壤,剔除石砾和根系等杂质,将5个点的土样混合,用四分法取出约1kg样品,过2mm筛,装入封口袋后放入冷藏箱带回实验室,共采集土壤样品13个,用于土壤理化性质、PLFA、石油烃的测定。

2.2 土壤理化性质测定

土壤pH值(水土比1:2.5)用pH计测定(Mettler-Toledo, Delta 320);电导率(EC)采用水土比1:2.5,电导率仪测定(雷磁, DDS-307);土壤含水量(SMC)采用105℃烘干24h以上至恒重的烘干法测定;土壤容重(D_b)采用容重环法测定;土壤全碳(TC)和全氮(TN)采用元素分析仪(Vario Max CN, Elementar)测定;铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用1mol/L KCl作为浸提液(土液比1:10),连续流动分析仪测定;速效磷(AP)采用0.03mol/L NH₄F—0.025mol/L HCl混合液作浸提,土液比1:10,连续流动分析仪测定^[23]。土壤溶解性全盐(TSS)采用加和法测定^[24]。土壤总石油烃(TPH)采用加压流体萃取^[25],重量法测定。



图例

△ 对照 □ 内外坝间 — 内坝 排水口
◇ 外坝边缘 ○ 内坝内 — 外坝 ■ 处理池

图1 干旱戈壁区某油田外排水形成湿地不同位置土壤采样点分布图

Fig.1 Sampling sites of the wetland formed by oilfield discharged water in arid Gobi region

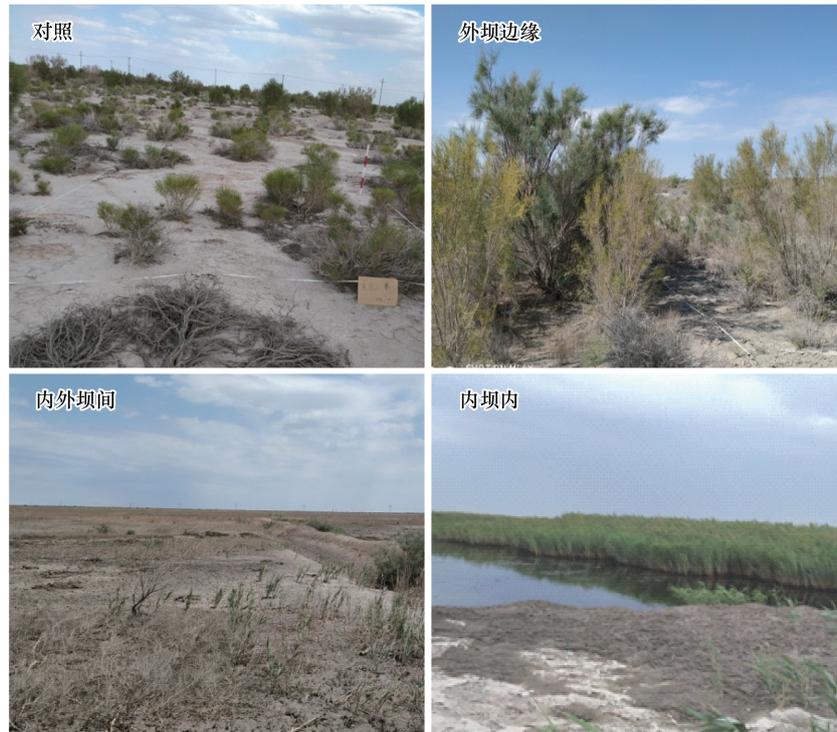


图 2 干旱戈壁区某油田外排水形成湿地不同位置景观图

Fig.2 Landscape photos of the wetland formed by oilfield discharged water in arid Gobi region

2.3 土壤微生物生物量测定

土壤微生物生物量测定采用微生物标志物磷脂脂肪酸(PLFA)法^[14,26]。样品用含甲酯化的 C19:0 正己烷溶解,用气相色谱仪(Aglient 7890B)测定,通过 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统(MIDI Inc., Newark, DE)鉴定 PLFA 类型。表征不同类群微生物生物量的 PLFAs 标志物见表 2。

