

慕臣英,梁红,纪瑞鹏,等. 沈阳春玉米不同生育阶段需水量及缺水变化特征[J]. 干旱气象,2019,37(1):127-133, [MU Chenying, LIANG Hong, JI RuiPeng, et al. Variation Characteristics of Spring Maize Water Requirement and Water Deficit in Different Growth Stages in Shenyang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1):127-133], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0127

## 沈阳春玉米不同生育阶段需水量 及缺水变化特征

慕臣英<sup>1,2</sup>, 梁红<sup>1</sup>, 纪瑞鹏<sup>2</sup>, 徐全辉<sup>1</sup>,  
周晓宇<sup>3</sup>, 隋东<sup>1</sup>, 赵凤<sup>4</sup>, 高桐<sup>1</sup>

(1. 辽宁省沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110016;  
3. 沈阳区域气候中心, 辽宁 沈阳 110166; 4. 辽宁省沈阳市苏家屯气象局, 辽宁 沈阳 110101)

**摘要:**基于 1960—2016 年沈阳 5 个气象观测站玉米发育期资料及气象观测资料, 计算春玉米不同生育阶段需水量、有效降水量, 进而计算水分盈亏指数并分析其变化特征。结果表明: 沈阳市春玉米除播种—出苗、出苗—七叶及拔节—抽雄期有效降水量呈增加趋势, 其他发育阶段及全生育期呈显著减少趋势; 全生育期及各生育阶段需水量均呈下降趋势; 全生育期缺水总体以下降为主, 其中拔节—抽雄期处于强下降趋势, 播种—出苗和出苗—七叶期呈弱下降趋势。沈阳北部有效降水量偏少、需水量偏高, 是缺水高值区; 拔节—抽雄期缺水最大。

**关键词:**春玉米; 作物需水量; 缺水; 有效降水量

**文章编号:**1006-7639(2019)01-0127-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0127

**中图分类号:**P422

**文献标志码:**A

### 引言

春玉米是辽宁省主要粮食作物之一, 主要采取雨养方式种植<sup>[1]</sup>。受气候变化影响辽宁省暖干趋势明显, 进入 20 世纪 90 年代以来, 东北地区春旱和春夏连旱事件频发, 降水量和作物需水量年际间、地域间波动较大, 导致水分亏缺程度地区间差异较大<sup>[2-5]</sup>。研究表明, 气候变化已使辽宁农业气候资源发生显著性变化, 东北地区年降水量呈减少趋势, 20 世纪 90 年代末以后尤其明显<sup>[1,6]</sup>, 春季降水量略有增加趋势, 夏季降水量有减少趋势, 作物生长季降水有减少趋势, 同时东北地区降水有向不均衡、极端化发展的趋势, 降水量、蒸散量变化直接影响作物生长发育和产量<sup>[7-8]</sup>。近年来针对玉米<sup>[9-11]</sup>、冬小麦<sup>[12]</sup>、水稻<sup>[13]</sup>等作物生育期内有效降水量、需水量、水分盈亏等进行了大量研究<sup>[14-16]</sup>, 取得一定成果。

刘钰等<sup>[15]</sup>分析 1970—2000 年东北玉米全生育期的有效降水量和需水量, 认为玉米全生育期水分亏缺量多年平均值为 10~220 mm。玉米不同生育阶段对水分的需求量不同, 不同生育期或生育阶段水分盈亏对产量形成的影响也不相同<sup>[17-18]</sup>, 因此, 对春玉米各生育阶段水分盈亏规律研究具有农业生产指导意义。

沈阳地处辽宁中部, 是辽宁省春玉米主产区, 研究沈阳地区玉米不同生育阶段有效降水量及水分盈缺演变特征, 对指导当地农业生产、优化灌溉模式具有重要意义。本文基于 1960—2016 年沈阳 5 个气象观测站玉米发育期资料及气象观测资料, 通过计算春玉米不同生育阶段需水量、有效降水量, 进而计算水分盈亏指数, 以期对沈阳区域玉米生育阶段有效降水量和需水量变化趋势有所了解, 为沈阳地区水资源合理配置、种植布局、防灾减灾提供科学依据。

收稿日期:2018-05-22; 改回日期:2018-08-13

基金项目:中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金项目(2017SYIAE08)和辽宁省市县科研课题(2018SXB01)共同资助

作者简介:慕臣英(1988—),女,工程师,主要从事农业气象研究。E-mail:mucheny@126.com。

通信作者:梁红(1966—),女,高级工程师,主要从事天气预报及气候评估研究。E-mail:sylianghong@sina.com。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

