

# 土壤及喷灌水量不均匀性 对干旱区春小麦产量影响的试验研究

李久生<sup>1</sup>, 饶敏杰<sup>2</sup>, 张建君<sup>2</sup>

(1. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心; 2 中国农业科学院农业气象研究所)

**摘要:** 在一种土壤特性变异程度较大的砂土及壤质砂土上, 对干旱地区喷灌条件下春小麦生育期内的土壤水分空间分布、作物产量等进行了监测, 研究了田间持水量及土壤机械组成的空间变化特性。对田间持水量及土壤机械组成的统计分布及空间变异规律的分析结果表明, 田间持水量可以用正态分布和对数正态分布来描述, 土壤细颗粒(粒径 < 0.02 mm)含量服从对数正态分布; 田间持水量随土壤细颗粒含量的增加而明显增大, 细颗粒含量离散程度较大时, 田间持水量的离散程度也较大。田间试验结果还表明, 喷灌均匀系数和可利用水量(田间持水量与凋萎系数之差)的离散程度对作物产量及其分布均有影响, 但对所试验地块而言, 可利用水量的离散程度对作物产量的影响更明显。在制订喷灌均匀系数设计标准时, 土壤特性的空间变异也应作为一个考虑因素。由于干旱地区作物生育期降水量明显小于湿润和半湿润地区, 降水难以弥补灌水不均匀对产量带来的负面影响, 因此干旱地区喷灌均匀系数设计标准一般应高于湿润和半湿润地区。

**关键词:** 喷灌; 土壤; 空间变异; 干旱地区; 春小麦; 产量

**中图分类号:** S275.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 100226819(2002)0320015207

影响作物产量的因素非常复杂, 土壤固有的性质和灌水特性是影响产量的两个重要因子。即使气候条件、耕作措施、灌溉与施肥状况完全一致, 同一地块不同位置处的产量仍存在差异, 造成这一差异的主要原因是土壤特性本身的空间变异。1 m 土层(作物根系活动层)在陆地水圈中水分转化最活跃, 对人类生产活动影响最大, 这一层次土壤水分状况对作物产量具有重要影响, 研究 1m 土层土壤持水能力的空间变异特性, 对探明土壤特性空间变化对作物产量的影响具有重要意义。

作物产量与土壤及灌水量之间的关系可概念性地表示为<sup>[1]</sup>

$$\bar{y} = \int_{w_0}^1 y f(w, w_e) dw_e \quad (1)$$

式中  $\bar{y}$ ——相对产量(实际产量/最大产量);  
 $y$ ——作物水分生产函数;  $w$ ——灌水量;  $w_0$ ——作物水分生产函数在  $w$  轴上的截距;  $w_e$ ——作物可利用水量(扣除深层渗漏等损失);  $f(w, w_e)$ —— $w$ 、 $w_e$  的联合概率密度函数。

在假定  $w_e$  为常数, 灌水量分布均匀的前提下, 国内外对产量与需水量(或灌水量)之间的关系进行

了长期而卓越的研究, 陈玉民等<sup>[2]</sup>和 Howell<sup>[3]</sup>分别就国内外在这方面的研究成果进行了较全面综述。在假定土壤特性均一的情况下, 对灌水均匀系数对作物产量的影响进行了模拟<sup>[4~7]</sup>和田间试验研究<sup>[8~10]</sup>。Warrick 和 Gardner<sup>[11]</sup>假定水分生产函数为线性, 模拟了灌水量和土壤不均匀性对作物产量的影响, 指出灌水量和土壤特性分布的均匀程度对作物产量均有影响。在已有文献中尚未见到同时就喷灌水量和土壤不均匀性对产量影响所进行的试验研究。

喷灌洒水的均匀程度通常用克里斯琴森均匀系数  $CU$  来定量描述<sup>[11]</sup>, 其定义为

$$CU = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N 2 Bx_i - \bar{x} B}{N \bar{x}} \right) \quad (2)$$

