

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.032

1960—2015年黑龙江省水稻需水量时空分布特征

聂堂哲^{1,2} 张忠学^{1,2} 齐智娟^{1,2} 陈鹏^{1,2} 林彦宇³ 孙仲益⁴

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 4. 北海道大学大学院农学院, 札幌 060-8589)

摘要: 基于黑龙江省26个气象站1960—2015年逐日气象数据和29个水稻灌溉试验站的作物系数, 利用Penman-Monteith方法和Arcmap空间分析功能计算并绘制了1960—1979年、1980—1999年和2000—2015年3个阶段水稻生长季参考作物蒸散量(ET_0)、水稻生育期天数、需水量、有效降雨量和需水量与有效降雨量耦合度及相应的气候倾向率分布图。结果表明: 水稻生长季 ET_0 平均值为620 mm, 自西向东总体表现为先减小后增大趋势, 风速、湿度、日照时数的减小和温度的升高共同作用导致水稻生长季 ET_0 以 $-3.90 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 的平均速度下降; 生育期平均天数为115 d, 自北向南总体表现为增加趋势, 温度升高引起了水稻生育期天数以 $2.68 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 的平均速度增加; 水稻生育期有效降雨量平均值为297.03 mm, 自西向东总体表现为先增大后减小的趋势, 生育期天数的增加也弥补了降雨量减小的影响, 使有效降雨量以 $0.62 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 的平均速度增加; 需水量平均值为490.52 mm, 自西向东总体表现为先减小后增加的趋势, 生育期天数的增加弥补了 ET_0 减小对需水量的影响, 使研究区内水稻需水量以 $6.66 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 的平均速度增加; 需水量与有效降雨量耦合度平均值为0.64, 自西向东表现为先增加后减小的趋势, 需水量增幅大于有效降雨量增幅, 使需水量与有效降雨量耦合度总体以 $-0.009/(10 \text{ a})$ 速度下降。本研究可为黑龙江省合理分配灌溉水资源和优化水稻品种布局提供依据。

关键词: 水稻; 黑龙江省; 需水量; 生育期; Penman-Monteith方法

中图分类号: S511; S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)05-0279-12

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Rice Water Requirement in Heilongjiang Province during 1960—2015

NIE Tangzhe^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} CHEN Peng^{1,2} LIN Yanyu³ SUN Zhongyi⁴

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Use of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150030, China

3. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

4. Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan)

Abstract: Distribution maps of ET_0 during rice growth season, day of growth period (DGP), crop water requirement (ET_c), effective precipitation (P_e), coupling degree of ET_c and P_e , and their climatic tendencies during 1970s, 1990s and 2010s were calculated and drawn by Penman-Monteith method and Arcmap spatial analysis based on daily meteorological data in 1960—2015 of 26 meteorological stations and crop coefficient of 29 rice irrigation experimental stations in Heilongjiang Province. The result showed that the average ET_0 during rice growth season was 620 mm, it was decreased firstly, and then increased from west to east, the decrease of wind speed, humidity, sunshine hours and the increase of temperature led to the decrease of ET_0 at a climatic tendency of $-3.90 \text{ mm}/(10 \text{ a})$. The average DGP was 115 d, and it showed an increase trend from north to south, the increase of temperature caused DGP to increase at a climatic tendency of $2.68 \text{ d}/(10 \text{ a})$. The average P_e in rice growth period was 297.03 mm, which was increased firstly and then decreased from west to east, the increase of DGP compensated for the decrease of rainfall, and the P_e was increased at an average climatic tendency of $0.62 \text{ mm}/(10 \text{ a})$. The average ET_c was 490.52 mm, which was decreased firstly and then increased from west to east, the

收稿日期: 2018-11-16 修回日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779046)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)

作者简介: 聂堂哲(1991—),男,博士生,主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: nietangzhe527@163.com

通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

increase of DGP compensated for the effect of ET_0 on ET_c , and the ET_c was increased at an average climatic tendency of 6.66 mm/(10 a). The average coupling degree of ET_c and P_e was 0.64, which was increased firstly and then decreased from west to east, the increase of ET_c was larger than that of P_e , which made the coupling degree of ET_c and P_e decrease at an average climatic tendency of $-0.009/(10 a)$. The research result provided a basis for rational allocation of irrigation water resources and rice variety layout in Heilongjiang Province.

Key words: rice; Heilongjiang Province; crop water requirement; growth period; Penman - Monteith method

0 引言

黑龙江省是中国最大的粳稻生产区,20世纪90年代以来水稻生产面积大幅增加,据统计,1990—2015年黑龙江省水稻种植面积增加了249%,达314.78万 hm^2 ,占东北地区的71%^[1-2]。黑龙江省位于我国最北部,是全国热量资源最少的省份,受积温和无霜期限制,只能栽培一季粳稻^[3-4]。作为气温升高幅度最明显的地区之一,气候变化导致黑龙江地区农业气候资源发生了显著变化^[5-6],气温和降雨的变化都会引起作物生长发育和需水量等产生相应变化^[7-11]。已有研究表明,东北三省的稻作系统已表现出对气候变化的适应性,种植界限呈北扩趋势,较晚熟型品种逐渐代替早熟品种,移栽日期提前,收获日期推迟^[7,12-13]。

水资源短缺是制约黑龙江省水稻发展的主要因素,2011年黑龙江省水稻灌溉用水量达260亿 m^3 ,占农业用水总量的96%,占全省用水总量的32%。虽然部分稻田可以利用过境水资源,但不断增大的水稻种植面积仍对黑龙江省水资源造成巨大压力^[3]。有报道指出水稻面积的快速增加已经成为控制三江平原地下水水位下降的主导因素,局部地区甚至出现了大的降落漏斗^[14-15]。研究气候变化下黑龙江省水稻需水量有利于缓解水资源压力和优化水资源分配。对于黑龙江省水稻需水量的研究,前人已进行了大量试验,并在此基础上针对寒地水稻的生长特点对黑龙江省水稻灌溉管理进行了分区研究^[3,16]。但对于过去黑龙江省寒区水稻需水量和有效降雨量的时空分布特征及其变化规律的研究较少,根据物候学规律计算水稻生育期内需水量与有效降雨量耦合度的研究更是鲜有报道。

以往研究中大多根据特定地区品种生长期内的积累温度来计算数据缺失年份作物的生育期^[17-20]或者根据农业气象站已有观测资料来确定生育期长度^[9,21-24],并未考虑气候变化下品种更新对生育期的影响。本研究充分利用黑龙江寒区的有限热量资源,以物候学中适宜水稻插秧和成熟的温度决定各年水稻移栽和成熟日期^[6,25-26],来模拟品种更新对

生育期的影响,使研究时段内水稻的生育期更接近实际生产情况。利用黑龙江省26个站点1960—2015年的逐日气象资料和29个水稻灌溉试验站作物系数资料,计算5—9月参考作物蒸腾蒸发量、水稻移栽日期、成熟日期和生育期天数,进而计算1960—1979年、1980—1999年和2000—2015年及整个研究时段内水稻生育期内需水量、有效降雨量、需水量和有效降雨量的耦合度及以上各参数的气候倾向率,并绘制相应的分布图,旨在为黑龙江省合理分配灌溉水资源和优化水稻品种布局提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况及数据来源

选取黑龙江省26个站点1960—2015年的逐日气象资料,包括:最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数、降雨量以及各站的经纬度信息。以上资料均来自于中国气象数据网。水稻作物系数(K_c)资料来源于《黑龙江省水田灌溉试验资料整编》中29个水稻灌溉试验站积累的492个试验年的需水量资料,根据各试验站多年各月平均水稻需水量,计算出各站各月平均 K_c 。图1为研究区域及气象站和水稻灌溉试验站的分布情况,根据黑龙江省农业委员会发布的《黑龙江省农作物品种积温区划图》^[27]和《黑龙江省2015年主要粮食作物优质高产品种区域布局规划》^[28],第六积温带不适合水