选取1960—2016年沈阳地区时间序列较长的5个气象观测站(康平、法库、新民、辽中和浑南)玉米发育期资料和常规气象观测资料,观测站点分布见图1。气象观测资料包括逐日最高气温、最低气温、降水量、平均风速、日照时数等。根据玉米多年发育期资料,采用生育阶段长度的多年平均值来代表当地一般生育阶段长度,主要划分为播种—出苗(4月下旬至5月上旬)、出苗—七叶(5月中旬至下旬)、七叶—拔节(6月上旬)、拔节—抽雄(6月中旬至7月上旬)、抽雄—乳熟(7月中旬至8月上旬)和乳熟—成熟期(8月中旬至9月中旬)6个时期。

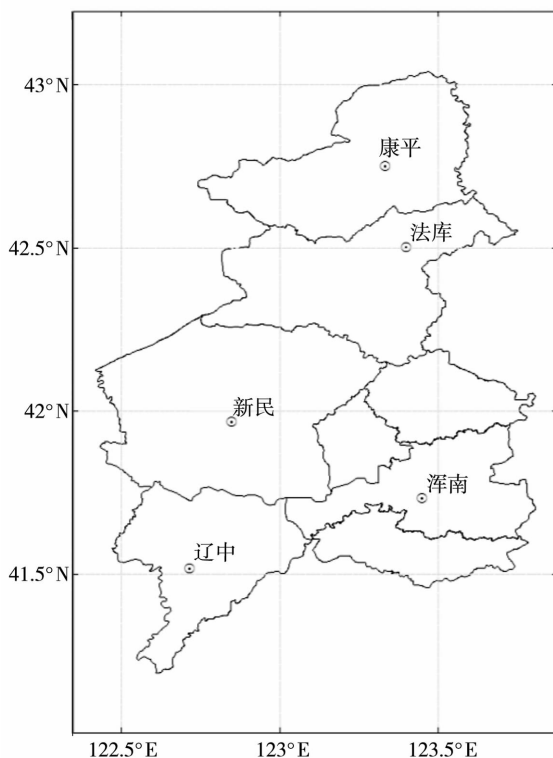


图1 研究区域气象观测站分布

Fig. 1 The distribution of meteorological stations in study area

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 作物有效降水量

作物有效降水量特指旱作种植条件下,总降水量中能够保存在作物根系层中用于满足作物蒸散需要的那部分降水量,它不包括地表径流和渗漏至作物根区以下的部分<sup>[19]</sup>。影响有效降水量的主要因子有降雨强度、土壤质地及结构、地形及平整度、降水前的土壤含水率、作物种类、生育阶段等<sup>[20]</sup>。

某次降水过程的有效降水量 $P_e$ 计算公式为:

$$P_e = a \cdot P_0 \quad (1)$$

式中: $P_0$ (mm)为某次降水过程的总降水量; $a$ 为有效利用系数;当 $P_0 \leq 5$  mm时, $a = 0$ ;当 $5$  mm  $\leq P_0 \leq 50$  mm, $a = 0.9$ ;当 $P_0 \geq 50$  mm, $a = 0.75$ ;生育阶段多次降水过程的有效降水量累积得到该阶段有效降水量<sup>[9,20]</sup>。

#### 1.2.2 作物需水量

把作物标准条件下(长势良好,供水充足)的逐日蒸散量作为理论作物需水量,利用FAO推荐的作物系数法<sup>[21]</sup>计算:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中: $ET_c$ (mm·d<sup>-1</sup>)为逐日蒸散量; $ET_0$ (mm·d<sup>-1</sup>)为逐日参考作物蒸散量,反映大气蒸发能力对植物需水量的影响; $K_c$ 为逐日作物系数,反映作物蒸腾、土壤蒸发的综合效应,受作物类型、气候条件、土壤蒸发、作物生长状况等多种因素影响,这里采用纪瑞鹏等<sup>[22]</sup>研究的辽宁省区域结果(表1)。

生育期逐日参考作物蒸散量 $ET_0$ 利用FAO推荐的Penman-Monteith公式<sup>[21]</sup>计算:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

式中: $R_n$ (MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)为冠层表面净辐射; $G$ (MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)为土壤热通量,在计算以日或旬为单位的时间时,相对于 $R_n$ 很小可忽略; $T$ (°C)为日平均温度; $\gamma$ (kPa·°C<sup>-1</sup>)为干湿表常数; $U_2$ (m·s<sup>-1</sup>)为距离地面2 m处的风速; $e_s$ 和 $e_a$ 分别为气温为 $T$ 时的饱和水汽压和实际水汽压(kPa); $\Delta$ 为饱和水汽压-温度关系曲线斜率(kPa·°C<sup>-1</sup>)。

