

# 2002—2011年华北平原北部农田缺水 时空分布特征研究

李鹏飞 冯瑶 赵昕奕<sup>†</sup>

教育部地表分析与模拟重点实验室, 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; <sup>†</sup>通信作者, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

**摘要** 利用华北平原北部气象站点实测气温、降水、风速等基本气象要素数据, 结合土壤相对湿度数据, 计算降水量、作物需水量和土壤水分变化量 3 个水分循环的核心变量, 构建华北平原北部农田水循环模型, 设计缺水指标, 并分析 2002—2011 年华北平原北部农田缺水量的逐旬时空变化。结果表明: 华北平原北部的农田在整个作物生长阶段严重缺水, 大多数月份所有地区缺水, 仅 7 月中旬自然水分较为充足; 春季是华北平原北部农田干旱最严重的时期, 以河北中南部地区春旱最为严重; 秋季干旱程度相比春季较轻, 干旱相对严重的区域位于研究区域西北部; 衡水以及北京西部地区在整个作物生长阶段均严重缺水, 是干旱最为严重的区域。研究结果可为研究区水分利用管理及农田灌溉提供参考。

**关键词** 华北平原北部; 农田水循环; 需水量; 缺水量

**中图分类号** S152

## Spatiotemporal Variability in Water Cycle of Cropland in the North Part of Northern China Plain from 2002 to 2011

LI Pengfei, FENG Yao, ZHAO Xinyi<sup>†</sup>

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871;  
<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

**Abstract** Based on the observed temperature, precipitation, wind speed, soil moisture and other basic meteorological data in the north part of Northern China Plain from China Meteorological Administration, three major variables of water cycle: precipitation, soil moisture and water requirement on cropland are calculated. Besides, the water cycle model of cropland in the study area is built together with designed water shortage index to analyze the temporal and spatial variability in water shortage of cropland in the study area by ten-day intervals. Results suggest that the water shortage of cropland in the study area is serious through all growth period. The study area witnesses droughts in most months with sufficient moisture only in the mid July. Spring is the most serious period of droughts on cropland, and the droughts are more severe in central and southern of Hebei Province than that in other areas. Furthermore, the stress of water shortage on cropland in autumn is much relieved compared with that in spring. However, droughts in the northwest part of study area are extremely serious in autumn. Meanwhile, droughts in Hengshui area and western Beijing are the most serious through the whole crop growth stage. Relevant conclusions can provide references to regional water management and irrigation of cropland.

**Key words** the north part of Northern China Plain; water cycle of cropland; water requirement; water shortage

水循环是联系大气水、地表水、地下水和生态水的纽带, 其变化深刻影响全球水资源系统和生态环境系统的结构和演变, 影响人类社会的发展和生

产活动<sup>[1-3]</sup>。近百年来, 地球气候正面临着一场以全球变暖为主要特征的显著变化。大量模型预测表明, 未来 100 年内, 气温将升高 1.4~5.8℃, 降水的

时空分布格局也将发生重大变化<sup>[4-6]</sup>, 干旱将成为人类面临的重大环境问题, 农业生产受到的影响将最为显著。华北平原北部自古以来就是中国重要的农业生产区, 干旱的发生会影响农业生产, 造成一系列的社会问题。因此, 分析华北平原北部农田水循环的时空变化规律, 对农业生产有重要指导意义。

降水、蒸散和土壤水分是农田水循环过程中最重要的 3 个影响因素, 目前学者对农田水循环的研究有很多。沈彦俊等<sup>[7]</sup>分析了华北平原典型井灌区农田水循环过程; 李取生等<sup>[8]</sup>采用联合国粮农组织最新推荐的模型方法, 利用 10 年的日气象资料, 对松嫩平原西部玉米、大豆、高粱等作物的农田逐日需水量进行了系统研究; 林耀明等<sup>[9]</sup>研究了中国热带东部丘陵区农田生态系统的水循环特征, 结果显示降水只能满足农田需水量的 81%; 徐宗学等<sup>[10]</sup>分析了北京地区降水量的时空分布规律; 王晓霞等<sup>[11]</sup>分析了天津市降水量变化趋势的时空分布特征; 刘剑锋等<sup>[12]</sup>分析了河北省气候干湿状况变化特征; 李春强等<sup>[13]</sup>分析了河北省近 40 年气温和降水变化的特征; 刘钰等<sup>[14]</sup>用两种不同规格的微型蒸发器测定麦田和裸地土面蒸发强度, 并分析了相对土面蒸发强度与土壤含水量的关系以及土面蒸发强度与作物叶面积指数的关系; 刘昌明等<sup>[15]</sup>分别就水-气界面和土-气界面, 详细介绍了蒸散发与环境因素和作物因素的关系, 同时做了界面节水调控试验, 探讨了抑制界面水分无效蒸发, 提高农田水分利用效率的途径和方法等。

尽管目前针对农田水分循环以及干旱的研究已有很多, 但大多研究基于植被蒸腾等生态学的角度, 研究区域较小, 研究内容主要集中在降水和蒸散, 忽略了农田水循环中的重要组成部分——土壤水分。由于土壤水分缺乏大范围观测数据, 观测手段和技术还需加强, 因此相关研究目前还较少。

