

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.014

土壤斥水性研究进展*

李 毅 商艳玲 李振华 刘世宾

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 简述了土壤斥水的基本概念,归纳了土壤斥水对农田水分循环、水土保持、地下水环境等的影响,分析了土壤斥水发生的原因,总结了国内外已采用的斥水度测定方法及其各自特点,并对土壤斥水度空间变异性、斥水土壤在入渗和蒸发过程中的水分运动规律及斥水土壤入渗性能改善方法的研究现状作了较全面的分析和评述。由于土壤斥水与农田水分循环、微生物活动、产流产沙和地下水环境污染之间存在密切联系,因此有必要进行相关问题的研究。

关键词: 土壤斥水性 滴水渗透时间法 空间变异性

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0068-08

Advance of Study on Soil Water Repellency

Li Yi Shang Yanling Li Zhenhua Liu Shibin

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

The basic concept of soil water repellency was introduced, the effects of soil water repellency on field water cycle, soil and water conservation, and groundwater environment was summed up. The reasons of soil water repellency were analyzed. The domestic and international methods used for detecting the degree of soil water repellency and their characteristics were introduced. The research advancement of spatial variability for soil water repellency, soil water movement of water repellent soil during infiltration and evaporation process, and measures for improving infiltration ability of hydrophobic soil were also reviewed and assessed thoroughly. Since there were closed associations between soil water repellency and filed water cycle, microbe activity, runoff and sediment production, and pollution of ground water environment, it was urgent to do related research.

Key words Soil water repellency, Water drop penetration time, Spatial variability

引言

土壤斥水性 (soil water repellency) 是指某些土壤无法被水湿润的现象。水洒在斥水土壤的表面时,水珠滞留在地表,长时间不能入渗。土壤的斥水性对包气带甚至地下水的大范围物理过程,如入渗、蒸发、溶质运移、根系吸水、农业化学物淋洗和地下水环境质量等,均具有重要影响。

土壤斥水具有直接和潜在的(负面)影响^[1],具体有:①斥水土壤的导水率和入渗率比亲水土壤的小,导致其入渗能力降低。加热后斥水和亲水的相

似结构土壤,前者入渗能力比后者低 25 倍^[2]。②斥水土壤表层易于积水,因此比亲水土壤更易产生地表和坡面径流,当降水充分时,可能发生超渗坡面流。③土表径流增加将不可避免地导致大小细沟的形成,加速土壤侵蚀过程^[3],并引起土壤质量退化。④土壤斥水使水流的向下运动被延迟,土壤存在不均匀湿润模式,易于在土壤基质中产生不稳定和不规则的湿润锋^[4]。水流在土壤中借助于大孔隙、裂缝、根孔、动物洞穴等通道运动,常形成指状优先流^[5],导致养分流失,加快了农业化学物的淋洗,增加了地下水污染的风险^[6-7]。⑤土壤斥水性的存在

收稿日期: 2011-03-04 修回日期: 2011-05-28

* 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金资助项目(QN2009087)

作者简介: 李毅,副教授,博士,主要从事农业水资源利用研究,E-mail: liyikitty@126.com

使得土壤含水率的三维分布差异很大,影响种子的正常发芽和作物生长。Summers^[8]估计每年在西澳大利亚由于土壤斥水导致减产引起的经济损失达 1 000 ~ 1 500 万澳元。⑥斥水引起的水分侧向流动及不规则分布使得土壤水分的入渗过程与亲水土壤有很大差异^[9],极大地影响田间土壤水分循环过程。另一方面,土壤斥水对增加团聚体的水稳性有一定贡献,对于土壤结构和碳存贮有正面影响^[10]。土壤斥水性研究不仅涉及土壤科学,而且与生态、水文、地质、微生物和环境等学科密切相关,属于多学科交叉领域。

土壤斥水性并非仅在特定环境下发生,斥水现象可以在不同质地的土壤、不同土地利用方式和各种气候条件下广泛存在^[11]。当土壤干燥至某一临界含水率时,几乎所有的土壤都会表现出一定的斥水度^[12],换言之,大部分土壤既非完全斥水,也非完全亲水,而是表现出一种亚临界状态的斥水特征^[13]。目前已见报道存在土壤斥水性的地区有澳大利亚、加拿大、哥伦比亚、埃及、希腊、印度、意大利、日本、新西兰、波兰、葡萄牙、南非、西班牙、荷兰、丹麦、巴西、美国、英国、中国、德国等。土壤斥水性是世界范围内普遍存在的重要特性之一^[14~16]。

