

The Study of Estimation on Maize Irrigation Water Requirement in the northwest of Liaoning Province

Xiaojing Liu^{1*} Donglai Ma² Jiquan Zhang³ Peng Chen¹

1. College of Tourism and Geographic Science, Jilin Normal University, Siping 136000, P.R. China

2. University of Tsukuba Graduate School of System and Information Engineering, Tsukuba 3050006, Japan

3. Environment College, Northeast Normal University, Changchun 130000, P.R. China

Received November 14, 2018

Accepted January 3, 2019

Abstract

This paper took the northwest of Liaoning Province as a study area and maize as the research object. Effective rainfall, crop water requirement and soil available water content at 6 growth stages of maize were calculated by using Penman-Montes equation, effective coefficient method and Cropland Soil Moisture Index. Then the estimation model of irrigation water requirement of maize at different growth stages of the northwest of Liaoning Province. Taking 2006 as an example, the irrigation water requirement of maize at different growth stages was estimated and the spatial distribution maps were drawn by GIS. The results show that overall the irrigation water requirement of maize in the western of the study area is more than that of in the northeastern. The irrigation water requirement of maize in heading stage has increased significantly because of the severe drought status. it can provide technical support for a region to relieve crop drought.

Keywords: Maize, Drought, Irrigation water requirement, CSMI

辽西北地区玉米灌溉需水量估算研究

刘晓静^{1*}, 马东来², 张继权³, 陈鹏¹

1. 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 四平 136000, 中国

2. University of Tsukuba Graduate School of System and Information Engineering, Tsukuba 3050006, Japan

3. 东北师范大学环境学院, 长春 130024, 中国

摘要: 本文以辽西北地区为研究区, 以玉米为研究对象, 通过彭曼-蒙特斯方程、有效利用系数法和农田浅层土壤指数 CSMI, 利用玉米各生育阶段的有效降雨量、作物需水量和土壤有效水含量, 构建了玉米不同生育阶段的灌溉需水量模型。以 2006 年为例, 计算了研究区玉米各生育阶段的灌溉需水量, 并借助 GIS 技术绘制玉米各生育阶段的灌溉需水量空间分布图。结果表明, 整体来看, 研究区西部玉米的灌溉需水量高于东北部的玉米; 抽穗-乳熟期, 辽西北各区域玉米灌溉需水量显著增多, 这除了与玉米在该阶段自身生长需大量水分有关外, 还与该时期严重的干旱状况有关。研究结果可为缓解农业作物干旱提供技术支撑。

通讯作者: 刘晓静(1985-), 女, 讲师, 博士, 主要从事自然灾害风险评价与管理方面的教学和科研工作。Email: liuxj@jlnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目“辽西北灌区玉米干旱灾害动态风险预警与玉米灌溉调控模拟研究(41501559)”、国家自然科学基金项目“多灾种农业气象灾害综合风险动态评估研究——以吉林省中西部玉米产区为例(41571491)”共同资助。

关键词: 玉米; 干旱; 灌溉需水量; CSMI

干旱灾害影响最直接的是农业。中国是一个幅员辽阔、地形地貌多样的农业大国,因此也成为世界上受干旱灾害影响最为严重、面积最广的国家之一。对于旱作地区来说,农作物的生长发育主要依赖于自然降水。为了减轻干旱对旱作农业造成的影响和危害,保证农作物的正常生长,需要对农作物进行灌溉^[1-3]。因此,作物灌溉需水量的估算是防止作物干旱,缓解作物干旱状况,保障粮食生产安全最直接、有效的手段。

作物灌溉需水量主要由作物需水量、有效降雨量及土壤有效水含量三个要素共同决定。基于此,众多研究以全生育期为时间尺度计算了作物的灌溉需水量^[4-6,8],但是这些研究并未考虑作物不同生育阶段对水分的不同需求。因此,本文以辽西北地区为研究区,以玉米为研究对象,以玉米各生育阶段为时间尺度,结合农田浅层土壤湿度指数 CSMI,构建辽西北地区玉米各生育阶段的灌溉需水量估算模型,估算辽西北地区玉米不同生育阶段的灌溉需水量,为区域快速制定作物防旱抗旱决策提供技术支撑。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况及资料选取

