

网络出版时间:2016-01-08 10:22

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.02.029

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160108.1022.058.html>

# 玛纳斯河流域土壤水分及斥水性空间变异性研究

邵志一, 李毅

(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)

**【摘要】**【目的】研究新疆玛纳斯河流域七大灌区内的土壤含水率及斥水性(用滴水穿透时间表示)的空间变异规律。【方法】在玛纳斯河流域七大灌区布设了400个土壤样点,分别用烘干法和滴水穿透时间法测定各土样的土壤含水率和滴水穿透时间,应用经典统计学方法和考虑高程影响的CoKriging方法分析各灌区土壤含水率及滴水穿透时间的变异规律。【结果】新疆玛纳斯河流域0~10,10~20 cm土层土壤含水率均值分别为12.00%和15.60%,平均土壤含水率以10~20 cm土层更高;滴水穿透时间均值为1.64 s,整体属于不斥水土壤。通过不同趋势效应下预测误差值及块金效应的比较,结果显示,0~10,10~20 cm土层土壤含水率空间变异的最优模型分别为0阶指数模型和0阶球状模型,土壤滴水穿透时间空间变异的最优模型为2阶指数模型。0~10 cm土层土壤含水率变化呈现出从东南和西北分别向西南和东北方向逐渐减小的趋势,10~20 cm土层土壤含水率的变化呈现出从东向西、从南向北逐渐减小的趋势;0~10 cm土层土壤含水率变异程度大于10~20 cm土层。滴水穿透时间的变化呈现出从东南和西北分别向西南和东北方向逐渐减小的趋势,与0~10 cm土层含水率的分布格局相似。【结论】灌区0~10与10~20 cm土层土壤含水率的空间分布格局类似,滴水穿透时间的空间分布属于强变异。

**【关键词】** 玛纳斯河流域;土壤水分;斥水性;空间变异;新疆

**【中图分类号】** S152.7

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2016)02-0207-07

## Spatial variability in soil moisture and water repellency in Manasi River basin

SHAO Zhi-yi, LI Yi

(Key Lab of Agriculture Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 The spatial variability in soil moisture and water repellency (represented as water droplet penetration time) were studied in 7 irrigation areas of Manasi River basin in Xinjiang. 【Method】 A total of 400 soil samples were collected from 7 irrigation areas and measured by oven dried method and water droplet penetration time method. Then classical statistics and CoKriging methods were used to analyze the spatial variation. 【Result】 Average soil moistures at the depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm were 12.00% and 15.60%, respectively. Soil in this area was generally non-water-repellent with average water droplet penetration time of 1.64 s. The best models of semi-variogram at two depths were zero-order exponential model and zero-order spherical model, respectively. The best model for water droplet penetration time was second order exponential model. Soil moisture at the depth of 0 to 10 cm decreased from southeast to southwest and from northwest to northeast, whereas soil moisture at the depth of 10 to 20 cm reduced

**【收稿日期】** 2014-06-11

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(51579213, U1203182);西北农林科技大学基本科研业务费优秀青年基金项目(YQ2013006)

**【作者简介】** 邵志一(1991-),男,安徽怀远人,在读硕士,主要从事农业水土工程研究。E-mail:469749446@qq.com

**【通信作者】** 李毅(1974-),女,陕西武功人,教授,博士生导师,主要从事土壤水盐运移研究。E-mail:liyikitty@126.com

from east to west and from south to north. Variation degree of moisture at depth of 0 to 10 cm was higher than that at 10 to 20 cm. The water droplet penetration time changed similarly with soil moisture at depth of 0 to 10 cm. 【Conclusion】 The spatial distributions of soil moisture contents at depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm were similar. The spatial variability of water droplet penetration time was strong.

