

三江平原 ET_0 时空特征及其未来情景下预测研究

邢贞相^{1,2} 王红利¹ 王欣蕾³ 喻熠¹ 段维义¹ 付强^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江省河湖长制保障中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 参考作物蒸发量(Reference crop evapotranspiration, ET_0)的预测对作物需水量计算与田间水分管理具有重大意义,可为农业节水和水资源高效利用提供重要的科学依据。基于三江平原6个气象站1961—2010年逐日气象资料,采用Penman-Monteith(P-M)公式计算 ET_0 ,对历史期(1961—2010年) ET_0 及相关气象要素的时空特征进行分析;依据美国国家环境预报中心再分析数据以及大气环流模型(GCM)中加拿大CanESM2模式的预报因子日序列的输出数据,采用统计降尺度模型(SDSM)对未来RCP4.5和RCP8.5两种排放情景下的 ET_0 进行预测。结果表明:历史期 ET_0 呈上升趋势,多年年平均气温与 ET_0 趋势相同,而年平均风速、相对湿度和净辐射整体呈下降趋势,空间分布上多年年平均 ET_0 总体表现为中部高于周边、西部高于东部的趋势;模拟精度检验方面,基于CanESM2模式下historical情景模拟的 ET_0 模拟值与P-M公式的 ET_0 计算值进行检验,两者对应率定期+验证期(1961—2005年)的纳什效率系数(NSE)为0.46~0.61,决定系数 R^2 为0.53~0.61,说明SDSM模拟效果较好。未来2011—2100年年内 ET_0 变化中,两种情景下2011—2040年、2041—2070年、2071—2100年3个未来时段月平均日值的变化趋势与历史期基本一致,均似开口向下的抛物线状,且表现为不同程度的上升趋势;未来2011—2100年年际 ET_0 变化中,未来 ET_0 较历史期为上升趋势,RCP4.5情景下3个未来时段较历史期分别增加11.11%、18.70%、20.24%,其中2011—2040年时段多年 ET_0 为较明显上升趋势,2041—2070年、2071—2100年时段总体为较缓下降趋势;RCP8.5情景下3个时段较历史期分别增加13.01%、24.05%、34.46%,3个时段内多年 ET_0 均为上升趋势。研究区未来 ET_0 的升高可能导致水资源短缺问题进一步加剧,研究结果可为研究区水资源优化管理和灌溉制度制定提供科学参考。

关键词: 参考作物蒸发量;三江平原;Penman-Monteith公式;统计降尺度模型(SDSM);趋势分析

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)06-0328-12



Spatiotemporal Characteristics and Prediction under Future Scenarios of ET_0 in Sanjiang Plain

XING Zhenxiang^{1,2} WANG Hongli¹ WANG Xinlei³ YU Yi¹ DUAN Weiyi¹ FU Qiang^{1,2}

(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, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. Heilongjiang Provincial River and Lake Mayor System Security Center, Harbin 150001, China)

Abstract: The prediction of reference crop evapotranspiration (ET_0) is great significant for crop water requirement calculation and field water management, which can provide an important scientific basis for agricultural water conservation and efficient use of water resources. Based on the day-by-day meteorological data of six meteorological stations in the Sanjiang Plain from 1961 to 2010, the Penman-Monteith formula was used to calculate ET_0 and analyze the spatiotemporal characteristics of ET_0 and related meteorological elements from 1961 to 2010; based on the NCEP reanalysis data and the output

收稿日期: 2022-10-05 修回日期: 2023-02-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51979038、51825901)、国家重点研发计划项目(2017YFC0406004)、黑龙江省自然科学基金项目(E2015024)和黑龙江省水文图集修编项目(SWJFS-2018-009)
作者简介: 邢贞相(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: zxxing@neau.edu.cn
通信作者: 王欣蕾(1986—),女,高级工程师,主要从事水资源与河湖健康研究,E-mail: wxlei_xx@163.com

data of the daily series of the CanESM2 forecast factor of the atmospheric circulation model, the statistical downscaling model (SDSM) was used to predict ET_0 under two emission scenarios, RCP4.5 and RCP8.5. The results showed that the ET_0 from 1961 to 2010 showed an increasing trend, the multi-year annual mean temperature and ET_0 trend were the same, while the annual mean wind speed, relative humidity and net radiation showed an overall decreasing trend, and the spatial distribution of multi-year annual mean ET_0 showed a general trend that the central part was higher than the periphery, and the western part was higher than the eastern part; in terms of simulation accuracy test, the ET_0 simulation values of “historical” simulation under CanESM2 model and the calculated values of the P – M formula corresponded to the Nash efficiency coefficient (NSE) range of 0.46 ~ 0.61 and the coefficient of determination R^2 range of 0.53 ~ 0.61 for the regular + validation period (1961—2005), which implied that the SDSM simulation was effective. The trends of the monthly average daily values of ET_0 in the three future time periods of 2011—2040, 2041—2070, and 2071—2100 under the two scenarios in the future 2011—2100 intra-annual ET_0 changes were relatively consistent, all resembling a parabola with a downward opening, with May – July significantly higher than the level of the historical period (1961—2010), January – April and August slightly higher than the historical period, and September – December gradually converged with the historical period. The future change of ET_0 between 2011—2100 would on an upward trend compared with the historical period, and the three time periods of 2011—2040, 2041—2070, and 2071—2100 under RCP4.5 scenario would be increased by 11.11%, 18.70%, and 20.24%, respectively, compared with the historical period, with the multi-year ET_0 in the time period of 2011—2040 on a more obvious upward trend. The overall downward trend would slower in the 2041—2070 and 2071—2100 time periods; the three time periods under the RCP8.5 scenario would be increased by 13.01%, 24.05%, and 34.46%, respectively, compared with the historical period, and the multi-year ET_0 would on the rise in all three time periods. The future increase of ET_0 in the study area may lead to aggravation of water shortage problem, and the results of the study may provide scientific reference for optimal water resources management and irrigation system formulation in the study area.

Key words: ET_0 ; Sanjiang Plain; Penman – Monteith formula; SDSM; trend analysis

0 引言

参考作物蒸发量(ET_0)是计算作物需水量和评价水资源的重要参数^[1-3]。在现有的几种经验方法中,联合国粮食及农业组织(FAO)采用了 Penman – Monteith(P – M)公式作为标准公式,该公式被认为是在各种气候条件下准确估算 ET_0 的最优选和最理想的方法^[4-5]。20 世纪 50 年代以来,全球气候变化问题较之前更为突出^[6],且 2000—2010 年期间的排放增速比之前 30 年中的任何 10 年都要快^[7]。气候变暖加剧的同时,风速、辐射和相对湿度等气象要素及受其影响显著的径流、蒸发量等水文要素的变化明显^[8-9]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第 5 次评估报告指出,未来大气中温室气体浓度将可能出现几种不同程度的变化,由此学者们也设定了多个不同的未来排放情景以进行相关研究^[10]。因此,研究气候变化背景下的 ET_0 变化特征十分必要,其对区域作物水分管理、作物需水量估算、灌溉制度优化等都具有重要意义^[11-12]。

