

# 石油污染对土壤持水能力及供水强度的影响

魏 样<sup>1,2,3,4,5</sup>, 王益权<sup>3</sup>, 韩霁昌<sup>1,4,5</sup>, 孙婴婴<sup>1,4,5</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710061; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075; 5. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075)

**摘 要:** [目的] 研究石油污染对土壤持水能力及供水强度的影响, 为有机污染物在土壤中迁移与转化规律研究提供理论基础。[方法] 以陕北采油区的主要土壤类型—轻壤质黄绵土为研究对象, 人为模拟获得 5 个不同梯度的石油污染土壤(0%, 0.5%, 1%, 2% 和 4%), 室内测定土壤水分特征曲线, 采用 Van Genuchten 模型拟合获得模型参数, 并以此为基础对比分析不同处理土壤持水能力、水分有效性、比水容量之间的差异。[结果] 石油污染引起土壤持水性显著降低, 污染浓度越大, 持水性越低; 对土壤水分特征曲线影响的显著区间主要在水吸力(pF)为 1.5 的低吸力段和水吸力(pF)为 3.5 以上的高吸力段, 石油污染对土壤结构性的影响更加显著; 高浓度的石油污染引起土壤有效水含量下降, 加剧了土壤的干燥化程度, 不利于协调干旱气候与植物需水性之间的矛盾; 随着石油污染浓度的增加, 土壤比水容量也呈现出显著递减趋势, 土壤可利用水分对应的吸力范围相应变窄。[结论] 石油污染显著降低了土壤的持水能力及供水强度, 加剧了地区土壤旱情, 给植物生产和生态环境带来严重危害。

**关键词:** 石油污染; 土壤水分; 持水能力; 供水强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0021-06

中图分类号: X53

**文献参数:** 魏样, 王益权, 韩霁昌, 等. 石油污染对土壤持水能力及供水强度的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 21-26. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 06. 004; Wei Yang, Wang Yiquan, Han Jichang, et al. Effects of oil pollution on soil water-holding capacity and water supply intensity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 21-26.

## Effects of Oil Pollution on Soil Water-holding Capacity and Water Supply Intensity

Wei Yang<sup>1,2,3,4,5</sup>, Wang Yiquan<sup>3</sup>, Han Jichang<sup>1,4,5</sup>, Sun Yingying<sup>1,4,5</sup>

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an,

Shaanxi 710075, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an

710061, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land

Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 5. Key Laboratory of Degraded

and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of oil pollution on soil water holding capacity and water supply intensity were studied in order to provide a theoretical basis for the study of organic pollutants migration and transformation in soil. [Methods] The main soil type (loessial soil) in the oil-producing area of northern Shaanxi was used as the test material, and five different levels of polluted soil (0, 0.5%, 1%, 2%, and 4%) were obtained by artificial simulation. The soil water retention curve obtained for each treated sample was analyzed using the van Genuchten model, to investigate the difference of soil water-holding capacity, water availability and specific water capacity among different treatments. [Results] The water-holding capacity of soil was significantly reduced by oil pollution, and the greater the pollution concentration was, the lower the water-holding capacity was. Oil pollution had a significant influence on the soil water characteristic curve in the low

收稿日期: 2019-06-19

修回日期: 2019-07-24

资助项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项“石油污染对土壤水分特性的影响研究”(300102279501); 陕西省土地工程建设集团内部科研项目“陕北石油污染土壤植物—化学修复技术研究”(DJNY2018-17)

第一作者: 魏样(1984—), 女(汉族), 陕西省高陵区人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事污损土地修复研究。E-mail: weiyang1120@163.com.

suction section of pF1.5 and the high suction section above pF3.5, and its influence on soil structure was more significant. The high concentration of oil pollution caused the decrease of soil water availability, exacerbated soil desiccation, which was not conducive to the coordination of the contradiction between the arid climate and the water demand of plants. With the increase of oil pollution concentration, the soil specific water capacity also showed a significant decreasing trend, and the suction range corresponding to soil available water was narrowed. [Conclusion] Oil pollution has significantly reduced the soil water-holding capacity and water supply intensity, exacerbated soil drought and brought serious harm to plant production and ecological environment.

