

环海军,杨再强,刘 岩,等. 鲁中地区夏玉米水分盈亏及灌溉需水量的时空变化特征[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):342-347.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.03.097

鲁中地区夏玉米水分盈亏及灌溉需水量的时空变化特征

环海军^{1,2}, 杨再强¹, 刘 岩², 夏福华², 杨 昆³

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044;

2. 山东省淄博市气象局, 山东淄博 255048; 3. 中国人民解放军 94900 部队 59 分队, 福建漳州 363000)

摘要:利用 1980—2014 年鲁中地区气象资料和夏玉米生育期资料, 采用 Penman - Monteith 模型和单作物系数计算夏玉米各生育阶段需水量, 利用美国农业土壤保持局推荐方法计算有效降水量、水分盈亏系数(CWSDI)和灌溉需水量, 分不同生育期进行时空变化分析探讨。结果表明:近 35 年来,鲁中地区夏玉米全生育期和各生育期需水量均随时间变化呈减少趋势,拔节—抽雄期是需水量最大的阶段,随时间变化减少幅度最大,全生育期需水量主要空间变化规律一致,减少强度中心在中北部地区。全生育期和各生育期有效降水随时间变化呈增加趋势,2003 年是突变增加的开始年份,全生育期增加强度中心在南部山区,拔节—抽雄期增加强度中心在中部平原。全生育期 CWSDI 随时间变化呈增加趋势,拔节—抽雄期增加幅度最大,自南向北递减。为满足夏玉米需水要求,全生育期平均灌溉需水量 228 mm,拔节—抽雄期是灌溉需水量最大的阶段,随时间变化呈减少的趋势,减少强度中心在中部地区。研究结果可为鲁中地区夏玉米干旱监测评估、适时灌溉和提高水分利用效率提供数据支撑。

关键词:夏玉米;需水量;有效降水量;水分盈亏系数;灌溉需水量;时空变化特征

中图分类号: S513.07 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)03-0342-06

农业旱涝主要由降水异常和作物需水变化引起^[1],近 50 年来,气温升高,降水量随时间变化呈减少趋势且年际变化较大,干旱有增强的趋势^[2-3],故研究区域灌溉需水量的学者越来越多^[1-12]。目前针对农业旱涝研究的评估指标主要有 2 类,一是降水量指标,如降水距平百分率、Z 指数、标注化干旱指数等;二是反映水分供需变化的指标,包括综合气象干旱指数 CI、相对湿度指数、作物水分盈亏指数等^[13-16]。在灌溉需水量的研究方面,国内许多学者通过对作物需水量和灌溉需水量进行大量研究,得出不同地区的农作物灌溉量^[7-9];国外不少学者对不同地区不同作物的灌溉需水量进行了研究^[10-13]。目前多数研究主要针对主要作物全生育期灌溉需水量的时空变化,而对逐个生育阶段灌溉需水量的研究较少,本研究对夏玉米全生育期期和逐个生育阶段进行时空变化研究,并分析其相关规律。

鲁中地区地处暖温带大陆性季风气候区,多数地区处在亚湿润气候大区的指标范围。受季风影响,气候变化具有明显的季节性。冬季盛行偏北风,雨雪稀少,寒冷干燥;春季气温回升快,少雨多风,干旱发生频繁;夏季高温高湿,降水集中;秋季降水锐减,秋高气爽。鲁中地区干旱发生较为频繁,

目前在鲁中地区夏玉米水分盈亏和灌溉需水量方面的研究较少,因此,本研究分析该区域夏玉米全生育期和逐个生育阶段水分盈亏灌溉需水量的变化规律,明确夏玉米不同生育阶段灌溉需水量,为夏玉米水分管理和区域种植区划提供技术支撑,在农业生产中具有明确的现实意义。

1 材料与方法

1.1 资料来源

1980—2014 年逐日气象资料来源于鲁中地区平原和山区有代表性的气象站,包括平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、实际水汽压、平均风速、平均相对湿度、经纬度和作物生育期。降水资料缺测利用附近站点进行线性插补,气温资料缺测利用 5 d 滑动平均进行插补。将夏玉米发育期分为 5 个阶段:播种—成熟全生育期、播种—拔节期、拔节—抽雄期、抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期。考虑多年种植习惯和品种的差异,根据夏玉米多年发育期资料,采用生育期日数的多年平均值代表一般生育期日数。

1.2 夏玉米农田蒸散计算方法

作物需水量采用 FAO^[18-20]推荐的 Penman - Monteith 模型和单作物系数法计算,即:

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_{net} - G_s) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}; \quad (1)$$

$$ET = K_c \times ET_0. \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量, K_c 为作物系数, ET 为作物需水量,各系数均采用 FAO-56 中的推荐值。作物系数采用分段表示:初始生长期 $K_{c,ini} = 0.4$ 、发育期中期 $K_{c,mid} = 1.2$ 、生长末