在 ET_0 的估算与预测方面,近年来气候变化问题已引起世界范围广泛关注,与气候密切相关的区域蒸散研究的热度也随之上升,大气环流模型

(General circulation model,GCM)在其相关研究中起到重要作用。由于 GCM 网格尺度较大,分辨率较低,因此需要采用降尺度方法将其应用到局部地区。降尺度方法是指将低分辨率、大尺度的 GCM 输出信息转换为高分辨率、区域尺度的气象要素输出信息的统计方法^[13]。目前常用的统计降尺度方法主要有转换函数法(回归方法)、天气分析技术和天气发生器 3 种^[14]。统计降尺度模型(Statistical downscaling model,SDSM)是基于多元线性回归和天气发生器的降尺度方法^[15],具有基于 Windows 界面、模拟效果好、简单易行、方便应用、计算量小且不需要考虑边界条件对于模型预测结果的影响等优点而被广泛地应用于解决 GCM 精度不足与预报量降尺度模拟的问题^[16]。近年来,SDSM 在农业、气候等相关领域的应用更为普遍。娄伟等^[17]在多种 GCM 模式集成的气候背景下,应用 SDSM 预估了泾河上游流域的未来降水变化;韩世亮等^[18]利用 SDSM 对 GCM 模式气候变化情景下的降水、气温数据进行空间降尺度处理,驱动水文模型并分析了气候变化对未来发电调度过程的影响;李毅等^[19]运用 SDSM,预测 2015—2099 年高排放和低排放两种气候情景下新疆地区各气象站点棉花和甜菜的日作物需水量(Crop water requirement, ET_c)时间序列,发现新疆历

史及未来的棉花和甜菜 ET_0 均不同程度下降。

三江平原是黑龙江地区主要的农业种植区,近年来受气候变化影响,区域内气候灾害频发且持续时间长,水资源供需矛盾十分突出。在气候变化影响下,分析研究区 ET_0 及其相关气候要素的时空特征并预测未来 ET_0 对于水资源优化管理以及灌溉制度科学制定具有重要意义^[20]。本文基于三江平原 6 个气象站 1961—2010 年逐日气象资料,采用 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发量 ET_0 ,对 1961—2010 年 ET_0 及气象要素的变化特征进行分析,并依据 NCEP 再分析数据以及大气环流模式 CanESM2 预报因子数据,采用 SDSM 对未来 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下的 ET_0 进行预测。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况及数据来源

三江平原(图 1)位于黑龙江省东北部(45°01′~48°27′N, 130°13′~135°05′E),总面积 $1.089 \times 10^5 \text{ km}^2$,耕地面积占黑龙江省总面积的 44.85%^[21],且近年来在全国耕地面积减少的背景下,三江平原耕地面积依旧表现出增加的趋势^[22]。三江平原地区属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,夏季炎热湿润,冬季严寒干燥^[23]。地势低平,由西南向东北倾斜,平均海拔 50~60 m,区域内分布多个国家气象站点,气象数据较易准确获得。本区域地表水及地下水资源丰富,受作物特性和生长环境影响,水稻高产稳产,是我国重要粮食产区^[24-25]。

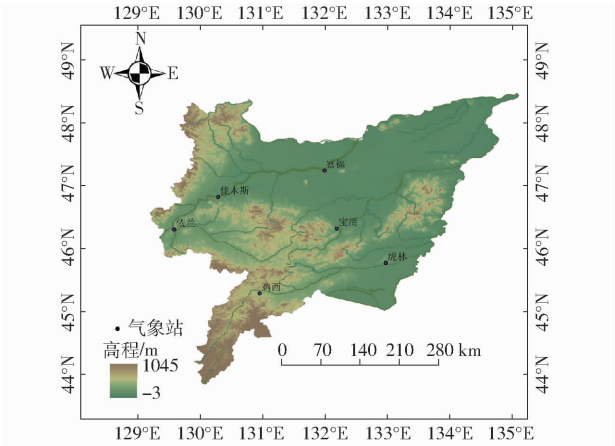


图 1 研究区域位置图

Fig.1 Location of Sanjiang Plain

本文所用数据主要为历史 ET_0 计算与未来 ET_0 模拟服务。P-M 公式计算历史 ET_0 所用资料数据为实测气象站点数据,SDSM 模拟未来 ET_0 所用数据包括两种:即用于率定和检验模型模拟效果的美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)再分析数据以及用

于模拟未来 ET_0 的 GCM 预报因子日序列的输出数据,并要求实测气象站点资料与 NCEP 资料数据长度一致,GCM 数据采用加拿大 CanESM2 模式输出的预报因子日序列数据。为使实测气象数据与 NCEP 再分析数据、CanESM2 模式数据的时间序列相匹配,并便于对未来 ET_0 进行研究分析,本文对于数据资料与模拟结果的时段选取如下:实测气象数据选用 1961—2010 年作为历史期,进行 ET_0 及相关气象要素值的计算与分析;未来 ET_0 模拟结果则选取 2011—2100 年并以 30 年为跨度,将研究的未来全长时段划分为 2011—2040 年、2041—2070 年、2071—2100 年 3 个时段,从而对预测的未来 ET_0 进行相应分析与讨论。

实测气象数据为三江平原 6 个气象站(富锦站、佳木斯站、依兰站、宝清站、鸡西站、虎林站) 1961—2010 年的逐日气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、平均风速等,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。6 个气象站的分布见图 1。

NCEP 再分析数据以及大气环流模型 GCM 输出的数据均来源于加拿大气候影响情景网(<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=predcanesm2>),NCEP 再分析数据共包含 26 个因子,包括平均海平面气压、总降水量、地表比湿度、2 m 处的气温、50、85 kPa 的位势高度、比湿度、50、85、100 kPa 的风速、纬向风分量、经向风分量、真风相对涡量、风向、真风散度。

大气环流模型 GCM 预报因子日序列的输出数据采用加拿大 CanESM2 模式数据,CanESM2 模式包括 historical 情景(1961—2005 年预报因子日序列的输出数据)以及代表低浓度温室气体排放的 RCP4.5 和高浓度温室气体排放的 RCP8.5 两种未来气候情景,预报因子与 NCEP 相同。下载数据为经过重整的分辨率匹配的数据,分辨率为 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$ 。

1.2 研究方法

首先采用 P-M 公式计算三江平原 6 个气象站历史期(1961—2010 年)50 年的 ET_0 日值,并计算相应时间序列的年平均气温、平均风速、平均相对湿度和净辐射,采用 Mann-Kendall、Theil-Sen 斜率分析方法和反距离加权插值方法,探讨这些相关气候要素与 ET_0 的历史变化规律,进而分析三江平原多年 ET_0 时空变化特征。其次基于 1961—2005 年逐日气象站点资料计算出的 ET_0 实测值与 NCEP 再分析数据,运用 SDSM 建立模型,并检验其模拟效果和应用到 CanESM2 模式数据的传递适用性。最后利

用 CanESM2 模式中的 RCP4.5、RCP8.5 未来情景下预报因子日序列的输出数据,通过建立的 SDSM 进行模拟,预测两种情景下 2011—2100 年的未来 ET₀ 变化,分析三江平原研究区年内及年际的时空变化趋势,为三江平原水资源优化管理和灌溉制度制定提供科学依据。

1.2.1 Penman - Monteith 公式

采用联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的 Penman - Monteith 公式计算逐日参考作物蒸发量 ET₀^[26-27]。其表达式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

(1)

式中 ET₀——逐日参考作物蒸发量,mm/d
Δ——饱和水汽压与温度关系曲线的斜率
R_n——地表净辐射,MJ/(m²·d)
G——土壤热通量,MJ/(m²·d)
γ——湿度计常数
T——空气平均温度,℃
U₂——地面以上 2 m 处风速,m/s
e_s——空气饱和水汽压,kPa
e_a——空气实际水汽压,kPa

