

DOI: 10.5846/stxb201406131230

叶瑶,高晓奇,付梦娣,苏荣花,李俊生,肖能文.陇东黄土高原石油开采对土壤线虫群落的影响.生态学报,2016,36(4): - .

Ye Y, Gao X Q, Fu M D, Su R H, Li J S, Xiao N W. Impacts of oil exploration on soil nematode communities in the Loess Plateau of East Gansu Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

陇东黄土高原石油开采对土壤线虫群落的影响

叶 瑶¹, 高晓奇¹, 付梦娣¹, 苏荣花², 李俊生¹, 肖能文^{1,*}

1 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2 庆阳市环境保护局, 庆阳 745000

摘要:为研究陇东黄土高原石油开采对土壤线虫影响的强度与范围,选择长庆油田不同开采年限(1a、10a和20a)油井共6口,按照距井基不同距离(3m、6m、10m、20m和50m)采集土壤样品90个,共鉴定出土壤线虫22科43属;其中,食细菌线虫26属、食真菌线虫2属、植物寄生线虫9属、杂食/捕食线虫6属,优势类群为小杆属 *Rhabditis* 和孔咽属 *Aporcelaimus*。土壤线虫生活史策略以c-p 2类群占优势,不同距离采样点,土壤线虫c-p 2和c-p 5差异极显著($P < 0.01$)。随着距井基距离增加(3m、6m、10m、20m和50m)线虫总数显著增加;其中,植食类、捕食杂食类和食真菌类线虫数量增加显著,且线虫群落多样性指数(H')显著增加($P < 0.05$)。但不同距离之间 λ 、 J 和 WI 差异不显著。不同开采年限油井,以10a土壤线虫群落多样性指数(H')、成熟度指数(MI)和瓦斯乐斯卡指数(WI)最低,而1a油井和20a油井较高,且与10a油井差异显著($P < 0.05$)。油井作业改变周围土壤性质,导致土壤含水率降低、总石油烃(TPH)含量增高,但土壤线虫分布与土壤TPH无明显相关。研究结果表明,油田开采影响土壤线虫的组成与群落结构,但影响范围一般局限在作业区范围,指数 H' 和 MI 能较好的指示油田开采对线虫群落的影响。

关键词:陇东黄土高原;石油开采;土壤线虫;总石油烃含量;群落结构

Impacts of oil exploration on soil nematode communities in the Loess Plateau of East Gansu Province, China

YE Yao¹, GAO Xiaoqi¹, FU Mengdi¹, SU Ronghua², LI Junsheng¹, XIAO Nengwen^{1,*}

1 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Qingyang Environmental Protection Bureau, Qingyang 745000, China

Abstract: Pollution generated during the processes of oil drilling and extraction is caused primarily by crude oil leaks, drilling mud, wastewater from washing equipment, and flushing of wells. After contamination by petroleum, the physical and chemical properties of soil may change and the community structure and species diversity of soil animals may be altered. This study aimed to evaluate whether oil exploitation affects soil nematode communities and the range of such effects. Six oil wells (38° 00' 35.2" to 38° 01' 29.9" N and 118° 37' 21.4" to 118° 39' 43.8" E) in the Loess Plateau of East Gansu Province, with different exploitation periods (1, 10, and 20 a), were selected for study. Triplicate soil samples were collected at distances of 3, 6, 10, 20, and 50 m from wellheads and in three directions from the well bases. Soil nematodes were identified to the genus level. There were a total of 43 genera in 22 families, including 26 genera of bacterivores, nine genera of herbivores, two genera of fungivores, and six genera of omnivore-predator nematodes. Dominant groups belonged to *Rhabditis* and *Aporcelaimus*, with 15.2% and 10.0% of total nematodes, respectively. Common groups (17 genera), accounted for 68.7% of all nematodes, whereas rare groups (15 genera), accounted for only 6.1% of the total. The largest

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2013-YSKY-16)和国家科技支撑项目(2008BAC43B01)

收稿日期:2014-06-13; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaonw@163.com

colonizer-persister (c-p) proportion of nematodes belonged to the c-p 2 guild with 48.2% of total nematodes. The smallest c-p proportion was c-p 4, with 2.2% of the total. The proportion of c-p 2 and c-p 5 nematodes changed significantly with sample distance from the wellheads ($P < 0.01$). The minimum nematode abundance occurred at 3 m ($23.5 \pm 7.1 \text{ ind}/100 \text{ cm}^3$) from a wellhead. The minimum nematode abundance was greatest ($122.7 \pm 15.5 \text{ ind}/100 \text{ cm}^3$) outside of the work area (50 m). Nematode abundance was significantly higher at 50 m than within the oilfield operations area (3 m, 6 m, 10 m, 20 m). The most abundant feeding type was bacterivores, followed by herbivores. The number of herbivores, fungivores, and omnivores-predators increased significantly with increase in the distance from the wellheads (3 m, 6 m, 10 m, 20 m and 50 m). The Shannon-Wiener index (H') of soil nematodes was also significantly higher at 50 m than within the operation areas ($P < 0.05$). However, the differences in Simpson index (λ), Evenness index (J), and Wasilewska index (WI) of soil nematodes between distances was not significant in operation and non-operation areas. The H' , Maturity index (MI) and WI indices were significantly different between 1, 10, and 20 a oil wells ($P < 0.05$). The wells with 10 a of exploitation showed the lowest H' , MI , and WI for the soil nematode community, compared to oil wells used for 1 or 20 years. Oil exploitation reduced soil moisture and increased total petroleum hydrocarbon (TPH) content. However, no significant correlation was found between the distribution of soil nematodes and soil moisture or TPH. The results showed that oil exploration did affect the composition and community structure of soil nematodes, but the effect range was limited to wellsite operations in the range of about 20 m around the well bases. The Shannon-Wiener index and MI was useful for evaluating the effect of oil exploration on the soil nematode community.