式中  $x_i$ ——第  $i$  测点的灌水深度;  $\bar{x}$ ——平均灌水深度,  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ;  $N$ ——测点数。

本文的目的是: 在干旱风沙区利用田间试验, 研究喷灌和土壤特性的分布对春小麦产量的影响, 评价灌水与土壤特性的空间变异对作物产量影响的相对重要性, 为干旱地区喷灌均匀系数设计标准的确定提供建议。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验布置

试验在水利部牧区水利科学研究所内蒙古达拉特旗试验基地进行, 该基地位于东经 109°58'、北纬

收稿日期: 2002201228

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 59779025, 50179037)及科技部公益性研究资助项目

作者简介: 李久生(1962~), 农学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。北京车公庄西路 20 号 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 100044

40 26, 属干旱区, 多年平均降水量 294.3 mm。春小麦 4 月 16 日播种, 行距 20 cm, 播种量 41.25 g $\bar{m}^2$ 。按喷灌均匀系数和土壤物理指标空间变异程度, 设置 3 个试验处理, 以下分别称为东处理、中处理和西处理, 试验布置见图 1。每个处理按 15 m  $\times$  15 m 的间距布置喷头, 选用 LEGO 公司生产的摇臂式喷头, 0.3 MPa 压力下的出水量为 0.8 m<sup>3</sup> $\bar{h}$ 。灌水时, 喷头以 90 $^\circ$  的扇形角向处理内喷水。通过调整每个处理内同时喷洒的喷头数量 (2~4 个) 来获得要求的喷灌均匀系数。春小麦播种前, 在 15 m  $\times$  45 m 的试验区内均匀布设了 5 个点, 按不同深度测定了土壤干容重并取样采用比重计法进行了土壤机械组成分析, 测定结果列于表 1, 试验地块的土壤为砂土及壤质砂土 (国际制), 土壤干容重沿深度变化很小, 1 m 土层平均干容重为 1.46 g $\bar{cm}^3$ 。采用双环入渗法测得的稳定土壤入渗速率为 0.3~0.4 mm $\bar{m} \bar{in}$ 。

表 1 土壤机械组成分析结果 (5 个剖面的平均值)

Table 1 Particle size distributions for the studied soil at different depths

深度 $\bar{cm}$	不同粒径含量 $\bar{\%}$			质地名称 (国际制)
	2~ 0.02 mm	0.02~ 0.002 mm	< 0.002 mm	
10~20	94.8	2.4	2.8	砂土及壤质砂土
20~40	96.8	1.0	2.2	砂土及壤质砂土
40~60	92.8	2.6	4.6	砂土及壤质砂土
60~80	89.8	5.6	4.6	砂土及壤质砂土

将每一 15 m  $\times$  15 m 的处理划分成 2.5 m  $\times$  2.5

m 的网格, 春小麦 7 月 17 日收获时, 在每一 2.5 m  $\times$  2.5 m 小区的中心取样 0.8 m<sup>2</sup>, 对其有效穗数、无效穗数、穗粒数、千粒重、籽粒总重等指标进行测定。

## 2.2 喷灌水量分布及土壤含水率的测定

在每一 15 m  $\times$  15 m 的处理内, 按 2.5 m  $\times$  2.5 m 的网格布置承雨筒, 测试喷灌水深及其分布, 承雨筒为圆柱形, 开口面积为 100 cm<sup>2</sup>。为了避免作物冠层对喷灌水量分布测定的影响, 承雨筒放置在高 75 cm 的支架上。土壤含水率采用取土烘干法测定, 每个处理内按 5 m  $\times$  5 m 的网格布置取样点 (每个处理 9 个点), 按 10 cm 的等间隔取样, 深度为 1 m。正常情况下每周测试一次土壤含水率, 灌水前和灌水后 1 d 各加测一次, 降雨后也加测一次。喷洒水量安装在水泵出水口处并经过体积法标定的水表测定。

