

文章编号:1000-694X(2012)03-674-09

腾格里沙漠沙丘固定后土壤的斥水性特征研究

杨昊天, 刘立超*, 高艳红, 李小军, 贾荣亮, 黄磊

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠试验研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 土壤斥水性是重要的土壤物理属性,对土壤水文过程和地貌过程有重要的影响。利用毛细上升法研究了腾格里沙漠东南缘沙丘固定后土壤的斥水性特征,分析了不同小地形、不同土壤深度和不同土壤粒径土壤的斥水性差异。结果表明,固沙植被建立后显著地改变了沙丘的土壤斥水性,且随沙丘固定时间增加而呈增强的趋势。丘间地和迎风坡的土壤斥水性大于丘顶和背风坡的斥水性。0~3 cm 土层的土壤斥水性显著大于 3~6 cm。随着粒径的不断增大,土壤斥水性呈减小趋势,不同粒径段土壤斥水性差异显著;且土壤斥水性与粒径分别为 0~0.05 mm、0.05~0.01 mm、0.01~0.15 mm 的土壤呈极显著正相关线性关系,与粒径大于 0.15 mm 的土壤呈显著负相关线性关系。植被区土壤斥水性的增加可能与大气降尘在固定沙丘表面不断沉积、生物土壤结皮形成,尤其是藻类和地衣的形成有关,斥水性的增强将影响到植物种在沙丘上的有效水分利用。

关键词: 土壤斥水性; 土壤接触角; 毛细上升法; 植被恢复区; 腾格里沙漠

中图分类号: P931.3, S152.7 文献标识码: A

土壤斥水性(soil water repellency)是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象^[1-2],主要表现为水滴在斥水性土壤表面不能迅速入渗或铺展的现象,一般用土壤接触角来表征^[3-4]。土壤斥水性是大部分地表水文过程和地下水文过程的关键影响因素,对于土壤水分运移有重要意义。一方面,土壤斥水性能显著阻止水分入渗^[5-7]、促进地表径流和土壤侵蚀^[8-11]、通过优先流携带化学物质污染地下水^[6-7]。另一方面,斥水性使得地表干燥而容易引起风蚀水蚀,造成土地退化,从而对生态系统格局与过程产生重要影响^[12-14]。此外,土壤斥水性可能会影响植物对土壤水分的利用及其生长。因此,土壤斥水性研究在国际上受到了广泛的关注。

最初关于土壤斥水性的报道大多来自于具有较大比表面积的粗质地沙壤土^[15]。之后的研究证明,中等质地的土壤(含有 20%~30% clay),甚至是黏土,也会呈现强烈的斥水性^[16-18]。近年来的观测证据更表明,土壤斥水性是一个全球性的现象,可以出现在各种气候背景、土壤类型和植被覆盖条件下^[11,19-20]。目前对土壤斥水性的研究主要涉及森林植被、灌丛植被、草地、农业用地、高尔夫球场、沙丘和牧场等生境条件^[19,21-22]。有研究表明,干旱、半干旱地区的土壤更容易产生斥水性,这些地区经常出现的持续干旱更加剧了这一现象。但是到目前

为止,有关温带荒漠土壤斥水性的研究报道还非常少见。

腾格里沙漠东南缘的沙坡头地区属于草原化荒漠地带,自 20 世纪 50 年代以来,通过人工栽植耐旱植物在本区形成了植被固沙防护体系。随着固沙植被的发展,原有的流动沙丘景观已逐渐演变为人工固沙植被和天然定居植被覆盖的复合生态系统^[23]。表层土壤的理化性质由于人工植被的演变而发生了显著变化,并对地表生态水文过程产生重要影响。已有许多研究报道了该地区植被建设对沙丘土壤入渗、地表蒸发及凝结水形成等水文过程以及水量平衡的影响^[23-32],但对固定沙丘土壤斥水性特征及其生态水文学效应了解甚少。这一问题的探讨对人工固沙植被系统的稳定性维持和管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2009 年在中国科学院沙坡头沙漠研究试验站(简称沙坡头站)进行。沙坡头位于腾格里沙漠东南缘(37°27'N,104°57'E),海拔约 1 300 m,处在阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带,为典型的草原化荒漠地带。本区格状沙丘主梁呈新月形沙丘链形态,由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布,相对高

收稿日期:2011-10-11; 改回日期:2011-11-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB42130-3)和国家自然科学基金项目(40971031,40701002)资助

作者简介:杨昊天(1985—),男(汉族),山西省临汾人,硕士研究生,主要从事干旱区生态学研究。Email: yanghaotian6516@163.com

* 通讯作者:刘立超 (Email: lichao@lzb.ac.cn)

差 15~20 m。该区年均气温为 10.4 °C, 低温极值为 -24.5 °C, 高温极值是 38.1 °C, 冬夏昼夜温差大; 年均降水量仅为 184.4 mm, 降水年际变率大, 年内的雨量分布很不均匀; 年均潜在蒸发量 3 007 mm; 空气平均相对湿度为 40%, 最低可达到 10%, 春季尤其干燥; 多年平均风速为 3.5 m·s⁻¹, 最大风速为 19 m·s⁻¹; 年均沙尘日数高达 122 d; 土壤以细沙为主, 以风沙土及灰棕荒漠土分布范围最广; 地下水埋藏很深, 不能为植物所利用, 沙丘的持水力很弱。沙坡头地区无灌溉人工固沙植被防护体系始建于 1956 年, 并先后于 1964 年、1981 年与 1987 年扩建, 目前在沿包兰铁路走向形成东西长 16 km、南北宽 1 km 的绿色走廊^[30-33]。

