

次生盐渍土垂向剖面斥水性及其与理化性质关系*

任鑫¹ 李毅¹ 李敏¹ 郭丽俊¹ 丰满²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083)

【摘要】 为探求土壤剖面斥水性的变化规律及其与土壤水盐含量、pH 值的关系, 在新疆新垦膜下滴灌棉田以 10 cm × 10 cm 和 5 cm × 5 cm 的网格等间距采集两个土壤剖面样品, 对剖面土壤的斥水性、含水率、含盐量和 pH 值进行了经典统计、地学统计和相关性分析。结果表明: 次生盐渍土剖面斥水性呈中等程度变异, 空间自相关性中等偏弱; 土壤斥水性在 40 cm 深度附近时最强, 在大于 80 cm 深度的土层斥水特征不明显; 在 0 ~ 40 cm 深度土层, 含水率与土壤斥水性正相关, 在 40 ~ 80 cm 深度与斥水性负相关; 含盐量除在 0 ~ 10 cm 的表层与斥水性正相关外, 在其余土层均为负相关; pH 值与斥水性之间多为正相关。

关键词: 次生盐渍土 斥水性 垂向剖面 土壤理化性质 相关性分析
中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0058-07

Relationship between Soil Water Repellency and Soil Physical-chemical Properties for Vertical Profiles in Secondary Saline Field

Ren Xin¹ Li Yi¹ Li Min¹ Guo Lijun¹ Feng Man²

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to seek the variations of soil water repellency and its relationship with soil moisture content, soil salt content and pH value, soils samples were collected in two profiles at two grids (intervals were 10 cm × 10 cm and 5 cm × 5 cm, respectively) in a newly cultivated cotton field mulched with plastic film and irrigated with trickle method in Xinjiang. The soil water repellency, soil moisture content, soil salt content and pH value of the profiles were tested and analyzed using the methods of classical statistics, geostatistics and correlation analysis. The results showed that the soil water repellency had moderate variability and the spatial auto-correlation was under the level of the middle class in secondary saline field profiles. The strongest soil water repellency appeared around the depth of 40 cm and the characteristics of soil water repellency were not obvious when the depth was deeper than 80 cm. The soil moisture content and the soil water repellency appeared to be positively related at 0 ~ 40 cm depth and negatively related at 40 ~ 80 cm depth. Soil salt content and soil water repellency appeared to be positively related to the surface soil layer at 0 ~ 10 cm depth but negatively related to the other depth. The pH value and the soil water repellency mostly were generally positively related.

Key words Secondary saline field, Soil water repellency, Vertical profiles, Soil physio-chemical properties, Correlation analysis

收稿日期: 2010-04-12 修回日期: 2010-07-08
* 国家自然科学基金资助项目(50709028)和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: 任鑫, 硕士生, 主要从事农业水土资源研究, E-mail: renxin1986@126.com
通讯作者: 李毅, 副教授, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: liyikitty@126.com

引言

土壤斥水性是指水分不能或很难浸润土壤颗粒表面的物理现象,具有斥水性的土壤称为斥水土壤^[1]。斥水性影响作物出苗和生长,尤其在干旱地区,对农业生产十分不利。此外,斥水土壤表面由于干燥易形成风蚀,一旦下雨,雨水难以入渗便容易形成水蚀,造成水土流失,土地退化。土壤斥水性问题是农业生产及环境保护中一个不容忽视的问题。

土壤的斥水性所引起的作物减产和环境问题在国外早已引起高度重视^[2~5]。国内除杨邦杰^[1,6]基于澳大利亚斥水土壤的水热耦合特征进行了相关研究外,仅吴延磊^[7]等通过测定内蒙古锡林浩特羊草草原土壤的斥水性比较了两种常用斥水性测定方法的相关性,到目前为止,国内关于土壤斥水性的研究报道很少。

次生盐渍土在我国尤其是西北地区分布广泛,我国有各类盐渍土地约 8 180 万 hm^2 ,干旱半干旱的西北地区是盐渍土主要分布地带,成为近期治理的重点^[8]。在盐碱地区种植作物,土壤的含水率、含盐量及 pH 值是影响作物生长的重要因素,若该类土同时具有斥水性,则有很大可能会加剧农业减产。本文通过对盐渍土剖面土壤斥水性和土壤水盐、pH 值的空间分布及其相关性进行分析,为我国土壤的斥水规律研究以及盐碱区土壤改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

