

玛纳斯河流域土壤斥水性及其影响因素

王亦尘 李毅* 肖珍珍

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 土壤斥水性(SWR)阻碍入渗及再分布过程.虽然斥水土壤在世界广泛存在,但其产生机理并不明确.本文采用滴水穿透时间(WDPT)法、酒精摩尔浓度(MED)法和接触角(θ)法测定了新疆玛纳斯河流域典型土壤的SWR指标,其中 θ 的测定采用高度法和质量法.对WDPT是否受烘干及不同容重的影响进行对比,探讨各SWR指标之间的联系,并分析了SWR的关键理化性质影响因子,探讨土壤斥水的机理和原因.结果表明:高容重土壤的WDPT值更大,烘干土壤的WDPT值比风干土壤大;3种SWR指标(WDPT、MED及 θ)之间有一定的相关关系,但MED与 θ 的相关性并不明显,表明各SWR指标之间虽有一定联系,但表征方面具有差异性;采用高度法和质量法测量水与土壤的 θ 值时,高度法的 θ 值大于质量法,高度法之间重复差异小于质量法;使用正辛烷作为参比溶液测量水与土壤的 θ 值时,其重复的差异较小,低于无水乙醇;在多种理化性质中,黏粒含量比其他土壤属性更显著地影响WDPT和 θ ;[K⁺],[Na⁺]均与 θ 呈正相关;蒙脱石含量与WDPT、MED呈负相关.综上,土壤SWR的测定方法中,WDPT法操作简单但易受影响;MED法缩短了入渗时间但试验过程耗时;接触角法操作复杂,结果相对精确,采用正辛烷作为参比溶液的高度法更可靠.建议采用多种指标综合表征土壤斥水性.

关键词 土壤斥水性;滴水穿透时间法;酒精摩尔浓度法;接触角;土壤理化性质

Water repellency and its influencing factors in Manas River Basin, China. WANG Yi-chen, LI Yi*, XIAO Zhen-zhen (College of Water Resources and Architecture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Soil water repellency (SWR) impedes the processes of soil water infiltration and redistribution. Although water repellent soils exist extensively in the world, its causes were not very clear. In this research, three measurement methods including the water droplet penetration time (WDPT), the molarity of ethanol drop (MED) and the contact angle (denoted as θ below) methods, were applied to obtain different SWR indices for the tested soils collected in Manas River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. The height method and the mass method were conducted to measure θ values. WDPT values of different soil samples were compared to investigate whether WDPT values were affected after being oven-dried or by different bulk densities. The relationships among three SWR indices (WDPT, MED and θ) were compared, and the major soil physico-chemical properties which influenced SWR were analyzed to discuss the intrinsic mechanism that caused SWR. The results showed that WDPT values of higher bulk density were larger than those of lower bulk density, and WDPT values of oven-dried soils were larger than those of air-dried soils. There were correlations between the three SWR indices of WDPT, MED and θ , but MED was insignificantly related to θ , which showed the differences among various SWR indices, although they were related to each other. When measuring θ values of soil-water, θ values obtained using the height method were larger than those obtained using the mass method, and the differences of θ for the three replications with the height method were smaller than those with the mass method. When using octane as the reference liquid for measuring θ values of soil-water, the differences of the three

本文由国家自然科学基金项目(51579213)、高等学校学科创新引智计划项目(B12007)和国家留学基金项目(201506305014)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51579213), the China 111 Project (B12007), and the China Scholarship Council for Studying Abroad (201506305104).

2016-05-09 Received, 2016-09-07 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyikitty@126.com

replications were small, being lower than those using ethyl alcohol. Among the studied multi-physico-chemical properties, clay content affected WDPT and θ values more significantly than other soil physico-chemical properties. Concentrations of K^+ and Na^+ were both positively correlated to θ values, while the content of montmorillonite was negatively correlated to WDPT and MED values. In summary, among the three SWR measurement methods, the WDPT method was quite simple in operation but was susceptible, the MED method shortened the infiltration time but was time-consuming in operation, and the contact angle method was complicated in operation but the results were relatively accurate. When using octane as the reference liquid for the height method, it was more reliable than using the other liquids. Because each index had its inherent nature, it was suggested to use multiple indices to characterize SWR comprehensively.

Key words: soil water repellency (SWR); water droplet penetration time (WDPT) method; molarity of ethanol drop (MED) method; contact angle; soil physical and chemical properties.

