

压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子

白一茹,王幼奇,王 菲,王建宇  
(宁夏大学资源环境学院,宁夏 银川 750021)

**摘 要:** 采用 10 m × 10 m 网格布点的方式对宁夏压砂田 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 深度下土壤饱和导水率 ( $K_s$ ) 及其相关因素的空间变异规律进行研究。经典统计结果表明: 2 个采样深度下土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度表现为弱变异,饱和含水量和土壤有机质含量表现为中等变异; 0 ~ 10 cm 深度下  $K_s$  表现为中等变异, 10 ~ 20 cm 深度下  $K_s$  表现为强变异; 10 ~ 20 cm 深度下土壤各种性质的平均值均大于 0 ~ 10 cm 深度。Pearson 相关性分析可知,影响  $K_s$  的主要因素是毛管孔隙度,其次为容重、总孔隙度、饱和含水量和有机质含量。地统计结果表明, 0 ~ 10 cm 深度下  $K_s$  表现为纯块金效应,主要受随机性因素的影响, 10 ~ 20 cm 深度下  $K_s$  主要受结构性因素的影响; 在 2 个采样深度下容重主要受随机因素的影响。从空间分布图可以看出, 2 个采样深度下  $K_s$  和容重存在高度的负相关关系,与饱和含水量、总孔隙度和毛管孔隙度存在高度的正相关关系。

**关键词:** 压砂地; 土壤饱和导水率; 地统计; 克里格插值

**中图分类号:** S152.7+2      **文献标志码:** A

Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in the gravel mulched field of Ningxia

BAI Yi-ru, WANG You-qi, WANG Fei, WANG Jian-yu  
(College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors could lay the scientific basis for soil water and soil desiccation management in mulched field. The classical and geological statistics were combined to identify the spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors at 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm depths with 10 m × 10 m grids. The classical statistics indicated that at the 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm depths the soil bulk density, total porosity and capillary porosity showed light variation, saturation moisture content, soil organic matter showed moderate variation, while soil saturated hydraulic conductivity had moderate and wide variation at the 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm depths, respectively. The capillary porosity was the key factors influencing saturated hydraulic conductivity by Pearson correlation analysis, followed by bulk density, total porosity, saturation moisture content and soil organic matter content. The geological statistics indicated that saturated hydraulic conductivity at the 0 ~ 10 cm depths was basically affected by random factors with pure nugget variograms, while at the 10 ~ 20 cm depths primarily affected by structural factors. At the 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm depths, the spatial variability of soil bulk density was mainly affected by random factors. According to the spatial distribution patterns, saturated hydraulic conductivity was highly negative correlated with bulk density, while was high positively related to saturation moisture content, total porosity and capillary porosity.

**Keywords:** gravel mulched field; soil saturated hydraulic conductivity; geostatistical statistics; kriging interpolation

压砂是农民为了克服恶劣自然环境,利用河湖沉积、沟壑冲击产生的砾石在土壤表面铺设成一定厚度来种植作物,通过改善小生境中土壤水分和热量条件以满足作物生长需要的一种旱作耕作方式<sup>[1]</sup>。压砂技术在历史上被广泛地应用到以甘肃省兰州市为中心的干旱、半干旱地区<sup>[2]</sup>。为了提高土

---

收稿日期: 2015-09-20  
基金项目: 宁夏高校科学研究项目 (NGY2013031, Ngy2013028); 宁夏大学人才引进科研启动基金 (BQD2012012); 国家自然科学基金 (41461104, 41071156)  
作者简介: 白一茹 (1984—), 女, 陕西渭南人, 讲师, 博士, 主要从事土壤物理研究。E-mail: yr0823@163.com。  
通信作者: 王幼奇 (1980—), 男, 安徽泾县人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事旱区植被恢复研究。E-mail: wyq0563@163.com。

