陕西省长武县黑垆土斥水性的影响因素

李 凯[1], 帕力夏提·格明[1], 王维维[1], 杜 峰[2], 徐学选[2]
(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 分析改性黑垆土出现斥水性的条件及其影响因素,为研究气候暖干化背景下当地降雨入渗行为对斥水性的响应问题提供参考。[方法] 试验在黄土旱塬陕西省长武县农田试验场进行。选取玉米地和苜蓿地 0—20 cm 土壤作为试验对象,对 2 种作物下的土样设计 4 水平土壤含水量、3 种容重和 3 水平十八烷基伯胺(OCT)添加量进行组合配制土样,用滴水穿透时间法进行斥水性测试。[结果] 土壤斥水性(SWR)随着土壤含水量(0%～6%范围)和容重的增加及 OCT 添加量的增加而增大,其中土壤含水量、OCT 添加量和土壤容重对 SWR 的影响存在多因素交互效应。在逐步回归分析中,OCT 和含水量共同参与下的拟合模型更优。1.3 g/cm^3 土壤容重下,在 0%含水量和 0.15%OCT 添加量及 2%含水量和 0.10% OCT 添加量条件时,非斥水的黑垆土土壤会转变为轻微斥水性土壤。[结论] 在黑垆土低水条件下的降水入渗过程中,应更多关注不同土地利用土壤含水量和极性物质的积累变化对斥水风险的影响。

关键词: 土壤斥水性; 土壤含水量; 十八烷基伯胺(OCT); 互作效应; 滴水穿透时间
文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)03-0062-07 **中图分类号**: S152.7

文献参数: 李凯, 帕力夏提·格明, 王维维, 等.陕西省长武县黑垆土斥水性的影响因素[J].水土保持通报,2021,41(3):62-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.009; Li Kai, Palixiati·Geming, Wang Weiwei, et al. Factors influencing water repellency of Heilu soil in Changwu County, Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):62-68.

Factors Influencing Water Repellency of Heilu Soil in Changwu County, Shaanxi Province

Li Kai[1], Palixiati·Geming[1], Wang Weiwei[1], Du Feng[2], Xu Xuexuan[2]
(1.*College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2.*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] The conditions and factors influencing soil water repellency (SWR) of Heilu soil was explored in order to provide a reference for research on the response of local rainfall infiltration behavior to water repellency under the background of climate change. [Methods] The experiment was conducted on farmland from Changwu County on the Loess Plateau. Measurements were made on soil samples from the 0—20 cm soil layer of a maize field and an alfalfa field. Soil samples from the two crop fields were brought to a laboratory and tested at four soil moisture contents, three bulk densities, and three levels of added octadecylamine (OCT). Water repellency tests were conducted by measuring drip penetration time. [Results] SWR increased with increasing soil moisture content (ranging from 0% to 6%), bulk density, and OCT addition. Soil moisture content, OCT addition, and soil bulk density exhibited multi-factor interaction effects on SWR. Stepwise regression analysis determined that the best model occurred with OCT and water content as regression parameters. Under a soil bulk density of 1.3 g/cm^3 at 0% moisture content with 0.15% OCT addition, 2% moisture content and 0.10% OCT addition, the non-water-repellent Heilu soil would turn into slightly water-repellent soil. [Conclusion] More attention should be given to the impact of soil water content

收稿日期:2021-01-14 **修回日期**:2021-03-24
资助项目:国家自然科学基金项目"黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究"(41977426),"植物根系构型与力学特性对黄土区浅层坡体稳定性的影响"(41771322)
第一作者:李凯(1996—),男(汉族),内蒙自治区古乌海市人,硕士研究生,研究方向为草地生态学。Email:18309260785@163.com。
通讯作者:徐学选(1966—),男(汉族),陕西省大荔县人,博士,研究员,主要从事流域水文生态、草地生态学。Email:xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn。

and accumulation of polar substances on water repellency risk under different land uses during the process of precipitation infiltration for a Heilu soil under low-water conditions.

Keywords: soil water repellency; soil moisture content; octadecylamine (OCT); water drip penetration time; Heilu soil

土壤斥水性(soil water repellency, SWR)是指土壤不能或者很难被水分湿润的现象。1910 年 Schreiner 和 Shorey 在调查加利福尼亚土壤的腐殖质时,首次提出土壤"很难被湿润"的概念。此后研究认为斥水性是极性有机质引发,积累有极性的物质的表面,或因为相同极性阻碍水湿润土壤,在干燥化的土壤中斥水性表现突出。但直到上个世纪末,斥水性研究并未得到广泛重视。进入 21 世纪,土壤斥水性才成为继土壤优先流(soil preferential flow)以后的有关土壤水分运动研究的新热点。国内对土壤斥水性的研究起步较晚[1],研究成果较少,2010 年后才有突破性增长。目前主要集中在斥水性测定[2-3]、空间分布、斥水性与土壤含水量的基本关系[4]、与有机质的关系[5],斥水土壤中的水及溶质运移方面等[6]。对于黄土区的相关研究尤其薄弱。

黄土母质下的土壤一般不易表现出斥水性[7-8],因而人们往往忽视了其发生斥水效应的水土流失危险。未来气候暖干化背景下土壤干燥化加剧,并且随着植被恢复进程和人类活动干扰减少,黄土土壤会在干旱环境下积累极性有机质,黄土区土壤或能表现出微弱的斥水性、进而增加土壤斥水引起的水土流失风险。如何消除土壤由亲水到斥水的转变危险,需要对引起土壤发生斥水的因素,如含水量、土壤有机质含量、容重等因素作深入研究。