表 2 表征微生物的磷脂脂肪酸(PLFA)标志物

Table 2 The PLFA biomarkers used to characterize microbes

微生物类群 Microbial group	磷脂脂肪酸标志物 Phospholipids fatty acid signatures	参考文献 References
革兰氏阳性菌(G ⁺) Gram-positive bacteria	i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0	[27]
革兰氏阴性菌(G ⁻) Gram-negative bacteria	16:1 ω 7c, 18:1 ω 7c, 17:1 ω 8c	[27-29]
细菌(B) Bacteria	i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0, 16:1 ω 7c, 18:1 ω 7c, 17:1 ω 8c	[27-29]
真菌(F) Fungi	18:3 ω 6c, 18:2 ω 6c, 18:1 ω 9c, 16:1 ω 5c	[28, 30-31]
丛枝菌根真菌(AM) Arbuscular mycorrhiza fungi	16:1 ω 5c	[30]
外生菌根真菌(ECM) Ectomycorrhizal fungi	18:2 ω 6c, 18:2 ω 9c	[31]
放线菌(AC) Actinomycetes	10me16:0, 10me17:0, 10me18:0	[27]

i, a 和 me 分别表示同型、异型和甲基分支脂肪酸, ω , c 分别表示甲基末端和顺式空间构造; PLFA: 磷脂脂肪酸 Phospholipid fatty acid

2.4 数据分析

数据使用 SPSS 18.0 统计软件进行分析,选择单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行显著性检验(Duncan 检验),显著水平为 $P < 0.05$,采用 Pearson 系数进行相关分析。利用 SigmaPlot 10.0 绘制图形。使用 Canoco 4.5 软件,用主成分分析(PCA)方法分析土壤微生物群落结构关系。

3 结果与分析

3.1 土壤总石油烃及理化性质特征

各类土壤的总石油烃含量无显著差异,但是在对照位置石油烃含量相对较高,湿地土壤不同位置的石油烃含量相对较低。参考 GB36600—2018^[32],各采样点的总石油烃含量低于一类用地筛选值 826mg/kg(图 3)。

湿地内坝内、内外坝间、外坝边缘与对照土壤的 pH、容重差异不显著($P>0.05$),电导率、溶解性全盐为内外坝间>对照>外坝边缘>内坝内,土壤含水量为内外坝间>内坝内>对照>外坝边缘(表 3)。

不同位置湿地和对照土壤的全碳、全氮和有效氮(包括铵态氮和硝态氮)、有效磷含量、全碳/全氮比之间差异不显著($P>0.05$),仅内坝内的土壤全碳含量显著低于内外坝间,约为内外坝间土壤全碳的 50%(表 4)。

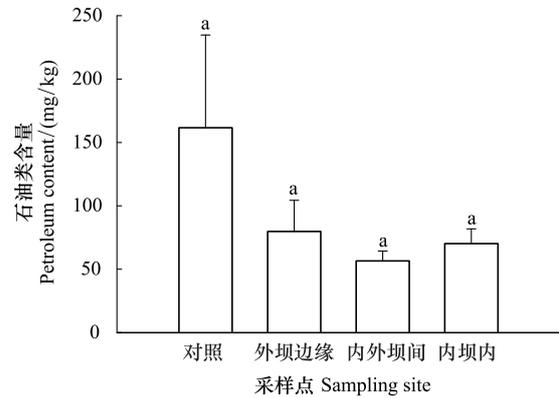


图 3 油田外排水对人工湿地生态系统土壤总石油烃含量的影响
Fig.3 Effects of oilfield discharged water on total petroleum hydrocarbon contents in constructed wetland ecosystems
相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$)

表 3 油田外排水对人工湿地生态系统土壤物理性质的影响

Table 3 Effects of oilfield discharged water on soil physical properties in constructed wetland ecosystems

采样点 Sampling site	pH	电导率 Electrical conductivity EC/($\mu\text{s}/\text{cm}$)	含水量 Soil water content SWC/%	溶解性全盐 Total soluble salt TSS/(mg/kg)	容重 Density of bulk soil $D_b/(\text{g}/\text{cm}^3)$
对照 CK	8.09±0.02a	9276±916ab	4.5±0.2c	8405±1108ab	1.06±0.06a
外坝边缘 OD	8.06±0.08a	6918±917ab	3.3±0.5c	5608±1020b	1.07±0.03a
内外坝间 BD	8.62±0.37a	10780±2558a	19.7±0.7a	13484±3038a	1.05±0.09a
内坝内 ID	8.17±0.05a	5937±687b	7.1±0.9b	5134±658b	1.26±0.15a