本文所用土样取自新疆维吾尔自治区玛纳斯县北五岔镇盐碱地改良试点工程示范区的棉花地。土壤的 pH 值 8.55,属典型盐碱地,现灌溉方式为膜下滴灌,灌溉水来自 80 m 深的地下水,矿化度小于 2.0 g/L ,水化学类型以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主^[9]。在距地边 3 m 的农田内,沿滴灌带选取了两个垂向剖面,其中剖面 I 取样深度为 0 ~ 140 cm,取样间隔为 10 cm,水平方向每层取 13 个土样,形成 13 × 14 等间距网格,共 182 个土样;剖面 II 样品取样深度为 0 ~ 80 cm,取样间隔为 5 cm,水平方向每层取 25 个土样,形成 25 × 16 等间距网格,共 400 个土样。采集的土样用铝盒和塑料袋分装。采样时间为 2007 年 8 月 24 ~ 29 日,此时处于棉花吐絮期,已累计灌水 12 次,取样之前无降水。两剖面取样网格示意图如图 1 所示。

1.2 样品处理及测定方法

1.2.1 土壤斥水性

将土样风干、研磨、过筛(2 mm 孔径)后,用干

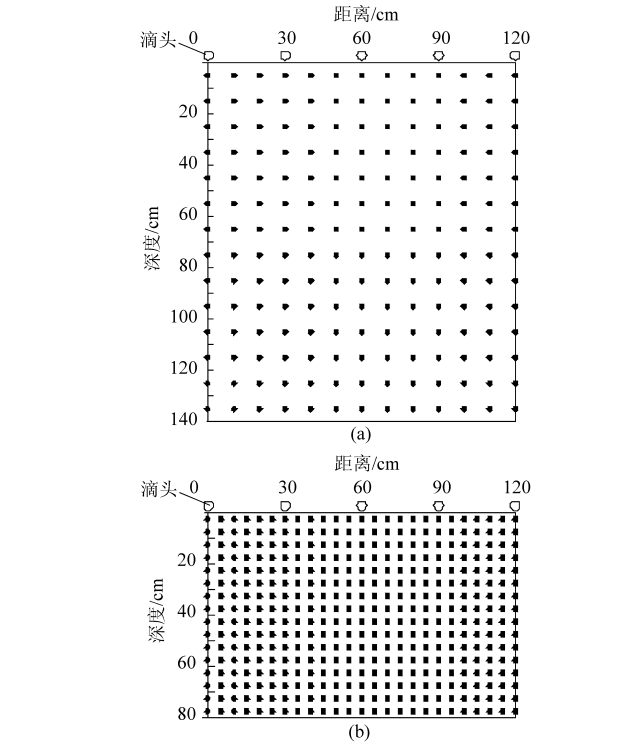


图 1 两垂向剖面土壤取样网格示意图
Fig.1 Sketch graph of soil sampling grid along the vertical profiles
(a) 剖面 I (b) 剖面 II

净的铝盒盖分别取两个剖面各采样点约 30 g 土样并整平其表面,用滴水穿透时间法测定风干土的斥水性。

滴水穿透时间法的主要测定过程为:用一个标准的胶头滴管将 6 滴蒸馏水(每滴约 0.05 mL)滴到土样表面,记录从水滴接触土壤表面到完全入渗所需要的时间。将 6 滴水的入渗时间去掉最大值和最小值后求出算术平均值作为每个样本的最终测定结果。前人的研究中一般以 5 s 作为斥水与不斥水的分界线^[7,10~11],根据 Dekker 和 Jungerius 提出的斥水强度分类标准,将土壤斥水性按斥水持续时间(滴水穿透时间)分为 5 个等级: < 5 s,无斥水性;5 ~ 60 s,轻微斥水性;60 ~ 600 s,强烈斥水性;600 ~ 3 600 s,严重斥水性; > 3 600 s,极度斥水性。

1.2.2 土壤水盐及 pH 值

土壤含水率用干燥法测定,将新鲜土样置于 105℃ 干燥箱中干燥至质量恒定后,计算含水率。

含盐量用电导法测定,将封装取回的土样自然风干,研磨后过 2 mm 筛后,称取土样 20 g,加蒸馏水 100 mL,中速振荡 30 min,过滤后得到水土比(蒸馏水与风干土的质量比)为 5:1 的土壤浸提液,利用 DDB-303A 型电导率仪测定土壤电导率。选取电导率值差别较大的 20 个土样,吸取一定量的浸提液

