

气候变化下黑龙江省水稻灌溉需水量变化特征

马文津¹, 刘诗梦¹, 卫琦^{1,2}, 廖林仙¹, 徐俊增^{1,2}

(1 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于黑龙江省8个典型站点60年(1956-2015)的历史气象资料,利用Penman-Monteith公式和水量平衡模型计算了黑龙江省水稻全生育期内,两种灌溉模式下(淹水和控制灌溉)的作物需水量(ET_c)及灌溉需水量,并结合气象因素的变化特征,借助Mann-Kendall检验方法分析了 ET_c 及灌溉需水量对气象因子的响应。结果表明: ET_c 方面,不同灌溉模式下同一站点 ET_c 的变化趋势基本一致,其中安达和绥化站的 ET_c 呈下降趋势,出现“蒸发悖论”现象,嫩江、尚志和孙吴站的 ET_c 显著上升,其余各站无明显变化。灌溉需水量方面,只有尚志站点在两种灌溉模式下均显著增加,孙吴、富锦和嫩江站仅在控制灌溉模式下呈明显上升趋势,而其余站点并没有一致性规律。总体上,相对于淹水灌溉,控制灌溉模式下有效降雨量提高了20%,灌溉需水量降幅为44.9%~52.9%,有效减少了农业生产在气候变化条件下受到的不利影响。

关键词: 灌溉需水量; 需水量变化特征; 气候变化; 控制灌溉; 水稻; 黑龙江省

中图分类号: S161; S511

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0236-07

Variation characteristics of rice irrigation water requirements in Heilongjiang Province under climate change

MA Wenjin¹, LIU Shimeng¹, WEI Qi^{1,2}, LIAO Linxian¹, XU Junzeng^{1,2}

(1. College of Agricultural Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China.)

Abstract: Based on the historical meteorological data of eight typical stations in Heilongjiang Province in recent 60 years (1956-2015), the crop water requirement (ET_c) and the irrigation water requirement of rice in Heilongjiang Province during the whole growth period under floods and controlled irrigation were investigated using the Penman-Monteith formula and water balance model. The response of ET_c and the irrigation water requirement to climate change was analyzed by combining with the characteristics of meteorological factors taking advantage of the Mann-Kendall Analysis. The results indicated that, the variation tendency of ET_c in the same station under different irrigation modes were basically consistent. Specifically, the ET_c of Anda and Suihua stations decreased significantly, which stands for the phenomenon known as ‘evaporation paradox’; however, that of Nenjiang, Shangzhi and Sunwu showed an opposite trend and the rest stations had no obvious variation. On the other hand, the irrigation water requirement of Shangzhi significantly increased both under the two irrigation modes, but in Sunwu, Fujin and Nenjiang, it increased only under controlled irrigation, and others showed no regularity. In conclusion, compared with flooding irrigation, the effective rainfall in controlled irrigation mode increased by 20% and the irrigation water requirement were reduced by 44.9%~52.9%, which effectively reduced the adverse effects of climate change on agricultural production.

Key words: irrigation water requirement; variation characteristics of water requirement; climate change; controlled irrigation; rice; Helongjiang Province

收稿日期:2018-03-15; 修回日期:2018-04-23

基金项目:国家重点研发计划子课题(2016YFC0400103); 江苏省水利科技项目(2016068)

作者简介:马文津(1995-),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。

通讯作者:徐俊增(1980-),男,山东聊城人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究。

1 研究背景

近年来,全球气候变暖以及极端天气频发已成为有目共睹的事实。相关文献已经表明,全球表面气温在整个20世纪升高了 $0.56 \sim 0.92^{\circ}\text{C}$ ^[1]。而农业作为受气候变化影响较为敏感的行业之一,气温的上升不仅会影响作物的生理生长,还会引起降雨等因素的变化,导致作物灌溉需水量的改变。黑龙江省在对全国稻米市场的贡献中占有极为重要的地位^[2],其特殊的地理位置(中高纬度地区)也导致水稻受气候变化的影响更为明显。在过去60年间,黑龙江省的平均气温升幅位列全国之首^[3],暖干化趋势显著。因此,针对黑龙江水稻灌区,探讨气候变化下水稻灌溉需水量的变化特征,对于科学制定水稻种植布局 and 合理进行灌溉具有重要的指导意义。

