

## 冀北地区近50 a马铃薯需水量及水分盈亏时空变化特征

马凤莲, 温永菁, 李春强, 刘园园

引用本文:

马凤莲, 温永菁, 李春强, 等. 冀北地区近50 a马铃薯需水量及水分盈亏时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 713–723.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190730>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 近30年吴桥县冬小麦生育期水分亏缺变化趋势分析

Study on water deficit trend in the recent 30 years in Wuqiao County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2015(4): 482–489 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141212>

#### 雄安新区上游农业种植结构及需水时空演变

Trend of agricultural plantation and irrigation requirements in the upper reaches of Xiong'an New Area

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1067–1077 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190323>

#### 气候变化背景下华北平原夏玉米各生育期水热时空变化特征

Spatiotemporal characteristics of heat and rainfall changes in summer maize season under climate change in the North China Plain

中国生态农业学报. 2015(4): 473–481 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141277>

#### 基于CERES-Wheat模型的沧州地区冬小麦需水量分析

Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou Area using CERES-Wheat model

中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1320–1328 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150229>

#### 华北平原种植结构变化对农业需水的影响

Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 8–16 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190490>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190730

马凤莲, 温永菁, 李春强, 刘园园. 冀北地区近 50 a 马铃薯需水量及水分盈亏时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 713–723

MA F L, WEN Y J, LI C Q, LIU Y Y. Spatial-temporal characteristics of water demand, water surplus and deficit of potato in northern Hebei Province in the past 50 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 713–723

# 冀北地区近 50 a 马铃薯需水量及水分盈亏时空 变化特征\*

马凤莲<sup>1,2</sup>, 温永菁<sup>3</sup>, 李春强<sup>1,4\*\*</sup>, 刘园园<sup>5</sup>

(1. 河北省气象与生态环境重点实验室 石家庄 050021; 2. 河北雄安新区气象局 雄安 071700; 3. 天津市静海区气象局 静海 301600; 4. 河北省气象科学研究所 石家庄 050021; 5. 河北省承德市气象局 承德 067000)

**摘要:** 为高效利用水资源, 提高农业生产效益, 根据联合国粮农组织(FAO)推荐的参考作物蒸散计算方法和相关作物系数法, 利用河北省马铃薯主要种植区域(冀北地区)23 个地面气象站的数据, 计算了冀北地区近 50 a(1969—2018 年)马铃薯生育期内的需水量和缺水量, 并分析了马铃薯生育期内降水量、有效降水量、需水量、缺水量变化趋势, 以及不同区域不同生育期马铃薯需水量、缺水量的变化特征。结果表明: 1)近 50 a 冀北地区马铃薯生育期内降水量、有效降水量年际变化可分为 2 个阶段: 1969—2003 年呈减少趋势, 气候倾向率分别为  $-15.68 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $-6.61 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ; 而 2004—2018 年呈显著增加趋势, 气候倾向率分别为  $60.07 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $9.68 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。近 50 a 平均降水量、有效降水量分别为 356.5 mm 和 148.6 mm; 空间上均呈自西向东逐渐递减的带状特征。2)近 50 a 马铃薯生育期需水量和缺水量年际变化也表现出 1969—2003 年减少、2004—2018 年增多的趋势, 且需水量多的年份缺水量也多, 近 50 a 平均需水量和缺水量分别为 497.8 mm、349.1 mm; 空间分布上均呈自坝上高原向坝下山地增多特点, 且需水量大的地区缺水量也多。3)马铃薯块茎膨大期需水量最多, 期间也是缺水量最多的时期。研究结果显示 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内水资源一直处于严重亏缺状态, 在生产中需充分考虑马铃薯需水量对气象要素变化的响应, 加强水分管理, 确保水资源高效利用。

**关键词:** 冀北地区; 马铃薯; 有效降水量; 需水量; 缺水量; 水分盈亏指数

中图分类号: S532

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Spatial-temporal characteristics of water demand, water surplus and deficit of potato in northern Hebei Province in the past 50 years\*

MA Fenglian<sup>1,2</sup>, WEN Yongjing<sup>3</sup>, LI Chunqiang<sup>1,4\*\*</sup>, LIU Yuanyuan<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China; 2. Meteorological Bureau of Xiong'an New Area, Xiong'an 071700, China; 3. Jinghai District Meteorological Bureau, Jinghai 301600, China; 4. Hebei Institute of Meteorological Science, Shijiazhuang 050021, China; 5. Chengde Meteorological Bureau of Hebei Province, Chengde 067000, China)

**Abstract:** In order to efficiently use water resources and increase the agricultural production efficiency, the data from 23 meteorological stations in the main potato growing areas of Hebei Province (northern Hebei Province) were analyzed to calculate the

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)资助

\*\* 通信作者: 李春强, 主要从事农业气象和气象灾害研究。E-mail: 402724417@qq.com

马凤莲, 主要从事生态与农业气象服务工作。E-mail: mflian@126.com

收稿日期: 2019-10-16 接受日期: 2020-01-03

\* This study was supported by the Special Fund for Meteorology-scientific Research in the Public Interest of China (GYHY201506001).

\*\* Corresponding author, E-mail: 402724417@qq.com

Received Oct. 16, 2019; accepted Jan. 3, 2020

water demand and water shortage during the growing period of potato from 1969 to 2018. The analyses involved the reference crop evapotranspiration calculation method and the related crop coefficient method recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations. The changing trend of precipitation, effective precipitation, water demand, and water shortage during the 50-year potato growing period, and the changing characteristics of water demand and water shortage in different regions and different growing periods were analyzed. There were three main results. Firstly, the annual variation of precipitation and effective precipitation during the growing period of potato in northern Hebei Province in the past 50 years could be divided into two stages. In one stage, there was a decreasing trend from 1969 to 2003. The climatic tendency rates of precipitation and effective precipitation were  $-15.68 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$  and  $-6.61 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ . In the stage from 2004 to 2018, the tendency rates was significantly increased, which were  $60.07 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$  and  $9.68 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ . The average precipitation and effective precipitation in recent 50 years were 356.5 mm and 148.6 mm, respectively. Their spatial characteristics showed the zonal feature of decreasing gradually from west to east. Secondly, the interannual variation of water demand and water shortage during the growth period of potato in the past 50 years also showed a decreasing trend from 1969 to 2003 and an increasing trend from 2004 to 2018. In years of high water demand, there was also a great shortage of water. In the past 50 years, the average water requirement and water shortage were 497.8 mm and 349.1 mm, respectively. The spatial distribution showed an increase from Bashang plateau to the Baxia mountain area. In the region of high water demand, there was also a great shortage of water. Thirdly, the water demand of potato was largest during the expansion period, when the water shortage also reached its maximum. The water resources of potato in northern Hebei Province have been in a serious deficit state during the past 50 years. It is necessary to fully consider the response of potato water demand to the changes of meteorological factors in order to strengthen water management and ensure the efficient utilization of water resources.