放在蒸发皿中于水浴上蒸干,用 H_2O_2 氧化有机质,干燥称质量后得含盐量 W 在 $0\sim 20\text{ g/kg}$ 之间时,与电导率 $E_c(\mu\text{S/cm})$ 关系为 $W=0.003E_c-1.1028$,决定系数达 0.9944 。用该关系可进一步换算得出其余土样土壤易溶盐含量。 $\text{Na}^+、\text{Mg}^{2+}、\text{Ca}^{2+}$ 离子含量用日立 $180-80$ 型原子吸收仪测定。

土壤 pH 值用电位法测定,将风干研磨后的土过 2 mm 筛,配置成水土比为 $2.5:1$ 的悬浊液,中速振荡 30 min ,静置 1 h ,采用 Phs-3C 型 pH 计测定其 pH 值,误差为 $\pm 0.01\text{ pH}$ 。

1.3 基本理论

采用经典统计学方法和地统计学方法对土壤属性进行分析。

半方差函数是地统计学方法的关键函数^[12],计算公式为

$$\gamma(\boldsymbol{h})=\frac{1}{2N(\boldsymbol{h})}\sum_{i=1}^{N(\boldsymbol{h})}[Z(x_i)-Z(x_i+\boldsymbol{h})]^2\quad (1)$$

式中 $\gamma(\boldsymbol{h})$ ——半方差

$\boldsymbol{h}$ ——样本的位置间距矢量

$N(\boldsymbol{h})$ ——间距为 $\boldsymbol{h}$ 时的样本对数

$Z(x_i)$ ——采样点观测值

应用半方差函数可对参数的空间分布进行变异

分析和结构分析,并能应用结构分析结果和 Kriging 法进行插值。半方差函数一般有 3 个重要参数:块金值、基台值和变程。块金值由测量误差和最小取样间距内土壤性质的变异性引起,用 C_0 表示;块金值表示随机部分的空间变异性^[13~14]。基台值是半方差函数随间距增到一定程度后出现的平稳值,用 C_0+C 表示, C 为拱高;基台值表示区域化变量的最大变异,基台值越高总的空间变异性程度越高^[13,15]。变程是半方差到达基台值时的样本间距,表示观测点之间的影响范围;当观测点之间的距离大于该值时它们之间是相互独立的,小于该值时则存在一定的相关关系^[16]。

用 SPSS 11.5 软件对数据进行描述性统计及相关性分析,用 GEO-EAS 1.2.1 软件进行半方差模型拟合,分析剖面的空间变异性,用 Surfer 8.0 软件进行 Kriging 插值并绘制等值线图。

2 结果与讨论

2.1 土壤属性的经典统计分析

为探讨所研究垂向剖面土壤属性的分布特征,采用经典统计学方法得出其相关统计参数,结果如表 1 所示。

表 1 土壤垂向剖面属性的经典统计参数
Tab.1 Classical statistic parameters of soil properties in the vertical profiles

参数	剖面	数值									
		样本数	平均值	最小值	最大值	极差	标准差	方差	峰度	偏度	变异系数/%
斥水持续时间/s	I	182	5.40	0.24	20.79	20.54	2.82	7.94	5.30	1.64	52.12
	II	400	6.53	0.54	23.69	23.16	2.92	8.51	2.94	0.85	44.69
含水率/%	I	182	23.13	11.27	34.31	23.04	4.83	23.34	-0.37	0.31	20.89
	II	400	22.53	8.83	50.34	41.51	4.48	20.03	4.08	0.41	19.87
含盐量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	I	182	14.05	4.24	19.65	15.41	3.18	10.09	0.77	-1.05	22.61
	II	400	5.86	0.01	10.77	10.75	2.55	6.48	-1.17	-0.17	43.42
pH 值	I	182	8.62	8.24	8.86	0.62	0.10	0.01	2.09	-1.08	1.17
	II	400	8.56	8.18	9.01	0.83	0.19	0.04	-0.93	-0.32	2.18
离子含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Na^+ I	182	8.27	2.13	32.90	30.77	5.83	33.99	4.19	2.19	70.47
	Mg^{2+} I	182	0.79	0.23	2.26	2.03	0.32	0.10	5.72	1.96	40.60
	Ca^{2+} I	182	1.52	0.56	5.03	4.47	0.94	0.89	2.92	1.97	62.00

由表 1 可以看出,斥水性:①两剖面的土壤斥水持续时间平均值均大于 5 s ,说明次生盐渍土剖面具有微弱的斥水性;剖面 I 斥水持续时间的最大值、最小值和平均值均小于剖面 II,说明剖面 I 的斥水性整体上弱于剖面 II。②极差和方差的最大值均出现在剖面 II,表明取样距离减小斥水性的离散程度反而增强;峰度和偏度值均大于零,说明数据在分布规