1.2 研究方法

实验样品取自沙坡头铁路北部无灌溉人工植被固沙区。于 2009 年夏天选择一条东西宽 50 m、南北长 600 m 的样带, 依次包括了 1956 年、1964 年、1981 年和 1987 年分别建立的人工植被区以及流沙区 5 个面积分别为 50 m×100 m 的样方, 在各样方内选择具有代表性的地形——丘间低地(A)、迎风坡(B)、丘顶(C)及背风坡(D), 在每个地形随机选取 8 个采样点, 利用 20 cm×20 cm 的取样框分 0~3 cm(上层)和 3~6 cm(下层)两层提取土壤样品, 均匀混合 8 个重复土样以减少土壤空间异质性。经过自然风干, 去除枯落物并过 0.5 mm 土壤筛后, 将样品分为两部分, 一部分用于直接测定土壤斥水性及其粒径组成; 剩余部分样品经过 0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm、0.250 mm 的土壤筛对样品进行分级, 用于测定 0~0.05 mm、0.05~0.1 mm、0.1~0.15 mm 和 0.15~0.25 mm 4 个粒径段土壤样品的斥水性。由于获得 0.25~0.5 mm 粒径段的样品极少, 故未对其进行斥水性的测定。

样品粒径利用激光粒度分析仪(MS-S, 英国 Malvern 仪器公司)测定。

采用毛细上升法^[34-35]测定人工植被区表层土壤接触角, 用以表征土壤斥水性的大小, 即土壤斥水性随土壤接触角的增大而增加。为了将实验误差降低到最小程度, 在玻璃柱中填充样本时, 要尽量保持均匀, 并使用样本的质量(g)、填充的高度(cm)来控制填充密度。实验过程中, 实验室的温度和湿度分别控制为 20 °C 和 50%^[34-35]。测量开始后, 记录液体湿润峰在圆柱土壤中上升高度的时间。

1.3 数据处理与分析

土壤接触角 θ 用 Washburn 公式计算,

$$h^2 = \frac{r\gamma_1 \cos\theta}{2\eta}t$$

式中: h 为上升液体前端在圆柱中的高度(m); r 为均一的孔隙有效半径(m), 表示了颗粒状材料理想化的孔隙系统; γ_1 为液体的表面张力(J·m⁻²); η 为液体的黏度(Pa·s); t 为时间(s)。分别使用蒸馏水和正辛烷测定。正辛烷是一种完全湿润的液体, 即接触角为 0°^[34], 在本实验中被选为参比液体, 用于求得公式中的 r 因子。

采用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析。对不同年代植被区、不同地形以及不同粒径的土壤斥水性差异显著性采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 并用 Tukey 检验进行多重比较分析; 以土壤斥水性为因变量, 土壤粒径为自变量, 采用线性回归(Linear Regression)分析了土壤斥水性与土壤颗粒组成之间的相关关系。

2 实验结果

2.1 不同年代固沙植被区与流沙区的土壤斥水性特征

人工植被区的土壤斥水性均大于流沙区, 且土壤斥水性随着植被的年龄而增大(图 1)。统计结果显示, 较早的固沙植被区(1956 年、1964 年和 1981 年植被区)的土壤斥水性与流沙区的差异性均达到极显著水平($P < 0.01$), 而较晚的植被区(1987 年植被区)的土壤斥水性与流沙区的差异不显著($P > 0.05$), 主要是由于 1987 年植被区靠近流沙区, 受流沙侵蚀较为严重。

就固定沙丘不同的地形部位而言, 丘间低地和迎风坡的土壤斥水性整体上大于背风坡和丘顶。对不同层次土壤的斥水性, 我们的结果表明, 上层土壤的斥水性随着丘间低地、迎风坡、背风坡、丘顶呈下降趋势; 下层土壤的斥水性随着丘间低地、迎风坡、丘顶、背风坡呈下降趋势(图 2)。

人工植被区不同地形部位的土壤斥水性均大于流沙区(图 3A 和 B)。上层土壤的斥水性随着植被恢复年代的增加呈上升趋势(图 3A)。下层土壤的斥水性随着植被恢复年代的增加并未呈现上升趋势, 且不同地形条件下的规律不同, 具体表现为, 丘间地: 1964 年 > 1987 年 > 1956 年 > 1981 年 > 流沙

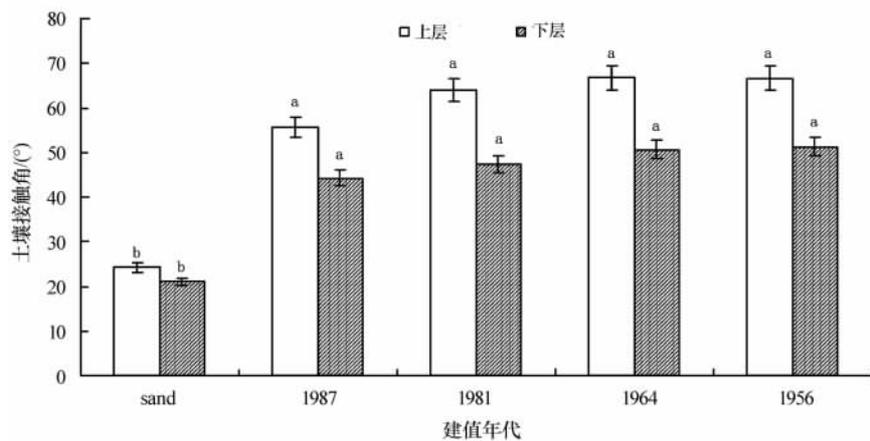


图 1 流动沙丘与不同年代固沙植被区的土壤斥水性 (平均值±标准差)