**Keywords:** Northern Hebei Province; Potato; Effective precipitation; Water demand; Water shortage; Water profit and loss index

河北省平均水资源为  $3\ 120 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 人均水资源仅为  $311 \text{ m}^3$ , 按照联合国人均  $1\ 000 \text{ m}^3$  为缺水、 $500 \text{ m}^3$  为极度缺水的标准, 河北省已成为水资源严重危机的地区之一<sup>[1-2]</sup>。河北省又是我国主要粮食产区, 目前, 在河北省的水资源利用中, 农业灌溉用水已占河北省总用水量的 70% 以上<sup>[3]</sup>。开展区域作物需水量研究, 科学确定主要农作物的需水量, 对水资源优化管理, 高效利用水资源, 合理安排灌溉制度, 提高农业生产效益等均有着重要的指导意义。

作物需水量是指在最适宜的土壤水分和肥力条件下, 在田间作物正常生长发育、无病害并达到高产水平的农田蒸散量, 即作物生长发育所需要消耗的水量。作物需水量的多少与气候条件关系密切, 并随气候条件的变化而变化。近些年来, 我国学者对作物需水量与气候的关系进行了诸多研究, 取得了大量成果。钟兆站等<sup>[4]</sup>分析了中国北方主要旱地作物需水量, 指出不同作物在不同发育期的需水量明显不同; 刘晓英等<sup>[5-6]</sup>分析了华北地区主要作物需水量变化特征以及气候变化对作物需水量的影响, 指出未来气候变暖将使华北地区业已紧张的水资源供需矛盾更加突出; 刘宏谊等<sup>[7]</sup>分析了甘肃省主要农作物需水量的变化特征, 认为作物需水量在近 40 年呈下降趋势; 郭晓丽等<sup>[8]</sup>分析了内蒙古中部地区春玉米(*Zea mays* L.)水分亏缺时空特征; 李喜平<sup>[9]</sup>分析了河南省夏玉米生长季水分供需时空变化特征;

曹永强等<sup>[10]</sup>、杜玲等<sup>[11]</sup>、吴云龙等<sup>[12]</sup>分别利用单站气象资料分析了河北省典型区域内的冬小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米等主要作物的需水量特征; 李春强等<sup>[13]</sup>、曹永强等<sup>[14]</sup>、康西言等<sup>[15]</sup>、刘玉春等<sup>[16]</sup>分别对河北省中南部的冬小麦、玉米、棉花(*Gossypium* spp.)的需水量和缺水量进行了相关研究, 确定了上述几种作物需水量指标。整体看来, 河北省对作物需水量的研究较多, 且各地作物需水量研究多以冬小麦、玉米为主<sup>[17-21]</sup>。当前对马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)的研究大多侧重于其生理特性和光合特性<sup>[22-23]</sup>、适宜播种期和品种变化<sup>[24-27]</sup>、不同种植模式<sup>[28-31]</sup>、以及关键生长期的气象条件<sup>[32]</sup>等对马铃薯产量的影响, 而有关马铃薯生育期需水量的相关研究却鲜见报道<sup>[33-35]</sup>, 且目前多数研究主要针对作物全生育期水分盈亏及灌溉需水量的时空变化, 对各生育阶段的研究相对较少, 同时研究结果因区域和作物不同而有差异。

马铃薯是世界性粮食作物, 其种植面积和产量仅次于水稻(*Oryza sativa* L.)、小麦、玉米<sup>[36]</sup>。近年来, 河北省马铃薯种植面积在 20 万  $\text{km}^2$  左右, 总产量(鲜薯)360 多万 t。马铃薯在河北省各地都有种植, 但以张家口、承德(即冀北地区)最为集中。2015 年冀北地区马铃薯种植面积为 16.47 万  $\text{km}^2$ , 占全省马铃薯播种面积的 79%, 冀北地区已成为全国主要的商品薯生产基地、脱毒种薯繁育基地和销售集散地。

承德市围场满族蒙古族自治县和张家口市沽源县先后被命名为“中国马铃薯之乡”。冀北地区地处旱半干旱地区, 受大陆性季风气候影响, 同样面临着气候变化与水资源短缺这一严峻问题。所以, 有必要针对不同水文年份的作物需水量、缺水量进行分析, 为优化作物水分管理提供更为详实、有针对性的基础数据。本文根据冀北地区的历史气象资料, 采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的彭曼公式和作物系数法, 计算了近 50 a(1969—2018 年)马铃薯需水量, 并分析马铃薯生育期内降水量、有效降水量、需水量和缺水量的时空变化规律, 以及不同地域不同发育期马铃薯需水量和缺水量特征, 以期为该地马铃薯生产和水资源利用提供科学依据。

### 1 研究区域概况与研究方法

#### 1.1 研究区域概况

本文以河北省马铃薯主产区(张家口、承德)为研究区域, 该区域内地形分为坝上高原和坝下山地两

种类型。高原分布于河北省西北部, 系内蒙古高原的南缘, 俗称坝上高原, 面积约 1.6 万 km<sup>2</sup>, 海拔 1 200~1 500 m, 包含张家口市的康保、沽源、张北、尚义 4 个县和承德市的围场、丰宁的部分区域; 坝下为燕山山地, 海拔 500~1 000 m。该研究区域属中温带向寒温带, 半湿润、半干旱向半湿润过渡的大陆季风性高原山地气候, 坝上高原、坝下山地气候差异明显, 同时坝下地区因海拔高度不同, 受山地地形影响, 不同地区温度、降水等分布也存在较大差异(图 1)。

#### 1.2 资料来源

本文所用气象资料和农业气象资料均来自河北省气象信息中心。其中, 气象资料选取河北省马铃薯主要种植区内(冀北地区)23 个气象站 1969—2018 年的地面气象观测资料, 包括逐日降水量、平均气温、最高气温、日照时数、平均风速和相对湿度等。农业气象资料主要为马铃薯各发育期的多年出现日期(表 1)。

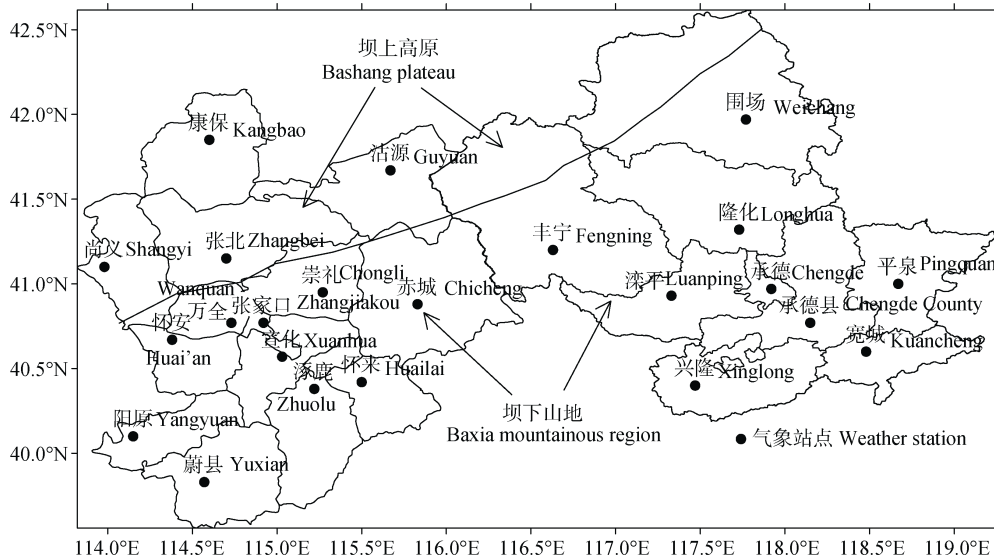


图 1 河北省马铃薯主要种植区域及地形特征

Fig. 1 Main regions of potato planting and the characteristics of topography in Hebei Province

