

引用格式:曹永强,李维佳,赵博雅. 气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1):150-160. [Cao Y Q, Li W J, Zhao B Y. Water requirement of spring maize in Northwest Liaoning Province under climate change[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1):150-160.] DOI :10.18402/resci.2018.01.14

气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究

曹永强, 李维佳, 赵博雅

(辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029)

摘要:作物需水量是制定灌溉用水计划和水资源规划的重要依据,了解其历史变化和未来发展趋势对预测农作物用水走势并据此制定合理决策至关重要。本文基于辽西北地区9个气象站1964—2013年的气象及土壤资料,采用FAO推荐的Penman-Monteith模型与充分灌溉条件下的土壤水分密度函数法获得春玉米不同生育期需水量,并预测了未来气候变化对辽西北春玉米净灌溉需水量的影响。结果表明:1964—2013年近50年辽西北春玉米需水量基本呈现不显著下降趋势,空间分布规律为自东南向西北方向逐渐递增;净灌溉需水量多年平均值为402.44mm,灌溉需求指数多年平均值为0.67;从未来气候变化情境下的净灌溉需水量来看,国内或区域内资源(A_2)情景与区域可持续发展(B_2)情景在未来30a距平增长率依次降低。本文研究可为辽西北春玉米种植的农业用水以及合理灌溉提供依据,对缓解本地区日益突出的水资源供需矛盾具有十分重要的战略意义。

关键词:气候变化;春玉米;需水量;灌溉需水量;辽西北

DOI :10.18402/resci.2018.01.14

1 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告认为全球气候变暖已是不争的事实,将对全球和区域间的环境安全问题带来间接影响^[1]。气温升高和极端气象灾害将会直接影响作物的生长发育,进而影响干旱半干旱地区的作物耗水过程和作物的需水量^[2]。而降水量、热量与土壤是影响农作物需水量的主要因素,任何程度的气候变化都会对农作物的生产及其相关过程带来潜在或显著的影响^[3]。中国粮食生产受气候变化的影响较大,气温升高会导致作物物候变化,使农作物生长期缩短,从而造成作物减产^[4,5]。因此,在气候变化背景下开展粮食作物需水量空间格局分析,有利于推动中国农业和粮食生产影响研究的发展,对研究区域内作物的生产决策与保障粮食安全均具有借鉴和指导意义。

辽西北地处东亚季风区,是中国重要的春玉米

产区,目前辽宁省年均玉米耕种面积达200万 hm^2 ,辽西北地区占辽宁省玉米耕种面积的2/3,但由于辽西北地区水资源缺乏、旱灾频繁,导致其单产水平较低,仅为6000 kg/hm^2 ,远低于发达国家的单产水平^[6]。国外作物需水量的研究始于20世纪40年代后期,代表性人物如前苏联考斯加科夫、布德科、英国的彭曼(H.L.Penman)、美国的布兰尼,乃至詹森(M.E.Jensen)^[7]。近年来,中国学者对农作物的需水量问题也进行了大量研究,韩伟峰等对农作物需水量理论进行系统的总结并详细论述了其理论发展过程,提出当前运用分形、小波、信息熵等复杂性理论研究作物需水时空特征的不确定性、不均匀性的缺点^[8];高晓蓉等对近50年东北玉米生育阶段的水分供需及早涝变化进行了分析,结果表明东北玉米四个生育阶段的需水量没有明显变化,但空间差异较大^[9];南纪琴等运用计算不同水文年的方法,研究了站点春玉米年际、年内需水量变化与整个北方春玉米需水量空间分布特征的相关性^[10];黄志刚等以

收稿日期:2017-04-01;修订日期:2017-09-09

基金项目:国家自然科学基金(51779114,51579126)。

作者简介:曹永强,男,内蒙古丰镇人,教授,博士生导师,从事水文水资源方面研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

2018年1月

松嫩平原玉米为研究对象,运用作物系数估算的方法对干旱、半干旱区的需水规律进行了分析,预测出在2040年松嫩平原玉米将会增加12.6亿 m^3 的灌溉水量^[1]。

近年来,中国有关作物耗水与作物需水量分析的文献数量逐渐增多,但是对气候变化背景下,依据长时间序列的气象数据对春玉米需水量、灌溉需水量以及在未来气候变化情境下作物需水量分析的相关性研究较少。另一方面,由于已有的研究在计算农作物的净灌溉需水量时,大多采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的公式,该公式是以国外的气候和土壤条件为参考总结的,并不完全适用于辽西北地区。基于此,本文考虑到土壤的水分状况、含盐量和质地与春玉米叶片的蒸腾强度密切相关,从土壤因子入手,采用充分灌溉条件下的土壤水分密度函数建立净灌溉需水量与降雨和潜在蒸散量的定量关系,将净灌溉需水量与土壤水分因素相结合,并运用主成分分析法,对影响作物需水量的各个气象因素进行主成分分析,找到影响作物需水量的主要因素,从而获得春玉米不同生育期净灌溉需水量,并探究其时空变化特征及其影响因子,弥补了Penman-Monteith方法对作物需水量研究精度的不足,以期对辽西北地区作物的生产决策与粮食安全保障问题提出借鉴。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况与数据来源

辽西北地区位于 $39^{\circ}59'N-43^{\circ}29'N$ 、 $118^{\circ}50'E-124^{\circ}26'E$ 之间,占地面积6.37万 km^2 ,作物耕地面积0.95万 km^2 。辖区含朝阳、锦州、葫芦岛、阜新4个地级市及沈阳市的康平县、铁岭市昌图县和法库县,是内蒙古科尔沁草原的沙缘地带,属季风边缘带,暖温带大陆性半湿润、半干旱季风气候区^[12]。研究区内近50年(1964—2013年)平均气温 $3.1\sim 14.7^{\circ}\text{C}$,年均降水量440~560mm,降水量60%以上集中在夏季,且降雨年际间与年内差异性显著,地区分布不均,致使辽西北地区旱涝灾害频发,其中干旱是对辽西北地区的作物影响最直接、危害最大的气象灾害。

