

# 北京地区夏玉米滴灌下土壤水分分布及水分利用效率的研究

袁成福<sup>1</sup>, 谭鉴利<sup>2</sup>, 钟文军<sup>3</sup>

(1. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013; 2. 广东珠荣工程设计有限公司, 广东 广州 510610;  
3. 江西省灌溉排水发展中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:**在北京地区开展滴灌条件下不同灌溉水量的夏玉米田间试验,通过测定土壤含水量和夏玉米产量,研究滴灌条件下不同灌溉水量对土壤水分分布及水分利用效率的影响。研究表明:由于2012年是丰水年份,在相同土层各灌水处理之间的土壤水分分布差异性较小;各灌水处理耗水总量随着灌水量的减小而减小,但在丰水年份均能满足夏玉米需水的需要,各灌水处理夏玉米全生育期内土壤蓄水供水基本平衡;各灌水处理水分利用效率随着灌水量的减小而增大,30% ( $ET_0 - P$ )的灌水方式可以获得较高的水分利用效率。因此,在研究区种植夏玉米若采用30% ( $ET_0 - P$ )的滴灌灌水方式进行灌溉,耗水量为368.5 mm,灌水量仅为42.9 mm,夏玉米减产幅度较低,提高了水分利用效率,从而实现高效用水的目的。

**关键词:**北京地区;夏玉米;耗水;水分利用效率

**中图分类号:**TV93      **文献标识码:**A      **文章编号:**1004-4701(2016)04-0255-05

## 0 引言

北京市位于华北地区的海河流域,该流域水资源严重不足。据相关资料统计,北京市每人平均水资源占有量少于300 m<sup>3</sup>,为全国每人平均水资源占有量的1/10,是世界每人平均水资源占有量的1/40,远远低于国际公认每人平均水资源量1 000 m<sup>3</sup>的缺水下限,因此北京是一个严重缺水的地区<sup>[1,2]</sup>。严重的水资源紧缺已经成为影响北京地区经济社会可持续发展的重要因素。据资料统计,2012年北京市总用水量为39.5亿m<sup>3</sup>,其中农业用水量为9.3亿m<sup>3</sup>,占总用水量的24%。因此,发展节水农业,减少农业用水量对减轻北京水资源紧缺现状有积极作用,节水农业也是解决北京市水资源问题重要途径之一<sup>[3,4]</sup>。从20世纪80年代开始,北京市迅速发展农业节水灌溉,农业用水量已从1980年的3.17 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>减少到2012年的9.3 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,农业节水在北京市节水工作中具有重要的地位。北京地区主要的粮食作物之一是夏玉米,夏玉米在北京地区种植面积较广,2012年全市种植夏玉米面积达13.2万hm<sup>2</sup>,占粮食作物总面积的69%。本文通过开展滴灌条件下不同灌溉水量的夏玉米田间试验,研究不同灌溉水量对土壤水

分分布及水分利用效率的影响,以期为北京地区种植夏玉米高效用水灌溉制度的制定提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

田间试验于2012年5月14日至10月2日在中国科学院地理科学与资源研究所通州农田水循环与现代节水灌溉试验基地进行,该研究基地位于北京市通州区永乐店镇(114°E,39°N,海拔约20 m)。该研究区属典型的半干旱地带,该研究区气候属温带半湿润大陆性季风气候,年平均日照时数为2 459 h,多年平均气温为11.5℃,多年平均降雨量为595 mm,主汛期主要集中在6~8月<sup>[5]</sup>。该研究区暴雨主要集中在每年的7月下旬至8月上旬,一次暴雨降雨量可达70~95 mm。研究区地下水埋深在10 m以上。田间试验地的平均土壤容重约为1.35 g/cm<sup>3</sup>,土壤有机质含量为1.3%,土壤初始盐分平均含量为1.0 g/kg<sup>[6]</sup>。试验地土壤基本物理性质见表1。

### 1.2 试验设计

供试作物为夏玉米,品种为郑单958号,于2012年5月14日播种,统一采用机器播种、施肥,9月17日收

获,全生育期共126天。

表1 土壤基本物理性质

土层深度/cm	土壤质地/美国制	土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> )	田间持水量/(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	饱和导水率/(cm/d)
0-20	壤土	1.35	0.298	19.0
20-40	粉壤土	1.56	0.325	37.6
40-80	砂壤土	1.41	0.317	29.2
80-120	壤砂土	1.41	0.373	41.4