表 1 河北省北部不同区域马铃薯多年平均发育期(月-日)

Table 1 Multi-year average of growth periods (month-day) of potato in different regions in northern Hebei Province

| 地区<br>Region | 播种<br>Sowing | 出苗<br>Seeding | 分枝<br>Branching | 花序形成<br>Inflorescence formation | 开花<br>Blossoming | 收获期<br>Harvest period |
|--------------|--------------|---------------|-----------------|---------------------------------|------------------|-----------------------|
| 坝上 Bashang   | 05-01        | 06-08         | 06-18           | 06-26                           | 07-08            | 09-11                 |
| 坝下 Baxia     | 04-24        | 05-25         | 06-06           | 06-17                           | 06-29            | 09-06                 |

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 需水量计算

采用参考作物蒸散量和作物系数法计算马铃薯需水量, 即:

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

式中: ET 为作物需水量,  $K_c$  为作物系数,  $ET_0$  为参考作物蒸散量。作物系数  $K_c$  与作物生育阶段有关, 不同作物在不同发育阶段的作物系数不同。根据马铃薯的需水规律, 将其划分为 3 个生长阶段<sup>[33]</sup>(表 2): 初期阶段, 即出苗期; 块茎形成和块茎膨大期为生长中期;

表 2 河北省北部不同区域马铃薯各生长阶段(月-日)  
Table 2 Different growth stages (month-day) of potato in different regions in northern Hebei Province

| 地区<br>Region | 出苗期<br>Seeding stage | 块茎形成和块茎膨大期<br>Tubule formation and expansion stage | 淀粉积累期<br>Starch accumulation stage |
|--------------|----------------------|--|------------------------------------|
| 坝上 Bashang   | 05-01—06-08          | 06-09—08-20  | 08-21—09-21                        |
| 坝下 Baxia     | 04-24—05-25          | 05-26—08-15  | 08-16—09-06                        |

淀粉积累期为生长后期。本研究采用文献[37]提供的马铃薯不同生育阶段  $K_c$  取值结果, 即马铃薯生长初期取值 0.4, 生长中期 1.15, 后期 0.75, 马铃薯作物最大高度为 0.8 m。

参考作物蒸散量采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方程(FAO-PM)计算, 其公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中:  $ET_0$  为参考作物蒸散( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ),  $R_n$  为作物表层净辐射( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ),  $G$  为土壤热通量( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ),  $T$  为 2 m 高处的气温( $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_2$  为 2 m 高处的风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $e_s$  为饱和水汽压(KPa),  $e_a$  为实际水汽压(kPa),  $\Delta$  为水汽压曲线斜率( $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  为干湿表常数( $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )。

### 1.3.2 有效降水量计算

有效降水量即作物某一生育阶段内, 降水中实际补充到作物根层土壤的净水量, 代表总降水量中的有效部分, 本文利用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析方法<sup>[20,38-39]</sup>, 即:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17} & (P < 8.3) \\ P(4.17 + 0.2P) & (P \geq 8.3) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_e$  为有效降水量,  $P$  为降水量( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )

### 1.3.3 缺水量和水分盈亏指数计算

缺水量( $D_w$ )是作物全生育期或各个生育阶段需水量与同期有效降水量之差<sup>[40]</sup>。正值表示作物需水量大于有效降水量, 表明有效降水不能满足作物需水要求; 负值表示有效降水可以满足作物需水要求。即:

$$D_w = ET - P_e \quad (4)$$

水分盈亏指数(crop water surplus deficit index, CWSDI)表征了作物各生育期的水分盈亏程度, 通过下式计算:

$$CWSDI = (P_e - ET) / ET \quad (5)$$

### 1.3.4 统计方法

利用 Microsoft Excel 和 SPSS 统计软件, 采用 Pearson 相关分析及线性回归等方法对各统计量进行时间序列分析, 并进行显著性检验。利用气候倾向率分析气象要素随时间的变化趋势, 用  $X_i$  表示样本量为  $n$  的某气象变量, 用  $t_i$  表示  $X_i$  所对应的的时间, 建立  $X_i$  与  $t_i$  之间的一元线性回归方程<sup>[41]</sup>:

$$X_i = at_i + b \quad (6)$$

式中:  $a$  为回归系数,  $b$  为常数项,  $a$  和  $b$  用最小二乘法进行估计, 以  $a$  的 10 倍作为每 10 a 气候倾向率。 $a > 0$  表示各指标随时间的增加而增加,  $a < 0$  表示各指标随时间的增加而减少。

各要素的空间分布特征主要采用 Surfer 软件对各站点要素数据进行空间插值, 生成空间变化分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 马铃薯生育期内降水量、有效降水量的时空变化

#### 2.1.1 降水量、有效降水量的年际变化

从图 2 可以看出, 近 50 a 冀北地区马铃薯生育期内降水量、有效降水量的年际变化大致分为 2 个阶段: 1969—2003 年降水量、有效降水量均呈减少趋势, 气候倾向率分别为  $-15.68 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $-6.61 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ; 2004—2018 年降水量、有效降水量均呈显著增加趋势( $P < 0.05$ ), 气候倾向率分别为  $60.07 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $9.68 \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。

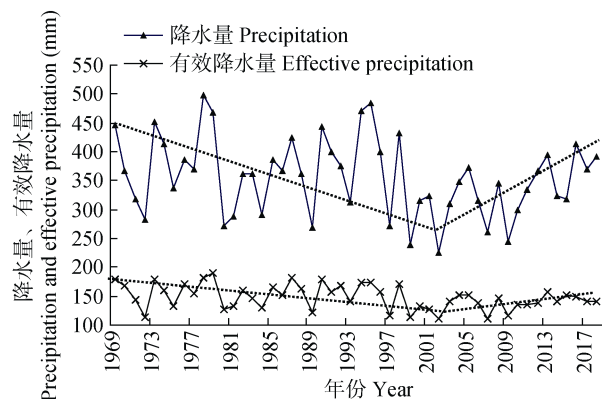


图 2 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内平均降水量、有效降水量的年际变化趋势

Fig. 2 Interannual variation trends of average precipitation and effective precipitation in potato growth period in northern Hebei Province from 1969 to 2018