国内外学者关于气候变化对作物需水量(ET_c)和灌溉需水量的影响已经开展了大量的试验研究。如刘晓英等^[4]计算了华北地区6个站点近50年主要作物的需水量,并分析了其变化趋势,发现作物需水量随气温的增加而下降,且日照时数与风速的减小是导致其下降的主要原因。王新华等^[5]、王鹤龄等^[6]利用增量情景法研究了气候变暖对我国不同灌区主要作物需水量的影响,结果表明气候变暖对不同作物需水量的影响程度不同,其中对棉花和玉米需水量的影响最大。黄志刚等^[7]分析了松嫩平原水稻全生育期内灌溉需水量的变化规律,结果表明灌溉需水量等值线沿西南-东北方向递减,同一灌溉需水量等值线北移。Silva等^[8]基于不同气候变化情景的大气环流模式(HadCM3)的输出,分析了未来作物灌溉需水量的变化特征,结果表明在未来气候变化情景下,作物的灌溉需水量可能增加^[8]也可能减小^[9-10]。

目前关于气候变化对黑龙江省水稻影响的研究,主要集中在气候变暖对水稻产量的影响等方面^[11-12],而关于多种气象因素对水稻灌溉需水量的影响等方面的研究还较少。因此,基于上述研究不足,本文拟选取黑龙江省8个典型站点,以1956-2015年的气象资料为依据,利用Penman-Monteith公式、水量平衡模型和Mann-Kendall检验方法分析 ET_c 的变化特征,以及4种主要气象因子对参考作物需水量(ET_0)和 ET_c 的影响,并结合有效降雨量的变化趋势,研究不同灌溉模式下水稻灌溉需水量对气象因素变化的响应,并提出应对气候变化的措施。

2 数据与方法

2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,收集了黑龙江省8个典型站点自1956年至2015年逐日气象数据。图1为各站点地理位置图,表1为各站点 ET_0 及气象参数60年平均值。

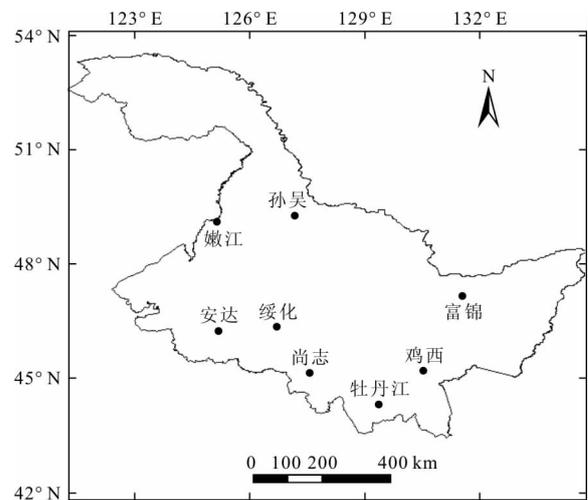


图1 各站点地理位置图

表1 各站点生育期内年 ET_0 、年降雨量及日气象数据均值

站点	$ET_0 / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	降雨量/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	日均气温/ $^{\circ}\text{C}$	日均相对湿度/%	日均风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	日均日照时数/h
安达	485.8	341.6	20.8	69	3.2	8.4
富锦	424.5	345.1	19.8	75	3.2	7.3
鸡西	430.9	369.0	19.6	74	2.5	7.8
牡丹江	430.1	375.0	20.0	69	2.1	7.2
嫩江	445.6	357.9	18.6	72	3.2	8.4
绥化	460.3	406.1	20.1	72	3.2	8.3
孙吴	397.4	397.7	17.5	77	2.5	7.9
尚志	408.6	461.7	19.5	79	2.5	7.6