## 2.3 灌溉

当 1 m 土层土壤水分消耗至田间持水量的 70%~75% 时即进行灌溉, 灌水上限为田间持水量, 每次灌水定额根据作物生育阶段调整, 一般控制在 40~60 mm。平均喷灌强度约为 12 mm $\bar{h}$ , 灌水过程中未发现地面径流。春小麦生育期内共灌水 11 次, 各次灌水的日期、灌水量和喷灌均匀系数列于表 2, 灌溉季节内的平均喷灌均匀系数  $CU_{\text{平均}}$  (各次灌水  $CU$  的算术平均值) 和累计灌水量均匀系数  $CU_{\text{累计}}$  也列入表中。

春小麦生育期内大于 5 mm 的有效降雨 2 次, 降水量共 17.2 mm。

表 2 春小麦生育期内各次灌水的日期、灌水量、喷灌均匀系数 ( $CU$ )

Table 2 Summary of applied depth, uniformity coefficients ( $CU$ ) and dates of each of the eleven irrigation events

序号	东处理			中处理			西处理		
	日期 $\bar{月} \bar{日}$	灌水量 $\bar{mm}$	$CU \bar{\%}$	日期 $\bar{月} \bar{日}$	灌水量 $\bar{mm}$	$CU \bar{\%}$	日期 $\bar{月} \bar{日}$	灌水量 $\bar{mm}$	$CU \bar{\%}$
1	04217	50.0	—	04217	55.0	—	04217	40.0	—
2	05212	48.7	80	05212	46.0	84	05212	51.5	85
3	05219	47.3	80	05218	39.4	72	05218	48.0	81
4	05223	44.7	79	05224	52.8	83	05225	50.2	82
5	05228	53.4	77	05229	41.4	81	05230	40.1	82
6	06203	60.5	72	06204	57.6	85	06204	58.3	89
7	06208	37.0	78	06209	43.6	76	06209	42.5	86
8	06216	44.0	76	06217	48.9	83	06217	48.9	90
9	06221	51.1	75	06221	48.8	86	06222	54.1	88
10	06225	52.7	82	06225	50.4	87	06226	51.4	90
11	07201	49.8	77	07202	50.9	85	07202	52.1	90
合计		539.2			534.8			537.1	
$CU_{\text{平均}}$			77			82			86
$CU_{\text{累计}}$			90			90			93

3 种子发芽水, 采用地面灌溉;  $CU_{\text{平均}}$ —灌水季节内各次灌水  $CU$  的算术平均值;  $CU_{\text{累计}}$ —灌水季节内累计灌水量的  $CU$  值。

## 2.4 土壤物理指标空间变异的测定

为了分析土壤特性的空间变异程度对作物产量

的影响, 对土壤持水能力和土壤机械组成的空间变异进行测试。

土壤持水能力空间变异测试: 春小麦收获后, 沿东西方向(一条直线)和南北方向(3 条直线, 图 1)按 1.25 m 的间距布置承雨筒, 测试喷灌水深及其分布。紧接着一次 32 mm 降雨(7 月 18 日)之后, 喷灌 53.4 mm。降雨和喷灌水量之和的均匀系数为 91%, 因此可以认为补充水量(降雨+ 灌水量)在试验区域(15 m × 45 m)内分布均匀。灌水结束 36 h 后, 沿东西方向条直线和南北方向直线分别按 1.25 m 的间隔取样测试土壤含水率, 测试深度为 1 m, 深度间隔为 0~ 10, 10~ 20, 20~ 40, 40~ 60, 60~ 80 和 80~ 100 cm, 测试点共计 73 个。由于试验地块土壤的砂粒含量很高(90% 以上, 表 1), 因此可以近似认为此时测得的土壤含水率可以较好地反映土壤的持水能力。

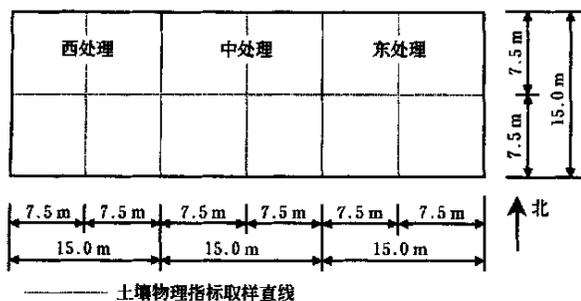


图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Schematics of the experimental plots