本试验在大田中进行,灌水方式采用滴灌灌溉,试验设置3个不同的灌水水平,分别分100%(ET<sub>0</sub>-P)(A处理)、60%(ET<sub>0</sub>-P)(B处理)和30%(ET<sub>0</sub>-P)(C处理),其中ET<sub>0</sub>为Penman-Monteith法<sup>[7]</sup>计算的参照作物需水量,P为降水量,当(ET<sub>0</sub>-P)累积量达40.0mm时进行灌溉。每个灌水处理设置3次重复,共9个试验小区,采用随机方式布置。每个试验小区面积为100m<sup>2</sup>,试验小区之间有2m的保护行,试验小区外部的农田设置为夏玉米保护区,每个试验小区与保护行之间用一道深2m的粘土墙隔开。灌溉所使用的水源来源于试验小区北部的水池。夏玉米为宽窄行种植,在窄行上布置滴灌带,每条滴灌带控制两行玉米,其中窄行为40cm,宽行为80cm,株距为30cm。

在夏玉米苗期各处理统一灌溉30.0mm,然后根据气象数据,利用Penman-Monteith公式计算下一次灌溉的时间和灌溉水量。6月2日第1次灌溉各处理灌溉水量均为30.0mm,6月17日第2次灌溉,A处理、B处理、C处理灌溉水量分别为43.1、25.9、15.9mm。各处理灌溉制度见表2。夏玉米生育期内各种农艺措施均与当地情况一致。在试验过程中,记录灌水时间、历时和施肥情况。另外再设置一个对照处理D,D处理为当地实际灌水方式,采用喷灌方式进行灌溉,6月1日第1次灌水量为20.0mm,6月18日第2次灌水量为40.0mm,灌溉定额为60.0mm。

表2 各处理灌溉制度

处理	灌水定额/mm		灌溉定额/mm
	6月2日	6月17日	
A	30.0	43.1	73.1
B	30.0	25.9	55.9
C	30.0	12.9	42.9

### 1.3 测定指标与方法

每个小区通过田间分层获取土样,每个取样点都为12层取样,每10cm一层,取至120cm,夏玉米生育期内共取土13次,每次取样完后回填钻孔并做标记,将获取的土样在105℃烘箱内烘8h测定含水率。收获后对每个试验小区的所有玉米进行脱粒并晒干,收集每个试验小区所有籽粒称重作为小区产量,然后再折算为kg/hm<sup>2</sup>。生育期内气象数据可以从试验基地的气象站获得,其中夏玉米生育期内降雨总量为494.4mm,2012年为丰水年份。

### 1.4 作物需水量及耗水量的计算方法

夏玉米需水量采用参照作物需水量公式进行计算,公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中:ET<sub>c</sub>为作物需水量;K<sub>c</sub>为作物系数;ET<sub>0</sub>为参照作物需水量。

采用水量平衡方程计算夏玉米耗水量,水量平衡方程表示为:

$$ET = P_0 + I - \Delta W - R - L + D \quad (2)$$

$$\Delta W = 10 \times rH(W_1 - W_0) \quad (3)$$

式中:ET为生育期总耗水量(mm);P<sub>0</sub>为生育期内降雨量(mm);I为生育期内灌水量(mm);ΔW为土壤水分变化量(mm);W<sub>0</sub>、W<sub>1</sub>分别为计算初期和计算末期土壤质量含水率(%);R为试验小区与外部区域的地面水分交换量(mm),本试验每个试验小区与保护行之间在地面上有宽30cm的粘土田埂隔开,故可取为0;L为土壤水分侧向交换量(mm),本试验每个试验小区与保护行之间用一道2m的粘土墙隔开,故取为0;H为土壤水计算深度(cm),本试验取为120cm;r为土壤容重;D为0~120cm土层与下层土壤层的水分交换量(mm),水分向上补给为正,向下渗漏为负,可以通过达西定律进行计算。

夏玉米水分利用效率表示为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中:WUE为水分利用效率(kg/m<sup>3</sup>);Y表示夏玉米的产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分动态变化

