

石油烃污染对土壤持水特征及水分有效性的影响

杨华, 石辉, 李卓, 胡凡

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西北水资源与生态环境教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要:石油烃污染土壤已经成为我国一个严重的环境问题, 污染后的土壤理化性质发生改变, 直接影响土壤的持水特性及水分有效性, 确定石油烃污染对土壤持水特征和水分有效性的影响及其程度可为揭示石油烃污染对土壤性质的影响提供新的科学认识。通过人工配置柴油和原油不同污染浓度污染的黄绵土, 利用离心机法测定土壤水分特征曲线, 分析了土壤的持水特征与水分有效性。结果表明: (1) 不同浓度柴油与原油污染土壤后, 水分特征曲线均位于未污染土壤的下部, 其中原油污染的影响更甚。(2) 水分特征曲线 van Genuchten 模型参数 θ_s 、 θ_r 随着污染浓度的增加呈现指数衰减, 参数 α 值呈幂函数减小, n 值出现随污染浓度对数增加的特点。(3) 土壤的饱和含水量、田间持水量以及凋萎含水量均随柴油、原油污染浓度的增加出现下降趋势, 表观土壤有效含水量随污染浓度表现出先降后升的 U 字形的变化模式。无论原油还是柴油污染土壤, 均会影响土壤的持水特征和水分有效性, 影响的大小与石油烃的类型和浓度密切相关。

关键词:持水特征; 表观水分有效性; 水分特征曲线; 柴油; 原油

中图分类号: S152.7; X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0142-05

Influence of Petroleum Hydrocarbon Pollution on Soil Water Holding Characteristics and Soil Water Availability

YANG Hua, SHI Hui, LI Zhuo, HU Fan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Key Laboratory of Northwest Water Resources and Ecological Environment, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Petroleum hydrocarbon contaminated soil has become a serious environmental problem in China. The physical and chemical properties of the polluted soil have changed due to the pollution, which directly affects the water retention characteristics and water availability of the soil. Determining the effects of petroleum hydrocarbon pollution on soil water retention characteristics and water availability and its degree can provide a new scientific understanding for revealing the effects of petroleum hydrocarbon pollution on soil properties. We made up the contaminated soil by different pollution concentrations of diesel and crude oil, and measured these soil moisture characteristic curve by the centrifuge method. The soil water-holding characteristics and soil water availability were explored. The results show that: (1) after the soil was polluted by petroleum hydrocarbons with different concentrations of diesel oil and crude oil, the water characteristic curves were all in the lower part of the unpolluted soil, and the influence of crude oil pollution was even more significant; (2) the parameters θ_s and θ_r of the Van Genuchten model of water characteristic curve decreased exponentially with the increase of pollution concentration; the α value decreased as a power function, while the n value increased with the logarithm of the pollution concentration; (3) soil saturated water content, field water capacity and wilting water content all showed a decreasing trend with the increase of pollution concentration; the soil available water content of diesel oil and crude oil showed a U-shaped change pattern of decreasing first and then rising with the increase of pollution concentration. Whether the soil is polluted by crude oil or refined diesel, it will affect the soil water holding characteristics and water availability, and the magnitude of the impact is closely related to the type and concentration of petroleum hydrocarbons.

收稿日期: 2021-05-19

修回日期: 2021-05-30

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区不同植被下土壤润湿性特征及其与团聚体稳定性的关系”(41771309)

第一作者: 杨华(1996—), 女, 江西南昌人, 学生, 硕士, 主要研究方向为环境生态。E-mail: 1575204350@qq.com

通信作者: 石辉(1968—), 男, 陕西眉县人, 博士, 教授, 主要从事环境生态与水土保持方面的教学科研工作。E-mail: shihui@xauat.edu.cn

Keywords: soil water holding characteristics; apparent soil available water content; soil water characteristic curve; diesel; crude oil