气象站所测风速的高度为地面以上 10 m 处,故需将其转换为地面以上 2 m 处的风速 U₂,转换公式为

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

(2)

式中 U_z——z 处风速,m/s
z——地面以上测量高度,取 10 m

1.2.2 TFPW - MK 趋势性检验法与 Theil - Sen 斜率分析方法

TFPW - MK 是一种改进的 Mann - Kendall 趋势检验方法。通过 TFPW 方法,剔除原始数据序列中显性趋势对自相关系数估计的影响,可更加准确地对数据序列进行 Mann - Kendall 趋势检验。该方法通过 Z 统计值来判别序列的整体变化趋势,当 Z > 0 时,序列整体呈上升趋势;当 Z < 0 时,序列整体呈下降趋势。Theil - Sen 斜率分析方法用于确定趋势的斜率,以此来估算序列的变化量。ET₀ 及相关气候要素的年际变化率以斜率 (Slope) 来表示,该方法可以减少数据异常值的影响,是一种稳健的非参数统计趋势计算方法。TFPW - MK 方法和 Theil - Sen 斜率分析方法的计算过程见文献[28 - 30]。

1.2.3 统计降尺度模型 (SDSM)

IPCC 在相关报告中指出,GCM 能够准确地预

估未来气候变化,但在应用其进行区域气候预测时,必须充分应用降尺度技术来解决空间尺度不匹配的问题^[31]。统计降尺度模型 (SDSM) 基于实测预报量与 NCEP 再分析数据中的预报因子建立经验统计关系,再应用 GCM 未来情景下的预报因子数据模拟未来 ET₀ 的预报量。SDSM 是一个基于天气发生器和多元线性回归 2 种方法的统计降尺度模型,其核心是确定 NCEP 再分析数据中预报因子与站点尺度的预报量 (ET₀) 之间的统计关系,进而对 ET₀ 进行预测,因此预报因子的选择一定程度上决定了降尺度的效果。本文采用统计降尺度技术 (SDSM) 生成未来 ET₀ 的日序列,主要步骤包括:①将 1961—2005 年划分为率定期 (1961—1990 年) 和验证期 (1991—2005 年) 2 个阶段,基于率定期预报量 (实测 ET₀) 与 NCEP 预报因子数据,利用 SDSM 筛选出最优预报因子,从而与 ET₀ 实测值建立经验统计关系,即对多元回归方程的参数进行确定。②将建立的率定期模型应用至验证期 NCEP 预报因子数据,根据模拟出的 ET₀ 模拟值与 P - M 公式计算的 ET₀ 实测值,对建立的 SDSM 模拟精度进行验证,采用纳什效率系数 (NSE) 和决定系数 R² 进行模拟精度检验。③利用率定期 + 验证期 (1961—2005 年) 实测 ET₀ 与 NCEP 预报因子建立的 SDSM,以 CanESM2 模式的 historical 历史情景预报因子作为输入进行模拟,依据 NSE 和 R²,检验输入由 NCEP 转变为 GCM 数据模拟的传递适用性。④以 CanESM2 模式 RCP4.5、RCP8.5 未来情景的预报因子数据作为输入,利用由率定期 + 验证期实测 ET₀ 与筛选出的 NCEP 预报因子建立完成的 SDSM,生成两种情景下 2006—2100 年的 ET₀ 日序列,选取 2011—2100 年作为未来全长时段进行分析。SDSM 模拟流程图见图 2。

2 结果与分析

2.1 1961—2010 年 ET₀ 及气象要素时空变化特征

2.1.1 ET₀ 及气象要素时间变化趋势

三江平原各气象站 ET₀ 及相关气象要素的 TFPW - MK 趋势检验与 Theil - Sen 斜率分析结果见表 1,根据表 1,对三江平原 ET₀ 及主要气象要素 1961—2010 年的多年变化趋势进行分析。经比较,P - M 公式计算的三江平原 6 个气象站 (宝清、富锦、虎林、鸡西、佳木斯、依兰) 历史期 50 年 (1961—2010 年) 的 ET₀,与相关研究结果基本一致^[32-33]。对于多年 ET₀ 情况,6 个气象站均呈上升趋势,上升速率平均值为 0.35 mm/a。三江平原 6 个站年平均气温均呈显著上升趋势,平均上升速率为 0.035 4℃/a;三江平原 6 个站年平均风速总体呈下

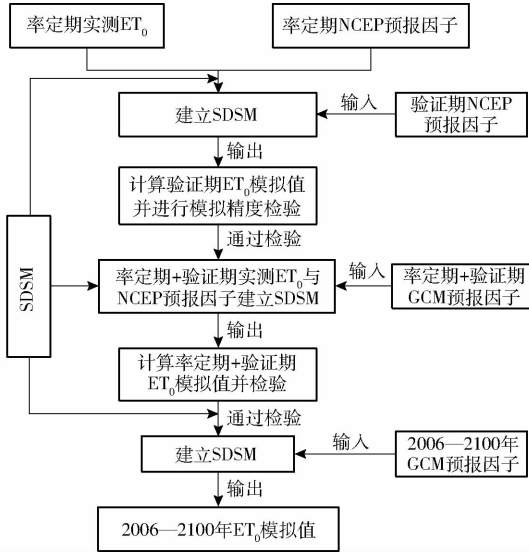


图2 基于SDSM的ET₀模拟流程图

Fig. 2 Flow chart of ET₀ simulation based on SDSM

降趋势,平均下降速率为 $-0.0159\text{ m}/(\text{s}\cdot\text{a})$,其中

宝清、富锦、虎林和佳木斯4个站下降趋势显著;三江平原6个站年平均相对湿度总体呈下降趋势,平均下降速率为 $-0.0294\%/a$,其中宝清和佳木斯下降趋势显著。三江平原6个站年平均净辐射总体呈下降趋势,平均下降速率为 $-0.0024\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{a})$,除鸡西下降趋势显著外,其他站的变化趋势不显著。

由表1可以看出,三江平原1961—2010年ET₀的变化趋势均不显著,故对三江平原1961—2010年ET₀进行滑动平均分析。三江平原1961—2010年ET₀的5年滑动平均过程线见图3,由图3可见,三江平原1961—1974年趋势呈波动性变化,即无明显上升或下降,1975—1979年呈上升趋势,1980—1984年呈下降趋势,1985—2010年继续表现为波动性变化。综上,三江平原1975—1984年期间ET₀的趋势变化较明显,其他时期变化趋势基本不大。

表1 ET₀及相关气象要素的M-K趋势检验与Theil-Sen斜率分析结果

Tab. 1 Results of M-K trend test and Theil-Sen slope analysis for ET₀ and related meteorological elements

气象站	平均气温		平均风速		平均相对湿度		平均净辐射		ET ₀	
	Z	Slope/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)	Z	Slope/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	Z	Slope/ ($\%\cdot\text{a}^{-1}$)	Z	Slope/ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	Z	Slope/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
宝清	4.52*	0.040 1	-7.90*	-0.022 8	-2.74*	-0.094 5	-1.03	-0.002 1	0.56	0.441 0
富锦	5.02*	0.043 9	-2.18*	-0.011 3	-0.03	-0.001 1	-0.82	-0.001 9	0.45	0.337 2
虎林	4.21*	0.033 2	-3.82*	-0.030 3	-0.27	-0.016 4	0.01	0.000 1	0.23	0.152 1
鸡西	3.63*	0.029 5	0.67	0.002 8	0.22	0.009 2	-2.81*	-0.007 7	0.64	0.345 3
佳木斯	4.21*	0.041 1	-2.43*	-0.020 7	-2.03*	-0.089 1	-1.37	-0.002 7	0.80	0.538 6
依兰	5.63*	0.032 9	-1.59	-0.012 8	0.40	0.015 8	-0.01	-0.000 2	0.36	0.274 5