**Key words:** Manasi River basin; soil moisture; water repellency; spatial variability; Xinjiang

玛纳斯河是天山北麓最大的一条河流,流经沙湾县、玛纳斯县、石河子市等地区,形成玛纳斯河流域。目前,此流域已经成为了我国第四大灌溉农业区和新疆最大的绿洲农耕区,农业经济取得了巨大发展,尤为突出的是当地的特色作物——棉花,产量占新疆地区棉花总产量的 20%,占全国棉花产量的 6%,2002 年生产总值达 123.58 亿元,为新疆地区经济发展作出了重大贡献。据估计,中国的干旱区面积占全国总面积的 1/3,盐碱土广泛分布于其中<sup>[1-2]</sup>。在新疆现有耕地  $406.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$  中,约有 1/3 土地产生盐渍化,严重影响到新疆农业的可持续发展<sup>[2-4]</sup>。2011 年,任鑫等<sup>[5]</sup> 在新疆地区的研究提出,土壤含盐量与斥水性除在 0~10 cm 土层呈正相关外,在其余土层两者之间均呈负相关。研究土壤水分及斥水性的空间变化规律,对于制定灌溉制度、做出合理灌溉决策、治理土壤次生盐渍化以及提升作物产量都具有重要意义。

近些年,国内外学者对土壤水分空间变异的研究显示出巨大潜力。20 世纪 80 年代雷志栋等<sup>[6]</sup> 通过经典统计学原理分析了土壤特性的空间变异,使用半方差函数反映土壤特性的空间关系;20 世纪 90 年代周刘宗等<sup>[7]</sup> 应用时序分析方法研究土壤含水率的动态变化;2010 年李毅等<sup>[8]</sup> 在不同尺度下研究土壤颗粒体积分数的空间变异特性。近些年的研究从多方法、多角度相互印证,呈现出从宏观层面向微观层面过渡的趋势。土壤斥水性的概念最初在 20 世纪 20 年代萌芽,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<sup>[9]</sup>。国外对其研究开始于 20 世纪六七十年代,由最初单纯的物理分析<sup>[10-12]</sup> 逐渐向应用型<sup>[13]</sup> 发展,从森林土壤<sup>[13]</sup>、农田土壤<sup>[14]</sup>、草原土壤<sup>[15]</sup>、火烧土壤<sup>[16]</sup>、受污染土壤<sup>[17]</sup>、矿区土壤<sup>[18]</sup> 等方面综合分析土壤斥水性<sup>[19]</sup>。在国内学者中,杨邦杰等<sup>[20]</sup>、吴延磊等<sup>[21]</sup>、陈俊英等<sup>[22]</sup> 分别对澳大利亚、内蒙古锡林浩特草原及以色列土壤的斥水性进行了研究。目前国内外有关土壤水分及斥水性的研究虽然较多,但对玛纳斯河流域的研究尚不多见<sup>[19]</sup>,而这对于了解该流域土壤属性及后续的水文模拟工作具有十分重

要的实际意义。

对土壤属性空间变异性的研究,目前常用的方法有传统的统计分析方法、时序分析方法、地统计学方法、随机模拟方法、分形与分数维方法以及基于 GIS 技术的研究方法等<sup>[23]</sup>。本研究以玛纳斯河流域七大灌区作为试验区,应用 ArcGIS 10.2 的地统计学分析模块中的协同克里格(CoKriging)分析方法来进行空间插值分析,并绘制玛纳斯河流域试验区土壤含水率空间分布图及土壤滴水穿透时间空间分布图,进一步分析玛纳斯河流域土壤水分和土壤斥水性的空间变异特征,以期为我国盐渍化土壤水分和斥水性的空间变异性研究提供参考。