河北省北部地区山地较多, 与南部平原地区农业生产方式不太一致, 因此本文选择河北省除去北部张家口、承德、秦皇岛三市之外的其他地区, 再加上北京市和天津市作为研究区域。该区域即华北平原北部, 在农业生产上以冬小麦和夏玉米轮作为主。基于该研究区域, 本文主要从气候学的角度, 对农田水循环过程中降水、蒸散和土壤水分 3 个要素进行综合研究, 构建华北平原北部农田水分循环模型, 设计农田缺水量指标, 逐旬分析华北平原北部不同地区农田的缺水状况。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

气象数据来自国家气象数据共享服务网中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(<http://cdc.cma.gov.cn>)。本文选用北京、天津、河北 3 个省市 22 个气象站点 2002—2011 年逐日的最高/最低气温、降水、风速、水汽压、气压、日照时数等基本气象要素资料。

从国家气象局获得京津冀地区 128 个农业气象站点 2002—2011 年逐旬的不同深度土壤相对湿度数据。由于数据质量问题, 本文主要分析 4 月上旬到 10 月中旬, 并选择 10, 20, 50 cm 这 3 个深度的土壤相对湿度数据(<http://www.cma.gov.cn/2011qx fw/2011qsjgx/>)。

土壤理化性质数据来源于中国科学院南京土壤研究所与中国农业部土壤环境处依据全国第二次土壤普查制作的全国 1:100 万数字化土壤图、土壤孔隙度数据从文献[16]获得, 用于土壤相对湿度向土壤水分的转换计算; 从文献[17-18]获得华北平原北部农作物不同时期的作物系数, 用以计算农作物正常生长的需水量。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 水量平衡方程

一般水量平衡方程如式(1)所示:

$$P+I=E_a+\Delta W+R, \quad (1)$$

其中  $P$  为降水量;  $I$  为灌溉量;  $R$  为径流量;  $E_a$  为实际蒸散量;  $\Delta W$  为土壤水分变化量, 土壤水分增加,  $\Delta W$  为正。本文的目的是分析农田水分循环规律, 确定不同地区不同时间的缺水状况, 因此将  $E_a$  取为各生态系统作物正常生长所要求的需水量, 将水量平衡方程变化为式(2):

$$S=I-R=E_a+\Delta W-P. \quad (2)$$

由于灌溉与径流都是农田与外界的输入和输出, 所以统一将其定义为生态系统的缺水量, 用  $S$  表示。这样, 重点分析需水量、土壤水分变化量和降水 3 个变量, 就可以研究农田在作物正常生长时的缺水情况。

#### 1.2.2 降水量与潜在蒸散量计算

首先计算各站点 2002—2011 年 4—10 月逐旬的多年平均降水量。

利用 Penman-Monteith 公式<sup>[19-21]</sup>计算 10 年内

逐日的潜在蒸散量,进而计算逐旬的多年平均潜在蒸散量。Penman-Monteith 模型如下所示(相关参数见文献[22]):

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, \quad (3)$$

$$G_i = 0.07(T_{i+1} - T_{i-1}), \quad (4)$$

$$U_2 = 0.72U_{10}, \quad (5)$$

$E_{T0}$  为潜在蒸散量(mm/d),月潜在蒸散量为  $E_{T0}$  乘以当月日数;  $R_n$  为参考作物表面净辐射(MJ/m<sup>2</sup>/d);  $G$  是土壤热通量密度(MJ/m<sup>2</sup>/d),其估算公式见式(4),  $i$  为月份,  $T_{i+1}$  和  $T_{i-1}$  为第  $i+1$  和  $i-1$  月的气温(°C);  $T$  是月平均气温(°C);  $U_2$  为 2 m 高处风速(m/s);  $U_{10}$  为气象站测得风速;  $e_s$  为饱和水汽压(kPa);  $e_a$  为实际水汽压(kPa);  $\Delta$  表示饱和水汽压-温度曲线的斜率(kPa/°C);  $\gamma$  为干湿表常数(kPa/°C)。

### 1.2.3 土壤水分计算

检验土壤相对湿度数据,结合华北平原北部各站点土壤类型以及相关土壤属性,将相对湿度数据转化为水量数据。从国家气象局获得的数据是土壤相对湿度,即土壤内实际水分与饱和水分之比。为获得土壤实际水分以便参与水循环计算,需要知道土壤饱和水分。土壤水分储存于土壤空隙中,不同类型的土壤在不同深度有不同的土壤孔隙度,参阅《中国土种志》及相关资料,获取华北平原北部地区各类型土壤各深度的孔隙度数据<sup>[16-18]</sup>,得到土壤饱和水分,再乘以土壤相对湿度,得到逐旬土壤实际水分,计算获得华北平原北部地区逐旬的多年