本文将土层分为三部分:0~20cm为表层土壤,20~60cm为中层土壤,为主要根系吸水层,60~100cm

深层土壤。表层土壤(0~20 cm)不同灌水处理土壤含水率变化规律见图1。由图1可以看出,0~20 cm各处理夏玉米生育期内土壤含水率变化比较剧烈,土壤含水率从 $0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 到 $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 进行动态变化。0~20 cm土壤初始含水率较低,第1次统一灌水30.0 mm后上升到 $0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;6月17日第2次灌溉,A处理灌溉43.1 mm、B处理灌溉25.9 mm和C处理灌溉12.9 mm后,土壤水分略微表现出A处理>B处理>C处理的规律。随着夏玉米生育期的推进,0~20 cm土壤水分消耗迅速,土壤含水率下降到 $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 左右,各处理土壤含水率比较接近。7月下旬,由于受到降雨作用的影响,土壤含水率迅速回升。在夏玉米灌浆后期土壤含水率下降至 $0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下时,又受到了降雨作用的影响,土壤含水率又迅速上升,随后逐渐降低。

中层土壤(20~60 cm)不同灌水处理土壤含水率变化规律见图2。图2与图1相比可以看出,夏玉米生育期内20~60 cm土壤含水率变化规律与0~20 cm大体一致,20~60 cm土壤含水率变化较慢,且变化程度相对较小,土壤含水率从 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 到 $0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 进行动态变化。0~20 cm和20~60 cm各处理土壤含水率受到灌溉与降雨作用影响较大,是夏玉米生育期内的主要供水土层,因此土壤含水率动态变化剧烈。

深层土壤(60~120 cm)不同灌水处理土壤含水率变化规律见图3。由图3可看出,夏玉米生育期内60~120 cm土壤含水率动态变化较小,平均土壤含水率在 $0.29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 与 $0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间,土壤含水率仅在灌溉与强降雨前后略微变化,但总体变化不明显,各处理之间差异也不明显。因此,灌溉和降雨作用对深层土壤含水率影响较小。

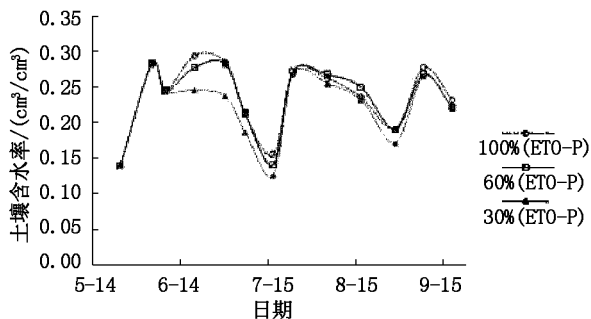


图1 0~20 cm土壤水分变化规律

## 2.2 夏玉米的耗水规律

### 2.2.1 夏玉米需水量的计算

计算夏玉米需水量的过程中,夏玉米作物系数 $K_c$ 。

是引用文献<sup>[8]</sup>中通过对ISAREG模型率定和验证后得到的华北地区夏玉米不同生育期的作物系数,见表3。根据气象资料利用Penman-Monteith公式计算参照作物需水量 $ET_0$ ,夏玉米需水量结果见表4。