土壤斥水性(soil water repellency, SWR)指水分滞留在土表不能迅速铺展^[1-2]、难以入渗的现象。斥水性土壤在全球范围内普遍存在。SWR可在不同质地土壤、不同土地利用方式和不同气候下发生,对土壤及环境有直接或潜在的负面影响^[3]。它严重影响土壤水分运移状况,使入渗异常困难,植物根部不能获得足够的水分^[4],从而导致作物受旱、减产。在山区等地,强降雨剧烈冲刷山体坡面,加强了地表径流和侵蚀作用^[5]。土体之间存在的大孔隙以及植物根孔和生物活动造成的孔隙,在灌溉或降雨过程中易形成指流,使土壤内部水分分布不均匀。强斥水性使得携带氮磷养分的土壤重力水沿大孔隙迅速进入地下水^[6],造成肥料流失和地下水污染。

1968年美国加州滨河分校召开了首次有关SWR的国际学术会议之后,有关SWR的出版物开始增多^[7]。从最初斥水性土壤的发现,到SWR不同评价指标的提出,研究不断深入。Debano等^[8]研究了火灾发生温度与SWR之间的关系;Chau等^[9]对比了土壤颗粒组成、斥水持续时间和临界含水量3个参量与SWR之间的关系;Nguyen等^[10]模拟了斥水性土壤中的溶质迁移过程。我国最早关于SWR的报道出现在1994年,较国际上晚,随后相继开展了相关研究^[11]。如吴延磊等^[12]进行了滴水穿透时间(water droplet penetration time, WDPT)法和酒精摩尔浓度(molarity of ethanol drop, MED)法的关联探究;刘春成等^[13]研究了微咸水灌溉对斥水性土壤水盐运移的影响;宋红阳等^[14]研究了不同质地斥水土壤的入渗模型。在斥水性成因方面,目前认为SWR的成因不仅与土壤的内在属性有关,而且和其所处的外部环境有紧密联系。土壤、有机质和腐殖质掺杂、包裹在土壤颗粒表面,会引发SWR^[3,15]。土壤中的微生物以及生物结皮^[16]也能够造成SWR。一些发

生过火灾的区域经过高温灼烧后,表土层也会发生SWR^[3]。此外,土壤质地、有机碳含量、粘土矿物等诸多因素都会引起斥水现象。由于SWR成因的复杂性,进行SWR发生机理的深层探究、筛选其关键影响因子的工作显得十分必要。虽然目前相关研究成果较多,但因斥水性土壤的发生机理非常复杂,涉及土壤本身的理化性质、外部成土因素以及气候等多方面因子,不同区域SWR的等级和斥水机理需要鉴别,进行全面分析。

从总体上看,当前针对土壤SWR机理的研究相对薄弱。以往的研究表明,新疆玛纳斯河流域^[17]存在斥水性的盐碱土,且其斥水性具有一定程度的空间变异性^[18],但目前对该区域土壤的斥水机理并不清楚。本文以新疆玛纳斯河流域主要灌区的农田土壤为例,基于WDPT、MED和毛管上升试验法3种方法,探究不同SWR指标之间的内在联系,从不同角度评价SWR,探讨研究区土壤发生斥水的机理和原因,以期对SWR评价和成因分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 土样的采集与理化性质的测定

土样采自新疆玛纳斯河流域的安集海、石河子、莫索湾、玛纳斯县、129团、121团、132团7个灌区。使用GPS进行导航定位,多选择以村庄、连队为单位的农田进行采样,取样间距为2~3 km,取样深度0~10 cm^[19],共221个样品。其中,安集海75个、石河子33个、莫索湾13个、玛纳斯县37个、129团19个、121团28个、132团16个。取回的土样为灰漠土,是新疆的重要土类,具有一定的典型性。土样经室内风干、研磨、剔除杂质后,过2 mm筛备用。

使用激光粒度仪对土样进行颗粒组成分析^[20],根据测定的黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02

mm)和砂粒(0.02~2 mm)含量,按照国际制标准进行质地分类.采用 DDB-303A 型电导率仪测定电导率(EC)^[20];采用外热-重铬酸钾氧化法^[21]测定有机质含量(SOM);采用原子吸收分光光度法测定土壤 K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺浓度^[20];委托中国科学院南京土壤研究所使用日本理学 Ultima IV 进行 X 衍射分析^[20],从而获得黏土矿物种类和相对含量.

1.2 土壤 SWR 的测定

1.2.1 滴水穿透时间法

采用 WDPT 法测定 WDPT,用来反映土壤斥水的持续性^[15].用滴管(每滴为 0.06 mL)吸取蒸馏水滴于土表,为减少水滴动能的影响,控制滴管口与土表的距离为 1 cm,每个样品重复测定 6 次,取其完全渗入时间的平均值作为该样品的 WDPT 值.依据 WDPT 值可分为不斥水(WDPT<5 s)、轻微斥水(5~60 s)、强烈斥水(60~600 s)、严重斥水(600~3600 s)和极端斥水(>3600 s)5 个等级^[15].在容重 1.16 g·cm⁻³、75℃烘干的条件下,选出 WDPT>5 s 的 25 个土样作为主要样品,占总样品数量的 11.3%.此外,为保证所测定的指标具有代表性,结合研究区自然状态下的实际土壤容重(最大值 1.6 g·cm⁻³,最小值 1.11 g·cm⁻³,平均值 1.41 g·cm⁻³)^[22],测定设计容重 1.16 g·cm⁻³的室内风干土样及容重 1.45 g·cm⁻³的室内风干土样的 WDPT,以便对比烘干及容重变化对 WDPT 的影响.