辽西北地区地处辽西丘陵山地,是辽宁省玉米重要产地,玉米播种面积占到了全省的 67%。同时,该区域也是辽宁省干旱最频繁、严重的地区,素有“十年九旱”之称。受大陆性季风气候影响,辽西北地区春旱现象时常发生,伏旱对产量影响较重,如 2006 年辽西北地区发生了自 1951 年以来特大伏旱,粮食减产 4.07×10⁹kg。辽西北地区主要的玉米品种为晚熟类型^[7-8],根据研究区各农业气象站提供的多年玉米发育期资料,参考联合国粮农组织 FAO 划分作物发育期的建议,将辽西北地区玉米生育期划分为:播种—出苗、出苗—七叶、七叶—拔节、拔节—抽穗、抽穗—乳熟、乳熟—成熟 6 个阶段。

研究数据包括辽西北地区的遥感数据、气象数据、农作物生长数据、土壤含水量及特征数据、土地利用类型图、水利工程与灌溉设施数据、地形图等。

1.2 研究方法

辽西北地区作物根系多数集中在 50cm 以上土层中。农田浅层土壤湿度指数 (Cropland Soil Moisture Index, CSMI) 是由归一化植被指数 NDVI 和地表含水量指数 SWCI 共同组成的,能够对 0~50cm 土壤墒情进行准确监测的植被指数^[9-10]。CSMI 的计算公式如下:

$$CSMI = \frac{NDVI - SWCI}{NDVI + SWCI} \quad (1)$$

作者在前期工作中利用 CSMI 反演了辽西北玉米生长季 0~50cm 深度土壤含水量,并对反演模型进行了验证,详细的计算方法及验证过程请参见文献^[11],反演结果如表 1 所示。农田浅层土壤湿度指数 CSMI 与玉米不同生长阶段的土壤湿度之间存在正、负两种相关关系,为了便于分析,对 CSMI 指数进行标准化处理,公式如下:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

$$x'_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (3)$$

式中 x'_i 为指标 x_i 标准化后的值, x_{max} 、 x_{min} 分别为指标 x_i 的最大值和最小值。对与玉米拔节后土壤湿度呈正相关的 CSMI 指数采用公式 (2) 进行标准化,将其标准化为与该阶段土壤湿度呈负相关;为了保持量纲的一致性,对与玉米播种-拔节期间土壤湿度呈负相关的 CSMI 指数则采用公式 (3) 进行标准化,使其二者关系仍然保持负相关。

表 1 CSMI 与实测 0~50cm 平均土壤湿度线性回归方程

生育期	线性回归方程
播种—出苗	$y = -0.1476x + 0.2554$
出苗—七叶	$y = -0.1876x + 0.2795$
七叶—拔节	$y = -0.1985x + 0.2736$
拔节—抽穗	$y = 0.219x + 0.0678$
抽穗—乳熟	$y = 0.2642x + 0.0374$
乳熟—成熟	$y = 0.2328x + 0.0443$

1.3 玉米生育阶段灌溉需水量估算模型的建立

作物一生所需的水分有两种,生理需水和生态需水。生理需水是作物为满足其自身正常的生命活动需从环境中吸收的大量水分,是指在健康无病、养分充足、土壤水分状况最佳等条件下,作物经过正常生长发育,从播种到成熟收获所需要的水分。生态需水是指作物在维持自身正常生长时环境所需要的水分,包括棵间蒸发和渗漏等。作物的生理需水量和生态需水量的总和称为作物需水量。而在作物生长发育过程

中，水分数量特定的情况下，作物实际吸收到的水分数量称为作物实际耗水量。当任一时段外部环境提供的水量（有效降雨量与土壤有效水含量之和）大于等于本时段作物的需水量时，则在该时段，作物实际耗水量等于作物需水量；当任一时段外部环境提供的水量（有效降雨量与土壤有效水含量之和）小于本时段作物的需水量时，则在该时段，作物实际耗水量等于降雨量与土壤有效水含量之和，作物需水量与作物实际耗水量之间的差值即为作物灌溉需水量^[12]。

