

油水淹地土壤的性质和污染机理研究

王铁媛¹, 窦森^{1*}, 刘录军², 崔俊涛¹, 林琛茗¹, 张子豪¹

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2.吉林油田公司扶余采油厂, 吉林 松原 138000)

摘要:为了研究油水淹地土壤的性质和污染机理,对吉林油田的油水淹地土壤及邻近作物生长良好的正常土壤进行了土样采集和对比分析,研究了油水淹地土壤的石油含量、离子组成和微生物群落等性质,最终得出关于污染机理的结论。结果表明,油水淹地土壤的有机质含量、pH值、电导率、钠离子吸附比、总碱度和全盐量均比正常土壤高,污染土壤盐碱性特征显著。与正常土壤相比,污染土壤的石油含量显著升高,超过了清洁土壤的标准;污染土壤盐分组成中 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 的比例升高,土壤中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量显著不同;污染土壤的微生物数量也明显减少。

关键词:油水淹地;污染机理;离子组成;微生物群落;盐胁迫

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)01-0058-07 doi:10.11654/jaes.2015.01.009

Properties and Contamination Mechanism of Soil Flooded with Oil-containing Wastewater

WANG Tie-yuan¹, DOU Sen^{1*}, LIU Lu-jun², CUI Jun-tao¹, LIN Chen-ming¹, ZHANG Zi-hao¹

(1.School of Resource and Environment Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Fuyu Oil Production Plant, Petrochina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: Oil exploration and production produce large amount of oil-containing wastewater that is usually returned into the underground oil producing zones by water injection. Due to accidents such as water pipeline leakage, however, the soils nearby were flooded by leaked oil-containing wastewater. Such soils seriously affected plant growth. In this study, oil-containing wastewater flooded soils and the adjacent soils with normal crop growth from the Jilin oilfield were used to examine their oil content, ion composition and microbial community. The results show that organic matter content, pH, electric conductivity, sodium adsorption ratio (SAR), total alkalinity (TA), and salt content in oil-containing wastewater flooded soils were higher than those in control soil, contaminated soils showed obvious alkalization. Compared with the control soil, oil content, the proportions of Na_2CO_3 and NaHCO_3 in salts, and ratios of Na^+/K^+ , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ and $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ were all higher in the contaminated soil, while the microbial population decreased in the contaminated soils. In conclusion, oil-containing wastewater polluted soils through modifying ion composition and microbial community and alkalizing soils.

Keywords: oil-containing wastewater flooded soil; contamination mechanism; ion composition; microbial community; salt stress

石油在开采和生产过程中产生的大量废水,往往要回注再利用,但在回注过程中,经常会出现管线泄漏等事故,使含油废水对土地形成一定时间的淹灌,这就是所谓的“油水淹地”。吉林油田现有油井 16 000 口,管线 20 000 km 以上,一些管线已经使用 30 多年,极易漏水、漏油,仅在吉林油田的油水淹地污染土壤的总面积就高达 1000 hm^2 。据统计,我国每年约有

十几亿吨采油废水需要处理,油田废水的成分比较复杂,含盐量、化学需氧量(COD)与悬浮颗粒物含量较高,还含有包括界面剂、破乳剂、混凝剂、絮凝剂、杀菌剂和残留石油等上千种结构复杂的有机物^[1],由于其特殊的物理和化学性质以及难去除和残留时间长的特点,这些油田废水一旦进入土壤形成油水淹地后,会对土壤造成很大程度上的危害,作物无法正常生长,急需修复再利用。

关于石油污染对土壤的影响已有很多报道,Andrade 等^[1]和 Khamehchiyan 等^[2]研究了石油污染土壤的渗透性,认为受石油污染后土壤孔隙度减小进而渗透性降低;贾建丽等^[3]研究表明土壤含油率与含水率

收稿日期:2014-07-16

基金项目:吉林省科技厅项目(20120405)

作者简介:王铁媛(1988—),女,硕士研究生,从事土壤环境和微生物及土地管理研究。E-mail:wangtieyuan1314@163.com

* 通信作者:窦森 E-mail:dousen@tom.com

存在制约关系;王传远等^[4]认为土壤总有机碳(TOC)含量与含油率呈正相关关系,石油污染土壤中 C、N 比例严重失调;Viggor 等^[5]认为石油污染影响了微生物物种的组成。石油对环境的污染主要有 3 种形式:含油固体废弃物、落地原油和含油废水^[6],含油固体废弃物对环境的污染具有可控制性,而落地原油和含油废水对环境的污染具有不可控制性,经常由于意外而产生大范围的污染,石油污染土壤的多数研究都关注落地原油对土壤性质的影响^[1-5],针对含油废水形成的油水淹地这种大范围的油和盐复合污染对土壤性质的影响尚未见报道。本研究对吉林油田含油废水形成的油水淹地土壤进行调查取样,以附近作物生长良好的未污染耕地土壤作为对照,测定了油水淹地土壤的石油含量、离子组成以及微生物群落等性质,以期探究油田废水对土壤性质的影响和污染机理,揭示油水淹地污染土壤不能正常生长作物的原因,为该地区的环境评价和油水淹地土壤的修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤采样