2.2 水稻需水量

水稻需水量采用单作物系数 FAO56 Penman - Monteith 公式^[13]计算,并考虑土壤水分修正系数。水稻逐日需水量计算公式为:

$$ET_C = K_C \cdot K_S \cdot ET_0 \quad (1)$$

其中:

$$K_S = \begin{cases} 1 & \theta_i \geq 100 \\ \ln(1 + \theta_i) / \ln 101 & 100 > \theta_i \geq \theta_c \\ \varepsilon e^{(\theta_i - \theta_c) / \theta_c} & \theta_i < \theta_c \end{cases} \quad (2)$$

$ET_0 =$

$$\frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{T + 273} \right] u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: ET_C 为水稻逐日需水量,mm,本文中指的是计算值; ET_0 为逐日参考作物需水量,mm; K_C 为作物系数,本文采用黑龙江省庆安县水稻灌溉试验中心^[14]得出的作物系数; K_S 为土壤水分修正系数,式中所需要的数据可参考文献[15]; R_n 为净辐射, MJ/($m^2 \cdot d$); G 为土壤热通量, MJ/($m^2 \cdot d$); T 为平均气温, $^{\circ}C$; u_2 为2 m高度处的风速,m/s; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压,kPa; Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线上的斜率,kPa/ $^{\circ}C$; γ 为湿度计常数,kPa/ $^{\circ}C$ 。

2.3 灌溉需水量

(1)当灌溉下限为水层即 $h_{dt} > 0$ 时,采用公式(4)进行计算:

$$I_t = \begin{cases} 0 & h_t > h_{dt} \\ I_{wt} - h_t & h_{dt} \geq h_t > 0 \\ I_{wt} + 1000(\theta_{st} - \theta_t)H_t & h_t = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_t 为第 t 天的灌溉需水量,mm; I_{wt} 为第 t 天灌溉上限,mm; θ_{st} 为第 t 天根系层土壤饱和含水率,%; θ_t 为第 t 天根系层土壤含水率,%; h_{dt} 为灌溉下限,mm; H_t 为第 t 天水稻主根层深度,m。

(2)当灌溉下限为土壤含水率即 θ_{dt} 时,采用公式(5)进行计算:

$$I_t = \begin{cases} 0 & \theta_t > \theta_{dt} \\ I_{wt} + 1000(\theta_{st} - \theta_t)H_t & \theta_t \leq \theta_{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_{dt} 为第 t 天灌溉土壤含水率下限,%;其他参数同上。

2.4 Mann - Kendall 检验

气象因子、水稻需水量以及灌溉需水量总体变化趋势采用 Mann - Kendall^[16](简称 M - K)检验分析。在 M - K 检验中,原假设 H_0 为时间序列数据

(X_1, X_2, \dots, X_n) ,是 n 个独立的、随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验,对于所有的 $i, j < n$,且 $i \neq j, X_i$ 和 X_j 的分布是不相同的。定义检验统计量 Z :

$$Z = \begin{cases} (S - 1) \sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1) \sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (7)$$

$$\text{Var}(S) = n(n - 1)(2n + 5) / 18 \quad (8)$$

式中: $\text{sign}()$ 为符号函数。当 $X_i - X_j$ 小于、等于或者大于0时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为-1、0或1。

在双边趋势检验中,对于给定的置信水平 α ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设 H_0 是不可能接受的,即在置信水平 α 上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于1.28、1.64和2.32时表示分别通过了置信度90%、95%和99%显著性检验。

3 结果与分析

3.1 水稻生育期内 ET_C 的变化特征及其对气象因子的响应

3.1.1 水稻不同灌溉模式下 ET_C 的变化特征 水稻生育期内,各站点在不同灌溉模式下的 ET_C 年平均值如表2所示。从空间分布情况来看,在淹水灌溉模式下, ET_C 由西向东大致呈先减小后增大的趋势,西部地区的安达、绥化和嫩江站的 ET_C 较大,其中安达站的 ET_C 最高,为446.3 mm/a;东南地区的富锦、鸡西和牡丹江站的 ET_C 次之;而中间区域的孙吴和尚志站的 ET_C 最小。在控制灌溉模式下,各站点的 ET_C 年平均值分布情况与淹水灌溉模式基本一致,但数值上略小于后者。