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);数据表示平均值±标准误;CK,对照;OD,外坝边缘 outer dam edge;BD,内外坝间 between dams;ID,内坝内 inner dam

表 4 油田外排水对人工湿地生态系统土壤养分和比值的影响

Table 4 Effects of oilfield discharged water on soil nutrient contents and their ratios in the constructed wetland ecosystems

采样点 Sampling site	全碳 Total carbon TC/(g/kg)	全氮 Total nitrogen TN/(g/kg)	铵态氮 $\text{NH}_4^+-\text{N}/$ (mg/kg)	硝态氮 $\text{NO}_3^--\text{N}/$ (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus AP/(mg/kg)	全碳/全氮 C/N ratio
对照 CK	35.8±8.5ab	0.7±0.1a	135±31a	13±1a	10±1a	49.9±9.2a
外坝边缘 OD	37.6±4.2ab	0.7±0.1a	151±41a	13±3a	12±1a	57.4±11.8a
内外坝间 BD	41.5±1.3a	0.6±0.1a	79±64a	7±1a	10±1a	69.4±11.2a
内坝内 ID	20.6±7.4b	0.5±0.1a	66±25a	10±2a	6±4a	36.2±8.5a

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),数据表示平均值±标准误

3.2 土壤微生物生物量及比值

湿地不同位置土壤与对照土壤相比,其总微生物量、细菌、真菌、放线菌、丛枝菌根真菌、外生菌根真菌差异不显著($P>0.05$),而从内坝内至内外坝间至外坝边缘,土壤总微生物量和主要类群微生物量呈现出逐渐增加的趋势,内坝内土壤总微生物量、细菌、真菌、革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌和丛枝菌根真菌量均显著低于外坝边缘土壤(图 4)。从内坝内至内外坝间至外坝边缘,真菌/细菌比值(F/B)逐渐增加,并且内坝内、内外坝间土壤 F/B 比值显著低于对照土壤($P<0.05$)。土壤 G^+/G^- 比值湿地内向外有逐渐递减的趋势,但差异不显著(图 4)。

