

黑龙江省参考作物蒸散量变化及气象因子分析

王子龙, 刘莹, 姜秋香, 李世强, 柴迅, 何馨

Analysis of reference crop evapotranspiration changes and meteorological factors in Heilongjiang Province

WANG Zilong, LIU Ying, JIANG Qiuxiang, LI Shiqiang, CHAI Xun, HE Xin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20200831003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黑龙江地区渠道基土工程性质试验分析

Experimental analysis of engineering properties of foundation soil of canal works in Heilongjiang area

水利水运工程学报. 2018(2): 82 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.011>

利用水位变化的黑龙江开河方式和开河日期预报

Prediction of Heilong River ice break-up mode and date based on water level change

水利水运工程学报. 2020(3): 29 <https://doi.org/10.12170/20200318003>

近50年辽宁省大雨与暴雨时空变化特征分析

Spatiotemporal variation characteristics of heavy rainfall and rainstorm in Liaoning Province over past 50 years

水利水运工程学报. 2017(1): 49 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.008>

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin

水利水运工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

50年来辽宁省不同等级舒适日数演变及空间区划分析

Analysis of variation in human body comfort days of different grades and its spatial distribution in Liaoning Province in recent 50 years

水利水运工程学报. 2017(5): 23 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.004>

河北省汛期降水集中度和集中期时空特征分析

Temporal and spatial characteristics of precipitation concentration degree and concentration period in flood season in Hebei Province

水利水运工程学报. 2018(4): 96 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.014>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20200831003

王子龙, 刘莹, 姜秋香, 等. 黑龙江省参考作物蒸散量变化及气象因子分析 [J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 46-56. (WANG Zilong, LIU Ying, JIANG Qiuxiang, et al. Analysis of reference crop evapotranspiration changes and meteorological factors in Heilongjiang Province[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(2): 46-56. (in Chinese))

黑龙江省参考作物蒸散量变化及气象因子分析

王子龙¹, 刘莹¹, 姜秋香¹, 李世强², 柴迅³, 何馨¹

(1. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省水文水资源中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 国网黑龙江省电力有限公司管理培训中心, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究中纬度寒区参考作物蒸散量时空变化及影响因子变化, 揭示参考作物蒸散量与各气象因子间响应关系, 基于黑龙江省 34 个标准气象站点数据资料, 运用 Penman-Monteith 公式方法计算逐日参考作物蒸散量。利用累积距平、气候倾向率、趋势分析和突变检验、Hurst 指数方法, 分析了黑龙江省参考作物蒸散量时空变化特征及气象因子间响应关系, 明确了产生差异性的主要原因。结果表明: 整体上, 黑龙江省 1990—2019 多年平均参考作物蒸散量呈下降趋势; 春季相对湿度是影响参考作物蒸散量变化的主要气象因子, 而冬季影响参考作物蒸散量较大的气象因子是平均气温; 全省高蒸散区集中在以泰来为中心的西南部, 低蒸散区集中在以呼中为中心的西北部; 风速和气温是影响黑龙江省南部地区参考作物蒸散量变化的主要气象因素, 相对湿度是影响北部地区参考作物蒸散量变化的主要气象因素; 对未来变化趋势预测表明, 黑龙江省 Hurst 指数为 0.60~0.69, 说明未来参考作物蒸散量变化呈与现在相同的下降趋势且具有一定持续性。

关键词: 参考作物蒸散量; 气象因子; Penman-Monteith 公式; 时空变化; 黑龙江省

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)02-0046-11

参考作物蒸散量(reference crop evapotranspiration, ET_0)是陆地生态水文和能量循环过程中重要参数之一, 也是农作物需水量估算的基础指标^[1]。 ET_0 在评价气候干湿程度、灌溉程度以及水资源供需平衡中起关键性作用^[2-3]。因此, 研究黑龙江省 ET_0 时空变化特征及气象因子的响应关系可为我国纬度最高省份作物需水量计算和农业水资源配置提供参考。

目前国内外众多学者对参考作物蒸散量展开了大量研究, 大多数研究表明, 在全球气候变暖和人类活动加剧变化下, 不同地区 ET_0 在时空分布上均呈不同程度的下降趋势^[4]。Jabloun 等^[5]在突尼斯缺少辐射量和相对湿度的地区使用 P-M 公式估算 ET_0 结果较为准确。Vicente - Serrano 等^[6]发现西班牙 ET_0 呈上升趋势, 动力因子成为影响 ET_0 变化的主要因素。Patle 等^[7]基于全球变暖分析了印度锡金喜马拉雅东部 ET_0 变化, 发现引起 ET_0 下降的主要气象因子为日照时数和风速, 相对湿度增加导致 ET_0 降低。Ariza-villaverde 等^[8]采用盒数联合多重形算法依据 P-M 公式提取主要气候变量相对湿度和空气温度, 描述西班牙瓜达尔基维尔河谷中部 ET_0 变化情况。Liu 等^[9]研究了中国粮食主产区气候变量及 ET_0 时空变化, 发现引起夏季和东北地区 ET_0 下降的主控因子为日照时数和风速。Zhang 等^[10]利用地理空间技术评价了中国 ET_0 时空变异性及控制气象要素, 最高和最低气温是影响我国 ET_0 的主要气候变量。然而, 不同地理位置和下垫面条件对 ET_0 变化及气象因子对 ET_0 的响应关系有所差异, Guan 等^[11]通过 P-M 公式计算黄淮海流域 ET_0 , 发现平均气温升高削弱了风速和辐射量对 ET_0 的响应强度, 从而使流域 ET_0 增加。Fan 等^[12]证明全球变暖不一定导致 ET_0 上升, 亚洲季风环流变化的原因可能是云层模式改变且风速普遍下降导致。Wang 等^[13]基于中国气象强迫数据集采用 P-M 公式对 ET_0 时空规律进行评估, 发现中国大部分地区 ET_0 呈明显上升趋势。

收稿日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579045); 黑龙江省自然科学基金资助项目(YQ2019E004)

作者简介: 王子龙(1982—), 男, 山东胶州人, 教授, 博士, 主要从事寒区陆面过程与水文学研究。

E-mail: wangzilong@neau.edu.cn 通信作者: 姜秋香 (E-mail: jiangqiuxiang2017@163.com)