表1 沈阳地区作物系数月平均值

Tab. 1 The monthly average crop coefficients in Shenyang

月份	作物系数
4月	0.39
5月	0.50
6月	0.70
7月	1.17
8月	1.12
9月	0.86

#### 1.2.3 作物缺水

作物缺水<sup>[23]</sup>又称为灌溉需水量,为作物生育

阶段内需水量和同期有效降水量的差值。公式为:

$$W = \sum ET_c - \sum P_e \quad (4)$$

式中:  $\sum ET_c$  为作物生育阶段内逐日蒸散量之和;  $\sum P_e$  为生育阶段内多次有效降水量过程的累计量。若  $W > 0$ , 说明有效降水不能满足玉米需水要求, 作物缺水, 需要灌溉;  $W = 0$ , 水分供需平衡;  $W < 0$ , 则表示有效降水能满足玉米需水要求, 作物不缺水。

#### 1.2.4 作物水分盈亏指数

作物水分盈亏指数 CWSDI (crop water surplus deficit index) 是表征作物水分亏缺程度的指标之一。为了更准确反映玉米不同生育阶段的需水特征和水分供应状况, 在不考虑灌溉条件下以有效降水量为供水指标, 生育阶段作物蒸散量为需水指标, 构建作物水分盈亏指数, 公式<sup>[24-25]</sup>为:

$$CWSDI = \frac{-W}{\sum ET_c} \quad (5)$$

式中: 当  $CWSDI > 0$ , 表示该生育阶段作物水分盈余; 当  $CWSDI = 0$ , 表示该生育阶段作物水分收支平衡; 当  $CWSDI < 0$ , 表示水分亏缺。高晓容等<sup>[9]</sup>参照相对湿度指数<sup>[26]</sup>及作物水分亏缺指数干旱等级<sup>[27]</sup>建立了东北玉米生育阶段水分盈亏指数旱涝等级标准(表2), 本研究采用此标准进行玉米生育阶段旱涝评估。

表2 东北玉米生育阶段水分盈亏指数的旱涝等级

Tab.2 Classification criteria of drought and wet at different growth stages of maize based on CWSDI

等级	CWSDI/%	
	其余生育阶段	抽雄—乳熟期
特旱	$\leq -95$	$\leq -90$
重旱	$(-95, -85]$	$(-90, -80]$
中旱	$(-85, -65]$	$(-80, -60]$
轻旱	$(-65, -45]$	$(-60, -40]$
正常	$(-45, 45]$	$(-40, 45]$
轻涝	$(45, 65]$	$(45, 65]$
中涝	$(65, 85]$	$(65, 85]$
重涝	$(85, 95]$	$(85, 95]$
特涝	$> 95$	$> 95$

#### 1.2.5 气候倾向率

气象要素的趋势变化可采用线性方程表示, 即:

$$Y = at + b \quad (6)$$

式中:  $Y$  为气象要素;  $t$  为时间;  $a$  为线性趋势项。将

$a \times 10$  称为气象要素每 10 a 的气候倾向率, 即  $a > 0$  时, 说明随着时间  $t$  的增加,  $Y$  呈上升趋势;  $a < 0$  时, 说明随时间  $t$  的增加,  $Y$  呈下降趋势。  $a$  绝对值的大小反映了  $Y$  上升或下降的速率<sup>[28]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 春玉米不同发育期有效降水量变化

图2为1960—2016年沈阳地区春玉米不同发育期有效降水量及其气候倾向率分布。1960—2016年沈阳地区春玉米全生育期平均有效降水量为325.0~407.0 mm, 区域平均值为367.7 mm, 总体呈南部偏高, 逐步向北部递减的趋势, 全生育期有效降水量最低值出现在北部康平。近57 a春玉米全生育期有效降水量除康平气候倾向率为  $4.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其他地区均呈减少趋势, 气候倾向率为  $-4.8 \sim -2.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 但均未通过0.05显著性检验。

沈阳春玉米各生育阶段有效降水存在差异, 各发育期平均有效降水量由小到大依次为: 播种—出苗 < 出苗—七叶 < 七叶—拔节 < 拔节—抽雄 < 乳熟—成熟 < 抽雄—乳熟, 拔节前各生育阶段有效降水量偏少, 多年平均有效降水量为16.0~23.2 mm, 拔节后有效降水量明显增加, 多年平均有效降水量为82.3~126.1 mm。空间分布特征与全生育期一致, 南部偏多、北部偏少, 其中北部康平地区各发育阶段均为有效降水量最低值区, 其次是法库、新民一带, 浑南有效降水量最多。