土壤斥水性研究的萌芽出现在 20 世纪前,当时对有机质的研究是土壤斥水研究的基础。关于斥水性研究的最初公开报道是在 1910 年, Schreiner 和 Shorey 调查了加利福尼亚土壤的腐殖质,并首次提出土壤“很难被湿润”的概念^[17]。1960 年以前土壤斥水及相关研究较少,随着对斥水性理解的加深,其研究逐渐增多,近年来具有增加趋势^[18]。

我国对土壤斥水性的研究报道最早出现在 1994 年,与国外相比至少滞后 80 年。可供参考的文献主要集中于杨邦杰等^[19~21]对斥水土壤水热运动的测定和模拟研究及陈俊英等^[22~23]对斥水土壤的相关研究,杨邦杰等的研究针对澳大利亚土壤,陈俊英等的研究对象是以色列土壤。关于内蒙古草原土壤斥水性测定方法的比较^[15]及对新疆次生盐渍土斥水性空间分布的研究^[24]说明我国土壤同样存在一定程度的斥水性。然而,这些有限的研究也从侧面说明我国在整体范围内对土壤斥水性的认识处于极低的水平,对土壤斥水性及与其他物理性质的时空变化、斥水土壤中的水及溶质运动迁移过程方面的研究几乎空白,在我国尽早着手进行土壤斥水性的调查和相关研究极其必要。本文在国内外相关研究的基础上,对国内外土壤斥水研究的相关成果进行论述,并详细说明斥水性的测定方法及斥水土壤的水分运动特征。

1 产生土壤斥水的因素

1910 年 Schreiner 和 Shorey 将土壤斥水的原因归结为腊状有机质的存在。当时也有研究提出土壤真菌可能会影响其斥水性。随着研究向深度和广度扩展,更多引起土壤斥水的因素也被挖掘出来。有一种共识是某些有机复合物能以不同方式导致土壤斥水^[25]。

具体说来,引起土壤斥水的因素包括:土壤有机质和腐殖质^[1,25],多样混合的有机组分,主要为脂肪质有机碳和两性分子物质;植被类型,如含树脂、蜡或芬芳油的树种(桉树,松树等),灌木,草地覆盖等能产生高斥水的复合物并释放到土壤中^[1];担子菌类的菌丝体、青霉菌黑化菌素、曲霉菌和放线菌等微生物^[26]能产生斥水复合物从而使土壤产生斥水性。另有研究表明,大气 CO₂ 浓度的提高使新西兰草原几个生长季节的土壤斥水性有所减弱^[27]。此外与自来水灌溉相比,长期用污水灌溉导致 0 ~ 5 cm 表层土壤呈现出严重斥水性^[28~29]。此外,由于森林野火燃烧植被使土壤失去植被覆盖层,加之土壤表面孔隙被燃烧的灰烬填充,导致土壤入渗率降低^[23,30~31]。这些研究表明影响土壤斥水性的原因是复杂的、多方面的。

2 土壤斥水性研究进展

2.1 测定土壤斥水性的直接方法

最简单和常用的斥水持久性测定方法为滴水渗透时间法^[32]。将 3 滴蒸馏水分别近距离滴至光滑土壤样品表面,确定水滴被吸附的平均时间 WDPT (water drop penetration time), WDPT 大于 5 s 时为斥水土壤^[33]。Dekker 和 Ritsema^[34]进一步将荷兰土壤划分为 5 种斥水等级:亲水土壤的 WDPT 小于 5 s;微斥水土壤的 WDPT 为 5 ~ 60 s;强斥水土壤的 WDPT 为 60 ~ 600 s;严重斥水土壤的 WDPT 为 600 ~ 3 600 s;极端斥水土壤的 WDPT 大于 3 600 s。

另一种常用的斥水度测定方法为酒精液滴摩尔浓度法 (molarity of ethanol droplet, 简称 MED)^[15,35]。用一系列酒精浓度不同的酒精-水混合溶液进行液滴穿透测试,能够立刻渗入土壤的酒精溶液浓度被用于判定土壤斥水度。浓度越高,土壤斥水性越强。

研究证实在一定斥水度范围内滴水渗透时间法和酒精溶液法之间有一定的相关性。吴延磊^[15]分析比较了滴水穿透时间法与酒精溶液入渗法的联系。陈俊英等^[22]指出土壤斥水性与综合水质指标值呈显著正相关线性关系,认为土壤斥水持续时间与含水率符合对数正态模型。

2.2 测定土壤斥水性的间接方法

间接方法通过提出一定的指标来反映土壤斥水程度。

Wang 等^[36]提出用进水值 (water-entry value) 表示土壤斥水度。对于斥水土壤采用积水入渗法测定进水值,而对亲水土壤采用一种改进的张力入渗仪测定进水值。土壤斥水度越高,进水值越高。目前该方法还未广泛应用,用进水值作为土壤斥水性水力指标的实用性尚未得到检验。