注: *表示变化趋势显著;统计量Z为正表示上升趋势,Z为负表示下降趋势。

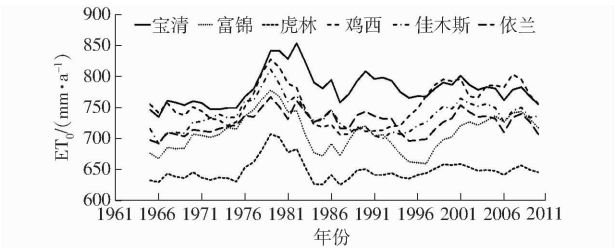


图3 三江平原1961—2010年ET₀的5年滑动平均过程线

Fig. 3 Five-year moving average of ET₀ in Sanjiang Plain from 1961 to 2010

2.1.2 ET₀及气象要素空间分布特征

ET₀及气象要素空间分布如图4所示。图4a表明,三江平原1961—2010年6个气象站ET₀多年年平均范围为647.05~777.54 mm/a,平均值为724.17 mm/a,虎林站多年平均ET₀最小,为647.05 mm/a,ET₀最高值位于三江平原地区的宝清站,为777.54 mm/a。由图4a可以得出,三江平原中部及西南部为高值区,东南部即虎林站所在地区为低值区,总体上呈中部高于周边、西部高于东部的

趋势。

图4b表明,三江平原1961—2010年6个气象站气温多年年平均范围为3.30~4.24℃,平均值为3.74℃,富锦站多年平均气温最低,为3.30℃,鸡西站最高,达到4.24℃。由图4b可看出,三江平原的西南部鸡西站、中部宝清站附近地区为高值区,但该地区并未出现因海拔较高而导致平均气温较低的现象,其主要原因可能是由于该地区纬度较低,加之旱田面积较大、土壤湿度较低使温度场降温效能减弱,故该地区平均气温较高;富锦站所在的中北部地区由于纬度较高、沼泽率高,导致该地区温度场降温效能增强,又加之冬季蒙古高压冷气流由北部凹形的黑龙江河谷吹送而至,使得该地区平均气温较低。三江平原多年平均气温总体上呈现南高北低的趋势。

图4c表明,三江平原1961—2010年6个气象站风速多年年平均范围为2.29~3.00 m/s,平均值为2.59 m/s;多年平均风速最低值为2.29 m/s(虎

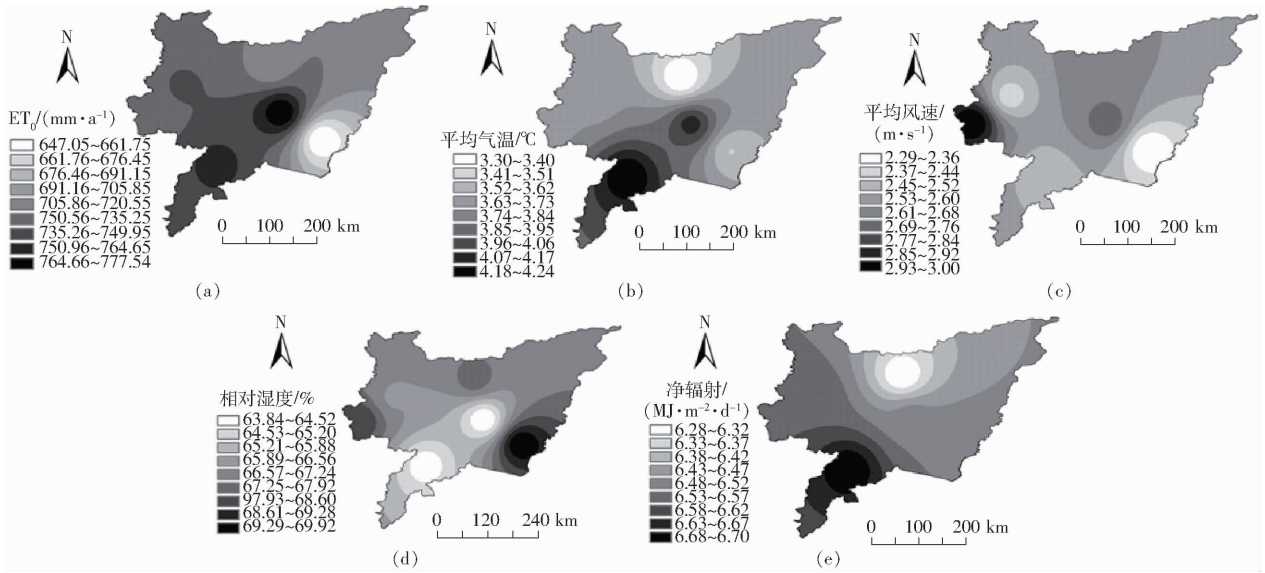


图 4 ET_0 及相关气候要素空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of ET_0 and related climatic elements

林站),最高值为 3.00 m/s(依兰站),由于依兰站三面环山,受地形影响,其多年平均风速相对较高。由图 4c 可看出,多年平均风速高值区位于三江平原的西部依兰地区周边,低值区位于南部、东南部及佳木斯站周边地区,总体上表现为:除西部依兰站为明显高值区外,其他地区整体上呈现北高南低的趋势。其中宝清站附近地区因位于完达山西北部,受山脉影响,其风速较大;完达山脉延伸至富锦境内,形成少量的孤山丘陵,且城海拔 538.7 m 的乌尔古力山与城西海拔 472.8 m 的别拉音子山遥相呼应,又加之冬季受蒙古高压冷气流影响,盛行北风,使得处于低海拔平原区的富锦站周边区域的平均风速反而略高于海拔较高的鸡西站地区。

图 4d 表明,三江平原 1961—2010 年 6 个气象站相对湿度多年年平均范围为 63.84%~69.92%,平均值为 66.73%,宝清站多年平均相对湿度最低,为 63.84%,最高值位于三江平原地区的虎林站,为 69.92%。由图 4d 可看出,高值区位于三江平原的东南部虎林地区和西部依兰地区附近,中部以北的三江平原 1/2 左右的区域相对湿度居中,中部及西南地区为低值区,总体上表现为:东西两边局部偏高,其他地区呈现北高南低的趋势。

图 4e 表明,三江平原 1961—2010 年 6 个气象站净辐射多年年平均范围为 6.28~6.70 MJ/($m^2 \cdot d$),平均值为 6.52 MJ/($m^2 \cdot d$),富锦站附近地区多年平均净辐射最低,为 6.28 MJ/($m^2 \cdot d$),最高值位于三江平原地区的鸡西站,为 6.70 MJ/($m^2 \cdot d$)。由图 4e 可看出,三江平原多年净辐射表现为由南到北逐渐递减的趋势。

综上所述,1961—2010 年多年平均 ET_0 呈上升

趋势,多年平均气温与 ET_0 趋势相同,然而平均风速、相对湿度和净辐射整体呈下降趋势,这可在一定程度上说明三江平原地区平均气温对 ET_0 有增进作用,平均风速、相对湿度、净辐射对 ET_0 有一定的抑制作用。 ET_0 的空间分布受平均气温、平均风速、相对湿度、太阳净辐射等气象要素的综合影响,不同地理位置的 ET_0 差异比较明显,总体上来看,海拔高的地区相应 ET_0 也随之较高,且三江平原 ET_0 呈现中部高于周边、西部高于东部的趋势。