各发育期除播种—出苗、出苗—七叶及拔节—抽雄期有效降水量呈增加趋势, 气候倾向率为  $0 \sim 5.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其他发育阶段有效降水量呈显著减少趋势, 尤以乳熟—成熟期最为显著, 气候倾向率为  $-8.8 \sim -0.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。从空间分布来看, 播种—出苗、出苗—拔节及拔节—抽雄期各地区有效降水量气候倾向率均为正值, 呈增加趋势; 抽雄—乳熟、乳熟—成熟期各地有效降水量气候倾向率多为负值, 呈下降趋势, 以南部浑南、辽中地区较为显著。北部康平、法库地区乳熟前气候倾向率多为正, 有效降水量呈增加趋势。通过对有效降水量年际变化趋势统计检验, 仅浑南站点播种—出苗期通过0.05显著性检验。

### 2.2 春玉米不同发育期需水量变化

图3为1960—2016年沈阳地区春玉米不同发育期需水量及气候倾向率分布。研究区域春玉米全生育期近57 a平均需水量为479.4~514.0 mm, 区域平均值为493.9 mm, 呈现北部多、南部少特点, 高

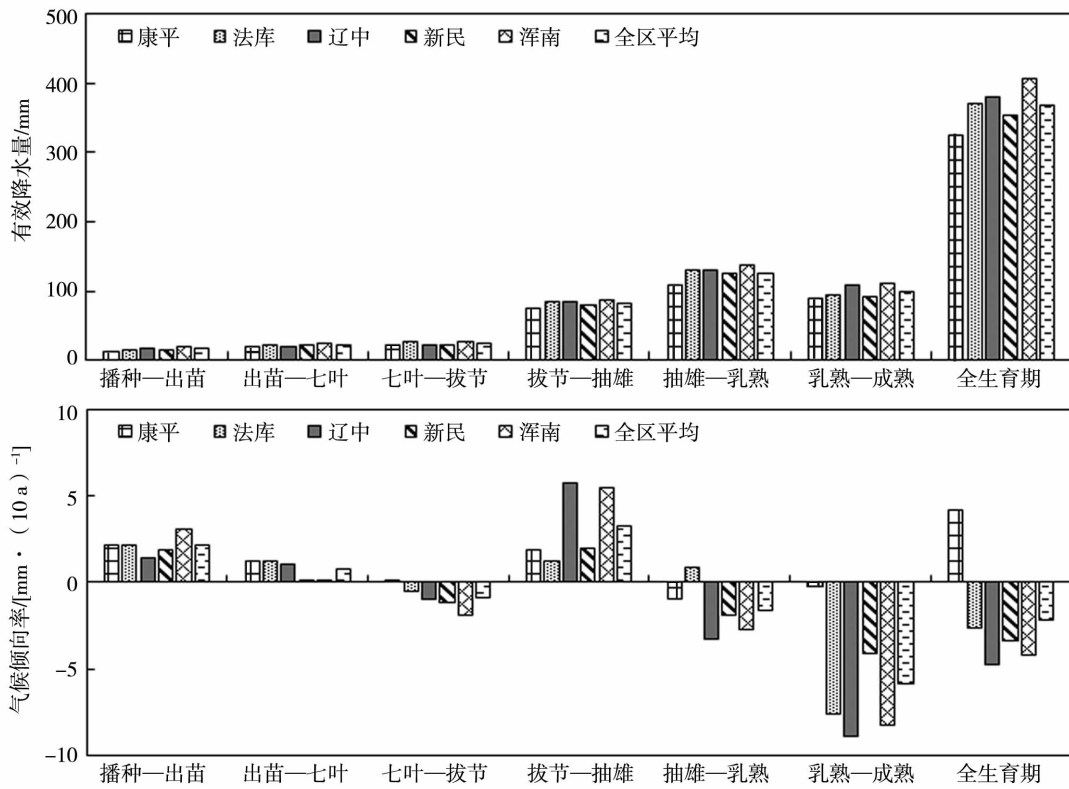


图2 1960—2016年沈阳地区春玉米不同发育期有效降水量及气候倾向率变化

Fig.2 Variation of effective precipitation and its climate tendency rate at different growth periods of spring maize in Shenyang from 1960 to 2016