**Keywords:** oil pollution; soil water; water-holding capacity; water supply intensity

土壤水分是农业生产的重要因素,是评价土壤生产力的主要指标之一,研究土壤持水能力及供水强度可为土壤资源评价提供基础依据<sup>[1]</sup>。关于土壤持水性、供水能力以及水分有效性,国内外学者开展了大量研究。有研究<sup>[2]</sup>表明,生物炭对不同质地土壤的持水性会产生不同的影响,对砂土的影响程度与生物炭添加量显著正相关,对壤土和黏土的影响均小于砂土;不同绿化植物废弃物对土壤持水能力和供水强度也产生一定影响,一定吸力条件下,绿化植物废弃物可有效提高土壤的持水能力,随着废弃物含量的增加,土壤田间持水量和有效水含量均逐渐增加<sup>[3]</sup>;土壤覆被不同,土壤的持水和供水能力也会有所不同,种植玉米和种植大豆的土壤水分状况存在一定差异<sup>[4]</sup>;有研究者利用模型来估算土壤的持水供水能力,研究得出通过作物模型可反演估算得到不同土层的土壤有效水含量<sup>[5]</sup>,利用田间现场监测数据可进一步改进土壤持水曲线的估算模型<sup>[6]</sup>;另有研究者测定了不同介质的土壤水分供持能力,获得了膨润土与砂混合介质的持水曲线<sup>[7]</sup>。以上这些研究为土壤水分高效利用提供了基础数据支撑,但是关于石油污染物对土壤持水能力及供水强度方面的研究却鲜有报道。土壤的持水性依赖于颗粒表面的亲水性和毛管孔隙的持水特征,土壤质地类别和结构孔隙是左右持水性的基础。然而土壤受石油污染后,一方面使得土壤颗粒表面疏水化,亲水性降低;另一方面油污对土壤孔隙会造成程度不同地堵塞,必将影响土壤的持水容量和持水能力,同样也会影响土壤的失水过程。土壤受石油污染后,往往会加剧土壤的干燥化过程,直接威胁植被和生态建设,影响土壤环境内的生物过程和修复效果。

土壤的持水特性必须体现在土壤水分变化的全过程中,而不是某时某刻的水分情况。为了直观表征在失水期间土壤持水特性的变化规律,评价不同梯度石油污染处理土壤的供水强度,揭示污染物对土壤干燥化的作用程度,本研究选取陕北采油区的主要土壤类型—轻壤质黄绵土为研究对象,设置不同石油污染

梯度,分析土壤水分特征曲线对石油污染的响应,采用 Van Genuchten 模型<sup>[8]</sup>进行曲线拟合,以不同石油污染梯度下的土壤水分特征曲线参数、土壤水分常数和比水容量等为指标,半量化地认知石油污染物对土壤持水能力及供水强度的作用与影响程度,对于指导石油污染地下水—土系统的治理与修复具有重要理论意义和应用价值,研究结果也可为分析其它有机污染物对土壤水分物理特性的作用规律提供借鉴,同时也为分析有机污染物在土壤中迁移与转化规律提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与制备

供试黄绵土采自陕西省延安市宝塔区,在远离油井的荒草地采集清洁土壤。样品采集时先用取土铲清除表面杂草,随后挖取 0—30 cm 表层土壤,带回室内进行处理。采集的土壤样品经自然风干、除杂、研磨并通过 2 mm 筛后备用。供试土壤机械组成采用 MS 2000 型激光粒度仪测定,结果详见表 1。用取自陕西省延安市延长油田开采的原油作为土壤石油污染物,采用人工定量化配置的均质石油污染土壤作为研究素材。具体做法是称取相同质量的土壤样品,按照污染浓度质量分数分别为 0%,0.5%,1%,2%,4%等 5 个污染梯度将石油与土样混合,并充分拌匀后放置备用。