## 1 材料与方法

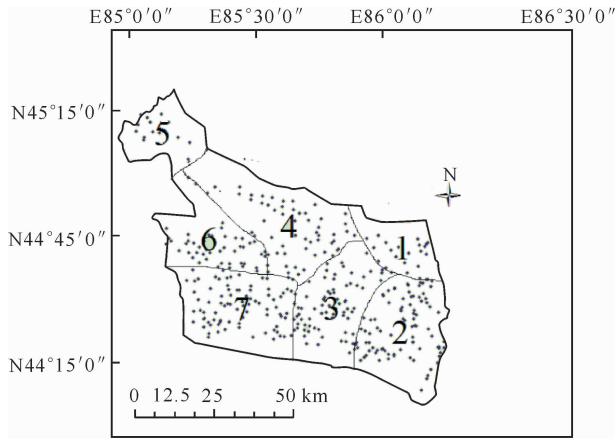
### 1.1 研究区概况

玛纳斯河流域经纬度范围分别为  $E85^{\circ}01' \sim 86^{\circ}32'$  和  $N43^{\circ}27' \sim 45^{\circ}21'$ ,地处新疆准噶尔盆地西南,西部是准噶尔盆地边缘,南部是天山山脉,地形南高北低,平原和山区各半。玛纳斯河流域存在冲积洪积扇、冲积平原和干三角洲 3 种主要地貌类型,不同地貌部位的地形、土壤、植被等明显不同,尤其土壤质地、地下水位高度、矿化度、土壤含盐量等差异较大,自上游到下游,土壤质地由粗变细,地下水位由深变浅再变深,矿化度由低变高,土壤盐渍化程度由轻变重<sup>[24-25]</sup>。

### 1.2 采样方案与土壤属性的测定

1.2.1 土样采集 因玛纳斯河流域北方为沙漠,南方为雪山,采样区域选于玛纳斯河流域七大灌区。采用随机布点方式,按照每隔 2~3 km 设置 1 个测点的方式,共设置 400 个样点。应用 GPS 进行导航定位,多选择以村庄、连队为单位的农田覆膜地进行采样。每个点分别取 0~10 和 10~20 cm 土层样品。取样点位详见图 1。

1.2.2 土壤含水率测定 采用烘干法测定土样的含水率。在田间样点处取铝盒(自然湿土),经  $105^{\circ}\text{C}$  的烘箱中烘 24 h 至恒定质量,水的质量与烘干土质量的百分比即为土壤含水率。



1. 莫索湾灌区 Mosuowan irrigation district;  
 2. 玛纳斯县灌区 Manasi country irrigation district;  
 3. 石河子灌区 Shihezi irrigation district;  
 4. 121团灌区 121 regiment irrigation district;  
 5. 136团灌区 136 regiment irrigation district;  
 6. 132团灌区 132 regiment irrigation district;  
 7. 安集海灌区 Anjihai irrigation district

图 1 玛纳斯河流域土壤采样点的分布

Fig. 1 Distribution of samples in Manasi River basin

1.2.3 土壤斥水性测定 采用滴水穿透时间法 (Water droplet penetration time) 测定土壤斥水性。

将土壤上层的枯叶及杂物拂去, 用一个标准的滴定管将约 0.05 mL 的蒸馏水水滴滴到土壤表面, 用秒表记录水滴完全入渗到土壤所需的时间, 以肉眼观测到水滴在土面不再滞留为“穿透”的准则。每个样点重复测定 8 次, 取 8 滴水入渗时间的算术平均值作为每个样品的最终滴水穿透时间, 用滴水穿透时间来表示土壤斥水性。另外, 在测试过程中, 液滴距土壤表面的高度小于 5 cm, 以避免液滴滴落时过大的动能影响水土作用。一般将滴水穿透时间  $t$  划分为 4 个等级:  $t < 5$  s, 不斥水;  $5 \leq t < 60$  s, 轻微斥水;  $60 \leq t < 600$  s, 中度斥水;  $t \geq 600$  s, 强烈斥水<sup>[18]</sup>。

1.3 土壤水分和斥水性的空间变异性分析原理概述

本研究拟分别采用经典统计学和地统计学分析

土壤水分及斥水性的空间变异特征。经典统计学主要通过计算样本极差、均值、标准差、变异系数、峰态系数、偏态系数等统计特征值以及进行显著性检验来表征土壤属性空间变异特征。地统计学主要通过半方差函数来反映空间相关结构, 并应用 ArcGIS10.2 的地统计学分析模块中的 CoKriging 分析方法来进行空间插值分析。Kriging 插值分析半方差函数按下式计算:

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

式中:  $\gamma(h)$  为与位差有关的半方差函数,  $h$  为位差,  $N(h)$  为以  $h$  为间距的所有观测点的成对数目,  $i$  为样本成对数,  $Z(x_i+h)$ 、 $Z(x_i)$  分别代表空间位置为  $x_i+h$ 、 $x_i$  时所对应的观测值。