地生产力和农作物产量,宁夏大力推广和开发压砂技术,目前宁夏压砂地面积已由 2003 年前累计的  $6.47 \times 10^3 \text{ hm}^2$  发展到现在的  $6.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,并且有进一步扩大的趋势<sup>[3-4]</sup>。然而,近年来随着砂田种植面积逐年扩大、种植年限增加,压砂地出现土壤水分减少<sup>[5-6]</sup>、容重增大<sup>[7]</sup>、养分含量下降<sup>[8]</sup>和生产力显著降低<sup>[9]</sup>等问题,压砂地退化成为阻碍压砂产业可持续发展的关键问题。许多学者对压砂土壤退化问题进行了深入研究和探索<sup>[10-12]</sup>,取得重要进展。但是关于压砂地土壤导水性能方面的研究相对较少。土壤饱和导水率( $K_s$ )是指土壤所有孔隙均充满水时,在单位水势梯度作用下,通过垂直于水流方向上单位面积土壤水流通量(速率)<sup>[13]</sup>。 $K_s$ 是衡量土壤渗透能力的重要指标之一,也是水文模型中重要参数。其对于估算土壤非饱和导水率和模拟土壤水分、溶质运移具有重要意义<sup>[14]</sup>。同时  $K_s$  受土壤质地、孔隙度、有机质和耕作方式等空间变量的影响,使其在空间上呈现出强烈的变异性<sup>[15-16]</sup>。在宁夏中部旱区压砂地研究  $K_s$  的空间分布及影响因素,对探索该区域水分运动规律、防治土壤干燥化都具有十分重要的意义。因此,以  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  网格方式采样,利用经典统计和地统计学方法,研究宁夏中部旱区典型压砂瓜田的耕层( $0 \sim 10 \text{ cm}$ )和亚耕层( $10 \sim 20 \text{ cm}$ )原状土  $K_s$  的空间变异特征和分布格局,并分析土壤容重、孔隙度等土壤基本性质对  $K_s$  的影响,旨在为研究区农田管理和防治压砂地干燥

化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

取样地点选在宁夏中部干旱带的中卫香山兴仁镇。地理坐标为东经  $105^\circ 47' \sim 105^\circ 59'$ ,北纬  $37^\circ 17' \sim 38^\circ 28'$ ,海拔  $1\,679 \sim 1\,680 \text{ m}$ ,多年平均气温  $13.5^\circ\text{C}$ 、日照时数  $2\,990 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ 、平均降水量  $250 \sim 270 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,无霜期  $170 \sim 175 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。夏季酷热,冬季寒冷,气候干燥,属宁南温暖风沙干旱区<sup>[17]</sup>。取样地块平整,种植作物为西瓜。

### 1.2 样点布设及土样采集

在 2013 年 4 月上旬整地前进行土壤样品采集。经过前期调研和采样分析,该田块土壤性质、耕作方式及种植作物在研究区具有代表性。其表层土壤( $0 \sim 10 \text{ cm}$ )平均粘粒含量为  $10.47\%$ 、粉粒含量为  $23.85\%$ 、砂粒含量为  $65.68\%$ 、有机质含量  $3.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮含量  $0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷含量  $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾含量  $19.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量  $4.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量  $162.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;压砂厚度约为  $15 \text{ cm}$ 、粒径为  $4 \sim 6 \text{ cm}$ 、压砂年限为 3 年;种植作物为硒砂瓜。按照  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  网格方式采集土壤样品,采样点为 110 个,在每个采样点位置  $0 \sim 10 \text{ cm}$  和  $10 \sim 20 \text{ cm}$  深度分别采集原状土和扰动土,其中原状土利用环刀采集,采集土壤样品总数为 220 个。取样点位置分布详见图 1。

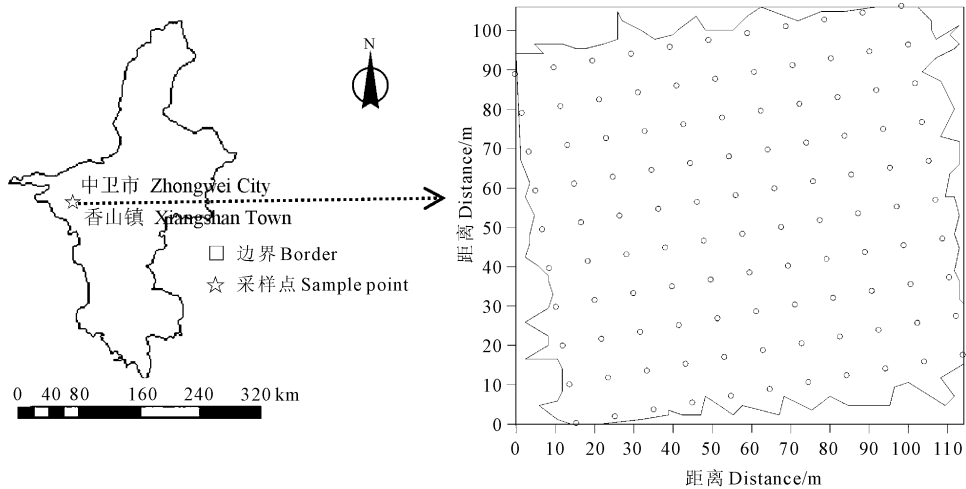


图 1 研究区样点布设

Fig.1 Locations of the sampling points

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤饱和导水率( $K_s$ )测定 用定水头法测定采样点原状土壤  $K_s$ ,根据质量守恒定律和达西定

律得出  $K_s$  的计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$K = 10Q \times L/A \times \Delta H \times t \quad (1)$$