石油的开采、冶炼、使用和运输过程中的污染和遗漏事故,以及含油废水、有害废泥浆的排放、污水灌溉、各种石油制品的挥发、不完全燃烧物飘落等引起一系列的石油烃污染。根据文献资料,我国石油烃污染土壤面积已经高达 50 万 hm^2 ^[1]。石油烃包括了原油和其加工的各种产品如柴油,其间的差异在于组成烃类物质、粘度、沸点等的不同;但无论原油和柴油,均在世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中。对于原油污染,主要集中于采油井的周边;张晓阳等^[2]对陕西省安塞县 8 个油田石油污染土壤状况进行调研发现,油井附近 5 m 范围内石油烃污染浓度达到 27.76~71.49 g/kg;李小利等^[3]对陕北巴家河油区和燕沟油区石油污染土壤状况进行调研发现,其土壤受到石油污染的浓度在 5.5~13.12 g/kg 范围内。而柴油的污染,主要出现在存贮和使用过程的跑冒滴漏。无论原油还是柴油,进入土壤加重土壤环境的污染负荷,改变土壤营养结构,使土壤中碳氮比和碳磷比失调^[4-5],影响微生物新陈代谢;包裹在土壤颗粒表面的石油烃阻碍土壤空气与水的置换,降低土壤的透气性透水性^[6],无法为植物提供正常生活代谢所需要的充足水分而导致植物发育不良^[7]。魏样等^[8]的研究发现,当土壤原油含量增加到 1%,土壤饱和和导水率平均变化率为 0.16 cm/s,从 1% 升高到 4% 时,饱和和导水率平均变化率仅为 0.02 cm/s。李梅等^[9]的研究发现,柴油污染清洁砂土后,可使砂土渗透系数降低 64% 左右;原油含量大于 2% 时,砂土的渗透系数降低一个数量级;8% 浓度的柴油与同浓度的原油相比,柴油污染的渗透系数降低 97%,而原油污染的渗透系数降低两个数量级,在各种土壤上,均表现出原油引起的渗透系数的降低比柴油更为显著。石油烃污染对土壤渗透性的这种影响,可能由于其进入土壤之后填充土壤孔隙结构,改变土壤颗粒表面润湿性,同时挥发、半挥发性有机污染物会对土壤水分运移产生阻滞效应^[10]。土壤水分特征曲线可反映不同土壤的持水和释水特性,从土壤水分特征曲线可以更好地认识石油烃污染对土壤水分有效性和供给的影响。Wei 等^[11]发现,不同程度的原油污染均会使水分特征曲线向左移动,导致饱和含水量降低,土壤质地是残余含水量的影响因素之一,质地较重的娄土与质地较轻的黄土或风沙土相比受到的影响更为强烈。Ahmadi 等^[12]的研究显示少量的原油增强了土壤样品的持水能力;李小飞等^[13]的研究发

现柴油污染会降低土壤在低水吸力段的持水能力。而石油污染土壤后对土壤持水特征影响方面的研究仍然较少,不利于石油烃污染后的土壤持水和供水性能的认识。针对这一问题,本文利用室内模式试验研究原油和柴油污染之后,不同浓度对土壤水分特征曲线的影响,分析其持水和供水特征,以期石油烃污染土壤的修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用土壤为远离油井污染的清洁耕作层黄绵土,有机碳含量 6.26 mg/kg, pH 值为 8.11, 土壤颗粒机械组成为小于 0.002 mm 的黏粒占 10.97%, 0.002~0.05 mm 的粉粒占 72.05%, 0.05~2 mm 的砂粒占 16.98%。

供试原油为延长石油公司采自陕西安塞的原油,密度是 0.858 g/cm^3 , 黏度系数为 4.05 $\text{mPa} \cdot \text{s}$; 柴油为普通商品油品,密度是 0.854 g/cm^3 , 黏度系数为 3.45 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

