

近 50 年新疆小麦需水量时空特征及气候影响因素分析

轩俊伟^{1,2}, 郑江华^{1,2}, 刘志辉^{1,2,3}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室,
乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学干旱与半干旱生态研究所, 乌鲁木齐 830046)

摘 要: 基于新疆地区 54 个国家基本气象站 1963—2012 年的逐日气象资料, 利用 FAO Penman-Monteith 公式和作物系数法, 得到近 50 a 来新疆小麦全育期和各生长阶段需水量, 并利用线性趋势估计、MK 检验、空间插值法分析了小麦全育期及各生长阶段需水量的年际变化趋势、空间分布特征及气象影响因素。结果表明: 近 50 a 新疆小麦全育期平均需水量空间分布总体呈现南疆大于北疆、东部大于西部、由西北向东南增大的格局, 生长初期和发育期需水量空间分布表现为南多北少, 而生长中期和生长末期则为东多西少。小麦全育期年需水量平均以 7.8 mm/10 a 的速率呈极显著的下降趋势, 并于 1978 年开始发生突变。小麦全育期内风速降低、日照时数减少是导致小麦全育期需水量下降的主要原因。

关键词: 小麦; 作物需水量; 空间分布; Penman-Monteith 公式; 趋势分析; 新疆

中图分类号: S963

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0155-06

Spatiotemporal Characteristics of Water Requirement of Wheat as Influenced by Climate in Xinjiang in Recent 50 Years

XUAN Junwei^{1,2}, ZHENG Jianghua^{1,2}, LIU Zhihui^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University 830046, China;

2. Key Lab for Oasis Ecosystem of MOE, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Based on the meteorological data of 54 stations from 1963 to 2012 in Xinjiang, the water requirement of wheat (WRW) of the whole growing period and different growth stages were calculated by using FAO Penman-Monteith model and crop coefficient. Meanwhile, we used the methods of linear regression, Mann-Kendall test and Inverse Distance Weighting to analyze the spatiotemporal change characteristics of water requirement of wheat in Xinjiang in recent 50 years. The results showed that the spatial distribution characteristics of mean WRW of the whole growing period and different growth stages of wheat were obviously various in the different regions of Xinjiang. Generally, the WRW of the whole growing period was larger in south than that in north, and it was larger in east than west. And the WRW of the initial or development stage were larger in south than northern. However, the WRW of the mid-season or late-season stage were larger in east than west. The annual WRW of the whole growing period was significantly decreasing with the rate of 7.8 mm/10 a, and it had significantly abrupt decrease in 1978. The negative trend in wheat water requirement in Xinjiang was mainly attributed to decline of sunshine hour and wind speed.

Keywords: wheat; crop water requirement; spatial distribution; Penman-Monteith equation; trend analysis; Xinjiang

IPCC 第五次评估报告指出, 全球气候变暖的事实是毋庸置疑的^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会和联合国粮食及农业组织都将农业列为最易遭受气候变化影响、最脆弱的产业之一^[2]。因此, 开展气候变化

背景下农作物需水量的时空变化特征研究, 对于农业生产和水资源可持续利用具有重要的科学意义^[3]。

目前, 众多学者对不同地域、不同农作物的需水量时空变化进行了研究。杨琪等^[4]基于河东地区

50 a 气象资料, 计算了冬、春小麦全生育期的需水量和缺水量, 并分析其变化趋势及气象影响因子。孙爽等^[5]研究了 1961—2010 年中国冬小麦全生育期及不同生育阶段的需水量, 发现小麦需水量呈下降趋势, 并呈现明显的空间分布特征。刘宏谊等^[6]计算分析了近 40 a 甘肃省主要农作物需水量及其时空变化规律。刘玉春等^[7]在研究棉花需水量的基础上, 利用水文学方法分析了不同水文年份棉花的灌溉需水量和灌溉需求指数。尹海霞等^[8]基于 1967—2009 年的逐日气象资料, 利用 FAO 推荐的彭曼公式计算分析了黑河流域中游春小麦、玉米需水量及其变化趋势。