2.2 SDSM 模拟与检验

以研究区各个气象站点的 ET_0 为预报量,以 NCEP 再分析数据的 26 个预报因子(表 2)作为备选因子,建立预报量 ET_0 与预报因子之间的统计关系,通过 SDSM 模型 Screen Variables 模块依据预报量与备选因子相关性优选出各站点 ET_0 的最优预报因子,筛选结果如表 3 所示。

表 2 NCEP 再分析数据的 26 个预报因子

Tab. 2 Totally 26 meteorological factors of NCEP reanalyzed data

预报因子	编码	预报因子	编码
平均海平面气压	mslp	50 kPa 真风散度	p5zh
100 kPa 风速	p1_f	85 kPa 位势高度	P850
100 kPa 纬向风分量	p1_u	85 kPa 风速	p8_f
100 kPa 经向风分量	p1_v	85 kPa 纬向风分量	p8_u
100 kPa 真风相对涡量	p1_z	85 kPa 经向风分量	p8_v
100 kPa 风向	p1_th	85 kPa 真风相对涡量	p8_z
100 kPa 真风散度	p1_zh	85 kPa 风向	p8_th
50 kPa 位势高度	p500	85 kPa 真风散度	p8_zh
50 kPa 风速	p5_f	总降水量	prep
50 kPa 纬向风分量	p5_u	50 kPa 比湿度	s500
50 kPa 经向风分量	p5_v	85 kPa 比湿度	s850
50 kPa 真风相对涡量	p5_z	地表比湿度	shum
50 kPa 风向	p5th	2 m 处气温	temp

表 3 预报因子筛选结果

Tab.3 Screening results of predictors	
站点	ET ₀ 预报因子
宝清	p1_u、p1_v、p5_zh、p8_zh、temp
富锦	p1_v、p8_zh、temp
虎林	p1_u、p5_zh、p8_zh、temp
鸡西	p1_u、p1_v、p5_zh、p8_zh、temp
佳木斯	p1_u、p1_v、p1_zh、p5_zh、p8_f、temp
依兰	p1_u、p1_v、p5_zh、p8_zh、temp

SDSM 对三江平原各气象站的 ET₀模拟精度检验结果见表 4。检验过程分两步,即模型模拟效果检验和模型应用的传递适应性检验。由表 4 可知,率定期(1961—1990 年),以 NCEP 预报因子作为输入数据进行模拟的 ET₀模拟值与 P-M 公式计算的 ET₀的 NSE 为 0.79~0.83, R² 为 0.80~0.84;验证期(1991—2005 年)的 NSE 为 0.75~0.81, R² 为 0.77~0.82,据此说明基于率定期预报量 ET₀与 NCEP 预报因子建立的模型模拟效果较好。率定期+验证期(1961—2005 年),以 CanESM2 模式中的 historical 历史情景预报因子作为输入数据模拟的 ET₀模拟值与 P-M 公式计算的 ET₀的 NSE 为 0.46~0.61, R² 为 0.53~0.61,此模拟结果的精度较前者略有降低,但精度与已有研究成果中的 ET₀模拟精度相当^[34-35],因此可采用 GCM 预报因子替代 NCEP 预报因子用于未来情景 ET₀的预报。

表 4 ET₀模拟值与 P-M 公式计算值的纳什效率系数及决定系数

Tab.4 Nash efficiency coefficient and deterministic coefficient for ET ₀ simulated value and calculated value by P-M formula						
气象站	NSE			R ²		
	率定期	验证期	率定期 + 验证期	率定期	验证期	率定期 + 验证期
	(1961—1990 年)	(1991—2005 年)	(1961—2005 年)	(1961—1990 年)	(1991—2005 年)	(1961—2005 年)
宝清	0.80	0.77	0.50	0.81	0.80	0.53
富锦	0.79	0.77	0.60	0.80	0.79	0.61
虎林	0.80	0.81	0.61	0.81	0.82	0.61
鸡西	0.83	0.79	0.52	0.84	0.81	0.56
佳木斯	0.82	0.75	0.46	0.83	0.77	0.53
依兰	0.79	0.77	0.54	0.80	0.79	0.56

综上所述,基于站点尺度 1961—2005 年的预报量 ET₀与 NCEP 再分析数据预报因子建立的 SDSM 模型和 GCM 未来情景的预报因子,可以用于未来 ET₀的预测。

2.3 三江平原未来 ET₀变幅及其空间分布

2.3.1 ET₀年内变化

图 5 为两种未来情景下三江平原 6 个气象站

ET₀年内变化趋势。图 5a 显示,RCP4.5 情景下 2011—2040 年、2041—2070 年、2071—2100 年 3 个未来时段中 ET₀月平均日值变化趋势基本一致,均为开口向下的二次抛物线状,且在趋势上普遍高于历史期 ET₀。各时段年内 ET₀月平均日值变化趋势中,未来时段 5—7 月明显高于历史期,1—4 月和 8 月略高于历史期,9—12 月逐渐与历史期趋于一致。历史期 ET₀在 6 月达到最大(平均值为 3.92 mm/d),1 月 ET₀最小(平均值为 0.22 mm/d);3 个未来时段的 ET₀最大值,除了依兰站 ET₀的 2071—2100 年时段出现在 5 月(4.97 mm/d)外,其余 5 个站点均出现在 6 月(各时段平均值分别为 4.77、5.03、5.05 mm/d),各时段 ET₀最小值均出现在 1 月(平均值分别为 0.25、0.27、0.26 mm/d)。RCP4.5 情景下 3 个未来时段及历史期 ET₀由大到小依次为 2071—2100 年、2041—2070 年、2011—2040 年、历史期,即 RCP4.5 情景下未来 ET₀呈增大趋势,且 2041—2070 年时段到 2071—2100 年时段的增幅趋势较不明显。

图 5b 为 RCP8.5 情景下三江平原 ET₀年内变化趋势。图 5b 显示,RCP8.5 情景下 3 个未来时段中 ET₀月平均日值变化趋势与 RCP4.5 情景相同,均为开口向下的二次抛物线状,而该情景下未来时段高于历史期 ET₀的趋势更为明显。各时段年内 ET₀月平均日值变化与 RCP4.5 情景相同。3 个时段 ET₀最大值均出现在 6 月(各时段平均值分别为 4.72、5.23、5.67 mm/d),3 个时段 ET₀最小值均出现在 1 月(各时段平均值分别为 0.24、0.28、0.31 mm/d)。RCP8.5 情景下 3 个未来时段及历史期 ET₀由大到小依次为 2071—2100 年、2041—2070 年、2011—2040 年、历史期,即 RCP8.5 情景下未来 ET₀呈逐渐增大趋势。

综上,两种情景下的 3 个未来时段 ET₀月平均日值的变化趋势较为一致,即年内变化均似开口向下的抛物线,其中 5—7 月明显高于历史期,1—4 月和 8 月略高于历史期,9—12 月逐渐与历史期趋于一致。对于年内 ET₀最大值,除了 RCP4.5 情景下依兰站的 2071—2100 年时段出现在 5 月外,其他两种情景下各个时段内的各站最大值均出现在 6 月;两种情景模式的最小值均出现在 1 月。整体上来看,RCP8.5 情景下的 ET₀高于 RCP4.5 情景下相对应时段的 ET₀。