黑垆土为黄土母质发育的地带性土壤,在中国陕西和甘肃等地分布广泛。豆科作物种植和免耕可以有效提高土壤表层有机质积累[9-10]。本研究选择苜蓿地为免耕地和容易积累极性物质容易的类型,玉米地为翻地整地多、表层土壤中有机质量少、极性往往被打扰的类型,探索黑垆土土壤出现斥水表现的可能条件和影响因素。由于黑垆土仅在干燥和积累一定极性物质情况下才会出现斥水,本文研究土样在低水水平下,添加 OCT 极性物质情况下使得黑垆土出现斥水的条件,以期为土壤干燥条件下的入渗能力相关研究提供参考。

1　材料和方法

1.1　研究区概况

试验土壤采自渭北旱塬的长武水土保持试验站农田生态系统长期定位试验场,位于陕西省长武县城关西 2.5 km 的十里铺村南 1 km 旱塬上,塬面平坦宽阔,黄土堆积深厚,海拔 1 200 m,年均降雨 584.1 mm,年均气温 9.1 ℃,无霜期 171 d,属温带大陆季风型半湿润易旱气候区。本试验选择 2 个试验样地,分别是苜蓿连作区和玉米连作区,土壤为黑垆土。土壤基本理化性质见表 1。

表 1　0—20 cm 黑垆土土壤基本理化性质

样 地	土壤机械组成/%			有机碳含量/(g·kg^{-1})	>0.25 mm 水稳性团聚体含量/%
	砂 粒 (>0.02 mm)	粉 粒 (0.002～0.02 mm)	黏 粒 (<0.002 mm)		
苜蓿地	28.36±5.10	36.33±2.49	35.32±4.61	35.95±2.51	61.36±4.00
玉米地	40.06±3.80	33.25±2.21	26.70±1.65	20.75±0.45	38.10±3.56

1.2　材料与方法

1.2.1　*样品制备*　采样时间为 2019 年 10 月,玉米地和苜蓿地各选取 3 个样点,取土深度为 0—20 cm,将土样用小刀沿自然裂隙切成 1 cm 左右的小块后自然风干,取风干土样粉碎,剔除杂质后过 1 mm 筛备用。

按土壤含水量 0%,2%,4%和 6%制备 4 组不同含水量的土壤试样。试样初始为干燥状态,给干土按控制含水量需要喷洒水量搅拌均匀后,密封放入 35 ℃恒温烘箱 12 h,使水和土混合均匀,此时某一含水量的试样即制备完成,即玉米地、苜蓿地分别制备 4 个含水量试样。

按 3 个水平 OCT 添加量(0.05%,0.10%和 0.15%)和 3 个水平土壤容重(1.3,1.4,1.5 g/cm^3)制备4 个不同含水量供试土壤样。将 OCT 研磨至细颗粒后按百分比与不同含水量的土壤混合,密封于 25 ℃的室温下放置 96 h,获得土壤试样 72 个。将不同含水量与 OCT 的土壤按容重 1.3 g/cm^3,1.4 g/cm^3,1.5 g/cm^3 分别装入土盒内,轻轻平整表面,共获得土样 3 容重×3 OCT 添加量×4 含水量水平×3 重复×2 作物=216 个处理,然后对其进行斥水性测定。

1.2.2　*土壤斥水性 SWR 测定方法*　采用滴水穿透

时间(WDPT)法对各土盒内的土壤进行斥水性测定，滴定溶液为 25 ℃室温下的蒸馏水，滴定管采用标准滴定管(0.48 ml/滴)，滴头距离土面 5 mm，每一个样本滴定 7 次，记录每滴的入渗时间 t，取其平均值作为样本滴水穿透时间，参照 WDPT 值分级对应的斥水等级[11](表 2)。

表 2 滴水穿透时间 WDPT 值分级所对应的斥水等级

项 目	WDPT 等级				
	≤5 s	5～60 s	60～600 s	600～3 600 s	>3 600 s
斥水等级	不斥水(湿润)	轻微斥水	斥水	严重斥水	极度斥水

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据统计和图表构建，SPSS 23.0 进行数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 黑垆土不同处理下的斥水表现比较

SWR 与土壤含水量、容重、OCT 添加量的差异如图 1—2 所示。由图 1—2 可以看出，不同含水量、容重及 OCT 添加量对 SWR 均产生一定的影响。黑垆土在没有 OCT 添加时是亲水性土壤，S_1 处理的滴定时间均小于 5 秒，即有一定的 OCT 加入，仍不能改变黑垆土亲水的性质，2 种作物，3 个容重的处理中，与黑垆土属于非斥水性土壤的性质十分一致。当 OCT 添加量为 0.10%后，2 种土地利用下的土壤均出现不同程度斥水现象，并且 OCT 添加量达到 0.15%时，2 种土地利用下的土壤表现出严重斥水；斥水程度随土壤含水量增加(0%～6%)逐渐增强；斥水程度基本符合随容重增加而增强规律，如在 2%和 4%含水量时，严格遵循容重增加斥水性增强的，只是在 0%和 6%含水量时有所波动。