收稿日期:2015-04-21

基金项目:山东省淄博市气象局气象科学技术研究项目(编号:ZB2013001)。

作者简介:环海军(1987—),男,江苏南通人,硕士研究生,工程师,主要从事农业气象研究。E-mail:324380521@qq.com。

通讯作者:杨再强,博士,教授,主要从事农业气象和设施农业气象研究。E-mail:yzq@nuist.edu.cn。

期(从叶片开始变黄至收获) $K_{c, \text{end}} = 0.6$ 。

利用 FAO 推荐模型,根据当地气候条件,对发育中期作物系数进行修正,即:

$$K_{c, \text{mid}} = 1.15 + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3)$$

式中: U_2 为 2 m 高度处的日平均风速(m/s), RH_{\min} 为日最低相对湿度的平均值, h 为发育期阶段作物的平均高度(m)。

1.3 夏玉米水分盈亏指数计算

水分盈亏指数 CWSDI (crop water surplus deficit index) 表征了夏玉米各生育期的水分盈亏程度,以生育阶段的农田蒸散(ET)为需水量,以有效降水量(P_e)为供水指标,即:

$$CWSDI = \frac{P_e - ET}{ET} \quad (4)$$

$CWSDI > 0$ 表示该生育阶段水分盈余, $CWSDI = 0$ 表示水分收支平衡, $CWSDI < 0$ 表示该生育阶段水分亏缺,可以较好地表征农田湿润程度和作物旱涝状况。生育期有效降水量是实际补充到土壤中的净水量,本研究采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量分析法^[15-16,21],即:

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & P < 8.3 \text{ mm/d} \\ 4.17 + 0.1P & P \geq 8.3 \text{ mm/d} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_e 为日有效降水量(mm/d), P 为日总降水量(mm/d)。

1.4 灌溉需水量计算

灌溉需水量是生育期内作物需要灌溉进行补充的水分,为需水量与有效降水量的差额,即:

$$I_s = \sum_{n=1}^N ET - \sum_{n=1}^N P_e \quad (6)$$

式中: I_s 是灌溉需水量(mm), N 为生育期日数(d)。

1.5 数据处理软件及方法

气象数据处理及分析采用 SPASS 16.0、MATLAB 7.0 和 VB 编程实现,利用 Mann-Kendall 法和经验正交分解(EOF)法进行突变检验和空间分解,空间分布采用 ArcGIS 9.2 软件制图。用一次直线方程斜率的 10 倍描述参考作物蒸散量及各相关气候要素变化的气候倾向率。

2 结果与分析

2.1 夏玉米生育期需水量及有效降水量时空变化规律

2.1.1 夏玉米各生育期需水量和有效降水量时间变化规律

鲁中地区夏玉米各发育期需水量和有效降水量见图 1。由图 1-A 可知,拔节—抽雄期是夏玉米需水的高峰期,平原高于山区,平原为 113.9 mm,山区为 110.6 mm,其次是播种—拔节期。由图 1-B 可知,播种—拔节期是有效降水量最大的阶段,山区多于平原,其他发育阶段有效降水依次递减。拔节—抽雄期的有效降水量与需水量匹配不一致,该阶段夏玉米需水量增大,而有效降水则处于减少的趋势。

2.1.2 夏玉米生育期需水量及有效降水量时间变化规律

鲁中地区夏玉米全生育期以及拔节至抽雄期需水量时间变化规律见图 2。由图 2-A、图 2-B 可知,平原和山区夏玉米全生育期需水量均随时间变化呈减少趋势,平原地区气候倾向率为 $-13.1 \text{ mm}/10 \text{ 年}$ ($P < 0.01$),山区为 $-9.7 \text{ mm}/10 \text{ 年}$ ($P < 0.05$)。平原地区在 2005 年发生 1 次主要突变,2010 年后随时间变化呈极显著减少趋势;山区在 2003 年发生 1 次突

变,2009 年后随时间变化呈极显著减少趋势。平原地区夏玉米全发育期平均需水量 367.0 mm,山区为 359.8 mm。

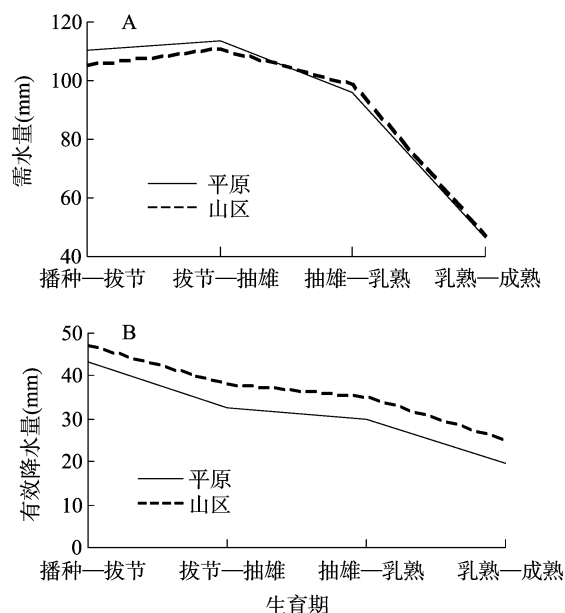


图1 夏玉米各发育期需水量(A)和有效降水量(B)