律上比正态分布有更粗的尾部,且分布是右偏的;剖面 II 的峰度和偏度均比剖面 I 更接近零,表明样本数越多越接近正态分布。③从变异程度来看,滴水穿透时间法测定的两剖面上土壤斥水持续时间的变异系数分别是 52.12% 和 44.69% ,均属于中等程度变异,剖面 I 的变异程度略大于剖面 II。含水率:①两个剖面上含水率的均值都在 23% 左右,最大值

和最小值均出现在剖面Ⅱ,最大值为 50.34%,达到超饱和状态,而最小值仅为 8.83%,土壤水分分布不均匀。②剖面Ⅱ的标准差小剖面Ⅰ,说明含水率的离散程度在取样间距小的剖面上较小。③两剖面上含水率的变异系数分别为 19.87% 和 20.98%,属于中等偏弱变异性。含盐量:①两剖面的含盐量相差较大,剖面Ⅰ含盐量的最小值和最大值均高于剖面Ⅱ,其平均值高达 14.05 g/kg,盐渍化程度非常严重,属于极重盐土;剖面Ⅱ含盐量平均值为 5.86 g/kg,属于重盐土。②含盐量的变异系数分别为 22.61% 和 43.42%,属中等程度变异,剖面Ⅱ的变异程度大于剖面Ⅰ。pH 值:①两剖面 pH 值非常接近,最大值均已大于 8.7,表明该地块有碱化的趋势^[13]。②pH 的最大值和最小值均出现在剖面Ⅱ,分别为 9.01 和 8.18,剖面Ⅱ的极差和标准差要大于剖面Ⅰ,峰度和偏度更接近于零,变异系数也比剖面Ⅰ大,这很可能是受样本数的影响。③两剖面上 pH 值的变异系数都很小,仅为 1.17% 和 2.18%,表

明剖面上的 pH 值相对稳定。离子含量:①对剖面Ⅰ的上的阳离子含量进行分析,无论是平均值还是极大极小值,其含量从大到小依次为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,钠盐含量的存在及其在土体内的移动极易造成土壤碱化,需要引起高度重视。②从离散程度上看, Na^+ 含量的极差和方差远高于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,表明其离散程度较高。③3 种离子均为中等程度变异,其中 Na^+ 的变异程度最高,属于中等偏强变异性, Ca^{2+} 变异程度次之, Mg^{2+} 最弱。

2.2 土壤属性的半方差分析

由于参数统计方法要求数据符合正态分布,用 Kolmogorov – Smirnov 法对剖面斥水性、含水率、含盐量和 pH 值的原始数据进行正态检验,对不符合正态分布的原始数据作 Box-Cox 变换^[17],使似然函数达到最大值即为最佳正态分布变换,最佳变换参数 λ 通过 Minitab. v15. 1.30 软件求得。用半方差函数对两剖面上土壤特征进行拟合,选择的最优半方差函数理论模型及参数如表 2 所示。

表 2 土壤垂向剖面属性半方差函数理论模型及参数

参数		剖面	数值					
			K – S 检验	变换参数 λ	理论模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C)$
斥水持续时间/s		I	正态		球形	2.900	5.600	0.518
		II	正态		球形	45	64	0.703
含水率/%		I	正态		球形	7	15	0.467
		II	非正态	5.00	球形	0.300	1.350	0.222
含盐量/g·kg ⁻¹		I	非正态	0.60	指数	20	630	0.032
		II	非正态	0.97	球形	0.650	2.100	0.310
pH 值		I	非正态	0.58	球形	55 000	215 000	0.256
		II	非正态	0.60	球形	0.001	0.006	0.167
离子含量/μg·g ⁻¹	Na ⁺	I	非正态	-0.37	球形	0.030	0.045	0.667
	Mg ²⁺	I	非正态	-0.01	球形	0.065	0.070	0.929
	Ca ²⁺	I	非正态	-0.73	球形	0.041	0.072	0.569

由表 2 可见,除剖面Ⅰ含盐量的半方差函数采用指数模型外,其他的最优理论模型均可用球形模型来描述,且土壤剖面各物理参数均存在块金效应。块金值与基台值之比 $C_0 / (C_0 + C)$ 可说明系统变量空间相关程度,如果比值小于 0.25,则说明系统具有强烈的空间相关性;如果比值在 0.25 ~ 0.75 之间,则说明系统变量具有中等的空间相关性;大于 0.75 则说明系统空间相关性很弱^[17-18]。各参数的空间相关性:①两剖面用滴头穿透时间法测得的斥水持续时间的 $C_0 / (C_0 + C)$ 值分别为 0.518 和 0.703,表明斥水性在两剖面上的空间相关程度均为中等偏弱,其变异受随机性因素影响较大,这除与土