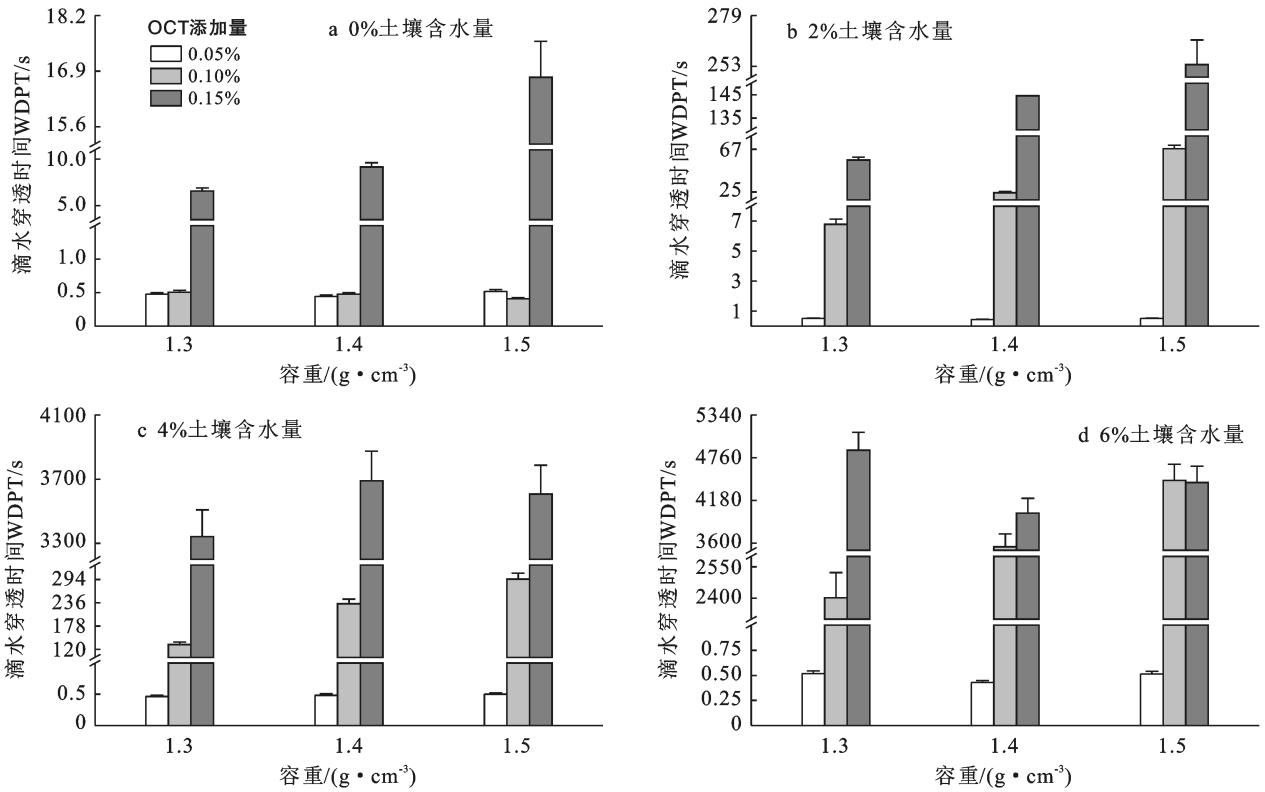


图 1 玉米地土壤处理样的斥水性测试结果

从图 1 玉米地和图 2 苜蓿地可以看出：在 0%含水量时，低、中两个水平的 OCT 添加下，3 个容重变化范围内土壤可以维持亲水本质，即完全干燥的黑垆土，在斥水物质添加低于(0.15%)时仍然可以保持亲水本性，当 OCT 添加到一定量后(0.15%)，无论含水量、容重，黑垆土就不再是亲水的，变化为斥水性土壤。当含水量增加到 2%时，只有容重 1.3 g/cm³ 处理组合没有斥水性，其他组合处理的 SWR 表现为随

容重、OCT 添加量增加、土壤含水量增加而增大趋势,即土壤容重开始影响到土壤的亲水性质,容重的增加加大了土壤水滴入渗的难度,土壤向斥水性转变。在 0%含水量、OCT 添加量在 0.15%时土壤由非斥水转变为轻微斥水状态,并且随着容重的增加斥水性增强(图 1a)。在 2%含水量时,SWR 随着 OCT 添加量的增加而增强,并且 0.10%和 0.15%OCT 添加量下,土壤由非斥水转变为轻微斥水或斥水状态(图 1b)。在 4%和 6%含水量的情况下,OCT 添加量达 0.15%时,WDPT 值均大于 3 600 s,土壤均表现出极度斥水,其中 6%含水量,OCT 添加量为 0.10%时 WDPT 值均大于 600 s,土壤表现出严重或极度斥水(图 1c,1d)。