式中, $K$  为饱和导水率,  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $Q$  是渗透量,

mL;  $L$  为土层厚度, cm;  $\Delta H$  是渗流路径的总水头差, cm;  $t$  是渗透时间, min;  $A$  是水流经过的横截面积,  $\text{cm}^2$ 。10 是将厘米转化成毫米。

为了使不同温度下所测得的  $K$  值便于比较, 将其换算成 10℃ 时的饱和导水率:

$$K_s = K / (0.7 + 0.03t) \tag{2}$$

式中,  $K_s$  为温度 10℃ 时的饱和导水率,  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $t$  为测定时水的温度, ℃。

1.3.2 土壤容重、饱和含水量、孔隙度及土壤有机质测定 用环刀法测定原状土土壤容重、饱和含水量、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度, 土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定<sup>[19]</sup>。

1.4 统计方法

分别采用经典统计学和地统计学分析  $K_s$  及相关性质的空间变异特征<sup>[20-21]</sup>。其公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \tag{3}$$

式中,  $r(h)$  为试验半方差函数,  $h$  为滞后距离,  $N(h)$  为相距  $h$  (滞后距离) 的数据点对数,  $Z(x)$  为区域化变量在  $x$  处实测值,  $Z(x+h)$  为区域化变量在  $x+h$  处实测值。

1.5 数据处理

采用拉依达准则处理异常数据 (显著水平为 0.01), 剔除了  $K_s$  的 1 个最大值, 然后使用剩余数据最大值代替<sup>[22]</sup>。利用 SPSS 17.0 对  $K_s$  及相关性质进行经典统计分析, 地统计分析在 GS+7.0 中完成, 普通克里格插值图利用 Surfer 8.0 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤导水特性描述性统计和正态分布检验

表 1 给出了压砂地土壤导水特性及其相关因素的描述性统计值。0~10 cm 和 10~20 cm 深度下土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度的变异系数 ( $CV$ ) 小于 0.1, 表现为弱变异; 饱和含水量和土壤有机质含量表现为中等变异 ( $0.1 < CV < 1$ )。0~10 cm 深度下  $K_s$  的变异系数为 0.80, 表现为中等变异, 而 10~20 cm 深度下  $K_s$  的变异系数为 1.17, 表现为强变异。这与以往的研究结果一致<sup>[23-24]</sup>。偏度和峰度系数说明压砂地土壤导水特性及其相关因素的正态分布特点。从统计结果来看, 两个取样深度下容重和 10~20 cm 深度下  $K_s$  的偏度值为负值, 表明分布峰为左偏。其它土壤性质的偏度值为正值, 表明分布峰为右偏。同时通过  $K_s$  检验可知, 除了 0~10 cm 深度下  $K_s$ 、有机质含量和 10~20 cm 的  $K_s$  不符合正

态分布外其它的土壤性质均符合正态分布。对  $K_s$  和有机质含量进行对数转换后, 其符合对数正态分布特征。通过平均值分析可以看出, 10~20 cm 深度下土壤容重小于 0~10 cm 深度, 其他土壤性质的平均值均大于 0~10 cm 深度, 这与以往普遍认为耕层土壤透水性和通气性要高于底层土壤的结果不一致<sup>[25-27]</sup>。同时与未压砂的土壤相比 ( $K_s$  平均值为  $0.06 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、容重均值为  $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、饱和含水量均值为 30%、总孔隙度均值为 46%、毛管孔隙度均值为 35%), 压砂土壤呈现出容重变大、孔隙度和土壤饱和导水率变小的现象。出现上述情况的原因是压砂这种特殊的耕作方式导致的, 15 cm 左右厚度砾石压在土壤上导致表层土壤紧实, 导水性能较未压砂和下层土壤差。

2.2 土壤导水特性空间变异特征

由于土壤物理性质的分布是空间连续的, 描述性统计只能说明土壤性质变化的全貌, 但难以完全反映其结构性、随机性和相关性等, 运用地统计学方法可以弥补上述缺陷<sup>[28]</sup>。利用半方差函数 (公式 1) 计算并用不同模型进行拟合, 获得模型相关参数值, 选取残差平方和最小、决定系数最大的模型。土壤导水特性及其相关属性的半方差函数模型及其参数见表 2。0~10 cm 深度下  $K_s$  和容重符合线性模型; 饱和含水量和总孔隙度符合球形模型; 毛管孔隙度和有机质含量符合高斯模型。 $K_s$  和容重的块金系数为 100%, 表现为纯块金效应, 土壤各样点之间表现出较强的随机性和独立性, 主要受随机性因素 (施肥、耕作等) 的影响。饱和含水量、总孔隙度和有机质含量的块金系数均小于 25%, 说明主要受结构性因素 (气候、地形和土壤质地等) 的影响, 具有强烈的空间相关性。毛管孔隙度的块金系数均介于 25%~75% 之间, 表现出中等空间依赖性, 说明二者的空间分布特征受随机性因素和结构性因素的共同影响。10~20 cm 深度下  $K_s$  和土壤含水量符合高斯模型; 容重符合线形模型; 饱和含水量和总孔隙度符合球形模型; 毛管孔隙度符合指数模型。容重的块金系数为 100%, 表现为纯块金效应, 各样点之间表现出较强的独立性和随机性, 主要受随机因素的影响。其它土壤性质的块金系数均小于 25%, 说明主要受结构性因素的影响, 具有强烈的空间自相关性。廖凯华等<sup>[23]</sup>在研究大沽河流域  $K_s$  空间变异特征时也发现表层其具有弱空间相关性。牛海山等<sup>[29]</sup>分析放牧对  $K_s$  空间变异的影响也得出相同的结论。