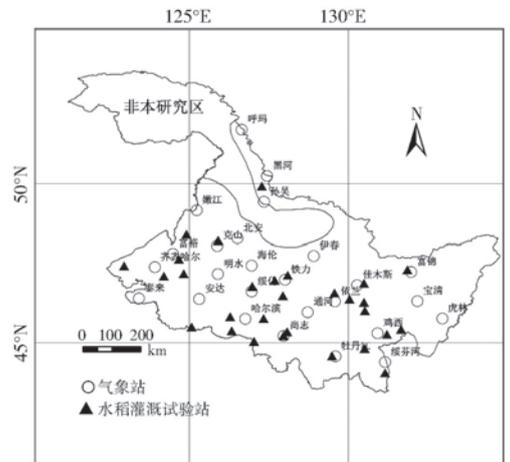


图1 研究区域及站点分布

Fig.1 Study area and distribution of stations

稻种植,故第六积温带非本文研究区域。

1.2 水稻生育期的确定

本研究中水稻生育期均指水稻从移栽到成熟这一时段。寒地水稻安全生育期天数为 95 ~ 125 d,为了使秧苗移栽后不受冻害,利用 5 点滑动平均找到平均温度稳定通过 13℃ 的初日作为水稻移栽的初始日期,在水稻结实期日平均温度降到 13℃ 时,光合产物基本停止运输,此时确定为水稻成熟日期^[6,25-26]。水稻生育期天数为成熟日期与插秧日期之差。为了比较计算水稻生育期天数变化以及有效降雨量和需水量的变化,将研究时段分为 3 段: 1960—1979 年、1980—1999 年、2000—2015 年。3 个时段的平均值分别代表 3 个时期的水稻生育期参数、有效降雨量和需水量等的平均水平。

1.3 有效降雨量

水稻生育期内的有效降雨量计算采用美国农业部土壤保持局(USDA)推荐的方法计算^[29],公式为

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & (P \leq 8.3 \text{ mm}) \\ 4.17 + 0.1P & (P > 8.3 \text{ mm}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 P_e ——有效降雨量,mm

P ——降雨量,mm

1.4 水稻需水量

水稻需水量采用 FAO 推荐的单作物系数法进行逐日计算^[30],水稻生育期内总需水量由逐日需水量累加得出,根据不同月份的作物系数可以计算得到水稻需水量,在计算各个气象站需水量时,选取临近的并与其在同一积温区内的水稻灌溉试验站作物系数作为计算依据,若一气象站附近存在多个水稻试验站,则取附近站作物系数平均值进行计算,需水量计算公式为

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

式中 ET_c ——作物需水量,mm

ET_0 ——参考作物蒸散量,mm

利用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 方法计算参考作物蒸散量(ET_0),其计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中 R_n ——作物表面净辐射量, MJ/(m²·d)

G ——土壤热通量密度, MJ/(m²·d)

T ——2 m 高处的日平均空气温度,℃

e_s ——饱和水汽压, kPa

u_2 ——生长中期 2 m 高度处日平均风速, m/s

e_a ——实际水汽压, kPa

Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线斜率, kPa/K

γ ——湿度计常数, kPa/K

1.5 气候倾向率

采用最小二乘法,将气象要素变化趋势用一次线性方程表示,即

$$\hat{Y}_i = at + b \quad (4)$$

式中 \hat{Y}_i ——气象要素的拟合值

t ——对应年份

a, b ——回归系数

10 a 称为气候倾向率,表示气象要素每 10 a 的变化速率。其正值表示对应气象要素呈增加趋势,负值表示呈减少趋势。

1.6 趋势检验

Mann - Kendall 趋势检验作为一种非参数统计检验方法,能够很好地揭示时间序列的变化趋势,对于非正态分布的气象数据,具有更加突出的适应性。其统计变量 Z 的正负表示数据变化趋势, Z 的绝对值在大于等于 1.64、2.32 和 2.56 时,分别表示通过可信度为 95%、99% 和 99.9% 的显著性检验^[31]。本文利用此方法对文中各参数的变化趋势进行检验。

1.7 需水量与有效降雨量的耦合度

需水量与有效降雨量的耦合度指作物生长期内有有效降雨量满足需水量的程度,计算公式为

$$\lambda = \begin{cases} 1 & (P_e \geq ET_c) \\ P_e/ET_c & (P_e < ET_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中 λ ——生育期内需水量与有效降雨量耦合度

1.8 数据处理

利用 CROPWAT 8.0 软件进行黑龙江省 26 个气象站逐日参考作物蒸腾蒸发量的计算,利用 Matlab 2004b 软件进行黑龙江省 26 个气象站水稻插秧日期、成熟日期、生育期天数、需水量、有效降雨量及其气候倾向率的计算,并进行 Mann - Kendall 趋势检验,利用 Arcmap 10.2 工具箱的空间分析功能对各参数进行空间插值并作图。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量变化

由于黑龙江省水稻生长季在 5—9 月,对 1960—2015 年的 5—9 月总参考作物蒸腾蒸发量(ET_0)进行分析,如图 2 所示,研究区内多年生长季 ET_0 在 514 ~ 741 mm 之间,平均值为 620 mm,自西向东总体表现为先减小后增大趋势,高值区主要分布在西部泰来、齐齐哈尔地区,低值区主要分布在中部伊春、孙吴等地。研究时段内生长季 ET_0 气候倾向率为 - 18.56 ~ 8.15 mm/(10 a) 之间,平均值为

-3.90 mm/(10 a), 总体呈下降趋势, 西部地区降幅较大。有22个站点的气候倾向率小于0, 其中安达、哈尔滨、明水、伊春的下陷趋势通过了 $\alpha = 0.001$ 显著性检验, 绥芬河和绥化的下陷趋势通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验, 虎林、克山、泰来的下陷趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。通过比较1960—1979年、1980—1999年和2000—2015年3个时期生长季

ET_0 发现, 1960—1999年阶段 ET_0 气候倾向率平均值为 -2.32 mm/(10 a), 研究区下降幅度较小, 65.38% 站点以 -8 ~ 0 mm/(10 a) 速度下降。1980—2015年阶段 ET_0 气候倾向率平均值为 -5.15 mm/(10 a), ET_0 降幅比上一阶段大, 且西部地区降幅较大, 而北部和东部少数地区则表现为增加趋势。

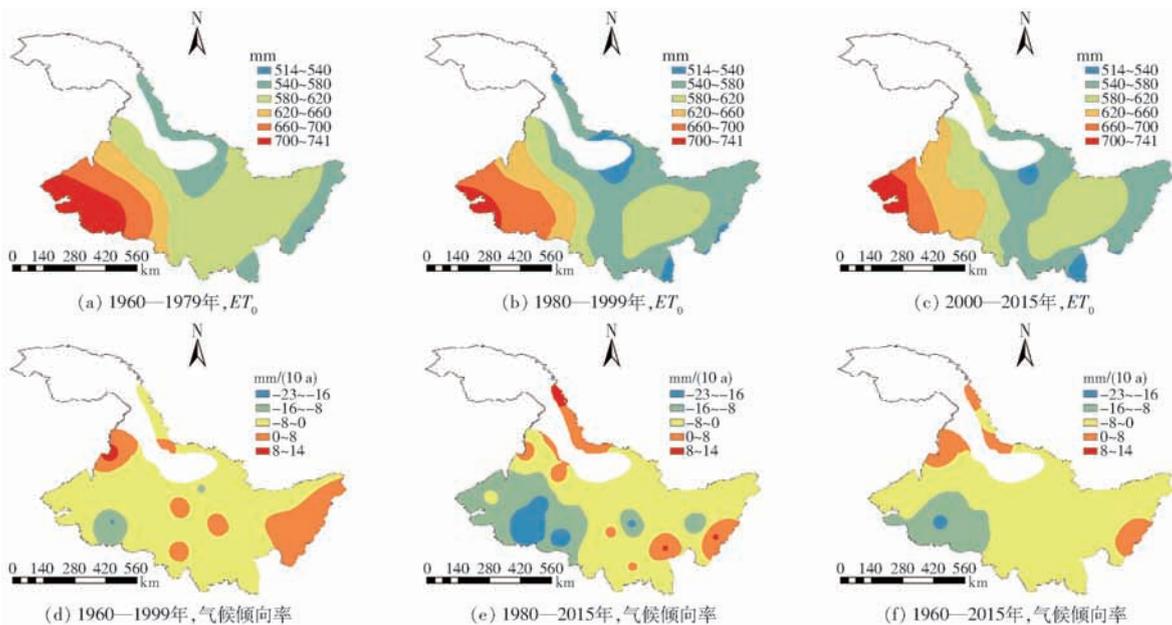


图2 1960—2015年 ET_0 及其气候倾向率的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of ET_0 and its climatic tendency during 1960—2015