马铃薯全生育期内降水量的年际变化较大, 最高值为 499.5 mm(1978 年), 最低值为 244.2 mm(2009 年), 降水量最多年份与最少年份相差 255.3 mm, 近 50 a 平均降水量为 356.5 mm。马铃薯生育期内平均有效降水量仅为 148.6 mm, 且年际间变化较大, 最高值为 185.1 mm(1979 年), 最低值为 109.7 mm(2002 年), 有效降水量最多年份与最少年

份相差 75.4 mm。

近 50 a 冀北地区 23 个站点降水量、有效降水量年际变化趋势大体一致, 所有站点降水量均呈减少趋势(图 3a), 其中承德市中南部 6 个站点和张家口市中部 4 个站点平均每 10 a 减少 10~24 mm, 其他站点

平均每 10 a 减少 2~9 mm, 但均未达显著水平。23 个站点有效降水量均呈减少趋势(图 3b), 其中张家口市中西部 6 个站点和承德市中南部 5 个站点呈显著减少趋势( $P < 0.05$ ), 平均每 10 a 减少 5~9 mm, 其他 12 个站点则平均每 10 a 减少 2~4 mm, 未达显著水平。

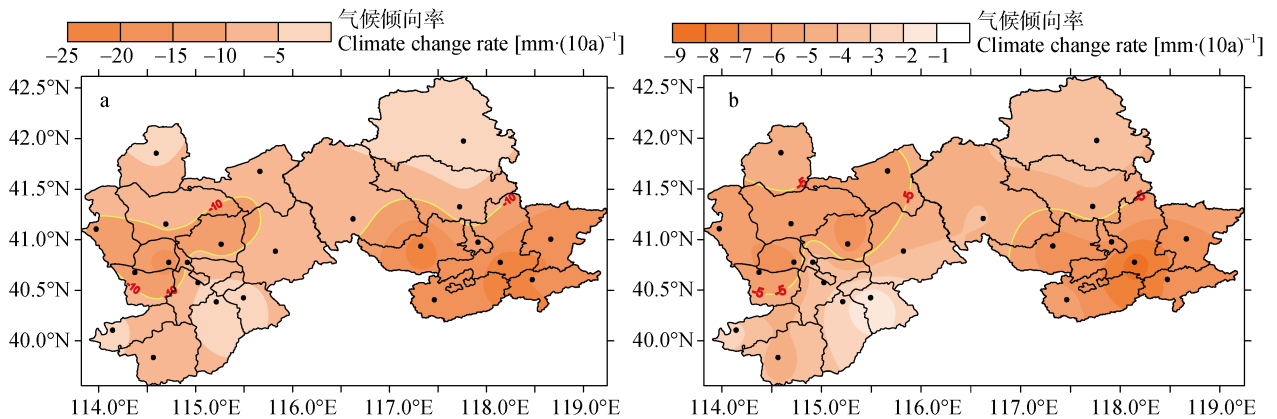


图 3 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内降水量(a)和有效降水量(b)年际变化趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of interannual variation trends of precipitation (a) and effective precipitation (b) during the growth period of potato in northern Hebei Province from 1969 to 2018

### 2.1.2 降水量、有效降水量的空间变化

近 50 a 冀北地区马铃薯全生育期内平均降水量、有效降水量在空间分布上表现为自坝上高原向坝下山地增多的带状分布, 坝下山地则表现为北少南多的特征(图 4)。其中张家口市的西北部及西南部的站点降水量不足 300 mm, 张家口中东部及承德市北部等 11 个站点降水量为 300~400 mm; 承德市中

南部的 6 个站点降水量达 400 mm 以上, 其中兴隆、宽城两地降水量分别为 588.9 mm、516.4 mm。

崇礼、赤城及承德市各站点有效降水量达 150 mm 以上, 其中兴隆最多, 为 187.1 mm; 尚义、张北、沽原、赤城等地有效降水量为 140 mm 左右, 康保及张家口中南部站点为 130 mm 左右, 其中宣化最少, 为 128.8 mm。

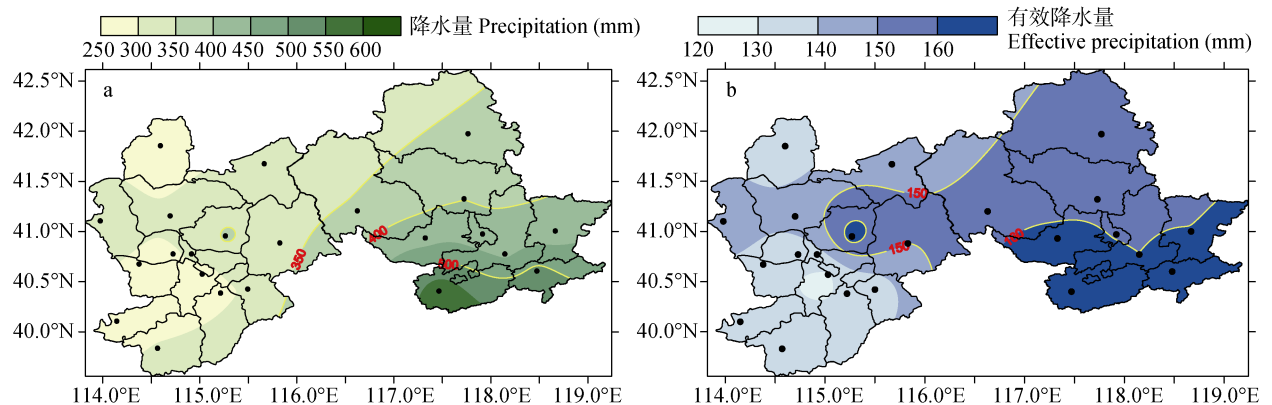


图 4 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内平均降水量(a)和有效降水量(b)的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average precipitation (a) and effective precipitation (b) in potato growth period in northern Hebei Province from 1969 to 2018

综上所述, 降水量、有效降水量多的地区, 其近 50 a 降水量、有效降水量减少趋势更为明显。

## 2.2 马铃薯需水量、缺水量的时空变化

### 2.2.1 需水量、缺水量的年际变化

根据 1.3.1 和 1.3.3 给出的方法计算得出冀北地区 1969—2018 年马铃薯生育期内平均需水量、缺水

量, 整体上看其变化趋势分为两个阶段(图 5): 1969—2003 年马铃薯全生育期内需水量呈减少趋势, 平均每 10 a 减少 5.0 mm, 此前李春强等<sup>[13]</sup>研究表明, 1965—1999 年河北省冬小麦和玉米的需水量呈减少趋势, 其结论与本研究结果一致, 但马铃薯需水量的减少幅度较冬小麦、玉米偏小。2004—2018 年马

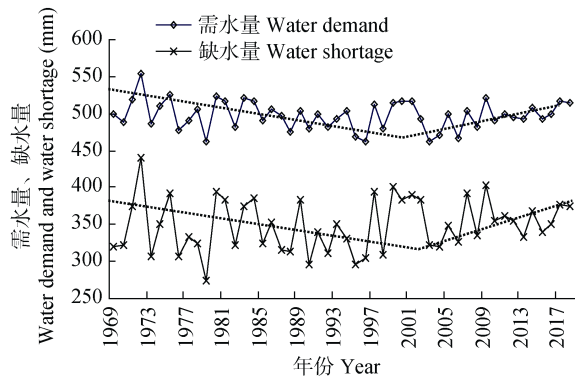


图 5 1969—2018 年冀北地区马铃薯全生育期内平均需水量、缺水率年际变化趋势

Fig. 5 Interannual variation trends of average water demand and water shortage during the whole growth period of potato in northern Hebei Province from 1969 to 2018