本文所用气象数据来源于辽西北地区9个气象站点的气象资料,气象站点分布见图1。气象数据来源于国家气象数据平台^[13](<http://data.cma.cn/>)提

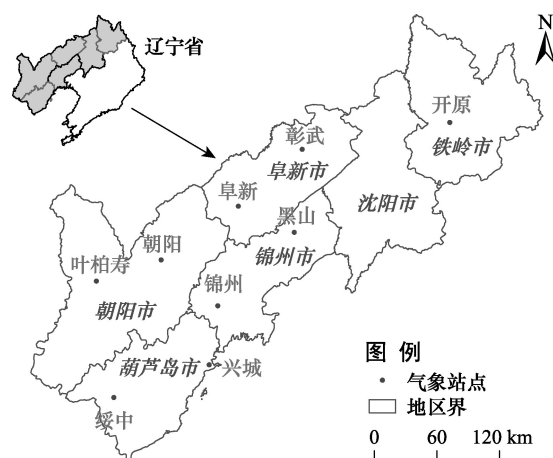


图1 辽西北地区气象站点分布

Figure 1 Distribution area of meteorological site of the Northwest Liaoning

供的逐日数据集,包括降雨、平均风速、平均气温、平均相对湿度、日照时数、日最高气温、日最低气温、平均气压、平均水汽压。构建未来气候变化情景中,未来2020年、2030年和2050年的气候变化数据,包括未来气温、降水等要素均来自于《气候变化国家评估报告》^[14]。土壤数据主要来源于中国土壤数据库^[15](<http://gis.soil.csdb.cn/>)9个气象站所对应地区的田间持水量、土壤水分、土壤孔隙度、根系深度。

2.2 计算方法

2.2.1 春玉米需水量的计算

作物需水量指作物在土壤水分和养分适宜、管理良好、生长正常、大面积高产条件下的棵间土面(或水面)蒸发量与植株蒸腾量之和,由于作物系数法比较接近实际值且应用范围广,因此本文采用作物系数法计算春玉米需水量 ET_c

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

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G)\gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)\mu_2} \quad (2)$$

式中 ET_c 为作物需水量(mm/d); k 为春玉米生长期作物系数; ET_0 为参考作物潜在蒸散量(mm/d); R_n 为冠层表面净辐射($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); G 为土壤热通量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); T 为平均温度($^{\circ}\text{C}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); r 为湿度计常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); u_2 为2 m处高的风速(m/s)。

2.2.2 作物系数 k_c 的确定

由春玉米的潜在蒸散量 ET_0 来计算春玉米实际需水量时,作物系数 k 是计算过程中的重要参数之一,本文依据已有的辽宁玉米作物系数研究^[16],在作物系数的实际计算中又充分考虑了土壤水分供给充足的情况,很大程度上提高了作物系数的精确性,弥补FAO推荐的作物系数不适用辽西北地区的不,得到辽西北春玉米作物系数研究结果,见表1。

根据9个气象站点在辽宁省的气候特点、地理位置与玉米种植区划等情况,结合相关文献对作物系数研究时分区,将9个气象站点分为辽宁西部与北部进行研究。

2.2.3 春玉米净灌溉需水量计算

净灌溉需水量反映的是作物在理想条件下达到高产所需要灌溉的水量,它是指作物生长过程中需依靠灌溉补充的水量。本文采用充分灌溉条件下的土壤水分密度函数建立净灌溉需水量与降雨和潜在蒸散发的定量关系,将净灌溉需水量与土壤水分因素结合起来,对净灌溉需水量的计算考虑了土壤与田间持水量对净灌溉需水量的影响,增加了

计算的精确度,从而获得春玉米不同生育期净灌溉需水量 V 计算公式如下^[17]

$$V = ET_0(s_{fc} - s^*)p(s^*)T \quad (3)$$

$$p(s) = \frac{C}{\eta \times \gamma - \lambda} \left[\frac{\lambda}{\eta} e^{-(\gamma - \lambda/\eta)(s - s^*)} - \gamma \right], s^* \leq s \leq s_{fc} \quad (4)$$

式中 V 为净灌溉需水量(mm); s_{fc} 为田间持水量,以饱和度表示; s^* 为作物开始产生水分胁迫的临界土壤水分(mm); s 为土壤水分(以饱和度表示)(mm); n 为土壤孔隙度; Z_r 为根系深度(mm); $p(s)$ 为充分灌溉条件下的土壤水分密度函数; α 为作物生育期降雨事件的平均降雨量(mm); λ 为降雨事件的到达率(d^{-1}); T 为作物生育期历时(d); $\gamma = n \times Z_r / \alpha$; $\eta = ET_0 / (n \times Z_r)$;降雨参数 α 和 λ 共同反映了降雨的特征, α 反映了降雨在雨量上的特征; λ 反映了降雨在时间上的分布特征。

2.2.4 主成分分析方法

首先根据作物需水量影响因素的特点,运用SPSS软件对其进行标准化处理,并对各个影响因素进行主成分分析,得到各个影响因素的特征值、主成分贡献率和累计贡献率(见表2)。当初始特征值

表1 辽西北地区春玉米生育期作物系数统计

Table 1 Liaoning northwest spring maize growth period crop coefficient statistics