很多研究者通过测定水-固体接触角 φ 值判断土壤斥水度, $\varphi > 90^\circ$ 时为斥水土壤,反之则为亲水土壤。Bachmann 等^[37]提出固着滴液法直接测定土壤接触角。他们将双面胶的一面粘在显微镜载玻片上,将过筛的土壤颗粒(直径为 63 ~ 200 μm)均匀地压在双面胶的另一面,形成一层均匀土壤颗粒层。在室温(20 $^\circ\text{C}$)下用显微镜和量角器测出滴水后颗粒-水的接触角。

Latey 等假定酒精湿润土壤时 $\varphi = 0^\circ$,则对酒精和水分别应用毛管上升方程,取其比值可得土壤-水的接触角方程^[38],即

$$\cos\varphi_w = \frac{h_w\sigma_e\rho_w}{h_e\sigma_w\rho_e}$$

(1)

式中 σ ——表面张力,N/m
 h ——毛管上升高度,m
 ρ ——液体密度,kg/m³

下标 e 和 w 表示酒精与水。接触角 φ 小于 90 $^\circ$ 时可采用此方法。

Tillman 等^[39]提出标定的压力头 (scaled pressure head) h^* ,公式为

$$h^* = \rho gh / \sigma$$

(2)

式中, g 为重力加速度。Tillman 等结合 Philip 定义的本征吸附 (intrinsic sorptivity) 概念得出

$$S^* = (\mu/\sigma)^{1/2} S$$

(3)

式中 S^* ——本征吸附系数,m^{1/2}
 μ ——动力粘滞系数,N·s/m²
 S ——吸湿系数,m/s^{1/2}

在一定水头 h^* 下根据吸附试验分别得出酒精溶液和水溶液入渗的吸湿系数,进一步计算其比值,得出斥水比(或斥水指标) $R = S_e^*/S_w^*$ 。本征吸附法可用于测定亚临界土壤的斥水度,该斥水指标直接与入渗率的减小成正比。当累积入渗量和时间平方根不遵从线性关系时,准确获得吸湿系数比较困难。

接触角 φ 大于 90 $^\circ$ 时计算公式为^[40~41]

$$\cos\varphi = (\gamma_{ND}/\gamma_w)^{1/2} - 1$$

(4)

式中 γ_{ND} ——接触角为 90 $^\circ$ 时的表面张力
 γ_w ——水的表面张力

Gilboa 等^[42]采用双面胶把土壤固定在 Wihelmy 平板,浸入水中。根据作用在平板上的力平衡关系,得出接触角的余弦函数为

$$\cos\varphi = -\frac{F_t + Vg\rho}{l_w\gamma_{LV}}$$

(5)

式中 F_t ——去除皮重的重量增加值
 V ——浸水平板的体积
 l_w ——湿润长度
 γ_{LV} ——液-气界面的表面张力

2.3 斥水土壤的水分运动特征

2.3.1 斥水土壤的入渗过程

斥水土壤的水力性质和水分(溶质)运动过程与亲水土壤相比有很大不同。DeBano^[43]对比了斥水与亲水土壤的水平 and 垂直入渗特征,结果表明斥水土壤的水平入渗比亲水土壤慢 25 倍。斥水土壤的接触角大于 90 $^\circ$,当水头小于或等于 0 时,斥水土壤不会被湿润,需施加一个正水头 h_p 迫使水分进入土壤,因此 h_p 又称为穿透水头。 h_p 值随接触角增加而增大,并随孔隙半径的减少而降低^[8]。当与水接触一段时间后部分土壤的斥水度会发生变化,接触角由 90 $^\circ$ 以上转变为 90 $^\circ$ 以下。Carrillo 等^[44]的试验观测表明斥水砂土的导水率随积水深度 h_0 的增加而增加,这种增加的特性与增加积水深度后平均土壤含水率增加有关。若 L 为斥水层深,当 $(h_0 + L)/h_p < 1$ 时水分不能开始入渗,当 $(h_0 + L)/h_p$ 介于 1 ~ 1.5 时将产生非稳定水流(指流),当 $(h_0 + L)/h_p > 1.5$ 时可观测到稳定湿润锋面。Feng 等^[8]通过对入渗过程的分析表明,斥水砂土的导水率随积水深度的增加而增加,不同 h_0 (5.2 ~ 30.5 cm) 入渗率随时间变化曲线明显不同,入渗初期未处理(亲水)砂土的入渗率在低的 h_0 (5.2 cm) 下迅速降低并很快达到稳定入渗率,而斥水砂土的入渗率在 h_0 分别为 24.5 cm 和 30.5 cm 时才具有该特征,但其稳定入渗率比亲水砂土低。在积水深度较低时斥水砂土的入渗率在初期随时间延长而增加,并在约 20 min 后达到稳定。Wang 等^[45]通过对二维有机玻璃平板中亲水和斥水土壤的入渗过程观测,发现初始干燥的斥水砂土很难湿润,其入渗起始需经过长时间的浸润,入渗水流绕过表层很大一部分土壤通过指状路径推进,入渗率很低。当积水高度 h_0 大于进水值时会发生指流;反之则入渗过程为稳定流动。试验观测的稳定和非稳定水流均可采用速度准则和压力准则来判定。