分析各发育期需水量,主需水期(拔节—抽雄)时间变化规律如图 2-C、图 2-D,其他发育期分析图略。由图 2-C、图 2-D 可知,平原和山区拔节—抽雄需水量均随时间变化呈减少趋势,2004 年是平原地区突变减少的年份,2008 年后显著减少;山区突变减少主要发生在 2000 年,2008 年后显著减少。对其他发育期分析发现,平原和山区均处于明显减少的趋势,减少幅度依次为拔节—抽雄期、播种—拔节期、抽雄—乳熟期、乳熟—成熟期,平原地区各生育期需水量减少幅度高于山区。

鲁中地区夏玉米全生育期以及拔节至抽雄期有效降水量时间变化规律见图 3。由图 3-A、图 3-B 可知,平原和山区夏玉米全生育期有效降水量均随时间变化呈增加趋势,山区增加幅度高于平原。2003 年是平原和山区夏玉米全生育期有效降水量突变增加的开始年份。

由图 3-C、图 3-D 可知,夏玉米最大需水期有效降水量随时间变化呈现增加趋势,变化波动较频繁,1990 年是主要突变增加的开始年份。对其他发育期有效降水量进行分析(图略)发现,平原地区拔节—抽雄期、抽雄—乳熟期有效降水量处于增加趋势,播种—拔节、乳熟—成熟处于减少的趋势,乳熟—成熟期减少幅度最大。山区除播种—拔节期均处于减少的趋势外,其他发育期均处于增加的趋势,抽雄—乳熟期有效降水量增加幅度最大。

2.1.2 夏玉米生育期需水量及有效降水量空间变化规律

鲁中地区夏玉米全生育期、拔节—抽雄期需水量和有效降水量的 EOF 分解第一特征向量见图 4。由图 4-A、图 4-B 可知,鲁中各地区夏玉米全生育期需水量、有效降水量主要空间变化规律一致,第一特征向量贡献率均为 85%,鲁中各地区需水量和有效降水量主要空间变化规律一致,需水量强度中心在中北部地区,有效降水量强度中心在南部地区。第一特征向量的时间系数变化趋势(图略)需水量随时间变化呈减