势,仅东北地区 ET_0 呈下降趋势,是由于近地面风速具有多变性和不确定性。白桦等^[14] 利用时间序列分析方法,证实了气象要素在时空尺度上分布不同,由于气候事件、下垫面条件和地形地理限制,将导致局部 ET_0 规律呈不同随机性。对东北区域 ET_0 研究^[15-19] 中,大多分析仅考虑作物生长季节 ET_0 对作物需水量的应用,未研究区域非作物生长季 ET_0 变化。综上可知,目前基于区域角度和不同时间尺度开展参考作物蒸散量变化及影响因子分析的研究相对较少,而这方面研究对深入了解不同时期区域参考作物蒸散量时空变化规律有重要意义。因此,为研究黑龙江省参考作物蒸散量变化及其主要驱动因子,本文以 34 个标准气象站数据为基本资料,针对黑龙江省内 ET_0 及气象因子变化特征,通过定性和定量分析,探究 ET_0 总体变化趋势,揭示 ET_0 与气象因子间的相关性。研究结果可为我国最北部省份和寒冷地区水循环提供参考,同时,可为黑龙江省农作物灌溉用水合理分配、农业生产规划安排播种时间及旱涝灾害成因原理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与数据收集

黑龙江省位于中国东北寒区,纬度在 $43^{\circ}26'\sim53^{\circ}33'N$, 经度在 $121^{\circ}11'\sim135^{\circ}05'E$, 省内气候变化明显,四季分明,冬季漫长且寒冷。横跨寒温带和中温带,属大陆季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。位于最北部的漠河地区年均温达 $-5.5\text{ }^{\circ}C$ 。根据降水情况可以分为半干旱区、半湿润区、湿润区。

本文采用黑龙江省 34 个气象站(站点分布见图 1)1990—2019 年常规气象资料(包括平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数等),气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面气候资料日值数据集。根据气象季节划分,春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12 月—翌年 2 月。根据省内作物实际情况^[18],划分作物生长季为 5—9 月。

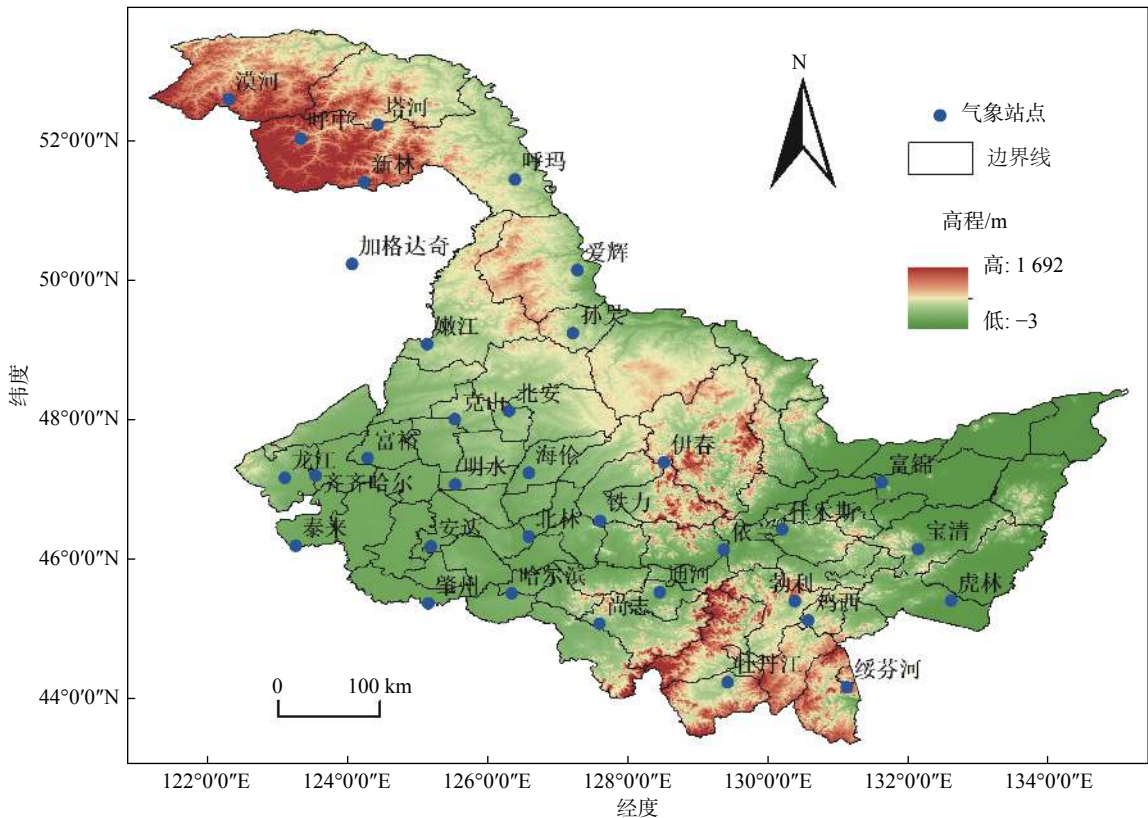


图 1 黑龙江省气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Heilongjiang Province

1.2 参考作物蒸散量计算

应用 1998 年联合国粮食及农业组织提出的 FAO-56 Penman-Monteith 修正公式计算参考作物蒸散量, 计算式^[20]如下:

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

式中: ET_0 为参考作物的日蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水气压与温度关系曲线的斜率(kPa/℃); γ 为湿度计常数(kPa/℃); R_n 为净辐射量(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); T 为地表以上 2 m 处平均气温(℃); u_2 为地表以上 2 m 处平均风速(m/s); e_s 为饱和水气压(kPa); e_a 为实际水气压(kPa)。

1.3 分析方法

趋势分析采用气候倾向率^[21]和 Mann-Kendall 趋势检验法^[22]。M-K 法是不受少数特异值影响的非参数检验方法, 避免了假设条件, 适用于分析非正态分布数据, 且样本数据无须符合特定分布。Mann-Kendall 突变检验具体步骤详见文献 [23]。

R/S 分析(重新标度极差分析, Rescaled Range Analysis)^[24]原本是处理时间序列的统计方法, 后经发展在水文领域得到广泛应用, 如分析径流变化、降水量、参考作物蒸散量等。该方法可以判断在一段时间序列内变量是随机分布还是存在着某种趋势变化, 计算式为:

$$\ln(R/S) = H \ln c + H \ln N \tag{2}$$

式中: R 为极差; S 为标准差; H 为 Hurst 指数; c 为常数; N 为时间步长。Hurst 指数变化范围在 0~1 之间。

2 结果与分析

2.1 ET_0 及气象因子时空变化特征

2.1.1 时间变化特征 近十几年来, 由于气候变暖改变气象因子变化从而影响水循环和能量平衡关系, 导致局部地区 ET_0 下降更加明显, 尤其在 20 世纪 90 年代变化更加显著, 中国东北地区冬季气温升高明显和风速减小导致 ET_0 发生较大变化。图 2 为 1990—2019 年黑龙江省 ET_0 累积距平曲线。由图 2 可知, 30 年来, 黑龙江省多年平均 ET_0 呈现出“上升-下降-上升”趋势, 其中自 1995 年后上升趋势较为迅速, 在 2008 年之后转为下降趋势, 到 2016 年 ET_0 有所回升。