1.2.2 酒精摩尔浓度法

采用 MED 法测定得出的 MED 指标可表征斥水性的强度^[23].使用纯度为 95% 的酒精配制不同体积分数的酒精溶液,相应应有 1.5%、3%、7%、12%、25%、30%、40% 和 50% 等 8 个等级,需根据实际的人渗速率调整酒精溶液浓度等级.使用滴管吸取不同浓度的酒精溶液滴在土表,记录酒精液滴完全渗入的时间.寻找出在 5 s 内入渗的酒精溶液浓度,将其摩尔浓度值作为该土样的 MED.

1.2.3 接触角法

当液体滴到土壤上时,液滴呈现弧状,弧的切线与土表形成的角度就是接触角(表示为 θ).通过测定 θ 值可判断土壤斥水的严重程度. $\theta>90^\circ$ 为斥水土壤; $0<\theta<90^\circ$ 为亚临界斥水土壤; $\theta=0^\circ$ 为亲水土壤.由于土表面不规则,无法直接测定 θ ,通常用间接方法,基于毛管上升原理测定 θ ^[9,23-24].使用接触角评价 SWR.通过高度法和质量法测量 θ ^[25],使用的测试液体有水、无水乙醇和正辛烷.两种方法的试验装置如图 1 所示.

高度法考虑液体对土柱的压力,用改进的

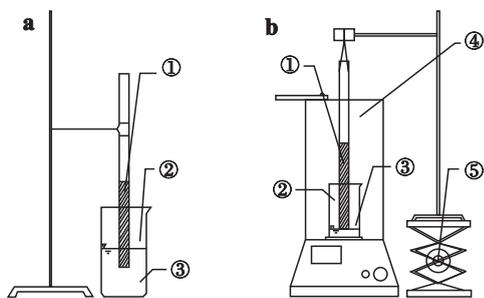


图 1 毛管上升试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of the capillary rise experimental system.

a) 高度法 The height method; b) 质量法 The mass method. ① 土柱 Soil tube; ② 烧杯 Breaker; ③ 溶液 Liquid; ④ 电子天平 Electronic balance; ⑤ 升降台 Lifting platform.

Washburn 公式^[26]计算液-土界面的 θ .公式为:

$$h^2 + 2hL = \frac{rt\gamma_L \cos\theta}{2\eta} \quad (1)$$

式中: h 为液体在土柱中的上升高度(cm); L 为土柱底部浸没在液体中的深度(cm); r 是与土壤毛管半径和其水力半径有关的参数(μm); t 为液体上升时间(s); γ_L 为液体表面张力($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$); η 为液体粘滞系数($\text{mPa}\cdot\text{s}^{-1}$).

γ_L 和 η 可在化学手册^[27-28]中查得,水、无水乙醇和正辛烷在 20℃ 下的密度分别为 0.99、0.79 和 0.70 g·cm⁻³,表面张力分别为 72.8、22.4 及 21.6 mJ·m⁻²,粘滞系数分别为 1.00、1.19 和 0.54 mPa·s⁻¹. r 值难获得,可借助具有完全湿润性质的烷烃类物质即参比溶液(如正辛烷^[23]、无水乙醇)获取.通常认为,参比溶液与土壤的接触角 $\theta=0^\circ$,即 $\cos\theta=1$.这样便可对参比溶液和水分别应用式(1)绘制 $(h^2 + 2hL)-t$ 图,根据该图拟合直线的斜率值计算 r 值,将 r 代入水为供试溶液时的式(1),从而求出分别使用正辛烷及无水乙醇两种参比溶液时水-土界面的 θ .应用式(1)时 θ 的有效范围是 $0^\circ\sim 90^\circ$.

在高度法试验中,采用内径 24 mm、高度 5 cm、带刻度的有机玻璃管装土后进行毛管上升试验.土壤容重为 1.45 g·cm⁻³、当土柱底端被水浸润时,用秒表记录浸润时间和对应的湿润锋高度,每个土样重复 3 次.

质量法^[25]原理与高度法类似,不同点是要记录土柱吸收液体的质量(ω)随时间的变化,公式为:

$$\omega^2 = \frac{c\rho^2\gamma_L \cos\theta}{\eta} \quad (2)$$

式中: c 为系数, $c=r\varepsilon^2(\pi R^2)^2$; ρ 为浸润液体密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); ε 为表征土壤孔隙度的系数.与高度法类似,因 $\omega^2\sim t$ 是线性关系,因此取其斜率可以间接

得出 c 值.进行质量法试验时,与 Siebold 等^[25]所用下挂称量土柱的装置有所不同,本研究将土柱悬吊,利用分析天平(量程 200 g,感量 0.1 mg)和秒表记录 $\omega^2 \sim t$ 的动态变化过程.