Fig. 1 The soil water repellency (Mean±SD) at depth of 0~3 cm and 3~6 cm in mobile sand dune and different fixation-duration sand dunes

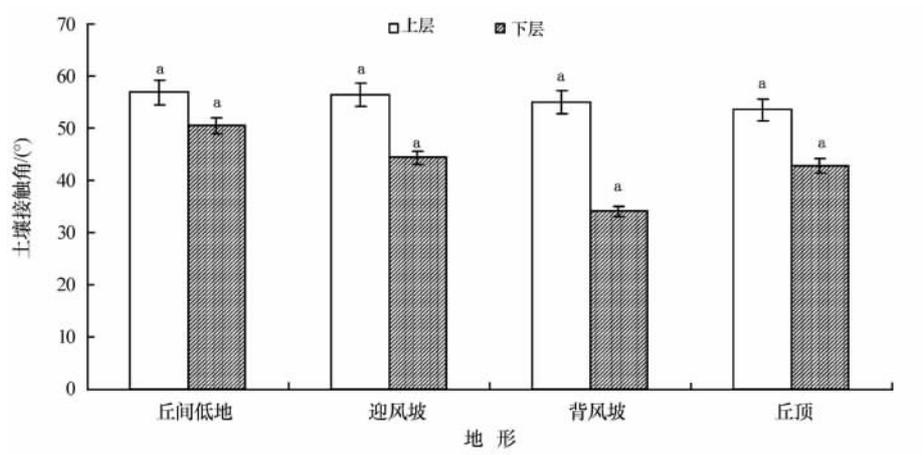


图 2 固定沙丘 4 种地形部位的土壤斥水性 (平均值±标准差)

Fig. 2 The soil water repellency (Mean±SD) at depth of 0~3 cm and 3~6 cm in different positions of the fixation sand dunes

区;迎风坡:1956年>1987年>1964年>1981年>流沙区;丘顶:1964年>1956年>1981年>1987年>流沙区;背风坡:1981年>1956年>1964年>1987年>流沙区(图 3B)。

在丘间地,流沙区与 1987 年和 1981 年植被区土壤斥水性差异显著($P<0.05$),与 1964 年和 1956 年差异极显著($P<0.01$);各植被区之间土壤斥水性差异不显著($P>0.05$)。在迎风坡,流沙区与植被区之间的差异均达到极显著的水平($P<0.01$);植被区之间的差异均不显著。在丘顶,流沙与 1981 年、1964 年和 1956 年植被区之间差异极显著($P<0.01$),与 1987 年植被区差异不显著($P>0.05$);1987 年与 1981 年、1964 年和 1956 年植被区之间的差异达到了显著水平($P<0.05$)。在背风坡,流沙和各年代植被区的土壤斥水性差异均为极显著($P<0.01$),1987 年植被区和 1956 年植被区之间差异

显著($P<0.05$)。

2.2 粒径对土壤斥水性的影响

不同粒径范围的土壤斥水性随着粒径的增大(0~0.05 mm、0.05~0.1 mm、0.1~0.15 mm 和 0.15~0.25 mm)呈减小趋势,且下层土壤各粒径的土壤斥水性均低于上层(图 4)。各粒径段土壤斥水性之间存在极显著性差异($P<0.01$)。

不同粒径的土壤斥水性见图 5。绝大部分样本不同粒径段土壤的斥水性均随粒径的增大而减小(图 5A 和 B)。0~0.05 mm 粒径段的土壤斥水性明显大于其他粒径段;0.05~0.1 mm 粒径段的土壤斥水与 0.1~0.15 mm 和 0.15~0.25 mm 粒径段相比,32 个样本中前者有 28 个大于后者;0.1~0.15 mm 与 0.15~0.25 mm 粒径段的土壤斥水性相比,32 个样本中前者有 26 个大于后者。