铃薯需水量呈显著增加趋势( $P < 0.05$ ), 平均每 10 a 增加 24.2 mm。

缺水率年际变化趋势与需水量变化趋势一致, 即 1969—2003 年马铃薯全生育期内缺水率呈减少趋势, 平均每 10 a 减少 1.3 mm; 2004—2018 年马铃薯缺水率则呈增加趋势( $P < 0.05$ ), 平均每 10 a 增加 20.0 mm。

马铃薯全生育期需水量年际间差异相对较小, 需水量最高达 554.6 mm(1972 年), 最低为 462.7 mm(1979 年), 需水量最高年与最低年差值为 91.9 mm, 近 50 a 平均需水量为 497.8 mm。相对于需水量, 马铃薯全生育期缺水率年际间变化较大, 最高为 441.2 mm(1972 年), 最低为 273.7 mm(1979 年), 近 50 a 平均缺水率为 349.1 mm。缺水率与需水量呈正相关, 需水量多的年份也是缺水率多的年份, 反之需水量少时对应的年份缺水率也少。

近 50 a 马铃薯种植区内 23 个站点需水量的变化趋势如图 6a 所示, 承德市的 8 个站点(丰宁除外)及张家口的宣化、尚义、怀来 3 个站点的需水量呈减少趋势, 气候趋势倾向率为  $-1.2 \sim -10.3 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ; 其他各站则呈增加趋势, 气候倾向率为  $0.5 \sim 7.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ , 但其变化趋势均未达显著水平。

进一步分析马铃薯种植区域内各站点缺水率变化趋势得出(图 6b), 承德市中东部 6 个站点缺水率呈减少趋势, 气候倾向率为  $-1.0 \sim -4.9 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ; 其他各站点均呈增加趋势, 气候倾向率为  $0.2 \sim 10.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。但各站点的年际变化趋势均未达显著水平。

近 50 a 马铃薯全生育期平均需水量呈增加趋势的地区, 其缺水率也呈增加趋势, 反之需水量呈减少趋势的地区, 其缺水率也呈减少趋势。

## 2.2.2 需水量、缺水率的空间变化

近 50 a 冀北地区马铃薯全生育期平均需水量为 430.9~570.0 mm。由图 7a 可见, 近 50 a 平均需水量在空间分布上呈从坝上高原向坝下山地增多的特征, 其中坝上地区需水量为 430~460 mm, 而坝下的承德市各站点以及张家口的赤城县等地需水量为 460~500 mm, 坝上高原南麓地区 5 个站点需水量达 500 mm 以上。

马铃薯全生育期平均缺水率的空间分布特征与需水量分布一致, 即需水量大的地区表现出缺水率多的明显特征, 坝上高原南麓的 6 个站点缺水率达 400 mm 以上, 其他大部分站点缺水率为 300~350 mm(图 7b)。

## 2.3 马铃薯各生育期需水量、缺水率变化

将近 50 a 马铃薯全生育期内逐日平均需水量进行统计分析(图 8), 马铃薯出苗期(坝上 5 月 1 日—6 月 8 日, 坝下 4 月 24 日—5 月 25 日)植株生长所需水分一部分来源于种块本身, 所以日均需水量较少, 为 1.4~1.9 mm。块茎形成和块茎膨大期(坝上 6 月 9 日—8 月 20 日, 坝下 5 月 26 日—8 月 15 日)是马铃薯植株生长和块茎生长并进期, 块茎膨大期对水分需求尤为旺盛, 所以该阶段马铃薯日均需水量明显增多, 为 3.8~5.5 mm。马铃薯淀粉积累期(坝上 8 月 21 日—9 月 11 日, 坝下 8 月 16 日—9 月 6 日)为干物质积累期, 马铃薯植株生长基本停止, 日均需水量逐渐减少, 为 2.3~2.7 mm。

马铃薯不同生育阶段的需水量、缺水率如图 9 所示, 马铃薯出苗期即作物生长初期需水量坝上为 65.1 mm、坝下为 53.3 mm, 缺水率坝上为 38.4 mm、坝下为 35.1 mm。随着作物生长, 需水量开始迅速增加, 马铃薯块茎形成和块茎膨大期需水量坝上为 338.8 mm、坝下为 403.3 mm, 缺水率坝上为 241.5 mm、坝下为 293.2 mm。到作物成熟收获期, 需水量下降, 马铃薯淀粉积累期需水量坝上为 47.1 mm、坝下为 55 mm, 缺水率坝上为 24.5 mm、坝下为 31.6 mm。总体来看, 马铃薯生长发育中需水量最多的时期也是缺水率最多的时期, 且马铃薯生长发育中后期, 坝下地区缺水率大于坝上地区。

## 2.4 马铃薯水分盈亏指数变化特征

水分盈亏指数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, 可以较好地表征农田湿润度和作物旱涝情况。根据公式(5), 冀北地区近 50 a 马铃薯全生育期内的水分盈亏指数如图 10 所示, 1969—2018 年逐年水分盈亏指数为  $-60\% \sim -80\%$ , 表现出近

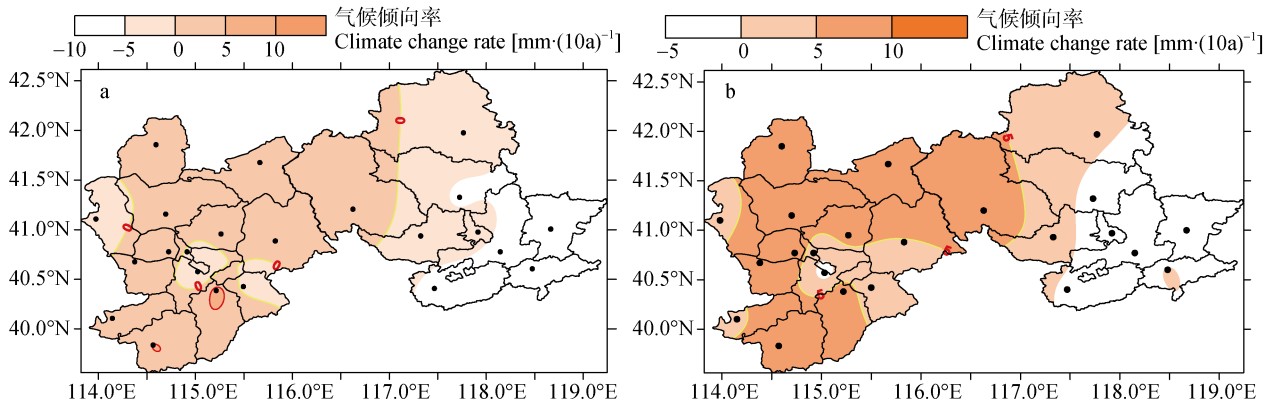


图 6 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内需水量(a)和缺水量(b)年际变化趋势的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of interannual variation trends of water demand (a) and water shortage (b) of potato during the growth period of potato in northern Hebei Province from 1969 to 2018