2.3.2 ET₀变幅年际变化

三江平原 RCP4.5 未来情景下各气象站各时段 ET₀年平均值及变幅见表 5。由表 5 可知,3 个未来时段 ET₀年平均值与历史期相比较,分别增加

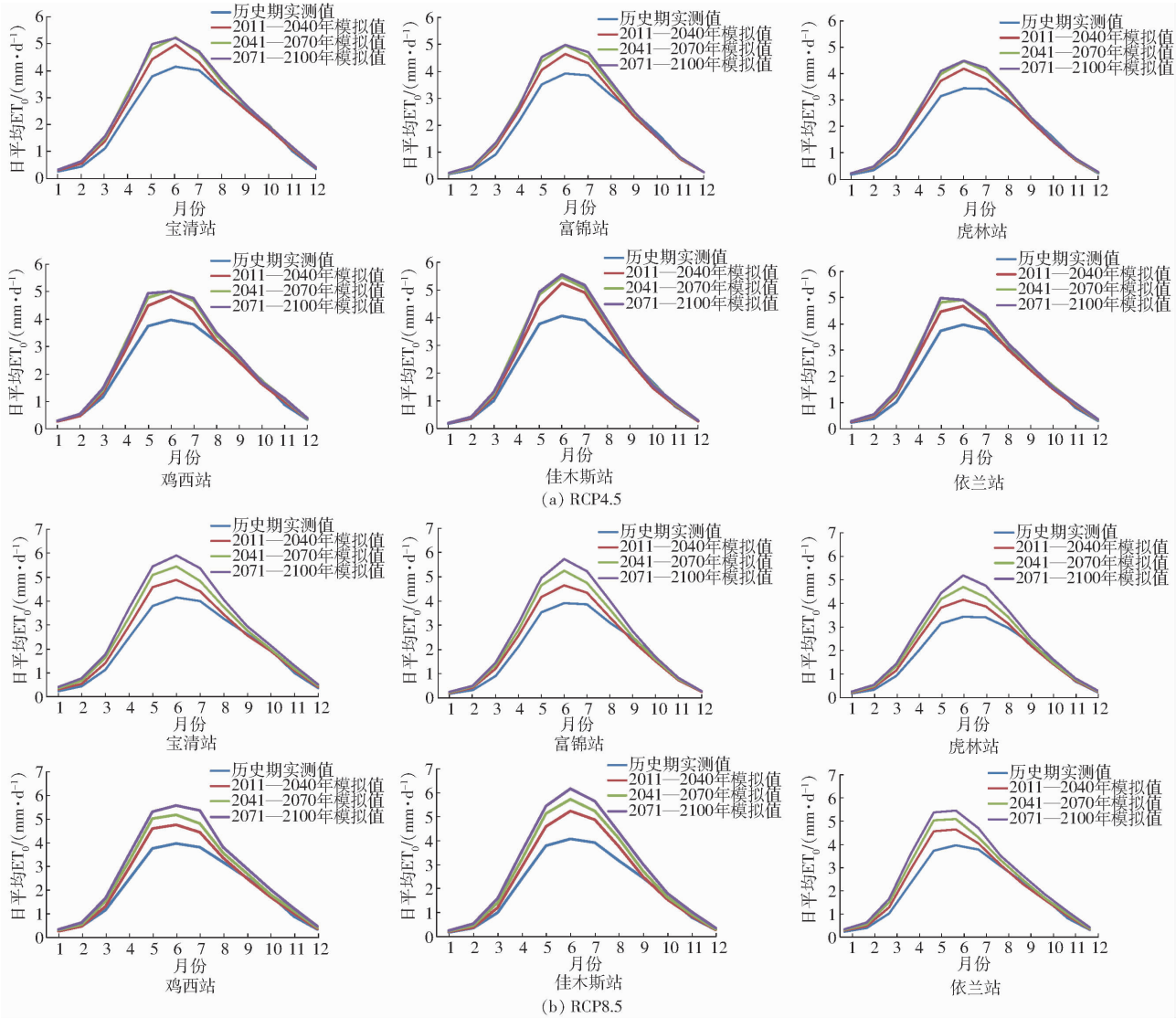


图 5 两种未来情景下三江平原 ET_0 年内变化曲线

Fig. 5 ET_0 intra-annual change in Sanjiang Plain under condition of two future scenarios

表 5 RCP4.5 未来情景下各气象站各时段 ET_0 的年平均值及变幅

气象站	历史期 ET_0	ET_0 变幅/%			ET_0 年平均值/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)		
	年平均值/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	2011—2040 年	2041—2070 年	2071—2100 年	2011—2040 年	2041—2070 年	2071—2100 年
宝清	777.54	9.93	18.40	19.59	854.74	920.59	929.89
富锦	707.52	9.98	17.06	19.29	778.12	828.24	844.03
虎林	647.05	11.04	18.69	20.67	718.48	768.01	780.81
鸡西	754.71	10.62	18.15	19.37	834.87	891.68	900.87
佳木斯	735.65	14.97	22.27	23.55	845.77	899.50	908.92
依兰	722.51	10.10	17.63	18.99	795.51	849.90	859.69

11.11%、18.70%、20.24%。在 RCP4.5 情景下,3 个未来时段 ET_0 年平均值均呈现上升趋势,且各时段与历史期相比,增幅逐渐增大,然而在 1961—2100 年整个时期中,各时段平均值与前一时段相比,增幅越来越小,这与图 5a 显示的逐渐贴近的变化趋势相吻合。在 2011—2040 年中,宝清、富锦、虎林、鸡西、依兰 5 个气象站的平均值增幅均为 10%

左右,但佳木斯站增幅明显高于其他 5 个气象站,为 14.97%;2041—2070 年和 2071—2100 年 2 个时段与 2011—2040 年较为相似,宝清、富锦、虎林、鸡西、依兰 5 个气象站的增幅分别为 18% 和 19% 左右,而该 2 个时段佳木斯站的增幅也明显高于其他 5 个站,分别为 22.27% 和 23.55%。RCP4.5 情景下 3 个时段的 ET_0 趋势见图 6,由图 6a~6c 可知,2011—

2040 年三江平原 6 个气象站 ET_0 均为上升趋势,且趋势较明显;2041—2070 年除富锦站有较缓的上升趋势外,其余 5 个气象站均为下降趋势;2071—2100 年则均为下降趋势。