时间/(月、旬)	辽宁西部	辽宁北部	时间/(月、旬)	辽宁西部	辽宁北部
4月中旬(播种期)	0.36	0.35	7月上旬(拔节期)	0.91	0.93
4月下旬(播种期)	0.46	0.44	7月中旬(拔节期)	1.17	1.14
5月上旬(苗期)	0.47	0.45	7月下旬(抽穗期)	1.21	1.16
5月中旬(苗期)	0.51	0.46	8月上旬(抽穗期)	1.02	1.08
5月下旬(苗期)	0.55	0.48	8月中旬(成熟期)	0.97	0.98
6月上旬(苗期)	0.58	0.51	8月下旬(成熟期)	0.95	0.93
6月中旬(苗期)	0.68	0.62	9月上旬(成熟期)	0.91	0.89
6月下旬(拔节期)	0.80	0.81	9月中旬(成熟期)	0.78	0.79

表2 成分矩阵

Table 2 Component matrix

指标项	成份						
	1	2	3	4	5	6	7
降水量	-0.221	0.774	0.488	-0.323	0.089	-0.040	-0.004
平均风速	-0.797	-0.367	0.187	0.257	0.357	0.042	0.008
平均气温	0.961	-0.151	0.181	0.075	0.073	0.069	-0.073
平均相对湿度	-0.123	0.832	0.115	0.509	-0.141	-0.008	-0.003
高程	-0.264	-0.368	0.234	0.314	0.497	-0.380	-0.241
日照时数	-0.385	-0.755	0.449	0.028	-0.279	0.030	0.006
日最高气温	0.890	-0.343	0.166	0.141	0.078	-0.191	0.022
日最低气温	0.968	0.146	0.127	0.010	0.041	0.144	0.059

2018年1月

的累计方差贡献率大于80%时,只需选取前3个主成分的信息量即可满足要求^[18]。如表2所示中的每一列都显示了各个变量与相关主成分的相关系数。以第一列为例,-0.221是“降雨”与第一个主成分的相关系数,这是它在第一个主成分上的载荷,以此类推得到7个主成分因子。

2.2.5 灌溉需求指数计算

考虑到土壤水和地下水对大气降水有较强的调蓄作用,将作物需水量和有效降雨的差值定义为作物的灌溉需水量 $IR(mm)$,它是指满足蒸散发、渗漏损失及其它需水要求的水量。将灌溉需水量 $IR(mm)$ 和需水量 $ETc(mm)$ 的比值定义为灌溉需求指数 IDI 。本文引入灌溉需求指数,以反映作物生长对灌溉的依赖程度,也在一定程度上反映作物生长的旱涝情况,灌溉需求指数的数值随着作物对灌溉的依赖程度呈正相关分布^[19]。

$$IDI = IR/ETc \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 春玉米需水规律分析

3.1.1 需水量时间变化特征

根据公式(2)采用FAO推荐的Penman-Monteith方法结合日平均气温、日最高气温、日最低气温、平均风速、日照时数及相对湿度等气象数据计算获得辽西北地区近50年(1964—2013年)9个气象站点需水量,如图2所示。

从图2需水量变化趋势来看,近50年春玉米全生育期作物需水量的变化趋势基本呈现增减交替

变化,变化率为 $-7.2mm/10a$,整体呈不显著下降趋势,变化幅度在454~579mm之间,其中最小值454mm出现在1998年,该年份整体降水量较少,因此需水量量相对较少,最大值579mm出现在1972年,该年9月份曾出现雨量多、强度大的连续阴雨天气过程,因此该年作物潜在蒸散量相对较大。此后潜在蒸散量虽呈增减交替变化,但整体呈下降趋势,需水量的时间变化主要反应了气象因素对其的影响,其变化趋势完全是气候自然波动影响的结果。

3.1.2 需水量空间变化特征

1964—2013年春玉米全生育期的需水量的空间分布如图3,总体来看,辽西北地区春玉米生育期需水量存在明显的地区之间的差别,空间分布整体呈现自东南向西北逐渐递增的规律;从年际变化来看,辽西北春玉米生育期需水量的空间分布大致呈现逐年减少的趋势。

20世纪60—70年代作物生育期需水量平均值在近50年中最大,其需水量变化在484.88~602.57mm,年平均为537.76mm,其中,需水量在60年代末期为低值期,波动较为明显,总体呈现西部>北部>中部>东部>南部的规律分布;20世纪80—90年代作物生育期需水量平均值在近50年中最小,需水量变化在445.40~551.74mm,年平均为494.91mm,其中,黑山地区需水量的年平均值较20世纪60—70年代相比减少了10.16%,波动也最为明显。需水量大小与所在纬度地区的降水量、蒸发量与平均气温有直接关系,辽西北地处中高纬,空气湿度较大,降