表 1 供试土壤机械组成

粒级分数/%			土壤质地
黏粒 ( $<2 \mu\text{m}$ )	粉粒 ( $2\sim 50 \mu\text{m}$ )	砂粒 ( $50\sim 2\ 000 \mu\text{m}$ )	
10.28	71.44	18.28	轻壤土

### 1.2 水分特征曲线的测定与拟合

目前测定不同土壤水分特性曲线的手段或方法很多<sup>[9-11]</sup>,各个方法和手段均有不同优缺点和应用条件。本研究采用高速离心机法对不同处理土壤水分特征曲线进行测定,离心机选用日本 HITACHI 公

司生产的 CR21G 型高速恒温冷冻离心机。按照设定土壤容重为  $1.40 \text{ g/cm}^3$  称取经过不同程度石油污染处理的土壤样品,将之装填在容积为  $100 \text{ cm}^3$  的离心机专用环刀内,将盛土的环刀放入水池内,进行充分水分饱和后并且称重,再放入离心机转子内,在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下按照设定的不同离心力依次设定转速和离心时间(表 2),待离心平衡后取出称重,依次用差减法计算在不同平衡离心力(水吸力)条件下的土壤含水量,即可获得不同处理土壤的水分特征曲线,每处理均重复 3 次。

表 2 不同土壤水吸力对应的离心机转速及离心时间

设定水吸力(pF)	转速/rpm	离心平衡时间/min	设定水吸力(pF)	转速/rpm	离心平衡时间/min
1.008 6	310	10.0	2.853 7	2 590	53.2
1.485 7	540	12.0	3.008 6	3 100	58.2
1.707 6	690	16.6	3.309 6	4 390	67.8
1.853 7	820	21.3	3.485 7	5 370	73.4
2.008 6	980	26.2	3.707 6	6 930	80.5
2.485 7	1 700	41.5	3.853 7	8 200	85.1
2.707 6	2 190	48.5	4.008 6	9 810	90.1

为了准确量化表征各处理土壤的水分特征曲线,采用了 V-G 模型进行数学拟合,因为该模型能够对多种质地类别和结构性状土壤的实测数据实现高度拟合,而被最广泛地应用。其中 V-G 模型见公式(1),相关参数详见公式(2)~(3):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1/m}} \quad (1)$$

$$\text{其中 } n = \frac{1}{1-m} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{h_b} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (3)$$

式中: $\theta_r \leq \theta \leq \theta_s$ ,  $\theta_r$ ——土壤剩余含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$ ——土壤饱和含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $h$ ——土壤基质吸力(cm 水柱高);  $m, n$ ——土壤水分特性曲线的斜率;  $\alpha$ ——水分特性曲线最大拐点处对应的水吸力的倒数( $\text{cm}^{-1}$ )。

本研究选用以 V-G 为模型的 RETC 软件拟合了不同石油污染土壤的水分特征曲线,并获得了各种处理的相应模型参数。

### 1.3 土壤水分常数及水分有效性划分

土壤水分常数以及水分有效性可以直接测得,也可以通过土壤水分特征曲线获得。田间持水量和萎蔫系数分别是土壤水分有效性的上限和下限,当土壤含水量低于萎蔫系数时,作物生长困难,甚至枯死。依据前人的研究结果,田间持水量大约相当于水吸力

(pF)为 2.53 时的土壤含水量,而萎蔫系数约为水吸力(pF)为 4.18 时的土壤含水量<sup>[12]</sup>。介于田间持水量和萎蔫系数之间的土壤含水量,即水吸力(pF)在 2.53~4.18 之间的土壤含水量为全有效水含量<sup>[13-14]</sup>。全有效水包含速效水(易效水)和迟效水(难效水),速效水相当于水吸力(pF)在 2.53~3.79 之间的土壤含水量,迟效水相当于水吸力(pF)在 3.79~4.18 之间的土壤含水量<sup>[15]</sup>。