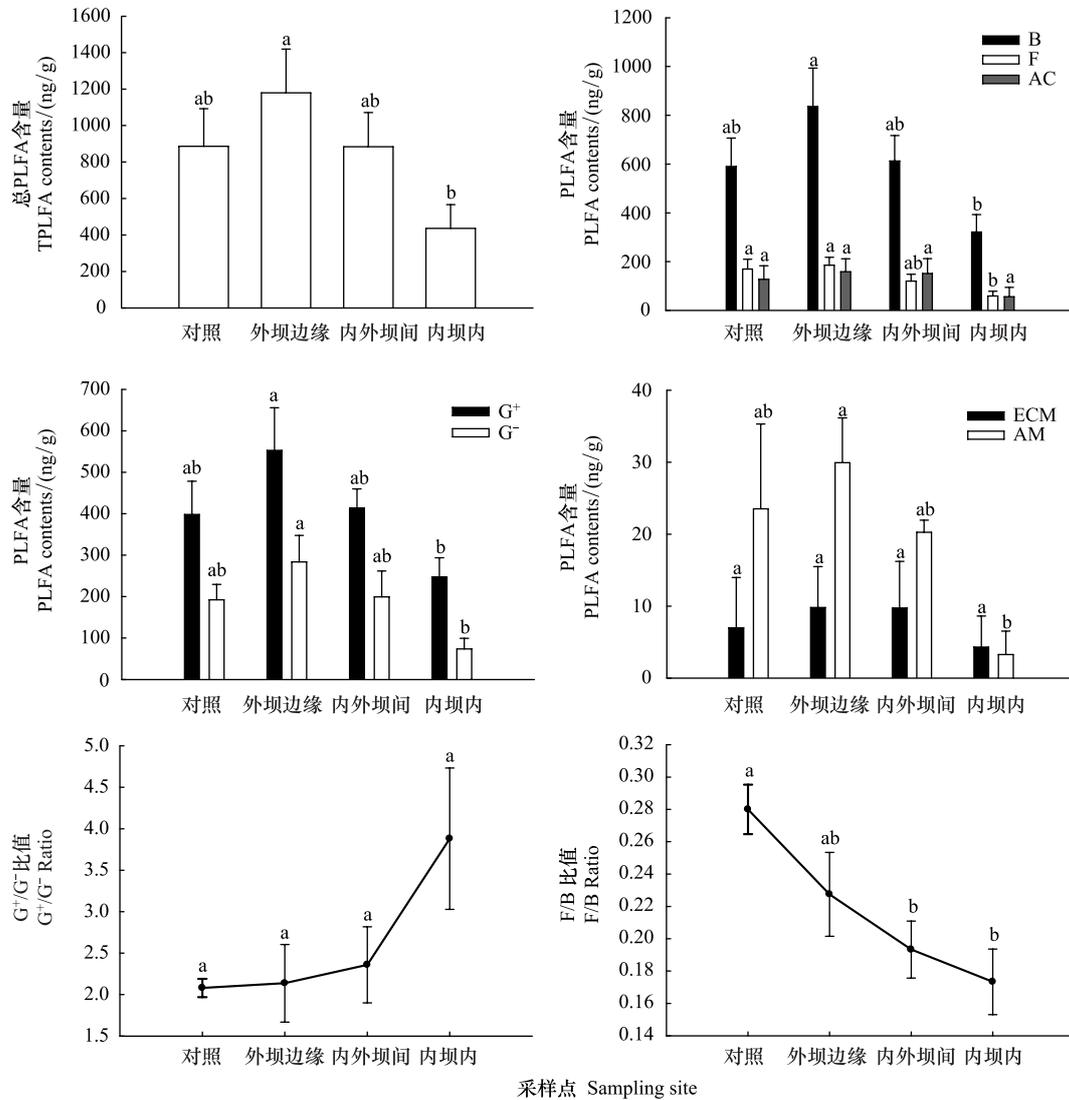


图 4 油田外排水对人工湿地生态系统土壤微生物生物量及比率影响

Fig.4 Effects of oilfield discharged water on microbial biomass and ratios of fungi/bacteria and G^+/G^- in the constructed wetland ecosystems

TPLFA, 土壤微生物总含量 Total phospholipid fatty acid; B: 细菌 Bacteria; F: 真菌 Fungi; AC: 放线菌 Actinomycetes; G^+ : 革兰氏阳性菌 Gram-positive bacteria; G^- : 革兰氏阴性菌 Gram-negative bacteria; ECM: 外生菌根真菌 Ectomycorrhizal fungi; AM: 丛枝菌根真菌 Arbuscular mycorrhiza fungi; G^+/G^- : 革兰氏阳性菌与革兰氏阴性菌的比值; F/B: 真菌与细菌的比值; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

对湿地不同位置土壤与对照土壤的微生物量进行主成分分析 (PCA), 第一轴和第二轴分别解释土壤微生物生物量的 78.3% 和 13.3% (图 5)。在总土壤微生物生物量的贡献率上, 各主要类群微生物生物量表现为细菌 > 革兰氏阳性菌 > 革兰氏阴性菌 > 放线菌 > 真菌 > 丛枝菌根真菌 > 外生菌根真菌 (图 5)。湿地内坝内、内外坝间和外坝边缘的土壤主要类群微生物生物量与对照土壤并无明显差异, 表明由于湿地外排水造成湿地不同位置土壤微生物量的差异不显著 (图 5)。

3.3 土壤微生物生物量与土壤性质的相关分析

土壤全氮、全碳、总石油烃含量与土壤微生物生物量正相关 (表 5)。全氮与革兰氏阳性菌、细菌、放线菌、丛枝菌根真菌及总微生物量均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与革兰氏阴性菌、真菌显著正相关 ($P < 0.05$); 总碳与丛枝菌根真菌显著正相关, 与 G^+/G^- 比值呈显著负相关 ($P < 0.05$); 总石油烃与真菌、丛枝菌根真菌有显著