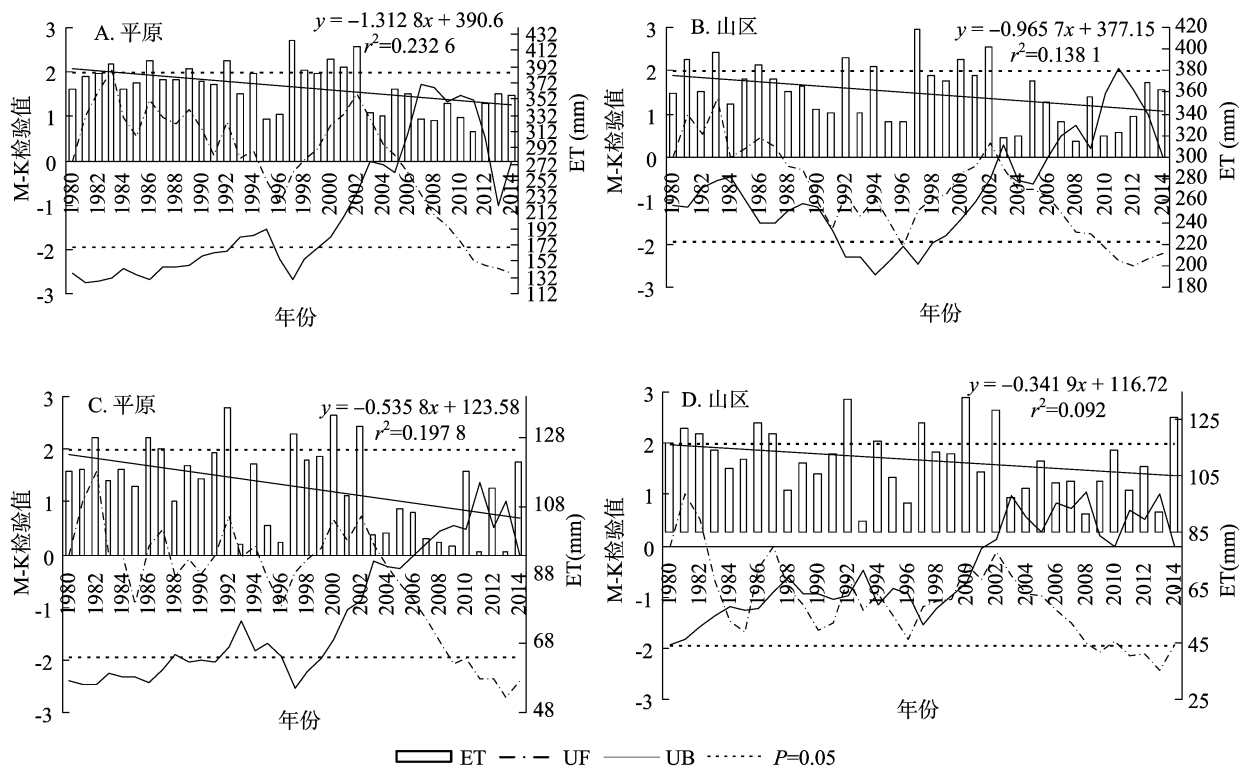


图2 夏玉米全生育期(A、B)和拔节—抽雄期(C、D)需水量及其M-K突变检验

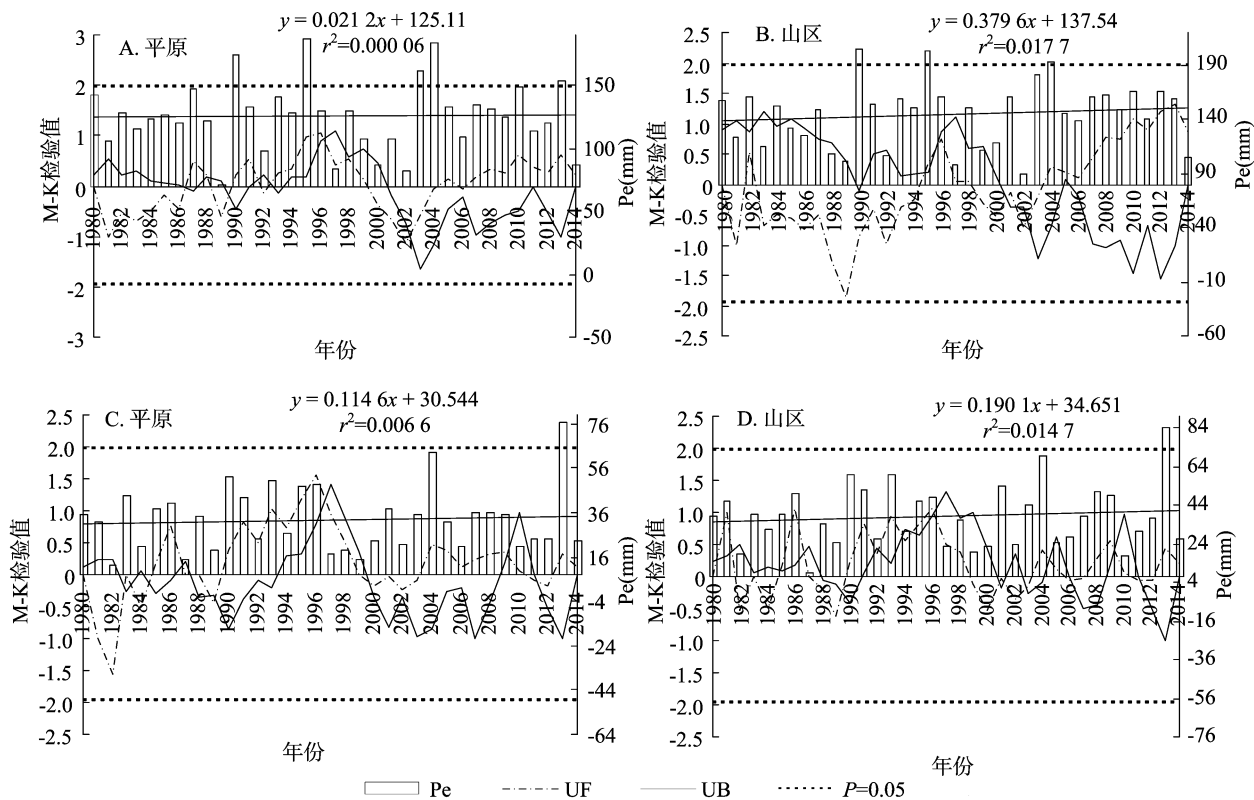


图3 夏玉米全生育期(A、B)和拔节—抽雄期(C、D)有效降水量及其M-K突变检验

少趋势,有效降水随时间变化呈增加趋势。全生育期需水量和有效降水量第二特征向量(图略)贡献率均为5%,需水量随时间变化呈现中北部地区和东部、南部存在空间变化的不一致性,有效降水量随时间变化呈现平原和山区存在空间变