图 2 苜蓿地表明:苜蓿地的表现与玉米地的基本一致,反映出土壤质地的影响上不足于含水量,OCT 添加量的影响。容重对 SWR 的影响在低含水量、低 OCT 添加量时影响不明显;在 2% 含水量,0.15% OCT 添加量和 4%含水量,0.10%OCT 添加量及 6% 含水量,0.10%OCT 添加量时,SWR 表现为随容重的增加而增大。在 0%含水量、OCT 添加量在 0.15% 时土壤由非斥水转变为轻微斥水状态(图 2a)。在 2%含水量时,SWR 随着 OCT 添加量的增加而增强,并且 0.10%和 0.15%OCT 添加量下,土壤由非斥水转变为轻微斥水或斥水状态(图 2b)。在 4%含水量的情况下,OCT 添加量 0.10%时,土壤表现为斥水或严重斥水状态,OCT 添加量0.15%时,土壤均表现出极度斥水(图 2c)。在 6%含水量时,OCT 添加量为 0.10%或 0.15%时 WDPT 值均大于 600 s,土壤表现出严重或极度斥水(图 2d)。

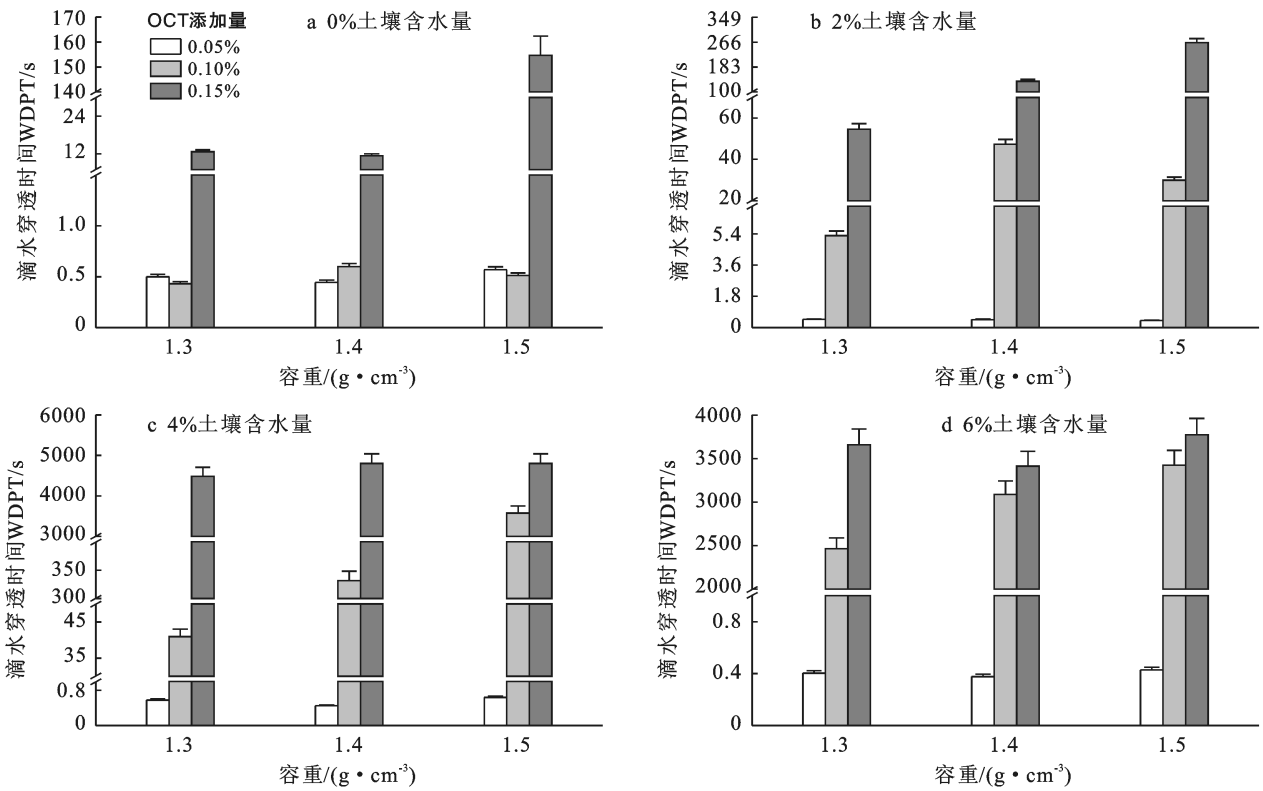


图 2　苜蓿地土壤处理样的斥水性测试结果

2.2　黑垆土 SWR 影响因素的互作效应分析

交互效应是指两个或者多个因素在对方不同水平上呈现的效应存在差异。由于滴水穿透时间(WDPT)值变幅较大,故取数据的对数进行互作效应分析,结果见图 3。图 3 表明,玉米地和苜蓿地体现出 3 个因素组合对 WDPT 值影响具有交互作用。通过多因素方差分析(表 3),玉米地 3 因素除了显著的直接作用外,仍表现出极显著的交互作用($p<0.001$)。包括两因素交互作用。单因子效应分析结果显示,土壤含水量,OCT 添加量和土壤容重均存在极显著效应($p<0.001$)。说明在玉米地土壤 OCT 添加量、土壤含水量、土壤容重是主要影响因素,并且各因素间均存在交互效应。0.10%OCT 添加量的 3 个容重下,不同土壤含水量水平之间存在极显著差异($p<0.001$);0.15% OCT 添加量,1.4,1.5 g/cm³ 容重下,0%,2%土壤含水量与 4%,6%土壤含水量差异极显著($p<0.001$)。