Key Words: Loess Plateau of East Gansu Province; oil exploitation; soil nematodes; total petroleum; hydrocarbons; community structure

陇东黄土高原地处甘肃东部,属黄河中游黄土高原沟壑区,区内塬(梁)川(沟)相间,高差 400 m;其西北部,由于严重的水土流失,已演变成梁峁丘陵区。甘肃省庆阳市是长庆油田的主产区之一,油田开采历史长,自 1971 年油田开发以来,已有 40 多年的历史。自“十二五”以来,进入开采高峰期,2011 年原油产量达到 $451.66 \times 10^4 \text{ t}^{[1]}$ 。开采方式由最初的粗放式开采,到现在的规范化生产。该区域为生态脆弱区,生态环境容易受到破坏。石油开采使得土壤发生扰动,地表结构改变,增加了水土流失和生态破坏的风险。同时,石油开采、维修及运输中的泄漏对土壤环境造成污染,这些污染物(石油中的烃类化合物)经多途径进入环境后较难降解消失,对土壤环境以及土壤动物造成危害,降低整个生态系统中物种丰富度及多样性指数,对生态系统造成难以修复的危害^[2]。

线虫是土壤动物区系中种类最为丰富的无脊椎动物之一,它们参与土壤有机质分解、植物营养矿化和养分循环等重要生态过程,在土壤食物网中占有重要地位^[3],被广泛地应用于土壤健康状况与土壤环境污染指示研究^[4]。线虫群落研究发展相对成熟,如成熟度指数(Maturity index, MI)能敏感地反映土壤环境的胁迫程度^[5]。线虫通路指数(Nematoda channel ratio, NCR)能表示土壤有机质的分解途径^[3, 6]。石油开采影响土壤线虫,一般认为油田污染土壤对土壤线虫有明显毒性^[7],采油区线虫数量减少^[8-9]。但也有研究者认为使用开采污染区土壤后线虫多样性有所增加^[10]。并且不同营养类型土壤线虫对石油开采污染的反应不一,Heininger 等认为石油污染条件下,捕食/杂食类线虫数量与污染呈正相关^[11],而 Chen 等认为该类群数量与污染呈负相关^[12]。陇东黄土高原油井钻井、维修区域一般在油井口周围 20 m 左右范围,该区域为标准化作业区,近 10 多年的油井均有围墙隔离,作业区内无植被杂草覆盖,土地利用方式、土壤理化性质与污染程度与周围环境有明显的差别。并且不同油田油井密度不一,开采历史以及开采方式不一样,油田的管理水平不一样。因此,石油开采对土壤的污染状况以及对土壤生物的影响还有待进一步研究。

为了研究石油开采对土壤线虫群落的影响,在陇东黄土高原长庆油田选择环境一致的不同开采年限(1 年、10 年和 20 年)油井,按不同距离采集土壤线虫,分析黄土高原石油开采过程中油井开采年限以及距离与

线虫群落结构的关系,揭示石油开采对土壤线虫群落的影响,其结论将为石油开采生态保护以及开采区污染土壤的修复打下理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究地区概况

本研究选取位于中国甘肃省庆阳市华池县黄土高原区的长庆油田(107°29'—108°33' E, 36°07'—36°51' S)作为研究区。该区属于黄土高原丘陵沟壑区,年平均降水量为 510 mm,年平均气温为 8.7 °C,无霜期 178 d^[13]。油井作业区一般为 20 m,除部分老旧油井,大部分都有围墙,围墙外为自然植被类型。

1.2 样地的设定

2013 年 9 月在长庆油田选取开采时间为 1 a(井 I 和 II)、10 a(井 III 和 IV)和 20 a(井 V 和 VI)的油田各 2 井,在距离采油井口分别为 3 m、6 m、10 m、20 m 和 50 m 处,以油井为中心向 3 个方向辐射布点采样,共采集 90 个土壤样品^[14]。每个采样点设 2 m×1 m 样方,在样方内选择 3 个点取土,用土钻采集深度为 0—15 cm 的表土,将其均匀混合后,制成约 500 mL 混合土样放入保温袋中并迅速移至实验室,冰箱 4 °C 保存,带回实验室分离土壤线虫和进行理化分析,以 3 个方位作为不同距离重复。

1.3 土壤理化性质测定

土样的含水率用土壤水分测量仪 TRIME-PICO-IPH TDR 测定。按 2.5:1 的水土比制备土壤水浸液,用玻璃电极 pH 仪测定 pH 值。土壤总石油烃(total petroleum hydrocarbon, TPH)采用重量法测定^[15]。称取 5.00 g 风干土样,添加萃取剂二氯甲烷,超声 15 min,4000 r/min 离心 10 min,重复萃取,收集上清液,54 °C 旋转蒸发至干,在通风橱内挥发至恒重,称重。同时做 2 个平行样。

有机碳(organic carbon, OC)测定采用 Analytikjena multi N/C 3100 TOC 仪器测定。将自然风干两周土样用研钵轻研磨,过 0.5 mm 筛,称量样品 300 mg 左右,装入取样舟,加入盐酸酸化,105—110 °C 烘箱干燥 12 h,催化燃烧测定。

1.4 线虫分离、鉴定

每个土样取土 100 cm³,3 d 内用改进的 Baermann 漏斗法分离线虫 48 h^[16],收集线虫悬浮液并浓缩至 2 mL,用 4%福尔马林溶液固定。光学显微镜下参照 Goodey 的分类系统^[17]和《中国土壤动物检索图鉴》^[18]以及《植物线虫志》^[19],将线虫鉴定到属,并统计各属线虫数量。

1.5 土壤线虫群落多样性分析

土壤线虫依据 Yeates 等分为 4 个营养类型^[20],分别为食细菌类(Bacterivores, Ba)、食真菌类(Fungivores, Fu)、植物寄生类(Herbivores, PP)和杂食捕食类(Omnivores-predators, OP)。线虫数量多度划分的标准为:个体数占线虫总数的百分比>10%为优势属;1%—10%为常见属;<1%为稀有属^[21]。