化的不一致性,时间系数变化趋势(图略)与第一特征向量一致。

由图4-C、图4-D可知,鲁中各地区主需水期拔节—抽雄期的需水量和有效降水量主要空间变化规律一致,第一特

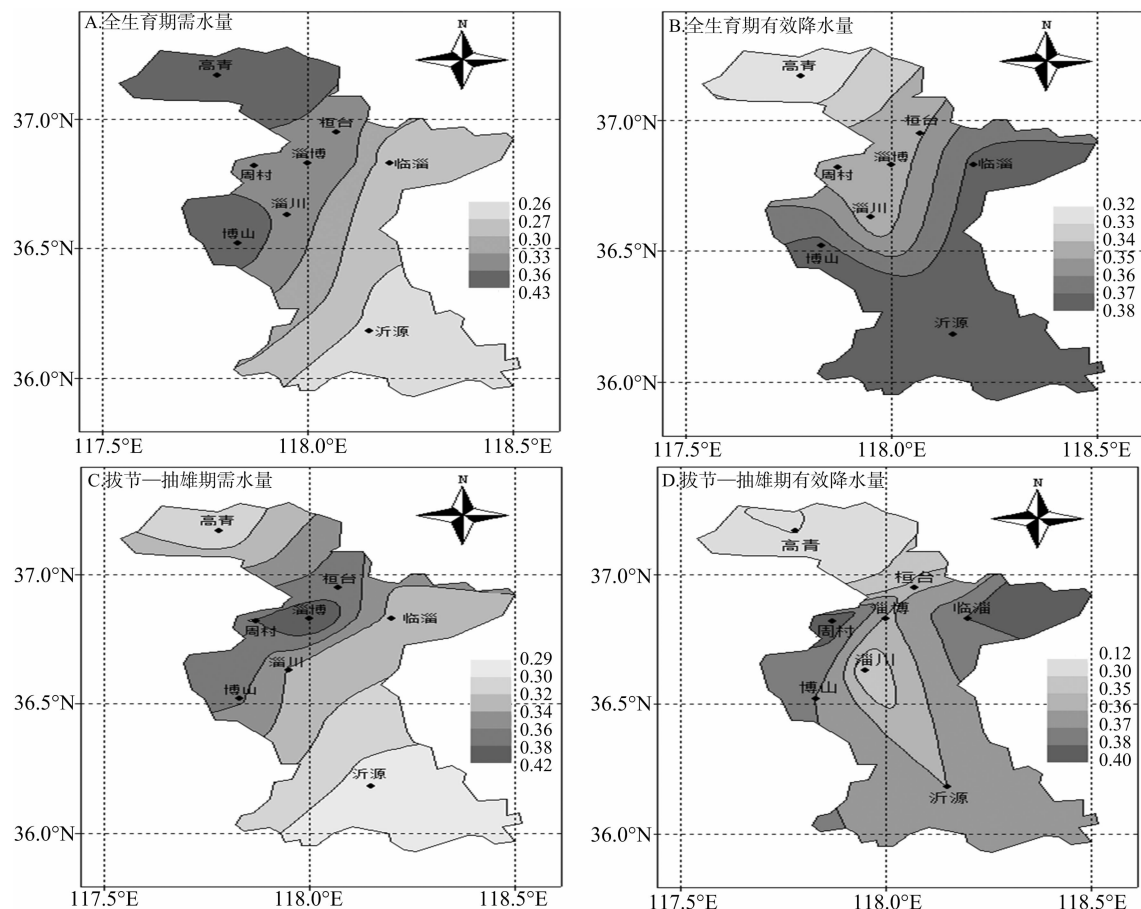


图4 夏玉米全生育期、拔节—抽雄期需水量和有效降水量的EOF分解第一特征向量

征向量贡献率分别为84%、81%，需水量强度中心在中部地区，有效降水量强度中心在中部平原地区，最小在北部平原，说明北部平原拔节—抽雄期有效降水量增加趋势偏小。

2.2 夏玉米生育期水分盈亏系数时空变化规律

2.2.1 夏玉米生育期水分盈亏系数时间变化规律 作物水分盈亏指数(CWSDI)反映作物生长对灌溉的依赖程度，CWSDI 越小说明灌溉需水量越大。鲁中地区夏玉米 CWSDI 在拔节至抽雄、抽雄至乳熟2个阶段最小，平原为-0.7，山区为-0.6，在乳熟期—成熟期最大，说明在鲁中地区拔节期—乳熟期是灌溉需水量的主要阶段。

图5为夏玉米全生育期CWSDI时间变化及其突变检验。由图5可知，夏玉米全生育期CWSDI均随时间变化呈增加趋势，山区较平原地区幅度略大，2003年是突变增加的主要年份，之后一直处于增加的趋势，说明近10年夏玉米全生育期水分亏缺处于减轻的趋势。