### 1.4 土壤比水容量的计算

比水容量为土壤水分特征曲线的斜率,表示的是在不同阶段单位土水势或吸力变化时单位质量土壤可释放或吸入的水量,用字母  $C$  来表示。比水容量在评价土壤水分有效性<sup>[16]</sup>和土壤供水能力方面具有极为重要的意义。土壤比水容量采用公式(4)计算,各符号意义同上。

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} = \frac{\alpha mn(\theta_s - \theta_r) |\alpha h|^{n-1}}{[1 + |\alpha h|^n]^{m+1}} \quad (4)$$

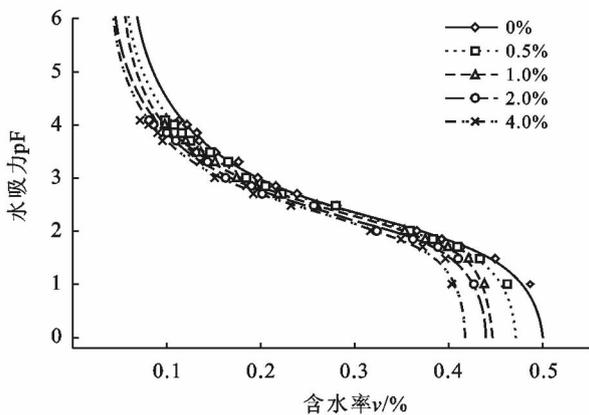
采用 Excel 和 Origin 85 软件进行数据处理和绘图,采用 SPSS 进行数据统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 石油污染对土壤持水性的影响

2.1.1 对土壤水分特征曲线的影响 土壤水分特征曲线表述了土壤水势和土壤水分含量之间的关系,反映了土壤水的能量和数量状态之间的关系,是土壤质地、结构、孔隙状况等物理特性的综合表征<sup>[8]</sup>,可用来研究不同性状土壤的持水性和土壤水分有效性,是研究土壤运动特性与水分保持的基本工具<sup>[17]</sup>。土壤持水性依赖于矿物颗粒表面的亲水性和毛管孔隙弯月力的作用,当土壤颗粒表面亲水性受到影响,或持水孔隙被占据,或孔隙壁的疏水性增加等,必然会影响土壤的持水能力。从机理上讲颗粒表面的亲水性影响主要体现在对高吸力段的分子持水性方面,而孔隙构造或孔隙壁受到影响主要体现在低吸力段的毛管孔隙持水段。图 1 为不同污染处理条件下供试土壤的水分特征曲线。由图 1 可见,石油污染引起土壤水分特征曲线发生持水性降低的左移现象。在相同水吸力下,随着石油污染浓度的增加,土壤的持水量在不同程度地递减,证实了石油污染对土壤持水能力有着极为显著的影响。非湿润性的石油污染土壤后一方面被吸附在土壤颗粒表面,使其表面油脂化,从而使土壤产生了一定斥水性;一方面石油的黏滞性较高,高含量的石油会滞留在土壤孔隙中,占据水分储存空间,从而使土壤饱和持水能力下降。石油污染对土壤水分特征曲线影响显著区间主要在水吸力(pF)

1.5 的低吸力段和水吸力 ( $pF$ ) 3.5 以上的高吸力段。也就是说石油污染物呈现着既明显降低土壤颗粒表面的亲水性, 又显著降低毛管孔隙持水性的机理。其次还可以看出, 在颗粒表面分子持水的高吸力段, 低浓度的石油污染就能显著降低分子持水性, 随石油污染物浓度增加, 分子持水递减的幅度明显减小, 似乎佐证着石油污染对颗粒表面的疏水化作用特别明显, 可见石油污染对土壤持水曲线显著性的影响体现在孔隙持水区段(低吸力)和颗粒表面分子持水区段(高吸力)。石油污染梯度变化对土壤水分特征曲线的影响在低水吸力段更加明显, 表明污染对土壤的结构性影响更为显著。