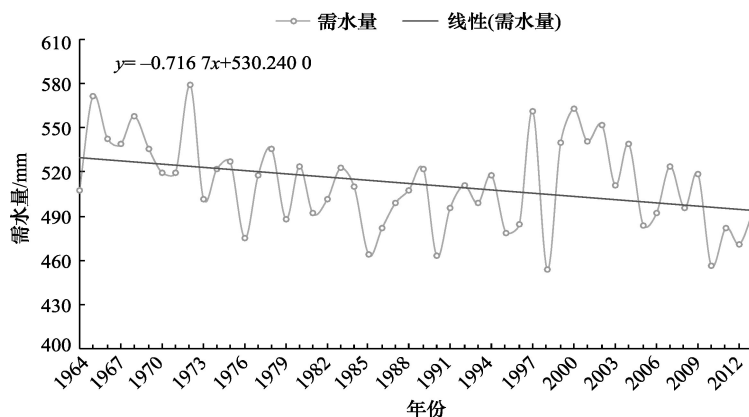


图2 1964—2013年作物需水量变化趋势

Figure 2 Water requirement of crops from 1964 to 2013

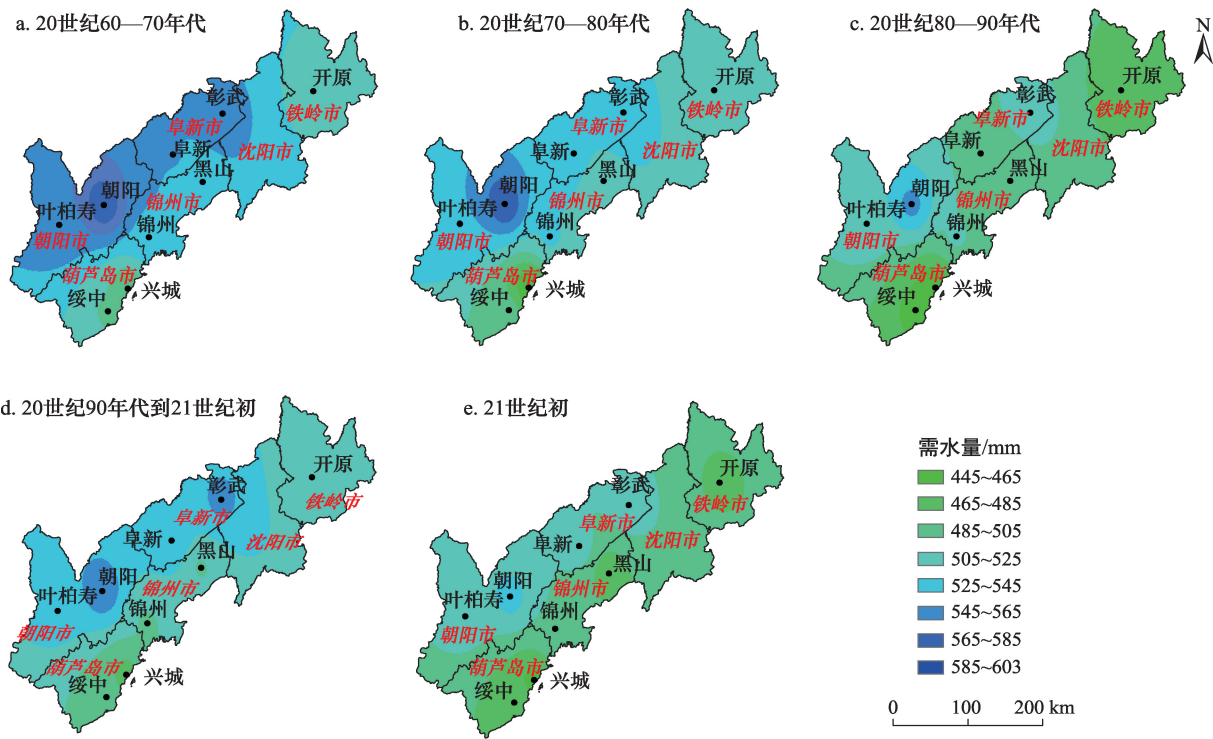


图3 需水量空间变化趋势

Figure 3 Spatial variation trend of water requirement

水量偏多,因此需水量呈逐渐减少趋势,从需水量逐渐减少的百分比也能很好的反映气候变化这一现象,但由于不同地区同一种作物对气候变化的响应存在差异,因此需水量的变化程度也各不相同,这与孙世坤等^[20]的研究结果相吻合。

3.1.3 主要气候因素与玉米需水量关系

运用 SPSS 统计分析软件进行对降雨、平均风速、平均气温、平均相对湿度、日照时数、高程、日最高气温、日最低气温八个影响因素进行主成分分析,为了使影响需水量变化的各项因子无量纲化和各指标趋同化,首先将数据进行标准化处理,然后进行主成分分析,得到主成分的特征值、贡献率和累计贡献率。

根据表3,第一、二、三主成分分别为日最低气温、降雨量和平均风速,特征值分别为3.50、2.15、0.56,方差贡献率分别为49.99%、30.83%、8.06%,其累计方差率达到了88.89%,说明日最低气温、平均相对湿度和降雨包含7个因子的所有信息。其中,第一主成分—日最低气温是最重要的,包含的因子信息最多,同时对需水量的影响最大;其次是降水

表3 特征值和主成分贡献率及累计贡献率

Table 3 Eigenvalue and principal component contribution rate and cumulative contribution rate

主成分因子	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.500	49.999	49.999
2	2.158	30.829	80.828
3	0.564	8.062	88.891
4	0.455	6.505	95.395
5	0.167	2.314	97.594
6	0.079	1.206	98.916
7	0.066	0.950	99.866
8	0.009	0.134	100.000

量和平均风速。总的来说,生育期内空气相对湿度大、海拔高、气温高、平均风速大、日照时数长、积温多等均会导致地面蒸发和叶面蒸腾作用增强,使春玉米的总需水量增多,反之亦然。

3.2 春玉米净灌溉需水量分析

3.2.1 不同生育期净灌溉需水量和灌溉需求指数

根据公式(4)和灌溉需水与需水量的比值得出辽西北地区各站点春玉米生育期净灌溉需水量和灌溉需求指数的多年平均统计结果见表4、表5。春玉米生育期净灌溉需水量多年平均为372.95~

2018年1月

表4 春玉米生育期净灌溉需水量多年平均统计结果

Table 4 Annual average statistical results of irrigation water requirement of spring maize growth period