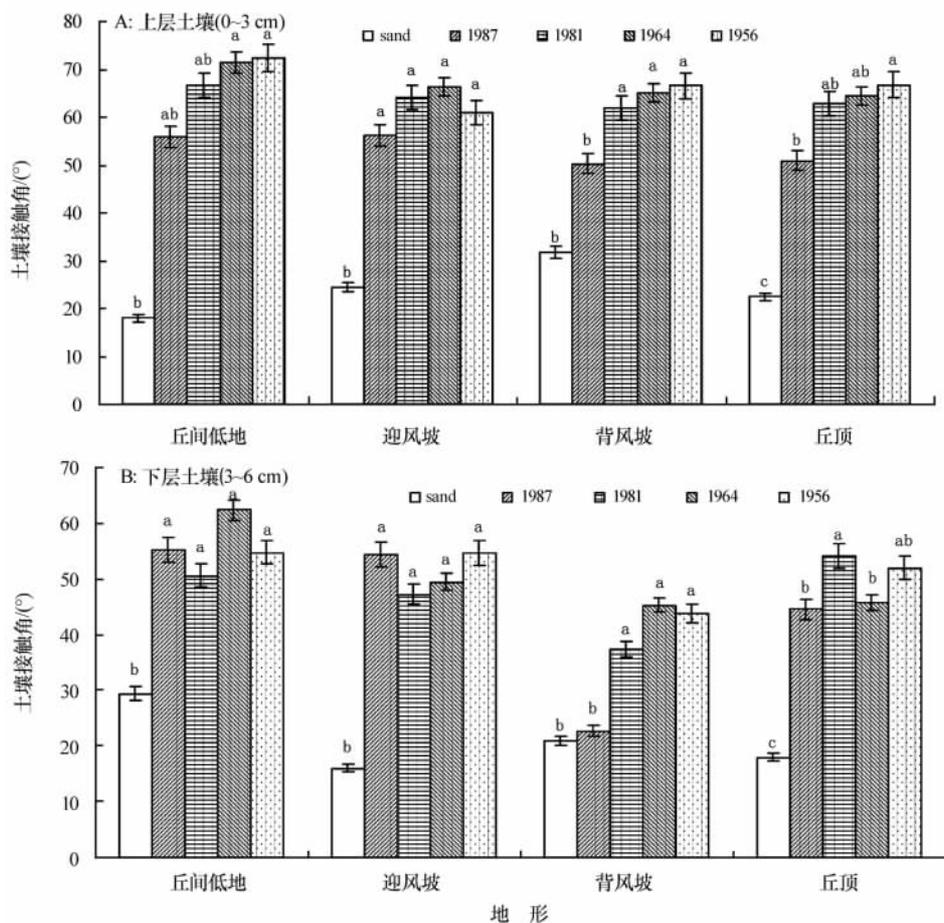


图 3 4 种地形条件下、流动沙丘与不同年代固沙植被区的土壤斥水性 (平均值±标准差)

Fig. 3 The soil water repellency (Mean±SD) at depth of 0~3 cm and 3~6 cm in different positions both of the mobile sand dune and different fixation-duration sand dunes

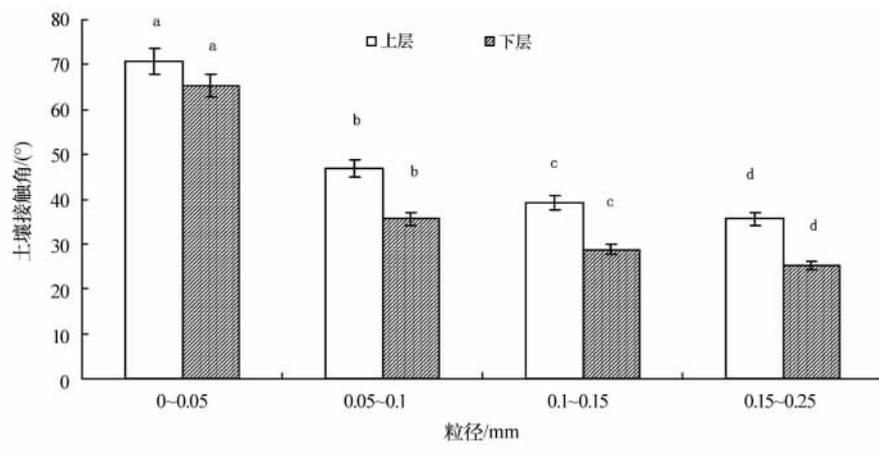


图 4 土壤斥水性 (平均值±标准差)随粒径的变化特征

Fig. 4 The soil water repellency (Mean±SD) changing with particle size

不同年代植被区各粒径之间土壤斥水性的差异性表现各异。1956 年植被区各粒径段之间土壤斥水性差异极显著 ($P < 0.01$)。1964 年植被区除了 0.1~0.15 mm 与 0.15~0.25 mm 两个粒径段之间差异不显著外,其他各粒径段之间土壤斥水性差异

均达到显著水平 ($P < 0.05$)。1981 年植被区 0~0.05 mm 粒径段的土壤斥水性与其它各粒径段均呈极显著水平 ($P < 0.01$); 0.05~0.1 mm 粒径与 0.1~0.15 mm 粒径段差异显著 ($P < 0.05$), 与 0.15~0.25 mm 粒径段差异极显著 ($P < 0.01$);