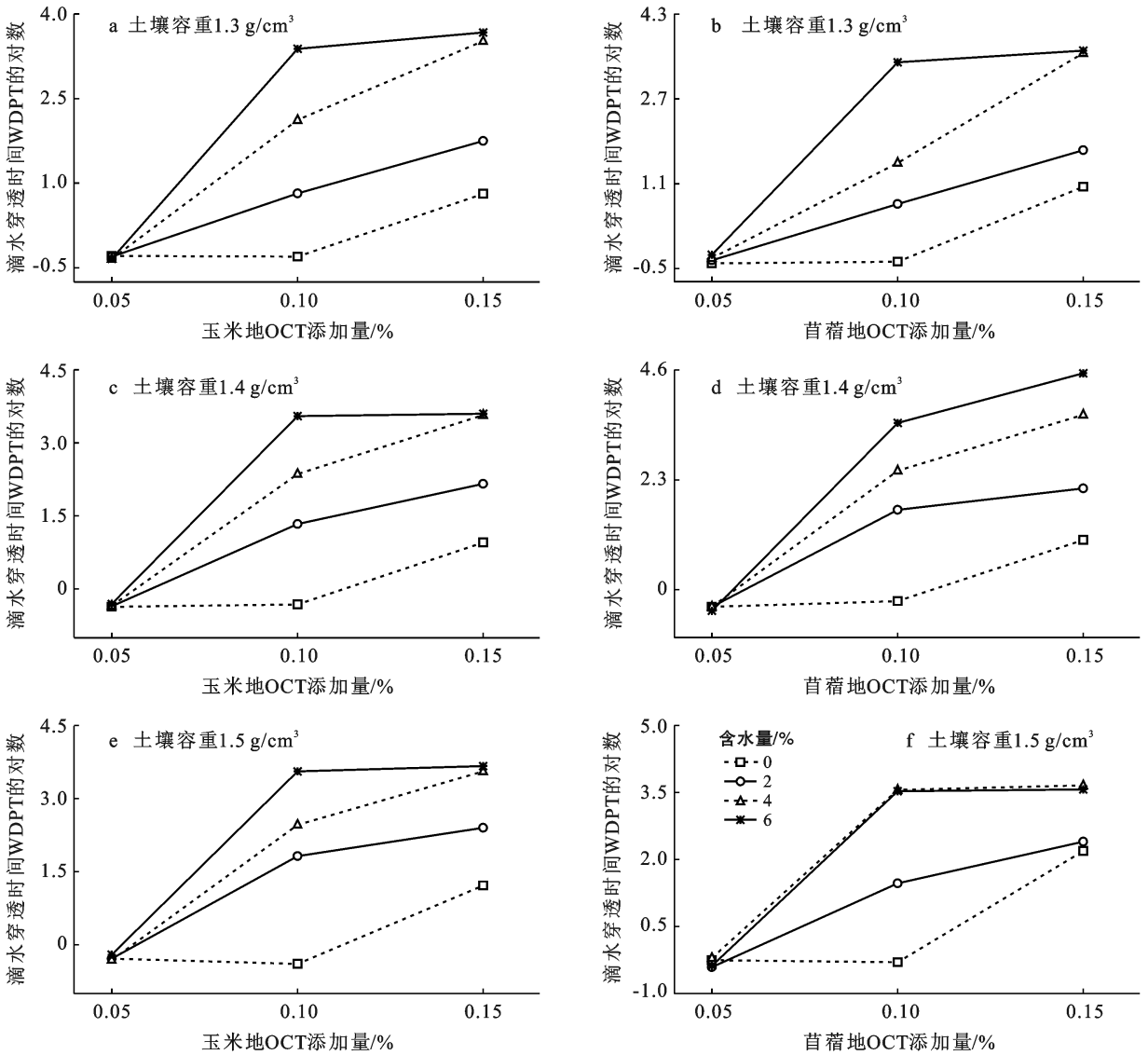


图 3 土壤含水量、OCT 添加量和土壤容重的互作分析

苜蓿地十分类似玉米地的情况(表 3,图 3),土壤含水量、OCT 添加量、容重对 WDPT 值的影响存在 3 因素交互和 2 因素的两两交互作用($p<0.001$)。

表 3 影响 SWR 的多因素方差分析

影响因素	玉米地		苜蓿地	
	F	*p*	*F*	*p*
a	9 794.175	<0.001	4 571.457	<0.001
b	3 074.970	<0.001	1 148.810	<0.001
c	57.390	<0.001	83.003	<0.001
a * *b*	831.158	<0.001	354.966	<0.001
a * *c*	10.990	<0.001	28.053	<0.001
b * *c*	14.026	<0.001	13.255	<0.001
a * *b* * *c*	8.345	<0.001	20.974	<0.001

注:*a* 为 OCT 添加量;*b* 为土壤含水量;*c* 为土壤容重。下同。

苜蓿地与玉米地相比:OCT 添加量、含水量的 *F* 值降低,容重的 *F* 值增强,交互作用的 *F* 值均有所增强。这可能与苜蓿地有机质含量和土壤颗粒组成有关,结合表 1 可知,苜蓿地本身有机质含量高、黏粒含量多,在低土壤含水量情况下,或可积累极性,增加斥水风险。