2.2 生育期天数变化

1960—2015年研究区水稻移栽日期分布如图3所示。水稻多年移栽日期在5月8日—6月9日之间, 研究区平均移栽日期为5月21日。移栽日期总体表现为西部早于东部, 南部早于北部。移栽较早

地区主要分布在齐齐哈尔、泰来、哈尔滨一带, 移栽较晚地区主要分布在北部的黑河、孙吴、呼玛、嫩江和南部绥芬河地区。研究时段内所有站点水稻的移栽日期均呈提前的趋势, 其气候倾向率为 -4.03 ~ -0.68 d/(10 a), 平均值为 -1.73 d/(10 a), 其中分

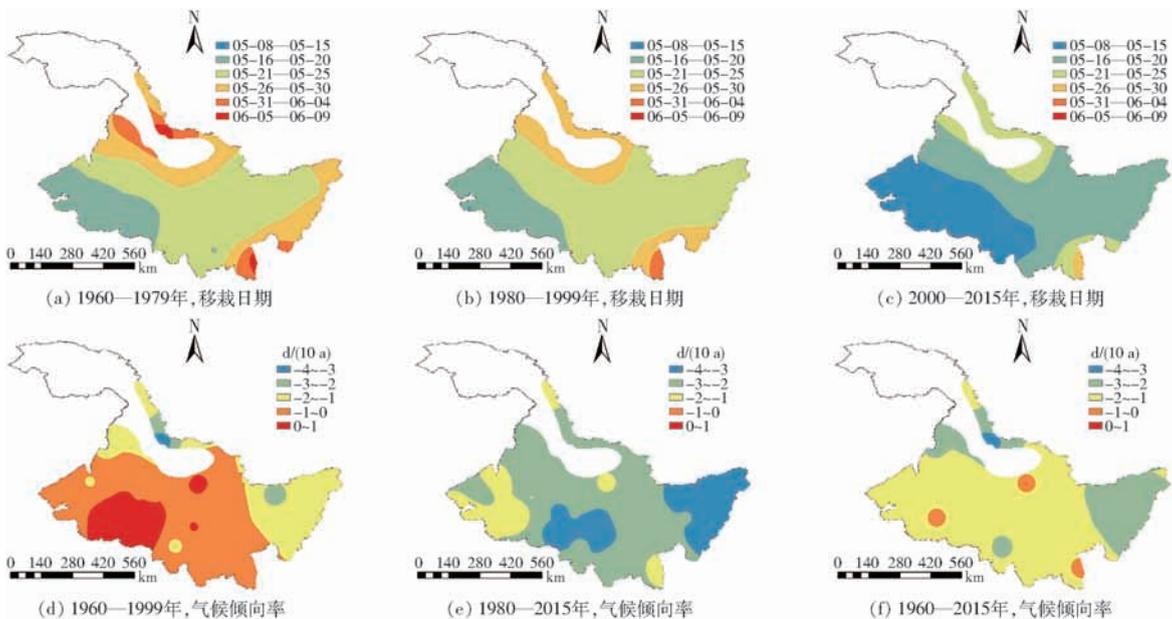


图3 1960—2015年水稻移栽日期及其气候倾向率的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of rice planting date and its climatic tendency during 1960—2015

别有 12、2、7 个气象站的移栽日期提前趋势通过了 $\alpha = 0.001$ 、 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.05$ 显著性检验。通过比较 1960—1979 年、1980—1999 年和 2000—2015 年 3 个时期的水稻移栽日期发现, 1980—1999 年比 1960—1979 年的移栽日期有略微提前的趋势, 平均气候倾向率为 $-0.71 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 只有黑河和孙吴两地有显著的提前趋势。而 1980—2015 年研究区平均气候倾向率为 $-2.48 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 移栽日期提前幅度比 1960—1999 年大, 全部 26 个气象站移栽日期的气候倾向率均小于 0, 其中有 16 个站点的移栽日期呈显著提前趋势, 中部和东部地区有较大提前幅度。

1960—2015 年研究区内水稻成熟日期分布如图 4 所示。研究区内水稻多年成熟日期在 8 月 30 日—9 月 22 日之间, 平均成熟日期为 9 月 13 日。成熟日期总体表现为南部早于北部。研究时段内,

所有气象站的水稻成熟日期均呈推迟趋势, 其气候倾向率为 $0.09 \sim 1.68 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 平均值为 $0.94 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 其中有 18 个气象站的成熟日期呈显著的推迟趋势, 东部和北部成熟期平均推迟 1 d, 而西部和南部地区平均推迟 2 d。比较 1960—1979 年、1980—1999 年和 2000—2015 年 3 个时期的水稻成熟日期发现, 1960—1999 年期间各站平均气候倾向率为 $0.47 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 只有绥芬河和孙吴两地的水稻成熟日期显著推迟, 而富锦、虎林和哈尔滨地区却呈略微的提前趋势。1980—2015 年期间的水稻成熟日期比 1960—1999 年推迟幅度大, 平均气候倾向率为 $1.15 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 有 23 个站点的成熟期气候倾向率大于 0, 其中有 7 个站点的推迟趋势显著, 绥化、哈尔滨、尚志和牡丹江地区的成熟日期推迟 2 d 以上。

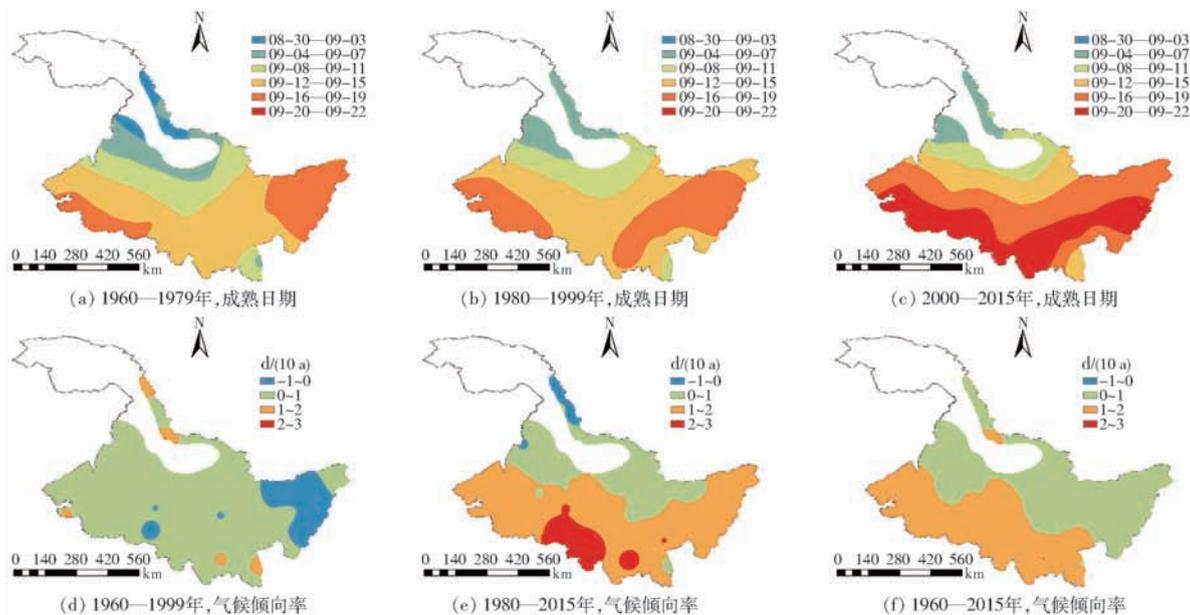


图 4 1960—2015 年水稻成熟日期及其气候倾向率的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of rice mature date and its climatic tendency during 1960—2015