土壤机械组成空间变异测试: 首先对试验范围内土壤质地沿剖面的变化情况进行了调查, 发现在

60~ 80 cm 深度土壤质地变化较大, 而其它层次土壤质地基本均一, 因此对 60~ 80 cm 土壤质地的空间变异情况进行了研究。取样直线与土壤含水率测定相同(图 1), 取样间隔为 2.5 m, 共取样 37 个。土壤机械组成采用比重计法测定。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤持水能力的空间变异

表 3 列出了土壤含水率空间变异测试得到的不同深度土壤含水率的均值、变差系数(CV)等统计特征值, 从表中可以看出:

(1) 各处理及整个试验田块内, 土壤含水率变差系数均在 60~ 80 cm 层次最大, 在该层次内土壤质地、结构的变化最大; (2) 1 m 土层平均土壤含水率的变差系数一般小于分层取值时的变差系数。这一结果与杨诗秀和雷志栋<sup>[12]</sup>所得结论一致。土壤含水率变化的这一特点对田间土壤含水率取样十分有利; (3) 东、中、西 3 个处理及整个田块不同层次土壤含水率变差系数的最大值分别为 0.30、0.39、0.40 和 0.44, 最大值与最小值之比的最大值分别为 4.44、5.99、11.73 和 4.99, 这些值均大于杨诗秀和雷志栋<sup>[12]</sup>认为土壤性质变异程度较大田块的相应值, 这说明试验田块土壤特性的变异性较大; (4) 比较 3 个处理的土壤含水率变差系数可以看出, 西处理的土壤含水率离散程度最大, 中处理次之, 东处理最小; (5) 东、中、西 3 个处理的 1 m 土层储水量平均值分别为 139、180 和 197 mm。

表 3 不同深度土壤含水率在各处理以及整个地块内的统计特征值

Table 3 The values of mean and coefficient of variation (CV) for soil water content at different depths of each of the three experimental plots and the whole field

深度 cm	东处理			中处理			西处理			整个田块		
	均值	CV	最大δ最小									
0~ 10	12.63	0.218	3.38	13.54	0.103	1.77	16.13	0.112	1.92	14.12	0.179	2.55
10~ 20	10.53	0.138	2.12	11.40	0.142	3.08	15.02	0.225	4.36	12.32	0.244	2.99
20~ 40	12.19	0.141	2.32	15.88	0.392	5.03	19.40	0.302	5.99	15.88	0.368	4.99
40~ 60	17.13	0.260	4.70	25.96	0.220	3.85	20.53	0.308	4.56	21.29	0.312	4.14
60~ 80	12.57	0.298	4.32	23.54	0.351	5.99	20.83	0.395	8.98	19.13	0.443	4.81
80~ 100	16.00	0.215	4.44	12.21	0.272	3.54	22.27	0.405	11.73	17.03	0.420	4.78
1 m 平均	13.90	0.097	1.82	18.01	0.182	2.82	19.72	0.230	3.44	17.31	0.237	2.65

注: 各处理的取样数目为 25, 整个地块为 73。

为了确认是否可以将土壤含水率空间变异试验中测得的 1 m 土层储水量近似为田间持水量, 将空间变异试验测得的储水量值与春小麦生育期内灌水 1 d 后 1 m 土层储水量的最大值进行了对比, 发现东、中、西 3 个处理的灌水 1 d 后的 1 m 土层储水量最大值(分别为 151、188 和 193 mm)与土壤含水率空间变异试验中测得的 1 m 储水量相近, 故可将土