1.3 数据处理

使用 SPSS 17.0 对数据进行统计分析.对 3 种不同条件下测定的土壤 WDPT 值进行方差齐性检验,分别以是否烘干和容重变化作为影响因子,进行单因素方差分析.对所测得的不同斥水性指标和理化性质数据依次进行单样本 K-S 检验,将服从正态分布的数据进行各斥水指标和理化性质因素间的 Pearson 检验,获取相关系数和显著性,从而判断不同斥水指标之间的联系,以及各理化性质对不同斥水指标的影响情况.

2 结果与分析

2.1 WDPT 和 MED 的变化特征

根据对斥水性样品的测定结果,不同的温度和容重处理可以改变其 WDPT 值(图 2、3).

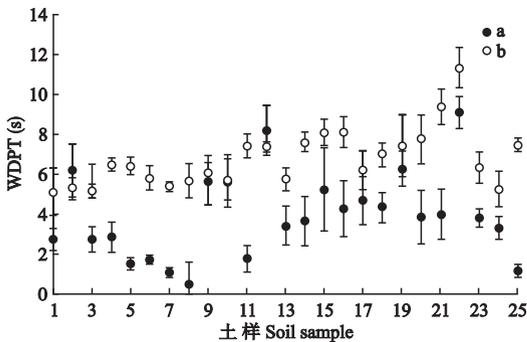


图 2 烘干前后温度变化对 WDPT 值的影响

Fig. 2 Influence of different treatments of temperature on WDPT values.

a) 容重 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 风干处理 Air dried with $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; b) 容重 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干处理 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ oven dried with $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

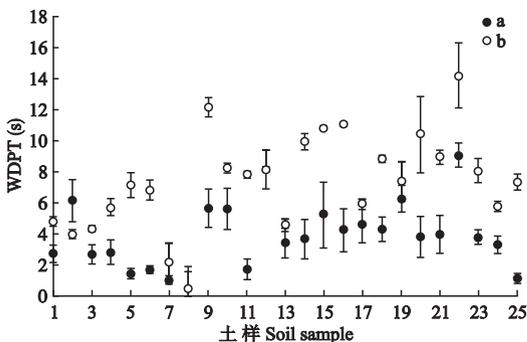


图 3 不同容重对 WDPT 值的影响

Fig. 3 Influences of different bulk densities on WDPT values.

a) 容重 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 风干处理 Air dried with $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; b) 容重 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 风干处理 Air dried with $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

图 2 表明,容重为 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,烘干土的 WDPT 值整体大于风干处理.在选出的 25 个土样中,经烘干处理的 WDPT 值都 $>5 \text{ s}$,而风干处理中大部分都 $<5 \text{ s}$,其中,7 个土样的 WDPT $>5 \text{ s}$,18 个 $<5 \text{ s}$.同时,两组数据均通过方差齐性检验,以烘干与否作为因子进行的单因素方差分析,结果显示,该因子对 WDPT 值影响极显著 ($P < 0.01$).

图 3 表明,同样的风干处理下,容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 WDPT 值较 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 大,其中,19 个土样的 WDPT $>5 \text{ s}$,6 个 $<5 \text{ s}$.单因素方差分析结果表明,容重对 WDPT 值的影响极显著.

综上,3 种处理对所研究土样的 WDPT 影响明显.容重增加和烘干都可增大土壤 WDPT 值.可以认为研究区土壤的 WDPT 会受其地点的实际容重影响而发生变化,因而 SWR 是随着时间或外界的某种诱因而变化的.此外,考虑到研究区自然状态下土壤实际的容重和接触角测定中土柱的设计容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,为保证所有 SWR 指标测定条件的一致性,使用容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 风干处理下的 WDPT 值作为研究对象该指标的分析结果, MED 的测定条件也与之相同.

由图 4 可见,不同土样的 MED 值存在较大差异,对某些土壤使用极低浓度的酒精溶液就可以在 5 s 内入渗,有的只有使用高浓度的酒精溶液时才可满足;相同浓度的酒精可以使斥水程度在某一范围内的土壤均满足 5 s 内入渗.