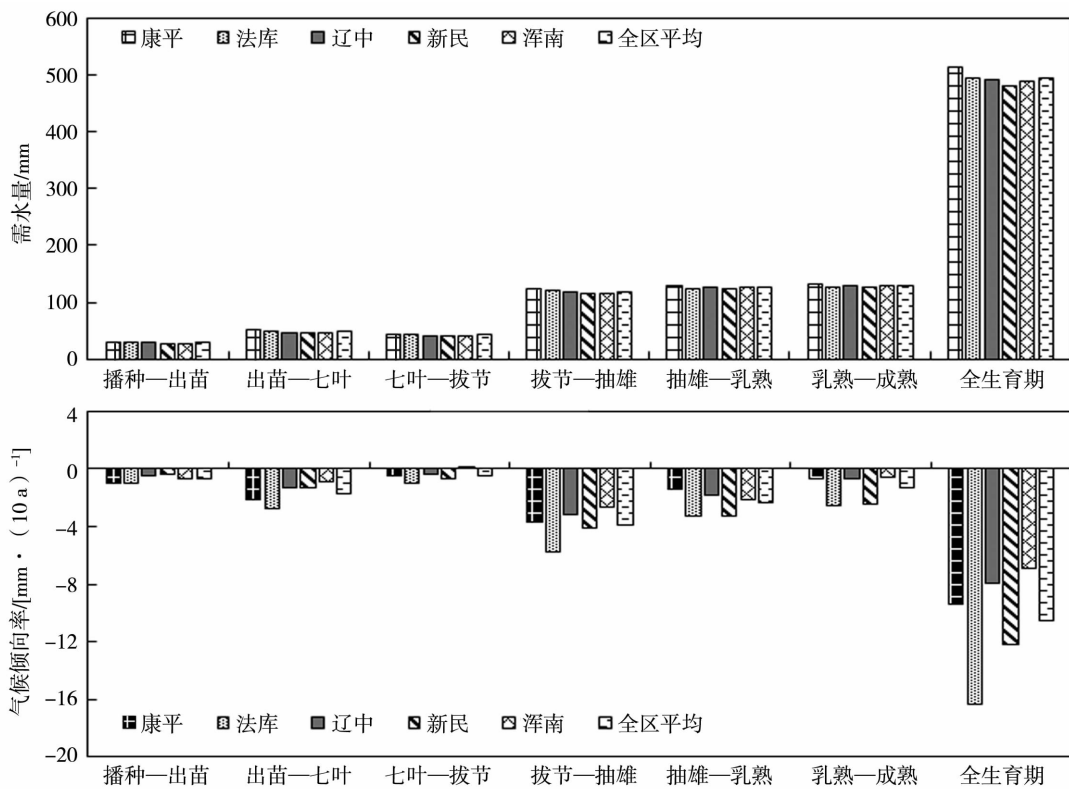


图3 1960—2016年沈阳地区春玉米不同发育期需水量及气候倾向率变化

Fig.3 Variation of water requirement and its climate tendency rate at different growth periods of spring maize in Shenyang from 1960 to 2016

值区分布在北部康平、法库一带。近 57 a 沈阳各地区全生育期需水量均呈减少趋势,气候倾向率为  $-16.3 \sim -7.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 区域平均值为  $-10.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 均通过 0.05 显著性检验。作物需水量的变化与日照、降水、风速、气温等均有关系,是一个极其复杂的过程,其中受日照的影响尤为显著,远大于气温,日照时数减少造成到达地面辐射能减少,引起需水量的下降<sup>[29-31]</sup>。辽宁地区日照时数和太阳辐射均呈减少趋势,这可能与人类活动产生气溶胶及其他空气污染物,改变大气尤其是云的光学特性有关<sup>[32-33]</sup>。

1960—2010 年沈阳春玉米各生育期需水量存在差异,近 57 a 沈阳春玉米各发育期需水量由小到大依次为:播种—出苗 < 七叶—拔节 < 出苗—七叶 < 拔节—抽雄 < 抽雄—乳熟 < 乳熟—成熟,生育前期作物需水量偏低,后期需水量逐渐偏高,播种—出苗期需水量为  $28.2 \sim 30.5 \text{ mm}$ ,乳熟—成熟期需水量为  $126.1 \sim 132.3 \text{ mm}$ 。空间分布与全生育期一致,呈现北部多、南部少的特点,这种差异性在拔节—抽雄期最小,极差为  $2.4 \text{ mm}$ ,播种—出苗期最大,极差为  $10.5 \text{ mm}$ 。

各地区不同生育阶段需水量气候倾向率均为负值,呈下降趋势,其绝对值由小到大依次为:七叶—拔节 < 播种—出苗 < 乳熟—成熟 < 出苗—七叶 < 抽雄—乳熟 < 拔节—抽雄,其中变幅较大的拔节—抽雄期,其气候倾向率为  $-5.8 \sim -2.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 研究区域站点均通过 0.05 显著性检验。七叶—拔节和播种—出苗期玉米需水量变幅较小,气候倾向率为  $-1.0 \sim -0.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,且仅播种—出苗期康平、法库和浑南地区通过 0.05 显著性检验。空间上播种至抽雄,北部康平、法库地区需水量高于其他地区,步入乳熟期后法库、辽中地区需水量偏高。