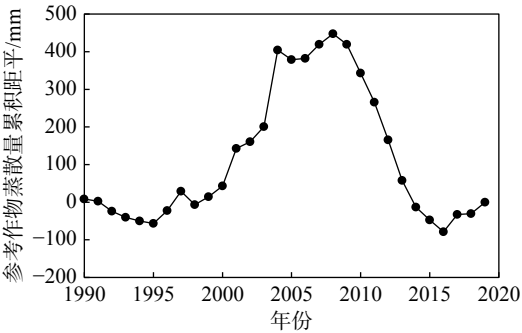


图 2 黑龙江省 ET_0 累积距平曲线
Fig. 2 Accumulative departure curve of annual ET_0 in Heilongjiang Province

不同时期多年平均 ET_0 变化趋势差异性明显。利用 M-K 突变分析法识别 ET_0 在不同时期是否存在突变年份。图 3 为黑龙江省不同时间尺度下 1990—2019 年间 ET_0 时间变化特征曲线。由图 3(a) 可知, 多年平均 ET_0 为 593.59 mm/a, 最高值出现在 2004 年为 797.13 mm, 最低值出现在 2013 年为 486.04 mm, 最高值是最低值的 1.64 倍, 1995—2005 年 ET_0 呈上升趋势, 在 2008 年发生突变后整体呈下降趋势。由图 3(b) 可知, 春季 ET_0 在研究期内变化趋势整体表现为上升趋势, 未发现突变年份。由图 3(c) 可知, 夏季 ET_0 在 1990—1995 年间有较大波动, 1996—2010 年呈升高趋势, 2009 年发生突变。由图 3(d) 可知, 秋季 ET_0 在 1990—1997 年间波动较大, 在 2008 年出现突变后趋势变化呈持续降低趋势。由图 3(e) 可知, 冬季 ET_0 在 1995 年和 2000 年发生突变, 变化趋势表现为先升高后持续降低。由图 3(f) 可知, 生长季 ET_0 在 1994—2010 年变化趋势持续升高, 其中 2000—2005 年升高趋势较为显著, 在 2010 年发生突变后, 变化趋势逐年降低。

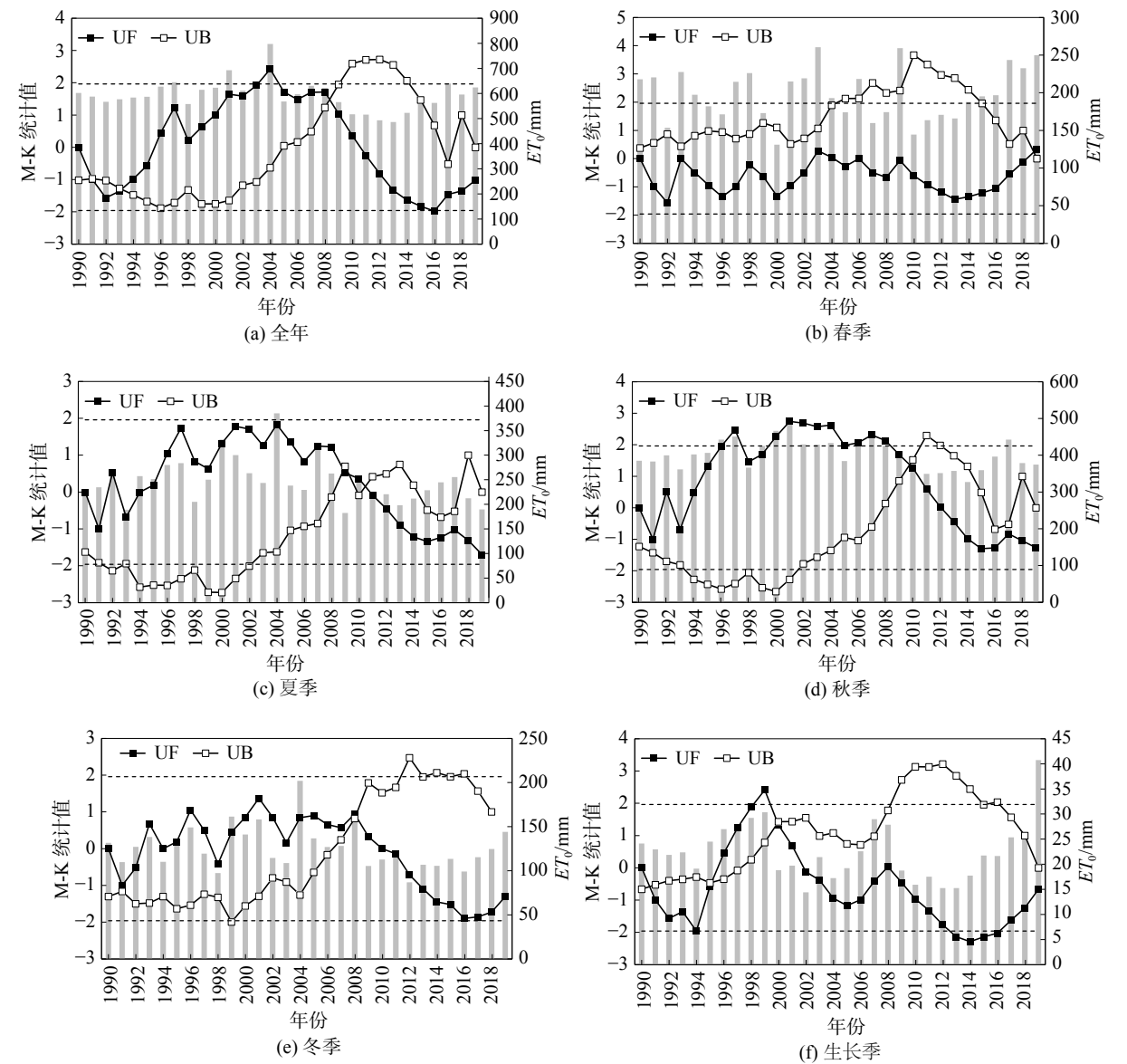


图3 黑龙江省不同时间尺度 ET_0 的变化(UF 和 UB 代表 $z=\pm 1.96$ 的统计量序列曲线)