1960—2015 年研究区水稻生育期天数分布如图 5 所示。研究区内水稻生育期天数在 84 ~ 137 d 之间, 全区多年平均值为 115 d, 自北向南总体表现为增加趋势, 其中齐齐哈尔、安达、泰来和哈尔滨的生育期天数较大, 而北部的呼玛、黑河和孙吴等地水稻生育期天数较小。研究区所有站点生育期天数均表现为增加趋势, 其气候倾向率 $1.30 \sim 5.30 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 平均值为 $2.68 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 除绥芬河和呼玛外, 其余各站点的生育期天数均显著增加, 其中孙吴增加最大, 气候倾向率为 $5.3 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。1960—1999 年期间研究区内水稻生育期天数增加较小, 平均气候倾向率为 $1.19 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 而 1970—2015 年期间, 水稻生育期天数以 $3.56 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 的平均速率快速增加, 其中研究区全部 26 个站点的生育期天数气

候倾向率均大于 0, 研究区内 69.23% 的气象站的生育期天数显著增加, 东部和中部地区的增加幅度较大。

2.3 需水量变化

1960—2015 年研究区水稻需水量分布如图 6 所示。水稻需水量在 244 ~ 740 mm 之间, 多年平均值为 490.52 mm, 自西向东总体表现先减小后增加的趋势。研究时段内, 各气象站水稻需水量气候倾向率范围为 $-11.05 \sim 23.30 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 平均值为 $6.66 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 有 23 个气象站的需水量呈增加趋势, 其中虎林、尚志、孙吴、铁力需水量的增加趋势通过了 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验, 嫩江需水量的增加趋势通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验, 宝清、北安、黑河、鸡西、牡丹江需水量的增加趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的

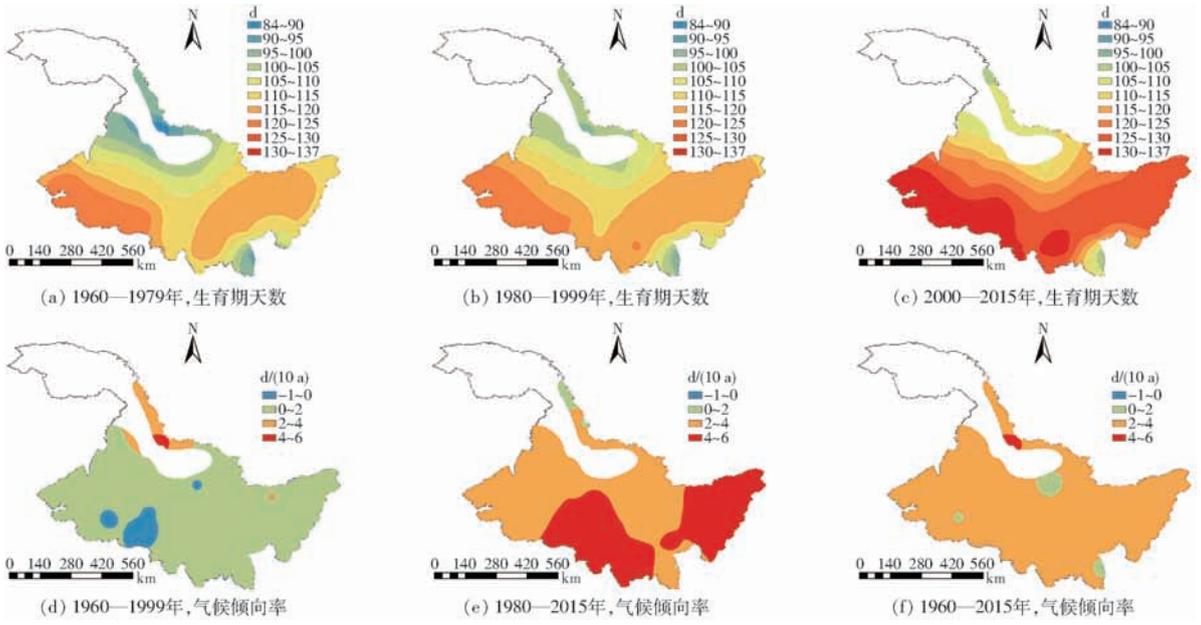


图5 1960—2015年水稻生育期天数及其气候倾向率的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of days of rice growth period and its climatic tendency during 1960—2015

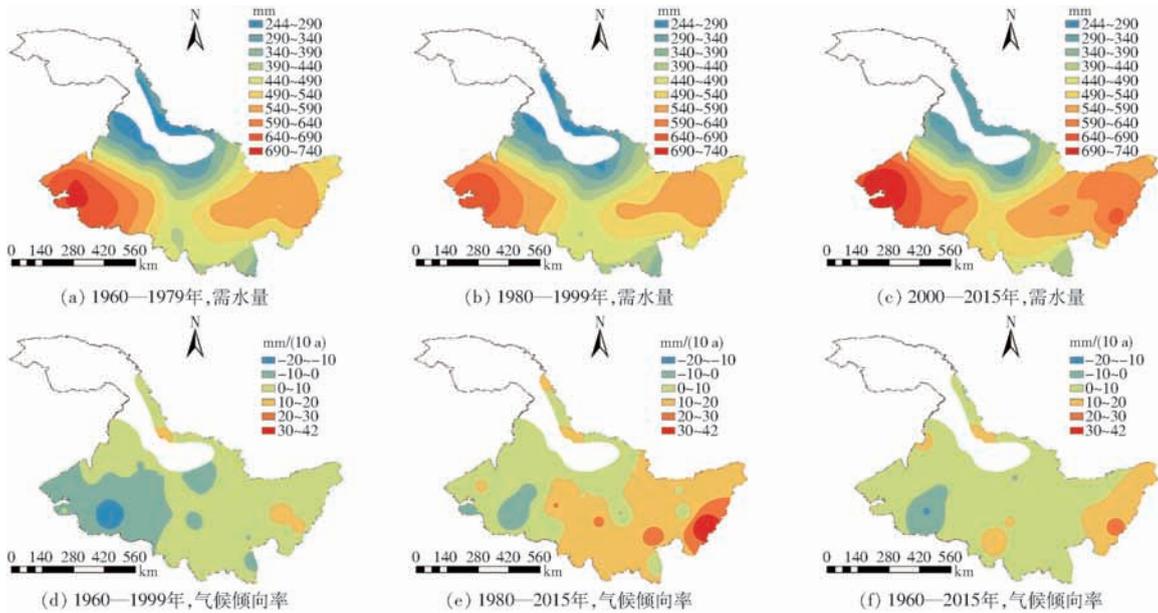


图6 1960—2015年水稻需水量及其气候倾向率的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of rice water requirement and its climatic tendency during 1960—2015

显著性检验,而安达的需水量却在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平上下降。

对 1960—1979 年、1980—1999 年和 2000—2015 年 3 个时期的需水量进行分析可知,从 1960 年到 1999 年,研究区水稻需水量变化不大,呈略微增加趋势,平均气候倾向率为 1.45 mm/(10 a),其中有 14 个站点的需水量呈增加趋势,而另外 12 个站点需水量呈减小趋势,需水量高值区的齐齐哈尔以 3.90 mm/(10 a) 的速度减小,而安达更是以 21 mm/(10 a) 的速度显著减小。从 1980 年到 2015 年,研究区需水量总体表现为较大的增加趋势,各站点平均气候倾向率为 10.19 mm/(10 a),有 23 个站