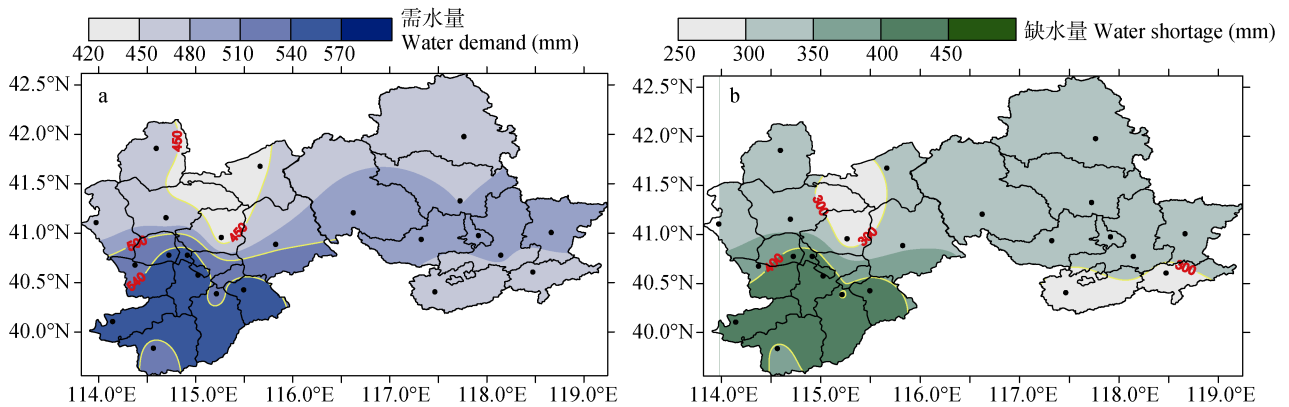


图 7 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内平均需水量(a)、缺水量(b)的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of water demand (a) and water shortage (b) during the growth period of potato in northern Hebei Province from 1969 to 2018

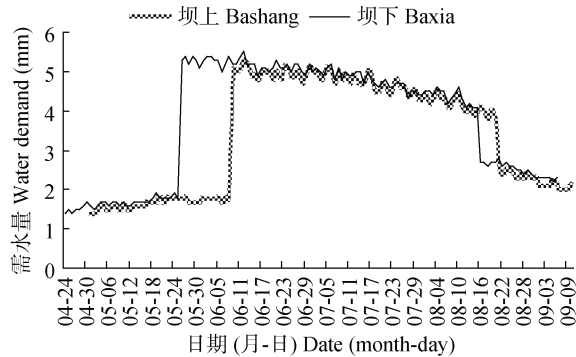


图 8 1969—2018 年冀北不同区域马铃薯生育期内逐日平均需水量

Fig. 8 Daily average water demand during the growth period of potato in different regions in northern Hebei Province from 1969 to 2018

50 a 冀北地区马铃薯生育期内水资源一直处于严重亏缺状态。

不同区域不同发育阶段的水分盈亏指数表明(图 11), 坝上、坝下地区马铃薯块茎形成和块茎膨大

期水分亏缺最多, 水分盈亏指数分别为-71%、-73%, 出苗期和淀粉积累期水分盈亏指数在-52%~-66%; 且坝下地区水分亏缺较坝上地区严重, 坝下地区水分盈亏指数较坝上地区平均低 4.7%, 标准误差为 2.9%。尤其在典型水分亏缺年份两个地区的水分盈

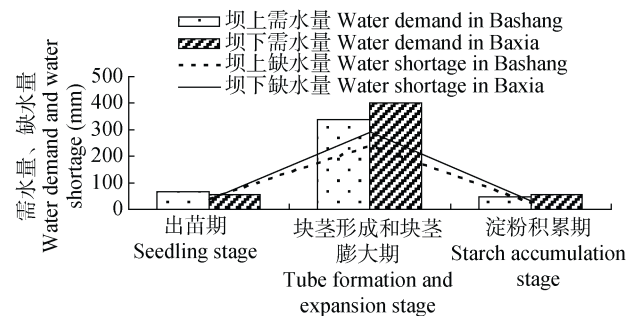


图 9 冀北不同地区马铃薯不同生育期内平均需水量和缺水量的变化

Fig. 9 Average water demand and water shortage at different developmental stages of potato in different regions in northern Hebei Province



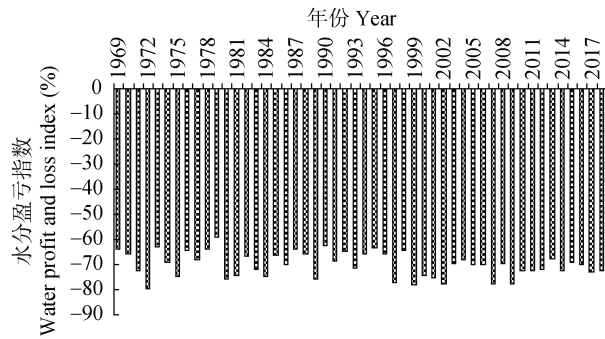


图 10 1969—2018 年冀北地区马铃薯生育期内水分盈亏指数

Fig. 10 Water profit and loss indexes during the growth period of potato in northern Hebei Province from 1969 to 2018

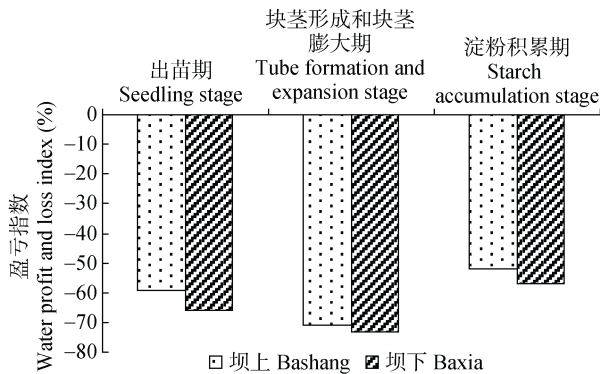


图 11 1969—2018 年冀北不同地区马铃薯不同发育期的水分盈亏指数

Fig. 11 Water profit and loss indexes at different development stages of potato in different areas in northern Hebei Province from 1969 to 2018

亏差异更为明显,例如 2007 年沽源县(坝上)马铃薯全生育期水分盈亏指数为 $-76.4\%$ ,怀来县(坝下)则

为 $-84.3\%$ ,出苗期分别为 $-70.1\%$ 、 $-69.6\%$ ,块茎形成和块茎膨大期分别为 $-76.9\%$ 、 $-85.6\%$ ,淀粉积累期则分别达 $-80.6\%$ 、 $-90.2\%$ 。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