Rodriguez-Alleres 等^[46]比较了不同植物覆盖下的土壤斥水性,发现大部分玉米或草地土壤未表现出斥水性,而森林表层土壤斥水性极强;总体上质地

差异对土壤斥水的影响不明显。就不同粒级而言，玉米或草地土壤的细颗粒（<0.05 mm）具斥水性，但仍不影响该土壤的整体亲水性；种植松树或桉树的土壤中所有粒级都对其斥水性有一定贡献，WDPT 法的测定表明粗颗粒（1~2 mm）斥水性更弱，MED 法的测定表明细颗粒（<0.05 mm）斥水性更强。Rodriguez-Alleres 等认为森林土壤的强斥水性与其高含碳量及有机质有关。

土壤中更广泛存在的是亚临界斥水，它指土壤吸水过程看似容易发生，但斥水表面膜的存在使入渗在一定程度上受到抑制。Hallett 等^[47]应用 Tillman 等的方法测定了不同管理方式（放牧、免耕、耕犁）下的土壤团聚体亚临界斥水指标 R ，表明亚临界斥水性对降低吸湿系数的影响比孔隙结构明显，免耕土壤比耕犁土壤的 R 值高，而施氮对团聚体的亚临界斥水性没有明显影响。

国内针对斥水土壤入渗的研究较少。刘春成等^[48]基于室内土柱试验对比不同积水高度和斥水度下的土壤入渗规律，采用 4 种模型（Green-Ampt 模型、Philip 模型、Kostiakov 模型及指数公式）分析了土壤入渗率变化特征，认为 Kostiakov 模型比较适用，其他模型拟合效果稍差。

2.3.2 蒸发过程

国内关于斥水土壤蒸发方面的研究主要集中于杨邦杰等的研究工作^[19~21]。杨邦杰等^[19]基于 Philip-de Vries 理论，采用一组偏微分方程作为水-土壤水热耦合运动的控制方程，即

$$C_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [(K + K_v) \nabla \psi] + \nabla \cdot (D_{TV} \nabla T) + \frac{\partial K}{\partial z} \tag{6}$$

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_L L \nabla \cdot (K_v \nabla \psi) \tag{7}$$

式中 C_w ——比水容量 C_h ——土壤热容量
 ψ ——土壤水的基质势
 D_{TV} ——土壤水汽在温度梯度下的扩散率
 T ——土壤温度 K ——非饱和导水率
 ρ_L ——液态水密度
 L ——水的气化潜热
 K_v ——水汽在基质势梯度下的当量导水率
 t ——时间 z ——深度
土壤-大气界面的边界条件为

$$-K_w \frac{\partial \psi}{\partial n} - D_{TV} \frac{\partial T}{\partial n} - K = E_s(x, z, t) \tag{8}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_L L K \frac{\partial \psi}{\partial n} = G(x, z, t) \tag{9}$$

式中 n ——边界（ x, z ）处的去向
 E_s ——时刻 t 边界（ x, z ）处的水汽通量

G ——时刻 t 边界（ x, z ）处的热通量
 E_s 计算公式为

$$E_s(x, z, t) = \frac{H_s(x, z, T_s, t) - H_a(t)}{r_c(x, z, t) + r_s(x, z, t)} \tag{10}$$

式中 H_s ——边界（ x, z ）处地表温度为 T_s 时空气的绝对湿度
 H_a ——参考高度 z 处的温度
 r_s ——土壤表层的蒸发阻力
 r_c ——修正的空气动力学阻力

r_s 计算公式为

$$r_s = -a + a (\theta_s / \theta)^b \tag{11}$$

式中 θ_s ——饱和含水率
 θ ——表层土壤（0~0.01 m）含水率
 a, b ——经验常数

杨邦杰等结合一定的定解条件采用有限元法求解了西澳大利亚垄沟耕作农田的温度变化及蒸发率和累积蒸发量的时间变化，并与实测值进行了比较，表明两者较吻合。但实测与计算的沟中 0.04 m 深度水分吻合程度不佳。显然他们的研究和 Hallett 等^[47]的研究都说明耕作和土壤斥水性之间具有一定的联系。