### 2.3 春玉米不同发育期缺水及 CWSDI 变化

图 4 为 1960—2016 年沈阳地区春玉米不同发育期缺水及气候倾向率分布。沈阳春玉米全生育期平均缺水量为  $82.63 \sim 188.90 \text{ mm}$ ,区域平均值为  $126.2 \text{ mm}$ ,总体上呈现由北向南递减趋势,南部浑南地区缺水最小、北部康平最大。近 57 a 沈阳各地区春玉米全生育期缺水呈减少趋势,气候倾向率为  $-13.7 \sim -2.7 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,区域平均值为  $-8.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,均未通过 0.05 显著性检验。

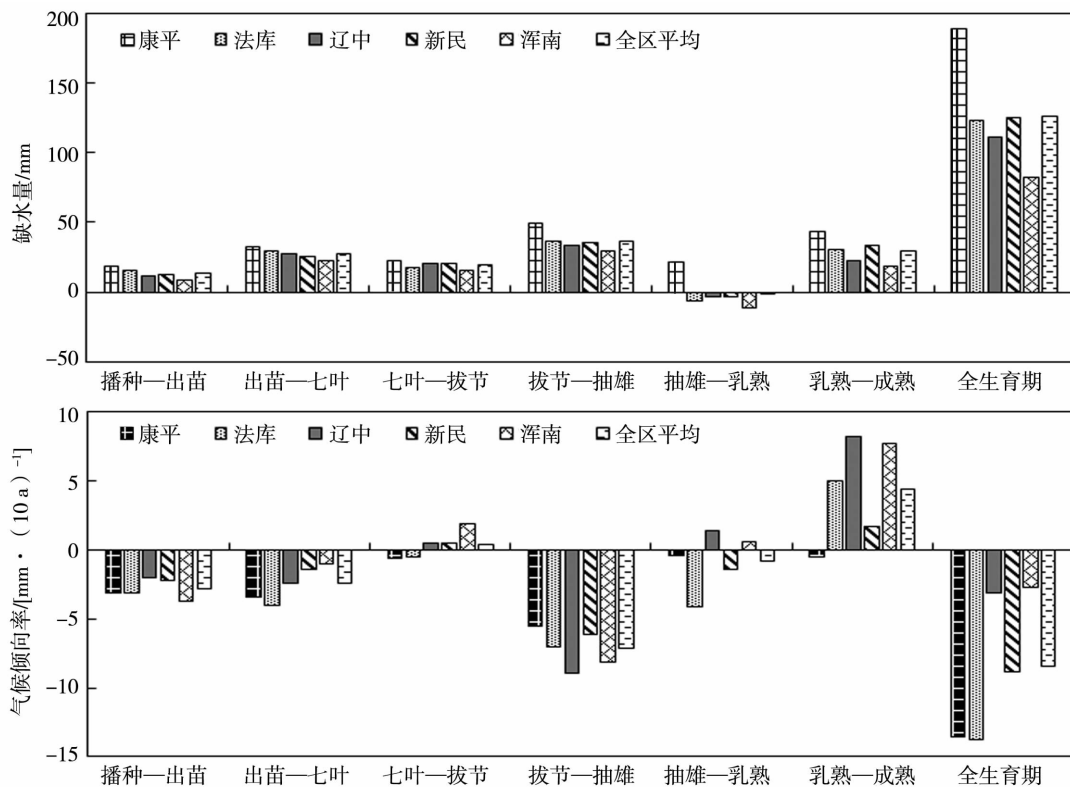


图 4 1960—2016 年沈阳地区春玉米不同发育期缺水及其气候倾向率变化

Fig. 4 Variation of water deficit and its climate tendency rate at different growth periods of spring maize in Shenyang from 1960 to 2016

各发育期缺水量由小到大依次为:抽雄—乳熟 < 播种—出苗 < 七叶—拔节 < 出苗—七叶 < 乳熟—成熟 < 拔节—抽雄,其中拔节—抽雄期缺水量为 29.1~49.7 mm,区域平均值为 36.8 mm;乳熟—成熟期缺水量为 18.4~43.4 mm,区域平均值为 29.7 mm;抽雄—乳熟期除康平缺水量为 22.0 mm 外,其他地区为 -11.0~-3.0 mm,呈现水分盈余特点。空间分布上各发育期均呈现北高南低的特点,这种差异性在抽雄—乳熟期最大,极差为 33.0 mm,七叶—拔节期最小,极差为 6.9 mm。

拔节—抽雄期缺水量处于强下降变化趋势,气候倾向率为  $-8.9 \sim -5.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,区域平均值为  $-7.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,新民和浑南地区变幅较大,通过 0.05 显著性检验;播种—出苗和出苗—七叶期呈弱下降趋势,缺水量气候倾向率为  $-4.0 \sim -1.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,区域平均值为  $-2.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,变幅较大区域集中在北部康平、法库一带,通过 0.05 显著性检验;七叶—拔节和抽雄—乳熟期变化幅度较弱,北部呈弱的下降趋势,气候倾向率为  $-4.2 \sim -0.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,区域