壤自身的性质相关外,还受到取样间距的影响。②剖面Ⅰ上含水率的块金值与基台值之比为 0.467,空间相关性中等偏强,剖面Ⅱ的的含水率则表现出强烈的空间相关性,其变异主要由结构性因素引起。③两剖面上含盐量和 pH 值的 $C_0 / (C_0 + C)$ 都较小,空间相关性强,随机变异占总变异的比例较小,其中剖面Ⅰ含盐量的 $C_0 / (C_0 + C)$ 仅为 0.032,空间相关性非常强烈。④剖面Ⅰ上各离子含量的空间相关程度从大到小依次为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} ,其中 Mg^{2+} 的 $C_0 / (C_0 + C)$ 值为 0.929,空间相关程度很弱, Ca^{2+} 和 Na^+ 空间相关程度中等偏弱。两剖面上半方差函数变程值剖面Ⅰ均大于剖面Ⅱ,

即变程随采样间距的增大而增大,且变程值均大于本文所采样的间距(5 cm,10 cm),表明取样的间距在可接受范围内,符合研究的需要。

为了更直观地显示土壤属性由点到面的分布特征,用 Surfer 8.0 软件进行 Kriging 插值,得出两剖面上土壤斥水性、含水率、含盐量及 pH 值的等值线图,如图 2 所示。

由图 2 可看出,斥水性:两剖面土壤斥水持续时间均呈不规则的指纹状分布。0~10 cm 表层土壤的斥水特征不明显,这可能与耕作有关,表层土壤受土地耕种翻动的影响,原有的斥水性被减弱;在 10~50 cm、60~80 cm 深度为等值线分布的密集区,土壤的斥水持续时间在这两个深度范围内较长;在 50~60 cm 深度等值线分布比较稀薄且斥水强度很小,存在一个不斥水区域。剖面 I 中,80 cm 深度以下土壤已基本不斥水,斥水持续时间在 5 s 以内,说明深层土壤已不具有斥水性。含水率:含水率的分布规律性不强,没有明显的分层,在滴头下方的土壤含水率并不明显高于其他位置,说明滴头布置的间距合理;由于灌后下渗和表土蒸发的影响,80 cm 深度以下土层含水率较大,表层土壤含水率较小;通过对土壤质地的详细分析^[19]发现,土壤质地在一定程度上影响了土壤水分的瞬间分布,在 0~30 cm 土层表现最为明显,砂粒含量越大,含水率越低;此外,土壤的斥水性也可影响土壤水分的分布^[20-25]。含盐量和 pH 值:含盐量和 pH 值的分布具有一定的分层特征;含盐量主要表现为底聚性,20~50 cm 土层的含盐量较小,粉粒含量高的土层中含盐量高,在砂粒含量较高的表层^[19],含盐量受频繁滴灌和表层蒸发的影响形成一定的集聚;pH 值在剖面 II 中的分层较剖面 I 明显,30 cm 以下土层 pH 值较大,碱性更强;剖面 I 中 pH 值不规则低谷的出现,显示了土壤特性的变异、灌溉方式及蒸发对其影响的复杂性。

2.3 土壤斥水性与土壤水盐、pH 值的相关性分析

基于测定的土壤属性资料,用 Spearman 秩相关系数的非参数方法分析 80 cm 以上土层土壤斥水持续时间与土壤初始含水率、含盐量及 pH 值的相关性,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,土壤斥水持续时间在 0~40 cm 深度土层与含水率正相关,在 40~80 cm 深度土层与含水率负相关,且在表层(0~20 cm)通过了 0.01 的

显著水平检验;土壤斥水持续时间与含盐量除在 0~10 cm 的表层土壤为极显著的正相关外,其余土层均为负相关;pH 值与土壤斥水持续时间之间多为正相关,但相关性不明显。采用多元线性回归方法分析表层土壤(0~20 cm)的含水率、含盐量及 pH 值与土壤斥水持续时间的关系,建立回归方程。回归模型为

$$T = a + b\theta_m + cW + dH \tag{2}$$

式中 T ——土壤斥水持续时间,s
 $a、b、c、d$ ——常数
 θ_m ——初始含水率,%
 W ——可溶性全盐含量,g/kg
 H ——土壤 pH 值

得到的土壤斥水持续时间的回归方程为

$$T = -44.458 - 0.338\theta_m + 0.148W + 4.997H \tag{3}$$

($R^2 = 0.335$)