表 1 压砂地土壤导水特性及相关因素描述性统计值

Table 1 Descriptive statistics for soil hydraulic characteristics and related properties in the gravel mulched field

| 深度/cm<br>Depth | 土壤性质<br>Soli properties                                  | 平均值<br>Mean | 标准差<br>SD | 极小值<br>Min. | 极大值<br>Max. | 极差<br>Difference | 变异系数<br>CV | 偏度<br>Skewness | 峰度<br>Kurtosis | KS 检验<br>KS test | 分布类型<br>Distribution |
|----------------|----------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|------------------|------------|----------------|----------------|------------------|----------------------|
| 0 ~ 10         | 饱和导水率<br>$K_s/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$           | 0.05        | 0.04      | 0.002       | 0.16        | 0.16             | 0.80       | 0.68           | -0.39          | 1.47             | LN                   |
|                | 容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$<br>Bulk density      | 1.53        | 0.07      | 1.36        | 1.73        | 0.37             | 0.05       | -0.02          | 0.08           | 0.78 *           | N                    |
|                | 饱和含水量/%<br>Saturation moisture                           | 26.77       | 2.83      | 20.72       | 34.20       | 13.48            | 0.11       | 0.56           | 0.23           | 0.91 *           | N                    |
|                | 总孔隙度/%<br>Total porosity                                 | 42.20       | 2.63      | 34.75       | 48.60       | 13.85            | 0.06       | 0.01           | 0.06           | 0.56 *           | N                    |
|                | 毛细孔隙度/%<br>Capillary porosity                            | 34.94       | 2.85      | 28.47       | 42.25       | 13.78            | 0.08       | 0.26           | -0.06          | 0.72 *           | N                    |
|                | 有机质含量/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$<br>Organic matter | 3.99        | 1.38      | 2.73        | 16.91       | 14.18            | 0.35       | 7.66           | 70.93          | 2.48             | LN                   |
| 10 ~ 20        | 饱和导水率<br>$K_s/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$           | 0.06        | 0.07      | 0.001       | 0.45        | 0.45             | 1.17       | 3.38           | 14.33          | 2.14             | LN                   |
|                | 容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$<br>Bulk density      | 1.46        | 0.08      | 1.28        | 1.63        | 0.35             | 0.05       | -0.05          | -0.52          | 0.70 *           | N                    |
|                | 饱和含水量/%<br>Saturation moisture                           | 29.47       | 3.17      | 23.51       | 37.42       | 13.91            | 0.11       | 0.25           | -0.46          | 0.56 *           | N                    |
|                | 总孔隙度/%<br>Total porosity                                 | 45.12       | 3.06      | 38.49       | 51.87       | 13.38            | 0.07       | 0.05           | -0.48          | 0.48 *           | N                    |
|                | 毛细孔隙度/%<br>Capillary porosity                            | 36.51       | 2.52      | 31.45       | 43.00       | 11.55            | 0.07       | 0.19           | -0.59          | 0.76 *           | N                    |
|                | 有机质含量/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$<br>Organic matter | 4.22        | 0.61      | 3.05        | 5.96        | 2.91             | 0.14       | 0.27           | 0.68           | 1.04 *           | N                    |

注：\* LN—对数正态分布类型；N—正态分布类型。\*  $P < 0.05$ 。

Note: LN—Lognormal distribution; N—Normal distribution.

表 2 压砂地土壤导水特性及相关因素半方差函数理论模型及参数

Table 2 Semivariogram model and corresponding parameters of soil hydraulic characteristics and related properties in the gravel mulched field