表2 不同灌溉模式下各站点 ET_C 年平均值 mm/a

站 点	淹水灌溉	控制灌溉
安 达	446.3	433.7
富 锦	392.4	385.1
鸡 西	398.5	390.5
牡丹江	397.6	389.9
嫩 江	411.0	401.3
绥 化	422.9	414.5
孙 吴	369.3	362.4
尚 志	378.5	372.4

对各站点不同灌溉模式下 ET_c 的变化趋势进行 M-K 检验(图 2)。从时间序列来看,在淹水灌溉模式下,有明显变化趋势的站点主要集中在西部地区,其中安达站表现出极显著的下降趋势, M-K 检验结果 $Z = -3.37$; 绥化站下降程度稍次之, $Z = -1.41$; 而最北部的嫩江站和孙吴站都表现出极显著的上升趋势, M-K 检验结果 Z 分别为 2.20 和 2.93; 西南地区的尚志站也呈现出较明显的上升趋势, M-K 检验结果 $Z = 1.37$; 而东南地区其余 3 个站点并没有明显的变化特征。在控制灌溉模式下,各站点 ET_c 的变化趋势与淹水灌溉模式完全相同,只是检验结果 Z 值大小略有差异。

以安达站和嫩江站为例,分析在淹水灌溉模式

下二者的 ET_c 年际间的变化过程(图 3)。

由图 3 可以看出,安达站的年 ET_c 在 1956 年至 1982 年间变化比较平稳,平均值为 469.0 mm/a; 1982 年达到最大值 561.9 mm/a, 1983 年发生剧烈变化,骤降至 403.7 mm/a; 而后 30 年虽出现几个极大值点,但总体上仍呈逐渐减少趋势,平均值为 427.7 mm/a。而嫩江站的年 ET_c 波动程度比较剧烈,其变化过程主要分为 3 个阶段:在前 25 年内显著上升,增速可达 29.4 mm/10a,至 1982 年达到最大值 479.6 mm/a; 1983 年突然下降至 365.8 mm/a, 随后的 15 年间相对稳定,平均值为 400.5 mm/a; 2000 年增至 492.9 mm/a, 此后以 57.0 mm/10a 的速度迅速降低。