研究采用的生态学评价指数如下。Shannon-Wiener 多样性指数(H'), $H' = - \sum P_i \ln P_i$, $P_i = n_i/N$,式中 P_i 为样品中属于第 i 种的个体的比例; n_i 为第 i 类群的个体数; N 为所有类群的个体总数^[22]。Pielou 均匀度指数(J'), $J' = H'/\ln S$, S 为类群数^[23]。Simpson 优势度指数(λ), $\lambda = \sum (n_i/N)^2$, $\lambda = \sum H'^2$ ^[24]。线虫成熟指数(Maturity index, MI), $MI = \sum v(i) \cdot f(i)$, $v(i)$ 是第 i 种线虫的生活史策略(colonizer persister, c-p)值; $f(i)$ 第 i 种线虫的个体数占总个体数的比例^[5]。线虫通路比值(Nematoda channel ratio, NCR), $NCR = N_{Ba}/(N_{Ba} + N_{Fu})$, 瓦斯乐斯卡指数(Wasilewska index, WI)^[25]: $WI = (N_{Ba} + N_{Fu})/N_{PP}$, N_{Ba} 为食细菌线虫数量, N_{Fu} 为食真菌线虫数量, N_{PP} 为食植物类线虫数量^[3]。根据线虫不同的生活史策略,将线虫划分为 5 个 colonizer persister (c-p)类群,分类参考 Neher 等^[26]。

1.6 数据分析

数据采用 SPSS 软件(13.0 版, SPSS Inc.)分析。不同年限油井和不同距离采样点土壤线虫的差异用

ANOVA 分析,处理间差异显著性检验采用最小极差法(Least-Significant Difference, LSD)方法。群落排序使用 Canoco for win 4.5 软件进行分析^[27],采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)对物种丰富度和环境进行群落排序,将物种丰富度采用 $\log(x+1)$ 进行处理以满足正态分布假设。

2 结果与分析

2.1 油田开采对土壤性质的影响

距井基不同距离(3 m、6 m、10 m、20 m 和 50 m)土壤性质有较大差异(表 1),土壤含水率在 50 m 采样点处最高达(8.98±1.26)%,显著高于其它采样距离土壤含水率。土壤总石油烃(TPH)浓度在 3 m 和 6 m 显著高于 10 m、20 m 和 50 m。

双因素方差分析表明,不同距离土壤含水率和 TPH 浓度差异极显著($P<0.001$),但各采样点 pH 值和有机碳含量差异不显著($P>0.05$)。不同开采年限油井土壤 pH 值和 TPH 有显著差异($P<0.05$),但不同年限油井土壤含水率和有机碳含量差异不显著。开采年限和距离对土壤性质无交互效用($P>0.05$)(表 2)。

表 1 各采样点土壤主要理化性质(N=18)
Table 1 The soil quality of sample sites(N=18)

距离 Distances	含水率 Moisture content/%	pH	总石油烃 Total petroleum hydrocarbon/(mg/g)	有机碳 Organic carbon/(mg/g)
3 m	3.69±0.31b	8.77±0.13a	9.99±1.92a	13.53±3.40a
6 m	3.98±0.20b	8.79±0.08a	10.78±2.49a	13.32±5.58a
10 m	3.66±0.40b	8.75±0.07a	5.31±0.95b	10.63±3.10a
20 m	4.28±0.35b	8.62±0.04a	5.10±1.14b	11.20±3.83a
50 m	8.98±1.26a	8.54±0.05a	3.00±0.79b	12.47±5.68a

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.2 土壤线虫科属及营养类群

共采集土壤样品 90 个,鉴定出土壤线虫 22 科 43 属。食细菌线虫有 26 属,食真菌线虫 2 属,植物寄生线虫 9 属,杂食/捕食线虫 6 属。其中,优势类群为小杆属 *Rhabditis* 和孔咽属 *Aporcelaimus*,分别占线虫总数的 15.2%和 10.0%;常见类群有 17 属,占线虫总数的 68.7%;稀有类群 15 属,占总线虫数量的 6.1%(表 3)。

不同距离土壤线虫优势类群差异较大;其中,3 m 处优势类群为散香属 *Beleodorus* 和头叶属 *Cephalobus*,6 m 和 10 m 处的优势类群均为小杆属 *Rhabditis* 和中杆属 *Mesorhabditis*,20 m 处优势类群为滑刃属 *Aphelenchoides*、短体属 *Pratylenchus* 和孔咽属 *Aporcelaimus*,50 m 处优势类群为针属 *Paratylenchus*、滑刃属 *Aphelenchoides* 和孔咽属 *Aporcelaimus*。

双因素方差分析表明,不同距离线虫属数量差异显著($F=2.72, P=0.04$)(表 2),不同年限油井线虫属数量存在极显著差异($F=15.11, P<0.001$),但开采年限和距离间无交互效用($F=0.92, P=0.5$)。

各油井线虫生活史策略 colonizer persister (c-p)以 c-p 2 类群为主,占总数的 48.2%;其次为 c-p 1,占 25.1%;而 c-p 4 类群占比例最小,仅为 2.2%。距井基不同距离采样点土壤线虫 c-p 组成差异较大(图 1),3 m 处以 c-p 2 比例最高达 65.7%,其次为 c-p 1,而 c-p 4 比例最小。在 6 m 和 10 m 处 c-p 1 比例最高,其次为 c-p 2。而在 20 m 和 50 m 处,土壤线虫以 c-p 2 比例最高,其次为 c-p 3,而 c-p 4 比例最低。方差分析结果表明,不同距离采样点,土壤线虫 c-p 2 和 c-p 5 差异极显著($P<0.01$),而其它类群差异均不显著($P>0.05$)。

2.3 油田开采对不同营养类型线虫数量的影响

距井基不同距离的土壤线虫数量差异较大(图 2)。其中,3 m 处线虫密度最小,为(23.5±7.1)条/100 cm³;6 m、10 m 和 20 m 处线虫数量有所增加且较为接近,作业区 50 m 外线虫数量最多达到(122.7±15.5)条/100 cm³。50 m 处土壤线虫数量显著高于油田作业区(3、6、10、20 m)。不同开采年限油井土壤线虫如表 3 表示,开采年限 10 a 油井土壤线虫数量最低,仅为(46.4±10.8)条/100 cm³,而开采年限 20 a 油井土壤线虫数量