可以看到在农作物需水量时空变化方面, 均是利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和作物系数法来计算农作物需水, 研究区也涉及我国大部分地区, 但对于地处西北干旱区的新疆地区, 相关研究较少。新疆是我国西部地区最为干旱的内陆农业灌区, 农业用水比重大、用水效益低是新疆农业用水的主要问题之一^[9]。而小麦是新疆最主要的粮食作物之一, 2012 年新疆小麦播种面积达 $1.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占粮食播种总面积的 51.4%。对于水资源较为匮乏的新疆地区, 在全球气候变暖背景下, 探索小麦需水量的时空变化规律对保证本地区粮食生产安全以及社会经济稳定发展都具有重要意义。基于此, 本文利用新疆地区 54 个国家基本气象站逐日气象数据, 基于 Penman-Monteith 公式和作物系数法, 计算了新疆地区春、冬小麦近 50 a 需水量并进一步分析其时空变化规律, 以期对新疆农业的可持续发展及水资源的管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于亚欧大陆中部, 地处中国西北边陲, 中部横亘着蜿蜒千里的天山将新疆分作天山北部(北疆)、天山南部(南疆)两大区域。新疆是灌溉农业区, 小麦是最主要的粮食农作物, 2012 年小麦的播种面积占全区总播种面积的 21.05%^[10]。其中冬小麦播种面积占 60% 左右, 春小麦占 40% 左右。南北疆均有春、冬小麦种植, 但北疆以种春小麦为主, 南疆以种植冬小麦为主, 其中天山南北两侧从丘陵到山前平原的多数区域为冬春麦混种区^[11]。

1.2 数据来源

新疆地区 54 个气象站 1963—2012 年的地面逐日气象数据, 来源于中国气象科学数据共享服务网, 所使用的气象要素包括逐日最低气温、最高气温、平均本站气压、平均水汽压、平均风速、日照时间、降水量等。小麦生育期的资料来源于中国农作物生长发

育和农田土壤湿度旬值数据集及相关文献^[12], 作物系数采用 FAO 的推荐值并进行修正。

1.3 研究方法

1.3.1 作物需水量 作物需水量是在理想的生长条件下, 作物从种植到收获所需的蒸散量, 一般利用参考作物腾发蒸腾量和作物系数法进行计算, 计算公式如下:

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

式中: ET_c ——某一时期作物的需水量(mm); K_c ——对应时期的作物系数; ET_0 ——相应时期的参考作物蒸散量(mm)。

参考作物腾发蒸腾量, 是一种假想的参考作物冠层腾发速率。这种参考作物被假定设为高度 12 cm、表面阻力 70 s/m、反射率 0.23, 类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、充分供水、完全遮盖地面的绿色草地^[13]。 ET_0 的大小只与气象因素有关, 一般采用 FAO 推荐的修正 Penman-Monteith 公式进行计算, 公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} V_2 (p_a - p_b)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V_2)} \quad (2)$$

式中: R_n ——地面净辐射蒸发当量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G ——土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; r ——温度计常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); T ——平均气温 ($^\circ\text{C}$); V_2 ——2 m 高的风速 (m/s); p_a ——饱和水汽压 (kPa); p_b ——实际水汽压 (kPa); Δ ——温度—饱和水汽压曲线的斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)。

作物系数, 反映实际作物和参考作物之间需水量的差异, 是作物某生长发育阶段需水量 ET_c 与该阶段参考作物蒸散量 (ET_0) 的比值。FAO-56 将作物全生育期划分为四个阶段, 生长初期、发育期、生长中期和生长末期, 并给出了 84 种作物各阶段相应的作物系数。其中, 初始生长期是由播种至覆盖率接近 10% (播种—返青期/出苗, 由于春小麦无返青期, 因此春小麦初始生长期为播种至出苗); 生长发育期是从覆盖率 10% 到完全覆盖 (返青—拔节期/出苗); 生长中期从完全覆盖到成熟期开始 (拔节—开花期); 生长末期从成熟到收获^[14] (开花—成熟期)。本文在计算作物需水量时, 结合研究区气候对 FAO-56 推荐的作物系数值进行修正。

1.3.2 需水量趋势变化及突变分析 利用线性倾向估计和 Mann-Kendall 法对 1963—2012 年新疆地区小麦需水量变化趋势进行分析。线性倾向估计^[15]是用一条合理的直线表示两变量之间的相关关系, 并建

立变量 Y 与时间 t 之间的一元线性回归方程。如下:

$$Y = a + bt \quad (3)$$

式中: a ——回归常数; b ——倾向率。判断变化趋势的程度是否显著,需要计算相关系数 r 并对其进行显著性检验,选定显著性水平值 α ,若 $|r| > r_\alpha$,说明 Y 随时间 t 的变化趋势是显著的,否则不显著。

MK 趋势检验法是一种非参数统计检验方法,能很好揭示时间序列的趋势变化,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰^[16],现已广泛应用于水文气象等资料的趋势变化检验。通过计算 UF 和 UB 两个统计量,可以分析得到变化趋势、突变时间区域及突变开始时间。

1.3.3 需水量空间分布 利用 ArcGIS 插值工具中反距离插值法^[17]对各气象站计算得到的小麦需水量及倾向率进行空间插值,产生空间栅格数据,并利用自然断裂法对栅格数据进行分类,获得全疆近 50 a 平均小麦需水量及倾向率空间分布图。