图 3 同时反映 2 种土地利用类型在不同土壤容重下随着 OCT 添加量增加,土壤含水量对 SWR 影响的变化趋势:在不同土壤容重下,玉米地和苜蓿地各含水量对 SWR 的影响随 OCT 添加量增加均呈上升趋势。其中玉米地在 1.3 g/cm³ 容重时,2%~4%含水量的曲线斜率变化较小,0%含水量斜率先小后大,6%含水量斜率先大后小。较于 1.3 g/cm³ 容重,1.4,1.5 g/cm³ 容重时,2%~4%含水量的曲线斜率有减小趋势,而 6%含水量斜率在中高 OCT 添加量时趋于水平,0%含水量斜率仍先小后大。苜蓿地与玉米地的情况基本相似,不同在 1.5 g/cm³ 容重时,4%含水量斜率在中高 OCT 添加量时也趋于水平。

说明在中高土壤容重下,各土壤含水量随着 OCT 添加量的增加,斥水性均会到达顶峰,此时随着含水量增加和 OCT 的添加,不同土壤处理表现出的斥水性均达到极度斥水级别,需要滴定时间的对数值差异也会变得不明显。

逐步回归分析结果(表 4)表明,2 类样地 OCT 添加量对 SWR 的作用最大,分别可以解释玉米地 SWR 54.0%的变异,苜蓿地为 56.2%。玉米地中,OCT 添加量和土壤含水量共同可以解释 SWR 80.1%的变异,而土壤容重没有被归入回归模型中,说明主要影响玉米地的 SWR 因素为 OCT 添加量和土壤含水量。苜蓿地 OCT 添加量和土壤含水量共同可以解释 SWR 77.6%的变异,OCT 添加量、土壤含水量和土壤容重共同可以解释 SWR 78.5%的变异,可以看出在苜蓿地中土壤容重虽然归入到回归模型,但是影响的程度不高。5 个拟合模型中,OCT 添加量和土壤含水量共同参与下的拟合模型更优,玉米地和苜蓿地的 F 值分别为 220.563,186.636。总体来看,2 类样地 OCT 添加量和土壤含水量对 SWR 的影响明显大于土壤容重的影响。

表 4　滴水穿透时间与各因子的逐步回归分析

样 地	拟合模型(标准化系数)	调整 R^2	F	p
玉米地	$\lg t=0.738a-1.564$	0.540	126.637	<0.001
	$\lg t=0.738a+0.513b-3.396$	0.804	220.563	<0.001
苜蓿地	$\lg t=0.753a-1.652$	0.562	138.496	<0.001
	$\lg t=0.753a+0.463b-3.343$	0.776	186.636	<0.001
	$\lg t=0.753a+0.463b+0.104c-3.759$	0.785	131.386	<0.001

2.3　黑垆土由不斥水转变为轻微斥水的条件分析

表 5 表示土壤由不斥水到轻微斥水转变的条件。由表 5 可知,玉米地和苜蓿地的出现斥水的条件和具体的 WDPT 值很接近,即土壤中颗粒机械组成(表 1)对斥水性影响不明显,只是相同条件下苜蓿地略微更斥水。具体出现斥水的条件为:玉米地在 0%含水量的情况下,只有当 OCT 添加量达 0.15%时,WDPT 值大于 5 s 且小于 60 s,土壤表现为轻微斥水。在 2%含水量的情况下,OCT 添加量为 0.10%且土壤容重为 1.3 g/cm^3,1.4 g/cm^3 时,WDPT 值大于 5 s 且小于 60 s,土壤表现为轻微斥水;OCT 添加量达 0.15%且土壤容重为 1.3 g/cm^3 时,土壤表现为轻微斥水。苜蓿地在 0%含水量的情况下,只有当 OCT 添加量达 0.15%且土壤容重为 1.3 g/cm^3,1.4 g/cm^3 时,WDPT 值大于 5 s 且小于 60 s,土壤表现为轻微斥水。在 2%含水量的情况下,OCT 添加量为 0.10%时,WDPT 值大于 5 s 且小于 60 s,土壤表现为轻微斥水,并且 WDPT 值随着土壤容重的增加而增大;OCT 添加量达 0.15%且土壤容重为 1.3 g/cm^3 时,土壤表现为轻微斥水;土壤容重为 1.4,1.5 g/cm^3 时,WDPT 值大于 60 s,土壤表现为斥水。

表 5　黑垆土土壤由湿润转变为轻微斥水时的条件及其滴水穿透时间 WDPT 值

样 地	土壤含水量/%	OCT 添加量/%	不同土壤容重/(g·cm^{-3})		
			1.3	1.4	1.5
玉米地	0	0.15	7 s	9 s	17 s
	2	0.10	7 s	24 s	>60 s
	2	0.15	56 s	>60 s	>60 s
苜蓿地	0	0.15	13 s	12 s	>60 s
	2	0.10	5 s	30 s	47 s
	2	0.15	55 s	>60 s	>60 s