Fig. 3 Temporal variations of seasonal ET_0 in Heilongjiang Province

为更好描述 1990—2019 年不同时间段黑龙江省各气象因子的变化趋势和显著性特征,趋势变化程度用气候倾向率表示(表 1),利用 M-K 趋势检验法分析多年变化趋势是否显著。由表 1 可知,平均气温、最高气温和最低气温在春季、夏季、生长季和全年均呈现出增加趋势,最低温度在夏季以 $0.516\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的变化速率上升,且通过 95% 显著性检验,在生长季气温均通过 99% 显著性检验。但在夏季和作物生长季出现明显蒸发悖论现象,即当气温呈显著上升趋势时, ET_0 却呈现下降趋势。这是由于 ET_0 不仅仅受气温变化的单因素影响,还受平均风速和气压等气象因子共同作用。平均风速在不同期间均呈现出下降趋势,春季和夏季多年降低趋势速率分别为 -0.141 和 $-0.154\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}/10\text{ a}$,且通过 99% 显著性检验,秋季、生长季和全年平均风速降低趋势均通过 95% 显著性检验。相对湿度在不同时期呈现不同变化,在秋季、冬季和全年呈下降趋势,尤其在冬季下降趋势通过 99% 显著性检验,降低趋势速率为 $-1.968\%/10\text{ a}$ 。日照时数多年来变化不大,仅在夏冬两季呈上升趋势。平均气压在各时期均呈现下降趋势,全年下降趋势速率为 $-0.506\text{ kPa}/10\text{ a}$,通过 99% 显著性检验,春季、冬季和生长季均通过 95% 显著性检验。

表 1 黑龙江省不同时期 ET_0 及气象因子气候倾向率

Tab. 1 Climatic trend of ET_0 and meteorological factors in different periods in Heilongjiang Province

时期	ET_0 / (mm·(10 a) ⁻¹)	平均气温/ (℃·(10 a) ⁻¹)	最高气温/ (℃·(10 a) ⁻¹)	最低气温/ (℃·(10 a) ⁻¹)	平均风速/ (m·s ⁻¹ ·(10 a) ⁻¹)	相对湿度/ (%·(10 a) ⁻¹)	日照时数/ (h·(10 a) ⁻¹)	平均气压/ (kPa·(10 a) ⁻¹)
春季	3.120	0.608	0.555	0.850	-0.141**	0.407	-0.027	-0.712*
夏季	-13.060	0.285	0.246	0.516*	-0.154**	0.689	0.016	-0.293
秋季	-5.580	-0.371	-0.359	-0.620	-1.400*	-0.172	-0.085	-0.265
冬季	0.020	-0.235	-0.266	-0.328	-0.560	-1.968**	0.066	-0.753*
生长季	-12.490	0.324**	0.319**	0.479**	-1.403*	0.541	-0.021	-0.382*
全年	-15.500	0.072	0.044	0.105	-1.227*	-0.261	-0.008	-0.506**

注: **表示显著性水平 $\alpha=0.01$; *表示显著性水平 $\alpha=0.05$; 未标注表示无显著性。

2.1.2 空间变化特征 结合研究区域实际蒸散变化情况,将多年平均蒸散量高于 690 mm 的地区称为高蒸散区,600~690 mm 的称为次高蒸散区,低于 470 mm 的称为低蒸散区。图 4 为 30 年来黑龙江省 ET_0 空间分布特征及变化率。由图 4 可知,北部属低蒸散区,多年蒸散值在各时期都较低,高蒸散区在西南部,主要站点包括泰来、肇州、龙江和齐齐哈尔。由图 4(a) 可知,全年蒸散量由西北部向西南和东南地区呈现递增趋势,最高值出现在泰来站为 849.21 mm,最低值在呼中站为 337.06 mm。由图 4(b) 可知,春季在佳木斯、勃利和鸡西区域出现次高蒸散区。由图 4(c) 可知,夏季次高蒸散区向东部偏移,区域中心站点为富锦站,蒸散值为 307.89 mm。全区分布趋势变化受纬度和地势影响。由图 4(d) 可知,秋季蒸散从西北部到东南部依次递增,西部和东部蒸散值较中部高,高蒸散区向东南方向转移,在鸡西、勃利、宝清出现仅次于泰来的次高蒸散区。由图 4(e) 可知,冬季 ET_0 由西北向东南递增,高蒸散区向东南偏移,最高蒸散值出现在鸡西为 40.38 mm。由图 4(f) 可知,作物生长季蒸散变化趋势与全年基本一致,高蒸散区蒸散量在 500.83~556.71 mm 内变化。

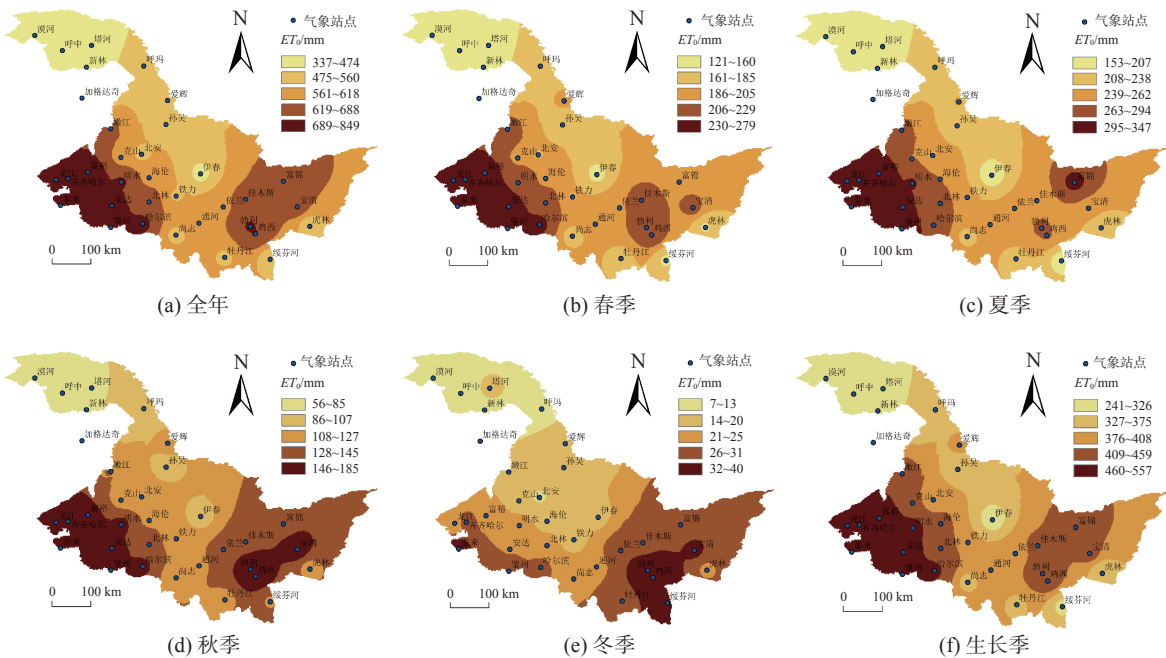


图 4 黑龙江省 1990—2019 年不同时期 ET_0 变化

Fig. 4 Proportion of ET_0 in different periods from 1990 to 2019 in Heilongjiang Province

参考作物蒸散量的变化趋势特征与气象因子分布特征趋势密不可分。因此,利用 M-K 趋势检验方法计算出各站点多年气象因子统计量 Z 值,再运用克里金法将各气象站点气象因子多年平均值在 ArcGIS 中