土壤采样地点 3 处,分别位于吉林省松原市宁江区新城乡联合村、长虹村和八家子村,采样地点概况见表 1。于 2013 年 5 月采样,被淹至采样前自然恢复,未做修复处理。将联合村、长虹村和八家子村分别记作采样地 1、2、3,污染区域(Contaminated site)记作 C,在每个村子作物生长良好的耕地上取土作为对照区域记作 CK,每个区域分别设 3 个采样点,在表层 0~20 cm 取样。土壤类型为淡黑钙土,土壤质地为壤土。

1.2 油田废水的基本性质和可溶性盐离子含量

由表 2 可知,油田废水中的主要阳离子为 Na^+ ,

含量为 $6.34 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,含量分别为 0.25 、 $0.14 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$;阴离子主要为 HCO_3^- ,含量高达 $335.0 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于 CO_3^{2-} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。

1.3 测试方法

土壤中石油含量的测定采用超声-紫外法^[7];电位计法测定土壤的 pH 值;电导率仪测定土壤的电导率;重铬酸钾容量法测定土壤有机质; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂中和法测定; Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法测定; SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法测定; K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度法测定;全盐量采用离子加和法^[8];土壤中细菌、真菌及放线菌数量采用稀释平板法^[9];微生物量碳的测定采用氯仿熏蒸浸提法。

1.4 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2003 处理数据。DPS V7.05 系统软件分析数据,用 LSD(Least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与讨论

2.1 油水淹地土壤的石油含量

石油是一种极为稳定的复杂物质^[10],通常将土壤中石油含量小于临界值 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤看作清洁土壤,高于此值则视为污染土壤。从图 1 可以看出,污染区土壤的石油含量明显高于该值,污染土壤 C1、C2、C3 的石油含量分别为 2239 、 2654 、 $3037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别是 CK1、CK2 和 CK3 的 110.10 、 134.97 、 130.14 倍,污染土壤 C 的石油含量显著高于 CK($P < 0.05$)。由于石油烃的水溶性小,土壤颗粒被石油烃吸附后不能形成有效的导水通路,透气性和透水性都会下降。土壤残留石油的组分十分复杂,含有包括苯系化合物、多环芳烃中菲、蒽、芘及酚类等具有较大毒性的多种

表 1 采样地点概况

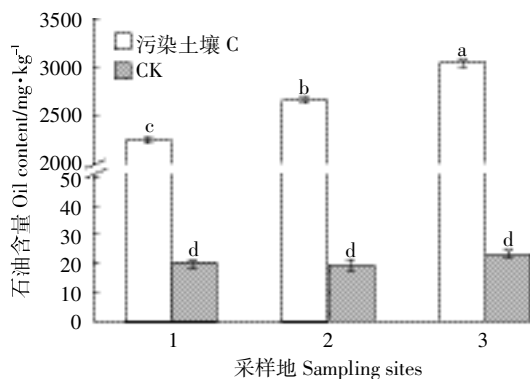
Table 1 Profile of sampling sites

采样地编号 Sampling site number	采样地名称 Sampling site name	油田废水污染时间 Contamination time and duration by oilfield wastewater	污染面积/ m^2 Contamination area	污染区域(C)状况 Contaminated site(C) condition	临近对照区域(CK)状况 Adjacent control(CK) site condition
1	联合村	2009 年 6 月,淹灌 10 个月	8210	油井已废弃,无农作物,有杂草生长	种植大豆,生长情况良好
2	长虹村	2010 年 5 月,淹灌 8 个月	10 020	井场还在生产,无农作物,有少量杂草生长	种植玉米,生长情况良好
3	八家子村	2010 年 2 月,淹灌 11 个月	9150	油井已废弃,无农作物,多处无杂草生长	种植玉米,生长情况良好

表 2 油田废水的基本性质和可溶性盐离子含量($\text{cmol} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 2 Basic properties and soluble salt ion concentrations in oilfield wastewater($\text{cmol} \cdot \text{L}^{-1}$)

石油含量 Oil content/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	电导率 Conductivity/ $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
740.3	7.22	4.89	0.251	0.143	0.000	6.34	0.416	335.0	3.65	1.07