1.2 试验处理

试验设置原油和柴油两种处理,每种处理设置 0, 5, 10, 20, 50, 100, 200 g/kg 的 7 个浓度,试验重复 3 次。

称取 1 kg 的风干黄绵土样品,根据设计的污染浓度称取相应数量的原油和柴油,少量多次将原油、柴油分别与土壤均匀混合,控制土壤质量含水量为 20%;将混匀后的土壤用黑色塑料袋层层密封好在实验室培育 40 d 备用。

1.3 水分特征曲线测定

利用离心机法测定土壤的水分特征曲线。在离心机 100 cm^3 的专用环刀内按照设计土壤容重 1.35 g/cm^3 填充土壤,环刀上下口均垫有滤纸防止土壤样品漏出环刀,用蒸馏水饱和 48 h 后用于试验测定。

2 结果与分析

2.1 对土壤水分特征曲线的影响

柴油和原油污染后土壤水分特征曲线分别见图 1—2,从中可以看出,无论柴油还是原油污染土壤后,水分特征曲线都会出现下移的特点,说明在同一水势下,由于石油烃的污染,土壤含水量下降,且随着污染浓度的增加,含水量下降的更为剧烈。未受污染土壤饱和含水量为 34.41%,柴油处理土壤后饱和含水量范围在 32.40%~37.91%,平均值为 33.63%,原油处理下土壤饱和含水量在 31.01%~35.07%,平均值为 32.52%;当土壤受到 $pF < 1.50$ 低吸力影响后,未污

染土壤含水量降至 33.75%，此时，柴油处理下土壤含水量平均值为 30.72%，柴油污染浓度在 100 g/kg 时含水量最低，仅 29.03%，原油处理土壤含水量均值为 29.23%，当原油污染浓度为 50 g/kg 时含水量最低，为 27.99%；当土壤受到 $pF=3.50$ 的吸力后，未污染土壤的含水量为 15.90%，柴油和原油处理土壤在 200 g/kg 重度污染下达到最低，含水量分别为 12.43%，10.47%； $pF=4.18$ 吸力下，未污染土壤含水量为 10.89%，柴油处理中，污染为 20 g/kg 时含水量达到最低，仅为 8.48%，

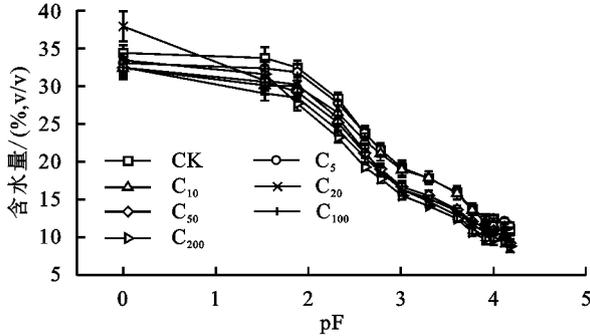


图 1 柴油污染土壤的水分特征曲线

根据拟合结果，反映土壤总孔隙度的饱和含水量 θ_s ，对照未受污染的清洁土壤为 32.47%，受到 5 g/kg 低浓度原油、柴油污染时分别为 30.26%，31.17%，下降了 6.8% 和 4.0%；在中等浓度 20 g/kg 石油烃污染时，原油污染下 θ_s 为 29.86%、柴油为 30.60%，与对照相比分别下降 8.0% 和 5.8%；在 200 g/kg 重度污染时，原油、柴油污染的 θ_s 与对照相比分别下降 12.0% 和 10.8%。对于残余含水量 θ_r ，对照土壤为 8.33%，轻度原油、柴油污染为 6.80% 和 7.02%，中度污染为 5.85% 和 6.64%，重度污染为 3.66% 和 3.95%；原油在轻、中和重度污染下的 θ_r 分别降低 18.4%，29.8% 和 56.0%，柴油在轻、中和重度污染下 θ_r 分别降低 15.7%，20.3% 和 52.6%。在饱和土壤中施加吸力，当吸力较小时，土壤中尚无水排出，土壤含水率维持饱和值；当吸力增加超过某一临界值时，土壤孔隙中的水分开始向外排出，该临界负压值称为进气值。van Genuchten 方程中 α 的倒数即被认为是这个进气值^[14]，对照土壤的 α 值为 0.086，在原油的轻、中、重度污染情况下， α 值分别为 0.074 2, 0.055, 0.046；柴油的 α 值分别为 0.076 3, 0.057 7, 0.048 3。整体来说，随着污染的加重， α 值减少；也就是说，随着石油烃污染程度的增大，需要更大的水吸力才能排水。参数 n 可以表征土壤孔隙的弯曲和复杂程度，对照清洁土壤的 n 值为 1.032 2，在原油的轻、中、重度污染情况下， n 值分别为 1.175 8, 1.260 5, 1.441 0；柴油的 n 值分别为 1.110 7, 1.333 6, 1.423 7。石油烃污染浓度与 van