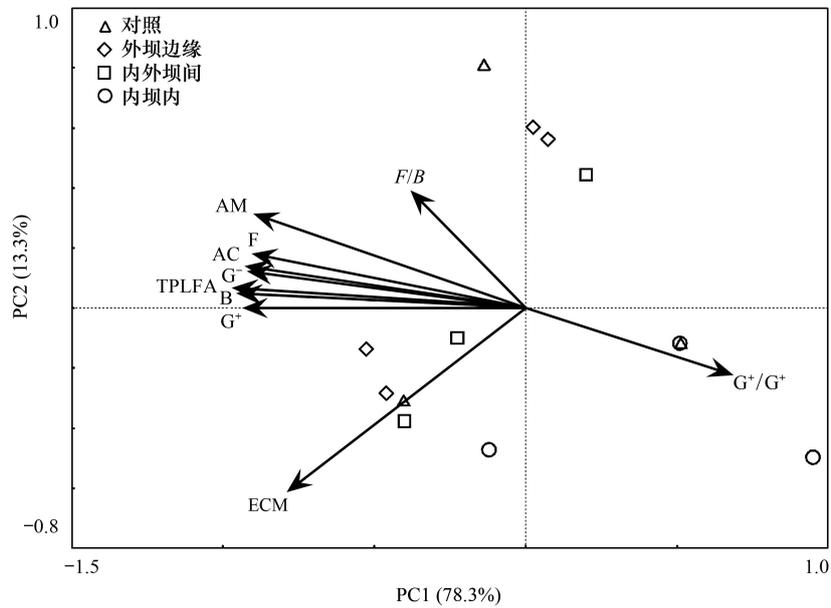


图 5 油田外排水形成人工湿地生态系统土壤微生物生物量及比值的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis (PCA) of soil microbial biomass and their ratios in wetland ecosystems constructed by oilfield discharged water

正相关 ($P < 0.05$) (表 5)。其他土壤性质则与土壤微生物生物量无显著相关性 (表 5)。

表 5 油田外排水形成人工湿地生态系统土壤微生物生物量与环境因子的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil microbes and environmental factors in wetland ecosystems formed by oilfield discharged water

环境因子 Environmental factors	微生物种类 Microbial types									
	G ⁺	G ⁻	B	F	ECM	AM	AC	TPLFA	G ⁺ /G ⁻	F/B
pH	-0.070	0.080	-0.010	-0.053	0.231	-0.090	0.098	0.006	-0.066	-0.136
EC	0.033	-0.141	-0.038	-0.084	-0.041	0.049	-0.014	-0.042	-0.146	0.010
TSS	-0.041	-0.185	-0.102	-0.184	-0.052	-0.020	-0.037	-0.105	-0.071	-0.126
SWC	-0.185	-0.178	-0.188	-0.323	0.031	-0.175	-0.010	-0.178	0.082	-0.372
Db	-0.174	-0.081	-0.141	-0.135	0.099	-0.148	-0.003	-0.115	0.488	-0.256
TC	0.480	0.421	0.470	0.496	0.366	0.617 *	0.506	0.498	-0.587 *	0.412
TN	0.760 **	0.622 *	0.726 **	0.626 *	0.504	0.710 **	0.801 **	0.750 **	-0.458	0.146
NO ₃ ⁻ -N	0.491	0.495	0.507	0.453	0.159	0.427	0.477	0.509	-0.474	0.207
NH ₄ ⁺ -N	0.375	0.246	0.333	0.322	0.286	0.313	0.231	0.320	-0.291	0.256
AP	0.316	0.311	0.323	0.330	-0.049	0.400	0.176	0.304	-0.501	0.288
C/N	0.070	0.142	0.102	0.183	0.075	0.234	0.052	0.108	-0.419	0.361
TPH	0.408	0.322	0.385	0.573 *	0.469	0.579 *	0.435	0.440	-0.196	0.494

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

4 讨论

本研究内外坝间土壤的含水量、电导率和溶解性全盐含量最高,这主要是由于排水和地势的影响,内外坝间由于地势相对较低,造成积水和积盐。由于靠近排水口的内坝内土壤受到长期的水洗作用,电导率、溶解性全盐、全碳、全氮含量最低,水扩散至内外坝间达到最高土壤含水量。土壤水分是盐分的溶剂与载体,在土水势作用下,土壤水分携带着溶质产生迁移^[33-34],溶质随着土壤水分的迁移造成湿地内外坝间土壤的电导率和