表 2 不同距离以及不同开采年限油井土壤线虫数量以及群落指数双因素方差分析
Table 2 Thetwo-ways ANOVA analysis of the number of soil nematodes and community ecology index

方差来源 Sources	pH	湿度 Moisture	有机碳 Organic carbon	总石油烃 Total petroleum hydrocarbon	属数 Genera	植食性 线虫 Herbivores	食细菌 线虫 Bacterivores	杂食/捕食 类线虫 Omnivores- predators	食真菌 线虫 Fungivores	线虫总数 Abundance	优势度 指数 Simpson index	多样性 指数 Shannon- Wiener index	均匀度 指数 Evenness index	成熟度 指数 Maturity index	瓦斯乐斯卡 指数 Wasilewska index
距离	df 4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Distances	F 2.12	12.79	1.24	4.58	2.72	7.75	2.44	2.72	5.03	3.51	1.39	1.27	2.01	4.00	1.16
年限	P 0.09	<0.001**	0.30	<0.001**	0.04	<0.001**	0.10	0.07	0.01**	0.01**	0.25	0.29	0.10	0.01**	0.34
Years	df 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	F 3.87	0.48	2.89	4.03	15.11	6.93	0.75	4.03	5.74	0.54	4.59	12.77	2.10	15.87	4.61
距离 * 年限	P 0.03*	0.62	0.06	0.02*	0.00	<0.001**	0.56	0.01**	<0.001**	0.59	0.01*	<0.001**	0.13	<0.001**	0.01**
Distances * Years	df 8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	F 1.42	0.93	0.59	0.43	0.92	2.32	1.41	1.33	3.44	2.38	1.98	1.16	2.49	1.47	0.57
距离 * 年限 * 年限	P 0.21	0.50	0.78	0.90	0.50	0.03*	0.21	0.25	<0.001**	0.03*	0.06	0.34	0.02*	0.19	0.80

* 表示差异显著, ** 表示差异极显著。

表3 距井基不同距离线虫科属丰富度、营养类型及 c-p 值

Table 3 The abundance, feeding type and c-p values of nematodes at different distances from the oil wells

线虫科 Families	线虫属 Genera	营养类型* feeding type (FT)	c-p 值** c-p value	不同距离线虫数量 /100 cm ³ (Mean±SD) Abundance of nematodes				
				3 m	6 m	10 m	20 m	50 m
盆咽线虫科	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	Ba	1	0.5±1.3	0.1±0.4	0.9±2.3	0.1±0.3	0.8±1.2
Panagrolaimidae	瓣唇属 <i>Panagrobelus</i>	Ba	1	0.1±0.3	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
小杆线虫科	小杆属 <i>Rhabditis</i>	Ba	1	1.1±2.5	21.9±58.7	16.9±58.6	4.3±11.4	0.5±0.8
Rhabditidae	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	Ba	1	0.9±1.9	5.6±11.8	6.4±17.3	2.1±4.8	2.4±3.8
	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	Ba	1	0.5±1.6	5.2±19.3	0.3±1.0	0.2±0.6	0.7±1.3
	钩唇属 <i>Diploscapter</i>	Ba	1	0.1±0.3	0.1±0.4	0.4±0.6	0.1±0.3	1.6±2.9
绕线虫科 Plectidae	绕线属 <i>Plectus</i>	Ba	2	0.3±0.6	0.1±0.4	0.2±0.4	0.3±0.5	0.0±0.0
头叶线虫科	丽突属 <i>Acrobeles</i>	Ba	2	0.2±0.8	0.1±0.5	0.0±0.0	0.1±0.5	2.0±7.7
Cephalobidae	拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	Ba	2	0.3±0.9	0.5±1.1	0.3±0.6	0.5±0.8	0.5±1.1
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	Ba	2	4.2±5.0	3.4±4.5	2.1±2.2	4.8±5.9	11.5±20.4
	板唇属 <i>Chiloplacus</i>	Ba	2	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.3	0.3±0.8	0.2±0.8
	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	Ba	2	1.7±2.4	1.7±2.5	0.1±0.4	1.3±2.1	1.8±2.8
畸头线虫科 Teratocephalidae	畸头叶属 <i>Teratocephalus</i>	Ba	3	0.9±2.4	0.9±2.6	0.8±2.3	0.7±1.2	0.1±0.3
单宫线虫科 Monhysteridae	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	Ba	3	0.1±0.4	0.3±0.6	0.0±0.0	0.1±0.5	0.0±0.0
无咽线虫科 Alaimidae	无咽属 <i>Alaimus</i>	Ba	4	0.0±0.0	0.1±0.4	0.1±0.3	0.1±0.3	0.0±0.0
垫刃线虫科	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	PP	2	0.1±0.3	0.3±0.5	0.0±0.0	1.7±0.0	2.0±4.6
Tylenchidae	丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	PP	2	1.0±1.4	0.7±0.8	1.5±3.2	1.5±3.4	9.6±18.5
	马氏垫刃属 <i>Malenchus</i>	PP	2	0.9±1.3	0.6±0.8	0.9±1.3	0.4±0.8	0.9±2.5
	裸矛属 <i>Psilenchus</i>	PP	2	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.3	0.0±0.0	1.9±7.2
	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	Fu	4	0.1±0.3	0.3±1.3	0.0±0.0	1.7±6.2	2.0±7.0
短体线虫科	短体属 <i>Pratylenchus</i>	PP	3	0.0±0.0	0.1±0.5	0.2±0.6	6.3±22.4	0.8±1.9
Pratylenchidae	潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	PP	3	0.1±0.3	0.1±0.3	0.0±0.0	0.0±0.0	0.2±0.8
刺线虫科 Belonolaimidae	矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	PP	3	0.1±0.3	1.3±4.6	0.3±0.8	0.1±0.5	15.2±28.5
伪垫刃科 Nothotylenchidae	散香属 <i>Beleodorus</i>	PP	2	4.5±10.4	2.1±4.7	1.4±3.8	1.7±2.9	3.8±10.2
纽带线虫科	盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	PP	3	1.4±5.2	0.9±2.9	0.5±1.1	0.3±0.8	6.0±16.6
Hoplolaimidae	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	PP	3	0.3±0.6	0.5±0.6	1.0±2.4	0.7±1.1	2.1±4.1
针线虫科 Paratylenchidae	针属 <i>Paratylenchus</i>	PP	2	0.9±3.1	0.7±1.3	0.5±0.9	7.9±25.4	14.0±23.5
拟滑刃线虫科 Aphelenchoididae	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	Fu	2	0.8±1.6	3.3±6.2	3.9±5.7	6.5±8.5	14.3±23.0
滑刃线虫科 Aphelenchidae	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	Fu	2	0.4±0.9	0.3±1.0	1.1±1.8	1.1±1.9	6.7±11.5
孔咽线虫科 Aporcelaimidae	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	OP	5	1.8±3.1	0.5±0.8	1.6±2.7	6.1±13.0	19.1±31.9
矛线线虫科 Dorylaimoidae	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	OP	4	0.2±0.8	0.1±0.3	0.0±0.0	0.1±0.5	1.7±4.4
矛线虫科 Dorylaimidae	原矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	OP	4	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.1±0.3
长尾滑刃线虫科 Seinurinae	长尾滑刃属 <i>Seinura</i>	OP	2	0.1±0.3	1.0±3.1	0.4±0.9	2.4±5.1	0.7±1.4
单齿线虫科 Mononchidae	单齿属 <i>Mononchus</i>	OP	4	0.1±0.3	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0