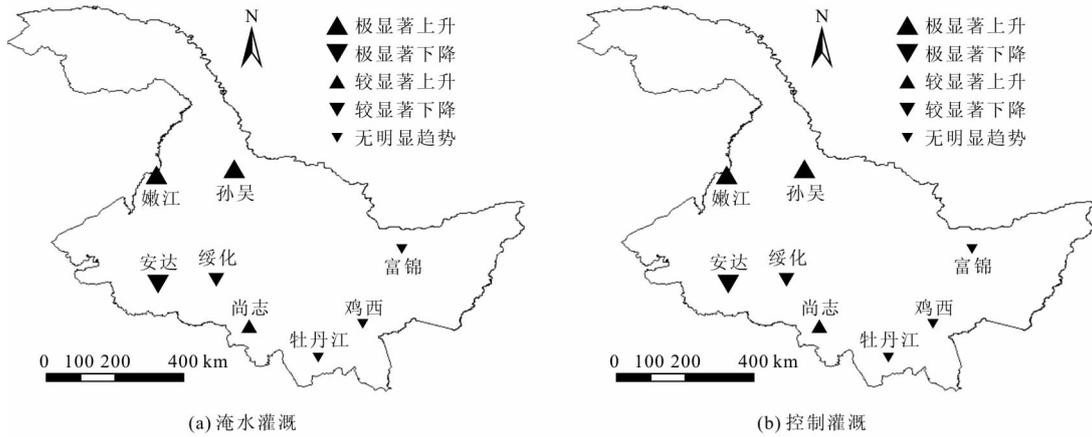


图 2 不同灌溉模式下各站点 ET_c 变化趋势 M-K 检验结果图

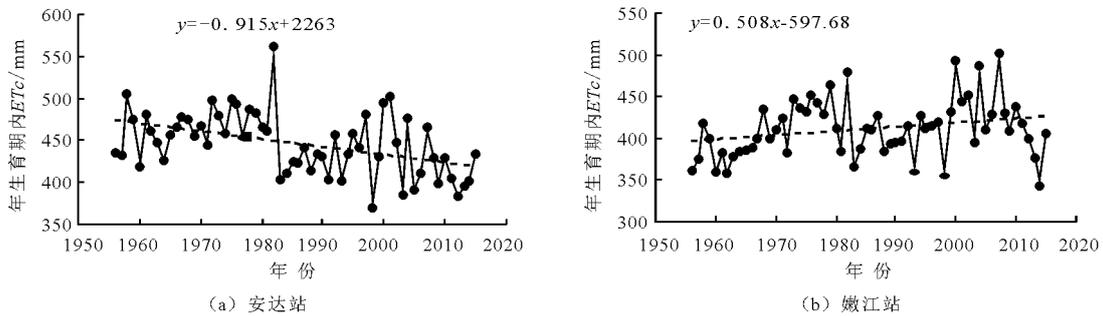


图 3 淹水灌溉模式下典型站点 ET_c 变化趋势

3.1.2 ET_c 变化成因分析 ET_c 是以 ET_0 为基础, 并对其修正而得出, 二者呈线性关系, 即 ET_c 的变化趋势直接取决于 ET_0 的变化情况, 且与 ET_0 的变化趋势一致。 ET_0 主要受气温、相对湿度、风速和日照时数这 4 种气象因子的影响, 对比表 1 中各站点的气象数据日平均值, 可以发现, 安达站和绥化站的日平均气温和日照时数明显高于其他各站, 这使得其 ET_0 年平均值在各站点中为最大, 相应的 ET_c 年平均值也为最大, 而孙吴站和尚志站的日平均气

温偏低及相对湿度偏高导致了 ET_c 年平均值偏小。同一站点在控制灌溉模式下的 ET_c 年平均值略低于淹水灌溉模式, 原因在于控制灌溉模式下田间无土层天数较多, 导致土壤水分修正系数 K_s 小于 1。

为了更深层次地对 ET_c 的变化进行归因分析, 对各个站点的 ET_0 和影响 ET_0 的气象因素分别进行趋势分析和 M-K 检验(表 3)。由表 3 可以看出, 对于 ET_0 显著增长的嫩江和孙吴站而言, 其气温在近 60 年上升幅度尤为显著, 最低气温上升趋势检验

结果高达 7.23 和 8.05,且相对湿度的下降趋势也十分明显,即使孙吴站的风速呈显著减小趋势,但仍无法改变 ET_0 显著上升的趋势。对于安达站来说,相对湿度的上升以及风速和日照时数的下降抵消了气温上升带来的影响,使得其 ET_0 逐渐下降。绥化

站相对湿度的显著减小虽能导致 ET_0 的升高,但仍抵不过风速和日照时数显著下降所带来的影响。而鸡西站温度、风速都有显著增大的情况下,日照时数的极显著下降扭转了这一趋势,说明鸡西站 ET_0 对日照时数的敏感性更大。

表 3 各站点 ET_0 及气象因子趋势检验结果

站 点	ET_0	平均气温	最高气温	最低气温	相对湿度	风速	日照时数
安 达	-3.48 **	4.02 **	2.09 **	5.04 **	1.36 *	-6.84 **	-3.62 **
富 锦	-0.26	3.66 **	2.70 **	4.12 **	-0.54	-2.52 **	-1.42 *
鸡 西	-0.07	3.92 **	1.92 **	6.12 **	-0.02	2.69 **	-2.49 **
牡丹江	-0.63	5.12 **	3.92 **	5.59 **	1.38 *	-2.94 **	-2.39 **
嫩 江	2.71 **	5.75 **	3.32 **	7.23 **	-3.18 **	0.51	-0.25
绥 化	-1.50 *	5.50 **	2.55 **	6.88 **	-1.80 **	-4.55 **	-2.21 **
孙 吴	3.56 **	7.40 **	4.95 **	8.05 **	-4.32 **	-1.84 **	0.53
尚 志	1.21	5.90 **	3.72 **	6.08 **	-2.05 **	-3.36 **	-1.36 *