2 结果与分析

2.1 小麦全育期、各生长阶段需水量及空间分布

2.1.1 小麦全育期需水量及空间分布 1963—2012 年,新疆 54 个气象站小麦全育期年平均需水量为 525 mm,各站变化范围为 287~782 mm,差异明显。新疆小麦全育期平均需水量空间分布如图 1,阿勒泰、塔城北部及伊犁地区需水量最小为 286~470 mm,天山北麓至准噶尔盆地腹地的博州、塔城南部、昌吉和天山南麓的阿克苏北部、巴州西北部需水量为 470~540 mm,喀什、巴州中部、吐鲁番东南部及哈密东北部需水量为 540~600 mm,新疆西南部从于田到哈密的带状区域为需水量高值区,需水量范围 600~780 mm。可以看出其空间分布整体呈现西北向东南递增、北疆大于南疆、东部大于西部的趋势。

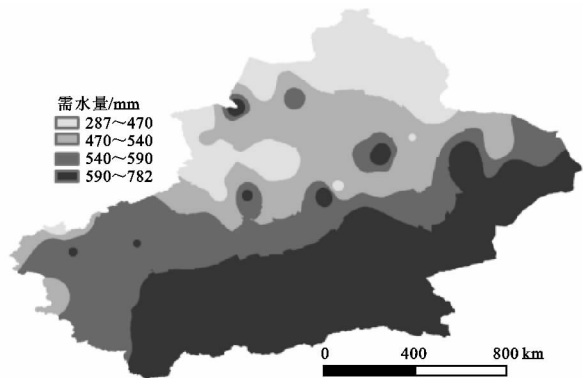


图1 近50年新疆小麦全生育期年平均需水量

小麦需水量主要由气候因素和小麦类型决定,气温越高、风速越大、日照时间越长的地区需水量越大,春小麦由于生长周期较冬小麦短,其需水量低于冬小

麦。新疆北部气候较南部温和且以种植春小麦为主,所以北疆小麦需水量小于南疆,东疆虽然也种植春小麦,但东部地区气候干燥、日照时间、风速均较大,因此东部小麦需水量也高于西部。

2.1.2 小麦不同生长阶段需水量及空间分布 新疆地区 1963—2012 年小麦各生长阶段需水量的空间分布如图 2 所示。图 2a 为小麦生长初期需水量空间分布情况,全疆平均需水量 81 mm,范围为 15~179 mm。需水量空间分布差异明显,总体由北向南增大并呈带状分布,塔城、阿勒泰、昌吉州西部为低值区,天山北麓、南麓地区为中值区,塔克拉玛干沙漠南缘的和田、且末、若羌等为高值区。图 2b 为小麦发育期需水量空间分布情况,全疆平均需水量 141 mm,范围为 69~216 mm。需水量空间分布总体由北向南增大并呈带状分布,塔城北部、阿勒泰、昌吉东北部为低值区,需水量在 69~115 mm,天山北麓、南麓地区为中值区,需水量在 115~170 mm,和田、且末、若羌等为高值区,需水量在 170~217 mm。图 2c 为小麦生长中期需水量空间分布情况,全疆平均需水量 258 mm,范围为 146~419 mm。需水量空间分布总体呈带状由西向东增大,伊犁、阿克苏、喀什、和田、巴州西北部等地区为低值区,塔城西北及东北部、阿勒泰、昌吉西北部、巴州中南部为中值区,巴州东南部、吐鲁番、哈密西部及塔城中部地区为高值区。图 2d 为小麦生长末期需水量空间分布情况,全疆平均需水量 48 mm,范围为 31~77 mm。需水量空间分布同样总体呈带状由西向东增大,伊犁、阿克苏、克州、巴州西北部等地区为低值区,塔城东北部、阿勒泰、昌吉西北部、巴州中南部、和田、喀什为中值区,巴州东南部、吐鲁番、哈密西部及塔城中部地区为高值区。

对比新疆小麦不同生育阶段需水量可知,生长中期需水量最大、发育期次之、生长末期最小。同样比较新疆小麦不同生育阶段需水量空间分布状况,可以看出生长初期和发育期具有相同的空间分布特征,均是呈带状由北向南增大,而生长中期和生长末期同样具有相同空间分布特征,东高西低成带状分布。

2.2 小麦不同生长阶段和全育期需水量年际变化趋势

2.2.1 小麦不同生长阶段需水量年际变化趋势 新疆 1963—2012 年,小麦不同生长阶段需水量年际变化情况见表 1。可知近 50 a,小麦生长初期需水量以 1.4 mm/10 a 的速率递减,并通过 0.001 的显著性水平检验;发育期需水量以 1.6 mm/10 a 的速率递减,并通过 0.05 的显著性水平检验;生长中期需水量以 3.9 mm/10 a 速率递减,并通过 0.05 的显著性检验;生长末期需水量以 0.6 mm/10 a 速率递减,并通过 0.001 的显著性水平检验。