* 线虫营养类型参考 Yeates et al (1993)^[20], * * c-p (colonizer persister) 为线虫生活史策略, 分类参考 Neher et al (1995)^[26]。其中, Ba (Bacterivores); 食细菌线虫, Fu (Fungivores); 食真菌线虫, OP (Omnivores-predators); 杂食/捕食类线虫, PP (Herbivores); 植食性线虫。

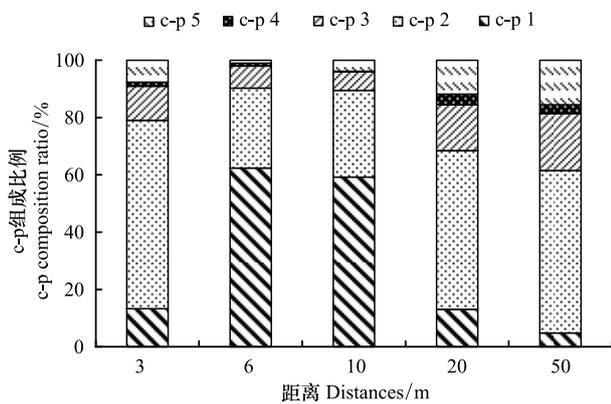


图1 不同距离采样点土壤线虫 c-p 组成比例

Fig. 1 The composition ratio of soil nematode c-p at different distances from the oil wells

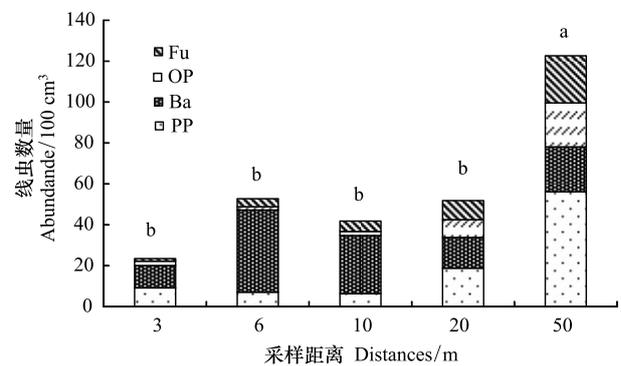


图2 距井基不同距离各营养类型线虫数量及线虫总量

Fig. 2 the total number and number of each feeding type of nematodes at different distances from the oil wells

相同字母表示组间无显著性差异,不同字母表示有显著性差异, $\alpha=0.05$ 。

最高,达到 (69.2 ± 12.6) 条/ 100 cm^3 。双因素方差分析结果表明,不同距离土壤线虫数量差异显著($F=3.51, P=0.01$),不同开采年限土壤线虫数量无显著差异($F=0.54, P=0.58$),且开采年限和距离对土壤线虫总数有交互效用($F=2.38, P=0.03$)(表2)。

不同营养类型土壤线虫以食细菌线虫数量最多,其次为植食性线虫。各营养类型在不同距离差异较大,植食性线虫、捕食杂食类和食真菌类线虫数量以50 m处最多,分别为 (56.1 ± 10.9) 、 (21.5 ± 6.2) 和 (23.1 ± 6.4) 条/ 100 cm^3 ,与其它几个距离采样点差异显著($P < 0.05$)。但食细菌线虫数量在不同距离采样点差异不显著($F=0.69, P=0.601$)。不同开采年限油田不同营养类型土壤线虫差异较大。植食性线虫20 a其中,20 a油井最多,为 (35.8 ± 9.9) 条/ 100 cm^3 ;10 a油井最少,为 (1.5 ± 2.1) 条/ 100 cm^3 。不同年限油井食细菌线虫差异不显著。捕食/杂食类线虫和食真菌线虫以1 a油井最多,为 (12.0 ± 5.5) 和 (14.2 ± 5.7) 条/ 100 cm^3 ,而10 a油井最少,为 (1.3 ± 2.3) 和 (1.8 ± 2.3) 条/ 100 cm^3 ,且差异显著(表4)。双因素方差分析结果表明,不同距离土壤植食性线虫和食真菌线虫数量差异极显著($P < 0.01$),不同开采年限土壤植食性线虫、食真菌线虫和捕食/杂食类线虫数量显著极差异($P < 0.01$),且开采年限和距离对土壤植食性线虫和食真菌线虫数量有交互效用($P < 0.01$)(表2)。