平均值为  $-1.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,南部呈弱的增加趋势,气候倾向率为  $0.5 \sim 1.9 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,区域平均值为  $1.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,各站点均未通过 0.05 显著性检验;乳熟—成熟期除康平缺水量气候倾向率为  $-1.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,其他地区呈较强增加趋势,气候倾向率为  $1.7 \sim 8.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,以新民和浑南较为明显,各站点均未通过 0.05 显著性检验。

CWSDI 不仅考虑了降水和作物蒸散量两项因子,也反映了实际供水情况与最大水分需要量的平衡关系,可较好表征农田湿润度和作物旱涝情况。表 3 列出了近 57 a 沈阳各地区生育阶段多年平均 CWSDI,各地全生育期 CWSDI 为  $-35.9\% \sim -15.9\%$ ,区域平均值为  $-24.4\%$ 。其中出苗—七叶期水分盈亏指数绝对值最大,且为负值,说明处于缺水状态。

参照玉米生育阶段水分盈亏指数旱涝等级标准,近 57 a 康平、法库播种—出苗期,全区出苗—七叶期,新民七叶—拔节期属于轻度干旱等级。说明沈阳春季虽然作物需水量较少,但有效降水偏少,气温回暖、地表蒸发量大,会影响春玉米的播种出苗,特别是沈阳北部地区。

表 3 1960—2016 年沈阳地区春玉米不同生育阶段平均 CWSDI

Tab. 3 The averaged CWSDI of spring maize at different growth periods in Shenyang from 1960 to 2016

生育阶段	单位: %					
	康平	法库	新民	辽中	浑南	全区平均
播种—出苗	-55.2	-45.7	-34.3	-41.8	-21.6	-39.7
出苗—七叶	-61.4	-55.3	-55.1	-53.2	-45.2	-54.1
七叶—拔节	-44.0	-33.1	-44.8	-43.7	-31.5	-39.4
拔节—抽雄	-36.7	-26.4	-26.1	-28.7	-22.5	-28.1
抽雄—乳熟	-14.1	9.1	6.9	6.4	13.7	4.4
乳熟—成熟	-30.7	-21.6	-15.0	-24.2	-12.1	-20.7
全生育期	-35.9	-23.4	-21.7	-25.0	-15.9	-24.4

### 3 结 论

(1) 1960—2016 年沈阳地区春玉米全生育期平均有效降水量为 325.0~407.0 mm, 总体呈现南部偏高, 逐步向北部递减的趋势。发育前期有效降水量偏少, 后期逐渐增大, 空间分布与全生育期一致。近 57 a 春玉米全生育期有效降水量除康平略有上升, 总体呈下降趋势。从各发育阶段来看, 播种—出苗、出苗—拔节及拔节—抽雄期各地区有效降水量气候倾向率均为正值, 呈增加趋势, 利于提升该时期降水满足度。

(2) 1960—2016 年沈阳地区春玉米全生育期平

均需水量为 479.4~514.0 mm, 各生育阶段与全生育期空间分布特征一致, 呈现北部多、南部少特点, 高值区分布在北部康平、法库一带。近 57 a 沈阳各地区全生育期及各生育阶段需水量均呈下降趋势, 各生育阶段中变幅较大的是拔节—抽雄期, 七叶—拔节和播种—出苗期相对较小。

(3) 1960—2016 年沈阳春玉米全生育期平均缺水为 82.63~188.90 mm, 各发育期缺水量由小到大依次为: 抽雄—乳熟 < 播种—出苗 < 七叶—拔节 < 出苗—七叶 < 乳熟—成熟 < 拔节—抽雄, 空间上自北向南逐步递减, 与全生育期变化一致。全生育期缺水量总体以下降为主, 其中拔节—抽雄期处于

强下降趋势,播种一出苗和出苗—七叶期呈弱下降趋势,说明虽然拔节—抽雄期缺水最大,但是缺水程度逐渐减轻。

(4) 近 57 a 康平、法库播种一出苗期,全区出苗—七叶,新民七叶—拔节期水分盈亏指数属于轻度干旱等级。说明沈阳春季虽然作物需水量较少,但有效降水偏少,气温回暖、地表蒸发量大,会影响春玉米的播种出苗,特别是沈阳北部康平、法库地区。