3　讨 论

在逐步回归分析中(表 4),OCT 添加量和土壤含水量是 SWR 的主要影响因素,玉米地中,OCT 添加量和土壤含水量共同可以解释 SWR 80.1%的变异,苜蓿地 OCT 添加量和土壤含水量共同可以解释 SWR 77.6%的变异,与吴珺华等[12]研究云南壤土 SWR 和 OCT 含量、含水量呈正相关关系相符。本研究中 0.10%OCT添加量下 SWR 随着土壤含水量的增加而增大,在 2%含水量时先出现轻微斥水性,与在对荷兰沙土进行研究时发现,某些土壤在小于 2%含水量时 SWR 会消失的结果相符[13],也与在改性土壤条件下,OCT 含量和砂土土壤含水率影响 SWR 的结果相符[14]。但是在 0%含水量和 0.15%OCT 添加量时,土壤仍然从不斥水转变为斥水状态,说明即使在干燥的土壤条件下,随着 OCT 添加量增加到一定程度,土壤仍会表现出斥水性质。根据图 3 中 0%土壤含水量的曲线变化趋势,可以推测随着 OCT 的继续增加,SWR 可能会达到严重甚至极度斥水水平。杨松等[2]对土壤颗粒理想模型的研究认为,砂土的密实度对斥水性也有重要影响:当砂土比较密实时,土壤的“亲水”与“斥水”特性对含水量特别敏感,随含水量的变化,土壤可能由亲水性较好的土壤转变为斥水性土壤;当砂土比较松散时,土壤颗粒的斥水性对含水量并不敏感,说明容重也可能是影响 SWR 的因素之一,本研究发现容重的影响在非干燥土壤、中高 OCT 添加量时,表现为随容重增加,斥水程度增强,随着含水量和 OCT 添加量的增加,这种趋势变得不明显,可能是在较高的含水量和 OCT 添加量的影响下,各因素间存在交互效应,容重对于 SWR 的影响被削弱。另一方面,逐步回归分析中,玉米地的土壤容重未被

纳入回归模型，苜蓿地的容重虽被纳入第 3 个模型，但是对于解释度的贡献较小，只比 OCT 添加量和土壤含水量的回归模型高 0.9%，F 值减小了 55.25(表 4)。在本研究中，互作效应分析显示，苜蓿地与玉米地的土壤含水量、OCT 添加量、土壤容重不仅单独显著影响 SWR，而且各因素之间存在交互效应(表 3)。其中 2 类样地土壤容重单独对 SWR 影响的 F 值均小于 OCT 添加量和土壤含水量，基本符合逐步回归分析中，OCT 添加量和土壤含水量对 SWR 的影响明显大于土壤容重的影响的结果。交互效应说明土壤容重、土壤含水量与 OCT 添加量之间存在不同水平的组合影响，表现在 0%～2%含水量时，随着 OCT 增加，WDPT 值差异不大，而在 4%～6%含水量时，WDPT 值急速增加；在 0.05%OCT 添加量时，随土壤含水量的增加，土壤仍表现为不斥水，而在 0.10% OCT 添加量时，2%～6%含水量的 WDPT 值差异明显，在0.15%OCT 添加量时，随着含水量的增加，土壤会从干燥条件下的非斥水状态迅速转变为斥水状态。苜蓿地与玉米地相比整地少，苜蓿地有机质含量和土壤颗粒组成与玉米地存在差异，多因素方差分析中苜蓿地较玉米地：OCT，含水量的 F 值降低，容重的 F 值增强，交互作用的 F 值均有所增强。结合表 1，苜蓿地本身有机质含量高、黏粒含量多，在低土壤含水量情况下，或可积累极性，更易出现斥水风险。

土壤有机碳是影响 SWR 的重要原因之一，SWR 和土壤有机碳含量呈正相关关系[15]，在本研究中，苜蓿地的有机碳含量比玉米地的有机碳含量高 73.25%，在 1.4，1.5 g/cm^3 容重下，苜蓿地在 4%含水量和 0.10%OCT 添加量的 WDPT 值比玉米地高(图 1c，2c)。另一方面，有机质是水稳性团聚体含量(water-stable aggregates，WSA)发育的有利条件[16]，有研究发现红壤土的不同土地利用方式对土壤团聚体的水分入渗力和斥水性存在显著影响[17]，本试验苜蓿地 WSA 含量比玉米地高 61.05%，推测黑垆土的团聚体含量对于 SWR 有一定的影响。对伊朗北部各类土壤研究表明，土壤黏粒与 SWR 呈负相关关系[18]，因为砂粒相比于黏粒有更小的比表面积，更易产生 SWR[19]。在荷兰某些土壤的研究证明，中等质地的土壤(黏粒占 20%～30%)，甚至是黏土也可能呈现强烈的斥水性[20]。产生这种差异的原因可能是土壤种类和土地利用类型不同造成的。本试验玉米地的砂粒含量比苜蓿地高 41.26%，粉粒含量较为接近，黏粒含量苜蓿地比玉米地高 32.28%，说明玉米地更易出现 SWR，这与在 0.15%OCT 添加量下，对比两地 0%和 2%含水量的 WDPT 值，玉米地较苜蓿地变化更大的结果相符(图 1a，1b，2a，2b)。可能苜蓿地高有机质含量对增加斥水的贡献被玉米地高砂粒含量增强斥水的作用互相抵消，最终两类土的 SWR 差别不大。根据陈俊英等[4]对以色列西南部黄土状母质沙壤土的研究，含水量 10%左右时 SWR 达到峰值，但本试验未出现随含水量升高 SWR 达到峰值且随后减弱的现象，可能是含水量梯度较少且含水量较低的原因造成，故黑垆土 SWR 随含水量的变化规律还需进一步深入研究讨论。

4 结 论

(1) 黑垆土土壤在一般情况下不表现出斥水性，特殊情况下会有斥水表现。影响黑垆土土壤斥水性的因素中 OCT 添加量、土壤含水量的影响明显大于土壤容重的影响。同时，含水量、OCT 添加量和容重之间对 SWR 也存在极显著交互作用。