采样地 1、2、3 分别为联合村、长虹村和八家子村；不同小写字母表示 5% 差异显著性水平。下同
Sampling site 1: Lianhe village, 2: Changhong village and 3: Bajiazi village. Different lowercase letters indicate significant difference at 5% level. The same below

图 1 采样地土壤的石油含量

Figure 1 Content of petroleum in studied soils

烃类,这些高分子化合物具有毒性,不但会在作物种子外形成一层粘膜,阻碍种子的呼吸作用和营养吸收,导致种子不能正常萌发,还会在植物根系上形成粘膜,阻碍根系的呼吸与吸收功能,导致根系腐烂^[6],影响作物正常生长。

2.2 油水淹地土壤的有机质含量、pH 值和电导率

土壤的有机质含量、pH 值和电导率见表 3。

污染土壤 C1、C2、C3 的有机质含量分别为 25.05、22.88、27.83 g·kg⁻¹,是相应 CK 土壤的 1.89、1.57、2.16 倍。由于石油中含有大量碳氢化合物,在石油烃存在的污染土壤中有机质含量会升高,王传远等^[4]研究表明石油污染土壤中有机质含量与石油烃之间呈显著正相关,说明污染土壤中的有机质含量有一部分是由石油烃提供。然而,由于石油含量而增加的这部分有机质并不能被生物正常吸收,油水淹地污染土壤的潜在肥力并不能用有机质含量来判断^[11]。

CK1、CK2、CK3 土壤的 pH 值分别为 7.51、7.42、7.65,为中性和弱碱性土壤,污染土壤的 pH 都大于 8.5,均为强碱性土壤。土壤的电导率(EC)可以反映土

壤的盐分状况,污染土壤 C1、C2、C3 的电导率分别为 0.651、0.595、0.712 mS·cm⁻¹,是相应 CK 土壤的 8.31、9.11、10.08 倍。张晓阳等^[11]和刘五星等^[12]研究表明石油的污染使土壤的 pH 值下降,而本研究中油水淹地土壤的 pH 值则因污染而升高;Benka-Coker 等^[13]认为石油污染使土壤电导率降低,与本研究的结果相反。pH 值和电导率与他人研究结果存在的差异可能是由于油水淹地土壤和通常的落地原油污染土壤存在着较大的差异。

2.3 油水淹地土壤的离子组成

土壤钠离子含量过高可能引起土壤次生碱化的发生^[14]。钠吸附比(SAR)是土壤溶液中钠离子和钙镁离子的相对含量,鉴于 SAR 的计算公式还没有统一的标准,本文选择 $Na^+/\sqrt{Ca^{2+}+Mg^{2+}}$ 之比作为非盐化土壤、盐土、盐性碱土和碱土的分类依据^[15],以比值 5、15 和 25 为界限。如图 2 所示,污染土壤的 SAR 与 CK 相差显著,CK 土壤 SAR 的最大值为 1.58(mmol·L⁻¹)^{0.5},污染土壤 C1、C2、C3 的 SAR 分别为 18.03、13.98、17.78 (mmol·L⁻¹)^{0.5}。可知,CK 土壤为非盐性土壤,污染土壤 C2 为盐土,C1、C3 为盐性碱土,SAR 越大,钙镁离子相对于阳离子总量的比值越小,钠离子所占的比值越大,土壤产生盐渍化的危害越大。

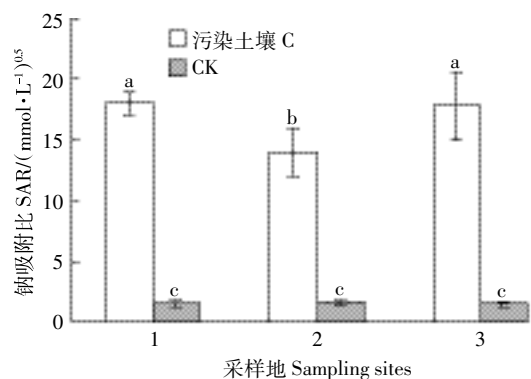


图 2 采样地土壤的钠吸附比(SAR)

Figure 2 Sodium adsorption ratio of soils

表 3 采样地土壤的有机质含量、pH 值和电导率

Table 3 Organic matter content, pH and electrical conductivity of studied soils

采样地土壤 Soils	C1	C2	C3	CK1	CK2	CK3
有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	25.05±1.36b	22.88±0.45c	27.83±1.49a	13.27±0.45d	14.62±0.83d	12.90±0.65d
pH 值	9.16±0.13a	8.97±0.17a	9.12±0.21a	7.51±0.14b	7.42±0.09b	7.65±0.11b
电导率 Conductivity/mS·cm ⁻¹	0.651±0.05b	0.595±0.02c	0.712±0.03a	0.078±0.01d	0.065±0.01d	0.071±0.01d

注: C1、C2、C3 和 CK1、CK2、CK3 分别为采样地 1、2、3 处的污染区域和对照区域;同一行数据后的小写字母为 5% 显著差异水平。下同。

Note: C1, C2, C3 and CK1, CK2, CK3: Contaminated and control soils from sampling site 1, 2, 3, respectively. Different lowercase letters within a row indicate significant difference at 5% level. The same below.

CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 的存在是土壤发生碱化的主要原因,土壤的总碱度(TA)可作为土壤碱化程度的指标之一,是土壤溶液中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的总量。由图 3 可见,CK 土壤TA 的最大值为 $1.73 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,污染土壤 C1、C2、C3 的 TA 值分别为 9.42 、 8.95 、 $9.10 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 CK 差异显著,说明污染土壤的碱化程度过高。

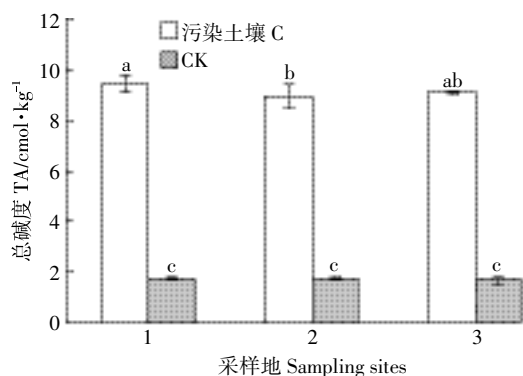
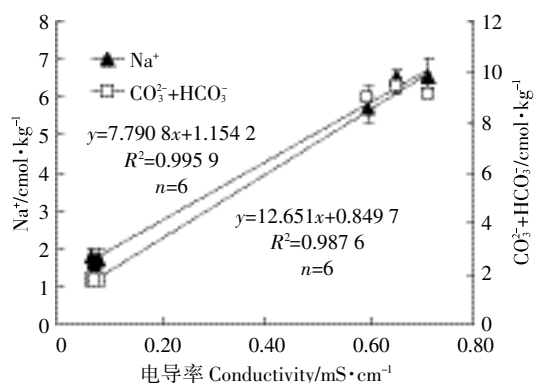


图 3 采样地土壤的总碱度(TA)

Figure 3 Total alkalinity of sampling site soils

土壤可溶性盐离子含量见表 4。污染土壤中,阴离子以 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 为主,C1、C2、C3 土壤的 CO_3^{2-} 含量分别占阴离子总量的 34.60%、36.21%、37.29%, HCO_3^- 含量分别占阴离子总量的 28.08%、29.33%、26.98%;阳离子以 Na^+ 为主,分别占阳离子总量的 93.65%、91.17%和 93.31%。CK 土壤中阴离子 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 占阴离子总量的最大值分别为 28.45%和 24.86%, Na^+ 含量占阳离子总量的最大值仅为 38.03%。由此可知,污染土壤中 Na^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 的含量百分比占绝对优势,并且由图 4 可知电导率与 Na^+ 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的相关系数 R^2 分别为 0.995 9 和 0.987 6,表明污染土壤中 Na^+

图 4 采样地土壤的电导率与 Na^+ 、 CO_3^{2-} 含量的相关性分析Figure 4 Correlation of electrical conductivity and content of Na^+ and CO_3^{2-} in soils

主要与 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 相结合,污染土壤的盐分组成主要为 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 。由油田废水中的可溶性盐离子测定结果可知,废水中主要的阳离子与油水淹地相同,都是以 Na^+ 为主;油田废水中阴离子以 HCO_3^- 为主,而油水淹地中阴离子以 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 为主。这可能是由于油田废水进入土壤后,一部分 HCO_3^- 与 H^+ 结合,失水产生了 CO_3^{2-} 。闫治斌等^[16]认为在可溶性盐离子组成的化合物中, Na_2CO_3 和 NaHCO_3 对植物的毒害作用最大,这可能是导致油水淹地土壤盐碱化和植物生长不良的重要原因之一。从土壤的全盐量来看,CK 土壤的全盐量最大值为 $8.21 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,污染土壤 C1、C2、C3 的全盐量分别达到了 21.95、19.88、21.19 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于 CK。这可能是因为油田废水致使作物无法生长,使裸土表面蒸发量增加,土壤盐分表聚。