0.1~0.15 mm 粒径段与 0.15~0.25 mm 差异不显著($P > 0.05$)。1987 年植被区 0~0.05 mm 粒径

段与其他各粒径段之间差异均为极显著($P < 0.01$);其他各粒径之间差异均不显著。

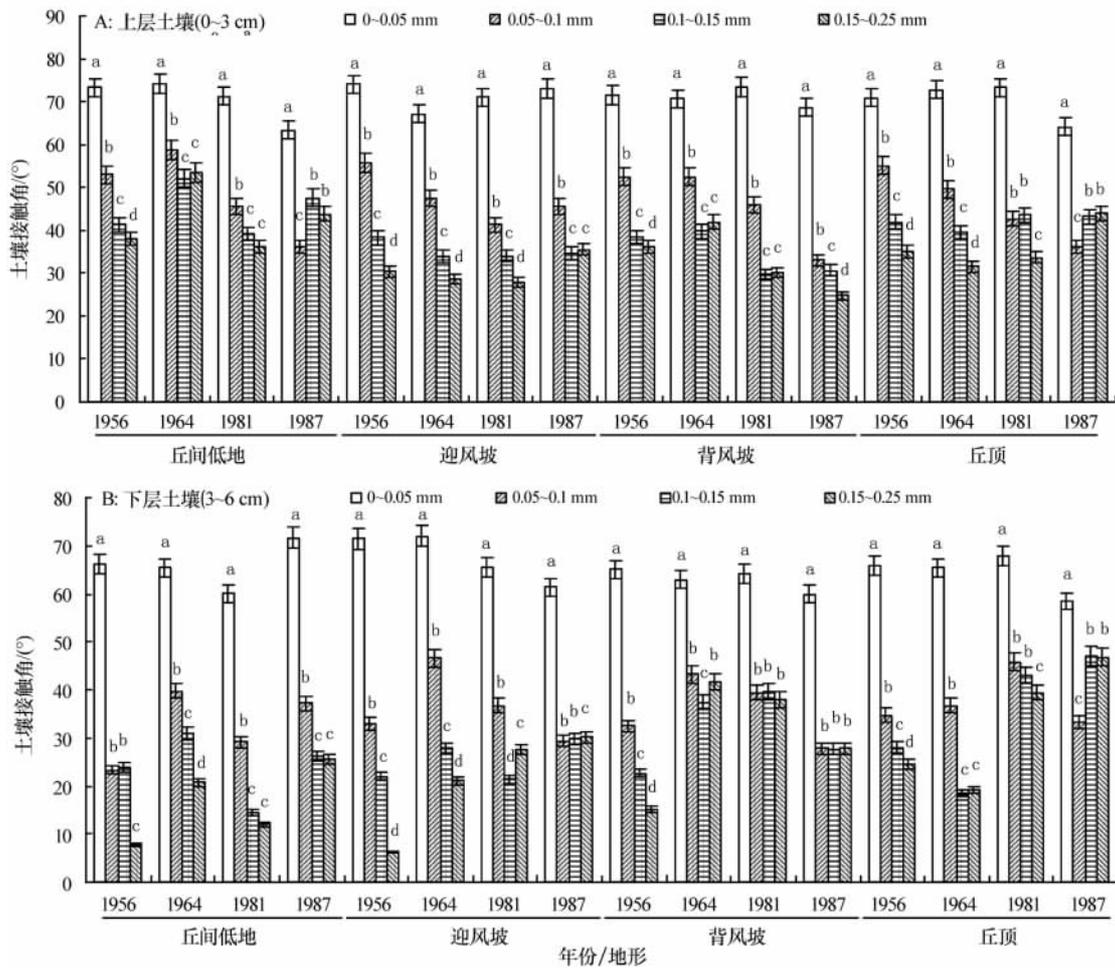


图 5 不同粒径段的土壤斥水性(平均值±标准差)随年代及地形的变化特征

Fig. 5 The soil water repellency (Mean±SD) of different particle sizes changing with dune positions and dune-fixation duration

土壤样本的颗粒组成分布见表 1,土壤斥水性与土壤颗粒组成分布之间的关系见表 2。结果表明,土壤斥水性与 < 0.05 mm、 $0.05 \sim 0.1$ mm 和 $0.1 \sim 0.15$ mm 粒径含量呈极显著正相关线性关系($P < 0.001$),相关系数分别为 0.818、0.911 和 0.676;与 $0.15 \sim 0.25$ mm 和 $0.25 \sim 0.5$ mm 粒径含量呈极显著负相关线性关系($P < 0.001$),相关系数分别为 -0.83 和 -0.68 。

3 讨论

土壤斥水性是重要的土壤物理属性,受土壤有机质、土壤颗粒组成、植被分布、土壤水分特征和土壤微生物等因素的影响^[36-37]。土壤斥水性也是土壤水分运动的关键影响因素之一,可以增强地表径流,导致土壤水分的不均匀分布等。斥水性土壤因

其难被雨水湿润,从而影响种子萌发、幼苗定居、以及植物的生长;同时也使地表干燥而引起风蚀水蚀,造成土地退化,不利于生态系统可持续性维持^[2,38]。

土壤斥水性这一现象主要是土壤有机物质覆盖在土壤颗粒表面而引起,两者之间呈现明显的正相关关系^[16-17,19,36,39-52]。我们的结果表明,土壤斥水性随着植被固沙年龄的延长而增大(图 1)。一方面,腾格里沙漠东南缘流沙区人工植被建立后,形成了相对稳定的生物及物理环境。之后,草本植物逐渐入侵、定居,导致以多年生灌木为主的人工植被逐渐被以草本植物为主的植被所替代,植被盖度逐年增大,植物凋落物也逐渐增加^[23,25,53-54]。同时,人工植被的建立改变了下垫面的粗糙度,有利于沙丘表面获得更多的降尘,为隐花植物的定居提供了有利条件,因而使由地衣、藻类、苔藓等隐花植物组成

表 1 不同年代固沙植被区 0~3 cm 和 3~6 cm 土层土壤颗粒组成分布
Table 1 Soil particle size composition at depth of 0~3 cm and 3~6 cm in different positions both of the mobile sand dune and different fixation-duration sand dunes