马铃薯需水量可分为由天气气候决定的参考作物蒸散量和作物系数两部分,其中参考作物蒸散量受气温、空气湿度、风速、日照时数等气象因素影响。由表 3 可知马铃薯需水量、缺水量分别与平均气温、风速、日照时数呈正相关,与空气相对湿度、降水量、有效降水量呈负相关,且除缺水量与风速的相关系数未通过显著性检验外,其他相关系数均通过了  $P < 0.01$  水平的显著性检验。

对各气象要素的年际变化分析发现,近 15 a(2004—2018 年)气象要素较前 35 a(1969—2003 年)表现出不同的变化趋势,尤其是风速变化由明显下降趋势(平均每 10 a 下降  $0.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )转为明显上升趋势(平均每 10 a 上升  $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),日照时数由平均每 10 a 减少 14.6 h,转为平均每 10 a 增加 72.5 h,且空气相对湿度近 15 a 下降趋势较前 35 a 明显。

气象因子对作物需水量的影响有两个方面:一方面气温上升会增加潜在蒸散量,从而使马铃薯需水量增加;另一方面日照时数、风速的增加以及空气相对湿度下降也会增加潜在蒸散量,从而使需水量增加。马铃薯需水量的变化趋势与日照、风速的变化趋势一致,表明日照和风速对其影响更为显著,这在生态需水量和气象要素相关分析中也有所证明<sup>[15]</sup>。

表 3 马铃薯全生育期需水量、缺水量与气象要素的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of water demand and water shortage with meteorological elements in the whole development period of potato

|                    | 平均气温<br>Mean temperature | 相对湿度<br>Relative humidity | 风速<br>Wind speed | 日照时数<br>Sunshine duration | 降水量<br>Precipitation | 有效降水量<br>Effective precipitation |
|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 需水量 Water demand   | 0.465 2*                 | -0.724 2*                 | 0.379 0*         | 0.698 7*                  | -0.398 6*            | -0.556 4*                        |
| 缺水量 Water shortage | 0.634 3*                 | -0.854 8*                 | 0.136 8          | 0.440 1*                  | -0.755 8*            | -0.890 5*                        |

\*表示通过  $P < 0.01$  水平的显著性检验。\* indicates significant correlation at the level of  $P < 0.01$ .

缺水量与降水量、有效降水量呈负相关,即降水量、有效降水量多的年份,缺水量则少,反之降水量、有效降水量少的年份,缺水量则大。

综上,近 50 a 冀北地区马铃薯生育期内水资源一直处于严重亏缺状态,除马铃薯自身生理生态特点影响需水量外,环境气象要素对作物需水量起着主要作用,马铃薯全生育期需水量、缺水量的年际变化与空气相对湿度、风速、日照时数等密切相关,尤其是近 15 a 空气相对湿度减小、风速增加、日照

时数增加导致需水量、缺水量呈增加趋势,表现出与前 35 a 不同的变化特征。所以,在马铃薯生产中,需充分考虑马铃薯需水量对气象要素变化的响应,充分利用自然降水,以同步提高自然降水与灌溉水的利用率,确保水资源高效利用。

#### 3.2 结论

1)近 50 a 冀北地区马铃薯生育期内降水量和有效降水量均由前 35 a 的减少趋势转为近 15 a 年的增多趋势,且近 15 a 降水量、有效降水量的增多趋势

通过信度为 0.05 的显著水平检验。近 50 a 平均降水量、有效降水量分别为 356.5 mm 和 148.6 mm, 在空间分布上均表现为坝上高原少、坝下山地多的特征, 且自西向东呈逐渐递减的带状分布。

2) 近 50 a 冀北地区马铃薯全生育期内需水量、缺水均由前 35 a 的减少趋势转为近 15 a 的增多趋势, 但其变化趋势均未达显著水平。近 50 a 平均需水量、缺水分别为 497.8 mm、349.1 mm, 在空间分布上均表现为自坝上高原向坝下山地增多, 且需水量大的地区表现出缺水多的明显特征, 坝上高原南麓地区需水量达 500 mm 以上, 缺水达 400 mm 以上。

3) 马铃薯不同发育期对水分需求不同, 块茎形成和块茎膨大期对水分需求旺盛, 需水量最多, 但此阶段也是缺水最多的时期, 水分盈亏指数为 -70%~-80%, 且坝下地区水分亏缺相对坝上地区更为严重, 究其原因, 一是坝上与坝下地区气候差异所致, 另一方面也与坝上、坝下两地的马铃薯生长期不同有关。

4) 冀北地区马铃薯全生育期内需水量与降水量、有效降水量呈负相关, 即降水量、有效降水量多的年份, 缺水则少, 反之降水量、有效降水量少的年份, 缺水则大。

## 参考文献 References

- [1] 张正斌, 徐萍. 中国水资源和粮食安全问题探讨[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1305-1310  
ZHANG Z B, XU P. Water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(5): 1305-1310
- [2] 郭进考, 史占良, 何明琦, 等. 发展节水小麦缓解北方水资源短缺——以河北省冬小麦为例[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 876-879  
GUO J K, SHI Z L, HE M Q, et al. Development of water-saving wheat cultivars to limit water shortage in North China — A case study of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 876-879
- [3] 贾冀南, 于瑞静. 基于水资源约束的河北省农业发展路径研究[J]. 邯郸职业技术学院学报, 2015, 28(4): 18-21  
JIA J N, YU R J. Study on agricultural development path of Hebei Province based on water resource restriction[J]. Journal of Handan Polytechnic College, 2015, 28(4): 18-21
- [4] 钟兆站, 赵聚宝, 郁小川, 等. 中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2): 1-4  
ZHONG Z Z, ZHAO J B, YU X C, et al. Calculation and analysis on water requirements of major crops in northern China[J]. Agricultural Meteorology, 2000, 21(2): 1-4
- [5] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 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  
LIU X Y, LI Y Z, HAO W P. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 155-159
- [6] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004, (2): 77-82  
LIU X Y, LIN E D. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (2): 77-82
- [7] 刘宏谊, 马鹏里, 杨兴国, 等. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 39-44  
LIU H Y, MA P L, YANG X G, et al. Temporal and spatial analysis of the water requirements of major crops in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 39-44
- [8] 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  
GUO X L, CHEN S H. Temporal and spatial characteristics of water surplus deficit index of spring maize in Central Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(2): 295-300
- [9] 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  
LI X P. Temporal and spatial variation about water requirement during growth season of summer maize in Henan Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(4): 796-802
- [10] 曹永强, 朱明明, 李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 560-570  
CAO Y Q, ZHU M M, LI W J. Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 560-570
- [11] 杜玲, 王猛, 刘曦, 等. 河北平原区农作物种植水资源压力指数评价[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 1-9  
DU L, WANG M, LIU X, et al. Evaluation of water resources pressure indexes based on crop cultivation in Hebei Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 1-9
- [12] 吴云龙, 刘胜尧, 李丽平, 等. 石家庄冬小麦需水量变化特征及气象影响因子[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 123-129  
WU Y L, LIU S Y, LI L P, et al. Water requirement characteristics and meteorological impact factors of winter wheat in Shijiazhuang[J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44(1): 123-129
- [13] 李春强, 李保国, 洪克勤. 河北省近 35 年农作物需水量变化趋势分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 359-363  
LI C Q, LI B G, HONG K Q. Trend of crop water requirement in recent 35 years in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 359-363
- [14] 曹永强, 李晓瑞. 河北省夏玉米主产区作物需水量和缺水研究[J]. 中国农村水利水电, 2018, (10): 141-147  
CAO Y Q, LI X R. Research on the crop water demand and water shortage in the main producing areas of summer maize in Hebei Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018, (10): 141-147
- [15] 康西言, 李春强, 杨荣芳. 河北省冬小麦生育期干旱特征及成因分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 210-217  
KANG X Y, LI C Q, YANG R F. Analysis of characteristics