注:(1) **表示极显著(置信水平 $\geq 95\%$),*表示显著($90\% \leq$ 置信水平 $< 95\%$);(2)正数表示上升,负数表示下降;下同。

理论上来说,在全球气候变暖的背景下,陆地和水面的蒸发量增大将导致 ET_0 升高,但本研究结果表明 ET_0 的变化并不完全如此,即存在“蒸发悖论”现象,这可能是由于 ET_0 是气温、风速、相对湿度和日照时数共同作用的结果,其最终变化趋势取决于各个因子的作用程度。同时多数研究表明, ET_0 的显著下降是由风速和日照时数的减小所导致^[17-19],这也与本文的研究结果较为一致。其原因可能在于日照时数的减小削弱了到达地面的能量,导致蒸发量降低;而风速的减小使得空气与土壤中水分的交换强度变低,促进了土壤对水分的保持。

3.2 水稻生育期内灌溉需水量的变化特征及对有效降雨量的响应

3.2.1 水稻不同灌溉模式下灌溉需水量变化趋势

灌溉需水量由作物需水量和降雨量共同决定,气候变化影响了作物的需水规律以及生育期内降雨量,从而影响灌溉需水量。对各个站点在不同灌溉模式下灌溉需水量的变化趋势进行 M-K 检验(图 4)。由图 4 可以看出,在淹水灌溉模式下,尚志站的灌溉需水量呈显著增加的趋势,检验结果 $Z = 2.3$,而其余站点则无明显变化趋势;在控制灌溉模式下,除尚志站($Z = 2.0$)仍表现出显著的上升趋势外,孙吴站、富锦站和嫩江站也呈十分明显的上升趋势,而其余站点无明显的变化趋势。

进一步分析各站点近 60 年间两种灌溉模式下水稻生育期内的灌溉需水量年平均值(图 5)可以看出, ET_c 年平均值最大的 3 个站即安达、绥化和嫩江站,其灌溉需水量也基本相应最大。与淹水灌溉相