表4 不同开采年限油井土壤各营养类型线虫数量及线虫总量($N=30$)Table 4 the total number and number of each feeding type of nematodes at oil wells with different exploitation periods ($N=30$)

年限 Years	植食性线虫 Herbivores	食细菌线虫 Bacterivores	杂食/捕食类线虫 Omnivores-predators	食真菌线虫 Fungivores	线虫总数 Abundance of nematodes
10年 Ten years	1.5 ± 2.1 b	41.8 ± 10.0 a	1.3 ± 2.3 b	1.8 ± 2.3 b	46.4 ± 10.8 a
20年 Twenty years	35.8 ± 9.9 a	15.5 ± 5.3 a	8.2 ± 4.2 ab	9.6 ± 4.0 ab	69.2 ± 12.6 a
1年 One year	21.3 ± 7.6 ab	12.5 ± 5.5 a	12.0 ± 5.5 a	14.2 ± 5.7 a	60.0 ± 12.3 a

不同年限处理间,字母相同表示组间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异, $\alpha=0.05$ 。

2.4 油田开采对土壤线虫群落结构的影响

距井基不同距离线虫群落指数如表5,Shannon-Wiener多样性指数(H') 在50 m处最高达 2.558 ± 0.869 ,在3 m处最低,而50 m处 H' 显著高于3 m处。优势度指数(λ)为0.796—0.827,均匀度指数(J)为0.822—0.869,但不同距离之间 λ 和 J 差异不显著。成熟度指数(MI) 在3 m处最高达 2.712 ± 1.13 ,显著高于6 m和10 m处。瓦斯乐斯卡指数(WI) 指数在各个距离差异不显著,线虫通路比值(NCR) 也以3 m处最高,显著高于10 m、20 m和50 m处。双因素方差分析表明, MI 指数在各个距离间存在显著差异($F=4.00, P=0.01$)(表2)。

表 5 距油井不同距离土壤线虫群落生态学指数 ($N=18$)Table 5 the community ecology index of soil nematode at different distances from oil wells ($N=18$)

距离 Distances	优势度指数 Simpson index	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Evenness index	成熟度指数 Maturity index	瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index	线虫通路比值 Nematode Channel Ratio
3 m	0.796±0.379 a	2.083 ±0.833b	0.862 ±0.350a	2.712 ±1.135a	2.516 ±1.869a	0.890±0.351a
6 m	0.800±0.385 a	2.382 ±0.769ab	0.833 ±0.393a	1.895 ±0.717b	8.325 ±4.205a	0.783 ±0.474ab
10 m	0.827±0.362 a	2.251 ±0.832ab	0.869 ±0.342a	1.867 ±0.758b	4.457 ±2.540a	0.674 ±0.566b
20 m	0.806±0.359a	2.494 ±0.663ab	0.822 ±0.369a	2.266 ±0.857ab	9.606 ±4.258a	0.663 ±0.516b
50 m	0.824±0.403a	2.558 ±0.869a	0.826 ±0.407a	2.392 ±0.914ab	1.962 ±1.410a	0.670 ±0.575b

不同距离处理间,字母相同表示组间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异, $\alpha=0.05$ 。

不同开采年限油井线虫群落指数表示(表 6),多样性指数 H' 以 20 a 和 1a 油井较高,而 10 a 油井最低,为 1.912 ± 0.806 ,且 1 a 油井和 20a 油井 H' 显著高于 10 a 油井。优势度指数以 1 a 油井最高,为 0.847 ± 0.320 ,显著高于 10 a 油井。范围为 0.796—0.827,均匀度指数范围为 0.820—0.871,但不同开采年限油井均匀度指数差异不显著。 MI 和 WI 指数以 20 a 和 1 a 油井较高,而 10 a 油井较低,且 1 a 油井和 20 a 油井 MI 和 WI 指数显著高于 10 a 油井。 NCR 则以 10 a 油井最高,且显著高于 20 a 和 1 a 油井。方差分析表明, λ 、 H' 、 MI 、 WI 和 NCR 指数在不同年限油井存在极显著差异 ($P<0.01$) (表 2),且开采年限和距离对土壤线虫均匀度指数有交互效用 ($P<0.01$)。

表 6 不同开采年限油井土壤线虫群落生态学指数 ($N=30$)Table 6 the community ecology index of soil nematode at wells with different exploitation periods ($N=30$)

年限 Years	优势度指数 Simpson index	多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Evenness index	成熟度指数 Maturity index	瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index	线虫通路比值 Nematode Channel Ratio
10 年 Ten years	0.767 ±0.417b	1.912±0.806b	0.838 ±0.408a	1.595 ±0.650b	15.065 ±4.524b	0.914 ±0.385a
20 年 Twenty years	0.814 ±0.364ab	2.609 ±0.710a	0.820 ±0.373a	2.504±0.887a	2.595 ±2.065a	0.636 ±0.530b
1 年 One year	0.847±0.320a	2.493 ±0.778a	0.871±0.325a	2.580 ±0.982a	1.565 ±1.229a	0.627±0.528b

不同年限处理间,字母相同表示组间无显著性差异,字母不同表示有显著性差异, $\alpha=0.05$ 。

2.5 土壤线虫群落排序

对不同距离采样点土壤线虫进行物种-环境典范对应分析 CCA 排序,第一轴和第二轴特征值分别为 0.132 和 0.093,且物种和环境的相关性分别达到 0.702 和 0.745,且结果均达到显著水平 ($P<0.05$),能很好的解释物种分布。