平均土壤含水量,进一步获得逐旬的土壤水分变化量  $\Delta W$ 。

### 1.2.4 需水量计算

作物系数即实际蒸散量与潜在蒸散量之比,本文将农作物正常生长情况下的实际蒸散量定义为需水量  $E_a$ 。华北平原北部 4—10 月主要为冬小麦和玉米轮作,因此根据作物类型与生长时期<sup>[19-20]</sup>获得农作物正常生长情况下逐旬的作物系数,再与多年平均潜在蒸散量相乘,便得到华北平原北部各站点逐旬的多年平均需水量。

### 1.2.5 缺水量计算

利用地理信息系统软件 ArcGIS 对各站点降水量、需水量和土壤水分变化量进行空间插值,进而根据水量平衡方程计算华北平原北部农田逐旬的缺水量,用以表征农田各时期的水分状况。缺水量为正表示干旱,需要人为灌溉以保证作物生长;缺水量为负表示水分充足,作物可正常生长。然后,逐旬分析华北平原北部农田缺水量的时空变化规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 华北平原北部农田 4 月缺水量

如图 1 所示,华北平原北部 4 月上旬普遍缺水,缺水量都在 40 mm 以上。天津、唐山等地缺水量较小,在 50 mm 以下,这是由于这些地区濒临渤海,降水较多;北京、石家庄、衡水等地缺水量在 50~60 mm 之间;保定、邢台、邯郸等地缺水较严重,缺水量在 60 mm 以上,需要大量灌溉才能维持作物生长。总体来看,4 月上旬华北平原北部缺水严重,河北西部缺水十分严重。4 月中旬华北平原

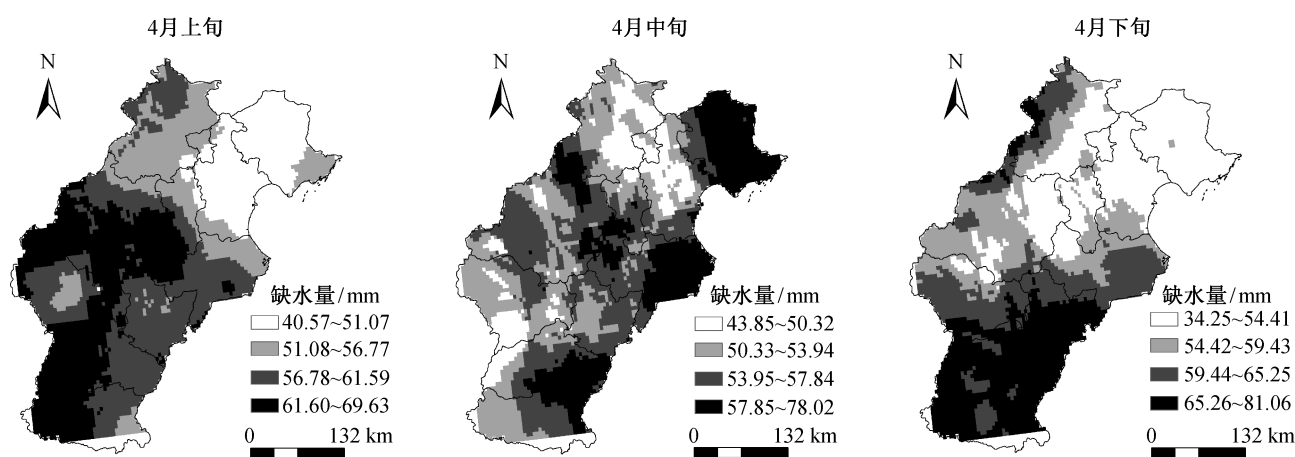


图 1 华北平原北部农田 4 月缺水量分布

Fig. 1 Water shortage of cropland in April in the north part of Northern China Plain

北部缺水状况有所缓解,大部分地区缺水量在 50~60 mm 之间。唐山缺水程度较严重,缺水量在 60 mm 以上,可能是蒸散量增加所致。4 月下旬,华北平原北部大部分地区缺水量增多,几乎所有地区缺水量在 50 mm 以上,河北南部邢台、邯郸等不少地区在 60 mm 以上,衡水地区缺水量达到 70 mm 以上。北京、天津、保定等中东部地区缺水量相对较小。总体来看,在整个 4 月,上旬沿海地区缺水较少,西部地区缺水较多;中旬沿海缺水较多,西部缺水较少;下旬河北南部缺水较严重。

### 2.2 华北平原北部农田 5 月缺水量

如图 2 所示,5 月上旬,华北平原北部地区降水开始增多,但作物需水量也随着作物生长变得更大,所以所有地区仍然缺水,基本上所有地区缺水量在 50 mm 以上。唐山、天津、石家庄、保定、沧州等地区缺水量在 60 mm 以上,衡水缺水尤为严重,达到 70 mm 以上。5 月中旬,降水缓解了华北平原北部地区东南部的缺水情况,唐山、天津、沧州、衡水、邯郸以及邢台等地缺水量在 50 mm 以下,不少地区下降到 40 mm 以下;北京、保定、石家庄等地缺水仍然严重,缺水量在 50 mm 以上。5 月下旬,河北中部和东南部地区缺水较为严重,保定、廊坊、衡水、沧州等地缺水量在 60 mm 以上;北京、唐山、石家庄等地缺水量在 50~60 mm 之间;天津缺水程度有所缓解,在 50 mm 以下。总体来看,在整个 5 月,上旬整个区域都缺水,河北东南部尤为干旱;中旬东南部缺水较少,西部和北部缺水较多;下旬河北中部和东南部缺水情况严重。