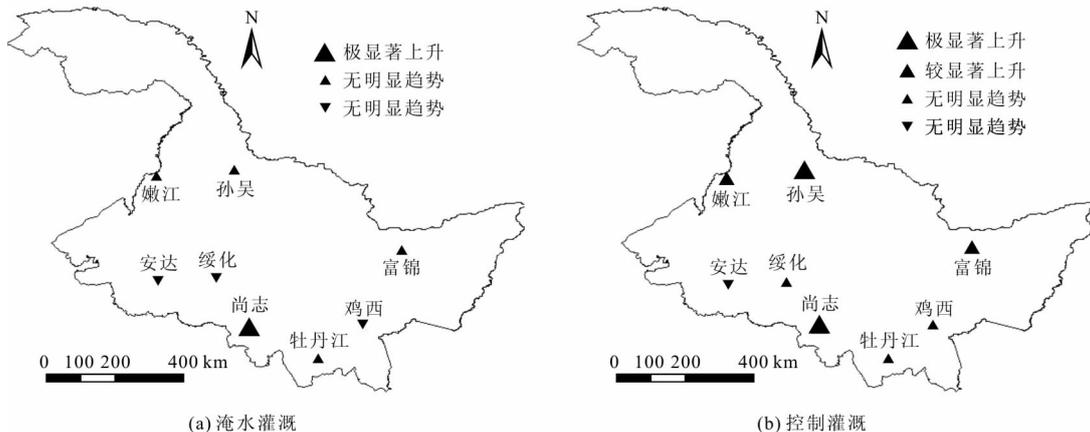


图 4 不同灌溉模式下灌溉需水量 M-K 检验结果图

比,控制灌溉稻田有效减少了年灌溉需水量,其年平均灌溉需水量降幅为 44.9% ~ 52.9%。

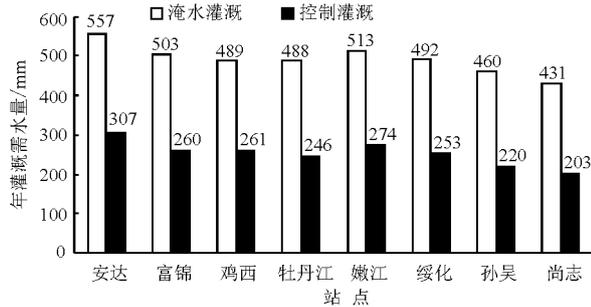


图 5 不同灌溉模式下水稻生育期内年灌溉需水量平均值

3.2.2 有效降雨量对灌溉需水量的影响 对各站点在不同灌溉模式下 60 年间水稻全生育期内有效降雨量变化趋势进行 M - K 检验(表 4)可以看出,富锦和尚志站的有效降雨量在两种模式下均呈显著下降趋势,安达站在淹水灌溉模式下的有效降雨量显著下降,在控制灌溉模式下无明显变化;而其余站点在两种模式下均无明显趋势。

表 4 各站点两种灌溉模式下有效降雨量 M - K 检验结果

站 点	淹水灌溉	控制灌溉
安 达	-1.70 **	-1.01
富 锦	-2.25 **	-2.47 **
鸡 西	-0.08	-0.15
牡丹江	-0.82	-0.76
嫩 江	0.35	0.45
绥 化	-0.10	-1.24
孙 吴	-0.40	-0.50
尚 志	-2.43 **	-2.28 **

不同站点间灌溉需水量变化趋势不尽相同,致使这种趋势产生的原因也各有差异。当水稻需水量基本保持不变时,如富锦站,其有效降雨量的减少使得稻田供水不足,导致灌溉需水量增加;当水稻需水量呈显著上升趋势时,如嫩江和孙吴站,其有效降雨量不变,则应加大灌溉需水量以满足蒸散发的需要;当水稻需水量呈显著下降趋势时,如安达和绥化站,其有效降雨量同样没有明显的变化,则应减少灌溉需水量以避免产生地表径流,但结果显示其灌溉需水量并没有显著的变化幅度。产生这种现象的原因可能在于年际间降雨集中度不同,即降雨的分配过程不同,导致同等的雨量伴随不同的排水过程。过于集中的降雨只会增加排水,生育期内其他时期仍需进行灌溉,而相对分散的降雨则可能恰好发生在

灌水前一天,减少了灌溉次数,从而影响年际间灌溉需水量的变化情况。

在同一个站点不同灌溉模式下,即使水稻需水量和有效降雨量的变化趋势一致,其灌溉需水量也可能呈现不同的结果。例如嫩江和孙吴站,二者在水稻需水量显著上升而有效降雨量不变的情况下,灌溉需水量在淹水灌溉模式下无明显趋势,而在控制灌溉模式下均呈显著上升趋势。其原因可能在于控制灌溉模式改变了田间蓄水的上、下限,影响了生育期内的排水过程,导致灌溉需水量也随之变化。

进一步分析各站点在不同灌溉模式下有效降雨量年平均(图 6)可以看出,控制灌溉稻田的降雨有效利用率为 84%,较淹水灌溉模式提高了 20%。这可能是由于控制灌溉稻田灌水后只建立不多于 5 mm 水层,一方面使水稻奢侈耗水变少,另一方面又增加了稻田的调蓄能力,从而增加了降雨的利用率。