2.2 高度法和质量法测定的接触角

由图 5 可见,使用高度法测 θ 的结果大于质量法(高度法测 θ 的平均值是 83.42° ,质量法是 74.06°);使用正辛烷作为参比溶液,每个土样间的 3 次重复变异系数小于无水乙醇(正辛烷作为参比溶液的 25 个土样的变异系数平均值是 1.4%,无水乙醇是 4.9%);因以正辛烷作为参比溶液的高度法测

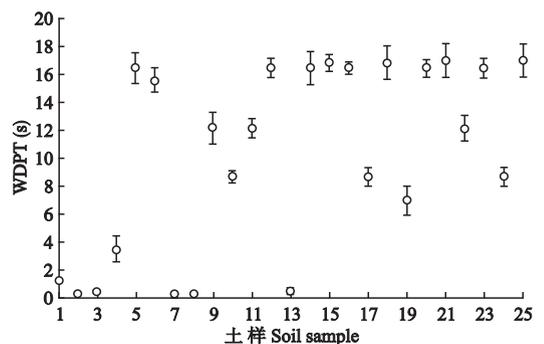


图 4 MED 的测定结果

Fig. 4 MED test results.

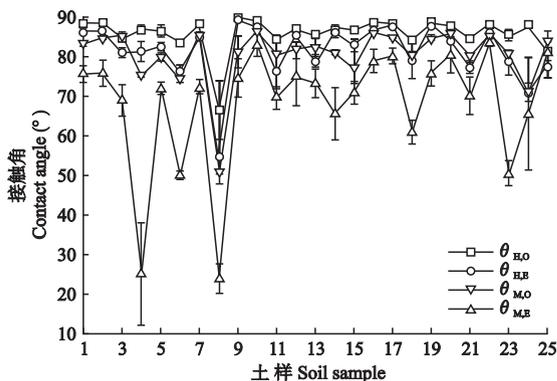


图5 高度法与质量法测定接触角结果比较

Fig.5 Comparison of contact angles results measured by the height and the mass method.

θ : 接触角值 Contact angle value; O: 正辛烷 Octane; E: 无水乙醇 Ethyl alcohol; H: 高度法 Height method; M: 质量法 Mass method.

θ 的变异系数平均值最小(1.0%),故认为其稳定性优于其他3种。

2.3 不同斥水指标间的关系

由表1可见,不同土样的MED值之间的差异大于WDPT之间的差异;4种不同方法得到的水-土接触角值不同,以正辛烷作为参比溶液的高度法所测得的 θ 值最大;不同土样间的差异也最小,而以无水乙醇作为参比溶液的质量法得到的 θ 值最小,土样间差异最大。

对WDPT、MED和 θ 3个指标进行单样本K-S检验,结果显示,所有数据均服从正态分布。

由表2可见,WDPT与MED之间存在较好的相关性,而 θ 与MED的相关性很弱;WDPT与4种不同条件下所测得的 θ 相关系数较接近,显著性相同,说明WDPT与 θ 之间存在一定关系,且WDPT与高度法的相关性略高于质量法; $\theta_{H,O}$ 与 $\theta_{H,E}$ 的相关性高于 $\theta_{M,O}$ 与 $\theta_{M,E}$ 的相关性,即高度法得到的 θ 值之间相关系数略优于质量法;使用正辛烷作为参比溶液

表1 斥水性指标统计结果

Table 1 SWR indices statistical results ($n=25$)

SWR 指标 SWR index	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 SD
WDPT (s)	14.17	0.53	7.43	3.11
MED ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	17.04	0.26	10.34	6.75
$\theta_{H,O}$ ($^{\circ}$)	89.62	66.25	85.64	4.56
$\theta_{H,E}$ ($^{\circ}$)	89.11	54.51	81.20	7.29
$\theta_{M,O}$ ($^{\circ}$)	86.18	50.68	80.23	7.36
$\theta_{M,E}$ ($^{\circ}$)	83.31	23.87	67.89	15.64

WDPT: 滴水穿透时间值 Water droplet penetration time; MED: 酒精摩尔浓度值 Molarity of ethanol value; θ : 接触角值 Contact angle value; O: 正辛烷 Octane; E: 无水乙醇 Ethyl alcohol; H: 高度法 Height method; M: 质量法 Mass method. 下同 The same below.

表2 不同斥水性指标 Pearson 相关系数的双侧检验结果
Table 2 Pearson two-tail test results among different SWR indices

	WDPT	MED	$\theta_{H,O}$	$\theta_{H,E}$	$\theta_{M,O}$
MED	0.748 **				
$\theta_{H,O}$	0.462 *	0.145			
$\theta_{H,E}$	0.478 *	0.136	0.896 **		
$\theta_{M,O}$	0.412 *	0.152	0.814 **	0.876 **	
$\theta_{M,E}$	0.427 *	0.209	0.618 **	0.671 **	0.793 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

的 θ 值与理化性质的相关系数高于无水乙醇作为参比溶液,这对高度法和质量法都适用.因正辛烷稳定性更好,以下分析中仅涉及以正辛烷作为参比溶液、基于高度法测定的 $\theta_{H,O}$ 值。