植物组织中充足的 K^+ 浓度对植物的正常生长十

表 4 采样地土壤中可溶性盐离子含量

Table 4 Content of soluble salt ions in soils

采样地土壤 Soils	C1	C2	C3	CK1	CK2	CK3
$\text{Na}^+/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$6.49 \pm 0.20\text{a}$	$5.68 \pm 0.34\text{b}$	$6.56 \pm 0.47\text{a}$	$1.71 \pm 0.26\text{c}$	$1.78 \pm 0.22\text{c}$	$1.63 \pm 0.22\text{c}$
$\text{K}^+/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0.18 \pm 0.03\text{b}$	$0.21 \pm 0.03\text{b}$	$0.19 \pm 0.03\text{b}$	$0.39 \pm 0.03\text{a}$	$0.34 \pm 0.03\text{a}$	$0.34 \pm 0.05\text{a}$
$\text{Ca}^{2+}/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0.14 \pm 0.03\text{b}$	$0.16 \pm 0.04\text{b}$	$0.13 \pm 0.03\text{b}$	$1.10 \pm 0.20\text{a}$	$1.38 \pm 0.55\text{a}$	$1.18 \pm 0.20\text{a}$
$\text{Mg}^{2+}/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$0.12 \pm 0.02\text{b}$	$0.18 \pm 0.06\text{b}$	$0.15 \pm 0.07\text{b}$	$1.43 \pm 0.15\text{a}$	$1.18 \pm 0.55\text{a}$	$1.40 \pm 0.10\text{a}$
$\text{Cl}^-/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$2.52 \pm 0.31\text{a}$	$2.04 \pm 0.31\text{b}$	$2.21 \pm 0.38\text{ab}$	$0.88 \pm 0.13\text{c}$	$0.97 \pm 0.21\text{c}$	$0.79 \pm 0.10\text{c}$
$\text{HCO}_3^-/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$4.22 \pm 1.36\text{a}$	$4.01 \pm 0.79\text{a}$	$3.82 \pm 0.67\text{a}$	$0.87 \pm 0.13\text{b}$	$0.77 \pm 0.13\text{b}$	$0.73 \pm 0.19\text{b}$
$\text{CO}_3^{2-}/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$5.20 \pm 1.15\text{a}$	$4.95 \pm 0.31\text{a}$	$5.28 \pm 0.73\text{a}$	$0.87 \pm 0.20\text{b}$	$0.93 \pm 0.20\text{b}$	$0.97 \pm 0.18\text{b}$
$\text{SO}_4^{2-}/\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$3.09 \pm 0.16\text{a}$	$2.67 \pm 0.49\text{a}$	$2.85 \pm 0.55\text{a}$	$0.88 \pm 0.02\text{b}$	$0.84 \pm 0.21\text{b}$	$0.92 \pm 0.27\text{b}$
全盐量/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	$21.95 \pm 0.76\text{a}$	$19.88 \pm 0.22\text{b}$	$21.19 \pm 0.37\text{a}$	$8.12 \pm 0.13\text{c}$	$8.21 \pm 0.16\text{c}$	$7.96 \pm 0.64\text{c}$
Na^+/K^+	$35.69 \pm 3.65\text{a}$	$26.78 \pm 3.90\text{b}$	$34.26 \pm 4.62\text{a}$	$4.43 \pm 0.41\text{c}$	$5.23 \pm 1.05\text{c}$	$4.81 \pm 0.22\text{c}$
$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	$46.69 \pm 10.06\text{a}$	$36.79 \pm 9.24\text{a}$	$51.64 \pm 16.47\text{a}$	$1.62 \pm 0.53\text{b}$	$1.44 \pm 0.63\text{b}$	$1.39 \pm 0.19\text{b}$
$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$	$57.58 \pm 14.77\text{a}$	$34.25 \pm 10.24\text{b}$	$52.45 \pm 26.39\text{ab}$	$1.19 \pm 0.08\text{c}$	$1.87 \pm 1.17\text{c}$	$1.17 \pm 0.22\text{c}$