(2) 土壤由不斥水到斥水转变的必要条件为：玉米地和苜蓿地出现斥水的条件和具体的 WDPT 值较为接近，即黑垆土在加入 0.10%OCT 添加量后，在 0%～6%的低水条件下可以表现出斥水性，而且斥水程度随着含水量增加有增强趋势。

(3) 苜蓿地较玉米地有机碳含量、黏粒含量高，其本身易积累极性而有斥水潜能，OCT 添加、含水量、容重变化后的斥水性交互分析中的 F 值增加，因素间的交互作用增强。因此，应注意不同土地利用下的土壤这些理化性质变化对黑垆土斥水风险的影响。

[参 考 文 献]

[1] 李毅，商艳玲，李振华，等.土壤斥水性研究进展[J].农业机械学报，2012，43(1)：68-75.

[2] 杨松，吴珺华，董红艳，等.砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响[J].土壤学报，2016，53(2)：421-426.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Zhang Bin, Peng Xiaohong, Zhao Qingguo, et al. Eluviation of dissolved organic carbon under wetting and drying and its influence on water infiltration in degraded soils restored with vegetation [J]. European Journal of Soil Science, 2004，55(4)：725-737.

[6] 王秋玲，施凡欣，刘志鹏，等.土壤斥水性影响土壤水分运动研究进展[J].农业工程学报，2017，33(24)：96-103.

[7] Täumer K, Stoffregen H, Wessolek G. Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content [J]. Geoderma, 2005，125(1/2)：107-115.

(下转第 75 页)

[13] 景阳.浅析兰州市气候资源与自然资源的特点和利用[J].农业科技与信息,2015,12(16):40-42.

[14] 张万儒,许本彤.森林土壤定位研究法[M].北京:中国林业出版社,1986:30-36.

[15] 秦华军,何丙辉,赵旋池,等.西南喀斯特山地林下经济模式对土壤渗透性的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(11):1386-1394.

[16] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey lakes watershed, central Ontario [J]. Journal of Hydrology, 2005,306(1/2/3/4):1-20.

[17] 刘广路,范少辉,漆良华,等.不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):44-46,56.

[18] 漆良华,张旭东,周金星,等.湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性[J].林业科学,2007,43(3):1-7.

[19] 薛文鹏,赵忠,李鹏,等.王东沟不同坡向刺槐细根分布特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(6):227-232.

[20] 张毓涛,胡莎莎,李吉玫,等.新疆 3 种主要森林类型根系生物量变化特征研究[J].干旱区地理,2013,36(2):77-84.

[21] 钟芳,王红赤,李俊年,等.兰州市南北两山水热条件对侧柏根系分布的影响[J].中国沙漠,2006,26(4):559-563.

[22] 刘小娥,苏世平.兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能[J].应用生态学报,2020,31(8):2574-2582.

[23] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].自然资源学报,2003,18(5):529-535.

[24] 吴发启,赵西宁,佘雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18,78.

[25] Alphei J, Bonkowski M, Scheu S. Protozoa, Nematoda and Lumbricidae in the rhizosphere of *Hordelymus europeaus* (Poaceae): Faunal interactions, response of microorganisms and effects on plant growth [J]. Oecologia, 1996,106:111-126.

[26] 靳士科,王娟娟,朱莎,等.上海市不同类型城市森林中小型土壤动物群落结构特征[J].应用生态学报,2016,27(7):2363-2371.

[27] 王磊,孙长忠,周彬.北京九龙山不同结构侧柏人工纯林降水的再分配[J].林业科学研究,2016,29(5):752-758.

[28] 李建兴,何丙辉,徐小军.生物埂护坡下不同土地利用方式对土壤渗透性的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):243-248,253.

[29] 闫东锋,杨喜田.豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):43-50.

(上接第 68 页)

[8] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].生态学杂志,2014,25(3):657-663.

[9] 王旭东,张霞,王彦丽,等.不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J].农业机械学报,2017,48(11):229-237.

[10] 宋霄君,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1588-1597.

[11] Doerr S H, Llewellyn C T, Douglas P, et al. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different Origin [J]. Soil Research, 2005,43(3):225-237.

[12] 吴珺华,林辉,刘嘉铭,等.十八胺化学改性下壤土的斥水性与入渗性能研究[J].农业工程学报,2019,35(13):122-128.

[13] Dekker L W, Ritsema C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils [J]. Journal of Hydrology, 2000,231:148-164.

[14] 刘畅,陈俊英,张智韬,等.砂土斥水性与含水率关系的试验研究及理想模型分析[J].节水灌溉,2017,(8):13-16,20.

[15] 闫加亮,赵文智,刘继亮,等.绿洲农田土壤斥水性及其影响因素[J].中国沙漠,2019,39(5):174-181.

[16] Mikha M M, Vigil M F, Liebig M A, et al. Cropping system influences on soil chemical properties and soil quality in the Great Plains [J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2006,21(1):26-35.

[17] 毕利东,马春平,陈丹,等.土壤斥水性在土壤团聚体内的空间分异研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(6):54-57.

[18] Mirbabaei S M, Shahrestani M S, Zolfaghari A, et al. Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran [J]. Catena, 2013,108:26-34.

[19] 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(1/2/3/4):33-65.

[20] Dekker L W, Ritsema C J. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils [J]. Catena, 1996,28(1/2):89-105.