### 2.3 华北平原北部农田 6 月缺水量

如图 3 所示,6 月上旬,华北平原北部大部分地区缺水量仍然在 50 mm 以上,河北省南端邯郸、邢台以及东部沧州、唐山等地缺水量最大,在 60 mm 以上,保定、廊坊部分地区缺水量在 50 mm 以下,其余大部分地区缺水量在 50~60 mm 之间。6 月中旬,华北平原北部缺水量呈现南北分异规律,北京、天津、唐山等北部地区缺水量减小到 50 mm 以下,河北省南部大部分地区,包括石家庄、邢台、衡水等地缺水量在 60 mm 以上,是由需水量也随之增大导致。6 月下旬,华北平原北部大部分地区缺水量减少,沧州地区首次出现缺水量为负的情况,即自然水分供给超过需水量,不需要灌溉;其余大部分地区缺水量仍然为正,北京、天津、唐山、廊坊、衡水等地缺水量在 20 mm 以下,缺水较少;河北西部保定、石家庄、邢台等地区缺水较多,邯郸地区缺水量在 50 mm 以上,尤为干旱。总体来看,6 月上旬华北平原北部大部分地区缺水,东部和南部缺水尤为严重;中旬,北部缺水较少,南部缺水较多;下旬,首次在沧州地区出现负的缺水量,其余地区仍然缺水,但程度较轻,只有邯郸缺水仍然严重。

### 2.4 华北平原北部农田 7 月缺水量

如图 4 所示,7 月上旬,作物需水量增加,大部分地区仍然缺水,但缺水程度已相对较轻。唐山北部地区缺水量已在 20 mm 以下;唐山南部、沧州、邯郸等地缺水量在 20~30 mm 之间;石家庄、北京、保定、廊坊等地缺水量在 30 mm 以上,仍然比较干旱。7 月中旬,由于降水增加,华北平原北

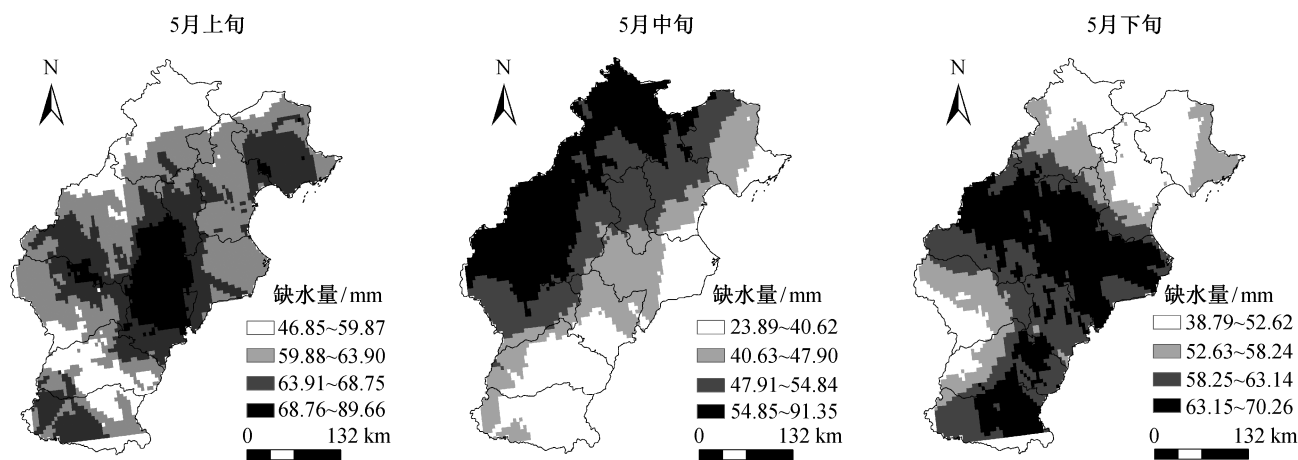


图 2 华北平原北部农田 5 月缺水量分布

Fig. 2 Water shortage of cropland in May in the north part of Northern China Plain