对方程内变量进行单独检测,初始含水率和 pH 值对斥水性有显著性影响, P 值分别为 0.000 1 和 0.014,含盐量的 P 值为 0.191,未能通过显著性水平检验。

3 结论

(1)经典统计分析结果表明,次生盐渍土剖面具有微弱的斥水性,斥水持续时间、含水率和含盐量均呈中等程度变异,pH 值相对稳定,离子含量从大到小依次为 $\text{Na}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}$ 。

(2)半方差分析结果表明,除剖面 I 含盐量的半方差函数采用指数模型外,其他属性均可用球形模型来拟合。斥水性在两剖面上的空间相关程度均为中等偏弱,受随机性因素影响较大。含水率、含盐量和 pH 值的空间相关性较强,各离子的空间相关程度从大到小依次为 $\text{Ca}^{2+}、\text{Na}^+、\text{Mg}^{2+}$ 。

(3)次生盐渍土剖面土壤斥水持续时间均呈不规则的指纹状分布。土壤斥水性在 40 cm 深度附近时最强,在大于 80 cm 深度的土层斥水特征不明显。含盐量和 pH 值具有一定的分层特征,含盐量主要表现为底聚性。

(4)土壤含水率在 0~40 cm 深度土层与斥水性正相关,在 40~80 cm 深度与斥水性负相关;含盐量与斥水性除在 0~10 cm 的表层正相关外,其余土层均为负相关;斥水性与 pH 值之间多为正相关。