注: 图中线条均为拟合值, 点均代表实测值。

图 1 不同石油污染梯度土壤水分特征曲线

2.1.2 对水分特征曲线参数的影响 对土壤水分特征曲线参数进一步分析, 不仅能够了解石油污染对土壤持水特征的影响程度和机理, 更有助于量化判别对土壤持水作用影响情况。本研究采用土壤水力学研究中广泛应用的 V-G 经验模型对土壤在不同污染梯度下的水分特征曲线进行拟合, 拟合参数详见表 3。由表 3 可见, 拟合系数  $R^2$  均达到了极显著水平, 表明 V-G 模型非常好的拟合了本试验土壤, 有关模型参数具有较高的可信性和真实性。

表 3 石油污染对土壤水分特征曲线 V-G 模型参数的影响

污染浓度/%	VG 模型参数				$R^2$
	$\theta_r / \%_v$	$\theta_s / \%_v$	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	$n$	
0	5.56 <sup>a</sup>	50.01 <sup>a</sup>	0.022 2 <sup>a</sup>	1.357 6 <sup>c</sup>	0.999 2
0.5	4.90 <sup>b</sup>	47.12 <sup>b</sup>	0.016 5 <sup>b</sup>	1.387 1 <sup>b</sup>	0.998 3
1	4.88 <sup>b</sup>	44.67 <sup>c</sup>	0.013 0 <sup>b</sup>	1.398 7 <sup>b</sup>	0.998 9
2	3.66 <sup>c</sup>	43.95 <sup>c</sup>	0.015 5 <sup>b</sup>	1.428 1 <sup>a</sup>	0.997 4
4	3.64 <sup>c</sup>	41.72 <sup>c</sup>	0.013 7 <sup>b</sup>	1.432 2 <sup>a</sup>	0.997 0

注: 同一列数据后不同小写字母者表示不同污染浓度在  $p < 0.05$  水平上差异显著。下同。

模型参数  $\theta_s$  为饱和含水量(容积含水量), 反映了土壤孔隙持水情况, 依赖于土壤总孔隙。理论上讲,  $\theta_s$  应该在数值上与土壤总孔隙度相一致, 然而从表 3 可见, 各处理土壤虽然容重一致(即总孔隙度相同), 但随着石油污染浓度的增加, 土壤饱和度明显递减, 土壤残缺饱和度(无污染土壤饱和含水量与污染土壤饱和含水量的差值与无污染土壤饱和含水量之间的比值)呈现增加趋势(图 2)。这是因为土壤受非湿润流体(油)的影响, 湿润流体(水)难以取代非湿润流体, 会产生“残余非湿润流体饱和度”<sup>[18]</sup>, 换句话说, 因为残余的非湿润流体饱和度的影响, 必然会出现石油污染土壤水分的“残缺饱和度”。

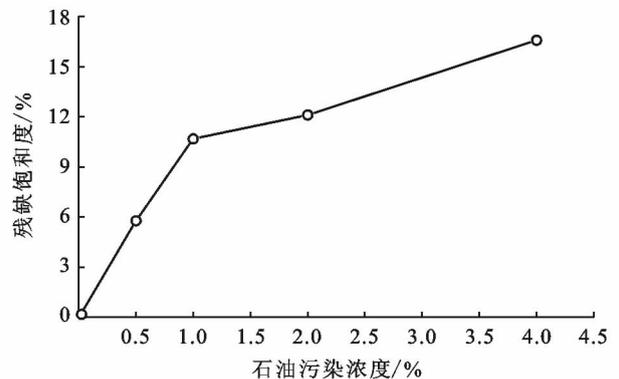


图 2 石油污染浓度与残缺饱和度的关系

$\theta_r$  为土壤剩余含水量, 为当水吸力无限增大时土壤所能保持的含水量, 严格意义上讲依赖于颗粒表面性状, 反映的是土壤颗粒表面的分子持水性<sup>[19]</sup>。受石油污染的作用和影响, 土壤颗粒表面被疏水化, 影响着颗粒的亲水性, 各处理  $\theta_r$  与清洁土壤之间的差异极为明显, 随着污染浓度的增加,  $\theta_r$  呈线性下降趋势( $R^2 = 0.786 3, p < 0.05$ ), 表明石油污染物对土壤颗粒表面分子持水性的显著作用和影响。