建值年代	地形	土壤颗粒组成分布/%									
		0~3 cm 土层					3~6 cm 土层				
		<0.05	0.05~0.1	0.1~0.15	0.15~0.25	0.25~0.5	<0.05	0.05~0.1	0.1~0.15	0.15~0.25	0.25~0.5
1956	迎风坡	17.94	18.14	21.36	34.69	7.87	9.13	11.64	20.08	48.19	10.96
	丘间地	21.16	21.18	20.55	27.22	8.89	10.05	12.36	17.98	46.25	13.36
	丘顶	17.19	19.21	21.96	37.05	4.59	7.37	10.72	18.93	50.54	12.44
	背风坡	15.98	16.89	22.02	37.11	8.0	6.02	8.83	19.5	53.69	11.96
1964	迎风坡	19.5	21.69	24.97	31.27	2.57	5.66	9.92	19.58	51.75	13.09
	丘间地	30.1	27.63	20.28	16.98	5.01	11.91	17.5	20.74	38.09	11.76
	丘顶	17.92	19.57	23.75	35.86	2.9	3.84	7.97	19.93	56.42	11.84
	背风坡	20.24	21.31	21.72	28.35	8.38	4.45	8.53	16.01	54.39	16.62
1981	迎风坡	17.35	21.1	27.7	31.49	2.36	4.03	9.58	21.63	52.46	12.3
	丘间地	19.87	20.88	25.89	30.76	2.6	6.52	13.73	23.59	44.28	11.88
	丘顶	12.95	16.94	24.85	39.77	5.49	—	—	—	—	—
	背风坡	10.08	15.28	23.46	42.39	8.79	2.07	6.26	18.43	58.96	14.31
1987	迎风坡	11.52	17.49	28.5	37.63	4.86	2.15	7.82	19.95	54.56	15.52
	丘间地	11.44	18.4	32.61	35.43	2.12	4.25	12.53	26.11	46.43	10.68
	丘顶	6.9	13.38	26.59	47.12	6.01	1.31	6.66	19.49	57.52	15.02
	背风坡	8.14	16.0	29.75	41.42	4.69	2.74	10.28	26.62	51.02	9.34
流沙	迎风坡	0.23	0.84	9.0	63.86	26.07	0.2	1.71	15.13	67.63	15.43
	丘间地	0.42	2.6	11.91	46.37	38.72	0.38	1.99	7.6	42.99	45.12
	丘顶	0.11	0.33	7.78	69.03	22.75	0.09	0.95	12.72	72.16	14.08
	背风坡	0.38	1.27	12.33	69.02	17.01	0.27	1.61	17.02	69.09	12.01

表 2 土壤斥水性与土壤粒径之间的关系

Table 2 The relationship between soil water repellency and soil particle size

土壤颗粒组成分布/%	拟合回归方程	决定系数 R^2	相关系数 r	显著水平
<0.05	$y=0.561x-20.699$	$R^2=0.6697$	0.818	0.000
0.05~0.1	$y=0.396x-9.2154$	$R^2=0.8300$	0.911	0.000
0.1~0.15	$y=0.2348x+8.8374$	$R^2=0.4573$	0.676	0.000
0.15~0.25	$y=-0.6543x+79.042$	$R^2=0.6891$	-0.830	0.000
0.25~0.5	$y=-0.3642x+30.057$	$R^2=0.4622$	-0.680	0.000

的生物土壤结皮大量拓殖^[55], 草本植物和隐花植物凋落物分解形成的有机物也不断进入土壤, 使有机质不断固存^[56]。另一方面, 人工植被的建立为昆虫及土壤动物活动创造了良好的条件, 如蚂蚁、沙蜥等在腾格里沙漠沙坡头人工植被区普遍存在, 其排泄物等也增加了人工植被区表层土壤的有机物质含量。这些生物和非生物过程使沙坡头人工植被区土壤有机质随着固沙年限的延长而不断增加, 表层土

壤理化性质不断得到改善, 表层土壤厚度不断增大^[26,30], 从而增强了土壤的斥水性。此外, 生物土壤结皮中含有大量的微生物, 它们的次生代谢产物也是人工植被区土壤斥水性增加的重要因素。

流沙区 0~3 cm 土层与 3~6 cm 土层的土壤斥水性无显著性差异 ($P>0.05$); 而人工植被区 0~3 cm 土层的斥水性显著大于 3~6 cm 土层的斥水性 ($P<0.05$)。这主要是因为沙坡头地区的人工植被

最初建立于流动沙丘上,因而人工植被的建植对土壤性质的影响更多是在浅表层土壤,表层土壤的有机质及黏粉粒含量随着土层深度呈下降趋势,且 0~3 cm 远大于 3~6 cm^[26],进而影响了两个土层的土壤斥水性。笔者认为,不同土层之间斥水性的差异可能随着人工植被建植时间的延长而逐渐减小,并最终趋于一致。

我们的结果显示,土壤斥水性随着粒径的增大而不断减小(图 4 和图 5),支持了 Bachmann 等^[57]和 Juan 等^[35]的研究结果。此外,不同年龄植被固沙区土壤斥水性与不同粒径段土壤之间的相关关系表现为,0~0.05 mm(%),0.05~0.1 mm(%) 和 0.1~0.15 mm(%) 这 3 个粒径段的土壤颗粒能显著的增加土壤斥水性,0.15~0.25 mm(%) 和 0.25~0.5 mm(%) 这两个粒径段的土壤颗粒的增加并不会增加土壤斥水性。土壤斥水性的增加可能是粒径依赖的可湿性、毛细管现象以及有机物质含量随着土壤颗粒的减小而增加^[58]等综合作用的结果。