壤含水率空间变异试验中测得的 1 m 储水量近似为田间持水量。

为了确定田间持水量是否服从正态分布和对数正态分布, 对测试数据进行了 Kolmogorov-Smirnov 检验。Kolmogorov-Smirnov 检验的判别指标为:

$$D_n = \max |F_n(x) - F(x)| \quad (0 \leq x \leq x_{max}) \quad (3)$$

式中  $D_n$ —— 累计分布与经验分布差值的最大值;

$F_n$ ——正态累计分布;  $F$ ——观测值的经验分布;  
 $x_{max}$ ——观测值中的最大值。

表 4 列出了 Kolmogorov-Smirnov 的检验结果, 在  $A=0.05$  的显著水平下, 可以认为田间持水量服从正态分布或对数正态分布, 但与对数正态分布的拟合情况更好一些。

### 3.2 土壤机械组成的空间变异

表 4 田间持水量、粒径小于 0.02 mm 颗粒百分数及春小麦生育期累计喷灌水量的 Kolmogorov-Smirnov 检验结果

Table 4 The Kolmogorov-Smirnov goodness of fit statistics for cumulative distribution function vs the empirical data for field holding capacity, silt and clay content and seasonal water application depth

	田间持水量				< 0.02 mm 颗粒%	累计喷灌水量		
	东处理	中处理	西处理	整个田块	整个田块	东处理	中处理	西处理
样本数	25	25	25	73	37	36	36	36
$D_n$ 正态	0.11	0.07	0.11	0.10	0.27	0.11	0.08	0.10
$D_n$ 对数	0.09	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.09	0.11
$D_n(A=0.05)$	0.24	0.24	0.24	0.14	0.20	0.20	0.20	0.20

表 5 各试验处理及整个田块 60~80 cm 土层机械组成的统计特征值

Table 5 The values of mean and coefficient of variation (CV) for cumulative percentages less than a given diameter at 60 to 80 cm depth of each of the three experimental plots and the whole field

	东处理				中处理			
	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	<0.02 mm	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	<0.02 mm
均值%	94.6	3.4	2.0	5.4	92.6	4.6	2.8	7.4
CV	0.03	0.42	1.43	0.46	0.04	0.42	0.88	0.50
	西处理				整个田块			
	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	<0.02 mm	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	<0.02 mm
均值%	86.8	6.8	6.4	13.2	91.1	5.0	3.9	8.9
CV	0.20	1.16	1.56	1.34	0.12	0.99	1.65	1.24

为了分析土壤细颗粒含量对田间持水量的影响, 图 2 绘出了 1m 土层田间持水量与 60~80 cm 土层细颗粒(粒径小于 0.02 mm)含量的关系。该图清楚地显示出, 田间持水量随细颗粒含量的增加而增加。

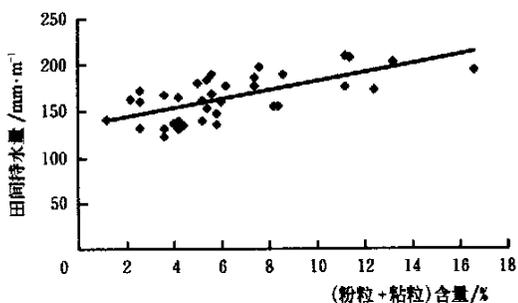


图 2 1 m 土层田间持水量与粒径小于 0.02 mm 颗粒百分数的关系  
 Fig. 2 Field holding capacity as function of silt and clay contents

试验田块 60~80 cm 土层粒径小于 0.02 mm 颗粒百分数的 Kolmogorov-Smirnov 检验结果也列

入表 4, 在  $A=0.05$  的显著水平下, 粒径小于 0.02 mm 颗粒百分数不服从正态分布, 但服从对数正态分布(图 3)。

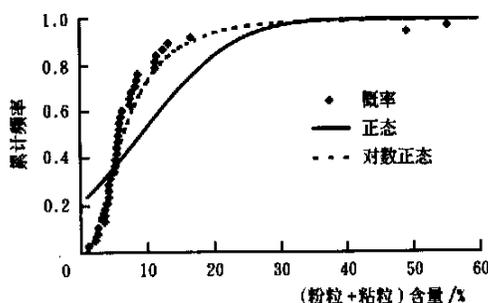


图 3 粒径小于 0.02 mm 颗粒百分数的累计概率分布及其与正态分布和对数正态分布的拟合情况  
 Fig. 3 Cumulative frequency distributions of silt and clay contents and their fitness to normal and lognormal distribution functions