(mm)

气象站	播种期(4月中旬— 4月下旬)	苗期(5月上旬— 6月中旬)	拔节期(6月下旬— 7月中旬)	抽穗期(7月下旬— 8月上旬)	成熟期(8月中旬— 9月中旬)	全生育期
彰武	28.20	113.64	102.92	74.32	76.70	395.78
阜新	27.92	110.88	101.96	74.26	97.02	412.04
开原	26.56	103.94	92.82	63.78	85.85	372.95
朝阳	34.62	131.76	103.84	73.56	109.54	453.32
叶柏寿	30.58	116.12	99.20	68.54	107.04	421.48
黑山	29.20	118.70	91.92	60.94	102.96	403.72
锦州	31.30	120.84	95.36	65.50	103.84	416.84
绥中	27.96	109.58	86.56	60.16	100.25	384.51
兴城	26.02	100.24	80.52	56.66	97.90	361.34

表5 春玉米生育期灌溉需求指数多年平均统计结果

Table 5 Annual average statistical results of irrigation demand index of spring maize

气象站	播种期 (4月中旬—4月下旬)	苗期 (5月上旬—6月中旬)	拔节期 (6月下旬—7月中旬)	抽穗期 (7月下旬—8月上旬)	成熟期 (8月中旬—9月中旬)	全生育期
彰武	0.89	0.85	0.80	0.53	0.60	0.73
阜新	0.89	0.85	0.80	0.52	0.79	0.77
开原	0.86	0.82	0.76	0.52	0.76	0.75
朝阳	0.90	0.86	0.78	0.55	0.83	0.78
叶柏寿	0.90	0.84	0.78	0.53	0.82	0.77
黑山	0.89	0.87	0.80	0.53	0.83	0.78
锦州	0.90	0.86	0.80	0.54	0.79	0.78
绥中	0.89	0.86	0.80	0.54	0.81	0.78
兴城	0.90	0.86	0.80	0.55	0.55	0.73

453.32mm,研究区平均402.44mm,研究区灌溉需求指数平均值为0.76。苗期(5月上旬—6月中旬)的净灌溉需水量最大(研究区域平均为113.96mm),占多年平均生育期净灌溉需水量的28.31%;其次是拔节期(6月下旬—7月中旬)和成熟期(8月中旬—9月中旬),多年平均净灌溉需水量分别为95.01mm和97.90mm,分别占多年平均生育期净灌溉需水量的23.6%和24.32%,灌溉需求指数多年平均值分别为0.79和0.75;播种期(4月中旬—4月下旬)多年平均净灌溉需水量最少,研究区平均29.15mm,合计占生育期净灌溉需水量7.2%,研究区内平均值为0.89,由于播种期为4月中旬—4月下旬,此时降水量较少而蒸发量大,与其他生长期相比,播种期的春玉米灌溉需求指数最大,作物对灌溉的依赖程度也大。

3.2.2 净灌溉需水量与潜在蒸散量和降水量的空间变化趋势

由图4a可知,辽宁省春玉米全生育期50年平均

净灌溉需水量(V)在373.31(兴城站)~468.97(朝阳站)mm,区域平均灌溉需水量422.44mm,净灌溉需水量高于400mm的气象站点占77.7%,主要分布在锦州、彰武、黑山、阜新、朝阳、叶柏寿地区。由图4b可知,辽西北地区各站点春玉米全生育期50年作物潜在蒸散量(ET_0)变化范围在578.57(兴城站)~755.64(朝阳站)mm之间,全省50年平均作物蒸散量为680.77mm。降水量与作物蒸散量呈负相关,其分布特征(图4c)呈现东南高、西北低的特征,变化范围在412.95(叶柏寿站)~559.23(绥中站)mm之间,全省50年平均降水量为486.05mm。

总得来说,在空间分布上春玉米全生育期净灌溉需水量总体表现出由东南向西北方向逐步递增的趋势,并且与全生育期作物潜在蒸散量的分布特征相同,与全生育期降水量分布特征相反,即作物潜在蒸散量偏少的地区,灌溉需水量也偏少;结合土壤因素来看,降雨量的增加会导致土壤蓄水增

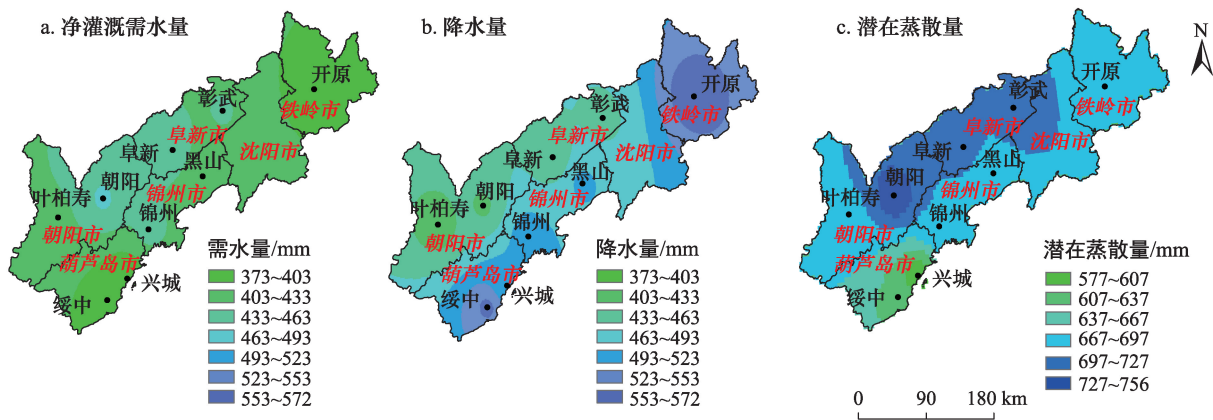


图4 净灌溉需水量与作物潜在蒸散量和降水量空间变化趋势

Figure 4 Spatial variation trend of crop potential evapotranspiration,irrigation water demand and precipitation