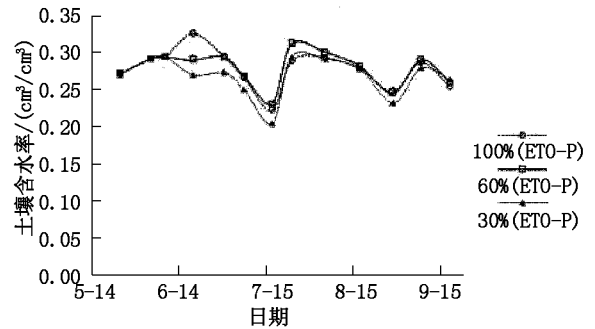


图2 20~60 cm土壤水分变化规律

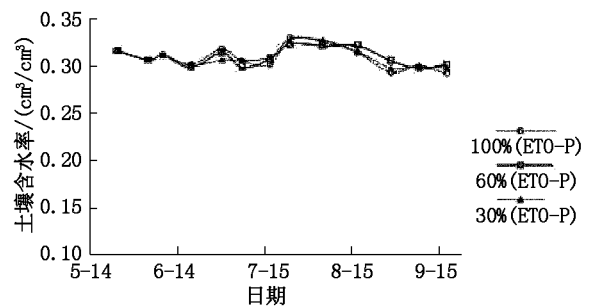


图3 60~120 cm土壤水分变化规律

表3 夏玉米的作物系数 $K_c$

播种- 出苗期	出苗- 拔节期	拔节- 抽穗期	抽穗- 灌浆期	灌浆- 成熟期
0.45	0.85	1.28	1.28	0.9

### 2.2.2 夏玉米的耗水规律

夏玉米全生育期耗水总量及组成见表5。由表5可知,A处理耗水量最高,为395.7 mm;其次为B处理,耗水量为376.5 mm;C处理耗水量为368.5 mm,D处理耗水量为367.1 mm。通过作物需水量公式计算得到的夏玉米需水量为365.1 mm,各处理耗水量均高于计算得到的需水量,由此可见该年份各灌水处理均能满足夏玉米需水的需要。夏玉米耗水由降雨、灌溉、土壤供水和0~120 cm土壤底部水分交换量四部分组成。2012年耗水最主要的部分是降雨,夏玉米生育期内有效降雨量为422.6 mm,在丰水年份,降雨是夏玉米耗水的主要来源。365.1 mm的夏玉米需水量小于422.6 mm

的有效降雨,由于夏玉米生育期内的降雨量主要集中在7月下旬和8月上旬,处于夏玉米的抽穗和灌浆期,尽管2012年是丰水年份,但灌溉也是必需的。A处理、B处理和C处理灌溉量占耗水总量的比例为11.58%~18.47%,A处理所占最大比例为18.47%。土壤水是耗

水量组成的较少部分,A处理土壤水消耗量为2.3 mm,占耗水总量的0.58%;而B、C和D处理土壤水均为正值,说明夏玉米生育期内土壤水有所增加,土壤起蓄水作用,蓄水量在2.7 mm~12.3 mm之间。因此,夏玉米全生育期内土壤水贮藏消耗基本平衡,变化程度较小。

表4 夏玉米需水量

日期(月.日)	播种-出苗	出苗-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	灌浆-成熟	全生育期
	5.14-5.24	5.25-6.16	6.17-7.12	7.12-8.1	8.2-9.17	5.14-9.17
天数/d	10	23	26	20	47	126
需水量/mm	18.9	76.9	91.7	65.7	111.9	365.1
占总需水量/%	5.2	21.1	25.1	18.0	30.6	100
日均需水量/mm	1.9	3.3	3.5	3.3	2.4	2.9

表5 夏玉米全生育期耗水总量及组成

处理	耗水总量/mm	有效降雨量/mm	灌溉量/mm	土壤水变化量/mm	0-120 cm土壤底部水交换量/mm	占耗水总量百分比/%	
						灌溉	土壤水
A	395.7	422.6	73.1	-2.3	-102.3	18.47	-0.58
B	376.5	422.6	55.9	3.4	-98.6	14.85	0.90
C	368.5	422.6	42.9	2.7	-94.3	11.64	0.73
D	367.1	422.6	60.0	12.3	-103.2	16.34	3.35

### 2.3 夏玉米的水分利用效率

表6为不同灌水处理夏玉米的产量与水分利用效率。各灌水处理产量在14 200~14 757 kg/hm<sup>2</sup>之间。经方差分析,各处理产量之间差异不显著( $P < 0.05$ )。表明在2012年丰水年里,各灌水处理对夏玉米产量的影响较小,抽穗前期短期略微的水分亏缺不会影响夏玉米收获时的最终产量。

各灌水处理夏玉米的水分利用效率在3.73~4.00 kg/m<sup>3</sup>之间,差异不显著( $P < 0.05$ )。D、B和C处理耗水总量略低于A处理,但由于该年份降雨量充沛,产量较高,水分利用效率略高于A处理。研究表明,适时适度的水分亏缺后,再受降雨的补充作用,对夏玉米的生长发育能够产生补偿效应,最终减产幅度较小,从而提高了夏玉米的水分利用效率。

表6 夏玉米的产量及水分利用效率

处理	产量/(kg/hm <sup>2</sup> )	耗水总量/mm	水分利用效率/(kg/m <sup>3</sup> )
A	14757	395.7	3.73
B	14467	376.5	3.84
C	14200	368.5	3.85
D	14676	367.1	4.00