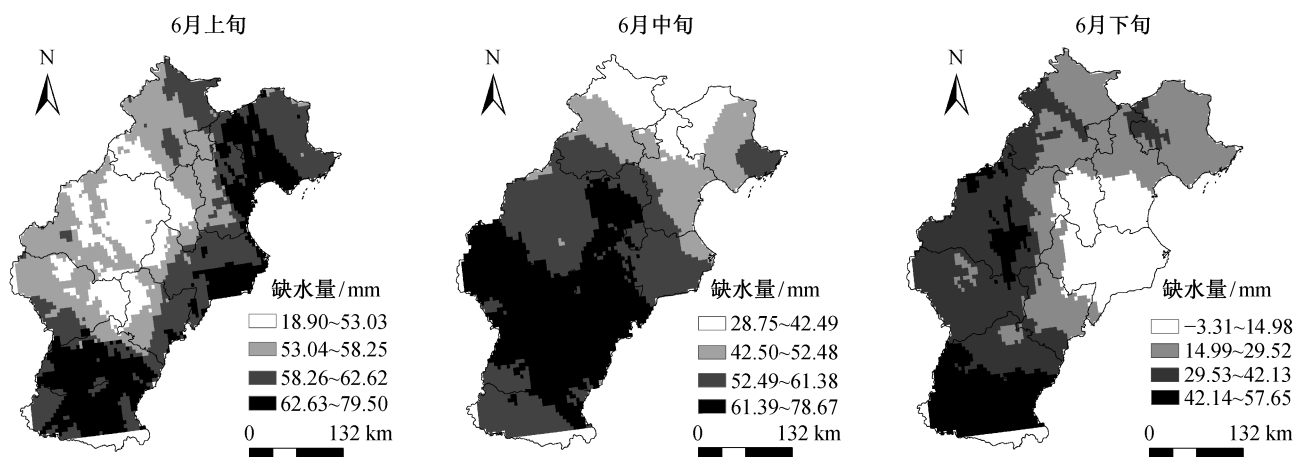


图 3 华北平原北部农田 6 月缺水量分布

Fig. 3 Water shortage of cropland in June in the north part of Northern China Plain

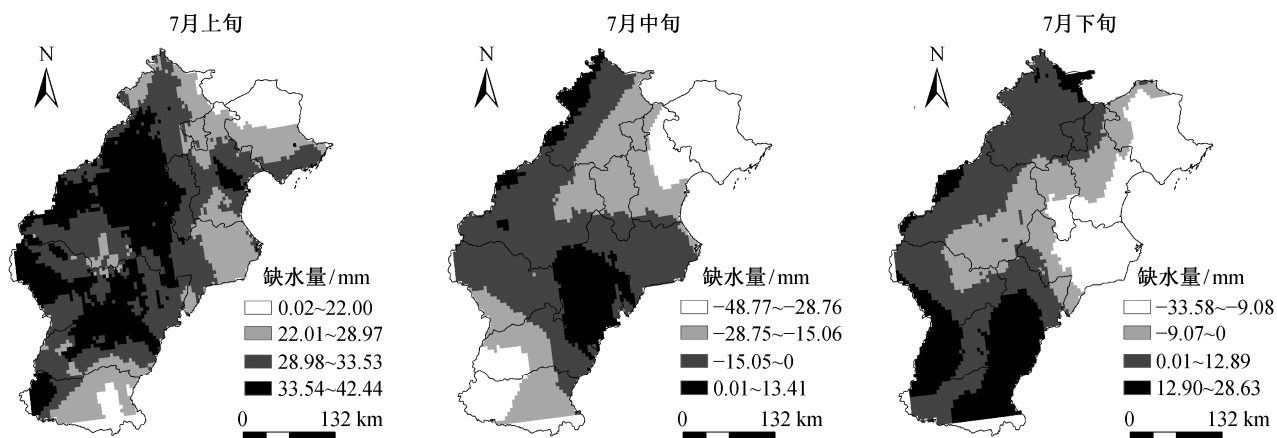


图 4 华北平原北部农田 7 月缺水量分布

Fig. 4 Water shortage of cropland in July in the north part of Northern China Plain

部大部分地区缺水为负，表明不需要灌溉，其中唐山、天津等沿海地区、以及邯郸部分地区缺水最小，在 $-30\text{ mm}$ 以下；廊坊、石家庄、邢台等地缺水在 $-30\sim-10\text{ mm}$ 之间；衡水、北京西北部地区仍然干旱，缺水仍然为正。7月下旬，华北平原北部大部分地区缺水变为正值，表明又开始缺水，但唐山、天津、保定东部、沧州、廊坊等东部地区缺水为负，其中沧州、唐山等地缺水最小，在 $-10\text{ mm}$ 以下，表明这些地区仍然比较湿润，不需要灌溉。其他地区缺水为正，衡水、邢台、邯郸地区缺水相对较多，在 $10\text{ mm}$ 以上。总体来看，7月上旬华北平原北部仍然缺水，但已经大大缓解，缺水整体较少，其中中部相对较多；中旬大部分地区缺水为负，表明十分湿润，只有衡水地区仍

然缺水；下旬，湿润区域缩小到东南沿海少数地区，其他地区变回干旱状态，南部相对更为干旱。

## 2.5 华北平原北部农田 8 月缺水量

如图 5 所示，8月上旬，只有唐山、沧州极少数地区缺水为负，表明不需要灌溉，其他大部分地区继续缺水，但缺水较少，大多数地区在 $10\sim30\text{ mm}$ 之间，天津、廊坊、沧州等地缺水在 $20\text{ mm}$ 以下，衡水地区缺水在 $30\text{ mm}$ 以上，十分干旱。8月中旬，所有地区缺水变为正值，表明所有地区都很干旱，但缺水相对春季仍然较少，唐山、天津、沧州等地缺水在 $10\text{ mm}$ 以下，缺水程度较轻；研究区域西北部以及南部缺水在 $20\text{ mm}$ 以上，干旱严重。8月下旬，河北西南部少数地区包括邢台、邯郸等地缺水变为负值，其余地区为正