曲线参数  $\alpha$  是土壤进气值时水吸力的倒数, 随着石油污染浓度的增加, 土壤的  $\alpha$  值变化不够显著, 即石油污染物对土壤的进气值影响不够明显。 $n$  值作为土壤水分特征曲线的斜率, 直观反映着在失水期间随水吸力增大, 水分特征曲线逼近剩余含水量的快慢, 因此, 它是反映土壤的失水速率的参数。 $n$  值越大, 土壤失水快, 说明保水性越差, 土壤越容易干燥化。由表 3 可见, 随着石油污染浓度的增加, 土壤的  $n$  值呈现出规律性的递增趋势, 表明石油污染物引起土壤失水速率显著增大, 保水性变差。

## 2.2 石油污染对土壤水分有效性的影响

土壤水分常数评价土壤持水性的直观性指标。根据各处理土壤水分特征曲线模型获取不同石油污

染处理土壤的系列水分常数,结果详见表4。由表4可以看出,石油污染对土壤水分常数的影响较为显著,随着污染物浓度的增加,土壤持水能力总体上呈现减弱趋势。相比于无污染土壤而言,4%石油污染浓度土壤的田间持水量和萎蔫系数分别降低了15.52%和33.09%;全有效水、速效水和迟效水含量分别降低了3.17%,1.32%和14.49%。总之,石油污染土壤后,导致土壤有效水含量降低,引起土壤持水或蓄水能力下降,不利于协调干旱气候与植物需水性之间的矛盾,对作物生长极为不利。

表4 石油污染土壤水分常数 %

污染浓度	田间持水量	有效水			萎蔫系数
		全有效水	速效水	迟效水	
0	26.86 <sup>a</sup>	15.77 <sup>b</sup>	13.62 <sup>b</sup>	2.14 <sup>a</sup>	11.09 <sup>a</sup>
0.50	26.11 <sup>b</sup>	16.25 <sup>a</sup>	14.14 <sup>a</sup>	2.11 <sup>a</sup>	9.86 <sup>b</sup>
1	26.23 <sup>b</sup>	16.53 <sup>a</sup>	14.40 <sup>a</sup>	2.12 <sup>a</sup>	9.70 <sup>b</sup>
2	22.99 <sup>c</sup>	15.46 <sup>b</sup>	13.60 <sup>b</sup>	1.86 <sup>b</sup>	7.54 <sup>c</sup>
4	22.69 <sup>c</sup>	15.27 <sup>b</sup>	13.44 <sup>b</sup>	1.83 <sup>b</sup>	7.42 <sup>c</sup>

### 2.3 石油污染对土壤比水容量的影响

比水容量是单位土壤基质势(或吸力)变化时单位质量土壤可释放(失水过程)或吸收(吸水过程)的水量,也被称为土壤的容水度,它是土壤物理性质的重要函数,也是土壤水分动力学的重要参数,表征着土壤失水或吸水过程与特征,反映的是土壤的释水能力亦即供水能力。比水容量是土壤水分特征曲线的斜率,由于水分特征曲线为非线性,所以不同水吸力