### 3.3 喷灌水量及土壤特性空间变异对作物产量的影响

东、中、西 3 个处理春小麦灌溉季节内的 1 m 土

层储水量均匀系数和喷灌均匀系数变化情况绘于图 4, 三个处理 1 m 储水量均匀系数变化范围分别为 88% ~ 98%、73% ~ 84% 和 78% ~ 94%, 平均值分别为 93%、78% 和 86%。Li 和 Kawano<sup>[13]</sup>在火山灰

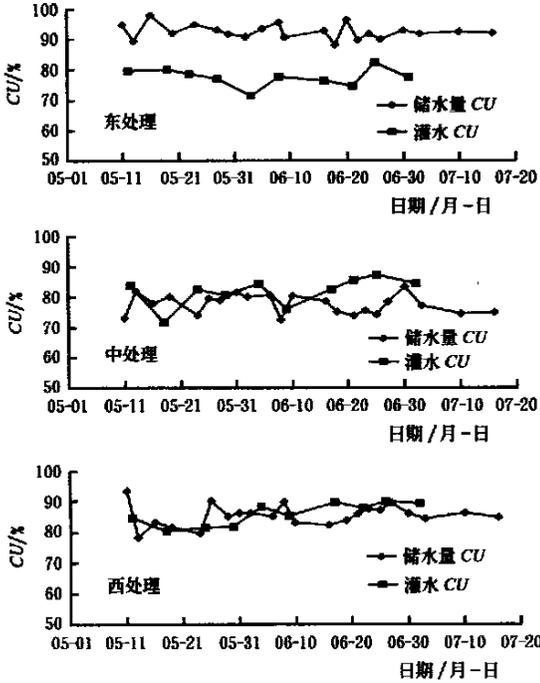


图 4 春小麦生育期内 1 m 土层储水量均匀系数及喷灌均匀系数的变化情况

Fig 4 Variations of uniformity coefficients (CU) for water storages within 1 m depth and sprinkler water during the growing season of spring wheat

和砂壤土两种土壤测试了不同喷灌均匀系数时水分在土壤中的再分布规律, 试验结果指出, 即使在喷灌均匀系数小于 50% 的情况下, 土壤含水率均匀系数仍然超过 90%; 李久生和饶敏杰<sup>[10]</sup>在砂质粘壤土上, 对冬小麦灌溉季节内 1m 土层储水量均匀性的监测结果表明, 尽管喷灌均匀系数在灌溉季节内变化较大(57% ~ 89%), 但土壤储水量均匀系数一直保持在 90% 以上。本试验中东、中、西 3 个处理喷灌均匀系数的变化范围分别为 72% ~ 82%、72% ~ 82% 和 81% ~ 90%, 高于李久生和饶敏杰<sup>[10]</sup>试验中的喷灌均匀系数, 而 1 m 土层储水量均匀系数明显小于的其观测值。产生这一结果的主要原因可能是本试验田块土壤特性的空间变异程度较大。

东、中、西 3 个处理春小麦灌溉季节内累计灌水量的 Kolmogorov-Smirnov 检验结果也列入表 4, 在 A= 0.05 的显著水平下, 累计灌水量可以用正态分布或对数正态分布来表示。累计灌水量、产量及其构成要素的统计特征值汇于表 6。分析表中数据可以看出, 尽管 3 个处理的累计灌水量和均匀系数之间差别不大, 但是有效穗数、穗粒数和产量的均匀系数之间却有较大差别, 产量及其构成要素的均匀系数均小于累计灌水量均匀系数。李久生和饶敏杰<sup>[10]</sup>在北京的田间试验结果指出, 产量及其构成要素的均匀系数均大于累计灌水量均匀系数。