由于土壤斥水性可以通过影响地表和地下水文过程来调控水分和植被的分布,故对受其影响的入渗、蒸发、径流和优先流以及土壤侵蚀等过程的进一步研究有助于解释干旱植被区的水文、生态以及水分平衡过程,为更好的利用干旱区水分和改善干旱区生态环境提供理论和方法的支持。

4 结论

腾格里沙漠东南缘沙坡头人工固沙植被建立 50 余年后,人工植被系统逐渐向自然系统演变,表层土壤理化性质不断改变,质地逐渐细粒化,有机质含量逐渐增加。与此同时,植被区的土壤斥水性显著大于流沙区;且随着植被建立的时间久远呈增加趋势;植被区固定丘间低地和迎风坡的土壤斥水性大于丘顶和背风坡,且 0~3 cm 土层的土壤斥水性显著大于 3~6 cm 土层。随着土壤颗粒的增大,土壤斥水性不断减小。土壤斥水性与小于 0.15 mm 的土壤颗粒含量呈显著正相关关系,而与 0.15~0.5 mm 的土壤颗粒含量呈现了极显著负相关关系。生物土壤结皮的不断拓殖和发展以及固定沙地有机物质的不断输入是出现土壤斥水性的重要原因。

参考文献(References):

[1] Carter D J, Hetherington R E. Claying of water repellent sands in the Albany district of the south coast of Western Australia[C]//Carter D J, Howes K M W. Proceedings of the

Second Natural Water Repellency Workshop. Perth, Western Australia, 1994:140-144.

- [2] 杨邦杰. 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.
- [3] Carillo M L K, Letey J, Yates S R. Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 63(3): 433-436.
- [4] Bachmann J, Horton R, Van Der Ploeg R R, et al. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 564-567.
- [5] Van Dam J C, Hendrickx J M H, Van Ommen H C, et al. Water and solute movement in a coarse-textured water repellent field soil[J]. Journal of Hydrology, 1990, 120: 359-379.
- [6] Hendrickx J M H, Dekker L W, Boersma O H. Unstable wetting fronts in water repellent field soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22: 109-118.
- [7] Ritsema C, Dekker L W, Hendrickx J M H, et al. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil[J]. Water Resources Research, 1993, 29: 2183-2193.
- [8] Witter J V, Jungerius P D, Ten Harkel M J. Modelling water erosion and the impact of water repellency[J]. Catena, 1991, 18: 115-124.
- [9] Terry J P, Shakesby R A. Soil hydrophobicity effects on rain-splash: Simulated rainfall and photographic evidence [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1993, 18: 519-525.
- [10] Jungerius P D, Ten Harkel M J. The effect of rainfall intensity on surface runoff and sediment yield in the grey dunes along the Dutch coast under conditions of limited rainfall acceptance[J]. Catena, 1994, 23: 269-279.
- [11] Doerr S H, Thomas A D. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231-232: 134-147.
- [12] Biemelt D, Schreiter M, Tahl S, et al. Nutzung von Standortuntersuchungen zur verbesserten Quantifizierung des regionalen Wasserhaushalts der Lausitz [C]//Hüttl R F, Weber E, Klem D. Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier, 2000: 126-141.
- [13] House M G. Select Committee Enquiry into Land Conservation[M]. Perth, Western Australia; Legislative Assembly, 1991.
- [14] York C A. A questionnaire survey of dry patch on golf courses in the United Kingdom[J]. Journal of Sports Turf Research, 1993, 69: 20-26.
- [15] Dekker L W, Jungerius P D. Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands[J]. Catena, 1990, 18(Supplement): 173-183.
- [16] McGhie D A, Posner A M. Water repellence of a heavy-textured Western Australian surface soil[J]. Australian Journal of Soil Research, 1980, 18: 309-323.
- [17] Chan K Y. Development of seasonal water repellency under