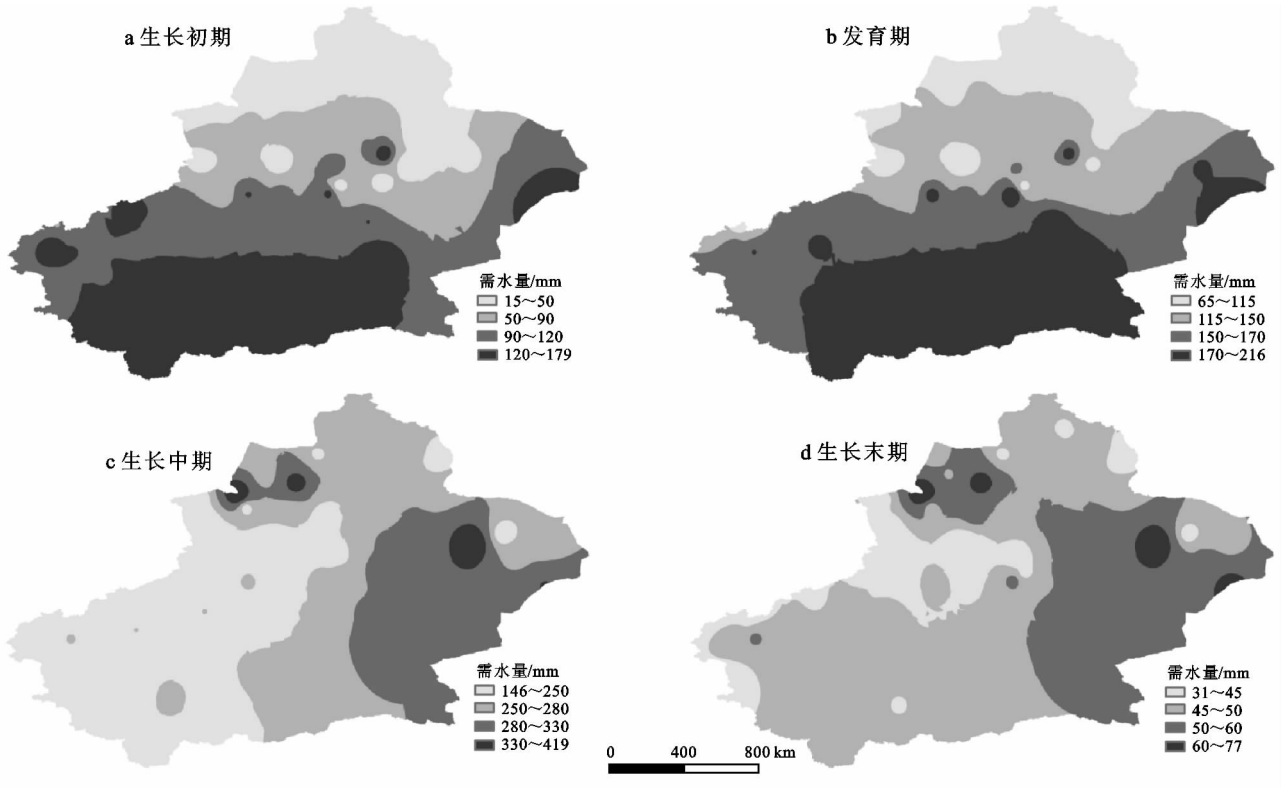


图 2 1963—2012 年新疆小麦各生长阶段年平均需水量

表 1 新疆小麦不同生长阶段需水量年际变化趋势

参数	生长初期	发育期	生长中期	生长末期
倾向率	-0.1413	-0.1553	-0.3870	-0.0859
相关系数	-0.4672**	-0.2983*	-0.4754**	-0.5749**

注：**表示通过 0.001 显著水平检验,*表示通过 0.05 显著水平检验。

新疆近 50 a 小麦不同生长阶段需水量总体呈现下降趋势,并且除发育期外其他生长阶段下降趋势非常显著。其中,生长中期下降速率最大、生长初期和发育期下降速率次之、生长末期下降速率最小。