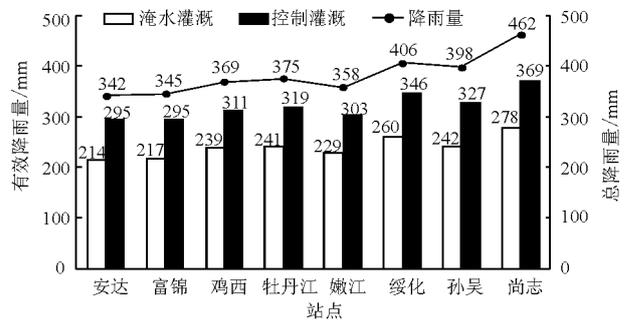


图 6 不同灌溉模式下总降雨量与有效降雨量平均值

4 结 论

本研究以黑龙江省 8 个典型站点近 60 年(1956 - 2015 年)的历史气象资料为依据,利用 Penman - Monteith 公式、水量平衡模型和 Mann - Kendall 检验相结合的方法分析了 ET_c 和灌溉需水量的变化特征及其对气象因子变化的响应情况,主要结论如下:

(1) 在全球气候变暖的背景下, ET_0 变化不完全呈上升趋势,即存在“蒸发悖论”现象。气象因子直接影响了 ET_0 的变化,引起 ET_c 随之改变。不同灌溉模式下 ET_c 的变化趋势基本一致,安达和绥化站的 ET_c 呈极显著和较显著下降趋势,嫩江和孙吴站呈极显著上升趋势,尚志站的 ET_c 上升趋势较为显著,其余各站无明显变化。

(2) 淹水灌溉模式下,尚志站的灌溉需水量极显著增加,其余站点无明显变化;控制灌溉模式下,除尚志站仍表现出极明显的上升趋势外,孙吴、富锦和嫩江站也呈明显的上升趋势,其余站点无明显的

变化规律。此外,年际间降雨分配过程及蓄水阈值不同会使排水过程产生差异,从而影响灌水需水量。

(3)控制灌溉模式能够有效地提高降雨的利用率,减少稻田灌溉需水量。控制灌溉模式下有效降雨量提高了20%,相对于淹水灌溉模式其年平均灌溉需水量降幅为44.9%~52.9%,采用控制灌溉技术可以有效减少农业生产在气候变化条件下受到的不利影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [R]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 张力军,陈智,张锡铭,等. 黑龙江省水稻产量、品质及市场现状分析[J]. 农场经济管理, 2014(9):25-29.
- [3] 周秀杰,王凤玲,吴玉影,等. 近60年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析[J]. 自然灾害学报, 2013,22(5):124-129.
- [4] 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.
- [5] 王新华,李应海,王建雄. 气候变化对张掖地区作物需水量的影响[J]. 人民黄河, 2007, 29(10):61-62+64.
- [6] 王鹤龄,牛俊义,王润元,等. 气候变暖对河西走廊绿洲灌区主要作物需水量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(5):245-251.
- [7] 黄志刚,王小立,肖焱,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.
- [8] SILVA C S D, WEATHERHEAD E K, KNOX J W, et al. Predicting the impacts of climate change: A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka [J]. Agricultural Water Management, 2007, 93(1):19-29.
- [9] CONG Zhentao, XIN Ru, YAO Benzhi, et al. Impact of climate change on water use of winter wheat with HadCM3 Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9):1101-1107.
- [10] 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.
- [11] 王芳,白鸣祺,高永刚. 黑龙江省气温变化对水稻产量的影响[C]//中国气象学会年会农业气象防灾减灾与粮食安全分会场. 2009:13571-13573.
- [12] 矫江,许显斌,卞景阳,等. 气候变暖对黑龙江省水稻生产影响及对策研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3):41-48.
- [13] ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [J]. FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998:56.
- [14] 于靖. 寒区水稻需水规律及水分胁迫影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.
- [15] 茆智,李远华,李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995(3):253-259.
- [16] 简虹,骆云中,谢德体. 基于Mann-Kendall法和小波分析的降水变化特征研究——以重庆市沙坪坝区为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4):217-222.
- [17] 申双和,盛琼. 45年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. 气象学报, 2008, 66(3):452-460.
- [18] 谢平,陈晓宏,刘丙军,等. 参考作物腾发量与蒸发皿蒸发量的变化特征及变化原因分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5):14-17.
- [19] LIU Xiaomang, ZHENG Hongxing, ZHANG Minghua, et al. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4):594-608.