多,土壤水分含量大,容易增加耗水量,因此应注意在耕种时期避免土壤发生龟裂失水。而降雨量与作物潜在蒸散量呈负相关,降雨量造成春玉米全生育期作物蒸散量在空间分布上呈由东南方向西北方向逐渐递增的趋势,即降雨量偏多的地区,作物潜在蒸散量偏少,反之亦然。

3.3 未来气候变化情境下净灌溉需水量分析

气候变化国家评估报告^[14]对GG、GS、A₂、B₂四种情景下21世纪的气温进行了预测,本文选取国内或区域资源情景(A₂)和区域可持续发展情景(B₂)情景来分析研究区域在2020年、2030年和2050年的净灌溉需水量,气候变化及情景(见表6)均来自文献《气候变化国家评估报告》。具体解释如下:

A₂:国内或区域内资源情景。这是一个低经济增长情景。经济发展主要依赖于国内或区域资源,人口持续增长,区域化的资源利用导致能源供应依赖于能源的分布。

B₂:区域可持续发展情景。强调区域的发展,在该情景下,世界体现出区域化倾向,同时环境问题又得到很好认识,在各区域内实现可持续发展道路,人口增长处于中间水平。

表6 辽西北地区未来气候变化情景

Table 6 Climate change scenario in future in the Northwest Liaoning

	A ₂ 情景		B ₂ 情景	
	温度/℃	降水/%	温度/℃	降水/%
2020年	+1.7	+2.5	+1.2	+4.0
2030年	+2.1	+2.8	+1.5	+5.2
2050年	+2.8	+6.0	+2.2	+7.0

根据对未来气候情景进行预测^[21],并依据上文的主成分分析得到温度和降水是影响作物需水量的两个重要因素,因此选取这两个因素来分析辽西北地区2020年、2030年、2050年未来3个典型年份不同气候情景下(A₂和B₂)的春玉米净灌溉需水量的空间插值分布特征(通过GIS反距离权重法实现),并以2013年作为基准年与未来气候变化下的净灌溉需水量进行比较,可以看出两种气候情景下净灌溉需水量分布规律相似,净灌溉需水量的变化在整个辽西北地区上表现出明显的空间异质性。总得来说,相比近50年辽西北地区净灌溉需水量的多年平均值,除了局部地区净灌溉需水量将减少外,整个研究区域在未来气候情景下(A₂和B₂)两个时期主要呈现增加的特征。

A₂情景下,净灌溉需水量呈减少的区域在2020年主要位于绥中部分地区(图5a),这可能是由于绥中位于沿海地带,受东南沿海相对湿度和风速变化影响,从而削弱了升高的温度对净灌溉需水量的依赖程度,除此之外的其他地区均呈现增加的特征,距平百分率变化范围在-1.25%~16.34%之间,平均增加6.92%;到2030a辽西北地区,除绥中部分地区净灌溉需水量减少以外,其他地区均呈现增加的特征(图5b),距平百分率变化范围在-1.30%~16.28%,平均增加6.87%;2050年与2030年相比,净灌溉需水量减少,但相比近50年辽西北地区净灌溉需水量的多年平均值来说是增加的,除此之外其他特征与2030年特征相似,距平百分率变化范围在-1.56%