两处试验结果不同主要是本试验田块土壤特性变异程度大而作物生育期降水量又很小所致。

表 6 春小麦生育期内累计灌水量及产量构成要素的均值及均匀系数

Table 6 The values of mean and uniformity coefficient (CU) for seasonal water application depth and spring wheat yield

处理	累计灌水量/mm		有效穗数/穗·m <sup>-2</sup>		穗粒数		千粒重/g		产量/t·hm <sup>-2</sup>	
	均值	CU <sup>3</sup>	均值	CU	均值	CU	均值	CU	均值	CU
东处理	539.2	90	531.4	81	13.2	81	43.4	94	3.76	85
中处理	534.8	90	558.3	87	17.1	85	42.7	95	5.42	82
西处理	537.1	93	552.5	89	18.6	79	44.0	95	5.53	76

3 计算中未包括发芽水, 单位为%。

表 7 春小麦累计灌水量、1 m 土层有效水量和产量的变差系数比较

Table 7 The values of coefficient of variation (CV) for seasonal water application depth, available water within 1 m depth and spring wheat yield of each of the three experimental plots and the whole field

处理	变差系数 CV		
	累计灌水量	有效水量	产量
东处理	0.133	0.097	0.180
中处理	0.136	0.182	0.224
西处理	0.084	0.230	0.293
整个田块	0.119	0.237	0.315

表 7 对比了东、中、西 3 个处理和整个田块累计灌水量、1 m 土层有效水量和产量的变差系数 CV 值。从表中可见, 产量的 CV 值既大于有效水量的 CV 值, 又大于累计灌水量的 CV 值, 因此可以认为, 灌水量和有效水量不均匀性的叠加, 加剧了产量的不均匀性。

为了分析喷灌均匀性及土壤特性空间变异对作物产量影响的相对重要性, 对沿东西直线方向春小麦产量与 1 m 土层有效水量及累计灌水量之间的关系进行回归分析后得出

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = 0.73 \frac{AW}{AW_{\max}} + 0.18 \quad (n = 18, r^2 = 0.533) \quad (4)$$

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = 0.054 \frac{I}{I_{\max}} + 0.58 \quad (n = 18, r^2 = 0.002) \quad (5)$$

式中  $Y$ ——产量,  $t\ddot{o}hm^2$ , 变化范围为 2.28~6.80  $kg\ddot{o}hm^2$ ;  $Y_{\max}$ ——最大产量,  $kg\ddot{o}hm^2$ ;  $AW$ ——1 m 土层有效水量, mm  $\ddot{o}m$ , 变化范围为 72~195 mm  $\ddot{o}m$ ;  $AW_{\max}$ ——1 m 土层有效水量的最大值, mm  $\ddot{o}m$ ;  $I$ ——累计灌水量, mm, 变化范围为 508.2~641.6 mm;  $I_{\max}$ ——累计灌水量的最大值;  $n$ ——样本数;  $r$ ——相关系数。

比较式(4)与式(5)的相关系数可以得出,产量与有效水量间的相关关系比与累计灌水量间的关系密切,即对所研究的田块而言,有效水量(田间持水量)的空间变异对产量的影响更大。

对产量变差系数  $CV_Y$  与有效水量变差系数  $CV_{AW}$  及累计灌水量变差系数  $CV_I$  之间的关系进行回归分析后得

$$CV_Y = 1.09CV_{AW} + 0.42CV_I \quad (n = 4, r^2 = 0.878) \quad (6)$$

式(6)表明,土壤特性(有效水量)和灌水量离散程度的增大,都会导致产量离散程度增大。式中  $CV_{AW}$  的系数是  $CV_I$  系数的 2.6 倍,说明产量分布的不均匀性主要是由土壤有效水量的空间变异引起的。

## 4 结 论

在一种土壤特性变异程度较大的砂土及壤质砂土上,对干旱风沙区春小麦生育期内的土壤水分空间分布、作物产量等进行了监测,并对主要土壤物理指标(机械组成、田间持水量)的空间变异情况进行了研究,主要结论如下:

1) 田间持水量、春小麦生育期累计灌水量可用正态分布和对数正态分布来描述;粒径小于 0.02 mm 颗粒百分数服从对数正态分布。

2) 田间持水量随土壤细颗粒(粒径小于 0.02 mm)含量增加而增大;细颗粒含量离散程度较大时,田间持水量的离散程度也较大。

3) 喷灌均匀系数和有效水量(田间持水量凋萎系数)的离散程度对作物产量及其分布均有影响,但对所试验地块而言,有效水量离散程度的影响更

明显。

4) 由于干旱地区作物生育期降水量明显小于湿润和半湿润地区,降水难以弥补灌水不均匀对产量的负面影响,因此干旱地区喷灌均匀系数设计标准应比湿润和半湿润地区高。

## [参 考 文 献]

- [1] Warrick A W, Gardner W R. Crop yield as affected by spatial variations of soil and irrigation[J]. Water Resource Research, 1983, 19: 181~186
- [2] 陈玉民, 郭国双, 王广兴等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 376
- [3] Howell T A. Relationship between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation [M]. In: B A Stewart and D R Nielsen (eds), Irrigation of Agricultural crops. Am Soc Agron, Madison, WI, 1990: 391~434
- [4] Seginer I. A note on the economic significance of uniform water application[J]. Irrigation Science, 1978, 1: 19~25
- [5] Seginer I. Irrigation uniformity effect on land and water allocation[J]. Trans of the ASAE, 1983, 26(1): 116~122
- [6] Mantovani E C, Villalobos F J, Orgaz F, et al. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield [J]. Agricultural Water Management, 1995, 27: 243~257
- [7] Li J. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation uniformity[J]. Agricultural Water Management, 1998, 38: 135~146
- [8] Stern J, Bresler E. Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield[J]. Irrigation Science, 1983, 4: 17~29
- [9] Mateos L, Mantovani E C, Villalobos F J. Cotton response to nonuniformity of conventional sprinkler irrigation[J]. Irrigation Science, 1997, 17: 47~52
- [10] 李久生, 饶敏杰. 喷灌均匀系数对土壤水分空间分布及冬小麦产量影响的试验研究[J]. 水利学报, 2000, (1): 9~14
- [11] Christiansen J E. Irrigation by sprinkling[R]. Agric Exp Stn Bull. 670, Univ of Calif, Berkeley, 1942
- [12] 杨诗秀, 雷志栋. 田间土壤含水率的空间结构及取样数目确定[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 447~456
- [13] Li J, Kawano H. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 1996, 32(1): 29~36

## Influences of Spatial Variations of Soil and Nonuniform Sprinkler Irrigation on Spring Wheat Yield in Arid Regions

Li Jiusheng<sup>1</sup>, Rao Minjie<sup>2</sup>, Zhang Jianjun<sup>2</sup>

(1. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100044, China;

2. Agronomy Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Field experiments were conducted on a sandy soil to study the effects of spatial variations of soil and nonuniform sprinkler irrigation on spring wheat yield in arid regions. The spatial variations of field capacity and soil texture were investigated. It was found that field capacity can be represented by both normal and lognormal distribution functions and a lognormal distribution function fits best to the observed silt and clay contents. As expected, field capacity greatly depends on the contents of silt and clay, increasing with the contents. Usually, a larger variation of silt and clay contents results in a larger variation of field capacity. Field experiments also demonstrated that both sprinkler nonuniformity and spatial variation of soil had effects on crop yield, but soil variation seemed to be more important for the studied soil. The spatial variation of soil should therefore be considered in selecting the target sprinkler uniformity. As the considerably less precipitation in arid regions cannot compensate for the negative effects of nonuniformly applied water on crop yield, a greater target sprinkler uniformity should be used in arid regions than in humid and semihumid regions.

**Key words:** sprinkler irrigation; soil; spatial variation; arid regions; spring wheat; yield