溶解性全盐量最高,pH 值也高于其他类土壤。贾建丽等^[35]研究认为,当油田区土壤可溶性盐含量低于 2% 时,pH 值随可溶性盐含量的增加而升高,本研究中不同位置土壤间虽然未达到显著差异不显著,但也呈现出 pH 值随可溶性盐含量的增加而升高的趋势。有效氮(硝态氮和铵态氮)和有效磷含量在内坝内、内外坝间有比对照和湿地外坝边缘低的趋势,这可能除了排水带走了部分有效养分外,还与该区域植物生长对养分吸收有关。水分是干旱区植物生长的最主要限制因子,在湿地中水限制缓解的情况下,芦苇等植物可能对湿地土壤中氮、磷吸收增加,导致湿地中的有效养分有降低的趋势。关于湿地外排水对该区域植物生物量、植物对氮、磷吸收的影响还有待于进一步的研究。不同位置土壤的石油烃含量差异不显著,这是由于外排水从处理站排出后,总石油烃含量已经明显降低(表 1),而湿地不同位置土壤的石油烃含量与土壤真菌(包括丛枝菌根真菌、外生菌根真菌)正相关,说明真菌会分解利用部分外排水带入湿地中石油烃。

本研究土壤微生物细菌(革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌)、真菌(丛枝菌根真菌、外生菌根真菌)、放线菌、总微生物量都是湿地内坝内最低,湿地外坝边缘的值最高,土壤微生物生物量与土壤全氮、全碳和总石油烃正相关。微生物的生长常常受氮有性的限制,环境中氮有效性越高,微生物量增加^[36]。内坝内的土壤在长时间的外排水冲洗和芦苇等植物的吸收利用下,土壤碳氮的含量较低,因而影响了土壤微生物量。总石油烃与真菌、丛枝菌根真菌成正相关,表明一定含量的石油烃可以促进土壤真菌微生物的生长,这与刘五星^[11]、甄丽莎^[16]的研究结果一致。因此,外坝边缘相对湿地内部较高的石油烃含量,导致其微生物量高于湿地内部。综上所述,油田外排水未对研究区土壤的理化性质造成显著影响,外排水改善湿地内坝外的土壤生态环境,增加了土壤微生物量。

参考文献 (References):

- [1] 国家环境保护总局. GB8978—1996 污水综合排放标准. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [2] 马尧, 张燕萍, 徐斌, 张华. 湿地生态处理技术在新疆油田的应用. 给水排水, 2009, 35(5): 175-178.
- [3] 孙宗连, 肖昕, 王倩. 人工湿地处理采油废水的可行性分析. 内蒙古石油化工, 2011, 37(16): 25-26.
- [4] 薛钧尹, 肖昕. 垂直潜流人工湿地对含油废水净化效果的研究. 工业水处理, 2014, 34(11): 21-24.
- [5] 项玮, 肖昕, 李莹, 曹文平, 韩宝平, 薛钧尹. 人工湿地系统净化含油废水效果研究. 水处理技术, 2016, 42(7): 121-125.
- [6] 王宝山, 温成成, 孙秦川, 赵峰德. 石油烃类污染对青藏高原北麓河地区冻区土壤微生物多样性的影响. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2917-2928.
- [7] Scherr K E, Lundaa T, Klose V, Bochmann G, Loibner A P. Changes in bacterial communities from anaerobic digesters during petroleum hydrocarbon degradation. *Journal of Biotechnology*, 2012, 157(4): 564-572.
- [8] Gao S, Liang J D, Teng T T, Zhang M. Petroleum contamination evaluation and bacterial community distribution in a historic oilfield located in loess plateau in China. *Applied Soil Ecology*, 2018, 136: 30-42.
- [9] 梁建芳, 杨江科, 杨杨, 晁群芳, 殷亚兰, 赵亚光. 克拉玛依油田石油污染土壤细菌群落结构与环境因子的关系. 微生物学报, 2016, 56(8): 1301-1313.
- [10] 孔令姣, 陈吉祥, 杨智, 李彦林, 王永刚, 周永涛, 张彦. 石油污染土壤强化修复前后细菌多样性变化研究. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(8): 3426-3433.
- [11] 刘五星, 骆永明, 滕应, 李振高, 吴龙华. 石油污染土壤的生态风险评价和生物修复 II. 石油污染土壤的理化性质和微生物生态变化研究. 土壤学报, 2007, 44(5): 848-853.
- [12] 李森森, 马大龙, 臧淑英, 王璐璐, 孙弘哲. 不同干扰方式下松江湿地土壤微生物群落结构和功能特征. 生态学报, 2018, 38(22): 7979-7989.
- [13] Kaur A, Chaudhary A, Kaur A, Choudhary R, Kaushik R. Phospholipid fatty acid-A bioindicator of environment monitoring and assessment in soil ecosystem. *Current Science*, 2005, 89(7): 1103-1112.
- [14] Frostegård Å, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(1), 59-65.
- [15] Zelles L. Phospholipid fatty acid profiles in selected members of soil microbial communities. *Chemosphere*, 1997, 35(1), 275-294.
- [16] 甄丽莎, 谷洁, 胡婷, 吕睿, 贾凤安, 刘晨, 李燕. 黄土高原石油污染土壤微生物群落结构及其代谢特征. 生态学报, 2015, 35(17): 5703-5710.