在旱生作物的整个生育期间，任一时段土壤计划湿润层中需灌水量，取决于该时段的来水量和作物需水量的多少。依据上述原理，构建辽西北地区玉米各生育阶段的灌溉需水量模型，公式如下：

$$IR_i = ET_{ci} - (P_i + WE_i + I_i) \quad (4)$$

其中， IR_i 为辽西北地区玉米在生育阶段 i 的灌溉需水量，mm； ET_{ci} 为该地区玉米 i 阶段需水量，mm； P_i 为该地区生育阶段 i 内的有效降雨量，mm； WE_i 为本生育阶段土壤有效水含量，mm； I_i 生育阶段 i 的计划灌溉量，mm。

根据作物生长水分的来源，辽西北地区的农业生产方式可以分为两种，灌溉型农业和雨养型农业。研究以雨养玉米为研究对象。对于雨养型农业来说，作物的生长发育完全依靠自然降水，因此灌溉量 I 为 0，此时玉米生育阶段的灌溉需水量模型为：

$$IR_i = ET_{ci} - (P_i + WE_i) \quad (5)$$

当区域外来水量大于玉米需水量时，则认为该区域不需要灌溉；当区域外部环境无法为玉米提供充足的需水量时，则此时玉米的缺水即为区域需灌溉的水量。因此，玉米在某一生育阶段的灌溉需水量应为：

$$IR_i = \begin{cases} 0, & ET_{ci} \leq (P_i + WE_i) \\ ET_{ci} - (P_i + WE_i), & ET_{ci} > (P_i + WE_i) \end{cases} \quad (6)$$

1.4 玉米生育阶段灌溉需水量估算模型参数的确定

1.4.1 生育阶段有效降雨量

一次降雨的总雨量分配主要有三个方式：深层渗漏、径流和留存于土壤中。雨水中的一部分渗漏到作物根区吸水层以下，一部分作为径流从土壤表面流走，地表的径流水和深处的渗漏水都不能被作物利用，换言之，这两部分的降雨量对于作物是无效的。剩余的降雨量贮存在土壤根区中，并为作物生长提供水分，这部分可被作物吸收利用的降雨量称为有效降雨量^[13]。

目前，多采用降雨有效利用系数计算有效降雨量，公式如（7）所示：

$$P_e = \alpha_j \cdot P_j \quad (7)$$

式中， P_j 为某次降雨总量，mm； P_e 为该次降雨的有效降雨量，mm； α_j 为该次降雨量的有效利用系数。依据康绍忠，蔡焕杰（1996）的研究结果， α 的取值如公式^[14]：

$$\alpha_j = \begin{cases} 0, & P_j \leq 5mm \\ 0.9, & 5mm < P_j \leq 50mm \\ 0.75, & P_j > 50mm \end{cases} \quad (8)$$

通过累积逐日有效降雨量得到玉米各生育阶段的有效降雨量，公式如（9）所示：

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n P_{e_{j,i}} \quad (9)$$

其中， P_{ei} 为生育阶段 i 的有效降雨量，mm； $i=1,2,\dots,6$ ，分别表示玉米的 6 个生育阶段； $P_{e_{j,i}}$ 为生育阶段 i 内第 j 次降雨的有效降雨量，mm； $j=1,2,\dots,n$ ，表示该生育阶段内降雨次数。

1.4.2 生育阶段需水量的计算

作物需水量的影响因素有很多，包括气象条件（温度、日照、湿度、风速）、土壤水分含量、作物种类及其生长发育阶段、土壤肥力、农业技术措施等。目前，计算作物需水量最常用的方法是通过计算参照作物的需水量来得到某种作物的需水量。研究表明，联合国粮农组织 FAO 推荐的单作物系数法在预测东北地区作物需水量时效果最好^[15]。因此，本文采用单作物

系数法计算作物的逐日蒸散量，即作物逐日需水量，则作物生育阶段的需水量由其逐日需水量累积得到。作物逐日需水量的计算公式如下：

$$ET_c = K_c ET_0$$

(10)

式中， ET_c 为逐日作物蒸散量，即逐日作物需水量，mm； K_c 为作物系数； ET_0 为逐日作物参考蒸散量，mm。 K_c 、 ET_0 分别采用联合国粮农组织 FAO 推荐的修正公式和彭曼蒙特斯公式进行计算^[16,17]。