2.4 影响斥水性的关键理化因素

对土样的理化性质进行正态分布检验,结果表明均符合正态分布,然后对其与3种SWR指标进行Pearson相关性分析.由表4可见,OC、EC、 $[\text{Mg}^{2+}]$ 、

表3 土壤理化性质统计结果

Table 3 Statistical results of soil physico-chemical properties ($n=25$)

理化性质 Physical and chemical properties	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 SD
Mo (%)	21.00	2.00	6.88	4.74
$[\text{K}^+]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.26	0.02	0.09	0.07
$[\text{Na}^+]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3.01	0.03	1.25	1.05
EC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	519.00	10.96	187.56	165.85
Clay (%)	45.00	6.00	25.64	8.25
OC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10.38	1.28	4.38	2.87
Ka (%)	21.00	9.00	16.32	2.64
$[\text{Ca}^{2+}]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.35	0.08	0.71	0.65
$[\text{Mg}^{2+}]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.47	0.02	0.13	0.11

OC: 有机碳含量 Organic carbon content; Clay: 粘粒含量 Clay particle content; Ka: 高岭石含量 Kaolinite content; Mo: 蒙脱石含量 Montmorillonite content; $[\]$: 土壤离子浓度,其中高岭石和蒙脱石的粒径均小于 $2 \mu\text{m}$ Soil ion concentration, among them particle size diameter of Kaolinite and Montmorillonite were less than $2 \mu\text{m}$.下同 The same below.

表4 斥水性影响因素与斥水性评价指标间的 Pearson 检验结果

Table 4 Pearson test results between SWR influence factors and SWR indices

理化性质 Physical and chemical properties	WDPT (s)	MED (%)	$\theta_{H,O}$ ($^{\circ}$)
Mo (%)	-0.382 *	-0.400 *	-0.073
$[\text{K}^+]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.009	-0.238	0.450 *
$[\text{Na}^+]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.032	-0.265	0.433 *
EC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.215	-0.226	0.177
Clay (%)	0.512 **	0.068	0.617 **
OC ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.006	-0.099	0.312
Ka (%)	-0.023	-0.071	0.080
$[\text{Ca}^{2+}]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.160	-0.082	0.194
$[\text{Mg}^{2+}]$ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.014	0.265	0.108

[Ca²⁺]和Ka对这3个斥水性指标的影响相关性很弱,Clay对WDPT、 $\theta_{h,0}$ 的相关性较好;[K⁺],[Na⁺]与WDPT、MED的相关性很弱,但与 $\theta_{h,0}$ 的相关性稍强;Mo与WDPT、MED呈负相关,但决定系数未超过0.5.

从对影响斥水性的关键理化性质因素分析来看,黏粒含量、土壤中阳离子种类和黏土矿物对该研究土样的SWR有一定影响,且这3种理化性质因素对SWR的影响也体现在不同斥水指标上.另外,它们对这些指标的影响程度也存在差异.

3 讨 论

3.1 3种SWR指标间的联系

在新疆玛纳斯河流域主要灌区,斥水性土壤虽然总量较少,但分布集中,主要分布在石河子和安集海2个灌区.其中,作为研究对象的斥水性土壤分别占这两个区各自取样量的33%和14.7%,且SWR大部分处于不斥水到轻微斥水之间.本研究使用了WDPT、MED和接触角(θ)3种指标对其SWR进行表征,发现烘干和容重增加会提高土壤WDPT值,可能由于烘干后土壤颗粒表面水分子减少,对外界水分子的引力减弱,呈现出一定的斥水性;而容重的增加则会降低土壤孔隙度,导致水分入渗变慢.由此可知,采用WDPT来表征土壤SWR并不稳定,易受到土壤自身状态和环境的影响.

相关分析发现,WDPT与MED、 θ 之间存在一定的关联.WDPT与MED之间可以拟合出多项式的函数关系[$MED = 18.00 (\lg WDPT)^2 - 1.08 \lg WDPT - 1.56, R^2 = 0.67$],这与吴延磊等^[12]的研究结果类似.另外,不同的参比溶液所得出的 θ 值也存在一定差异,当使用多种指标来表征同种土样SWR时,需考虑土壤状态和外界条件一致,避免对测定结果造成干扰.WDPT与 θ 之间存在较弱的正相关关系,但是相关系数明显低于WDPT与MED.由此看来,这3个指标间虽有一定联系,但各有侧重,反映了SWR的不同方面.这也导致得出的同一种土壤SWR等级有一定差异.

3.2 影响SWR的关键理化因素

不同的理化性质因子对不同SWR指标的影响存在很大差异.虽然SWR指标的表征各有侧重,但某一理化性质因子仅反映了土壤该方面的具体属性.这可能导致某个理化性质因子对SWR的影响不能准确地体现在特定的SWR指标上,有必要考虑诸多因子对斥水性的组合效应.