点的需水量表现为增加趋势,其中虎林和牡丹江需水量的增加趋势通过了 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验,鸡西、尚志和铁力需水量的增加趋势通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

2.4 有效降雨量变化

1960—2015 年研究区水稻生育期内有效降雨量的分布如图 7 所示。有效降雨量范围为 225 ~ 353 mm,平均值为 297.03 mm。有效降雨量自西向东总体表现为先增大后减小的趋势。高值区总体分布在伊春、铁力、尚志一带,其平均值大于 325 mm。低值区主要分布在呼玛、嫩江、富裕、齐齐哈尔和泰来一带,其平均值小于 275 mm。水稻生育期内有效

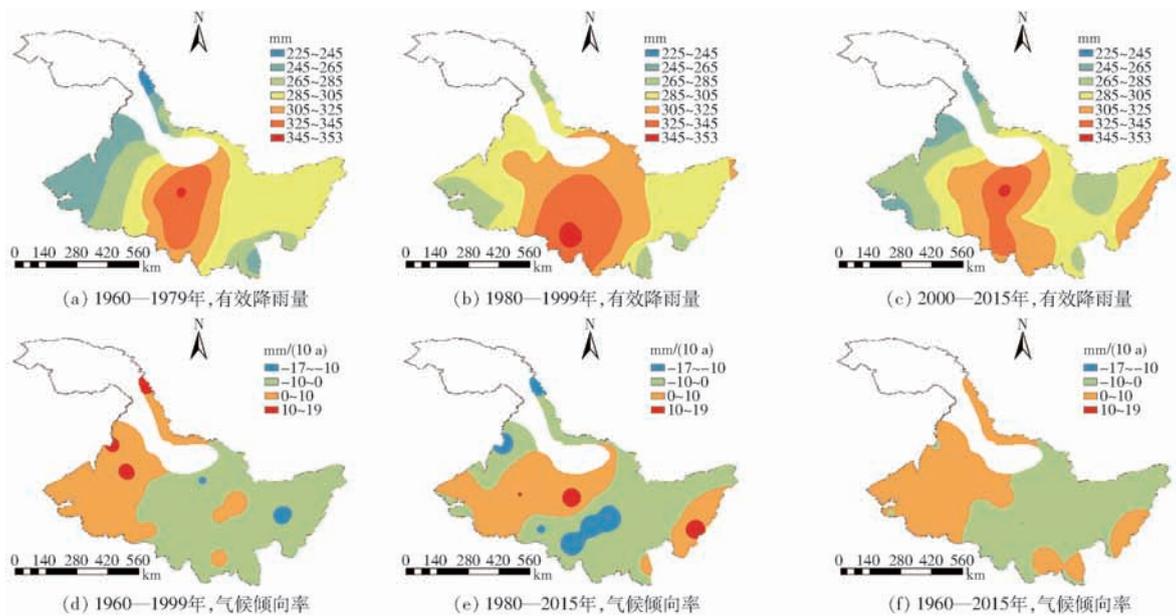


图7 1960—2015年水稻生育期内有效降雨量及其气候倾向率的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of effective rainfall and its climatic tendency during rice growth period in 1960—2015

降雨量气候倾向率为 $-7.70 \sim 8.54 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 平均值为 $0.62 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 总体表现为增加趋势, 其中虎林、绥芬河和孙吴、海伦、绥化、哈尔滨一线以西的14个站点呈增加趋势, 其中克山有效降雨量的气候倾向率最大, 为 $8.54 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 其他12个站点呈减小趋势, 佳木斯、依兰、通河和尚志一带减小幅度较大。但研究区内各气象站有效降雨量的增加和减小趋势均未通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。

对1960—1979年、1980—1999年和2000—2015年3个时期的水稻生育期内有效降雨量进行分析可知, 从1960到1999年, 有效降雨量呈微弱的增加趋势, 平均气候倾向率为 $0.58 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 其中西部和北部地区呈增加趋势, 克山和嫩江的有效降雨量增加趋势通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。从1980到2015年, 有效降雨量呈减小的趋势, 平均气候倾向率为 $-1.94 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 研究区内有17个站点的气候倾向率小于0, 呼玛和嫩江有效降雨量的减小趋势通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验, 而中部的铁力和东部的虎林有效降雨量却以较大的气候倾向率 (大于 $14 \text{ mm}/(10 \text{ a})$) 增加。通过比较两阶段及整个研究时段各站点有效降雨量发现, 1960—1999年期间有效降雨变化趋势与整个研究时段变化趋势大致相同, 呈西部和北部增加而其他地区减小的趋势, 而1999—2015年阶段内北部地区却表现出了较大的减小趋势。

2.5 需水量与有效降雨量耦合度

1960—2015年研究区水稻生育期内需水量与有效降雨量耦合度的分布如图8所示。其范围为 $0.37 \sim 0.98$, 平均值为 0.64 , 自西向东呈现为先增

加后减小的趋势。多年平均值大于 0.85 的高值区主要分布在北部的黑河、孙吴和伊春, 低于 0.5 的低值区主要分布在西部的安达、富锦、齐齐哈尔、泰来和富裕等地。生育期内需水量与有效降雨量耦合度的气候倾向率在 $-0.0331 \sim 0.0125/(10 \text{ a})$ 之间, 平均值为 $-0.009/(10 \text{ a})$, 总体表现为减小的趋势。研究区内有21个站点的气候倾向率小于0, 其中尚志、通河分别在 $\alpha = 0.001$ 和 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下减小。而西部的齐齐哈尔、富裕、克山、明水和安达表现为增加趋势, 其中安达的增加趋势通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。

对1960—1979年、1980—1999年和2000—2015年3个时期的水稻生育期内需水量与有效降雨量耦合度进行分析可知, 从1960年到1999年, 研究区内需水量与有效降雨量耦合度总体呈减小趋势, 气候倾向率平均值为 $-0.0012/(10 \text{ a})$, 海伦、哈尔滨以东地区和海伦、伊春以北地区的气候倾向率大于零, 其他地区气候倾向率小于零, 没有任何气象站的变化趋势通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。从1980年到2015年, 研究区内需水量与有效降雨量耦合度总体呈减小趋势, 气候倾向率平均值为 $-0.0209/(10 \text{ a})$, 但西部地区的明水、安达等地仍大于零, 其余的21个气象站均呈减小趋势, 其中尚志和通河在 $\alpha = 0.001$ 水平上显著减小, 鸡西在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著减小, 牡丹江和嫩江在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著减小。通过比较两阶段及整个研究时段各站点耦合度发现, 研究时段内水稻生育期内需水量与有效降雨量耦合度总体减小的趋势主要是由于1980年到2015年阶段的耦合度减小造成的, 但北