2018年1月

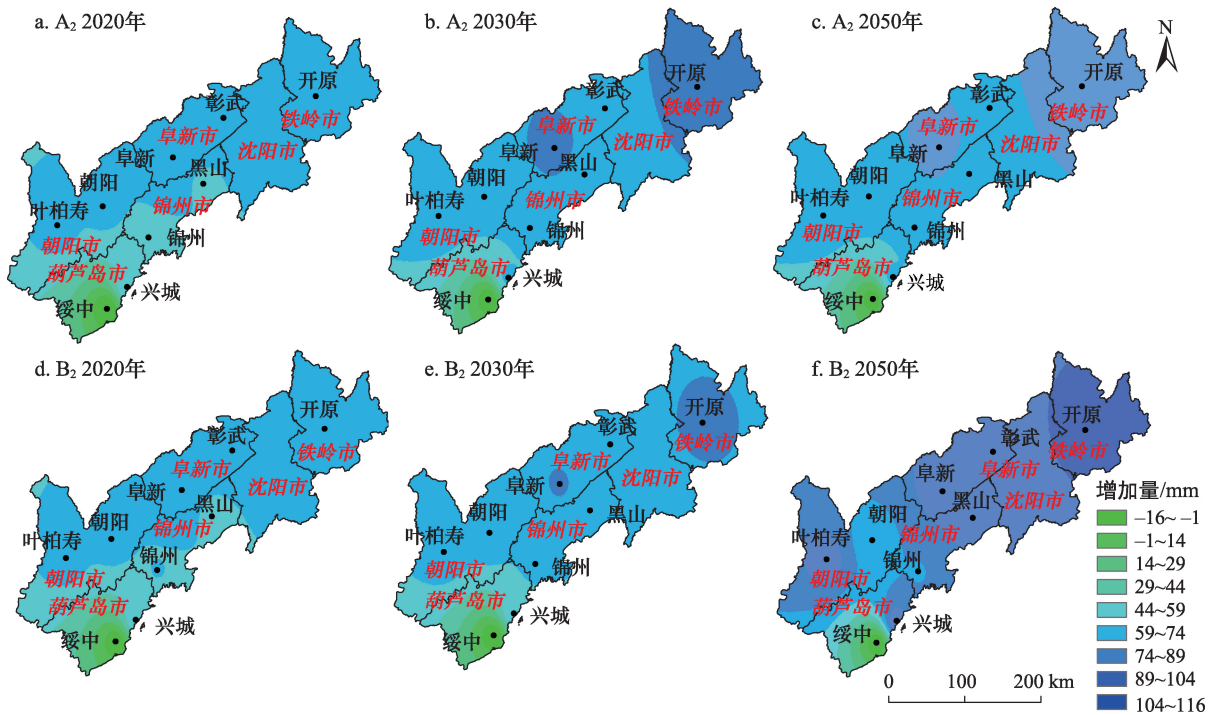


图5 未来气候变化情境下净灌溉需水量增减趋势空间分布

Figure 5 Spatial and temporal distribution of net irrigation water demand under future climate change scenarios

~16.12%,平均增加6.63%。

B₂情境下,总体来说2020年、2030年和2050年的净灌溉需水量小于A₂情景,减少的地区主要位于锦州和黑山地区。随着时间的推移,净灌溉需水量是逐渐减少的,并且减少量呈逐渐上升趋势,但相比近50年辽西北地区净灌溉需水量的多年平均值来说是增加的。2020年辽西北地区的净灌溉需水量距平百分率的变化范围在-1.27%~16.37%,平均增加6.91%(图5d);到2030年辽西北地区的净灌溉需水量距平百分率的变化范围在-1.40%~16.31%,平均增加6.82%(图5e);到2050年辽西北地区的净灌溉需水量距平百分率的变化范围在-1.59%~16.17%,平均增加6.62%(图5f)。

总的来说,随着未来气候逐渐变暖、降水增加,辽西北春玉米净灌溉需水量与近50年的多年平均值有逐渐增大的趋势。从空间分布来看,无论是哪个气候情境下,未来三个时期典型辽西北春玉米净灌溉需水量的距平百分率大多表现为不同程度的增加(辽宁省的绥中县除外),而且,不论哪种气候情景下,春玉米净灌溉需水量距平百分率整体分布规律大同小异。因此,气候变化主要是通过温度和

降水的改变进一步影响春玉米对净灌溉需水量的依赖程度,而这种气候变化中是否隐含着城市热岛效应的影响,值得进一步探讨。

4 结论

(1)从作物需水量时间变化特征来看,近50年辽西北春玉米全生育期的需水量变化整体呈不显著下降趋势,变化幅度在454~579mm之间;在空间上,呈现自东南向西北逐渐递增的规律。研究结果表明,辽西北地区需水量时空变化特征能很好的反映气候变暖这一现象,由于不同地区、不同时段同一种作物对气候变化的相应存在差异,因此需水量的变化程度也各不相同。

(2)从净灌溉需水量和灌溉需求指数来看,辽西北地区各站点春玉米生育期净灌溉需水量多年平均在372.95~453.32mm之间,研究区内平均值402.44mm,各站点灌溉需求指数平均值在0.73~0.78之间,研究区内平均值为0.76。其结果表明,在一定程度灌溉需求指数反映作物生长的旱涝情况,并且灌溉需求指数的数值随着作物对灌溉的依赖程度呈正相关分布,这与郑东方等^[19]的研究结果相吻合。

(3)从净灌溉需水量与作物潜在蒸散量和降水量的空间变化趋势来看,在空间分布上辽西北地区春玉米全生育期净灌溉需水量总体表现出由东北向西南方向逐步递增的趋势,并且与全生育期作物潜在蒸散量的分布特征相同,与全生育期降水量分布特征相反。

(4)从未来气候变化情境下净灌溉需水量来看响应,无论是A₂情景还是B₂情景,净灌溉需水量的多年平均值有逐渐增大的趋势;从空间分布来看,未来三个时期辽西北春玉米净灌溉需水量的距平百分率大多表现为不同程度的增加(辽宁省的绥中县除外)。其结果表明,未来辽西北地区水资源可能更趋近于短缺的状况,但不一定像预测的那样严重,因为经本文研究分析,在气候自然波动的情况下作物净灌溉需水量存在具有下降趋势的地区(辽宁省的绥中县),这意味着气候变化对水资源的影响可能是有限的,中国水资源短缺的严峻形势可能更多来自人口压力与人类活动的影响,应制订出合理的科学灌溉和合理利用水资源制度,为农作物的生产提供参考。

参考文献(References):