| 深度/cm<br>Depth | 土壤性质<br>Soli properties      | 模型<br>Model | 变程<br>Range/m | 块金值<br>Nugget( $C_0$ ) | 基台值<br>Sill( $C_0 + C$ ) | 块金系数/%<br>$C_0/(C_0 + C)$ | 决定系数<br>$R^2$ | 残差<br>RSS             |
|----------------|------------------------------|-------------|---------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|-----------------------|
| 0 ~ 10         | 饱和导水率 $K_s$                  | L           | 42.26         | 0.001                  | 0.001                    | 100.00                    | 0.57          | $1.18 \times 10^{-3}$ |
|                | 容重 Bulk density              | L           | 42.26         | 0.006                  | 0.006                    | 100.00                    | 0.68          | $2.56 \times 10^{-4}$ |
|                | 饱和含水量<br>Saturation moisture | S           | 9.90          | 0.75                   | 8.61                     | 8.71                      | 0.59          | $3.08 \times 10^{-3}$ |
|                | 总孔隙度 Total porosity          | S           | 9.90          | 1.88                   | 8.53                     | 22.04                     | 0.71          | 0.23                  |
|                | 毛细孔隙度 Capillary porosity     | G           | 2.60          | 2.93                   | 9.15                     | 32.02                     | 0.66          | 5.86                  |
|                | 有机质含量 Organic matter         | G           | 23.73         | 0.001                  | 1.71                     | 0.001                     | 0.68          | 0.68                  |
| 10 ~ 20        | 饱和导水率 $K_s$                  | G           | 23.90         | 0.00001                | 0.006                    | 0.17                      | 0.74          | $1.94 \times 10^{-3}$ |
|                | 容重 Bulk density              | L           | 42.26         | 0.008                  | 0.008                    | 100.00                    | 0.59          | $1.34 \times 10^{-3}$ |
|                | 饱和含水量<br>Saturation moisture | S           | 9.90          | 1.00                   | 10.76                    | 9.29                      | 0.62          | $7.23 \times 10^{-3}$ |
|                | 总孔隙度 Total porosity          | S           | 9.90          | 2.76                   | 11.71                    | 23.57                     | 0.67          | 2.16                  |
|                | 毛细孔隙度 Capillary porosity     | E           | 0.60          | 1.00                   | 6.698                    | 14.93                     | 0.54          | 0.88                  |
|                | 有机质含量 Organic matter         | G           | 16.97         | 0.001                  | 0.32                     | 0.003                     | 0.88          | $2.09 \times 10^{-3}$ |

注：\* G—高斯模型，E—指数模型，S—球形模型，L—线形模型。

Note: G—Gauss model, E—Exponential model, S—Spherical model, L—Line model.

2.3 土壤导水特性空间分布特征

地统计学分析可以解释土壤导水特性及其相关因素的空间结构特征,但其提供的信息仍有限。所

以借助 Surfer 软件分别对 0~10 cm 和 10~20 cm 深度土壤导水特性及其相关因素进行普通克里格插值并绘制空间分布图(图 2、3)。

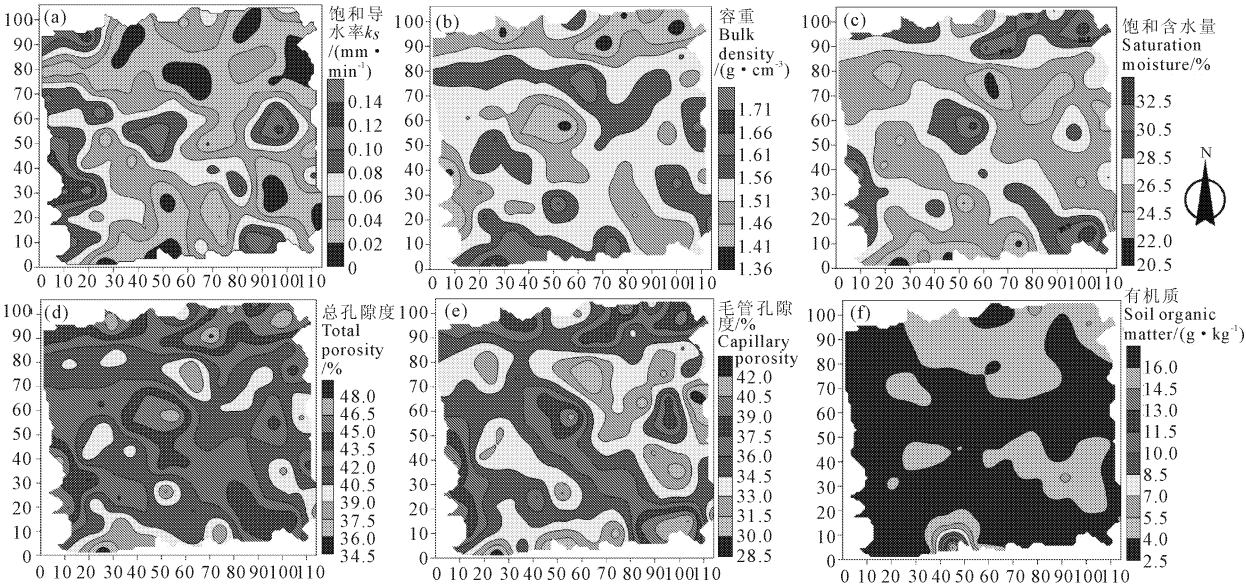


图 2 压砂地 0~10 cm 土层土壤饱和导水率(a)、容重(b)、饱和含水量(c)、总孔隙度(d)、毛管孔隙度(e)和土壤有机质含量(f)空间分布

Fig.2 Spatial distribution of  $K_s$  (a), bulk density (b), saturation moisture (c), total porosity (d), capillary porosity (e) and soil organic matter (f) in 0~10 cm soil depths in the gravel mulched field