早期研究认为,粗质地的砂壤土易产生斥水性;但之后的研究发现,中等质地的土壤甚至黏土都会产生斥水性^[27-28].本文在研究区实际采样量共221个,出于对研究目的的考虑和研究成本所限,仅对选出的25个代表样品进行土壤颗粒组成分析,其中,砂壤土1个、黏壤土16个、黏土8个样品,大部分土壤SWR属于轻微斥水级别,可知SWR的发生不限于土壤种类.土壤黏粒含量是影响该批土样SWR的一个较为主要的因素,且对 θ 的影响更明显,原因可能是黏粒含量增加会提高土壤的表面能,在减缓入渗的同时也增加了斥水性.

在阳离子中,只有[Na⁺],[K⁺]与 θ 间具有一定的相关性,且相关系数较接近.由于土壤中[Na⁺]过高会阻碍土壤胶体的离子交换反应,引起土壤黏粒膨胀和团聚体分散,使土壤通透性变差^[13],从而在一定程度上增强了SWR.但本研究中[Na⁺]和[K⁺]与WDPT和 θ 的相关性都很弱,两离子与土壤斥水指标之间的相关性具有一定的相似性,整体说明土壤化学性质不是影响斥水性的主要因素.

黏土矿物对SWR的影响较大,且不同矿物种类对SWR的影响效果不同^[29].但目前有关黏土矿物影响SWR的研究结论并不一致.本研究中,Mo含量与WDPT、MED之间呈现一定负相关,可能与蒙脱石倾向聚集^[30]的作用有关,使土壤孔隙度增加,通透性改变,从而影响了WDPT和MED.

以往的研究成果表明,有机质是影响SWR的一个重要因素^[31-32].但本研究未发现有机碳含量(OC)对SWR具有显著影响.原因可能有:由于供试土壤的基础性OC偏低,且土样之间OC差别不大(最大值10.38 g·kg⁻¹,最小值1.28 g·kg⁻¹,平均值4.38 g·kg⁻¹),因此OC的影响不突出.并非所有类型的有机质都影响SWR,也并非所有土壤的SWR都因有机质含量过高而导致.由于土壤形成的地质、地貌和气候特点差异大,引起SWR的原因非常复杂,因此有机质对本研究的土壤不具有明显影响也是可信的.

3.3 3种SWR测定方法的优缺点

本研究将WDPT法、MED法和接触角法结合,发现三者之间虽然存在一定联系,但是关系不密切,对斥水性的表征方面也各不相同.不同测定方法及所得出的指标具有各自的特点.

不同SWR方法所表征的斥水性意义不同.指标WDPT反映了土壤斥水的持续性,而指标MED反映了土壤斥水的强度;指标 θ 反映了土壤斥水的严重

程度.不同指标的测定和表达方式不同,所含的斥水信息也不同.若时间和试验条件具备,应综合 WDPT、MED 和 θ 等多种指标全面反映斥水性特征.

从测定过程来说,WDPT 法操作简便,可方便快捷地得到结果,是目前测定 SWR 的常用方法;但其测定结果易受到较多因素干扰.本研究发现,较高的土壤容重会提高 WDPT 值.另外,土壤含水率、滴管的规格等因素也会产生影响.WDPT 法更适合对 SWR 进行快速、粗略的评价.MED 法操作上与 WDPT 法类似,且酒精溶液的入渗比水快,但需要寻找、配置合理浓度等级的酒精溶液,测定过程比 WDPT 方法繁琐.接触角法比 MED 和 WDPT 法操作更复杂,适用于实验室的精确测定.

在成本方面,3 种方法测试成本的大小顺序为: WDPT<MED<接触角方法.

就接触角方法而言,使用正辛烷作为参比溶液的效果优于无水乙醇.无水乙醇挥发较快,同时吸收大量的热,长时间会影响结果.此外,由于操作简单、影响因素少,高度法的组间差异小于质量法,可见高度法比质量法稳定性好.Siebold 等^[25] 研究认为,采用质量传感器测量比高度法的读数更精确.可见,接触角法的选择受到测量仪器精度的影响.

目前,根据不同的 SWR 指标进行斥水性等级划分体系还不完善,需根据精度要求、试验条件及成本等适当选择测定方法.建议在条件具备的情况下,使用多个指标对土壤 SWR 进行综合表征.