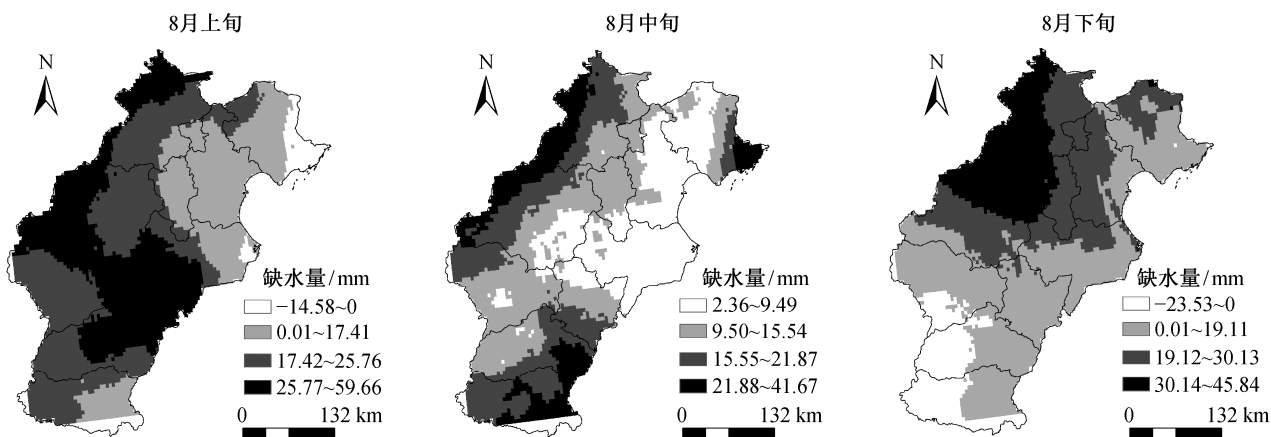


图 5 华北平原北部农田 8 月缺水分布

Fig. 5 Water shortage of cropland in August in the north part of Northern China Plain

值。衡水、石家庄等地缺水在 15 mm 以下；北京以及保定北部地区缺水增加，在 30 mm 以上，干旱程度加剧。总体来看，8 月上旬，缺水为负的湿润地区缩小到东部极少数地区，衡水缺水严重；8 月中旬，河北西部和南部地区缺水严重；8 月下旬，河北南部缺水缓解，但北京和保定缺水程度严重。

### 2.6 华北平原北部农田 9 月缺水

如图 6 所示，9 月上旬，华北平原北部所有地区缺水都为正值，并且相对于 8 月增大，干旱程度变得严重，南部缺水在 40 mm 以下，相对较少，石家庄缺水最少，在 30 mm 以下；北京、天津、沧州、廊坊、唐山等地缺水在 50~60 mm 之间，干旱程度十分严重。9 月中旬，干旱区域呈条带状分布，河北省西部太行山一线以及东南部靠近山东一带缺水最大，在 35 mm 以上，缺水程度相对严

重；北京、唐山、天津、廊坊等地干旱缓解，缺水减少到 30 mm 以下。华北平原北部整体上相对于上月干旱程度有所减轻。9 月下旬，华北平原北部地区仍然干旱，但所有地区缺水都在 45 mm 以下，大部分地区缺水在 30~40 mm 之间，石家庄、邢台、邯郸等西南部地区缺水相对较少，在 30 mm 以下。总体来看，9 月上旬干旱较为严重，南部相对缺水较少，北部缺水较多；中旬基本上所有地区缺水下降到 40 mm 以下，干旱区域呈带状分布；9 月下旬大部分地区缺水仍然在 40 mm 以下，中旬的条带状干旱区在下月缺水相对较少。