2.2.2 小麦全育期需水量年际变化趋势 新疆 1963—2012 年小麦全育期年需水量变化趋势如图 3 所示,可知近 50 a 小麦全育期需水量最高年份是

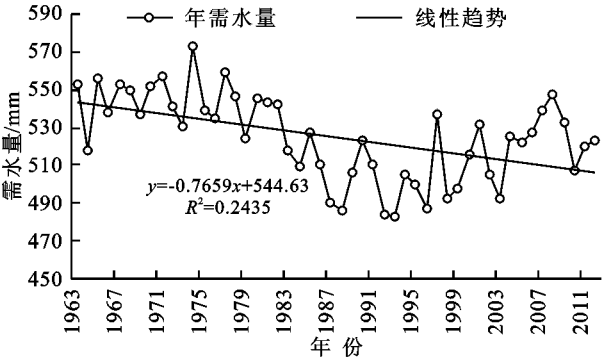


图 3 小麦全生育期年需水量变化趋势

此外,考察小麦需水量年际变化发现,1963—1978 年正序曲线 UF 在 0 附近小幅波动,说明此段时间小麦需水量变化趋势不明显,处于相对平稳状

1974 年为 573 mm,最低年份是 1993 年为 483 mm,平均年需水量为 525 mm。全育期内小麦需水量总体呈下降趋势,递减速率为 7.8 mm/10 a,并通过 0.001 的显著性水平检验。利用 MK 法在 DPS 软件中对新疆 1963—2012 年小麦全育期需水量变化趋势进行突变检验,结果如图 4 所示。由正序曲线 UF 可知,自 20 世纪 70 年代末期以来,新疆小麦全育期需水量有明显的下降趋势,并且 80 年代末期至今这种下降趋势大大超过了 0.001 显著性水平,说明小麦需水量下降趋势是十分明显的。正序曲线 UF 和逆序曲线 UB 在置信度区间内,于 1978 年有一个交点,表明新疆小麦需水量下降是突变现象,突变开始时间为 1978 年。

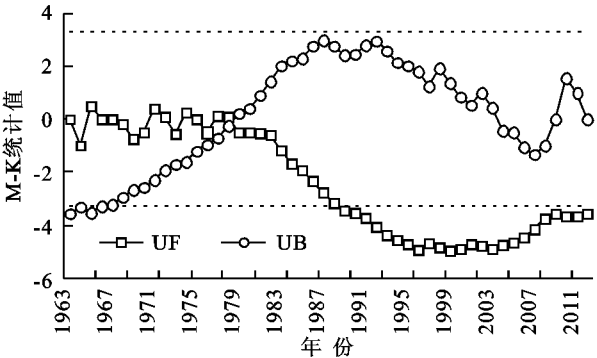


图 4 小麦全生育期年需水量 MK 突变检测

态;1978 年 UF 开始偏离 0,特别是 1982 年后 UF 值下降趋势更加明显,说明 1978 年以来小麦全育期需水量呈持续下降趋势,并从 1982 年开始下降趋势加

剧。可以看到 MK 法检测到的需水量变化趋势与线性倾向估计结果一致。

2.3 小麦需水量年际变化气候影响因素

2.3.1 小麦全育期主要气象因素变化趋势 采用线性倾向估计对 1963—2010 年新疆小麦全育期内的四种主要气象要素变化进行了分析,结果见图 5。可知,近 50 a 来新疆小麦全育期平均气温总体呈上升趋势,上升速率为 $0.35^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,并通过 0.001 的显著

性检验,说明上升趋势极其显著(图 5a)。全育期内平均风速呈现下降趋势,递减速率为 $0.18(\text{m/s})/10\text{ a}$,并通过 0.001 的显著性水平检验,表明下降趋势极其显著(图 5b)。全育期内日均日照时数以 $0.035\text{ h}/10\text{ a}$ 的速率呈下降趋势,但下降趋势并不显著(图 5c)。全育期内有效降雨量以 $5.96\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率呈下降趋势,并通过 0.01 的显著性水平检验,表明下降趋势一般显著(图 5d)。