原油处理中，重度污染 200 g/kg 时含水量达到最低，仅为 6.81%。式中的 van Genuchten 方程常用于土壤水分特征曲线的拟合：

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (ah)^n]^{-m} \quad (1)$$

式中： θ_r 表示残余含水量 (cm^3/cm^3)； θ_s 表示土壤饱和含水量 (cm^3/cm^3)； h 表示土壤基质吸力 (cmH_2O)； α 表示土壤水分特征曲线最大拐点对应的土壤水吸力的倒数 (cm^{-1})； m, n 表示土壤水分特征曲线的形状参数，其中 $n = 1/(1-m)$ 。

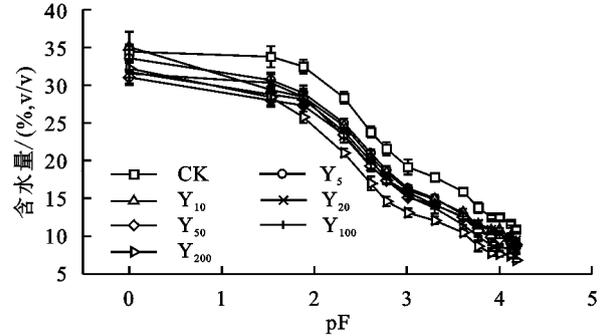


图 2 原油污染土壤的水分特征曲线

Genuchten 方程中的 θ_s, θ_r 参数存在着图 3 所示的 $y = ae^{-bx}$ 指数衰减关系，对于饱和含水量 θ_s ，无论原油和柴油其衰减指数均为 0.000 4；而对于残余含水量 θ_r ，原油的衰减指数为 0.004 6，柴油的为 0.003 7，原油污染对残余含水量的影响较柴油为大。对于 van Genuchten 方程中的形状参数 n 和 α 参数，石油烃的种类影响不大，主要是浓度的影响，随着浓度的增加， α 参数逐渐减小，满足 $y = 0.0906x^{-0.127}$ ($R^2 = 0.9161$)； n 参数随着浓度呈现对数函数 $y = 0.0743\ln(x) + 1.0397$ ($R^2 = 0.9149$) 的模式增加 (图 4)。

2.2 对土壤水分常数的影响

土壤水分常数可反映土壤对各类水分的保持能力以及植物对土壤水分有效利用的程度。根据土壤物理中水分有效性的原则， $pF2.53$ 对应的含水量是田间持水量， $pF4.18$ 对应的是凋萎持水量， pF 在 2.53~4.18 的含水量是总有效水， $pF2.53 \sim 3.79$ 之间的是速效水， $pF3.79 \sim 4.18$ 的是迟效水。由于石油烃污染之后，会对土壤的性质产生巨大的影响，此时 $pF2.53$ 和 $pF4.18$ 对应的含水量与田间持水量和凋萎持水量还是存在一些差异，因此两者之间的含水量我们称之为表观有效水。根据拟合的土壤水分特征曲线，不同石油烃污染浓度下的土壤水分常数见表 1。从表中可以看出，饱和含水量、田间持水量、凋萎含水量，均随着污染程度的增加而降低。但由于土壤的田间持水量和凋萎含水量随不同污染浓度的下降不一致，使得其有效水的含量表现出奇怪的变化方式。对于柴油污染，其总有效水的含量从未污染的 12.08% 随着污染浓度