### 2.7 华北平原北部农田 10 月缺水

如图 7 所示，10 月上旬，华北平原北部地区大部分地区缺水在 40 mm 以下，石家庄、北京、天津以及周边地区缺水相对较多，在 20 mm 以上，北

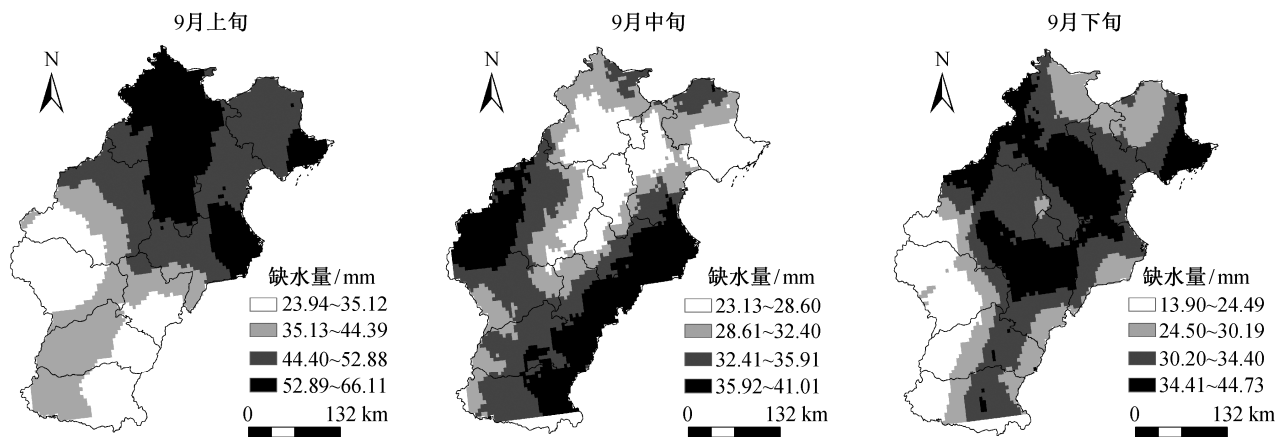


图 6 华北平原北部农田 9 月缺水分布图

Fig. 6 Water shortage of cropland in September in the north part of Northern China Plain

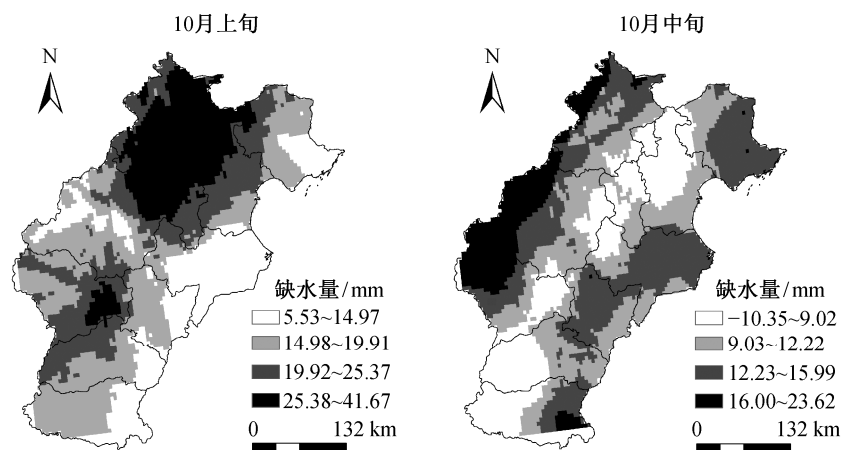


图 7 华北平原北部农田 10 月缺水分布

Fig. 7 Water shortage of cropland in October in the north part of Northern China Plain

京南部地区缺水达到 30 mm 以上；其他大部分地区缺水在 20 mm 以下。10 月中旬，华北平原北部地区大部分地区缺水程度有所缓解，缺水基本上在 20 mm 以下，只有保定部分地区缺水在 20~30 mm 之间；天津、廊坊、邯郸等地缺水在 10 mm 以下。整体来看，华北平原北部地区在 10 月仍然缺水，但缺水较小，上月，北京、天津较为干旱；下旬，干旱区域转向西发生移动。

## 2.8 华北平原北部农田 4 月上旬到 10 月中旬生长期内缺水量

统计华北平原北部农田从 4 月上旬到 10 月中旬总的缺水量，即农田生长期内缺水量，结果如图 8 所示。在整个生长期内，华北平原北部所有地区缺水都在 550 mm 以上，表明缺水十分严重，农田需要大量的灌溉。唐山地区生长期内缺水量最小，在 600 mm 以下；天津和沧州东部地区缺水也较小，在 600~650 mm 之间；廊坊、沧州中部、石家庄、邢台以及邯郸西部地区缺水在 650~700 mm 之间；北京、保定、衡水、邢台东部等地区缺水达到 700 mm 以上，缺水十分严重，其中北京西部、保定西北部、以及衡水地区缺水达到 740 mm 以上，是干旱最为严重的区域。

## 3 讨论

水分是农作物生长的重要影响因素，研究农业水循环对农业生产有重要的指导意义。以往的研究或者只从区域角度研究降水和潜在蒸散量等气象要素的时空特征，或者利用实验的方法研究小区域蒸

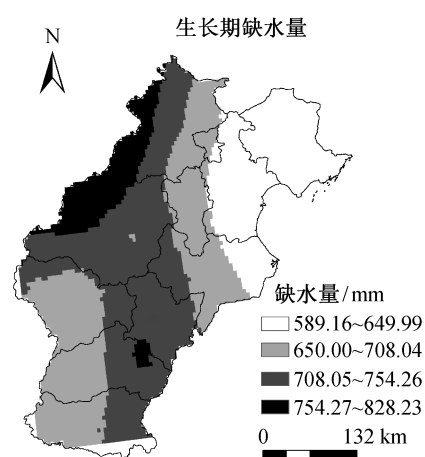


图 8 华北平原北部农田生长期内缺水量分布

Fig. 8 Water shortage of cropland through growth period in the north part of Northern China Plain