各发育期CWSDI时间变化规律分析(图略)可知，平原地区除在乳熟至成熟期CWSDI随时间变化呈减少趋势外，在其他发育期均处于增加趋势，其中拔节期至抽雄期降幅最大；山区在各发育期CWSDI均处于增加的趋势，其中拔节期至乳熟期增加幅度最大，各生育阶段增幅均较平原地区大。

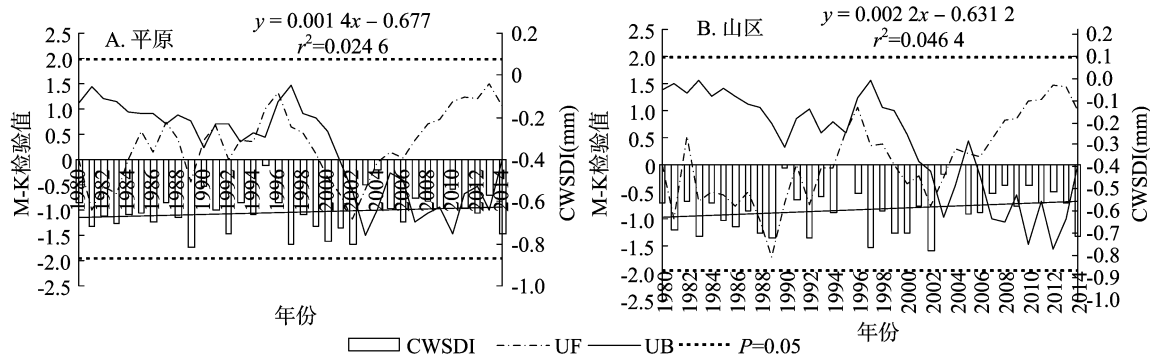
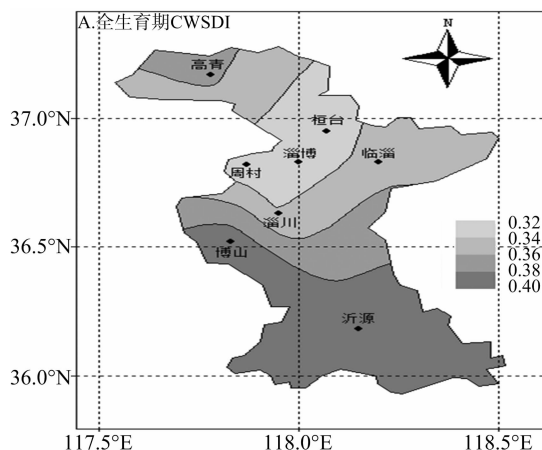


图5 夏玉米全生育期CWSDI及其M-k突变检验

2.2.2 夏玉米生育期水分盈亏系数空间变化规律 鲁中地区夏玉米全生育期、拔节—抽雄期CWSDI的EOF分解第一

特征向量见图6。由图6可知，鲁中各地区夏玉米全发育期CWSDI主要空间变化趋势一致，第一特征向量贡献率分布为

87%、84%。由图6-A可知,全生育期 CWSDI 空间变化强度中心为南部山区,中部平原最小,第一特征向量时间系数随时间变化呈增加的趋势,说明鲁中中部地区全发育期水分亏缺减轻幅度最小,南部山区全发育期水分亏缺减轻幅度最大。



由图6-B可知,拔节至抽雄阶段,鲁中 CWSDI 各地区空间变化趋势一致,强度中心在南部山区,依次向北递减。时间系数变化规律(图略)与“2.2.1”节结论一致。

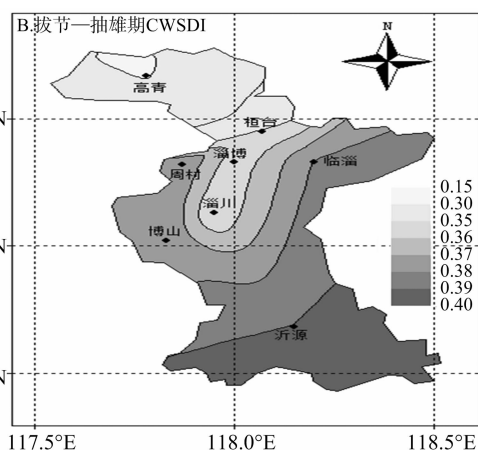


图6 夏玉米全生育期、拔节—抽雄期CWSDI的EOF分解第一特征向量

2.3 夏玉米生育期灌溉需水量时空变化规律

2.3.1 夏玉米生育期灌溉需水量时间变化规律 鲁中地区夏玉米全生育期灌溉需水量及其突变检验见图7。由图7可知,鲁中地区全生育期灌溉需水量随时间变化呈减少趋势,平原地区35年全生育期平均灌溉需水量241.5 mm,山区为215.4 mm,2003年是灌溉需水量突变减少的开始年份,山区在2012年达极显著减少年份。