1.4.3 土壤有效水含量的计算

土壤中的水分并非所有都对作物有效。例如，土壤吸湿水和膜状水就属于无效水，由于它们被土壤颗粒紧密吸附，没有溶解能力，因此不能被植物利用。而土壤中的重力水虽然可以被植物利用，但因其很快便渗漏出根层，因此也不计入有效水。因此，一般说土壤中可被植物吸收利用的有效水，指的就是毛管水。任一时段某一深度的土壤有效水含量，可通过同时段同深度土壤含水量与萎蔫系数（植物根系无法吸收到水分而发生永久萎蔫时的土壤含水量）的差值求得，计算公式如下：

$$WE_{hj} = W_{hj} - f_h$$

(11)

式中， WE_{hj} 为时段 j 土壤 h 层深度的有效水分含量，mm； W_{hj} 为时段 j 土壤层 h 深度的水分含量，mm； f_h 为土壤 h 层深度的萎蔫系数，mm。

因此，0~50cm 土层的平均土壤有效水含量计算如公式 (12)：

$$WE_{(50)j} = W_{(50)j} - f_{(50)}$$

(12)

式中， $WE_{(50)j}$ 为时段 j 的 0~50cm 土层的平均有效水分含量，mm； $W_{(50)j}$ 为时段 j 的 0~50cm 土层平均土壤含水量； $f_{(50)}$ 为该土层深度的平均萎蔫系数。

结合土壤湿度的反演方程，上式可变换为：

$$WE_{(50)j} = f(CSMI_j) - f_{(50)}$$

(13)

据此，玉米生育阶段的灌溉需水量模型又可变换为：

$$IR_i = \begin{cases} 0, & ET_{ci} \leq (P_i + f(CSMI_i) - f_{(50)}) \\ ET_{ci} - (P_i + f(CSMI_i) - f_{(50)}), & ET_{ci} > (P_i + f(CSMI_i) - f_{(50)}) \end{cases}$$

(14)

2 结果与分析

分析历史资料可知，辽西北地区 2006 年发生了自 1951 年以来的特大伏旱。因此，以 2006 年为例，利用辽西北地区 11 个农业气象站点 2006 年逐日气象要素，分别计算各站点玉米逐日需水量和日有效降雨量，通过累积确定玉米各生育阶段的玉米需水量和有效降雨量，根据辽西北玉米灌溉需水量模型，确定各站点玉米在不同生育阶段的灌溉需水量。采用反距离加权法对各站点玉米不同生育阶段的灌溉需水量进行空间插值，得到辽西北地区玉米播种-出苗-七叶（图 1）、七叶-拔节-抽穗（图 2）和抽穗-乳熟-成熟（图 3）等 6 个生育阶段的灌溉需水量空间分布图。