的增加,降低到浓度为 20 g/kg 的 10.90%;随后随着石油烃浓度的增大,有效水含量又增加到污染最高的浓度 200 g/kg 所对应的 12.98%。对于原油污染,有效水的变化趋势与柴油污染一致,从未污染的 12.08% 降低到浓度为污染浓度为 10 g/kg 的 11.40% 左右;又随浓度的增大增加到污染最高的浓度 100 g/kg 所对应的 13.42%。无论是柴油污染还是原油污染,有效水含量随污染浓度表现出 U 字形的变化模式。进

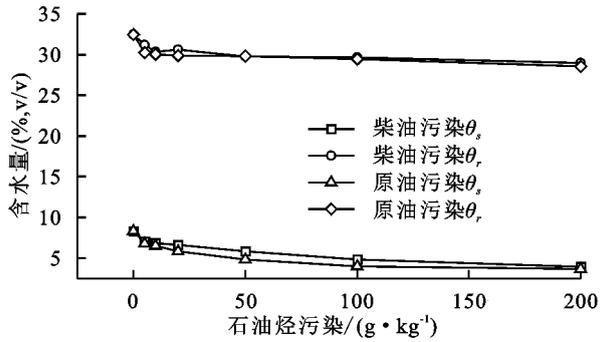


图 3 石油烃污染浓度与饱和残余含水量关系

一步分析发现,在未污染时,土壤有效水中的速效水与迟效水的比值为 1.70,而受 5 g/kg 柴油轻度污染之后,比值为 0.83;重度的 200 g/kg 污染下为 0.43,表现出下降的趋势;而原油污染,污染浓度与速效水和迟效水的比值之间的关系同于柴油污染,只是其下降的幅度更大,在浓度为 200 g/kg 污染下仅为 0.25。说明了石油烃污染不仅影响其有效水的含量,主要影响的是速效水的含量。