杨邦杰等^[20]应用上述水热运动模型分析了不同的沟垄尺寸、湿润剂、镇压和沟垄走向对沟种苗床水分散失和温度的影响，认为采用沟种后，表层的斥水土壤形成不透水的垄，促进雨水渗入沟中，能阻止水分的蒸发，降低沟中的温度，有利于种子发育出苗，从而使不利因素转化为有利条件。这一结果显然与 Summers^[9]的研究结果明显不同，说明土壤斥水的负效应是相对的。

Bachmann 等^[12]分别针对同斥水程度的 4 种砂土进行了等温（ $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ）和非等温（土柱底部温度维持在 55°C ，上部温度维持在 21°C ）条件下的土柱蒸发试验。基于 Philip-de Vries 理论结合 Nassar-Horton 方法，采用隐式差分法求解，对比了计算和测定的累积蒸发量。数值模拟的水分运动偏微分方程为

$$\left[\left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_L} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \psi} + \frac{\theta_a}{\rho_L} \frac{\partial \rho_v}{\partial \psi} \right] \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\theta_a}{\rho_L} \frac{\partial \rho_v}{\partial \psi} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(k + D_{\psi v}) \nabla \psi + D_{TV} \nabla T + K e] \tag{12}$$

式中 θ_a ——体积空气含量
 ρ_v ——水汽密度
 $D_{\psi v}$ ——和基质势水头有关的水汽流扩散系数
 e ——单位矢量，方向向下

Bachmann 等用隐式差分法求解，与实测结果进行对比，表明对于非斥水土壤（接触角小于 5° ），实测与模拟的结果偏差很小。当接触角逐渐增加时，数值模拟结果偏低，对斥水性最强的土壤（接触角

为 110°) 尤其明显。

陈世平等^[49]进行室内斥水土壤覆膜开孔蒸发的土柱试验,结果表明,覆膜开孔条件下不同斥水度土壤累积蒸发量与时间平方根成正比,土壤斥水性抑制土壤水分蒸发;单位膜孔面积的单位深度累积蒸发量 E_r 随覆膜开孔率增大而急剧减小, E_r 与覆膜开孔率的变化关系可以采用幂函数表示;随着土壤斥水度增大,剖面水分蒸发幅度减小。

2.4 斥水土壤物理性质的空间变异性

土壤空间变异性的研究方法常用经典统计方法和地质统计学,部分研究采用随机模拟方法进行分析。自 Manderbrot 提出分形原理之后,分形在土壤空间变异中的应用也曾一度成为热点。近年来多重分形方法^[50~52]、谱分析结合小波分析原理^[53]在土壤属性空间变异研究中的应用,从更深层次和不同角度揭示了土壤属性的空间结构、相互作用和影响因素,表明一种土壤属性与其他土壤属性之间具有密切联系,从本质上说明在有限空间内的土壤属性之间不是孤立变异的,而具有联合空间变异特征。

由于斥水或亚临界斥水现象在土壤中几乎普遍存在,斥水特性在空间上的变化也在近年来引起了人们的重视。Hallett 等^[54]测定了毫米和厘米尺度的小区土壤表面吸湿率和斥水指标 R 的空间分布,认为毫米尺度上斥水度的变化能引起水分运动的空间变异,而稍大(厘米)尺度上大孔隙对水分运动的影响则不明显。Buczko 等^[55]对柏油和重金属污染的工业区土壤进行断面直线取样,分析了滴水穿透时间(WDPT)、酒精体积分数、含水率和有机质含量的半方差函数,发现滴水穿透时间的相关距为 $16 \sim 406$ cm,而酒精体积分数则未显示出空间相关性,田间湿土的临界含水率阈值(小于该值土壤斥水性更强)范围为 $2.5\% \sim 4\%$ 。Buczko 等^[56]用滴水渗透时间法和固着滴液法分别测定了森林土壤 4 个小区内 $0 \sim 160$ cm 深度范围的土壤斥水度,2 种方法都表明表土 $0 \sim 10$ cm 深度的土壤斥水度最高且随深度增加而递减,现场观测到的优先流主要由土壤斥水度的高度变异引起。

郭丽俊等^[24]通过对新疆盐渍化土壤进行 3 个尺度取样并进行室内理化性质的分析测定,采用不同方法进行分析,结果表明,土壤斥水性和 pH 值符合正态分布,其余土壤属性符合对数正态分布,不同尺度下土壤斥水性与理化性质具有一定的差异。任鑫等^[57]在新疆膜下滴灌棉田进行网格式垂向剖面采样,对剖面土壤的斥水性和土壤理化性质进行了经典统计、地质统计和相关性分析。结果表明,土壤斥水性在 30 cm 深度时最强,在大于 80 cm 深度的