辽西北地区玉米在播种一出苗阶段灌溉需水量范围约为 2-34mm，在该阶段，由于降雨量极少，整个辽西北地区玉米干旱较为严重，辽西北地区玉米干旱强

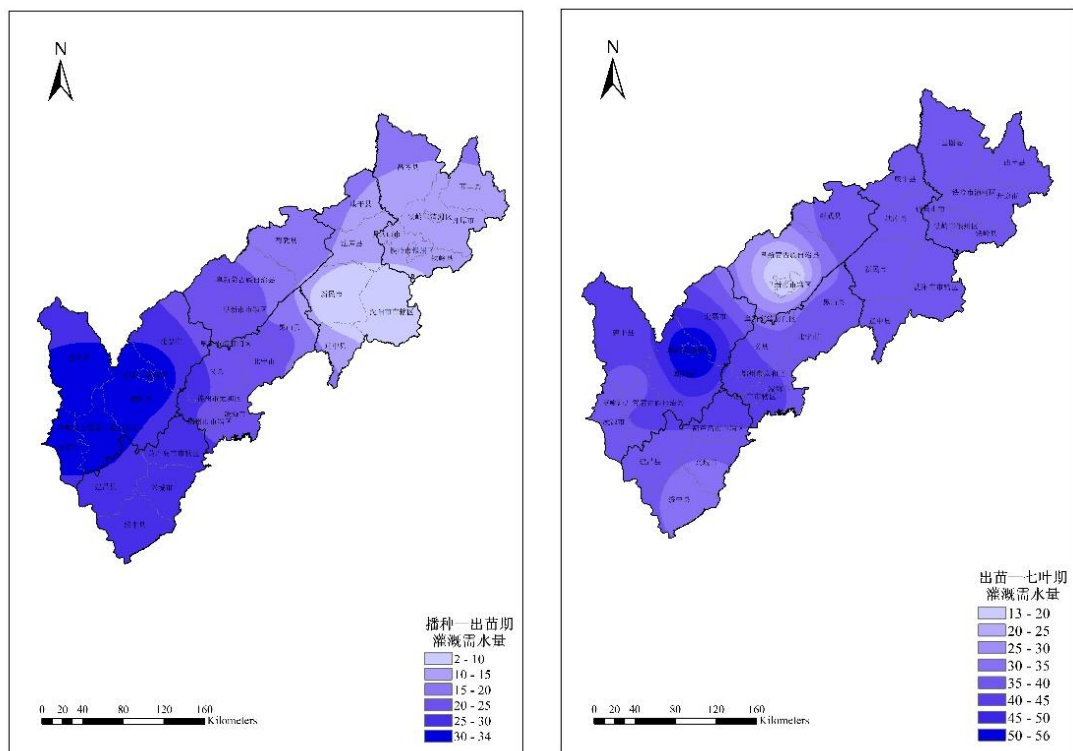


图 1 辽西北地区玉米播种-出苗-七叶阶段的灌溉需水量空间分布

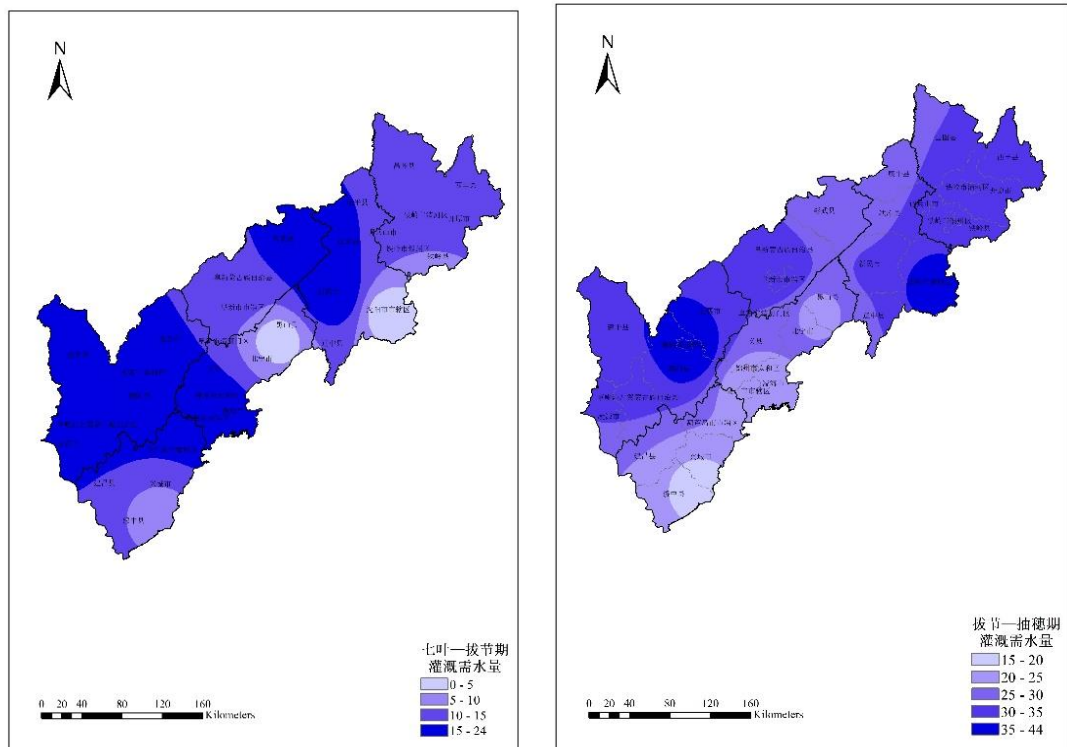


图2 辽西北地区玉米七叶-拔节-抽穗阶段的灌溉需水量空间分布

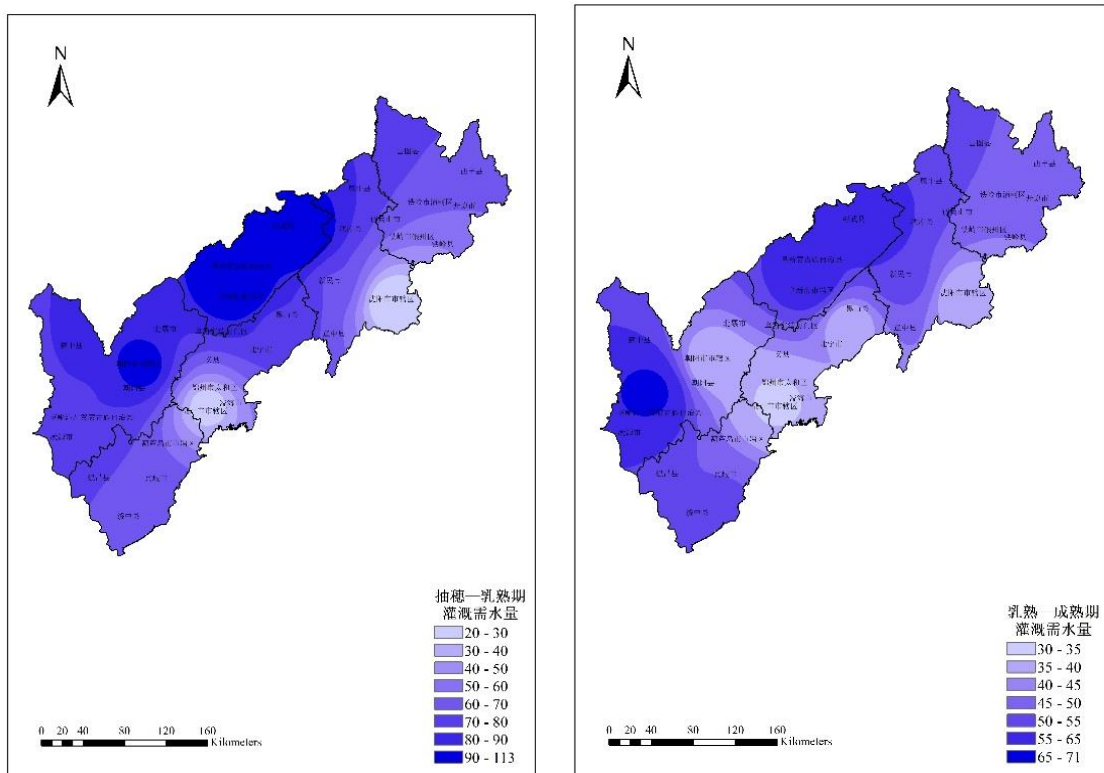


图3 辽西北地区玉米抽穗-乳熟-成熟阶段的灌溉需水量空间分布

度由北向南、从东至西增高，因此西部需灌水较多，而东北部较少。出苗—七叶阶段，部分地区大面积降雨，虽在一定程度上缓解了玉米旱情，但整体来看玉米的干旱状况仍然由北向南、从东至西增高，且玉米在该阶段开始光合作用，蒸腾蒸发量增大，因此该阶段的玉米灌溉需水量较前一阶段也增多，约为 13-56mm，阜新市需水量较少，其余各市都较多，灌溉需水量趋势符合该阶段实际干旱分布状况。