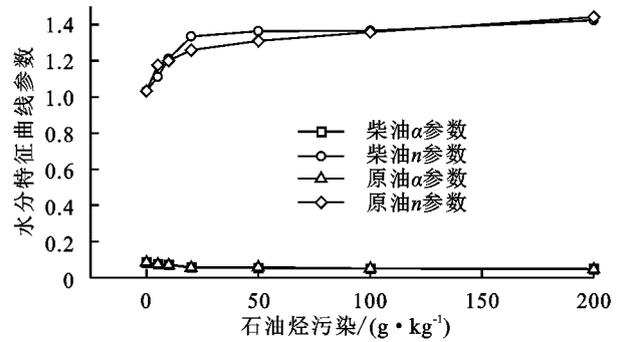


图 4 石油烃污染浓度与参数 α, n 的关系

表 1 石油烃污染对土壤水分常数的影响

| 污染浓度/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 柴油 | | | | | | 原油 | | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | 饱和 含水量/% | 田间 持水量/% | 总有效水 含量/% | 速效水 含量/% | 迟效水 含量/% | 凋萎含 水量/% | 饱和 含水量/% | 田间 持水量/% | 总有效水 含量/% | 速效水 含量/% | 迟效水 含量/% | 凋萎含 水量/% |
| 0 | 32.36 | 21.40 | 12.08 | 7.60 | 4.48 | 9.32 | 32.36 | 21.40 | 12.08 | 7.60 | 4.48 | 9.32 |
| 5 | 31.12 | 20.11 | 12.09 | 5.47 | 6.61 | 8.02 | 30.11 | 19.20 | 11.40 | 5.29 | 6.11 | 7.80 |
| 10 | 30.01 | 19.25 | 11.44 | 4.88 | 6.56 | 7.81 | 29.89 | 18.89 | 11.42 | 4.66 | 6.76 | 7.47 |
| 20 | 29.17 | 18.44 | 10.90 | 4.95 | 5.95 | 7.54 | 29.64 | 18.68 | 11.98 | 4.56 | 7.42 | 6.70 |
| 50 | 29.02 | 18.72 | 11.88 | 5.13 | 6.75 | 6.84 | 29.52 | 18.56 | 12.91 | 4.47 | 8.44 | 5.65 |
| 100 | 29.00 | 17.60 | 12.79 | 4.87 | 7.92 | 4.81 | 29.31 | 17.29 | 13.42 | 4.25 | 9.17 | 3.87 |
| 200 | 28.47 | 16.86 | 12.96 | 3.9 | 9.06 | 3.90 | 28.17 | 16.44 | 12.85 | 2.60 | 10.25 | 3.59 |

3 讨论

对于土壤水分特征曲线,在低吸力段的持水能力主要依靠土壤的孔隙状况,特别是大孔隙的孔径与数量;而高吸力段的持水能力主要受土壤颗粒表面性质的影响^[15]。无论是柴油还是原油,其主要的化学成分是斥水性的烃类物质,这些烃类物质在低浓度时主要黏附在土壤颗粒的表面,对土壤的孔隙度影响不大,因此污染后整体的土壤水分特征与未污染的土壤差异较小;在高浓度时,不仅在土壤颗粒表面形成了一层疏水层还会在一部分土壤孔隙中充满石油烃类物质,阻止水分进入较小的孔隙,导致重度污染的水分特征曲线不同于未污染土壤。土壤水分特征曲线的高吸力和低吸力段,分别代表了孔隙和颗粒表面的效应,因此无论柴油还是原油,主要影响的是土壤水分的高吸力和低吸力段,这同于 Wei 等^[11]的结果。未污染与重度污染土壤水分特征曲线的这种差异,原因有可能在于,低浓度石油烃污染时土壤孔隙主要充水;而石油烃污染浓度升高之后,土壤孔隙中不仅有

水还存在部分石油,由于污染处理是石油烃在先,因此土壤的孔隙会优先被石油烃占据,这样后续的水分就只能进入相对较大的孔隙,导致凋萎含水量的降低。由于田间持水量与凋萎含水量的降低幅度的差异,导致了有效含水量的降低。在高浓度石油烃的重度污染下,相对较大的孔隙也被石油烃占据,导致能进入土壤的水分更少,且离心法测定水分特征曲线会发生容重变化^[16-17],我们计算之后的孔隙会缩减 18% 左右,这样导致了高浓度污染中的部分石油烃在高吸力下会被排除,导致表现的凋萎含水量剧烈下降,使得表现的有效水含量增加,出现表现有效水含量随污染程度呈 U 字型变化的特点。

4 结论

不同浓度柴油与原油石油烃污染土壤后,土壤的持水能力均出现下降,水分特征曲线位于未污染土壤的下部,原油污染的影响更甚。无论柴油还是原油污染,水分特征曲线 van Genuchten 模型参数 θ_s 、 θ_r 随着污染浓度的增加呈现出指数衰减, α 值呈幂函数减

小,而 n 值出现随污染浓度呈对数增加的特点。柴油、原油污染之后,土壤的饱和含水量、田间持水量以及凋萎含水量均出现下降,总的有效水含量与未污染土壤相比降低。由于柴油、原油这些石油烃类物质,在低浓度下主要附着在土壤颗粒物的表面,而在高浓度下不仅附着在颗粒表面,还有部分会进入土壤的孔隙;同时离心法测定土壤水分特征曲线还存在变容重、变孔隙的问题,导致严重污染的土壤中的石油烃在离心过程中会部分排出,表现出含水量的表观变化而非实际水分的变化,由此导致了土壤表观有效水含量随污染浓度变化的 U 字形变化特征。石油烃污染土壤之后,由于其浓度的大小直接影响石油烃与土壤颗粒作用的机制,从而对土壤的持水性产生影响,但目前这方面的研究相对薄弱,有待进一步的深入。