CoKriging 插值分析使用的交互半方差函数按下式计算:

$$\gamma_{12}(h) = \gamma_{21}(h) = \frac{1}{2N(h)} \times$$

$$\sum_{i=1}^{N(h)} [Z_1(x_i+h) - Z_1(x_i)][Z_2(x_i+h) - Z_2(x_i)] \quad (2)$$

式中:  $\gamma_{12}(h)$ 、 $\gamma_{21}(h)$  分别为变量  $Z_1$  和  $Z_2$  之间的交互半方差函数,  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别代表空间位置为  $x_i+h$ 、 $x_i$  时所对应的 2 个观测值, 其他符号含义同前。

使用 CoKriging 插值, 综合了高程的影响, 对土壤含水率和滴水穿透时间插值分析, 可以提高估测精度, 其插值误差较 Kriging 小。通过研究模型中的块金值(Nugget,  $C_0$ )、基台值(Sill,  $C_0 + C$ )、变程(Range,  $A$ ), 用块金值( $C_0$ )与基台值之比( $C_0 / (C_0 + C)$ ), 即块金效应<sup>[26-27]</sup>来分析土壤各属性的变异规律。

2 结果与分析

2.1 玛纳斯河流域土壤属性的经典统计学分析

对玛纳斯河流域 400 个样点的土壤属性进行经典统计学分析, 其统计特征值见表 1。

表 1 玛纳斯河流域不同土层土壤各属性的统计特征值

Table 1 Characteristic values of each property at different layers in Manasi River basin

土层深度/cm Soil layer	含水率/% Moisture content					变异系数 Coefficient of variation	峰态系数 Kurtosis coefficient	偏态系数 Skewness coefficient
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	均值 Mean	标准差 Median			
0~10	38.85	1.14	37.71	12.00	5.00	0.42	3.32	1.18
10~20	39.30	0.71	38.60	15.60	5.23	0.34	2.33	1.00
土层深度/cm Soil layer	滴水穿透时间/s Water droplet penetration time					变异系数 Coefficient of variation	峰态系数 Kurtosis coefficient	偏态系数 Skewness coefficient
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	均值 Mean	标准差 Median			
0~2	21.40	0.10	21.30	1.64	1.74	1.06	51.90	5.80

表 1 显示, 从土壤含水率平均值来看, 10~20 cm 土层高于 0~10 cm 土层。0~10 cm 土层含水

率最小值为 1.14%，最大值为 38.85%；10~20 cm 土层含水率最小值为 0.71%，最大值为 39.30%。玛纳斯河流域 2 层土壤含水率变幅较大。根据变异系数的等级分析，2 个土层土壤含水率为中等变异强度，而且土壤水分变异程度随土层深度增加而减小，即 0~10 cm 土层水分变异程度大于 10~20 cm 土层。0~10 cm 土层土壤含水率的分布具有过度的峰度，10~20 cm 土层土壤含水率的分布具有不足的峰度；2 个土层土壤含水率的分布均属于正偏。

表 1 还显示，滴水穿透时间平均值为 1.64 s，根据其等级划分标准可知，研究区流域土壤整体上属于不斥水土壤。土壤滴水穿透时间最小值为 0.10 s，最大值为 21.40 s，个别地区有斥水性土壤。滴水

表 2 玛纳斯河流域不同土层土壤各属性最优半方差函数模型的预测误差

Table 2 Prediction errors of the best semi-variogram model of each property at different layers in Manasi River basin

土壤属性 Soil attributes	土层深度/cm Soil layer	趋势效应 Trend effect	理论模型 Theoretical model	预测误差 Prediction error				
				平均误差 ME	均方根误差 RMS	平均标准误差 ASE	标准平均误差 MSE	标准均方根误差 RMSSE
含水率 Moisture content	0~10	0 阶 0-order	指数模型 Exponential model	-0.000	0.045	0.045	-0.000	1.002
	10~20	0 阶 0-order	球状模型 Spherical model	0.000	0.045	0.045	0.004	0.999
滴水穿透时间 Water droplet penetration time	0~2	2 阶 2-order	指数模型 Exponential model	-0.047	1.583	1.211	-0.012	1.084

半方差函数模型具有 4 个重要的参数，即块金值( $C_0$ )、变程、基台值( $C_0 + C$ )和偏基台值。其中，块金值与基台值的比值称为块金效应，用以表明土壤各属性的空间变异特征；根据该比值大小可将相