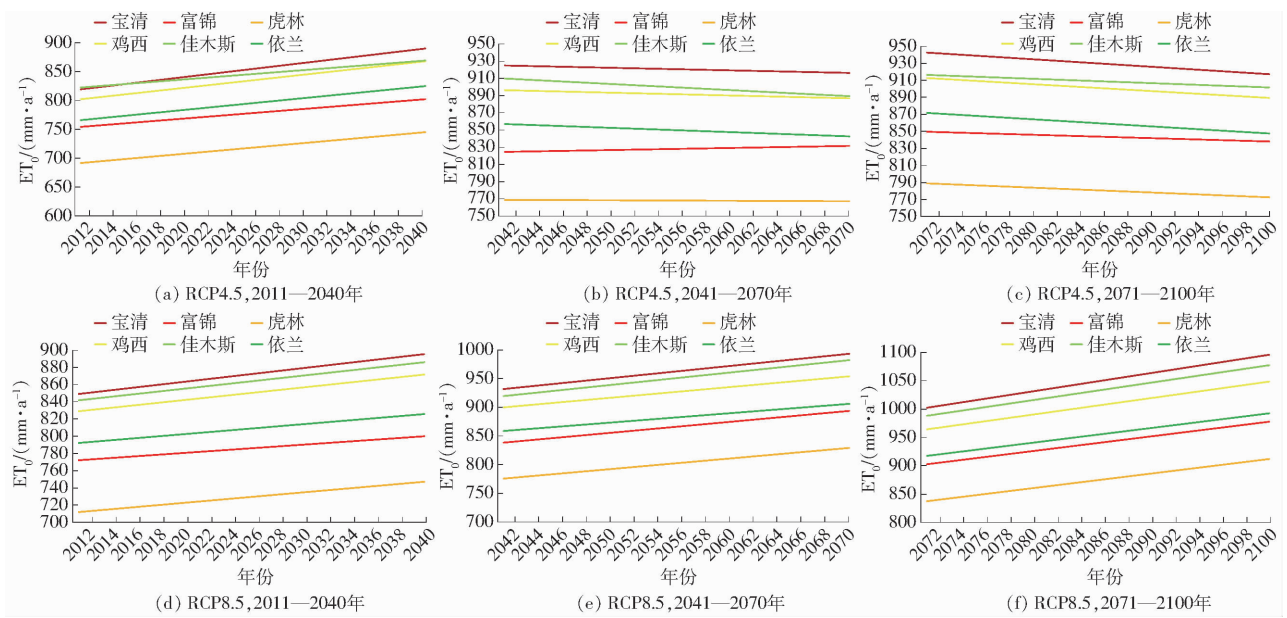


图 6 两种未来情景下各个时段的 ET_0 趋势

Fig. 6 ET_0 trend for each period under two future scenarios

RCP8.5 情景下各气象站各时段 ET_0 年平均值及变幅见表 6,表 6 显示,3 个未来时段 ET_0 年平均值与历史期相比较,分别增加 13.01%、24.05%、34.46%。在 RCP8.5 情景下,3 个时段 ET_0 均呈现增加趋势,且各时段与历史期相比,增幅逐渐增大。3 个时段中,6 个站平均值变幅情况同上述 RCP4.5 情景,即佳木斯站的增幅明显高于其他 5 个站(宝清、富锦、虎林、鸡西、依兰)。RCP8.5 情景下 3 个时段的 ET_0 趋势见图 6。由图 6d~6f 可知,3 个时段 ET_0 均为上升趋势,并且从 2011—2040 年到 2041—2070 年再到 2071—2100 年,上升趋势越来越明显,这与 RCP8.5 情景的高浓度排放设定存在密切的内在联系。

对两种情景进行比较分析:首先,在各时段 ET_0 平均值变幅方面,两种情景下 2011—2100 年变幅均

呈现增大的趋势,但 RCP8.5 较 RCP4.5 情景增幅更为明显;其次在 3 个未来时段 ET_0 趋势变化方面, RCP4.5 情景下 2041—2070 年、2071—2100 年总体上呈下降趋势,其余 4 个时间段(RCP4.5 情景的 2011—2040 年、RCP8.5 情景的 3 个时段)均为上升趋势。需要特别说明的是: RCP4.5 情景下 2041—2070 年、2071—2100 年 2 个时段内年际 ET_0 呈下降趋势并不与各时段平均值变幅的升高相矛盾,因为各个时段的年际趋势变化是相对于各个时段内的 ET_0 而得出的,而各时段平均值变幅的升高是相对于历史期而言的。RCP4.5 情景下 3 个时段 ET_0 平均值相对于历史期的增幅逐渐增大,而各时段的变幅与前一时段相比,增幅越来越小,这也更加印证了 RCP4.5 情景下 2041—2070 年、2071—2100 年 2 个时段内 ET_0 呈下降趋势的变化意义。

表 6 RCP8.5 未来情景下各气象站各时段 ET_0 的年平均值及变幅

Tab. 6 Mean value and variation for ET_0 at meteorological stations in different periods under RCP8.5 future scenarios							
气象站	历史期 ET_0	ET_0 变幅/%			ET_0 年平均值/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)		
	年平均值/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	2011—2040 年	2041—2070 年	2071—2100 年	2011—2040 年	2041—2070 年	2071—2100 年
宝清	777.54	12.19	23.77	34.90	872.30	962.36	1 048.90
富锦	707.52	11.13	22.39	32.85	786.25	865.97	939.97
虎林	647.05	12.75	24.02	35.16	729.53	802.47	874.55
鸡西	754.71	12.66	22.81	33.34	850.25	926.88	1 006.30
佳木斯	735.65	17.41	29.20	38.35	863.74	950.45	1 017.80
依兰	722.51	11.95	22.11	32.15	808.86	882.22	954.79

2.3.3 ET_0 变幅年际空间分布

三江平原两种情景下未来 ET_0 平均值变幅的时

空分布见图 7。图 7a 显示, RCP4.5 情景下三江平原未来 3 个时间段 ET_0 均呈现升高的趋势,且从

2011 年至 2100 年,随着时间推移,增幅也表现出逐渐增大的趋势。RCP4.5 情景下 3 个时段变幅的空间分布特征整体上表现较为一致,其中位于佳木斯站附近的西北部为高值区,增幅较其他地区最为明

显。高值区的范围表现为先增大后缩小,在 2071—2100 年中局部出现增幅最低值,如中北部富锦站、西部依兰站与西南部鸡西站附近等,其他地区增幅趋势居中。

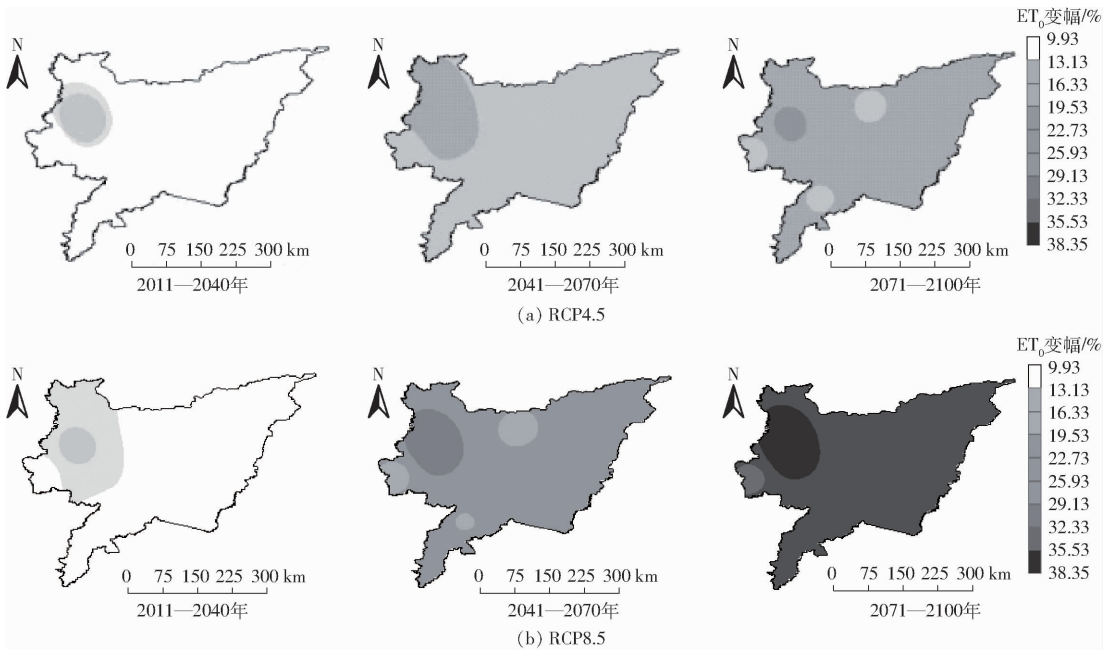


图 7 三江平原两种情景下未来 ET_0 变幅的空间分布
Fig. 7 Spatial distributions of ET_0 variation under two future scenarios in Sanjiang Plain