进行空间插值,得到黑龙江省多年平均气象因子空间分布规律,结果如图 5 所示。图 5 中 (a)~(c) 依次为平均气温、最高气温和最低气温的多年变化趋势,气温总体分布规律为由北向南递增且表现为上升趋势,在空间上体现高度一致性。经检验平均气温在漠河、孙吴、北林和尚志的变化趋势显著增加,最高气温在漠河、塔河和爱辉显著增加,其余站点变化趋势不显著,但大多站点呈上升趋势。研究结果印证了在全球变暖的大环境下导致大部分站点温度呈上升趋势。然而,最低气温在呼玛和新林表现为显著下降趋势,这与整体上升趋势相反,但不影响整体呈上升趋势。同样表现出上升趋势的气象因子为饱和水汽压差,如图 5(g),由于不同地理位置地势不同,饱和水汽压差的分布在站点间表现出较大差异,研究区内 22 个站点呈增加趋势其中 66.7% 的站点通过 95% 显著性检验。如图 5(d) 风速分布由中部向东部和西部逐渐增加,站点间变化差异性较明显,整体呈显著下降趋势,34 个站点中有 24 个呈下降趋势通过 95% 显著性检验的站点占 62.5%。相对湿度变化趋势如图 5(e),中部地区向两侧地区递减,整体呈下降趋势,仅富锦站呈显著上升趋势。日照时数如图 5(f) 全省变化范围为 6.3~8.8 h,超过半数站点通过显著性检验呈下降趋势。如图 5(h) 平均气压多年来呈显著减小趋势,有 29 个站点呈减小趋势,58.6% 的站点通过了 95% 显著性检验。净辐射值是根据太阳赤纬角和地理纬度由公式计算得出,因此站点位置对其变化有一定影响,如图 5(i) 净辐射分布随纬度升高而降低,多年来呈显著下降趋势,仅在虎林站呈显著上升趋势。

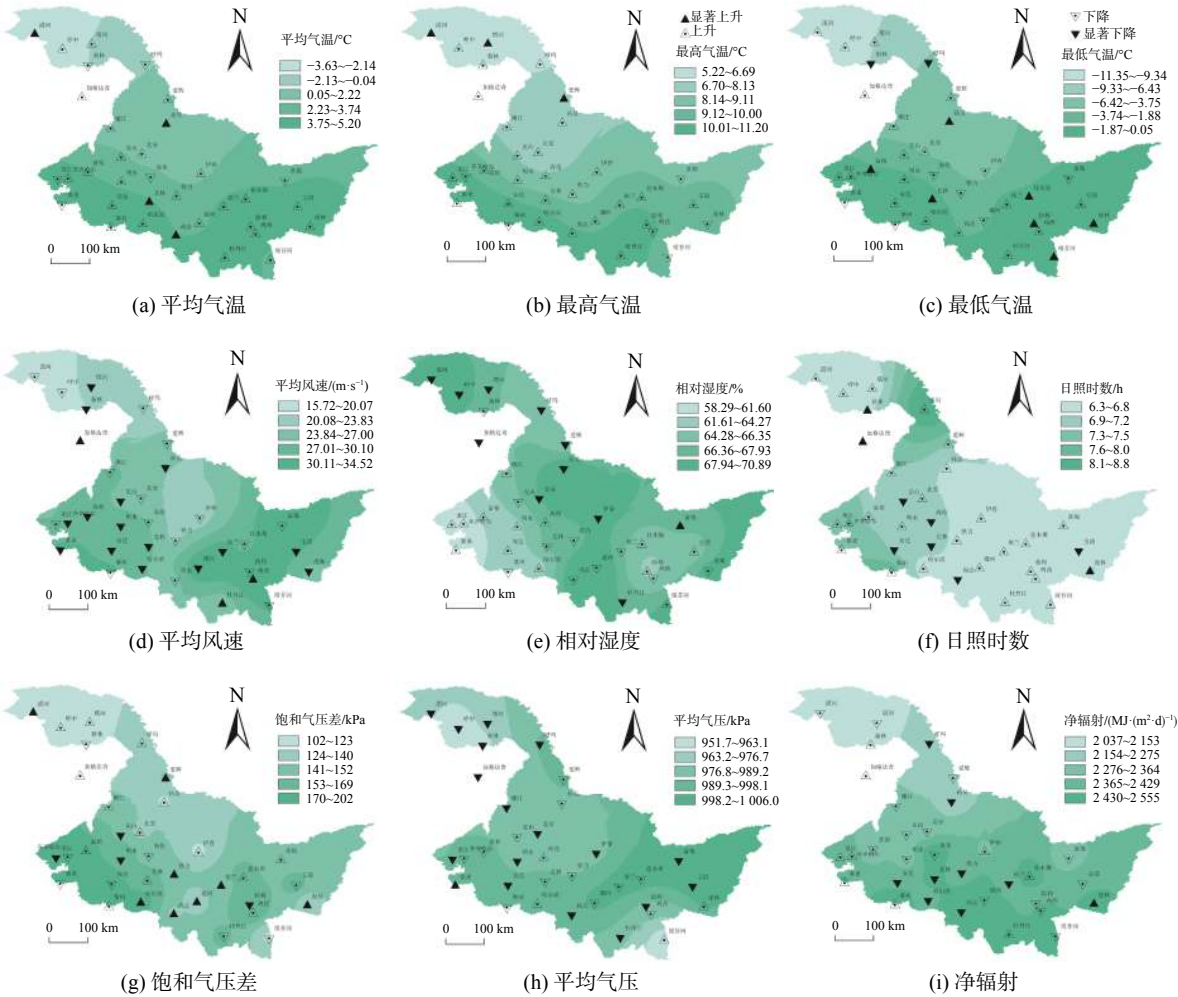


图 5 黑龙江省 1990—2019 年各气象因子变化趋势

Fig. 5 Variation trend of meteorological factors in Heilongjiang Province from 1990 to 2019

综合年内各时期 ET_0 空间分布变化规律和年内各气象因子变化趋势, 年内 ET_0 变化分布规律与平均风速和饱和气压均有一定相似之处, 但具体分布有差异。全省多年平均相对湿度呈下降趋势, 与全球变暖而引起空气中水分含量下降有关。由于全球变暖使相对湿度受到影响, 尤其在北方冬季寒冷地区, 空气中水汽压与饱和水汽压之比也随之减少, 空气中水分含量下降, 导致相对湿度降低, 致使参考作物蒸散量出现小范围上升现象。但温度作为至关重要的影响因素, 对参考作物蒸散量变化起决定性作用, 同时, 纬度增加会加剧气候系统动力学变异性, 可能是由于太阳辐射角度随纬度升高而增加, 导致北部地区太阳辐射动力变异性更强, 而根据 P-M 公式计算参考作物蒸散量需要转换太阳辐射角度, 因此, 北部地区参考作物蒸散量变化较为复杂。故仍需探究参考作物蒸散量与气象因子的相关性。