关土壤属性划分为强空间相关、中等空间相关和弱空间相关 3 个等级<sup>[26-27]</sup>。根据选定的最优半方差函数模型，得到土壤各属性的重要参数见表 3。

## 2.2 玛纳斯河流域土壤各属性的地统计学分析

在 ArcGIS 10.2 中对玛纳斯河流域土壤各属性进行地统计学分析，利用 Geostatistical Analyst 模块得到土壤属性半方差函数模型的相关参数，并通过其误差检验值选出最优半方差函数模型，其结果见表 2。最终分析确定 0~10, 10~20 cm 土层含水率的最优模型分别为 0 阶指数模型和 0 阶球状模型，滴水穿透时间的模型为 2 阶指数模型(表 2)。

表 3 玛纳斯河流域不同土层土壤各属性最优半方差函数模型的参数

Table 3 Parameters of the best semi-variogram model of each property at different layers in Manasi River basin

土壤属性 Soil attributes	土层深度/cm Soil layer	趋势效应 Trend effect	理论模型 Theoretical model	$C_0$	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C)$	长轴变程/km Major range	短轴变程/km Minor range	各向异性比 Anisotropic ratio
含水率 Moisture content	0~10	0 阶 0-order	指数模型 Exponential model	0.585	1.02	0.574	61.45	22.23	2.764
	10~20	0 阶 0-order	球状模型 Spherical model	0.654	1.018	0.642	64.29	27.22	2.362
滴水穿透时间 Water droplet penetration time	0~2	2 阶 2-order	指数模型 Exponential model	0.355	0.482	0.737	70.35	23.62	2.978

由表 3 可知，玛纳斯河流域 0~10, 10~20 cm 土层土壤含水率的块金效应分别为 0.574 和 0.642，土壤滴水穿透时间的块金效应为 0.737，均位于 0.25~0.75 之间，说明该流域 0~10, 10~20 cm 土层土壤含水率和土壤滴水穿透时间均具有中等空间相关性。长轴变程和短轴变程是相关性消失最慢和最快方向的变程，其中 0~10, 10~20 cm 土层土壤

含水率变程为 22~65 km，即不同土层土壤含水率空间相关性消失的范围在 22~65 km。土壤滴水穿透时间变程为 23~71 km，即不同土层土壤含水率空间相关性消失的范围在 23~71 km。长轴变程与短轴变程的比值称为各向异性比，其值接近或等于 1 时，空间异质性为各向同性，反之为各向异性。该流域 0~10, 10~20 cm 土层土壤含水率及土壤滴水

穿透时间的各向异性比均大于 1, 所以呈现明显的各向异性, 符合空间插值的要求<sup>[26]</sup>。

### 2.3 玛纳斯河流域土壤各属性的 CoKriging 插值与空间分布

#### 2.3.1 土壤含水率 在 ArcGIS 10.2 中对玛纳斯河流域 400 个样点的 0~10 及 10~20 cm 2 个土层

的含水率进行地统计学分析, 由于该流域 2 个土层土壤含水率均符合正态分布, 所以直接应用地统计学分析模块中的 CoKriging 分析, 得到 0~10 及 10~20 cm 2 个土层的土壤水分空间分布图, 结果见图 2。