土层斥水特征不明显;在 $0 \sim 40$ cm 深度,含水率与土壤斥水性呈正相关,在 $40 \sim 80$ cm 深度与斥水性呈负相关。

2.5 改善土壤斥水性的方法

虽然国内外已经针对土壤斥水性进行了不同方向的研究,但针对改善土壤斥水性从而增加斥水土壤入渗能力方面的研究还较少。Feng 等^[58]分别测定了 4 种浓度的表面活性剂溶液和一种酒精溶液在斥水土壤中的入渗率,结果表明表面活性剂可将斥水土壤转变为亲水土壤,从而增加土壤入渗率,但表面活性剂溶液与酒精溶液的入渗特征没有可比性。崔敏等^[59]针对园艺生产中土壤等生长介质的斥水性,指出湿润剂的应用能够较好地解决作物生长介质的斥水性问题。

当前的研究说明,对湿润剂改善斥水土壤入渗性能方面的研究还不深入。

3 结论

尽管国际上对斥水土壤的研究已有近百年的历史,但由于田间土壤结构的复杂性,微生物、有机质、气候、温度、土壤含水率等都对土壤斥水有不同程度的贡献,且土壤斥水随空间和时间的变化而呈现出不同程度的变异,迄今为止对于土壤斥水性的研究除发展了各种不同的方法和探索了土壤斥水度的来源外,在土壤斥水性发生机理及相关理论方面并没有大的突破。目前国内外研究存在以下问题:

(1)虽然有研究者利用毛管上升理论描述斥水土壤的接触角,但没有将其与具有不同斥水性土壤的水力性质相联系,而无论是亚临界斥水土壤还是非(或完全)斥水的土壤,其水分运动特征与斥水性必然存在某种联系,显然研究土壤斥水与水力性质的相互作用是完全必要的。土壤斥水性的空间变化不是孤立存在的,而是与土壤水动力性质具有密不可分的联系,它们之间存在复杂的相互作用和相互影响,而对于两者联合空间变异的发生规律目前国内外均未涉及。

(2)国内外研究者已经采用不同的方法对土壤水力性质的空间变异性进行了大量研究,取得了相当多的有意义的结论,但关于斥水土壤空间变异性的研究仅处于起始阶段,在有限的研究中大多采用传统统计方法和地质统计学方法。采用地质统计学方法研究土壤斥水和水力性质的空间变异性虽然能够揭示其空间结构,但对于两者的相互作用和影响度无法定量分析,有必要结合新方法如多重分形和小波分析等全面研究其联合空间变异特征。

(3)针对斥水性土壤进行灌溉时,采用什么方

法能够改善盐碱土不同程度的斥水性从而增加土壤入渗性能,继而提高作物产量方面的问题,目前相关研究很少。

总体上来看,国际上目前针对斥水土壤的研究内容越来越多,在近几年成为土壤物理学研究的热点内容之一,而国内对于该方面的研究不仅起步晚,而且尚未引起重视。基于斥水土壤存在的普遍性,国内对于该方面的研究应逐渐引起重视。将来对于斥水土壤的相关研究应侧重于以下方向:

(1)斥水土壤水分运动参数的研究。由于斥水土壤的入渗和蒸发过程都与亲水土壤不同,因此有必要从参数角度进行对比,以便将斥水度因素引入土壤水分运动参数,从而进一步实现对斥水土壤水分运动的模拟。

(2)斥水土壤中优势流的研究。由于斥水土壤中的水分分布具有不规则性,极易出现优势流,因此有必要针对斥水条件下土壤水及溶质的不稳定和不规则分布进行系统研究。

(3)斥水土壤中的溶质迁移过程。目前国内外对于入渗和蒸发条件下斥水土壤的水分运动研究较多且有一定认知水平,但是关于斥水土壤中的溶质运动特征研究不够深入,有必要进行相关研究。

(4)斥水土壤膜下滴灌土壤水分和溶质分布规律研究。目前我国发现的斥水土壤大多分布在北方(如新疆次生盐渍土区,内蒙古草原土壤),其中新疆次生盐渍土区近些年在大力推广膜下滴灌,因此对斥水土壤在膜下滴灌条件下的水分和溶质运移规律应着重进行研究。