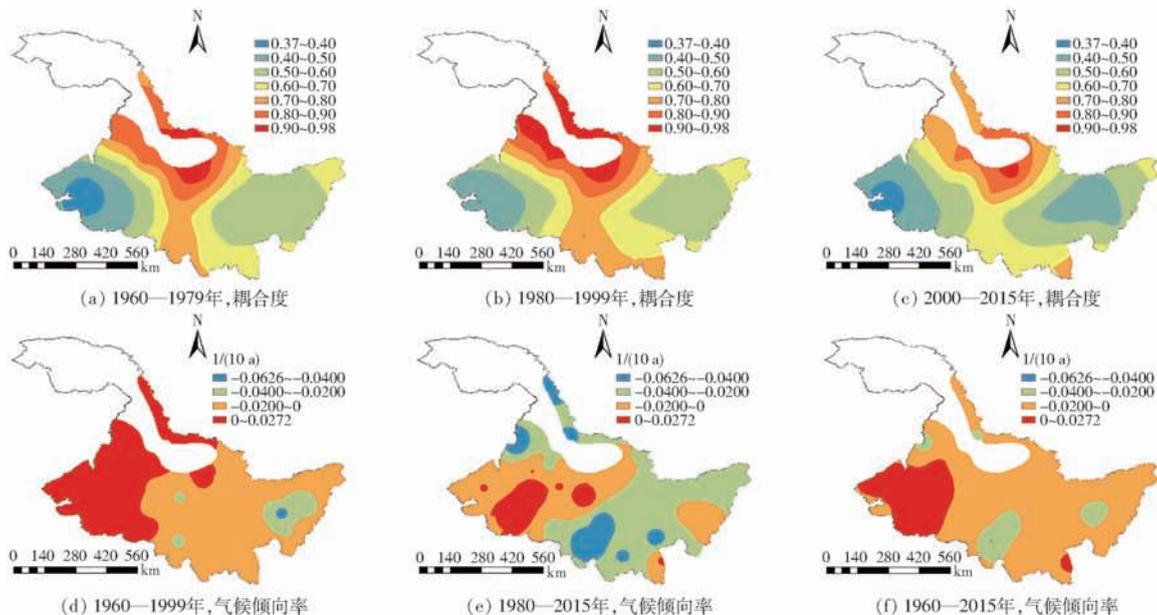


图8 1960—2015年水稻生育期内需水量与有效降雨量耦合度及其气候倾向率的空间分布

Fig.8 Spatial distributions of coupling coefficient of effective rainfall and water requirement and its climatic tendency during rice growth period in 1960—2015

部的安达、克山、明水和齐齐哈尔则一直表现为增加趋势。

2.6 气候变化对需水关系的影响

1960—2015年研究区不同气候因素变化对水稻需水关系的总体影响如图9所示,图中的箭头表示各参数的变化趋势,加减号表示参数对与之相联接的下一个参数的促进和抑制作用。通过对研究区1960—2015年5—9月各气象因子及 ET_0 进行Mann-Kendall趋势检验,发现风速、湿度、日照时数和降雨量总体呈下降趋势,温度呈增加趋势(表1)。风速、湿度、日照时数和温度共同作用导致水稻生长季 ET_0 减小,温度的升高同时也增加了水稻的生育期天数,生育期天数的增加弥补了水稻生长季 ET_0 减小对需水量的影响,使研究区水稻需水量总体呈增加趋势。同样,生育期天数的增加也弥补了降雨量减小对有效降雨量的影响,使水稻生育期内有效降雨量总体呈增加趋势。然而,需水量的增幅比有效

降雨量的增幅大,所以研究区内需水量与有效降雨量的耦合度总体呈下降趋势。值得注意的是,研究区西部地区的水稻需水关系与研究区总体规律不同。以安达为例,多年气候变化导致该地区生长季 ET_0 降幅较大,而降雨量增多,水稻生育期天数的增加不能弥补生长季 ET_0 减小对需水量的影响,却增加了生育期内有效降雨量,故该地区需水量与有效降雨量的耦合度呈增加趋势。

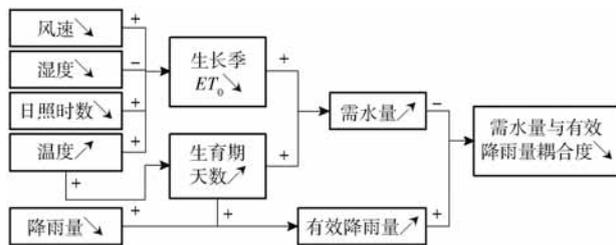


图9 1960—2015年气候变化对水稻需水关系的影响

Fig.9 Consequences of climate change on water requirement relations of rice during 1960—2015

表1 1960—2015年水稻生长期各气象因子气候倾向率变化

Tab.1 Climatic tendency changes of each meteorological factor during rice growth season in 1960—2015

月份	气候倾向率					
	平均最低温度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$)	平均最高温度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$)	平均相对湿度/ ($\% \cdot (10\text{a})^{-1}$)	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(10\text{a})^{-1}$)	日照时数/ ($\text{h}\cdot(10\text{a})^{-1}$)	降雨量/ ($\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$)
5	0.58***	0.13	0.55	-0.28***	-4.93	2.59
6	0.63***	0.30**	-0.37	-0.16***	-4.92	1.39
7	0.35***	0.10	-0.12	-0.15***	-4.87	0.54
8	0.29***	0.20	-0.37	-0.13***	-0.54	-5.36
9	0.28**	0.27***	-0.84*	-0.18***	-0.25	-3.71

注: *、**、***分别表示在0.05、0.01和0.001水平上显著。

通过以上分析可知,受气候变化影响,1980—2015年阶段中水稻生长季 ET_0 、移栽日期、成熟日期的变化幅度均大于1960—1999年阶段,导致水稻生育期天数增幅较大,生育期天数的增加也促进了1980—2015年阶段水稻需水量的增加。而1960—1999年和1980—2015年阶段研究区内各地有效降雨量的变化幅度比需水量的变化幅度更大,导致这两阶段各地的需水量和有效降雨量耦合度变化与有效降雨量的变化类似。

3 讨论

3.1 气候变化对水稻生长季参考作物蒸腾蒸发量的影响

本文主要研究目的是估算1960—2015年气候变化对黑龙江省水稻需水量的影响,结果表明近55年的气候变化引起了水稻生长季 ET_0 的减小。最高温度、最低温度的升高和平均相对湿度的减少并没有引起 ET_0 的增加。本研究结果与前人类似,曹永强等^[32]发现1966—2015年辽宁省 ET_0 呈减小趋势。ACHARJEE等^[18]发现1980—2013年孟加拉西北地区水稻生长季 ET_0 同样存在下降的趋势。然而,陈莉等^[33]的研究表明1960—2008年东北地区生长季 ET_0 呈增加趋势,这主要是因为2008年以后黑龙江省生长季 ET_0 存在明显的下降趋势而导致与本文结果不一。徐新良等^[34]报道1991—2000年东北地区5—9月 ET_0 呈增加趋势,虽然其研究时段在本研究时段内,但短时段的研究结果并不具有代表性。王亚平等^[35]指出1980—2005年风速的显著降低和净辐射可能补偿了气温升高引起 ET_0 的增量,导致东北三省近20年 ET_0 减小。吴霞等^[36]认为,1961—2015年中国平均 ET_0 呈减少趋势主要是由风速减小、日照时数降低和水汽压微弱增加共同导致的,中国东北地区 ET_0 变化的主导因子为风速,其次为日照时数,这与本研究结果一致,风速和日照时数的大幅减小与温度和湿度共同作用造成了 ET_0 的减小。因此在估算 ET_0 时,要综合考虑各项气候因子的影响。只考虑气温升高对 ET_0 的作用会导致估算值与真实值出现较大偏差。本研究中日照时数的减小有可能因为云量或气溶胶的增加引起的,导致辐射量下降^[37],然而辐射量的减小并没有降低气温,云和气溶胶的温室气体效应反而更有利于捕获更多热量,在增加气温的同时减小了太阳辐射量,从而导致 ET_0 的减小。