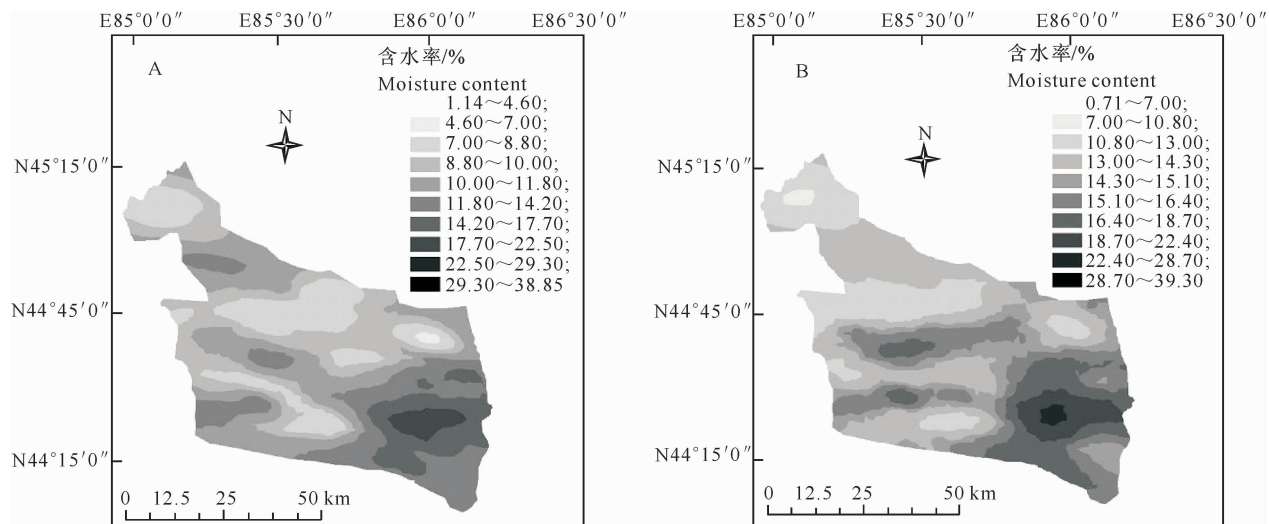


图 2 玛纳斯河流域 0~10 cm(A)和 10~20 cm(B)土层土壤含水率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of moisture content at the depths of 0-10 cm (A) and 10-20 cm (B) in Manasi River basin

由图 2 可以看出, 玛纳斯河流域 0~10 cm 土层土壤含水率最大值集中在东南方向的块状范围内, 最小值出现在东北方向的块状范围内, 土壤含水率的变化呈现出从东南和西北分别向西南和东北方向逐渐减小的趋势。10~20 cm 土层土壤含水率最大值集中在东南方向的块状范围内, 最小值出现在西北方向的块状范围内, 土壤含水率的变化呈现出从东向西、从南向北逐渐减小的趋势。土壤含水率分布的空间变异性不仅表现在水平方向, 而且表现在垂直方向。0~10, 10~20 cm 土层土壤含水率分布格局以及水平方向变异程度均相似, 说明各层土壤含水率之间的空间相关性极强。

的块状范围内, 最小值出现在东北方向的块状范围内, 滴水穿透时间的变化呈现出从东南和西北分别向西南和东北方向逐渐减小的趋势, 与 0~10 cm 土层含水率的分布格局相似。

#### 2.3.2 滴水穿透时间

在 ArcGIS 10.2 中对玛纳斯河流域 400 个样点的滴水穿透时间进行地统计学分析, 由于该流域土壤滴水穿透时间符合 log 正态分布, 应用地统计学分析模块中的 CoKriging 分析时要先对原始数据进行 log 变换, 之后得到土壤滴水穿透时间空间分布图, 结果见图 3。图 3 显示, 玛纳斯河流域七大灌区内的土壤滴水穿透时间大部分集中在 0.10~2.36 s, 说明流域灌区内大部分土壤不斥水。玛纳斯河流域土壤滴水穿透时间的空间分布的图形较为密集, 说明该滴水穿透时间的空间变异较大。土壤滴水穿透时间最大值集中在东南方向

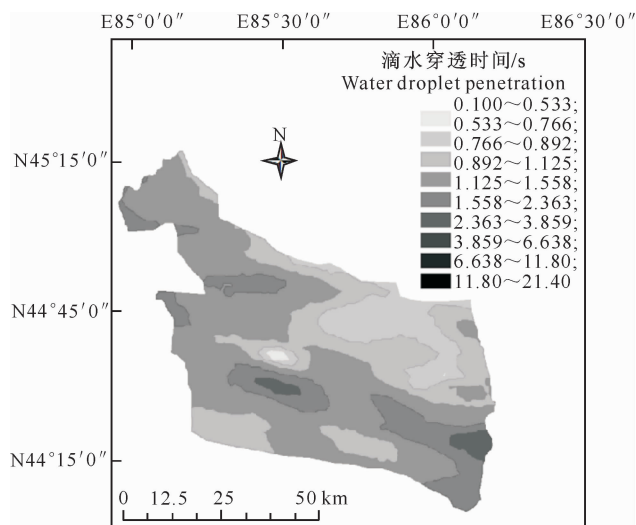


图 3 玛纳斯河流域土壤滴水穿透时间的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water droplet penetration time in Manasi River basin