- and causes of drought for winter wheat growing period in Hebei Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 210–217
- [16] 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 98–104  
LIU Y C, JIANG H A, LI C D, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 98–104
- [17] 张建军, 盛绍学, 王晓东. 安徽省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. *干旱气象*, 2014, 32(2): 163–168  
ZHANG J J, SHENG S X, WANG X D. Temporal and spatial distribution characteristics of drought during summer corn growing season in Anhui Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32(2): 163–168
- [18] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 冀京津冬小麦灌溉需水量时空变化特征[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(6): 648–654  
HU W, YAN C R, LI Y C, et al. Spatial and temporal variation of irrigation water requirement for winter wheat in Jijingjin Region[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(6): 648–654
- [19] 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  
LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 6–12
- [20] 环海军, 杨再强, 刘岩, 等. 鲁中地区冬小麦水分盈亏及灌溉需水量的时空变化特征[J]. *干旱气象*, 2016, 34(5): 866–872  
HUAN H J, YANG Z Q, LIU Y, et al. Spatial and temporal variation of crop water surplus or deficit and irrigation water requirement for winter wheat in Middle Shandong Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(5): 866–872
- [21] 高晓容, 王春乙, 张继权, 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  
GAO X R, WANG C Y, ZHANG J Q, et al. Crop water requirement and temporal-spatial variation of drought and flood disaster during growth stages for maize in Northeast during past 50 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 101–109
- [22] 沈宝云, 刘星, 王蒂, 等. 甘肃省中部沿黄灌区连作对马铃薯植株生理生态特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 689–699  
SHEN B Y, LIU X, WANG D, et al. Effects of continuous cropping on potato eco-physiological characteristics in the Yellow River irrigation area of the central Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(6): 689–699
- [23] 黄承建, 赵思毅, 王季春, 等. 马铃薯/玉米不同行数比套作对马铃薯光合特性和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1443–1450  
HUANG C J, ZHAO S Y, WANG J C, et al. Photosynthetic characteristics and yield of potato in potato/maize intercropping systems with different row number ratios[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1443–1450
- [24] 董旭生, 牛俊义, 高玉红, 等. 半干旱区马铃薯品种性状比较试验[J]. *中国马铃薯*, 2015, 29(3): 129–132  
DONG X S, NIU J Y, GAO Y H, et al. Comparative test of characteristics for potato varieties in semi-arid region[J]. *Chinese Potato Journal*, 2015, 29(3): 129–132
- [25] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 播期和品种变化对马铃薯产量的耦合效应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(2): 296–304  
LI Y, WANG J, TANG J Z, et al. Coupling impacts of planting date and cultivar on potato yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2): 296–304
- [26] 沈姣姣, 王靖, 潘学标, 等. 播种期对农牧交错带马铃薯生长发育和产量形成及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 137–144  
SHEN J J, WANG J, PAN X B, et al. Effect of sowing date on the growth and yield formation and water use efficiency of potato in Agro-pastoral Ecotone[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 137–144
- [27] 张凯, 王润元, 李巧珍, 等. 播期对陇中黄土高原半干旱区马铃薯生长发育及产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2261–2268  
ZHANG K, WANG R Y, LI Q Z, et al. Effects of sowing date on the growth and tuber yield of potato in semi-arid area of Loess Plateau in central Gansu Province of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2261–2268
- [28] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 852–864  
ZHANG X C, YU X F, WANG H L, et al. Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water-fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5): 852–864
- [29] 韩凡香, 常磊, 柴守玺, 等. 半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(7): 874–882  
HAN F X, CHANG L, CHAI S X, et al. Effect of straw strip covering on ridges on soil water content and potato yield under rain-fed semiarid conditions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(7): 874–882
- [30] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 115–123  
LI R, HOU X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 115–123
- [31] 韩秀峰, 梁春波, 石瑛, 等. 大垄栽培条件下的土壤环境与马铃薯产量[J]. *中国马铃薯*, 2006, 20(3): 135–139  
HAN X F, LIANG C B, SHI Y, et al. Effects of big ridge on soil environments and potato yield[J]. *Chinese Potato Journal*, 2006, 20(3): 135–139

- [32] 金林雪, 李云鹏, 李丹, 等. 气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 38–48  
JIN L X, LI Y P, LI D, et al. Suitability analysis of key potato growth stages in Inner Mongolia under climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(1): 38–48
- [33] 郭伟, 阳伏林, 张荣, 等. 晋西北地区马铃薯生态需水量对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 516–520  
GUO W, YANG F L, ZHANG R, et al. Change trend of ecological water requirement of potatoes and its response to climate warming in northwestern of Shanxi Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4): 516–520
- [34] 陈秋帆, 陈劲松, 代兴梅, 等. 云南春作马铃薯作物系数及需水规律研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(3): 564–566  
CHEN Q F, CHEN J S, DAI X M, et al. Research on crop coefficient and water requirement rural of potato sowed in spring in Yunnan[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(3): 564–566
- [35] 任稳江, 任亮, 刘生学. 黄土高原旱地马铃薯田土壤水分动态变化及供需研究[J]. 中国马铃薯, 2015, 29(6): 355–361  
REN W J, REN L, LIU S X. Moisture dynamics and ‘supply and demand’ on potato fields in arid areas of southern Loess Plateau[J]. Chinese Potato Journal, 2015, 29(6): 355–361
- [36] 魏延安. 世界马铃薯产业发展现状及特点[J]. 世界农业, 2005, (3): 29–32  
WEI Y A. Status quo and characteristics of potato industry development in the world[J]. World Agriculture, 2005, (3): 29–32
- [37] 马鹏里, 杨兴国, 陈端生, 等. 农作物需水量随气候变化的响应研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(2): 348–353  
MA P L, YANG X G, CHEN D S, et al. Responses of crop water requirements to climatic changes[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2006, 26(2): 348–353
- [38] SMITH M. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20–21
- [39] DÖLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 8-1–8-10
- [40] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 1961—2012 年中国棉花需水量的变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2107–2119  
CHEN C, PANG Y M, PAN X B, et al. Variation characteristics of water requirement of cotton in China during 1961–2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(12): 2107–2119
- [41] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007  
WEI F Y. Diagnostic and Prediction Techniques of Modern Climate Statistics[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007