- direct drilling[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 326—329.
- [18] Dekker L W, Ritsema C J. Preferential flow paths in a water repellent clay soil with grass covers[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32: 1239—1249.
- [19] DeBano L F. Water repellent soils: A state-of-the-art[R]. USDA Forest Service General Technical Report PS W-46, Berkeley, CA, 1981.
- [20] Jaramillo D F, Dekker L W, Ritsema C J, et al. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231—232: 105—111.
- [21] Wessel A T. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13: 555—561.
- [22] Dekker L W, Ritsema C J. How water moves in a water-repellent sandy soil: 1. Potential and actual water-repellency[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30: 2507—2517.
- [23] Li X R, Ma F Y, Xiao H L. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 1—16.
- [24] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 81—86.
- [25] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 605—611.
- [26] 李新荣, 张志山, 王新平, 等. 干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 845—852.
- [27] 肖洪浪, 李新荣. 沙坡头站雨养人工生物防护体系水平衡研究五十年[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 166—172.
- [28] 李守中, 肖洪浪, 罗芳, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 228—233.
- [29] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 217—222.
- [30] 刘立超, 李守中, 宋耀选, 等. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的实验研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 191—195.
- [31] 王新平, 康尔泗, 张景光, 等. 草原化荒漠带人工固沙植被区土壤水分动态[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 216—222.
- [32] 李新荣, 陈应武, 贾荣亮, 等. 生物土壤结皮: 荒漠昆虫食物链的重要构建者[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 245—248.
- [33] 李小军, 谭会娟, 张志山, 等. 油蒿不同部位水分关系研究[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 448—454.
- [34] Siebold A, Walliser A, Nardin M, et al. Capillary rise for the thermodynamic characterization of solid particle surface[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997, 186: 60—70.
- [35] Juan C, Susanne K, Bachmann J, et al. Comparing capillary rise contact angle of soil aggregates and homogenized soil[J]. *Geoderma*, 2008, 146: 336—343.
- [36] 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: 33—65.
- [37] DeBano L F. Water repellency in soils: A historical overview[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231—232: 4—32.
- [38] 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.
- [39] Bisdom E B A, Dekker L W, Schoute J F. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure[J]. *Geoderma*, 1993, 56: 105—118.
- [40] Franco C M, Tate M E, Oades J M. Studies on non-wetting sands: I. The role of intrinsic particulate organic matter in the development of water repellency in non-wetting sands[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, 33: 253—263.
- [41] Bond R D. The influence of the microflora on the physical properties of soils: II. Field studies on water repellent soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1964, 2: 123—131.
- [42] DeBano L F, Letey J. Proceedings of the Symposium on Water Repellent Soils[C]//University of California, 1969: 354.
- [43] Ma'shum M, Farmer V C. Origin and assessment of water repellency of a sandy Australian soil[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1985, 23: 623—626.
- [44] Neinhuis C, Barthlott W. Characterisation and distribution of water repellent, self-cleaning plant surfaces[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79: 667—677.
- [45] Roberts F J, Carbon B A. Water repellence in sandy soils of south-western Australia: 1. Some studies related to field occurrence. Division of Plant Industry CSIRO Australia[J]. *Field Station Record*, 1971, 10: 13—20.
- [46] Chen Y, Schnitzer M. The surface tension of aqueous solutions of soil humic substances[J]. *Soil Science*, 1978, 125: 7—15.
- [47] Ma'shum M, Tate M E, Jones G P, et al. Extraction and characterisation of water-repellent material from Australian soils[J]. *Soil Science*, 1988, 39: 99—110.
- [48] Hudson R A, Traina S J, Shane W. Organic matter comparison of wettable and non-wettable soils from bentgrass-sand greens[J]. *Journal of the Soil Science Society of America*, 1994, 58: 361—367.
- [49] Franco C M, Clarke P J, Tate M E, et al. Studies on non-wetting sands: II. Hydrophobic properties and chemical characterisation of natural water-repellent materials[J]. *Journal of Hydrology*, 2000.
- [50] Wallis M G, Horne D J, McAuliffe K W. A study of water repellency and its amelioration in a yellow brown sand: 1. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion[J]. *New Zealand Journal of Agriculture Research*, 1990, 33: 139—144.
- [51] Berglund K, Persson L. Water repellence of cultivated organic soils[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1996, 46: 145—152.
- [52] McKissock I, Gilkes R J, Harper R J, et al. Relationships of water repellency to soil properties for different spatial scales

- of study[J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36: 495—507.
- [53] 王新平, 李新荣, 肖洪浪, 等. 干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变特征[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1974—1980.
- [54] Li X R, Tan H J, He M Z, et al. Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: Prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(5): 669—680.
- [55] Li X R, Zhang J G, Wang X P, et al. Study on soil microbiotic crust and its influences on sandfixing vegetation in arid desert region[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(9): 965—970.
- [56] Fearnough W, Fullen M A, Mitchell D J, et al. Aeolian deposition and its effect on soil and vegetation changes on stabilised desert dunes in northern China[J]. Geomorphology, 1998, 23: 171—182.
- [57] Bachmann J, Horton R, Van Der Ploeg R, et al. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 564—567.
- [58] 贾晓红, 李新荣, 陈应武, 等. 植被恢复对旱区表土颗粒中有机碳和氮分布的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 560—564.

Characteristics of Soil Water Repellency in Stabilized Sand Dunes in the Tengger Desert

YANG Hao-tian, LIU Li-chao, GAO Yan-hong, LI Xiao-jun, JIA Rong-liang, HUANG Lei
(Shapotou Desert Experiment and Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Soil water repellency (SWR) is one of the important physical properties of soils, which has significant effects on soil hydrological process and geomorphological process. In this study, the Capillary Rise Method was used to measure the SWR in the afforestation area in the Shapotou region, southeast of the Tengger Desert, China. Variations of soil water repellency in different micro landforms, different soil depths and different particle sizes were analyzed. Results indicate that the soil SWR is markedly changed by vegetation restoration, and it increases with the dune stabilization duration. In the same vegetation area, the SWR in inter-dune depression and windward slope is greater than that in crest and leeward slope, but no significant difference is found. The SWR of 0~3 cm topsoil is significantly greater than that in the soil layer of 3~6 cm. The soil SWR decreases with the increase of grain size, and the differences of SWR between different sieved soil fractions are found to be significant. There are significantly positive correlations between the SWR and the content of soil grain size at 0~0.05 mm, 0.05~0.01 mm and 0.01~0.15 mm, and a significantly negative correlation between the SWR and the content of soil grain size exceeding 0.15 mm. The increase of SWR at afforestation areas may depend on atmospheric dust on the stabilized dune surface and the formation of biological soil crusts, especially the formation of algal crust and lichen crust. Enhanced SWR will affect the effective water use of plants in the sand dunes.

Keywords: soil water repellency; soil contact angle; capillary rise method; vegetation restoration; the Tengger Desert