散。本文利用从国家气象局获得的土壤相对湿度数据，综合考虑水循环过程中降水、蒸散和土壤水分 3 个核心变量，构建了华北平原北部农田水循环模型，设计了农田生长过程中缺水指标，对该地区农业灌溉有很大的指导意义。

春季干旱最为严重的区域位于河北中南部，如石家庄、沧州、邢台、邯郸等市，天津、唐山等东部地区干旱程度较轻；干旱的缓解也是东部地区最先开始，7 月东部地区缺水最小，水分最为充足；秋季，干旱最为严重的区域变为保定、北京、廊坊等西北部区域。需要注意的是，衡水和北京西部地区在整个生长过程中干旱情况都十分严重，即使在 7 月中旬其他地区缺水都为负值时，该地区缺水

量仍然为正,十分干旱。

本文设计缺水指标,分析了华北平原北部农田水循环的时空特征,但由于研究区域较大以及数据的缺乏,在土壤水分计算以及需水量计算过程中,都是利用文献中的研究结果,并且土壤类型和作物类型的设定都比较理想化,与实际情况可能会有一定出入,在以后的研究中可以调研获取更详尽的数据,以便进行更细致的分析。

## 4 主要结论

综合以上分析和讨论,可以得到以下结论。

1) 华北平原北部农田在整个生长阶段缺水状况都十分严重,所有地区在整个生长期缺水量都在 550 mm 以上,从 4 月中旬到 10 月下旬,只有 7 月中旬一个时间段大部分地区缺水量为负,水分较为充足,其他时段内大部分地区都处于缺水状态。

2) 华北平原北部农田在一年内春季缺水最为严重,4 和 5 月大部分地区缺水量都在 50 mm 以上,是整个生长过程中缺水最多的时段。

3) 从 6 月开始,由于降水增多,华北平原北部农田缺水状况得到缓解,7 月中旬,大部分地区缺水量为负,到 7 月下旬,缺水量为负的区域只有东部的唐山、天津、沧州等地。

4) 华北平原北部农田在秋季仍然缺水,大部分地区缺水量在 30 mm 以上,但相对于春季干旱程度较轻。

5) 春季干旱最为严重的区域位于河北中南部,东部干旱程度较轻;干旱的缓解也是东部最先开始,7 月东部地区缺水最小,水分最为充足;秋季干旱最为严重的区域变为研究区域西北部地区。

6) 衡水以及北京西部地区在整个农作物生长过程中干旱情况都十分严重,所有时段内缺水量都为正,并且在大部分时间内相比其他区域缺水更为严重,是干旱情况十分严重的地区。

## 参考文献

[1] Entekhabi D, Asrar G R, Betts A K, et al. An agenda for land surface hydrology research on a call for the second international hydrological decade. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(10): 2043-2059

[2] Li C. Carbon isotope composition, water-use efficiency and biomass productivity of *Eucalyptus microtheca* populations under different water

supplies. *Plant and Soil*, 1999, 214: 165-171

[3] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. *地理科学*, 2013, 33(4): 457-464

[4] Sterling M S, Ducharne A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390

[5] 赵少华, 杨永辉, 邱国玉, 等. 河北平原 34 年来气候变化趋势分析. *资源科学*, 2007, 29(4): 109-113

[6] 李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近 50 年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 57-63

[7] 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型井灌区农田水循环过程研究回顾. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1004-1010

[8] 李取生, 李晓军, 李秀军. 松嫩平原西部典型农田需水规律研究. *地理科学*, 2004, 24(1): 109-114

[9] 林耀明, 夏军, 陈永瑞, 等. 中国亚热带东部丘陵区农田生态系统水循环特征. *江西科学*, 2003, 21(2): 110-117

[10] 徐宗学, 张玲, 阮本清. 北京地区降水量时空分布规律分析. *干旱区地理*, 2006, 29(2): 186-192

[11] 王晓霞, 徐宗学, 阮本清. 天津市降水量变化趋势的时空分布特征. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(9): 92-96

[12] 刘剑锋, 刘学锋, 刘方圆, 等. 河北省气候干湿状况变化特征分析. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(2): 83-86

[13] 李春强, 杜毅光, 李保国, 等. 河北省近四十年(1965—2005)气温和降水变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(7): 1-7

[14] 刘钰, Fernando R M, Pereira L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究. *水利学报*, 1999(6): 45-50

[15] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 北京: 科学出版社, 1999

[16] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998

[17] 梁文清. 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012

[18] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究. *水利学报*, 2010, 41(8): 953-959

[19] 郭瑞萍, 莫兴国. 森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1751-1757

[20] 赵双喜, 张耀生, 赵新全, 等. 草地蒸散量计算方法的比较研究. *中国农业气象*, 2007, 28(增刊): 115-117

[21] 李艳, 刘海军, 罗雨. 北京地区潜在蒸散量计算方法的比较研究. *灌溉排水学报*, 2010, 29(5): 27-32

[22] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956~2000 年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25(3): 378-387