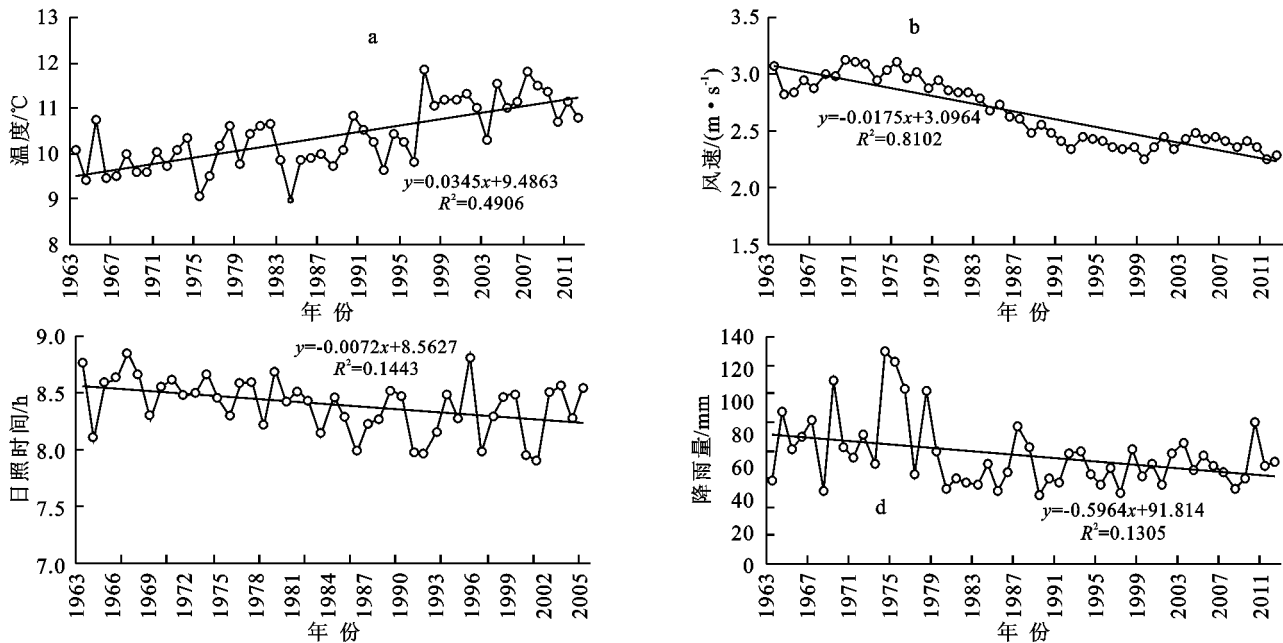


图5 1963—2012年新疆小麦全育期气象因素变化趋势

新疆近 50 a 小麦全育期内日平均气温呈极显著的上升趋势,而风速、日照时数及有效降雨量均呈现与需水量变化相同的下降趋势,其中风速下降趋势最为明显、有效降雨量次之、日照时数最不显著。

2.3.2 小麦全育期需水量年际变化的主要气象因素

为探讨新疆小麦需水量变化的主要原因,本文利用 Pearson 相关分析法计算了近 50 a 小麦需水量与气温、风速、日照、有效降雨量四种主要气象因素的相关关系,见图 6。可知,小麦全育期需水量与气温、风速、日照时数及有效降雨量均呈正相关。气温、有效降雨量与小麦需水量的相关系数较低,表现出较为微弱的正相关关系。而风速和日照时数的相关系数分别为 0.679 6, 0.776 4,表现出很强的相关性,是影响小麦全育期需水量的主要气象因素。

结合图 5、图 6 分析可知,虽然平均气温呈显著上升趋势会引起小麦需水量的增加,但这种增加量远远小于由风速降低及日照时数减少所导致的小麦需水减少量。因此,近 50 a 新疆小麦全育期内风速的降低、日照时数的减少是导致小麦全育期需水量下降的主要原因。

3 讨论

根据作物需水量计算公式,可知作物需水量由作物系数和参考作物蒸散量决定,小麦需水量与参考作物蒸散量有极强的相关关系。本文利用线性倾向估计和 MK 检验法研究新疆小麦需水量趋势变化发现,近 50 a 新疆小麦需水量呈极显著下降趋势,于 1978 年开始发生突变,并且从 1982 年开始下降趋势明显加剧。这与张青山等^[18]得出的近 50 a 新疆参考作物蒸散量呈显著减少趋势,并于 1981 年开始突变减小的结论基本一致。

施雅风等指出在全球气候变暖背景下,新疆地区气温升高趋势明显,并呈现由暖干向暖湿转型的特点^[19]。本文通过分析近 50 a 新疆小麦全育期内的气象因素变化趋势,得到气温呈显著升高趋势与施雅风等提出的论点相一致。但分析得到的有效降雨量呈现下降趋势与施雅风等提出新疆地区由暖干向暖湿转型的趋势相悖。可能原因是小麦全育期内的有效降雨量并不同于年降雨量,如北疆春小麦生育期一般为 4—7 月,南疆冬小麦生育期为 9 月至次年 6 月,而