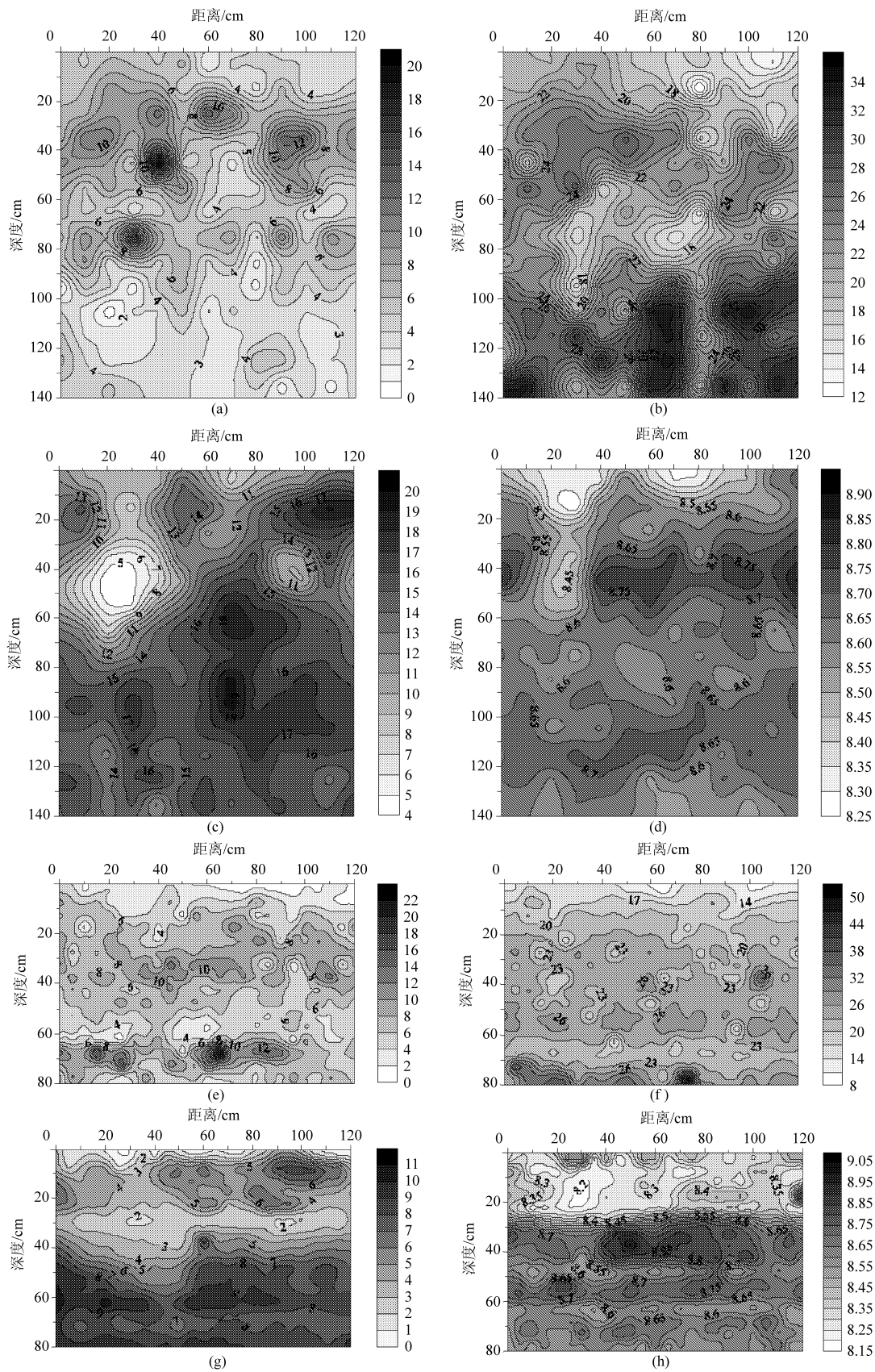


图 2 土壤剖面斥水性、水盐及 pH 值等值线图

Fig. 2 Contour maps of soil water repellency, soil moisture content, soil salt content and pH in the profiles

(a) 剖面 I, 斥水持续时间 (b) 剖面 I, 含水率 (c) 剖面 I, 含盐量 (d) 剖面 I, pH 值
(e) 剖面 II, 斥水持续时间 (f) 剖面 II, 含水率 (g) 剖面 II, 含盐量 (h) 剖面 II, pH 值

表 3 土壤斥水性与含水率、含盐量及 pH 值的 Spearman 相关系数

Tab.3 Spearman correlation coefficient of soil moisture content, soil salt content, pH and water repellency

深度 /cm	斥水持续时间(s) vs 含水率(%)		斥水持续时间(s) vs 含盐量(g/kg)		斥水持续时间(s) vs pH 值	
	相关系数	双尾显著性概率	相关系数	双尾显著性概率	相关系数	双尾显著性概率
0 ~ 10	0.524 **	0.000	0.361 **	0.004	-0.043	0.736
10 ~ 20	0.340 **	0.006	-0.163	0.201	0.030	0.814
20 ~ 30	0.101	0.432	-0.156	0.222	0.294 *	0.020
30 ~ 40	0.103	0.420	-0.027	0.833	0.174	0.172
40 ~ 50	-0.277 *	0.028	-0.065	0.613	0.005	0.971
50 ~ 60	-0.148	0.246	-0.078	0.541	-0.289 *	0.021
60 ~ 70	-0.217	0.088	-0.502 **	0.000	0.204	0.108
70 ~ 80	-0.010	0.940	-0.159	0.213	0.127	0.323

注：* * $P \leq 0.01$ 通过了 0.01 的显著水平检验(双尾)，* $0.01 < P \leq 0.05$ 通过了 0.05 的显著水平检验(双尾)， $N=63$ 。

参 考 文 献

1 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.
Yang Bangjie. Modeling heat and water movement in a water repellent sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(4): 351~359. (in Chinese)

2 Van Dam J C, Hendrickx J M, Van Genuchten M T, et al. Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil [J]. Journals of Hydrology, 1990, 120(1~4): 359~379.

3 Wetherby K G. The extent and significance of water repellent sands on Eyre peninswa technical report [R]. Adelaide, SA: South Australia Department of Agriculture, 1984: 47.

4 Oades J M, Blackwell P S. Proceedings of the national workshop on water repellency in soils [R]. Adelaide, SA: Waite Agricultural Research Institute, 1990:86.

5 DeBano L F. Water repellency in soils: a historical overview[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231~232: 4~32.

6 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, 1993, 15(4):88~90.

7 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. Correlation of soil water repellency measurements from two typical methods [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (7):8~13. (in Chinese)

8 李毅,王全九,王文焰. 覆膜条件下土壤水、盐、热耦合迁移研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社,2006:2~3.

9 李敏,李毅,曹伟,等. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析 [J]. 水利学报,2009, 40(10):1 210 ~ 1 218.
Li Min, Li Yi, Cao Wei, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content at different sampling grid scales under plastic mulch drip irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (10):1 210 ~ 1 218. (in Chinese)

10 Dekker L W, Jungerius P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands [J]. CATENA, 1991, 18(Supp.):173~183.

11 Dekker L W, Doerr S H, Olstindie K, et al. Water repellency and critical soil water content in a dune sand [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6):1 667~1 674.

12 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2003: 209~210.