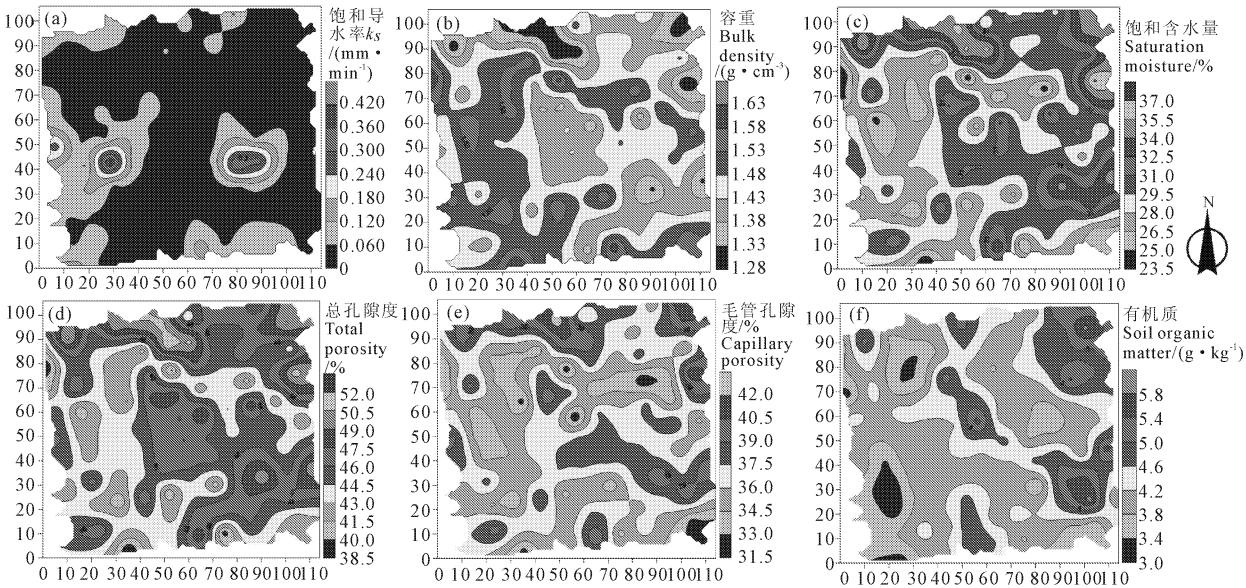


图 3 压砂地 10~20 cm 土层土壤饱和导水率(a)、容重(b)、饱和含水量(c)、总孔隙度(d)、毛管孔隙度(e)和土壤有机质含量(f)空间分布

Fig.3 Spatial distribution of  $K_s$  (a), bulk density (b), saturation moisture (c), total porosity (d), capillary porosity (e) and soil organic matter (f) in 10~20 cm soil depths in the gravel mulched field

从图中可以看出,2 个采样深度下  $K_s$  与容重存在高度的负相关关系,与饱和含水量、总孔隙度和毛管孔隙度存在高度的正相关关系。 $K_s$ 、容重、饱和

含水量、总孔隙度和毛管孔隙度的空间插值图除存在数值上的差异外,其密集程度和走向都非常相似。这一现象和 Duffera 等、Wang 等<sup>[24,26]</sup>文章中插值图

所描述的情况一致。这一现象也说明  $K_s$  受土壤容重、孔隙分布以及土壤水分含量等空间变量的影响,导致其在空间分布上呈现出结构性和变异特征。0 ~ 10 cm 深度下  $K_s$  西部高,向东部逐渐递减,饱和含水量、总孔隙度和毛管孔隙度都在东北方向和东南方向上存在数值较高的区域,容重在西南方向上较高。有机质含量在空间上分布较为均匀,仅在南部边缘含量较高。总体上土壤导水特性及其相关因素在空间上呈现出较为明显的斑块状分布特征。

2.4 土壤导水特性 Pearson 相关性分析

通过 Pearson 相关性分析可知,  $K_s$  与容重和有机质含量呈显著负相关,  $K_s$  与总孔隙度、毛管孔隙度间具有极显著正相关关系,  $K_s$  与饱和含水量呈显