- [17] 高晓奇, 肖能文, 叶瑶, 付梦娣, 李俊生. 基于 Biolog-ECO 分析长庆油田土壤微生物群落功能多样性特征. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5): 913-918.
- [18] Zhang J, Wang R Q, Du X M, Li F S, Dai J L. Characterization of contamination, source and degradation of petroleum between upland and paddy fields based on geochemical characteristics and phospholipid fatty acids. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(11): 1995-2003.
- [19] Schafer A N, Snape I, Siciliano S D. Influence of liquid water and soil temperature on petroleum hydrocarbon toxicity in Antarctic soil. Environmental Toxicology and Chemistry, 2009, 28(7): 1409-1415.
- [20] Li X X, Fan F Q, Zhang B Y, Zhang K D, Chen B. Biosurfactant enhanced soil bioremediation of petroleum hydrocarbons: Design of Experiments (DOE) based system optimization and Phospholipid Fatty Acid (PLFA) based microbial community analysis. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 132: 216-225.
- [21] 潘峰, 田长彦, 邵峰, 周伟, 陈飞. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究. 地理学报, 2011, 66(11): 1497-1507.
- [22] 韩鹏冉, 严成, 孙永秀, 岳健. 克拉玛依市中部城区外围生态敏感性评价. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1217-1222.
- [23] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统土壤观测规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 环境保护部. HJ 783—2016 土壤和沉积物有机物的提取 加压流体萃取法. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [26] Bossio D A, Scow K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns. Microbial Ecology, 1998, 35(3/4): 265-278.
- [27] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1): 167-176.
- [28] Sampedro L, Jeannotte R, Whalen J K. Trophic transfer of fatty acids from gut microbiota to the earthworm *Lumbricus terrestris* L. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(8): 2188-2198.
- [29] Landesman W J, Dighton J. Response of soil microbial communities and the production of plant-available nitrogen to a two-year rainfall manipulation in the New Jersey Pinelands. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(10): 1751-1758.
- [30] Bach E M, Baer S G, Meyer C K, Six J. Soil texture affects soil microbial and structural recovery during grassland restoration. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12): 2182-2191.
- [31] Olsson P A. Signature fatty acids provide tools for determination of the distribution and interactions of mycorrhizal fungi in soil. FEMS Microbiology Ecology, 1999, 29(4): 303-310.
- [32] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB36600—2018 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行). 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [33] 孟阳阳, 刘冰, 刘婵. 荒漠绿洲湿地土壤水热盐动态过程及其影响机制. 中国沙漠, 2019, 39(1): 149-160.
- [34] 邹平, 杨劲松, 福原辉幸, 寺崎宽章, 何超. 蒸发条件下土壤水盐热运移的实验研究. 土壤, 2007, 39(4): 614-620.
- [35] 贾建丽, 刘莹, 李广贺, 张旭. 油田区土壤石油污染特性及理化性质关系. 化工学报, 2009, 60(3): 726-732.
- [36] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 孙晓敏, 刘希玉, 何念鹏, 庾强. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 4943-4949.