2.2 ET_0 与气象因子的相关关系

为探究不同时期 ET_0 与各气象因子间的相应关系, 本文对黑龙江省 1990—2019 年不同时期 ET_0 与影响其变化的气象因子进行相关性分析, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 多年平均 ET_0 与最高气温正相关程度较高, 与相对湿度间存在密切负相关性, 即当相对湿度增加时, 多年平均 ET_0 呈减小趋势。基于不同气象因子共同作用, 在年尺度上, 相对湿度是引起参考作物蒸散量变化的主要因素, 在春夏秋冬及作物生长季气象因子影响 ET_0 的程度有所差异, 在春秋两季 ET_0 与最高气温、最低气温及日照时数呈显著正相关, 即随气温和日照时间的增加, 多年平均 ET_0 呈增加趋势, 而与相对湿度呈显著负相关。夏季 ET_0 出现蒸发悖论现象, 最低气温与多年平均 ET_0 呈显著负相关, 即气温上升反而使 ET_0 下降, 在冬季和生长季同样出现平均气温下降而多年平均 ET_0 上升的现象。这是由于太阳辐射、风速和饱和水汽压差不足抵消温度对 ET_0 的正贡献, 导致 ET_0 随着温度上升出现下降趋势。当弱变暖信号足够强时, 相对湿度持续降低将抵消部分地区风速的负相关性, 导致 ET_0 增加。在夏季和作物生长季, 平均风速对此时期 ET_0 呈显著正相关。在各时期平均气压与多年平均 ET_0 相关程度均呈不显著相关。在不同时期内各气象因子与多年平均 ET_0 的相关关系时间差异较为粗略, 故需进一步明确多年平均日 ET_0 与多年平均日气象因子间的相关性。

表 2 不同时期 ET_0 与各气象因子相关关系
Tab. 2 Correlation between ET_0 and meteorological factors in different periods

时期	平均气温	最高气温	最低气温	平均风速	相对湿度	日照时数	平均气压
春季	0.377*	0.771***	0.568**	0.272	-0.773***	0.529**	-0.028
夏季	-0.064	0.252	-0.363*	0.486**	-0.812***	0.277	-0.066
秋季	0.271	0.638***	0.637***	0.306	-0.481**	0.706***	-0.230
冬季	-0.395*	0.106	0.186	0.310	-0.136	0.138	0.193
生长季	-0.004	0.212	-0.365*	0.519**	-0.834**	0.253	-0.163
全年	0.195	0.383*	0.046	0.440*	-0.762***	0.198	-0.100

注: *表示显著性水平 $p<0.10$; **表示显著性水平 $p<0.05$; ***表示显著性水平 $p<0.01$ 。

为更详尽准确地刻画 ET_0 与气象因子在日时间尺度上的变化规律, 分析黑龙江省多年平均日参考作物蒸散量与各气象因子间的相关关系, 结果如图 6 所示。由图 6(a)~(c) 可知, 气温与多年平均日参考作物蒸散量间存在较强正相关性, 随着气温的升高, 多年平均日蒸散量也在上升; 由图 6(d) 可知, 相对湿度与多年平均日蒸散量呈较强负相关性, 表明相对湿度的变化对多年平均日蒸散量影响较大; 由图 6(e) 可知, 日照时数与多年平均日蒸散量相关程度较弱, 即日照时数变化对多年平均日蒸散量影响较低; 由图 6(f) 可知, 平均风速与多年平均日蒸散量间存在正向相关性, 风速越大多年平均日蒸散量越高。综上可知, 温度、日照时数、平均风速的增加均可导致多年平均日蒸散量增加, 而相对湿度的增加则使多年平均日蒸散量降低。由此得出, 多年平均日蒸散量受各气象因子共同影响。但在本研究区域对多年平均日蒸散量相关性较明显的气象因子为相对湿度和平均风速。

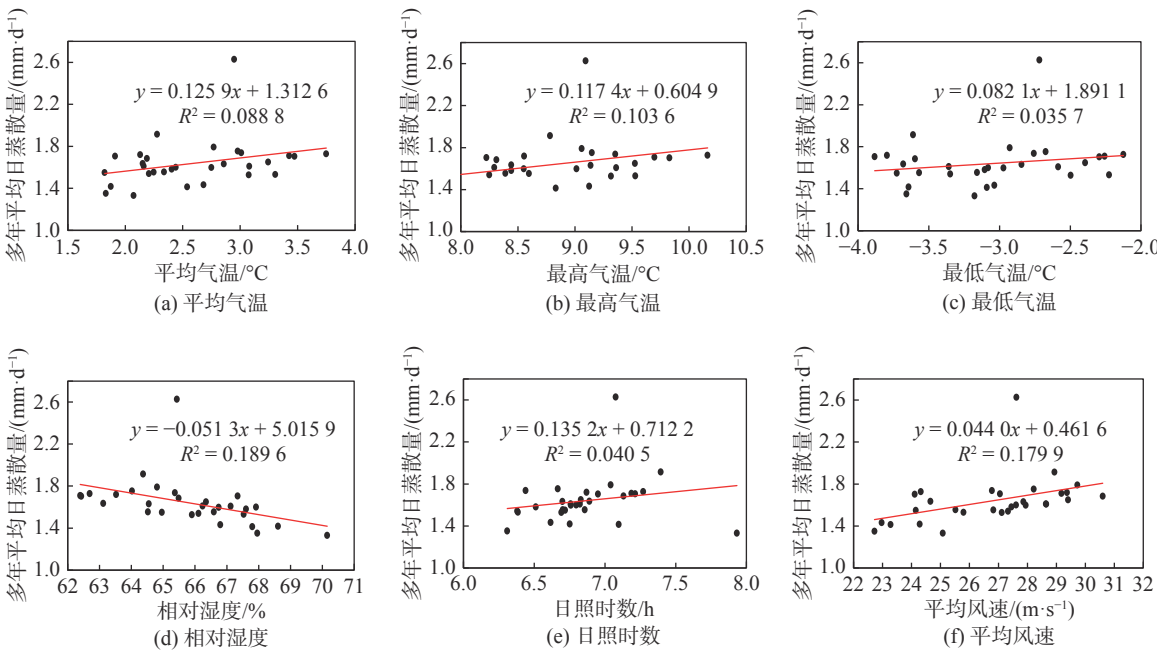


图 6 多年平均日 ET_0 与气象因子的相关关系

Fig. 6 Correlation diagram between perennial daily mean ET_0 and meteorological factors