著正相关关系。说明当  $K_s$  减小时,土壤呈现出粘重、紧实、透水性和通气性差的特点。容重与  $K_s$ 、饱和含水量、总孔隙度、毛管孔隙度和有机质含量均呈现显著负相关关系。从 Pearson 相关系数的大小可以看出,影响压砂地  $K_s$  的主要因素是毛管孔隙度,其次为容重、总孔隙度、饱和含水量和有机质含量。而张扬等<sup>[30]</sup>研究表明影响农地  $K_s$  的主要因子为有机质含量和毛管孔隙度。吕殿青<sup>[31]</sup>等和贺康宁<sup>[32]</sup>研究表明容重对  $K_s$  的影响最大。这些结论说明在不同区域影响  $K_s$  的主要因子存在明显的差异性,应该根据研究区的土壤理化性质进行具体分析<sup>[33]</sup>。关于研究区土壤饱和导水率的其他可能的影响因素,如植被、土壤水分、温度等因素还有待进一步研究。

表 3 压砂地土壤导水特性及相关因素 Pearson 相关性分析

| 土壤性质<br>Soil properties   | 饱和导水率<br>$K_s$ | 容重<br>Bulk density | 饱和含水量<br>Saturation moisture | 总孔隙度<br>Total porosity | 毛管孔隙度<br>Capillary porosity | 有机质含量<br>Organic matter |
|---------------------------|----------------|--------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 饱和导水率 $K_s$               | 1              |                    |                              |                        |                             |                         |
| 容重 Bulk density           | - 0.179 **     | 1                  |                              |                        |                             |                         |
| 饱和含水量 Saturation moisture | 0.161 *        | - 0.952 **         | 1                            |                        |                             |                         |
| 总孔隙度 Total porosity       | 0.180 **       | - 0.999 **         | 0.952 **                     | 1                      |                             |                         |
| 毛管孔隙度 Capillary porosity  | 0.252 **       | - 0.848 **         | 0.921 **                     | 0.849 **               | 1                           |                         |
| 有机质含量 Organic matter      | - 0.150 *      | - 0.128            | 0.131                        | 0.125                  | 0.063                       | 1                       |

注: \* 表示在 0.05 水平下显著, \*\* 表示在 0.01 水平下显著。  
Note: \*\* Correlation is significant at the 0.01 level, \* Correlation is significant at the 0.05 level.

3 结 论

本文应用地统计学和经典统计学相结合的方法,以宁夏中部旱区压砂农田为例,研究了  $K_s$  及相关因素的空间变异特征及其影响因素。主要结论如下:

- 1) 经典统计结果表明,除  $K_s$  服从对数正态分布外,其余土壤性质服从正态分布。2 个采样深度下土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度表现为弱变异,饱和含水量和有机质含量表现为中等变异。0 ~ 10 cm 深度下  $K_s$  表现为中等变异,10 ~ 20 cm 深度下  $K_s$  表现为强变异。10 ~ 20 cm 深度下土壤各种性质的平均值均稍大于 0 ~ 10 cm 深度。
- 2) 地统计结果表明,0 ~ 10 cm 深度下  $K_s$  表现为纯块金效应,主要受随机性因素(施肥、耕作等)的影响。10 ~ 20 cm 深度下  $K_s$  的块金系数小于 25%,主要受结构性因素(气候、地形和土壤质地等)的影响。在 2 个采样深度下容重主要受随机因素的影响。
- 3) 由普通克里格插值分布图可以看出,2 个采

样深度下  $K_s$  与容重存在高度的负相关关系,与饱和含水量、总孔隙度和毛管孔隙度存在高度的正相关关系。 $K_s$ 、容重、饱和含水量、总孔隙度和毛管孔隙度的空间插值图除存在数值上的差异外,其密集程度和走向都非常相似。其空间分布图可为该地区土壤有效利用、土壤水盐运移模拟和植被建设等提供一定的数据支持和理论指导。

参 考 文 献:

[1] 马国飞,张晓煜,张磊,等.宁夏压砂地土壤水分动态及消耗规律分析[J].宁夏农林科技,2011,31(1):4-7.

[2] 逢蕾,肖洪浪,谢忠奎,等.砂田不同覆盖方式对土壤微生物组成的影响[J].中国沙漠,2012,32(2):351-358.

[3] 王永忠,牛国元,许强,等.宁夏中部干旱带压砂地耕作方式的生态功能[J].水土保持通报,2010,30(3):163-167.

[4] 赵燕,李成军,康建宏,等.砂田的发展及其在宁夏的应用研究[J].农业科学研究,2009,30(2):35-38.

[5] 王平,谢成俊,陈娟.不同种植年限砂田水盐变化与砂田退化初探[J].水土保持通报,2012,32(2):251-254.

[6] 赵小勇,田军仓.宁夏压砂地西瓜自然降水生产力及障碍因子分析[J].节水灌溉,2012,(5):16-18.