3.2 气候变化对水稻生育期天数的影响

作物需水量不仅受 ET_0 影响,还受作物系数及

生育期天数影响。本研究中,研究区内各站点生育期天数不一,且所有站点的水稻生育期长度均呈增加趋势,这主要是受黑龙江省有限的热量条件及气温升高的共同影响,热量资源较多的南部地区不小于 10°C 的积温为 $2\ 600\sim 2\ 800^{\circ}\text{C}$,而北部山区的积温一般小于 $2\ 200^{\circ}\text{C}$ 。随着不小于 10°C 积温的增加,水稻品种的生育期变长。气候变化条件下,各地积温在不断增加,早熟品种逐渐被中熟和晚熟品种替代。研究区各月平均最低气温和平均最高气温均呈不同程度的上升趋势,平均最低气温的显著升高促进了移栽期的提前和成熟日期的推迟^[7,12-13],使增加的热量资源得以充分利用,同时又增加了产量。侯雯嘉等^[7]通过对水稻审定品种和观测站水稻生育期数据进行回归分析发现,近20年来黑龙江省的水稻播种期和收获期呈极显著的提前和推迟趋势,其中审定品种1989—2006年间生育期长度以 $3.4\text{ d}/(10\text{ a})$ 的速率延长,本研究中水稻生育期天数1980—2015年以 $3.56\text{ d}/(10\text{ a})$ 的平均速率增加,二者相差很小,这在数据上肯定了本研究的成果。而在热量资源较为丰富的地区,气温升高则会引起作物生育期天数减小,DING等^[19]通过校正的水稻生育期模型对长江中下游地区水稻生育期天数进行计算,发现气候变化下过去及未来单季稻、早稻和晚稻的生育期均呈不同程度的下降趋势。YE等^[17]使用气象生态模型计算了中国南方单季稻和双季稻的生育期天数及适宜种植区,发现与1951—1980年相比,1981—2010年单季稻适宜种植面积减少了 $6.2\times 10^4\text{ km}^2$,而双季稻种植面积却相应增加,在未来气候变暖条件下双季稻的种植面积呈逐渐向北扩张的趋势,这主要是因为其研究区热量条件足以达到使当地水稻高产的最优品种的生长热量需求,所以在水稻生育期计算时未考虑气候变化下水稻品种的更新,只利用研究区特定品种的生育期累计有效积温来计算水稻生育期天数,导致气候变暖条件下相应研究区的水稻生育期天数变小。然而,当温度升高到大于水稻生长的适宜温度阈值时,水稻的生长发育会变慢,在某种程度上也会增加水稻生育期长度^[17,38],这种情况不仅发生在热量资源丰富的地区,侯雯嘉等^[7]通过对水稻生育期和温度相关分析发现7月温度升高可能会导致东北三省水稻生育期缩短。因此,及时掌握区域气温变化对优化品种布局作物,调整作物耕作制度具有重大意义。

3.3 气候变化对水稻需水关系的影响

本研究计算出的水稻生育期需水量空间差异较大,这主要是因为研究区内各地气候条件差异较大导致计算出的 ET_0 空间差异较大,另外各地水稻生

育期内 K_e 也存在着较大的时空差异。本研究中水稻生育期需水量的空间分布趋势与文献[3]中黑龙江省37个水稻灌溉试验站水稻生育期需水量分布趋势较为一致,该文献中37个试验站的水稻需水量范围为314~696 mm,黑龙江省范围内水稻需水量差异较大,这在数据方面肯定了本研究中需水量的计算结果。本研究指出,1960—2015年黑龙江省水稻需水量除北部安达和明水外均呈增加趋势,马文津等^[39]对黑龙江省8个气象站的水稻需水量变化特征的研究表明1956—2015年黑龙江省安达水稻需水量降低,这与本研究类似,但绥化、牡丹江、鸡西和富锦的水稻需水量呈减小趋势,与本研究结果不同,这主要是因为其研究中并未考虑水稻生育期天数变化对需水量的影响。文献[17-19]在不同地区进行气候变化对需水量影响的研究表明,全球变暖导致的水稻生育期天数减小均会减小水稻生育期需水量,因此研究气候变化对作物需水量影响时,生育期长度变化是一项不可忽视的因素。

本研究中的水稻生育期内有效降雨量及其气候倾向率的分布情况与1959—2015年黑龙江省玉米生育期内有效降雨量及其气候倾向率的分布情况类似^[9]。这可能是由于黑龙江省特定气候决定了作物的生长季为5—9月,即使玉米播种日期与水稻移栽日期相差较大,但5月较小的降雨量不至于对两种作物生育期内有效降雨量的分布及变化趋势造成较大差别。因此,黑龙江省水稻和玉米生育期内有效降雨量分布和变化趋势也应用在具有类似生育期长度的大豆和小麦等其他大田作物上。

降雨量空间分布和变化幅度均会影响作物对降雨量的有效利用。本研究中黑龙江省中部水稻需水量小于东部和西部地区,而有效降雨量的分布则与之相反,呈现为东部和西部小于中部的分布趋势。所以,中部地区需水量和有效降雨量耦合度较大,而东部西部较小。研究区内需水量的气候倾向率总体表现为东部大于西部,有效降雨量的气候倾向率表现为东部小于0,而西部大于0。故西部地区需水量和有效降雨量的耦合度总体表现为增加趋势而其他地区则呈下降趋势。全省范围来看,不适宜水稻种植的西部地区正朝着适宜的方向转化,而在水稻大面积种植的西部地区随着水稻需水量的增加和有效降雨量的减小则需要更多的灌溉水资源。

水稻品种、水分管理方法、土壤状况等都会影响

水稻需水量^[17-18]。本文采用的研究区多年 K_e 平均值可以在一定程度上减小水稻品种、土壤状况的影响。而近些年来新兴的非传统水分管理方法,如干湿交替灌溉、控制灌溉等,都会有效减小作物需水量。气候变化下,全球 CO_2 平均浓度(物质的量比)由1960年的317 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 增加到了400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, CO_2 浓度的升高也会促进气孔关闭,进而引起作物需水量的减小^[40]。因此,黑龙江省水稻需水量的实际增加趋势可能缓于本文结果。在有效降雨量减小和需水量增加的情况下,大面积推行水稻节水灌溉技术,优化种植制度与品种布局将会有效减小水资源压力,有利于水稻生产的稳步发展。

4 结论

(1) 1960—2015年黑龙江省水稻多年生长期 ET_0 在514~741 mm之间,平均值为620 mm,自西向东总体表现为先减小后增大趋势。气候倾向率为-18.56~8.15 mm/(10 a),平均值-3.90 mm/(10 a),总体呈下降趋势,西部地区降幅较大。

(2) 1960—2015年黑龙江省水稻移栽日期在5月8日—6月9日之间,平均移栽日期为5月21日。移栽日期均呈提前的趋势,其气候倾向率平均值为-1.73 d/(10 a),成熟日期在8月30日—9月22日之间,平均成熟日期为9月13日。气候倾向率平均值为0.94 d/(10 a),水稻生育期天数在84~137 d之间,全区多年平均值为115 d,自北向南总体表现为增加趋势,其气候倾向率平均值为2.68 d/(10 a),总体表现为增加趋势。

(3) 1960—2015年黑龙江省水稻需水量在244~740 mm之间,多年平均值为490.52 mm,从大到小总体表现为西部、东部、中部、北部。气候倾向率平均值为6.66 mm/(10 a),总体表现为增加趋势,东部地区增幅较大。1980—2015年水稻需水量增加幅度较大。有效降雨量为225~353 mm,平均值为297.03 mm。有效降雨量自西向东总体表现为先增大后减小趋势,气候倾向率平均值0.62 mm/(10 a),东部表现为减小趋势,西部表现为增加趋势。需水量与有效降雨量耦合度为0.37~0.98,平均值为0.64,自西向东变为先增加后减小的趋势,北部地区耦合度较大,西部较低,其气候倾向率平均值为-0.009/(10 a),总体表现为减小的趋势,但西部表现为增加趋势。

参 考 文 献

- [1] 黑龙江统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [2] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴2016[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.