参 考 文 献

- 1 Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51(1~4): 33~65.
- 2 DeBono L F. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1971, 35(2): 340~343.
- 3 Doerr S H, Ferreira A J D, Walsh R P D, et al. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modeling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal [J]. *Hydrol. Process*, 2003, 17(2): 363~377.
- 4 Hendrickx J M H, Dekker L M, Boersma O H. Unstable wetting fronts in water repellent field soils [J]. *J. Environ. Qual.*, 1993, 22(1): 109~118.
- 5 Ritsema C J, Dekker L W, Hendrickx J M H, et al. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil[J]. *Water Resour. Res.*, 1993, 29(7): 2 183~2 193.
- 6 Bauters T W J, DiCarlo D A, Steenhuis T S, et al. Preferential flow in water-repellent sands[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62(5): 1 185~1 190.
- 7 de Jonge L W, Jacobsen O H, Moldrup P. Soil water repellency: effects of water content, temperature, and particle size [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63(3): 437~442.
- 8 Feng G L, Letey J, Wu L. Water ponding depths affect temporal infiltration rates in a water-repellent sand [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65(2): 315~320.
- 9 Summers R N. The incidence and severity of non-wetting soils of the south coast of Western Australia [D]. Perth: The University of Western Australia, 1987.
- 10 Piccolo A, Mbagwu J S C. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63(6): 1 801~1 810.
- 11 Deurer M, Bachmann J. Modeling water movement in heterogeneous water-repellent soil: 2. A conceptual numerical simulation [J]. *Vadose Zone J.*, 2007, 6(3): 446~457.
- 12 Bachmann J, Horton R, van der Ploeg R R. Isothermal and Nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001(6): 1 599~1 607.
- 13 Ellerbrock R H, Gerke H H, Bachmann J, et al. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, 69(1): 57~66.
- 14 Jaramillo D F, Dekker L W, Ritsema, et al. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231~232: 105~111.
- 15 吴延磊,李子忠,龚元石. 两种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 8~13. Wu Yanlei, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Correction of soil water repellency measurements from two typical methods [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 8~13. (in Chinese)
- 16 Dekker L W, Doerr S H, Oostindie K, et al. Water repellency and critical soil water content in a dune sand [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65(6): 1 667~1 674.

- 17 Schreiner O, Shorey E C. Chemical nature of soil organic matter [J]. USDA Bur. Soils Bull., 1910, 74: 2~48.
- 18 DeBano L F. Water repellency in soils: a historical overview [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231~232: 4~32.
- 19 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施研究[J]. 环境科学, 1994, 15(4): 88~90.
- Yang Bangjie, Blackwell P S, Nicholson D F. Study on the soil degradation, survey methods and modification measures caused by water repellency [J]. Environment Science, 1994, 15(4): 88~90. (in Chinese)
- 20 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水土壤中的水热运动规律与数值模型[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 351~359.
- Yang Bangjie, Blackwell P S, Nicholson D F. Modeling water and heat movement in a water-repellent sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(4): 351~359. (in Chinese)
- 21 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 斥水土壤中水热运动模型的应用[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 427~433.
- Yang Bangjie, Blackwell P S, Nicholson D F. Application of the model of heat and water movement in water-repellent soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(4): 427~433. (in Chinese)
- 22 陈俊英, 张智韬, 杨飞, 等. 土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 35~38.
- Chen Junying, Zhang Zhitao, Yang Fei, et al. Modeling water repellency and water content of a sand soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 35~38. (in Chinese)
- 23 陈俊英, 张智韬, 汪志农. 土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 84~89.
- Chen Junying, Zhang Zhitao, Wang Zhinong. Influencing factors and amelioration of soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 84~89. (in Chinese)
- 24 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 37~45.
- Guo Lijun, Li Yi, Li Min, et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in a salinized-alkaline field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 37~45. (in Chinese)
- 25 DeBano L F. Water repellent soils: a state-of-the-art [R]. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report, PSW-46. Berkeley, California, 1981: 21.
- 26 Savage S M, Martin J P, Letey J. Contribution of some soil fungi to natural and heat-induced water repellency in sand [J]. Soil Sci. Soc. Am. P., 1969, 33(3): 405~409.
- 27 Newton P C D, Carran R A, Lawrence E J. Reduced water repellency of a grassland soil under elevated atmospheric CO₂ [J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 1~4.
- 28 Wallach R, Ben-Arie, Graber E R. Soil water repellency induced by long-term irrigation with treated sewage effluent [J]. J. Environ. Qual., 2005, 34(5): 1910~1920.
- 29 Arye G, Tarchitzky J, Chen Y. Treated wastewater effects on water repellency and soil hydraulic properties of soil aquifer treatment infiltration basins [J]. Journal of Hydrology, 2011, 397(1~2): 136~145.
- 30 DeBano L F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231~232: 195~206.
- 31 刘发林, 张思玉. 森林火灾对马尾松次生林土壤斥水性的影响[J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 37~41.
- Liu Falin, Zhang Siyu. Influences of fire disturbance on the water repellency of *Pinus massoniana* Soil [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology: Natural Science, 2009, 29(4): 37~41. (in Chinese)
- 32 van't W, Bessel D. Particle coatings affecting the wettability of soils [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64(2): 263~267.
- 33 Bond R D, Harris J R. The influence of the microflora on physical properties of soils. I: effects associated with filamentous algae and fungi [J]. Aust. J. Soil Res., 1964, 2(1): 111~122.
- 34 Dekker L W, Ritsema C J. How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency [J]. Water Resour. Res., 1994, 30(9): 2507~2517.
- 35 Watson C L, Letey J. Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships [J]. Soil Sci. Soc. Am. P., 1970, 34(6): 841~844.
- 36 Wang Z, Wu L, Wu Q J. Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231~232: 76~83.
- 37 Bachmann J, Horton R, van de Ploeg R R, et al. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(2): 564~567.
- 38 Latey J, Osborn J, Pelishek R E. Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand [J]. Soil Sci., 1962, 93:

149 ~ 153.

- 39 Tillman R W, Scotter D R, Wallis M G, et al. Water-repellency and its measurement [J]. Aust. J. Soil Res., 1989, 27(4): 637 ~ 644.
- 40 Carrillo M L K, Letey J, Yates S R. Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63(3): 433 ~ 436.
- 41 Letey J, Carrillo M L K, Pang X P. Approaches to characterize the degree of water repellency [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231 ~ 232: 61 ~ 65.
- 42 Gilboa A, Bachmann J, Woche S K, et al. Applicability of interfacial theories of surface tension to water-repellent soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70(5): 1 417 ~ 1 429.
- 43 DeBano L F. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1971, 35(2): 340 ~ 343.
- 44 Carrillo M L K, Letey J, Yates S R. Unstable water flow in a layered soil; I. Effects of a stable water-repellent layer [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(2): 450 ~ 450.
- 45 Wang Z, Wu Q J, Wu L, et al. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231 ~ 232: 265 ~ 276.
- 46 Rodriguez-Alleres M, de Blas E, Benito E. Estimation of soil water repellency of different particle size fractions in relation with carbon content by different methods [J]. Science of the Total Environment, 2007, 378(1 ~ 2): 147 ~ 150.
- 47 Hallett P D, Baumgartl T, Young I M. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2001, 65(1): 184 ~ 190.
- 48 刘春成,李毅,任鑫,等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报,2011,27(5):62 ~ 67.
Liu Chuncheng, Li Yi, Ren Xin, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristics of water repellent soils [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(5):62 ~ 67. (in Chinese)
- 49 陈世平,李毅,高金芳. 覆膜开孔蒸发条件下不同斥水度土壤水盐变化规律[J]. 农业机械学报,2011,42(5):86 ~ 91.
Chen Shiping, Li Yi, Gao Jinfang. Evaporation experimental on different water repellent soils under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(5): 86 ~ 91. (in Chinese)
- 50 Zeleke T B, Si B C. Scaling properties of topographic indices and crop yield: multifractal and joint multifractal approaches [J]. Agron. J. 2004, 96(4): 1 082 ~ 1 090.
- 51 Zeleke T B, Si B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69(6): 1 691 ~ 1 702.
- 52 Zeleke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3 ~ 4): 440 ~ 452.
- 53 Si B C. Spatial scaling analyses of soil physical properties: a review of spectral and wavelet methods [J]. Vadose Zone J. 2008, 7(2): 547 ~ 562.
- 54 Hallett P D, Hallett P D, Nunan N, et al. Millimeter-scale spatial variability in soil water sorptivity: scale, surface elevation, and subcritical repellency effects [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68(2): 352 ~ 258.
- 55 Buczek U, Bens O, Durner W. Spatial and temporal variability of water repellency in a sandy soil contaminated with tar oil and heavy metals [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2006, 88(3 ~ 4): 249 ~ 268.
- 56 Buczek U, Bens O. Assessing soil hydrophobicity and its variability through the soil profile using two different methods [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2006, 70(3): 718 ~ 727.
- 57 任鑫,李毅,李敏,等. 次生盐渍土垂向剖面土壤斥水特征及其与理化性质的关系[J]. 农业机械学报,2011,42(3): 58 ~ 64,79.
Ren Xin, Li Yi, Li Min, et al. Relationship between soil water repellency and soil physical-chemical properties for vertical profiles in secondary saline field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3): 58 ~ 64, 79. (in Chinese)
- 58 Feng G L, Letey J, Wu L. The influence of two surfactants on infiltration into a water-repellent soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66(2): 361 ~ 367.
- 59 崔敏,宁召民,张志国. 斥水性生长介质中湿润剂的使用[J]. 北方园艺,2007(6):72 ~ 73.
Cui Min, Ning Zhaomin, Zhang Zhiguo. Utilizations of wettable materials in water repellent growing media [J]. North Horticulture, 2007(6): 72 ~ 73. (in Chinese)