分关键^[17], K^+ 可以作为植物的渗透调节剂^[18], 植物体内适宜浓度的 K^+ 也对植物的有效叶面积和气孔导度有一定影响, 植物体中的 Na^+/K^+ 与其耐盐能力也存在着一定的关系^[19]。由表4可知, 与CK相比污染土壤的 Na^+/K^+ 值发生了明显的变化, 污染土壤C1、C2、C3的 Na^+/K^+ 值分别是相应CK的8.06、5.12和7.11倍。土壤中 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的关系由图5所示, 随着土壤中 Na^+ 浓度的不断增加, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度不断降低, Na^+ 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在土壤中的含量呈现此消彼长的变化规律。这可能是土壤表层中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与油水中的 Na^+ 发生了离子交换作用, Na^+ 在土壤表面发生聚集现象, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 被淋洗到土壤深层所致^[20]。钙可以通过防止膜脂过氧化, 降低质膜透性, 进而维持细胞内的区域化, 以保证细胞内各种代谢能够正常进行, Ca^{2+} 的缺失还会使种子内淀粉酶活性降低, 从而使种子萌发率降低。盐胁迫下 Na^+ 能够置换细胞膜结合的 Ca^{2+} , 打破细胞间一价(Na^+)和二价(Ca^{2+})离子的平衡, 使膜结构的完整性和通透性遭到破坏, 功能改变^[21]。污染土壤的 Na^+/Ca^{2+} 值变化也很明显, 污染土壤C的 Na^+/Ca^{2+} 值分别是相应CK的28.82、25.55、37.15倍。 Mg^{2+} 能够维持生理代谢关键酶的活性, 是叶绿素的中心分子, 对植物的光和作用具有重要的作用, 而且 Mg^{2+} 还影响着细胞的离子平衡、调节气孔的关闭和呼吸作用, 盐胁迫使得植物无法正常生长^[22-24], 污染土壤C的 Na^+/Mg^{2+} 值分别是相应CK的48.37、18.35和44.77倍, 变化更为明显。

土壤中的可溶性阳离子对植物的生长有很重要的作用^[17-19, 21-24], 过量的 Na^+ 是植物生长受到抑制和产量下降的主要原因^[25-26]。污染土壤中 Na^+ 含量增加, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量明显降低, Na^+ 进入植物使细胞内 Na^+ 大量增加, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 外渗, 使得 Na^+/K^+ 、 $Na^+/$

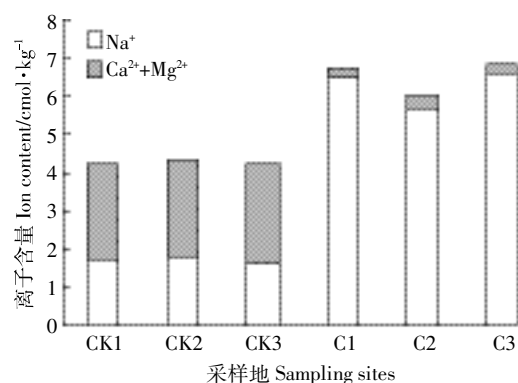


图5 采样地土壤中 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的关系

Figure 5 Content of Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in soils

Ca^{2+} 、 Na^+/Mg^{2+} 的比值上升, 破坏了原有的离子平衡, 当 Na^+/K^+ 、 Na^+/Ca^{2+} 、 Na^+/Mg^{2+} 值超过阈值时植物将无法正常工作。而且盐胁迫还会使植物体内积累许多抑制植物生物合成的有毒代谢产物, 致使植物叶片生长不良, 组织变黑甚至坏死等, 除了毒素积累, 渗透胁迫、营养物质流失也是盐害的重要原因。土壤盐渍化影响作物产量、蛋白质合成和光合作用以及能量代谢^[27-29], 油水淹地污染土壤中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量与CK相比具有较大的差异, 盐胁迫特征明显, 这是植物无法正常生长的一个重要原因。

2.4 油水淹地土壤中微生物群落研究

土壤微生物群落的组成与活性很大程度上决定土壤的肥力和质量, 土壤微生物量碳可作为评价微生物数量和动态的重要参数指标。从表5可以看出, 污染土壤C中细菌、放线菌、真菌的数量均显著低于CK。在土壤的微生物量碳上, 污染土壤也都显著低于CK。虽然仅从微生物数量变化上来判断污染物对土壤质量的影响比较片面, 但是土壤中的细菌、放线菌和真菌这三种微生物的数量与其发挥的生态功能密切相关, 其数量的减少能反映出土壤质量的下降^[30]。刘五星等^[12]、Hilla等^[31]认为石油为微生物提供了丰富的碳源和氮源, 会刺激土壤中微生物的生长, 而孙佳杰等^[32]认为随盐害程度的增加微生物数量会随之减少。在本研究中污染土壤的细菌、放线菌和真菌的数量都显著低于CK, 可能是因为虽然碳源和氮源充足, 但污染土壤中的盐分和其他有害物质却抑制了微生物的生长, 致使细菌、放线菌和真菌这三种微生物的数量都显著低于CK。从微生物量碳的分析结果可知, 污染土壤的微生物量碳均比CK低, 微生物量碳

表5 土壤中细菌、放线菌及真菌的数量和微生物量碳

Table 5 Population of bacteria, actinomycetes and fungi, and microbial biomass carbon in soils