范围的比水容量也不尽相同。一般在低吸力,土壤释水量较多,植物汲取水分耗能少,高吸力段,土壤释水量减少,植物汲水耗能高,故而植物所吸收利用的水分存在一定的不等效性。通过水分特性曲线计算获得各处理土壤在重要供水的中、低吸力段的比水容量(表5),以表征石油污染对土壤抗旱性的作用和影响机理。由表5可以看出,在中低吸力段,土壤比水容量随着水吸力的增加呈先增加后递减的趋势,随着石油污染浓度的增加,污染物引起土壤颗粒表面疏水化程度越发严重,对土壤孔隙的堵塞作用随之增强,由此引起土壤的比水容量呈现出显著递减趋势,表明污染引起土壤释水量递减,为植物供给可利用的水量相应减少。与无污染土壤比较,在低吸力段,较小比例的石油污染(0.5%)便可引起土壤比水容量发生较大幅度的降低。有研究指出,当比水容量的数量级为 $10^{-4}$ ( $\text{cm}^{-1}$ ), $10^{-6}$ ( $\text{Pa}^{-1}$ )时,土壤水分有效程度显著降低,已处于或相当于毛管断裂含水量状态,土壤处于水分胁迫状态,此时的土壤供水能力逐渐开始不能满足植物的正常生长需求,植物便出现不同程度的萎蔫或减产状态<sup>[20]</sup>。因此,当土壤比水容量达到此数量级时的吸力值越大,土壤耐旱性越好。对照表5可以看出,石油污染引起土壤可利用水分对应的吸力范围变窄,由此可见,石油污染物显著降低了土壤的供水能力,并且随着污染浓度的增加,土壤供水能力显著在减弱,土壤耐旱性降低,更加剧了该地区的土壤旱情,给生态和植物生产带来不可避免的灾难。

表5 石油污染土壤的比水容量

$10^{-4} \text{ cm}^{-1}$

土壤水吸力/ cm	不同污染浓度土壤的比水容量				
	0%	0.50%	1%	2%	4%
0.5	7.09 <sup>a</sup>	4.24 <sup>b</sup>	3.36 <sup>c</sup>	2.79 <sup>d</sup>	2.64 <sup>d</sup>
1	9.04 <sup>a</sup>	5.52 <sup>b</sup>	4.51 <sup>c</sup>	3.67 <sup>d</sup>	3.55 <sup>d</sup>
5	15.19 <sup>a</sup>	9.93 <sup>b</sup>	8.72 <sup>b</sup>	6.79 <sup>c</sup>	6.94 <sup>c</sup>
10	17.72 <sup>a</sup>	12.20 <sup>b</sup>	11.99 <sup>b</sup>	10.49 <sup>c</sup>	9.86 <sup>c</sup>
51	15.78 <sup>a</sup>	12.00 <sup>b</sup>	11.09 <sup>b</sup>	8.93 <sup>c</sup>	8.56 <sup>c</sup>
102	8.59 <sup>a</sup>	8.07 <sup>a</sup>	7.89 <sup>a</sup>	7.46 <sup>b</sup>	7.17 <sup>c</sup>
306	3.12 <sup>a</sup>	2.53 <sup>b</sup>	2.51 <sup>b</sup>	2.51 <sup>b</sup>	2.47 <sup>b</sup>
510	2.39 <sup>a</sup>	1.34 <sup>b</sup>	1.32 <sup>b</sup>	1.31 <sup>b</sup>	1.29 <sup>b</sup>
714	1.25 <sup>a</sup>	$8.64 \times 10^{-1b}$	$8.46 \times 10^{-1b}$	$8.28 \times 10^{-1b}$	$8.19 \times 10^{-1b}$
1020	$8.05 \times 10^{-1a}$	$5.36 \times 10^{-1b}$	$5.24 \times 10^{-1b}$	$5.06 \times 10^{-1b}$	$5.01 \times 10^{-1b}$
2040	$5.01 \times 10^{-1a}$	$2.08 \times 10^{-1b}$	$2.03 \times 10^{-1b}$	$1.91 \times 10^{-1b}$	$1.89 \times 10^{-1b}$
5100	$1.14 \times 10^{-1a}$	$5.82 \times 10^{-2b}$	$5.75 \times 10^{-2b}$	$5.19 \times 10^{-2b}$	$5.13 \times 10^{-2b}$
7140	$5.73 \times 10^{-2a}$	$3.64 \times 10^{-2b}$	$3.61 \times 10^{-2b}$	$3.22 \times 10^{-2b}$	$3.17 \times 10^{-2b}$
12240	$2.24 \times 10^{-2a}$	$1.72 \times 10^{-2b}$	$1.71 \times 10^{-2b}$	$1.49 \times 10^{-2c}$	$1.47 \times 10^{-2c}$