- [1] 张晓华, 高云, 祁悦, 等. IPCC第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 14-19. [Zhang X H, Gao Y, Qi Y, et al. Analysis of the influence of the main conclusions of the first working group of the fifth assessment report on the progress of the United Nations Framework Convention on climate change (IPCC) [J]. *Advances in climate change research*, 2014, 10(1): 14-19.]
- [2] 张艺萌, 张雪松, 郭婷婷, 等. 辽西北地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 203-211. [Zhang Y M, Zhang X S, Guo T T, et al. Characteristics of temperature and precipitation change and the influence on climate productive potential in the northwestern Liaoning [J]. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2015, 36(2): 203-211.]
- [3] 覃志豪, 唐华俊, 李文娟, 等. 气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(5): 1-7. [Qin Z H, Tang J H, Li W J, et al. Progress and directions in studying the impacts of climate change on agriculture and grain production in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(5): 1-7.]
- [4] Tao F, Yokozawa M, Liu J. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends[J]. *Climate Research*, 2008, 38(1): 83-94.
- [5] Chen S Y, Shi Y Y, Guo Y Z, et al. Temporal and spatial variation of annual mean air temperature in arid and semiarid region in northwest China over a recent 46 year period[J]. *Journal of Arid land*, 2010, 2(2): 87-97.
- [6] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西地区不同种植模式对春玉米产量形成及其生长发育特性的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 181-189. [Bai W, Sun Z X, Zheng J M, et al. Effect of different planting patterns on maize growth and yield in Western Liaoning Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 181-189.]
- [7] 李新红. 全国农业灌溉需水量及区域特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. [Li X H. Agricultural Irrigation Water Requirement and Its Regional Characteristic in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.]
- [8] 韩伟锋, 武继承, 何方. 作物需水量研究综述[J]. 华北水利水电学院学报, 2008, 29(5): 30-33. [Han W F, Wu J C, He F. Summarization on researches on the crop water requirement[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2008, 29(5): 30-33.]
- [9] 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.]
- [10] 南纪琴, 肖俊夫, 刘战东, 等. 不同水文年型北方春玉米需水量时空变化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 45-49. [Nan J Q, Xiao J F, Liu Z D, et al. Temporal and spatial variations of water requirements of spring maize under different hydrological year in the North of China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(Z1): 45-49.]
- [11] 黄志刚, 肖焯, 张国, 等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 1-15. [Huang Z G, Xiao Y, Zhang G, et al. Estimation and prediction of maize irrigation water requirement based on climate change in Songnen Plain, NE China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 1-15.]
- [12] 曹永强, 刘佳佳, 高璐. 近54年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1027-1032. [Cao Y Q, Liu J J, Gao L. Relationship between sunspots and precipitation in northwestern Liaoning in recent 54 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8): 1027-1032.]
- [13] 中国气象局气象数据中心. 中国气象数据网[EB/OL]. (2014-01-01) [2017-04-01]. <http://data.cma.cn/>.[Meteorological Data

2018年1月

- Center of the China Meteorological Administration. China Meteorological Data Network[EB/OL]. (2014-01-01)[2017-04-01]. <http://data.cma.cn/>.]
- [14] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 3 (S1): 3-8. [Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, *et al.* National assessment report of climate change (I): climate change in China and its future trend[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 3 (S1): 3-8.]
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据网[EB/OL]. (2014-10-01)[2017-04-01]. <http://gis.soil.csdb.cn/>. [Nanjing Institute of Soil Research, Chinese Academy of Sciences. China Soil Data Network [EB/OL]. (2014-10-01)[2017-04-01]. <http://gis.soil.csdb.cn/>.]
- [16] 靳春香. 近50年辽宁省玉米全生育期有效降水与需水量变化特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015. [Ji C X. Variation Characteristics of Maize Effective Precipitation and Water Requirement in Liaoning during 1960-2014[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.]
- [17] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 等. 气候变化对河南省冬小麦和夏玉米灌溉需水量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 10-13. [Huang Z D, Qi X B, Fan X Y, *et al.* The effects of climate change on irrigation requirements of winter wheat and summer maize in Henan Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34 (4): 10-13.]
- [18] 王沙沙, 艾萍. 基于SPSS的主成分分析法的水利信息化评估[J]. 信息技术, 2014, (3): 9-12. [Wang S S, Ai P. Water information assessment of principal component analysis based on SPSS[J]. *Information Technology*, 2014, (3): 9-12.]
- [19] 郑东方, 许嘉阳, 卢秀萍, 等. 云南省烤烟需水量及灌溉需求指数的时空特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2091-2098. [Zheng D F, Xu J Y, Lu X P, *et al.* Spatial and temporal characteristics of flue-cured tobacco water requirement and irrigation requirement index in Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 2091-2098.]
- [20] 孙世坤, 蔡焕杰, 王健. 石羊河流域春小麦灌溉需水量时空分布研究[J]. 节水灌溉, 2010, (5): 22-27. [Sun S K, Cai H J, Wang J. The study of temporal and spatial distribution of spring wheat irrigation water requirement in Shiyang River Basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010, (5): 22-27.]
- [21] 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. [Zhang J P, Wang C Y, Yang X G, *et al.* Impact forecast of future climate change on maize water requirement in three provinces of Northeast China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 50-55.]

Water requirements of spring maize in Northwest Liaoning Province under climate change

CAO Yongqiang, LI Weijia, ZHAO Boya

(School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Crop water requirement is important to irrigation requirement planning and water resources planning. Understanding historical changes and future trends is critical to predicting future crop water use trends and making rational decisions. Using the Penman-Monteith model recommended by the FAO, the water requirement of spring maize across the whole plantation in northwestern Liaoning was calculated. The net water requirement of spring maize at different growth stages was obtained by soil moisture density function under full irrigation conditions. We found that potential evapotranspiration and spatial and temporal variation in water demand indicates that spring maize increased and decreased over the last 50 years. In the past 50 years, the water demand of spring maize in northwestern Liaoning has not decreased over time. The spatial distribution has gradually increased from southeast to northwest. From net irrigation water demand, the average annual net irrigation water requirement of spring maize in northwestern Liaoning was 402.44 mm, and average annual irrigation requirement index was 0.67. From the perspective of net irrigation water demand under future climate change scenarios, domestic or regional resources (A_2) scenarios and regional sustainable development (B_2) scenarios, the 30a growth rate decreased in turn. This study provides a basis for agricultural water use and reasonable irrigation of spring maize planting in the northern Liaoning. It is of great strategic significance to the increasingly prominent contradiction between supply and demand of water in this region.

Key words: climate change; spring maize; water requirement; irrigation water requirement; Northwest Liaoning