- [3] 吕纯波, 郭龙珠, 郭彦文. 寒地水稻控制灌溉理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [4] 矫江, 李禹尧, 中本和夫. 黑龙江省水稻生产发展区划研究[J]. 黑龙江农业科学, 2012(11):3-6.
JIAO Jiang, LI Yuxiao, KAZUO N. Research on rice production regionalization in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2012(11):3-6. (in Chinese)
- [5] DING Y, REN G, ZHAO Z, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(6):954-971.
- [6] GU H, DU C Y, GAO Y G, et al. Variation of accumulated temperature and precipitation and its effects on crop belts over the past 48 years in Heilongjiang Province [J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(10):12-15.
- [7] 侯雯嘉, 耿婷, 陈群, 等. 近20年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):249-259.
HOU Wenjia, GENG Ting, CHEN Qun, et al. Impacts of climate warming on growth period and yield of rice in Northeast China during recent two decades[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1):249-259. (in Chinese)
- [8] 高军波, 楚冰洋, 闫军辉, 等. 1960年以来河南省玉米气候生产潜力估算与种植空间优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1):245-254.
GAO Junbo, CHU Bingyang, YAN Junhui, et al. Estimation of climate production potential of corn and optimization of planting space in Henan Province from 1960 [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):245-254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.027. (in Chinese)
- [9] 聂堂哲, 张忠学, 林彦宇, 等. 1959—2015年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):217-227.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, LIN Yanyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959—2015 [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):217-227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180726&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.026. (in Chinese)
- [10] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11):238-246.
PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Simulation for regional water consumption and optimization of irrigation schedule for winter wheat in North China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):238-246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171129&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.029. (in Chinese)
- [11] 于秋竹, 孔宇, 陈东升, 等. 黑龙江省不同积温带水稻物质生产特点研究[J]. 中国稻米, 2015, 21(4):68-71, 76.
YU Qiuzhu, KONG Yu, CHEN Dongsheng, et al. Study on dry matter production characteristics of rice in different accumulated temperature zone in Heilongjiang Province[J]. China Rice, 2015, 21(4):68-71, 76. (in Chinese)
- [12] CHEN C, QIAN C, DENG A, et al. Progressive and active adaptations of cropping system to climate change in Northeast China[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38(1):94-103.
- [13] 李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等. 气候变化背景下东北三省主要作物典型物候期变化趋势分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20):4180-4189.
LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al. Trend analysis of typical phenophases of major crops under climate change in the three provinces of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20):4180-4189. (in Chinese)
- [14] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1):202-210.
WEI Runchu, XIAO Changlai, FANG Zhang. Trends mutation nodes of groundwater dynamic in Jiansanjiang Area of Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46(1):202-210. (in Chinese)
- [15] 付强, 佟兆生, 魏庆利. 建三江分局地下水资源计算与评价[J]. 农机化研究, 2002, 24(1):47-49.
FU Qiang, TONG Zhaosheng, WEI Qingli. Calculating and evaluating the groundwater resource of Jiansanjiang Area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(1):47-49. (in Chinese)
- [16] 尹钢吉, 吕纯波, 孙艳玲, 等. 黑龙江省水稻需水量等值线图的研究与应用[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(1):29-31.
YIN Gangji, LÜ Chunbo, SUN Yanling, et al. Study and application of rice water requirement contour map in Heilongjiang [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2005, 33(1):29-31. (in Chinese)
- [17] YE Q, YANG X, DAI S, et al. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159:35-44.
- [18] ACHARJEE T K, HALSEMA G V, LUDWIG F, et al. Declining trends of water requirements of dry season Boro, rice in the north-west Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180:148-159.
- [19] DING Y, WANG W, SONG R, et al. Modeling spatial and temporal variability of the impact of climate change on rice irrigation water requirements in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 193:89-101.
- [20] 韩冰, 罗玉峰, 王卫光, 等. 气候变化对水稻生育期及灌溉需水量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1):29-32.
HAN Bing, LUO Yufeng, WANG Weiguang, et al. Impacts of climate change on rice growing period and irrigation water

- requirements[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1):29-32. (in Chinese)
- [21] MAINUDDIN M, KIRBY M, CHOWDHURY R A R, et al. Spatial and temporal variations of, and the impact of climate change on, the dry season crop irrigation requirements in Bangladesh[J]. *Irrigation Science*, 2015, 33(2):1-14.
- [22] 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.
- LI Yong, YANG Xiaoguang, YE Qing, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961—2007 [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9):175-183. (in Chinese)
- [23] 黄志刚, 王小立, 肖焯, 等. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1):260-268.
- HUANG Zhigang, WANG Xiaoli, XIAO Ye, et al. Effect of climate change on rice irrigation water requirement in Songnen Plain, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):260-268. (in Chinese)
- [24] 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.
- WANG Weiguang, PENG Shizhang, SUN Fengchao, et al. Spatiotemporal variations of rice irrigation water requirements in the mid-lower reaches of Yangtze River under changing climate[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5):656-664. (in Chinese)
- [25] 刘克良. 寒地稻作授时历[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012.
- [26] 朱海霞, 李秀芬, 王萍, 等. 黑龙江省水稻生长季积温计算方法[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(2):247-256.
- ZHU Haixia, LI Xiufen, WANG Ping, et al. Method of accumulated temperature during rice growing stage in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(2):247-256. (in Chinese)
- [27] 黑龙江省农业委员会. 黑龙江省农作物品种积温区划分[EB/OL]. [2018-01-11]. <http://www.hljagri.gov.cn/nygk/nzwpzjqwh/>.
- [28] 黑龙江省农业委员会. 关于印发《黑龙江省2015年主要粮食作物优质高产品种区域布局规划》的通知[EB/OL]. (2015-01-29) [2018-01-11]. <http://dszz.hljagri.gov.cn/tjxxw/jrtj/tzgg/201501/>.
- [29] FAO. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: FAO, 1992.
- [30] 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: FAO, 1998.
- [31] JIANG J M, YOU X T. Where and when did an abrupt climatic change occur in China during the last 43 years? [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 1996, 55(1-4):33-39.
- [32] 曹永强, 李维佳. 辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. *生态学报*, 2018, 38(20):1-11.
- CAO Yongqiang, LI Weijia. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in Liaoning Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20):1-11. (in Chinese)
- [33] 陈莉, 方丽娟, 李帅. 东北地区生长季潜在蒸散量的变化特征分析[J]. *灾害学*, 2010, 25(2):92-96.
- CHEN Li, FANG Lijuan, LI Shuai. Variation characteristics of potential evapotranspiration in growing season of crops in Northeast China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(2):92-96. (in Chinese)
- [34] 徐新良, 刘纪远, 庄大方. GIS环境下1991—2000年中国东北参考作物蒸散量时空变化特征分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2):10-14.
- XU Xinliang, LIU Jiyuan, ZHUANG Dafang. Analysis of temporal-spatial characteristics of reference evapotranspiration based on GIS technology in Northeast China during 1991—2000 [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2):10-14. (in Chinese)
- [35] 王亚平, 黄耀, 张稳. 中国东北三省1960—2005年地表干燥度变化趋势[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(6):619-627.
- WANG Yaping, HUANG Yao, ZHANG Wen. Variation and tendency of surface aridity index from 1960 to 2005 in three province of Northeast China[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(6):619-627. (in Chinese)
- [36] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 等. 1961—2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. *资源科学*, 2017, 39(5):964-977.
- WU Xia, WANG Peijuan, HUO Zhiguo, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in China from 1961 to 2015[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5):964-977. (in Chinese)
- [37] STANHILL G, COHEN S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2001, 107(4):255-278.
- [38] ZHAO H, YAO F, ZHANG Y, et al. Correlation analysis of rice seed setting rate and weight of 1000-grain and agrometeorology over the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(4):430-436.
- [39] 马文津, 刘诗梦, 卫琦, 等. 气候变化下黑龙江省水稻灌溉需水量变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4):236-242.
- MA Wenjin, LIU Shimeng, WEI Qi, et al. Variation characteristics of rice irrigation water requirements in Heilongjiang Province under climate change [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4):236-242. (in Chinese)
- [40] BAKER J T, JR L H A. Effects of CO₂ and temperature on rice[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2010, 48(5):575-582.