采样地 土壤 Soil	细菌 Bacteria/ $\times 10^5$ cfu $\cdot$ g $^{-1}$	放线菌 Actinomycetes/ $\times 10^4$ cfu $\cdot$ g $^{-1}$	真菌 Fungi/ $\times 10^3$ cfu $\cdot$ g $^{-1}$	微生物量碳 Microbial biomass carbon/mg $\cdot$ kg $^{-1}$
C1	14.91 $\pm$ 1.79c	3.33 $\pm$ 1.24c	3.85 $\pm$ 1.17b	130.6 $\pm$ 9.29b
C2	13.67 $\pm$ 1.71c	3.87 $\pm$ 0.88c	4.19 $\pm$ 0.83b	126.1 $\pm$ 7.73b
C3	12.49 $\pm$ 1.77c	2.87 $\pm$ 0.72c	2.75 $\pm$ 0.73b	122.4 $\pm$ 5.32b
CK1	24.02 $\pm$ 2.02ab	10.61 $\pm$ 2.05ab	11.58 $\pm$ 1.40a	159.6 $\pm$ 7.71a
CK2	22.49 $\pm$ 2.62b	8.67 $\pm$ 1.33b	12.03 $\pm$ 1.57a	166.3 $\pm$ 8.20a
CK3	27.13 $\pm$ 1.99a	11.27 $\pm$ 1.75a	10.48 $\pm$ 1.28a	160.5 $\pm$ 12.90a

注: 同一列数据后的小写字母为5%显著差异水平。

Note: Lowercase letters within a column indicate significant difference at 5% level.

的含量反应着微生物的动态变化,这与土壤中微生物的数量变化一致。

3 结论

(1)油水淹地土壤受到石油的污染,土壤中石油含量与周围正常土壤差异显著,石油含量远远超过了清洁土壤的标准。

(2)油水淹地土壤具有明显的盐化特征,土壤 pH 值、EC、TA、SAR 都明显高于周边正常土壤;土壤盐分离子组成中 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 比例升高,土壤中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量与 CK 相比具有较大差异,盐胁迫特征明显。

(3)油水淹地土壤与周围正常土壤相比,微生物群落也受到影响,污染土壤的微生物数量显著减少。

参考文献:

- [1] Andrade M L, Covelo E F, Vega F A, et al. Effect of the prestige oil spill on salt marsh soil on the coast of Galicia (Northwestern Spain) [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6):2103-2110.
- [2] Khamehchiyan M, Charkhabi A H, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(3-4):220-229.
- [3] 贾建丽, 刘莹, 李广贺, 等. 油田区土壤石油污染特性及理化性质关系 [J]. 化工学报, 2009, 60(3):726-732.
JIA Jian-li, LIU Ying, LI Guang-he, et al. Contamination characteristics and its relationship with physico-chemical properties of oil polluted soils in oilfields of China [J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(3):726-732.
- [4] 王传远, 杨翠云, 孙志高, 等. 黄河三角洲生态区土壤石油污染及其与理化性质的关系 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(2):214-217.
WANG Chuan-yuan, YANG Cui-yun, SUN Zhi-gao, et al. Contamination characteristics and its relationship with physico-chemical properties of oil polluted soils in the Yellow River delta swamp [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2):214-217.
- [5] Viggor S, Juhanson J, Jösaar M, et al. Dynamic changes in the structure of microbial communities in Baltic Sea coastal seawater microcosms modified by crude oil, shale oil or diesel fuel [J]. *Microbiological Research*, 2013, 168(7):415-427.
- [6] 任磊, 黄廷林. 土壤的石油污染 [J]. 农业环境保护, 2000, 19(6):360-363.
REN Lei, HUANG Ting-lin. The soil pollution by petroleum [J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(6):360-363.
- [7] 李纪云, 李丽, 冯成武. 超声-紫外法测定土壤中石油类物质含量 [J]. 石油大学学报, 1999, 23(6):82-83.
LI Ji-yun, LI Li, FENG Cheng-wu. Determination of oil content in soil by ultrasonic and ultraviolet spectrophotometry [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1999, 23(6):82-83.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemistry analysis [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [9] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验 [M]. 三版. 北京: 高等教育出版社, 1999:92.
SHEN Ping, FAN Xiu-rong, LI Guang-wu. Microbiology experiment [M]. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 1999:92.
- [10] 吴伟林, 张秀霞, 单宝来, 等. 不同处置方式对石油污染土壤理化性质和生物学特性的影响 [J]. 石油学报 (石油加工), 2010, 26(5):831-834.
WU Wei-lin, ZHANG Xiu-xia, SHAN Bao-lai, et al. Effect of different treatment methods on the physicochemical and biochemical properties of an oil polluted soil [J]. *Acta Petroleum Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2010, 26(5):831-834.
- [11] 张晓阳, 李凯荣, 张麟君. 陕北石油污染对土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(3):32-38.
ZHANG Xiao-yang, LI Kai-rong, ZHANG Lin-jun. Effect of petroleum contamination on physical and chemical properties of soils in oilfield of Northern Shaanxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3):32-38.
- [12] 刘五星, 骆永明, 滕应, 等. 石油污染土壤的理化性质和微生物生态变化研究 [J]. 土壤学报, 2007, 44(5):848-852.
LIU Wu-xing, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. Physical and chemical properties and microbial ecological change research of oil contaminated soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):848-852.
- [13] Benka-Coker M O, Ekundayo J A. Effects of an oil spill on soil physico-chemical properties of a spill site in Niger Delta Area of Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, 36(2):93-104.
- [14] 范富, 张庆国, 侯迷红, 等. 玉米秸秆隔离层对西辽河流域盐碱土碱化特征及养分状况的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):131-137.
FAN Fu, ZHANG Qing-guo, HOU Mi-hong, et al. Effect of maize straw isolation layer on alkalization characteristics and nutrient status of saline-alkali soil in west Liaohhe region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):131-137.
- [15] 迟春明, 王志春. 松嫩平原盐碱土饱和浸提液与土水比 1:5 浸提液间化学参数的换算关系 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(1):172-176.
CHI Chun-ming, WANG Zhi-chun. Conversion relationships between the chemical parameters in saturated and in 1:5 soil/water extracts of saline and alkaline soils in Songnen Plain of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1):172-176.
- [16] 闫治斌, 秦嘉海, 王爱勤, 等. 盐碱土改良材料对草甸盐土理化性质与玉米生产效益的影响 [J]. 水土保持通报, 2011, 31(2):122-127.
YAN Zhi-bin, QIN Jia-hai, WANG Ai-qin, et al. Effect of improvement materials on meadow saline soil properties and corn productive benefits [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(2):122-127.
- [17] Munns R. Genes and salt tolerance: Bringing them together [J]. *New Phytologist*, 2005, 167(3):645-663.
- [18] Mansour M M F, Salama K H A. Cellular basis of salinity tolerance in plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52(2):113-122.
- [19] Ashraf M Y, Sarwar G. Salt tolerance potential in some members of