## 3 结论

北京地区夏玉米采用滴灌灌水方式,设置不同灌水处理,通过测定夏玉米生育期内的土壤含水率和夏玉米的产量,研究不同灌水量对土壤水分分布与水分利用效率的影响。主要结论如下:

(1)随着夏玉米生育期的推进,0~20 cm、20~60 cm和60~120 cm不同灌水处理的土壤含水率动态变化明显,但差异性逐渐减小。在相同土层各灌水处理土壤水分分布差异性较小。各处理土壤剖面水分动态变化可分为土壤水分强烈变动层(0~20 cm)、土壤水分缓变层(20~60 cm)和相对稳定层(60~120 cm)。

(2)夏玉米生育期内需水量为365.1 mm,各灌水处理耗水总量随着灌水量的减小而减小,但各灌水处理均能满足夏玉米需水要求。通过水量平衡方程计算夏玉米耗水量,结果表明:降雨量是夏玉米最主要耗水的部分;在夏玉米全生育期内土壤蓄水供水基本平衡,在灌溉和降雨期间土壤蓄水,而在灌溉和降雨不足时土壤供水。

(3)各灌水处理水分利用效率随着灌水量的减小而增大,30%(ET<sub>0</sub>-P)的灌水方式可以获得较高的水

分利用效率。在丰水年份,适当减少灌溉水量能够保证夏玉米不减产,也能够提高夏玉米的水分利用效率;灌溉水量采用30% ( $ET_0 - P$ )的滴灌灌水方式,耗水总量为368.5 mm,而灌水量仅为42.9 mm,能够达到水资源高效利用的目的。

#### 参考文献:

- [1] 岳冰,王焕松,王洁,等.北京市水资源可持续利用面临的挑战及对策[J].环境与可持续发展,2011(2):80~83.
- [2] 廖强,张士锋,陈俊旭.北京市水资源短缺风险等级评价与预测[J].资源科学,2013,35(1):140~147.
- [3] 李瑾,孙留萍.北京市发展节水农业的思考[J].黑龙江农业科学,2015(12):155~160.
- [4] 杨林林,王成志,韩敏琦,等.关于北京市高效节水农业建设的思考[J].北京农业,2016(2):195~196.
- [5] 付颖,徐新良,通拉嘎,等.近百年来北京市地表水体时空变化特征及驱动力分析[J].资源科学,2014,36(1):75~83.
- [6] 谭鉴利.北京地区夏玉米耗水与生长规律田间试验研究[D].扬州:扬州大学,2013.
- [7] 钟文军,梅小文,周晋,等.冬小麦作物需水量计算分析下的节水研究[J].江西水利科技,2016,42(1):11~14.
- [8] 赵娜娜,刘钰,蔡佳冰.夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J].水利学报,2010,41(8):953~959.

编辑:张绍付

## Research on soil water distribution and water use efficiency of summer corn under drip irrigation in Beijing area

YUAN Chengfu<sup>1</sup>, TAN Jianlin<sup>2</sup>, ZHONG Wenjun<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China;

2. Guangdong Zhurong Engineering Design Co. Ltd, Guangzhou 510610, China;

3. Jiangxi Irrigation and Drainage Development Center, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** A field summer corn experiment of different irrigation quantity was conducted under drip irrigation in Beijing. Soil water content and summer crop yield were observed for study the effects of different irrigation quantity on soil water distribution and water use efficiency. The research results showed that the difference of the soil water distribution were smaller in the same layer since the 2012 was a wet year. The total water consumption decreased with the irrigation water decreased. But it can meet the needs of summer corn water requirement in a wet year. Soil water content kept balance between water storage and water supply in the summer corn growth. The water use efficiency of each treatment increased with irrigation water quantity decreased. Irrigation method with 30% ( $ET_0 - P$ ) can obtain higher water use efficiency. Irrigation method with 30% ( $ET_0 - P$ ) of drip irrigation, which water consumption was 368.5 mm and irrigation water amount only was 42.9 mm, is recommended as a result of increasing water use efficiency and the summer corn yield decreasing slightly in researching area.

**Key words:** Beijing; Summer corn; Water consumption; Water use efficiency

翻译:袁成福