从排序图(图 3)可以看出,土壤性质与第二轴较为相关,而不同采样距离与第一轴更为相关,其中 3 m、6 m、10 m 和 20 m 处土壤线虫与第一轴显著正相关,而 50 m 处与第一轴显著负相关。3m 处土壤线虫分布受 TPH 影响较大,50 m 处线虫与土壤湿度较为相关。而真矛线属 *Eudorylaimus* 的分布与土壤湿度较为相关。与 50 m 处相关的物种有原矛线属 *Prodorylaimus* 与矮化属 *Tylenchorhynchus*;而小杆属 *Rhabditis*、畸头叶属 *Teratocephalus*、棱咽属 *Prismatolainus*、拟丽突属 *Acrobeloides* 等更倾向于分布在油井作业区内。

3 讨论

陇东黄土高原油田开采历史时间长,目前进入开采高峰期。巨大的原油开采量不仅会带来生态破坏,而且对环境也造成一定的污染。我们研究结果表明在陇东黄土高原油田作业区,由于油田开采实行标准化作业,植被杂草被清除,土壤裸露,加上长期由于钻井、维修和运输等因素影响,导致土壤性质发生改变,土壤含水量明显降低。同时,在油井井基周围 6 m 内土壤 TPH 明显增加,而在 50 m 处土壤 TPH 污染显著减少,表明油田开采过程中,产生一定范围的土壤污染。

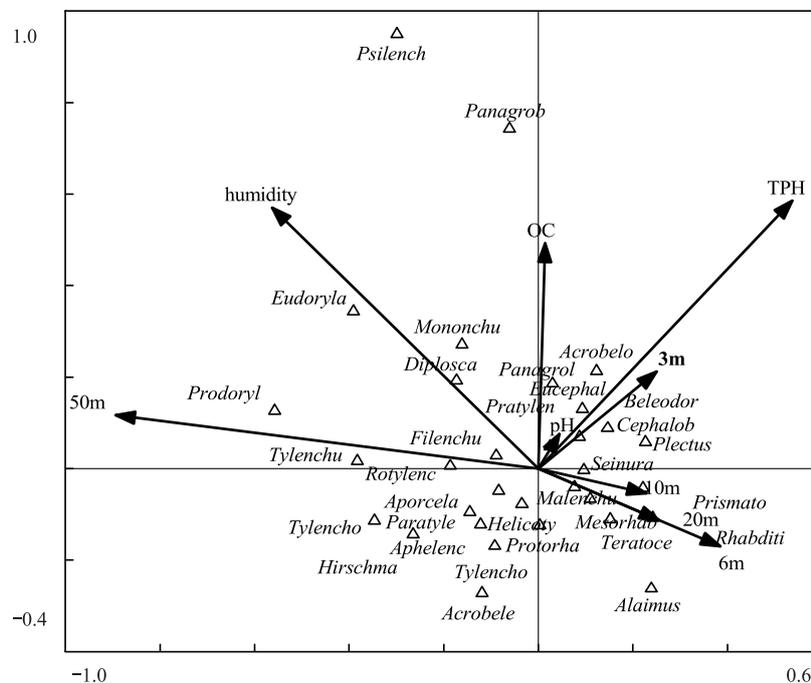


图3 油井土壤线虫物种-环境 CCA 排序双序图

Fig. 3 Species-environment CCA diagram of soil nematodes in Changqing Oilfield

石油开采影响土壤性质并带来一定的污染,从而也影响土壤线虫数量与组成。距井基不同距离,由于土壤受到干扰不一样,土壤线虫丰富度发生较大变化,在 50 m 处线虫数量最高,而在井场作业区(3 m、6 m、10 m 和 20 m)土壤线虫数量明显减少,尤其是植食性线虫、捕食杂食类和食真菌类线虫数量显著减少,结果说明石油开采影响土壤线虫数量。各油井线虫以 c-p 2 类群为主,占总数的 48.2%。c-p 2 类群世代时间短,产卵量大,较耐环境压力,表明油田开采区环境压力较大。其结果与 Wang 等调查胜利油田采油区土壤线虫丰富度显著低于对照区域结论一致^[10]。原因可能是因为油井作业区土地利用性质发生改变,地表覆盖和土壤性质发生变化,引起线虫数量减少。我们研究黄土高原油井周围土壤微生物群落,井场作业区土壤微生物群落功能多样性显著低于作业区外(50 m)土壤微生物群落功能多样性^[14],说明作业区土壤结构与功能均受到一定影响,石油开采使土壤生物多样性发生改变。

石油开采导致线虫优势类群也发生改变。长庆油田井场周围以食细菌线虫为最主要类群,可能是石油污染使土壤有机质含量增加刺激了土壤中微生物的生长,使土壤中微生物多样性增加^[28],食细菌线虫增加。但不同区域油田土壤线虫优势类群不一。肖能文等调查大庆油田土壤线虫,其中食细菌线虫为最主要类群^[6]。Chen 等调查黄河兰州段土壤,认为土壤 PAHs 污染严重位点,食细菌线虫数量较高,而 PAHs 污染较轻位点,植食性线虫数量较多^[12],我们结果与之基本一致。但 wang 等在胜利油田调查结果植食性线虫为主要类群^[10],与长庆油田土壤线虫主要类群有一定差异,其差异可能是因为调查采样点不限定在油井周围,而是整个油田开采区。

油井开采年限对土壤线虫构成及群落均有一定影响,我们研究结果表明不同开采年限油井土壤线虫总数差异不显著,但群落组成变化很大。10 a 油井土壤线虫群落多样性指数 H' 、 MI 和 WI 指数最低,而开采年限 20 a 和 1 a 油井较高,且差异显著。而 NCR 指数以 10 a 油井最高。可能原因是庆阳市油井开采历史较长,10 a 油井均为标准化作业油井,10 a 油井正处于生产高峰期,产量较高,同时维修也较多,因此对土壤干扰较为强烈,线虫受影响比较大。但是 20 a 油井为老油井,大多没有建设标准的围场,产量相对也较低,干扰也逐渐减小。而新油井经过建设,运行稳定,因此干扰减小,土壤线虫得以恢复。