- Brassicaceae physiological studies on water relations and mineral contents [M]//Prospects for saline agriculture. Springer Netherlands, 2002:237-245.
- [20] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007:24-28.
- WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong. The soil water movement and solute migration[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007:24-28.
- [21] Zehra A, Gul B, Ansari R, et al. Role of calcium in alleviating effect of salinity on germination of *Phragmites karka* seeds[J]. *South African Journal of Botany*, 2012, 78:122-128.
- [22] 郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- GUO Quan-en. The response mechanism of soil salinity transfer and diversity rule to environment factor[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [23] Loupassaki M H, Chartzoulakis K S, Digalaki N B, et al. Effects of salt stress on concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sodium in leaves, shoots and roots of six olive cultivars [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(11):2457-2482.
- [24] Castillo E G, Tuong T P, Ismail A M, et al. Response to salinity in rice: Comparative effects of osmotic and ionic stress[J]. *Plant Production Science*, 2007, 10(2):159-170.
- [25] Hong C Y, Chao Y Y, Yang M Y, et al. Na^+ but not Cl^- or osmotic stress is involved in NaCl-induced expression of glutathione reductase in roots of rice seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2009, 166(15):1598-1606.
- [26] Aldakheel Y Y. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2011, 39(2):171-180.
- [27] Navarro J M, Pérez-Tornero O, Morte A. Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the rootstock salt tolerance[J]. *Journal of Plant Physiol*, 2014, 171(1):76-85.
- [28] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3):324-349.
- [29] Adolf V I, Jacobsen S, Shabala S. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92:43-54.
- [30] 李 晶, 刘玉荣, 贺纪正, 等. 土壤微生物对环境胁迫的响应机制[J]. 环境科学学报, 2013, 3(4):959-967.
- LI Jing, LIU Yu-rong, HE Ji-zheng, et al. Insights into the responses of soil microbial community to the environmental disturbances[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 3(4):959-967.
- [31] Hilla G T, Mitkowskia N A, Aldrich-Wolfe L, et al. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1):25-36.
- [32] 孙佳杰, 尹建道, 解玉红, 等. 天津滨海盐碱土壤微生物生态特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(3):57-61.
- SUN Jia-jie, YIN Jian-dao, XIE Yu-hong, et al. Microbial ecological characteristics of saline-alkali soil in coastal area of Tianjin[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2010, 34(3):57-61.