本文统计的仅是小麦生育期内的有效降雨量。此外,相关研究^[20-21]指出 50 a 来新疆年日照时数和风速均

呈显著下降趋势,并于 20 世纪 80 年初期发生突变,与本文的分析结果也基本一致。

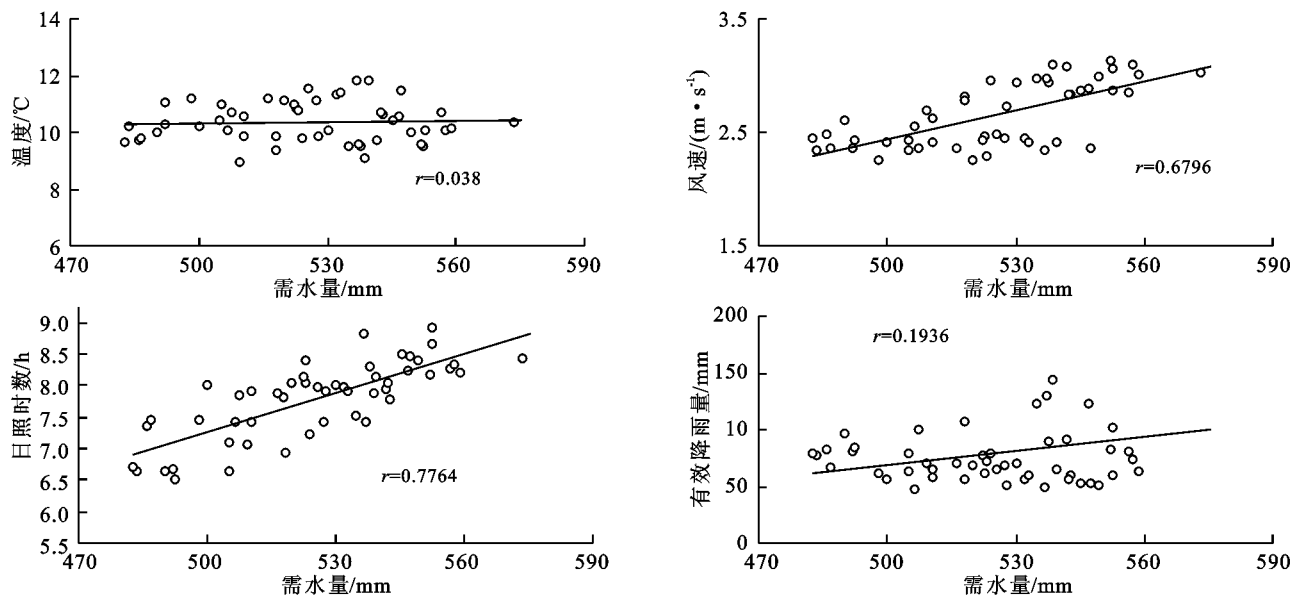


图 6 小麦全育期需水量与气象因素相关关系

新疆地区面积广大,地形地貌、气候变化的区域性差异明显,本研究所利用的 54 个国家气象基本站点数据相对来说比较稀少,如果能增加气象站点数量,小麦需水量空间分布插值将会更加精细。此外,受制于小麦物候期数据时限的限制,本文计算小麦需水量时利用小麦生育期多年平均数据来确定各生长阶段的起始时间,还需要进一步的完善。

4 结论

(1) 1963—2012 年新疆小麦全育期平均需水量为 525 mm,但区域差异明显,空间分布总体呈现南疆大于北疆、东部大于西部、由西北向东南增大的格局。此外,从小麦各生长阶段来看生长初期和发育期需水量空间分布表现为南疆多北疆、由北向南呈带状逐渐增大的特征,而生长中期和生长末期需水量空间分布表现为东多西少的格局。

(2) 1963—2012 年新疆小麦全育期年需水量平均以 7.8 mm/10 a 的速率呈极显著的下降趋势,并于 1978 年开始发生突变。不同生长阶段需水量也均呈现下降趋势,其中生长中期下降速率最大、生长初期和发育期下降速率次之、生长末期下降速率最小。

(3) 1963—2012 年新疆绝大部分区域小麦全育期需水量均呈下降趋势,下降速率总体呈现北疆小于南疆、东疆大于西部、由西北向东南递增的空间分布特征,与小麦全育期需水量空间分布特征一致,全育期需水量大的高值区也是需水量递减趋势最剧烈的区域。

(4) 1963—2012 年新疆小麦全育期内日平均气

温呈极显著的上升趋势,风速、日照时数及有效降雨量均呈现下降趋势。小麦全育期需水量与风速和日照时数表现出很强的相关性,全育期内风速的降低、日照时数的减少是导致小麦全育期需水量下降的主要原因。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013,35(5):1068-1076.
- [2] 吴普特,赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. 农业工程学报, 2010,26(2):1-6.
- [3] 王卫光,孙凤朝,彭世彰,等. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2013,29(14):90-98.
- [4] 杨琪,张勃,尹海霞,等. 甘肃河东地区近 50 年小麦需水量变化趋势及影响因子[J]. 生态学杂志, 2013,32(11):3074-3081.
- [5] 孙爽,杨晓光,李克南,等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2013,29(15):72-82.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 尹海霞,张勃,王亚敏,等. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2012,34(3):409-417.
- [9] 赵忠文,杨旭东. 新疆农业用水现状及对策[J]. 现代农业科技, 2010(3):317-318.