参考文献

- [1] Carillo MLK, Lety J, Yates SR. Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 433-436
- [2] Bachmann J, Horton R, Ploeg RR, et al. Modified sessile drop method of assessing initial soil-water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**: 564-567
- [3] Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-science Reviews*, 2000, **51**: 33-65
- [4] Chen J-Y (陈俊英), Wu P-T (吴普特), Zhang Z-T (张智韬), et al. Amelioration effect of water repellency by tillage. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* (排灌机械工程学报), 2012, **30**(4): 479-484 (in Chinese)
- [5] Dekker LW, Ritsema CJ. How water moves in a water repellent sandy soil. 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 1994, **30**: 2507-2517
- [6] Wallach R, Ben-Arie O, Graber ER. Soil water repellency induced by long-term irrigation with treated sewage effluent. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**: 1910-1920
- [7] DeBano LF. Water repellency in soils: A historical overview. *Journal of Hydrology*, 2000, **231-232**: 4-32
- [8] DeBano LF, Krammes JS. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 1996, **2**: 14-19
- [9] Chau HW, Biswas A, Vujanovic V, et al. Relationship between the severity, persistence of soil water repellency and the critical soil water content in water repellent soils. *Geoderma*, 2014, **221-222**: 113-120
- [10] Nguyen HV, Nieber JL, Oduro P, et al. Modeling solute transport in a water repellent soil. *Journal of Hydrology*, 1999, **215**: 188-201
- [11] Li Y (李毅), Shang Y-L (商艳玲), Li Z-H (李振华), et al. Advance of study on soil water repellency. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2012, **43**(1): 68-75 (in Chinese)
- [12] Wu Y-L (吴延磊), Li Z-Z (李子忠), Gong Y-S (龚元石). Correlations of soil water repellency measurements from two typical methods. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(7): 8-13 (in Chinese)
- [13] Liu C-C (刘春成), Li Y (李毅), Guo L-J (郭丽俊), et al. Effect of brackish water irrigation on water and salt movement in repellent soils. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(8): 39-45 (in Chinese)
- [14] Song H-Y (宋红阳), Li Y (李毅), He C-S (贺缠生). Infiltration models for different textures of water-repellent soils. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* (排灌机械工程学报), 2013, **31**(7): 629-635 (in Chinese)
- [15] Dekker LW, Jungerius PD. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena*, 1990, **18**: 173-183
- [16] Zhang P-P (张培培), Zhao Y-G (赵允格), Wang Y (王媛), et al. Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(3): 657-663 (in Chinese)
- [17] Li Y-Y (李玉义), Liu H-D (柳红东), Zhang F-H (张凤华), et al. Assessment on the effect of irrigation technology on soil salinization in Manas River valley, Xinjiang. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2007, **12**(1): 22-26 (in Chinese)
- [18] Guo L-J (郭丽俊), Li Y (李毅), Li M (李敏), et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in saline-alkaline field. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48**(2): 278-285 (in Chinese)
- [19] Shao Z-Y (邵志一), Li Y (李毅). Spatial variability in soil moisture and water repellency in Manasi River basin. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2016, **44**(2): 206-213 (in Chinese)

- [20] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Lin D-Y (林大仪). Experimental Guidance of Soil Science. Beijing: China Forestry Press, 2004 (in Chinese)
- [22] Li M (李敏). Spatial Variability of Fractal Dimensions for Soil Particle Size Distributions and Physical Properties. PhD Thesis. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010 (in Chinese)
- [23] DeBano LF. Water Repellent Soils: A State-of-the-Art. Berkeley, California: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1981
- [24] Siebold A, Nardin M, Schultz J, *et al.* Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena. *Journal of Colloids and Surfaces*, 2000, **161**: 81-87
- [25] Siebold A, Walliser A, Nardin M, *et al.* Capillary rise for thermodynamic characterization of solid particle surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997, **186**: 60-70
- [26] Washburn EW. The dynamics of capillary flow. *Physical Review*, 1921, **17**: 273-283
- [27] Bisdorn EBA, Dekker LW, Schoute JF. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 1993, **56**: 105-118
- [28] Ma'sham M, Tate ME, Jones GP, *et al.* Extraction and characterization of water-repellent materials from Australian soils. *European Journal of Soil Science*, 1988, **39**: 99-110
- [29] Chen J-Y (陈俊英), Zhang Z-T (张智韬), Wang Z-N (汪志农), *et al.* Influencing factors and merlioration of soil water repellency. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (农业机械学报)*, 2010, **41** (7): 84-89 (in Chinese)
- [30] McKissock I, Walker EL, Cilkers RJ, *et al.* The influence of clay type on reduction of water repellency by applied clays: A review of some West Australian work. *Journal of Hydrology*, 2000, **231-232**: 323-332
- [31] Leelamanie DAL, Karube J. Effects of organic compounds, water content and clay on the water repellency of a model sandy soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**: 711-719
- [32] Hurraß J, Schaumann GE. Properties of soil organic matter and aqueous extracts of actually water repellent and wet table soil samples. *Geoderma*, 2007, **132**: 222-239

作者简介 王亦尘,女,1992年生,硕士研究生.主要从事斥水土壤的优先流运移规律研究.E-mail: yichen_wang@yeah.net

责任编辑 杨弘