2.3 未来 ET_0 变化趋势预测

为预测未来 ET_0 在不同时期空间上的变化趋势, 利用在水文分析上广泛应用的 R/S 方法计算 Hurst 指数, 结果如图 7 所示。

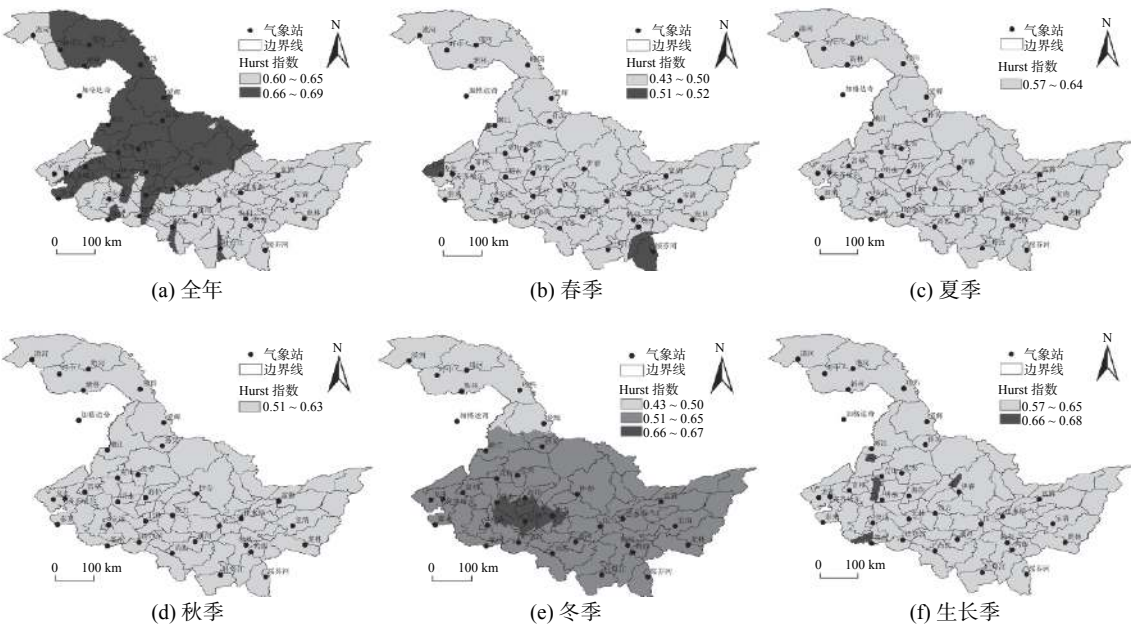


图 7 不同时期黑龙江省 ET_0 的 Hurst 指数

Fig. 7 Hurst exponent of ET_0 in Heilongjiang Province in different periods

Hurst 指数可表征未来一段时间内 ET_0 变化是否具有一定持续性, 如图 7(a) 全年 Hurst 指数变化范围为 0.60~0.69, 表明未来一段时间内 ET_0 变化趋势与研究时段内变化趋势一致, 在未来一段时间内 ET_0 也会

下降。根据 Hurst 指数分类标准, H 介于 0.50~0.65 时, 全年东南部地区 ET_0 呈弱持续性; 当 H 介于 0.65~0.69 时, ET_0 呈强持续性, 主要位于中部和北部部分地区。如图 7(b) 春季 Hurst 指数为 0.43~0.52, 依据 Hurst 指数分类标准, H 介于 0.35~0.50 时, 省内中部及东部地区 ET_0 表现出弱反持续性, 即与原来变化趋势相反, 呈现上升趋势, 当 H 介于 0.50~0.65 时, ET_0 呈现弱持续性, 分布在龙江站和绥芬河站。如图 7(c)~(d) 夏秋两季 Hurst 指数变化范围为 0.51~0.64, 表明全区域 ET_0 变化趋势与近年来均呈现弱持续性, 即在未未来夏秋两季各站点 ET_0 持续下降趋势不明显。如图 7(e) 所示, 冬季 Hurst 指数为 0.43~0.67, 整体变化以中部为中心区域向四周递减, 北部地区 ET_0 呈弱反持续性, 省内中部及西部地区 ET_0 呈强持续性, 东南地区 ET_0 呈弱持续性。如图 7(f) 所示, 作物生长季 Hurst 指数为 0.57~0.66, 全区域大部分 ET_0 呈弱持续性。

3 结 语

本文基于 34 个国家标准气象站点利用 P-M 公式对黑龙江省 1990—2019 年多年平均参考作物蒸散量及气象因子进行时空变化规律研究, 并分析影响参考作物蒸散量的主要气象因子, 得到以下结论:

(1) 黑龙江省 1990—2019 年多年平均日 ET_0 呈递减趋势, 递减幅度为 $-0.044 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 在年际上, 20 世纪 90 年代和 21 世纪 10 年代多年日均 ET_0 呈现上升趋势, 但 21 世纪 00 年代以 $-0.219 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 呈递减趋势。在不同时期 ET_0 年内变化存在较大差异, ET_0 由低到高依次为冬季、秋季、春季、夏季和作物生长季。

(2) 在空间上, 多年平均 ET_0 呈现西南多, 东北少的分布特点, 其中有 33.3% 的站点 ET_0 呈显著上升趋势, 47.4% 的站点 ET_0 呈显著下降趋势。在不同时期 ET_0 存在空间差异性, 冬季高蒸散区集中在以鸡西为中心点的东南部地区, 而其他季节高蒸散区集中在以泰来站为中心的西南地区。

(3) 影响全年 ET_0 的主要气象因子由高到低依次为相对湿度、风速和净辐射。3 个气象因子均呈递减趋势, 在中纬度地区相对湿度升高会削弱 ET_0 的变化, 随着气候变化的影响, 风速呈逐年下降趋势, 其中有 62.5% 的站点呈显著下降。净辐射显著下降的区域集中在以哈尔滨为中心的南部地区, 整体上呈显著下降趋势。

(4) 利用 Hurst 指数预测不同时期 ET_0 未来变化趋势, 黑龙江省 ET_0 的 Hurst 指数变化范围为 0.60~0.69, 表明未来一段时间内 ET_0 变化趋势与研究时段内变化趋势持续性较强即呈下降趋势。不同时期 Hurst 指数变化不同, 在春季和冬季均有部分地区 ET_0 呈弱反持续性变化趋势。

参 考 文 献:

- [1] MACKENZIE L, BAO K S, MAO L M, et al. Anthropogenic and climate-driven environmental change in the Songnen Plain of northeastern China over the past 200 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 511: 208-217.
- [2] MILLY P C D, DUNNE K A. Potential evapotranspiration and continental drying[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10): 946-949.
- [3] MOKHTAR A, HE H M, ALSAFADI K, et al. Evapotranspiration as a response to climate variability and ecosystem changes in Southwest, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(12): 312.
- [4] MCVICAR T R, RODERICK M L, DONOHUE R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416-417: 182-205.
- [5] JABLOUN M, SAHLI A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: application to Tunisia[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6): 707-715.
- [6] VICENTE-SERRANO S M, AZORIN-MOLINA C, SANCHEZ-LORENZO A, et al. Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011)[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(11): 8458-8480.
- [7] PATLE G T, SENGDO D, TAPAK M. Trends in major climatic parameters and sensitivity of evapotranspiration to climatic parameters in the eastern Himalayan region of Sikkim, India[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2020, 11(2): 491-502.