13 盛建东,杨玉玲,陈冰,等. 土壤总盐、pH 及总碱度空间变异特征研究[J]. 土壤, 2005,37(1):69~73.
Sheng Jiandong, Yang Yuling, Chen Bing, et al. Spatial variability of soil total salt, pH and total alkalinity [J]. Soils, 2005, 37 (1):69~73. (in Chinese)

14 李毅,门旗,王文焰,等. 喷灌条件下田间土壤水分的空间变异性[J]. 水土保持学报,2000, 14 (6):60~64.
Li Yi, Men Qi, Wang Wenyan, et al. Spatial variability of soil moisture in the field irrigated by sprinkler [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14 (6):60~64. (in Chinese)

15 陈翠英,江永真,袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. 农业机械学报, 2005,36(10):121~124.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (10):121~124. (in Chinese)

- Zhang Jinfeng, Yuan Shouqi, Fu Yuedeng, et al. Numerical forecast of the influence of splitter blades on the flow field and characteristics of a centrifugal pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (7): 131 ~ 137. (in Chinese)
- 5 严俊峰,陈炜. 高速复合叶轮离心泵多相位定常流动数值模拟[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 28 ~ 31.
Yan Junfeng, Chen Wei. Numerical analysis of flow features of a high-speed centrifugal pump with a complex impeller with multi-phase position [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33 (1): 28 ~ 31. (in Chinese)
- 6 沈艳宁,袁寿其,陆伟刚,等. 复合叶轮离心泵数值模拟正交试验设计方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 22 ~ 26.
Shen Yanning, Yuan Shouqi, Lu Weigang, et al. Orthogonal test design method based on numerical simulation for non-overload centrifugal pump with complex impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 22 ~ 26. (in Chinese)
- 7 Cui Baoling, Zhu Zuchao, Zhang Jianci, et al. The flow simulation and experimental study of low-specific-speed high-speed complex centrifugal impellers [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2006, 14 (4): 435 ~ 441.
- 8 王祖温,郭晓晨,包钢,等. 基于流场的气动换向阀流量特性研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 304 ~ 306.
Wang Zuwen, Guo Xiaochen, Bao Gang, et al. Effect of flow path on flow characteristic of pneumatic spool valves[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40 (2): 304 ~ 306. (in Chinese)
-

(上接第 64 页)

- 16 蔺娟,艾尼瓦尔·买买提,地里拜尔·苏力坦. 新疆盐渍化区土壤盐分离子的空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 184 ~ 187.
Lin Juan, Anwer Mohammed, Dilbar Sultan. Spatial variability of soil saltions in Xinjiang salinization region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 184 ~ 187. (in Chinese)
- 17 王学军,李本纲,陶澍,等. 土壤微量金属含量的空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 29 ~ 31.
- 18 王政权. 地质统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 150 ~ 156.
- 19 李敏. 土壤颗粒分布分形及物理性质的空间变异[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Li Min. Spatial variability of fractal dimensions for soil particle size distributions and physical properties [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010. (in Chinese)
- 20 Bauters T W, Steenhuis T S, DiCarlo D A, et al. Physics of water repellent soils [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231 ~ 232: 233 ~ 243.
- 21 Hallett P D, Numan N, Douglas J T, et al. Millimeter-scale spatial variability in soil water captivity: scale, surface elevation, and sub critical repellency effects [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68 (2): 352 ~ 358.
- 22 Bachmann J, Horton R, Van der Ploeg R R. Isothermal and non-isothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency [J]. Soil Science Society of America, 2001, 65(6): 1 599 ~ 1 607.
- 23 Dekker L W, Ritsema J. How water moves in a water repellent sandy soil: potential and actual water repellency [J]. Water Resources Research, 1994, 30 (9): 2 507 ~ 2 517.
- 24 Dekker L W, Ritsema J. How water moves in a water repellent sandy soil: 2 dynamics of fingered flow [J]. Water Resources Research, 1994, 30(9): 2 519 ~ 2 531.
- 25 Yang B, Zeng D C. Simulation of seedbed soil moisture and temperature behavior as effected by tillage operations [C] // Proceedings of the 11th International Conference: Soil and Tillage Research Organization. Edinburgh, 1988: 433 ~ 438.
- 26 高金芳,李毅,陈世平,等. 覆膜开孔蒸发条件下土体高度对水盐运移的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 50 ~ 55.
Gao Jinfang, Li Yi, Chen Shiping, et al. Effects of soil column heights on movement of soil water and soil salt during evaporation under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 50 ~ 55. (in Chinese)