玉米在七叶-拔节阶段，由于受上一阶段降雨影响，干旱状况继续有所缓解，因此玉米灌溉需水量在该生育阶段与上一阶段相比整体有所减少，约为 0-24mm，整体来看，仍然是东北部偏少，西部偏多，其中沈阳市和铁岭市的灌溉需水量显著下降，葫芦岛南部、锦州北部和中部地区玉米灌溉需水量最少，朝阳市、阜新北部和锦州南部玉米灌溉需水量最多。玉米进入拔节期，研究区东北部降雨量较少，因此东北部灌溉需水量与上一阶段相比明显增多，在此阶段玉米灌溉需水量大约 15-44mm，其中朝阳、阜新西部干旱程度及状况最为严重，因此需水最多。抽穗-乳熟阶段是玉米生长的关键期，也是全生育期需水最多的时期。在该阶段玉米灌溉需水量在 20-113mm，与上一生育阶段相比各区域玉米灌溉需水量都显著增多，其中锦州市市辖区和沈阳市市辖区灌溉需水量最少，阜新市需灌水最多，其次为朝阳市，东部和南部较少。乳熟—成熟阶段，辽西北地区西部和南部玉米干旱状况有所缓解，干旱较为严重的地区主要分布于朝阳西部、沈阳北部和阜新。在该阶段玉米灌溉需水量约为 30-71mm，朝阳西部和阜新市玉米灌溉需水量最多；由于该阶段玉米需水较少且沈阳北部在前几个生育阶段干旱并不严重，因此沈阳北部玉米的灌溉需水量并不是最多；与上一生育阶段相比，各地区的灌溉需水量均有所下降。