## 3 结 论

1) 玛纳斯河流域七大灌区 0~10 cm 土层土壤

含水率从东南和西北分别向西南和东北方向逐渐减小;10~20 cm 土层土壤含水率从东向西、从南向北逐渐减小。0~10 cm 土层土壤含水率变异程度大于10~20 cm 土层。滴水穿透时间的变幅较大,变异程度较大,属于强变异;滴水穿透时间从东南和西北分别向西南和东北方向逐渐减小。

2) 0~10,10~20 cm 土层含水率的最优模型分别为 0 阶指数模型和 0 阶球状模型,模型相应的块金效应分别为 0.574 和 0.642;滴水穿透时间的最优模型为 2 阶指数模型,模型的块金效应为 0.737,空间变异性较强。

本研究分析了玛纳斯河流域土壤水分及斥水性的空间变异规律,以期为我国盐渍化土壤水分和斥水性的空间变异性研究提供参考,对于此地区土壤其他相关特性的空间变异规律还有待于进一步研究。

## [参考文献]

- [1] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议 [J]. 干旱区地理,2000,23(2):177-181.  
Tian C Y,Zhou H F,Liu G Q. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21's century in Xinjiang [J]. Arid Land Geography,2000,23(2):177-181. (in Chinese)
- [2] 谷海斌,盛建东,武红旗,等. 灌区尺度土壤盐渍化调查与评价:以石河子灌区和玛纳斯灌区为例 [J]. 新疆农业大学学报,2010,33(2):95-100.  
Gu H B,Sheng J D,Wu H Q,et al. Survey and evaluation on soil salinization of irrigation area scale:A case study of irrigation area in Shihhotze and Manas [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2010,33(2):95-100. (in Chinese)
- [3] 潘旭东,杨乐. 玛纳斯河流域次生盐渍化弃耕地全面生态重建的新理念 [J]. 新疆农业科学,2004,41(6):431-434.  
Pan X D,Yang L. New conception on the overall ecosystem reconstruction of secondary salinization wasteland in Manas River Valley [J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2004,41(6):431-434. (in Chinese)
- [4] 刘春卿,杨劲松,陈小兵,等. 新疆玛纳斯河流域灌溉水质与土壤盐渍状况分析 [J]. 土壤,2008,40(2):288-292.  
Liu C Q,Yang J S,Chen X B,et al. Quality of irrigation water and soil salinity of the Manas River Valley in Xinjiang [J]. Soils,2008,40(2):288-292. (in Chinese)
- [5] 任鑫,李毅,李敏,等. 次生盐渍土垂直剖面斥水性及其与理化性质关系 [J]. 农业机械学报,2011,42(3):58-64.  
Ren X,Li Y,Li M,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. (in Chinese)
- [6] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等. 土壤特性空间变异性初步研究 [J]. 水利学报,1985(9):10-21.  
Lei Z D,Yang S X,Xu Z R,et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1985(9):10-21. (in Chinese)
- [7] 周刘宗,陈志雄,周凌云,等. 土壤水分的时序分析研究 [J]. 土壤,1998(4):188-193.  
Zhou L Z,Chen Z X,Zhou L Y,et al. A temporal distribution of soil moisture [J]. Soils,1998(4):188-193. (in Chinese)
- [8] 李毅,李敏,曹伟,等. 农田土壤颗粒尺寸分布分维及颗粒体积分数的空间变异性 [J]. 农业工程学报,2010,26(1):94-102.  
Li Y,Li M,Cao W,et al. Spatial variability of fractal dimension for soil particle size distribution and particle volume percentage in farmlands [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(1):94-102. (in Chinese)
- [9] 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):351-358.  
Yang B J,Blackwell P S,Nicholson D F. Modeling heat and water movement in a water repellent sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica,1996,33(4):351-358. (in Chinese)
- [10] Letey J,Carrillo M L K,Pang X P. Approaches to characterize the degree of water repellency [J]. Journal of Hydrology,2000,231:61-65.
- [11] 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,2007,378:147-150.
- [12] 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.
- [13] Buczko U,Bens O,Huttl R F. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*) [J]. Geoderma,2005,126:317-336.
- [14] Blanco-Canqui H,Lal R. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils [J]. Geoderma,2009,149:171-180.
- [15] Martinez-Zavala L,Jordan-Lipez A. Influence of different plant species on water repellency in Mediterranean heathland soils [J]. Catena,2009,76:215-223.
- [16] Arcenegui V,Mataix-Solera J,Guerrero C,et al. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils [J]. Catena,2008,74:219-226.
- [17] Buczko 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,2006,88:249-268.
- [18] Gerke H H,Hangen E,Schaaf W,et al. Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with *Pinus nigra* [J]. Geoderma,2001,102:255-274.
- [19] 郭丽俊,李毅,李敏,等. 盐渍化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(2):277-285.