参考文献:

- [1] 张晓阳. 陕北石油污染对土壤理化性质和酶活性的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [2] 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.
- [3] 李小利, 刘国彬, 许明祥. 陕北油田土壤和地表水石油污染特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 145-148.
- [4] 李小利, 刘国彬, 薛蕙, 等. 土壤石油污染对植物苗期生长和土壤呼吸的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 95-98.
- [5] Cui B, Zhang X, Han G, et al. Antioxidant defense response and growth reaction of *Amorpha fruticosa* seedlings in petroleum-contaminated soil[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2016, 227(4): 1-10.
- [6] 程金香, 马俊杰, 王伯铎, 等. 石油开发工程生态环境影响分析与评价[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(6): 64-65, 78.
- [7] 邓绍云, 徐学义, 邱清华. 我国石油污染土壤修复研究现状与展望[J]. 北方园艺, 2012(14): 184-190.
- [8] 魏样, 蔡苗, 朱坤, 等. 石油污染对土壤水分特征的影响[J]. 地球环境学报, 2018, 9(3): 266-272.
- [9] 李梅, 郑西来, 童玲, 等. 石油污染对土壤渗透性的影响研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 48(2): 119-123.
- [10] 魏样, 王益权, 何俐蓉. 石油污染对土壤水理性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S1): 98-101.
- [11] Wei Y, Wang Y, Han J, et al. Analysis of water retention characteristics of oil-polluted earthy materials with different textures based on van Genuchten model[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 373-380.
- [12] Ahmadi M, Ebadi T, Maknoon R. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures[J]. *Engineering Geology*, 2021, 283; doi. org/10. 1016/j. enggeo.2021.106021.
- [13] 李小飞, 李一菲, 钱天伟. 柴油污染对土壤水分特征曲线的影响研究[J]. 节水灌溉, 2015(6): 22-25.
- [14] Schaap M G, Van Genuchten M T. A modified mualem; van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(1): 27-34.
- [15] 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.
- [16] 吕殿青, 邵明安, 王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报, 2003, 3(3): 110-114.
- [17] 邵明安, 吕殿青, 付晓莉, 等. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系. I. 填装土壤[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1003-1009.
- [23] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of animal ecology*, 2008, 77: 802-813.
- [24] Wang G X, Li Y S, Hu H C, et al. Synergistic effect of vegetation and air temperature changes on soil water content in alpine frost meadow soil in the permafrost region of Qinghai-Tibet[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22: 3310-3320.
- [25] Zhang F, Li H, Wang W, et al. Net radiation rather than moisture supply governs the seasonal variations of evapotranspiration over an alpine meadow on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(2): e1925.
- [26] 曹广民, 李英年, 鲍新奎. 高寒地区寒冻锥形土的持水特性[J]. 土壤, 1998, 30(1): 27-30.
- [27] 张法伟, 王军邦, 林丽, 等. 高寒草甸非生长季土壤表层水汽传输阻抗的变化特征和水热驱动[J]. 中国农业气象, 2017, 38(2): 96-103.
- [28] 闵安成, 张一平, 朱铭莪, 等. 田间土壤的水势温度效应[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 235-240.
- [29] 牛赞, 刘贤德, 王立, 等. 祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 385-391.
- [30] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 40-50.
- [31] 张法伟, 郭竹筠, 李以康, 等. 青海湖芨芨草干草原植被退化对土壤温湿特征的影响[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 219-225.

(上接第 141 页)