3 结论与讨论

灌溉是缓解作物干旱的最有效手段。本文以 2006 年为例，通过计算研究区玉米逐日需水量和日有效降雨量，根据研究区玉米的生育阶段，累积获得玉米各生育阶段的玉米需水量和有效降雨量，利用不同生育阶段的农田浅层土壤湿度指数反演了玉米各生育阶段的土壤含水量，构建了辽西北玉米各生育阶段灌溉需水量估算模型，确定各站点玉米在不同生育阶段的灌溉需水量。通过对典型案例年的分析发现，玉米在不同的生育阶段对灌溉需水量的需求也不同。整体来看，辽西北地区西部玉米的灌溉需水量高于东北部的玉米灌溉需水量；出苗—七叶阶段，部分地区大面积降雨缓解了玉米在该阶段及下一阶段的干旱状况，但研究区玉米的灌溉需水量仍然呈现西部高于东北部；抽穗—乳熟阶段，辽西北地区玉米灌溉需水量最多，这种需求

不仅与玉米自身生长对水分的要求不同有关，还与外部来水量紧密相关。

由于土壤数据的限制，本文仅以 2006 年为例探讨了研究区玉米不同生育阶段的灌溉需水量，时效性较差。但是本文的重点在于玉米不同生育阶段灌溉需水量估算模型的构建，所以研究成果是可以接受的。另外，研究中发现，作物的生长变化可以在一定程度上反应作物灌溉需水量的变化，这将是下一步要继续完成的工作。

参考文献

1. 郑大玮,李茂松,霍治国.农业灾害与减灾对策.北京:中国农业大学出版社,2013.
2. 史培军.中国自然灾害风险地图集.北京:科学出版社,2012.
3. 肖俊夫.中国玉米生长期干旱与灌溉投入问题分析.灌溉排水学报,2009,28(5):21-24.
4. Daccache A.,Knox J.W.,Weatherhead E.K.,et al. Implementing precision irrigation in a humid climate-Recent experiences and on-going challenges. *Agricultural Water Management*,2015,147:135-143.
5. 黄志刚,肖焯,张国,et al. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测. *生态学报*, 2017, 37(7):2368-2381.
6. 牛纪苹,粟晓玲,唐泽军. 气候变化条件下石羊河流域农业灌溉需水量的模拟与预测. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(1):206-212.
7. 郭建平.东北地区近46年玉米气候资源变化研究. *中国农业气象*,2009,30(3):302-307.
8. 高晓容. 近50年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化. *农业工程学报*,2010,12(28):102-109.
9. 杜晓,王世新,周艺.一种新的基于MODIS的地表含水量模型构造与验证. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(3): 205-207.
10. 张红卫,陈怀亮,申双和,等.基于表层水分含量指数的土壤干旱遥感监测. *遥感技术与应用*,2008,23(6):624-628.
11. 刘晓静,马东来,张继权,等. 辽西北地区玉米干旱的识别方法. *干旱区研究*, 2018(3).
12. A.Araya,Leo Stroosnijder. Assessing drought risk and irrigation need in northern Ethiopia. *Agriculture and Forest Meteorology*,2011,151: 425-436.
13. C. Brouwer,M. Heibloem. FAO:Irrigation Water Management Training manual no.3:Irrigation Water Needs. Rome,Natural Resources Management and Environment Department,1986.
14. 康绍忠,蔡焕杰.农业水管理学.北京:中国农业出版社,1996.
15. 李彩霞,陈晓飞,韩国松,等.沈阳地区作物需水量的预测研究. *中国农村水利水电*, 2007(5):61-67.
16. 刘钰, L.S.Pereira.对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. *农业工程学报*, 2000, 16(5):26-30.
17. R G Allen, L S Pereira, D Raes, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