态评价研究。本研究主要从静态的角度展开分析,缺少动态关联与趋势预测,基本农田保护区与城镇演变时空变化规律、地方经济的发展趋势结合不紧密。可在后续研究中,结合历年来基本农田保护区变化情况,建立动态评价决策体系,提升评价的客观时效性。

参考文献:

- [1] 蔡运龙. 中国经济高速发展中的耕地问题[J]. 资源科学, 2000, 22(3): 24-28.
- [2] 聂艳, 吴西子, 于婧, 等. 基于土地评价和空间聚类的基本农田划定方法研究: 以湖北省鹤峰县为例[J]. 中国土地科学, 2013(12): 39-45.
- [3] 金志丰. 基于 GIS 空间分析的基本农田配置研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 134-137.
- [4] 唐宽金, 郑新奇, 姚金明, 等. 基于粮食生产能力的基本农田保护区规划方法研究[J]. 地域研究与开发, 2008, 27(6): 105-109.
- [5] 董秀茹, 尤明英, 王秋兵. 基于土地评价的基本农田划定方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 336-339.
- [6] 钱凤魁, 王秋兵. 基于农用地分等和 LESA 方法的基本农田划定[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 251-255.
- [7] 李灿, 黄九松, 王玲燕, 等. 基于农用地分等成果的县级基本农田布局优化[J]. 广东农业科学, 2014, 41(1): 193-197.
- [8] 孔祥斌, 靳京, 刘怡, 等. 基于农用地利用等别的基本农田保护区划定[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 46-51.
- [9] 周尚意, 朱阿兴, 邱维理, 等. 基于 GIS 的农用地连片性分析及其在基本农田保护规划中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 72-77.
- [10] Bonham-Carter G F, Agterberg F P, and Wright D F. Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential [C] // Agterberg F P, Bonham-Carter G F. Statistical Applications in the Earth Sciences, 1989.
- [11] 田立环. 用 GIS 证据权重法对河南宝丰地区铝土矿进行成矿预测[J]. 矿产勘查, 2011, 2(2): 145-149.
- [12] 张艳玲, 南征兵, 周平根. 利用证据权法实现滑坡易发性区划[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 121-125.
- [13] 谢洪斌, 杨雪, 谭德军, 等. 模糊证据权法在夏橙产区土地适宜性评价中的应用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 37(6): 693-698.
- [14] 金贵, 王占岐, 胡学东, 等. 基于模糊证据权模型的青藏高原区土地适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 241-250.
- [15] 金贵, 王占岐, 李伟松, 等. 模糊证据权法在西藏一江两河流域耕地适宜性评价中的应用[J]. 自然资源学报, 2013, 29(7): 1246-1256.
- [16] Agterberg F. A modified weights-of-evidence method for regional mineral resource estimation [J]. Natural Resources Research, 2011, 20(2): 95-101.
- [17] Deng M. Binary pattern recognition in the presence of correlated multiple dependent variables[J]. Natural resources research, 2010, 19(4): 269-278.
- [18] Cheng Q, Agterberg F P. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping [J]. Natural resources Research, 1999, 8(1): 27-35.
- [19] 张英, 潘瑜春, 曾志炫, 等. 基于农用地分等定级的耕地入选基本农田评价比较分析[J]. 中国土地科学, 2012, 26(3): 29-33.
- [20] 王新盼, 姜广辉, 张瑞娟, 等. 高标准基本农田建设区域划定方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 241-250.
- [21] 李建春, 张军连, 李宪文, 等. 银川市基本农田保护区空间布局合理性评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 242-249.
- [22] 赵昕, 郭晶. 区域承灾力评价的协调度模型与实证[J]. 统计与决策, 2011(6): 63-65.

(上接第 160 页)

- [10] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [11] 王荣栋, 孔军, 陈荣毅, 等. 新疆小麦品质生态区划[J]. 新疆农业科学, 2005, 42(5): 309-314.
- [12] 黄敬峰, 王秀珍, 蔡承侠, 等. 新疆冬小麦物候与气候条件研究[J]. 中国农业气象, 2000, 21(1): 14-19.
- [13] Smith M, Allen R, Pereira L. Revised FAO methodology for crop water requirements[M]. Rome: Land and Water Development Division, 1997.
- [14] 王瑶, 赵传燕, 田风霞, 等. 黑河中游春小麦需水量空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2374-2382.
- [15] 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.
- [16] 杨波, 张勃, 安美玲, 等. 1961—2011 年秦巴山区极端降水事件的时空特征分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 110-116.
- [17] 原立峰, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 基于地统计学和 GIS 的鄱阳湖流域降雨空间差异分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 34-38.
- [18] 张山清, 普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 73-79.
- [19] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [20] 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等. 西北地区近 50 年日照时数和风速变化特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 825-835.
- [21] 张山清, 普宗朝, 李景林. 近 50 年新疆日照时数时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1481-1492.