- Guo L J, Li Y, Li M, et al. Spatial variability of soil water repellency and soil physical-chemical properties in saline-alkaline field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 277-285. (in Chinese)
- [20] 杨邦杰, Blackwell P S, Nicholson D F. 土壤斥水性引起的土壤退化、调查方法与改良措施研究 [J]. *环境科学*, 1993, 15(4): 88-90.
- Yang B J, Blackwell P S, Nicholson D F. Study on soil degradation, investigation methods and improvement measures caused by soil water repellency [J]. *Environmental Science*, 1993, 15(4): 88-90. (in Chinese)
- [21] 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 Y L, Li Z Z, Gong Y S. Correlation of soil water repellency measurements from two typical methods [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 8-13. (in Chinese)
- [22] 陈俊英, 张智韬, 杨 飞, 等. 土壤的斥水性和含水率变化关系的数学模型 [J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 35-38.
- Chen J Y, Zhang Z T, Yang F, 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] 李 毅, 刘建军. 土壤空间变异性研究方法 [J]. *石河子大学学报: 自然科学版*, 2000, 4(4): 331-337.
- Li Y, Liu J J. Advance in spatial variability of soil properties [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science Edition*, 2000, 4(4): 331-337. (in Chinese)
- [24] 李玉义, 张凤华, 潘旭东, 等. 新疆玛纳斯河流域不同地貌类型土壤盐分累积变化 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 60-64.
- Li Y Y, Zhang F H, Pan X D, et al. Changes of salt accumulation in soil layers with different landforms in Manas River Valley in Xinjiang Region of China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 60-64. (in Chinese)
- [25] 张凤华, 赵 强, 潘旭东, 等. 新疆玛纳斯河流域绿洲土壤特性空间分异与合理开发模式 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 53-56.
- Zhang F H, Zhao Q, Pan X D, et al. Spatial differentiation and exploration direction of soil characteristic in valley of Manas River in Xinjiang [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 53-56. (in Chinese)
- [26] 谭 艳, 吴承祯, 洪 伟, 等. 邓恩桉林地土壤 pH 空间变异分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2012, 21(1): 14-19.
- Tan Y, Wu C Z, Hong W, et al. Analysis on spatial variation of pH in soil of *Eucalyptus dunnii* forest [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2012, 21(1): 14-19. (in Chinese)
- [27] 陈朝阳. 南平市植烟土壤 pH 状况及其与土壤有效养分的关系 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(5): 149-153.
- Chen C Y. The relationships of pH and available nutrient in Nanping tobacco-growing soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5): 149-153. (in Chinese)

(上接第 206 页)

- [14] Mayer R R, Cherry J L, Rhodes D. Effects of heat shock on amino acid metabolism of cowpea cells [J]. *Phytochemistry*, 1990, 94: 796-810.
- [15] Wallace W, Secor J, Schrader L. Raped accumulation of  $\gamma$ -amino acid and alanine in soybean leaves in response to and abrupt transfer to lower temperature, darkness or mechanical manipulation [J]. *Plant Physiol*, 1984, 75: 170-175.
- [16] Ramputh A L, Rapid B. [ $\gamma$ ]-aminobutyric acid synthesis and the inhibition of the growth and development of oblique-banded leaf-roller larvae [J]. *Plant Physiol*, 1996, 111: 1349-1352.
- [17] Aurisano N, Bertani A, Rogianni R. Involvement of calcium and calmodulin in protein and amino acid metabolism in rice roots under anoxia [J]. *Plant Cell Physiol*, 1995, 36: 1525-1529.