### 3 结论

土壤受石油污染的影响,水分特征曲线发生持水性降低的左移现象,引起土壤失水速率显著增大,保水性降低。石油污染对土壤持水曲线显著性的影响体现在孔隙持水区段(低吸力)和颗粒表面分子持水区段(高吸力),在低水吸力段的影响更加明显,表明污染对土壤的结构性的影响更为显著。石油污染导致土壤有效水含量降低,土壤蓄供水强度显著减弱,土壤耐旱性降低,不利于协调干旱气候与植物需水性之间的矛盾,对作物生长极为不利。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 沈思渊,席承潘. 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系[J]. 土壤学报,1990,27(3):34-42.
- [2] 闫俊华,周国逸,唐旭利,等. 鼎湖山 3 种演替群落凋落物及其水分特征对比研究[J]. 应用生态学报,2001,12(4):509-512.
- [3] 伍海兵,方海兰,李爱平. 几种常用绿地改良材料对土壤水分特征的影响[J]. 土壤,2016,48(6):1229-1236.
- [4] Suat I, Vasudha S, Mohammed A T, et al. Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity, and infiltration [J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(4):1307-1321.
- [5] Sreelash K, Buis S, Sekhar M, et al. Estimation of available water capacity components of two-layered soils using crop model inversion; Effect of crop type and water regime[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 166-178.
- [6] Bordoni M, Bittelli M, Valentino R, et al. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 283-305.
- [7] Fattah M Y, Salim, Nahla M, Irshayid, Entesar J. Determination of the soil-water characteristic curve of unsaturated bentonite-sand mixtures[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(5):201.
- [8] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(4): 892-898.
- [9] Haghverdi A, Öztürk H S, Durner W. Measurement and estimation of the soil water retention curve using evaporation method and pseudo continuous pedotransfer function[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563:251-259.
- [10] Pires L F, Bacchi O O S, Reichardt K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 82(1):89-97.
- [11] Alekseev V V, Maksimov I I. Aerodynamic method for obtaining the soil water retention curve[J]. Eurasian Soil Science, 2013, 46(7):751-757.
- [12] 肖恩邦,孙保平,陈串,等. 陕北黄土区人工刺槐林地土壤水势特征[J]. 水土保持学报,2017,31(3):129-133.
- [13] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究:以黄土为例[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [14] 徐敬华,黄土丘陵区人工植被恢复对土壤水力性质的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [15] 宋桂龙,韩烈保,李德颖. 不同沙土配比根系层土壤的持水特性研究[J]. 土壤通报,2008,39(2):233-237.
- [16] 窦建德,王绪芳,熊伟,等. 宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J]. 林业科学研究,2006(3): 301-306.
- [17] Milly P C D. Estimation of Brooks-Corey Parameters from water retention data [J]. Water Resources Research, 1987, 23(6):1085-1089.
- [18] Lu J F, Hanyga A. Linear dynamic model for porous media saturated by two immiscible fluids[J]. International Journal of Solids & Structures, 2005, 42(9): 2689-2709.
- [19] 冉艳玲,王益权,张润霞,等. 保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J]. 干旱地区农业研究,2015, 33(5): 101-107.
- [20] 丁新原,张广宇,周智彬,等. 咸水滴灌条件下塔里木沙漠公路防护林土壤水分物理性质[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1):250-256.