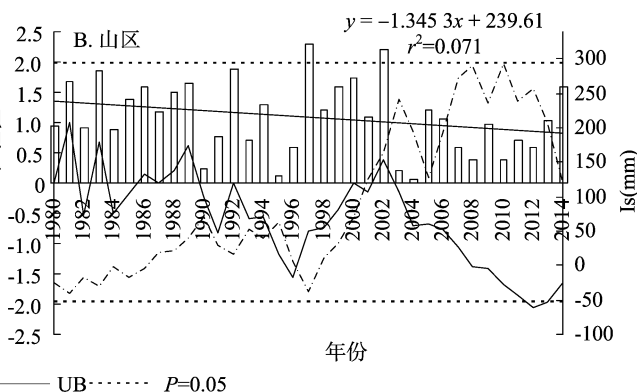
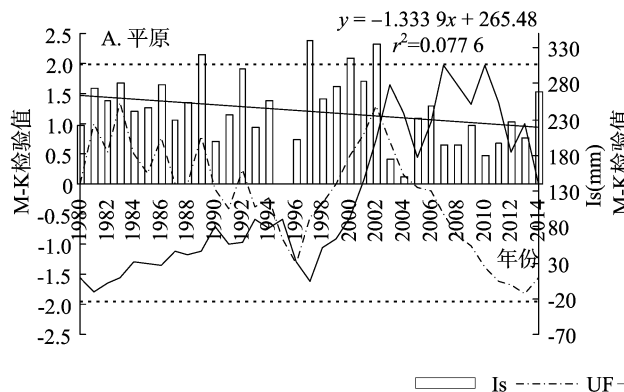


图7 夏玉米全生育期灌溉需水量及其M-K突变检验

2.3.2 夏玉米生育期灌溉需水量空间变化规律 夏玉米全生育期、拔节—抽雄期灌溉需水量的 EOF 分解第一特征向量见图8。由图8可知,鲁中各地区全生育期灌溉需水量主要空间变化规律一致,第一特征向量贡献率分别为89%、85%。由图8-A可知,全生育期灌溉需水量空间变化强度中心在鲁中西部地区,东部地区最少,时间系数趋势随时间变化呈减少趋势(图略),与“2.3.1”节分析一致。由8-B可知,拔节—抽雄期灌溉需水量空间变化强度中心在中部地区,北部平原最小,时间系数趋势随时间变化呈减少趋势(图略)。

37.1%,不能满足作物的生长需求。拔节至抽雄期是需水量最多的阶段。全生育期需水量随时间变化呈减少趋势,气候倾向率平原为-13.1 mm/10年,山区为-9.7 mm/10年,各生育期阶段需水量均随时间变化呈减少趋势,其中,拔节—抽雄期减少幅度最大,2008年后显著减少。全生育期需水量主要空间变化规律一致,强度中心在中北部地区,但在第二特征向量上中北部地区和东部、南部地区存在空间变化不一致性。主需水期拔节—抽雄期的需水量随时间变化呈减少趋势,减少中心在中部平原。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)鲁中地区全生育期平均有效降水量占需水量的

(2)鲁中地区近35年来,夏玉米全生育阶段有效降水量随时间变化呈增加趋势,2003年是突变增加的开始年份,播种至拔节期是有效降水量最多的阶段。主需水期拔节—抽雄期阶段有效降水量随时间变化呈增加趋势。各地各生育阶段