石油开采也改变了土壤线虫的群落结构,长庆油田井场 3 m 处线虫多样性指数 H' 较低,但 MI 和 NCR 指

数较高,而在油井作业区外 50 m 处 H' 最高,而 WI 最低。一般认为在干扰和污染环境,土壤线虫 MI 指数较低^[29]。Chen 等认为干扰强度大的土壤,线虫 MI 指数较低^[12],Wang 等认为胜利油田采油区土壤线虫多样性较高^[10],我们结论与上述结果均不一致。土壤线虫分布受到多种因素的影响,我们结果认为 3 m 处土壤线虫分布受 TPH 影响较大,50 m 处线虫与土壤湿度较为相关(图 3)。实验结果表明石油开采降低了土壤线虫群落多样性,生物多样性指数 H' 和成熟度指数 MI 能较好的评价油田开采对线虫群落的影响。但 Suderman 和 Thistle 认为石油污染对线虫无明显影响^[30]。不同类群的线虫对不同环境的选择不一,因此石油开采对土壤线虫群落结构的影响有待进一步的研究。

4 结论

石油开采对油井周围土壤性质有一定影响,在油井 3 m 和 6 m 内土壤 TPH 含量显著高于 10 m 以外的土壤,作业区土壤含水量降低。开采距离影响土壤线虫数量,油井作业区内(20 m)土壤线虫显著低于作业区外(50 m);其中,植食性线虫、捕食杂食类和食真菌类线虫数量显著降低。此外,土壤线虫 c-p 构成和群落结构也发生改变,生物多样性指数 H' 和成熟度指数 MI 能较好的评价油田开采对线虫群落的影响。油井开采年限对土壤线虫构成及群落均有一定影响,土壤线虫以 10 a 开采土壤线虫密度最低,捕食/杂食类线虫和食真菌线虫显著减少。10 a 油井指数 H' 、 MI 和 WI 均显著低于其它年限油井。

参考文献 (References):

- [1] 李虎. 甘肃年鉴——2012 年.兰州: 甘肃文化出版社, 2012.
- [2] 李小利, 刘国彬, 党小虎. 落地石油量对黄土丘陵区撂荒地植物群落的影响. 草地学报, 2008, 16(2): 164-169.
- [3] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210.
- [4] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology*, 2001, 33(4): 161-168.
- [5] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19.
- [6] 肖能文, 谢德燕, 王学霞, 闫春红, 胡理乐, 李俊生. 大庆油田石油开采对土壤线虫群落的影响. 生态学报, 2011, 31(13): 3736-3744.
- [7] Höss S, Jänsch S, Moser T, Junker T, Römbke J. Assessing the toxicity of contaminated soils using the nematode *Caenorhabditis elegans* as test organism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(7): 1811-1818.
- [8] Beyrem H, Louati H, Essid N, Aïssa P, Mahmoudi E. Effects of two lubricant oils on marine nematode assemblages in a laboratory microcosm experiment. *Marine Environmental Research*, 2010, 69(4): 248-253.
- [9] Boufahja F, Hedfi A, Amorri J, Aïssa P, Mahmoudi E, Beyrem H. Experimental validation of the “relative volume of the pharyngeal lumen (RVPL)” of free-living nematodes as a biomonitoring index using sediment-associated metals and/or Diesel Fuel in microcosms. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, 399(2): 142-150.
- [10] Wang Y Y, Chen H, Chen H L, Wu J H. Influences of chronic contamination of oil field exploitation on soil nematode communities at the Yellow River Delta of China. *Frontiers of Biology in China*, 2009, 4(3): 376-383.
- [11] Heininger P, Höss S, Claus E, Pelzer J, Traunspurger W. Nematode communities in contaminated river sediments. *Environmental Pollution*, 2007, 146(1): 64-76.
- [12] Chen G, Qin J, Shi D Z, Zhang Y M, Ji W H. Diversity of soil nematodes in areas polluted with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lanzhou, China. *Environmental Management*, 2009, 44(1): 163-172.
- [13] 付梦娣, 妙旭华, 全占军, 叶瑶, 王琦, 李俊生, 肖能文. 庆阳市土地利用变化的景观生态效应研究. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 240-244.
- [14] 高晓奇, 肖能文, 叶瑶, 付梦娣, 李俊生. 基于 Biolog-ECO 分析大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.
- [15] 王如刚, 王敏, 牛晓伟, 唐景春. 超声-索氏萃取-重量法测定土壤中总石油烃含量. *分析化学*, 2010, 38(3): 417-420.
- [16] Ingham R E. Nematodes//Weaver R W, Angle S, Bottomley P, Bezdicsek D, Smith S, Tabatabai A, Wollum A, eds. *Methods of Soil Analysis Part 2 Microbiological and Biochemical Properties*. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994: 459-490.
- [17] Goodey T. *Soil and Freshwater Nematodes*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1963.
- [18] 尹文英. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京: 科学出版社, 1998.

- [19] 刘维志. 植物线虫志. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [20] Yeates G W, Bongers T, De Goede R M, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and genera - an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331.
- [21] 梁文举, 张万民, 李维光, 段玉玺. 施用化肥对黑土地区线虫群落组成及多样性产生的影响. *生物多样性*, 2001, 9(3): 237-240.
- [22] Shannon C E. A mathematical theory of communication. New York: American Telephone and Telegraph Company, 1948.
- [23] Pielou E C. *Ecological Diversity*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975.
- [24] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163(4148): 688-688.
- [25] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251.
- [26] Neher D A, Peck S L, Rawlings J O, Lee Campbell C. Measures of nematode community structure and sources of variability among and within agricultural fields. *Plant and Soil*, 1995, 170(1): 167-181.
- [27] Lepš J, Šmilauer P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [28] 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.
- [29] Bongers T. The Maturity Index, the evolution of nematode life history traits, adaptive radiation and cp-scaling. *Plant and Soil*, 1999, 212(1): 13-22.
- [30] Suderman B L, Marcus N H. The effects of Orimulsion and Fuel Oil #6 on the hatching success of copepod resting eggs in the seabed of Tampa Bay, Florida. *Environmental Pollution*, 2002, 120(3): 787-795.