- [8] ARIZA-VILLAYERDE A B, PAVÓN-DOMÍNGUEZ P, CARMONA-CABEZAS R, et al. Joint multifractal analysis of air temperature, relative humidity and reference evapotranspiration in the middle zone of the Guadalquivir river valley[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107657.
- [9] LIU B J, HUANG Z Q, CHEN X H, et al. Effects of large-scale climate anomalies on crop reference evapotranspiration in the main grain-production area of China[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(3): 1195-1212.
- [10] ZHANG L, TRAORE S, CUI Y L, et al. Assessment of spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and controlling climate factors over decades in China using geospatial techniques[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 499-511.
- [11] GUAN X X, ZHANG J Y, YANG Q L, et al. Changing characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai River Basin, China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2021, 133: 97-108.
- [12] FAN Z X, THOMAS A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: Spatial and temporal variability over China 1960-2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 461-470.
- [13] WANG Z Z, YE A L, WANG L H, et al. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration and its climatic driving factors over China from 1979-2015[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 1096-1108.
- [14] 白桦, 鲁向晖, 杨筱筱, 等. 基于彭曼公式日均值时序分析的中国蒸发能力动态成因[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 235-244. (BAI Hua, LU Xianghui, YANG Xiaoxiao, et al. Attribution analysis on changes in evaporation capacity based on mean diurnal time-series analysis of penman equation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 235-244. (in Chinese))
- [15] ZHANG R, CHEN T T, CHI D C. Global sensitivity analysis of the standardized precipitation evapotranspiration index at different time scales in Jilin Province, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(5): 1713.
- [16] ZHAO J F, GUO J P. Multidecadal changes in moisture condition during climatic growing period of crops in Northeast China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 87-88: 28-42.
- [17] MA Q Y, ZHANG J Q, SUN C Y, et al. Changes of reference evapotranspiration and its relationship to dry/wet conditions based on the aridity index in the Songnen Grassland, Northeast China[J]. *Water*, 2017, 9(5): 316.
- [18] 聂堂哲, 张忠学, 齐智娟, 等. 1960—2015年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 279-290. (NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rice water requirement in Heilongjiang Province during 1960—2015[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 279-290. (in Chinese))
- [19] 姜宇, 杜崇, 孙海宁, 等. 气候变化条件下黑龙江省作物生长季潜在蒸散发量时空变化特征及其敏感性分析[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(5): 6-9. (JIANG Yu, DU Chong, SUN Haining, et al. Temporal and spatial variations of potential evapotranspiration and their sensitivity in crop growth season in Heilongjiang province under climate change[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(5): 6-9. (in Chinese))
- [20] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 4-20.
- [21] 张亮亮, 曹永强, 朱明明. 近50年辽宁省大雨与暴雨时空变化特征分析[J]. *水利水运工程学报*, 2017(1): 49-56. (ZHANG Liangliang, CAO Yongqiang, ZHU Mingming. Spatiotemporal variation characteristics of heavy rainfall and rainstorm in Liaoning Province over past 50 years[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(1): 49-56. (in Chinese))
- [22] 管晓祥, 金君良, 黄爱明, 等. 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2019(5): 36-43. (GUAN Xiaoxiang, JIN Junliang, HUANG Aiming, et al. Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 36-43. (in Chinese))
- [23] 刘娟, 陈涛涛, 迟道才. 基于Daniel及Mann-Kendall检验的辽西北地区降雨量趋势分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2014, 45(5): 599-603. (LIU Juan, CHEN Taotao, CHI Daocai. Rainfall trend analysis of the northwest Liaoning Province based on Daniel and Mann-Kendall test[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2014, 45(5): 599-603. (in Chinese))
- [24] 王小杰, 姜仁贵, 解建仓, 等. 渭河干流径流变化趋势及突变分析[J]. *水利水运工程学报*, 2019(2): 33-40. (WANG Xiaojie, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Analysis of variation trend and abrupt point of runoff in the mainstream of Weihe River Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(2): 33-40. (in Chinese))

Analysis of reference crop evapotranspiration changes and meteorological factors in Heilongjiang Province

WANG Zilong¹, LIU Ying¹, JIANG Qiuxiang¹, LI Shiqiang², CHAI Xun³, HE Xin¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Hydrology and Water Resources Center, Harbin 150001, China; 3. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited Management Training Center, Harbin 150030, China)

Abstract: To explore the temporal and spatial variation of reference crop evapotranspiration and the change of influencing factors in mid-latitude cold regions, the response relationship between reference crop evapotranspiration and various meteorological factors was revealed. Based on the data of 34 standard meteorological stations in Heilongjiang Province, daily reference crop evapotranspiration was calculated by the Penman-Monteith formula. Using the methods of cumulative departure curve, climate tendency rate, trend analysis and mutation test (Mann-Kendall test), and Hurst exponent, the spatial and temporal variation characteristics of reference crop evapotranspiration in Heilongjiang Province and the response relationship between diversified key meteorologic factors were analyzed, and the leading causes for the dissimilitude identified. The results show that the average reference crop evapotranspiration in Heilongjiang Province from 1990 to 2019 exhibited a moderating trend as a whole; the relative humidity was the main meteorological factor affecting evapotranspiration of reference crops in spring, while the average temperature in winter was that leading to the variation of reference crop evapotranspiration. In the entire province, the high evapotranspiration areas are concentrated in the southwest, with Tailai as the center, while the low evapotranspiration areas are concentrated in the northwest, with Huzhong as the center. The main meteorological factors that affect reference crop evapotranspiration changes in the southern region of Heilongjiang Province are mean wind speed, maximum air temperature, and minimum air temperature. The main meteorological factor that affects the change of reference crop evapotranspiration in the northern region is relative humidity, which refers to the ratio of the vapor pressure of water in the air to the saturated vapor pressure of water at the same temperature and pressure. The prediction of a future variation trend proves that the Hurst exponent in Heilongjiang Province is between 0.60 and 0.69, indicating that the future change of reference crop evapotranspiration will be similar to the same present downward trend as well as a certain degree of sustainability.

Key words: reference crop evapotranspiration; meteorological factors; Penman-Monteith formula; spatiotemporal variability; Heilongjiang Province