[7] 逢蕾,肖洪浪,路建龙,等.干旱半干旱地区砂田结构及水分

特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 698-704.

[8] 许 强, 吴宏亮, 康建宏, 等. 旱区砂田肥力演变特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 37-41.

[9] 马 波, 田军仓. 老压砂地西瓜水肥效应研究[J]. 节水灌溉, 2012, (7): 5-9.

[10] Li Xiao Yan. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semiarid region of China[J]. Journal of hydrology, 2002, 260(1-4): 151-160.

[11] 谢忠奎, 王亚军, 陈士辉, 等. 黄土高原西北部砂田西瓜集雨补灌效应研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2032-2039.

[12] Xie Zhongkui, Li Fengmin, Wang Yajun, et al. The effect of supplemental irrigation on watermelon (*Citrullus lanatus*) production in gravel and sand mulched fields in the Loess Plateau of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(1): 29-41.

[13] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 区域尺度土壤入渗参数空间变异性规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 102-108.

[14] 黄琳琦, 向业凤, 魏孝荣, 等. 六盘山林区土壤物理性质分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 60-65.

[15] Moustafa M M. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt[J]. Agricultural Water Management, 2000, 42(3): 291-312.

[16] 王卫华, 王全九. 基于 GPS 与 GE 的土壤水力参数空间变异采样间距确定[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 97-100.

[17] 李丁仁, 鲁长才, 周 旋, 等. 宁夏压砂地生产现状与可持续发展建议[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(1): 1-3, 42.

[18] 白一茹, 王幼奇, 展秀丽. 陕北农牧交错带土地利用方式对土壤物理性质及分布特征的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1619-1627.

[19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.

[20] 宋 玉, 塔西甫拉提·特依拜, 吴雪梅, 等. 于田绿洲不同季节表层土壤盐渍化程度的空间变异特征[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 171-175.

[21] 李志鹏, 赵业婷, 常庆瑞. 渭河平原县域农田土壤速效养分空间特征[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 163-170.

[22] 张 敏, 袁 辉. 拉依达(PauTa)准则与异常值剔除[J]. 郑州工业大学学报, 1997, 18(1): 84-88.

[23] 廖凯华, 徐绍辉, 程桂福. 大沽河流域土壤饱和和导水率空间变异特征[J]. 土壤, 2009, 41(1): 147-151.

[24] Duffera M, White J G, Weisz R. Spatial variability of Southeastern US Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management[J]. Geoderma, 2007, 137(3): 327-339.

[25] Miao Y, Mulla D J, Robert P C. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: implications for precision corn management[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(1): 5-20.

[26] Wang Y Q, Shao M G. Spatial variability of soil Physical properties in a region of the loess plateau of PR China subject to wind and water erosion[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(3): 296-304.

[27] ÖZGÖZ E, GÜNAL H, ÖNEN H, et al. Effect of management on spatial and temporal distribution of soil physical properties [J]. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi – Journal of Agricultural Sciences, 2012, 18(1): 77-91.

[28] Bai Y R, Wang Y K. Spatial variability of soil chemical properties in a Jujube slope on the Loess Plateau of China[J]. Soil Science, 2011, 176(10): 550-558.

[29] 牛海山, 李香真, 陈佐忠. 放牧率对土壤饱和和导水率及其空间变异的影响[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 211-216.

[30] 张 扬, 赵世伟, 华 娟. 宁南山区草地植被恢复方式对土壤饱和和导水率的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7: 100-104.

[31] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 154-157.

[32] 贺康宁. 水土保持林地土壤水分物理性质的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(3): 44-50.

[33] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和和导水率比较研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 469-477.



(上接第 37 页)

[10] 王 敏, 张从宇, 姚维传, 等. 不同生育期干旱胁迫对小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(5): 605-607, 610.

[11] 张玉书, 米 娜, 陈鹏狮, 等. 土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 1-7.

[12] 单玉芬, 王立坤, 马永胜, 等. 不同水分亏缺对向日葵产量、水分利用效率及经济效益的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(7): 70-73.

[13] 胡树平, 高聚林, 吕佳雯, 等. 源库调节对向日葵产量及其构成的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(8): 52-58.

[14] Plaut Z, Butow B J, Blumenthal C S, et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature[J]. Field Crops Research, 2004, 86: 185-198.

[15] Ehdaie B, Alloush G A, Madore M A, et al. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat[J]. Crop Science, 2006, 46: 735-746.

[16] 田纪春, 邓志英, 胡瑞波, 等. 不同类型超级小麦产量构成因素及籽粒产量的通径分析[J]. 作物学报, 2006, 32(11): 1699-1705.

[17] 韩惠芳, 赵丹丹, 沈加印, 等. 灌水量和时期对宽幅精播冬小麦产量及品质特性的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 109-114.

[18] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 455-463.