在分析水分收支过程中,考虑的是某生育阶段内的水分收支平衡,没有考虑降水的后延性,在玉米实际生长发育过程中,某一时期的农田水分不足会通过土壤调节作用与另一时期农田水分过多相互抵消。同时有效降水没有考虑降水强度和地表径流,研究区域地貌存在一定的地域差异,因此计算精度存在一定误差。此外在当地实际生产中遇降水稀少时期,人工灌溉作用较为明显,本文并未考虑这一因素,因此在今后的研究中,有待结合研究区域具体情况进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 孙风华,杨素英,陈鹏狮,等. 东北地区近 44 年气候变暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志,2005,24(7):751 - 755.
- [2] 张淑杰,张玉书,陈鹏狮,等. 东北地区湿润指数及其干湿边界线的变化特征[J]. 干旱区农业研究,2011,29(3):226 - 232.
- [3] 张云海,杨宏斌,李法云,等. 辽宁水资源与气候变化分析及对策研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(4):6 - 9.
- [4] 张淑杰,张玉书,陈鹏狮,等. 东北地区玉米干旱时空特征分析[J]. 干旱区农业研究,2011,29(1):231 - 236.
- [5] 宫丽娟,王晨轶,王萍,等. 东北三省玉米气候适宜度变化分析[J]. 玉米科学,2013,21(5):140 - 146.
- [6] 赵春雨,任国玉,张运福. 近 50 年东北地区的气候变化事实检测分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(7):25 - 30.
- [7] 龚葵,陆维松,陶丽. 东北春夏季降水气温异常的时空分布以及与旱涝的关系[J]. 南京气象学院学报,2003,26(3):349 - 357.
- [8] 汪宏宇,龚强. 东北地区作物生长季降水异常特征分析[J]. 气象科技,2005,33(4):345 - 354.
- [9] 高晓容,王春乙,张继全,等. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化[J]. 农业工程学报,2012,28(12):101 - 109.
- [10] 张淑杰,周广胜,张玉书,等. 辽宁地区玉米耗水量与产量的关系[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(1):244 - 250.
- [11] 张建平,王春乙,杨晓光,等. 未来气候变化对中国东北三省玉米需水量的影响预测[J]. 农业工程学报,2009,25(7):50 - 55.
- [12] 张淑杰,张玉书,蔡福,等. 1961 年至 2007 年东北地区水分盈亏变化趋势及其影响与响应[J]. 资源科学,2010,32(4):663 - 670.
- [13] 李勇,杨晓光,叶清,等. 1961 ~ 2007 年长江中下游地区水稻需水量变化特征[J]. 农业工程学报,2011,27(9):175 - 183.
- [14] 杨艳昭,封志明,林耀明. 甘肃省冬小麦水分平衡及其时空分布模式[J]. 地理研究,2005,24(6):853 - 859.
- [15] 刘钰,汪林,倪广恒,等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(12):6 - 12.
- [16] 申双和,褚荣浩,吕厚荃,等. 气候变化情景下黄淮海冬麦区降水量及其适宜度变化分析[J]. 中国农业气象,2015,36(4):454 - 464.
- [17] 郭晓丽,陈素华. 内蒙古中部地区春玉米水分亏缺时空特征[J]. 干旱气象,2018,36(2):295 - 300.
- [18] 张顺谦,邓彪,杨云洁. 四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系[J]. 农业工程学报,2012,28(10):105 - 111.
- [19] 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报,2007,26(3):27 - 34.
- [20] 康绍忠,蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京:中国农业出版社,1996:101 - 117.
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998:37 - 58.
- [22] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰. 辽宁地区玉米作物系数的确定[J]. 农业环境科学,2004,20(3):246 - 248.
- [23] 闵瑾如,贺菊美,梁红,等. 北方旱区主要农作物水分供需状况分析[J]. 干旱地区农业研究,1987(1):30 - 42.
- [24] 中国气象局. 北方春玉米干旱等级:QX/T 259 - 2015 [S]. 北京:气象出版社,2015.
- [25] 蔡福,张淑杰,纪瑞鹏,等. 近 30 年辽宁玉米水分适宜度时空演变特征及农业干旱评估[J]. 应用生态学报,2015,6(1):233 - 240.
- [26] 张强,邹旭恺,肖风劲,等. 气象干旱等级:GB/T 20481—2006 [S]. 北京:中国标准出版社,2006:1 - 17.
- [27] 吕厚荃,张玉书,王建林,等. 农业干旱等级:GB/T 32136—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015:1 - 16.
- [28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:36 - 39.
- [29] 刘晓英,李玉中,郝卫平,等. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. 农业工程学报,2005,21(10):155 - 159.
- [30] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002,298:1410 - 1411.
- [31] 李喜平. 河南省夏玉米生长季水分供需时空变化特征[J]. 干旱气象,2013,31(4):796 - 802.
- [32] 纪瑞鹏,张玉书,冯锐,等. 辽宁省农业气候资源变化特征分析[J]. 资源科学,2007,29(2):74 - 82.
- [33] 赵东,罗勇,高歌,等. 1961 年至 2007 年中国日照的演变及其关键气候特征[J]. 资源科学,2010,32(4):701 - 711.