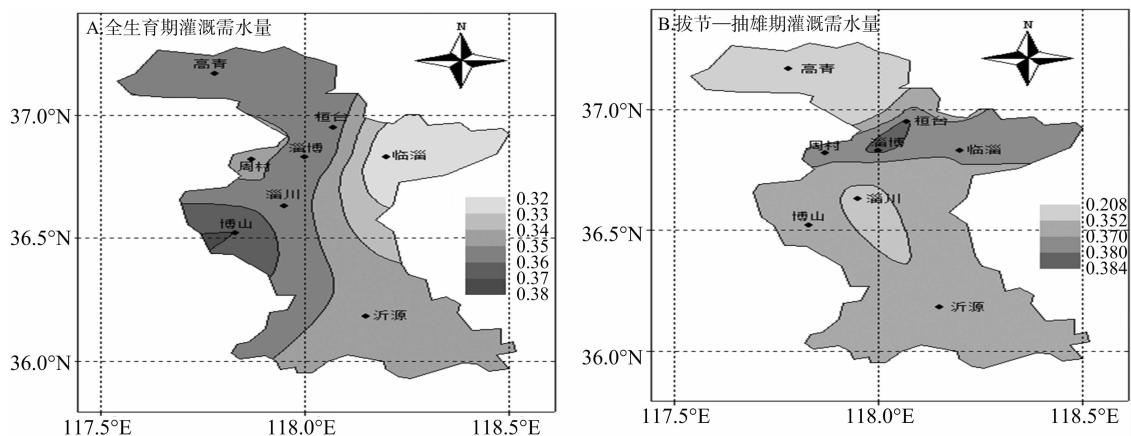


图8 夏玉米全生育期、拔节—抽雄期灌溉需水量的EOF分解第一特征向量

主要空间变化规律一致,全生育期强度中心在南部山区,拔节—抽雄期强度中心在中部平原。

(3)鲁中地区夏玉米 CWSDI 在拔节至抽雄、抽雄至乳熟 2 个阶段最小,平原为 -0.7 ,山区为 -0.6 ,全生育期 CWSDI 随时间变化呈增加趋势,说明鲁中地区夏玉米生育期水分亏缺有减轻的趋势。各发育阶段 CWSDI 主要空间分布规律一致,强度中心在南部地区。准确掌握各发育期的水分盈亏时空变化,为灌溉和干旱评估提供基础。

(4)鲁中地区全生育期灌溉需水量随时间变化呈减少趋势,平原地区 35 年全生育期平均灌溉需水量 241.5 mm,山区为 215.4 mm,2003 年是灌溉需水量突变减少的开始年份。拔节至抽雄期是灌溉需水量最大的阶段,各生育阶段灌溉需水量均随时间变化呈减少的趋势,其中,拔节至抽雄期减少幅度最大。各生育期灌溉需水量主要空间变化规律一致,全生育期灌溉需水量空间变化强度中心在鲁中西部地区,拔节—抽雄期强度中心在中部地区。结合各发育阶段的灌溉需水量的时空变化,因地制宜地在关键发育阶段进行灌溉,对提高产量十分关键。

3.2 讨论

本研究采用有效降水量消除了无效降水引起的误差,对作物生育阶段水分亏缺的计算比较精确。全生育期灌溉需水量的研究与刘钰等的研究^[6]基本相符,但本研粉在分析灌溉需水量时未考虑底墒的水分基础,将在以后研究中进行完善。

在全球气候变暖的大趋势下,确定夏玉米各生育阶段的水分变化和灌溉需水量尤为重要。实际生产中可依据本研究的结果对夏玉米进行灌溉,合理安排灌溉时间,节约水资源,提高夏玉米产量。

参考文献:

- [1] 王晓东,马晓群,许莹,等. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J]. 资源科学,2013,35(3):665-672.
- [2] 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.
- [3] 曹倩,姚凤梅,林而达,等. 近 50 年冬小麦主产区农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农业气象,2011,32(2):161-166.
- [4] 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.

- [5] 王卫光,彭世彰,孙凤朝,等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J]. 水科学进展,2012,23(5):656-664.
- [6] 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.
- [7] 马林,杨艳敏,杨永辉,等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报,2011,15(2):324-339.
- [8] 许莹,马晓群,吴文玉. 气候变化对安徽省主要农作物水分供需状况的影响[J]. 气候变化研究进展,2012,8(3):198-204.
- [9] 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要农作物需水量与灌溉[M]. 北京:水利电力出版社,1995:191-195.
- [10] Pleban S,Israeli I. Improved approach to irrigation scheduling[J]. Irrig Drain Eng,1989,115(4):577-587.
- [11] Cropwat S M. A computer program for irrigation planning and management-irrigation and drainage[R]. Rome:FAO,1992:20-21.
- [12] Kuo Sheng Feng, Ho S S, Liu C W. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan[J]. Agricultural Water Management,2006,82(3):433-451.
- [13] Doll P,Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research,2002,38(4):1-8.
- [14] 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旱涝时空变化[J]. 农业工程学报,2012,28(12):101-109,后插 3-后插 4.
- [15] 曹永强,张兰霞,张岳军,等. 基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析[J]. 资源科学,2012,34(2):265-272.
- [16] 张婧,梁树柏,许晓光,等. 基于 CI 指数的河北省近 50 年干旱时空分布特征[J]. 资源科学,2012,34(6):1089-1094.
- [17] 付学功,孙俊荷,任来良. 半干旱半湿润地区农业旱情综合评价方法[J]. 中国农业气象,1999,20(4):17-20,53.
- [18] Allen R G,Perreira L S,Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements: irrigation and drainage [R]. Rome:FAO,1998.
- [19] Mccuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating vaporation[J]. Water Resource Bulletin,1974,10(3):486-498.
- [20] Yin Y H,Wu S H,Chen G. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. Theoretical and Applied Climatology,2010,101(1/2):19-28.
- [21] 李勇,杨晓光,叶清,等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报,2011,27(9):175-183.