由图 7b 可知,RCP8.5 情景下三江平原未来 3 个时间段 ET_0 均呈上升趋势,且从 2011 年到 2100 年,整体上 ET_0 的增幅逐渐增大。其中以佳木斯站附近的西北部为高值区,其增幅最为明显,且该高值区的范围随着时间推移逐渐扩大。RCP8.5 情景的 2041—2070 年 ET_0 变幅空间分布与 RCP4.5 情景的 2071—2100 年较为相似,表现为佳木斯站附近的西北部为高值区,中北部富锦站、西部依兰站与西南部鸡西站附近等为低值区,其他地区增幅趋势居中,RCP8.5 情景较高的气温和 CO_2 等温室气体排放可能是导致其 ET_0 空间分布时段早于 RCP4.5 情景下相似 ET_0 空间分布对应时段的主要原因。

两种情景下的未来 ET_0 增幅整体上表现较为一致,但 RCP8.5 情景下 3 个时段的 ET_0 增幅普遍高于 RCP4.5 情景下相对应时段的 ET_0 增幅。RCP8.5 与 RCP4.5 情景下 ET_0 变幅的空间分布差异主要在于:相比于 RCP4.5 情景,对于 3 个时段,RCP8.5 情景下低值区的范围较 RCP4.5 情景逐渐缩小,也在一定程度上说明,在此排放情景下三江平原整体范围内 ET_0 增幅的增大趋势越来越明显。

另外,两种情景下 ET_0 增幅均以佳木斯站附近地区更为凸显,究其原因可能主要为:①气候方面,该区域年实际光照时数较大且降雨量较多,雨季晴天较多,为蒸散作用提供了较为丰富的水分和能

量供给。②地形地貌方面,该区域天然湿地广布,水系发达,植被覆盖率高,为蒸散作用提供了丰富的水分基础。此外,该区域低山丘陵较多,区域内的山前地带,含水层出露地表,地下水位埋深较浅,故其蒸散作用更为强烈。蒸散过程受气温影响较为明显,两种未来情景下的气温和 CO_2 等温室气体浓度均呈明显增大的趋势。综合以上两方面原因,在该地区的气候及地形地貌条件的基础上,加之未来气温和 CO_2 等温室气体的反馈作用下,该地区可形成影响区域 ET_0 变化的局部小气候,从而使得两种情景下 ET_0 增幅较其他地区更为明显,且高浓度排放情景下 RCP8.5 的 ET_0 增幅较低浓度排放情景 RCP4.5 更显著,进而使得区域蒸散发在未来情景下有所加快,水资源短缺和骤旱可能性加大。

3 结论

(1)三江平原 1961—2010 年 6 个气象站 ET_0 年平均范围为 647.05 ~ 777.54 mm/a,平均值为 724.17 mm/a。1961—2010 年多年年平均气温与 ET_0 趋势相同,呈上升趋势,而年平均风速、相对湿度和净辐射整体呈下降趋势,这可在一定程度上说明三江平原地区平均气温对 ET_0 有增进作用,平均风速、相对湿度、净辐射对 ET_0 有一定的抑制作用。 ET_0 的空间分布受平均气温、平均风速、相对湿度、

太阳净辐射等气象要素的综合影响,不同地理位置的 ET_0 差异比较明显,总体上来看,海拔高的地区相应 ET_0 也随之较高。其中三江平原中部及西南部为高值区,东南部即虎林站所在地区为低值区,整体上呈中部高于周边、西部高于东部的趋势。

(2)未来 2011—2100 年年内 ET_0 变化中,两种情景下的 3 个未来时段月平均日值变化趋势与历史期较为一致,均似开口向下的抛物线,且相比于历史期均有所升高。2011—2100 年 3 个未来时段中,RCP4.5 情景下各时段 ET_0 的平均值变幅与前一时段相比,增幅越来越小,而 RCP8.5 情景下 ET_0 增幅

上升趋势越来越大,这可能与 RCP8.5 情景的高浓度排放设定有关。

(3)未来 2011—2100 年 ET_0 的平均值变幅空间分布方面,RCP4.5、RCP8.5 两种情景整体上表现一致,但 RCP8.5 情景下未来 ET_0 增幅普遍高于 RCP4.5 情景下相应地区的 ET_0 增幅,整个时段的上升趋势也更明显;此外,两种未来情景下 ET_0 增幅均以佳木斯站附近地区更为凸显,说明未来佳木斯站附近地区的区域蒸散进一步增强,因而未来出现水资源短缺和骤旱的可能性有所增大,应加强对该区域水资源的高效利用与干旱监测。

参 考 文 献

[1] 强小嫚,蔡焕杰,孙景生,等. 陕西关中地区 ET_0 计算公式的适用性评价[J]. 农业工程学报,2012,28(20):121-127.
QIANG Xiaoman, CAI Huanjie, SUN Jingsheng, et al. Adaptability evaluation for reference evapotranspiration (ET_0) formulas in Guanzhong Region of Shaanxi[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 121-127. (in Chinese)

[2] 邢贞相,喻熠,李凤昱,等. 建三江主要作物需水量变化趋势与关键影响因子识别[J]. 农业机械学报,2022,53(7):308-315,346.
XING Zhenxiang, YU Yi, LI Fengyu, et al. Change trend and key influencing factors identification of main crops water demand in Jiansanjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 308-315, 346. (in Chinese)

[3] 李隆安,邱让建,刘春伟. 基于气温估算参考作物蒸散量方法的对比与改进[J]. 农业工程学报,2021,37(24):123-130.
LI Long'an, QIU Rangjian, LIU Chunwei. Change comparison and improvement of estimation models for the reference evapotranspiration using temperature data[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(24): 123-130. (in Chinese)

[4] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper(FAO), 1998.

[5] HEYDARI M M, AGHAMAJIDI R, BEYGIPOOR G, et al. Comparison and evaluation of 38 equations for estimation reference evapotranspiration in an arid region[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, 23(8): 1985-1996.

[6] Intergovernmental panel on climate change. Fifth assessment report(AR5)[EB/OL]. (2014-07-08) <http://www.Ipcc.ch>.

[7] 王柳,熊伟. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(21):138-146.
WANG Liu, XIONG Wei. Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 138-146. (in Chinese)

[8] IPCC. Climate change 2001: impacts adaptation and vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[9] WANG W G, SHAO Q X, PENG S Z, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences[J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): 113-122.

[10] IPCC 第五次评估报告第二、三工作组报告发布 气候变化影响无处不在[J]. 中国环境科学,2014,34(5):1292.

[11] PEREIRA L S. Water agriculture and food: challenges and issues[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 2985-2999.

[12] 王自奎,吴普特,赵西宁,等. 小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(21):72-81.
WANG Zikui, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Mathematical simulation of soil evaporation from wheat/maize intercropping field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 72-81. (in Chinese)

[13] 侯保俭,王渺林,傅华. 统计降尺度法在中国流域气候的应用进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012,30(6):1408-1411.
HOU Baojian, WANG Miaolin, FU Hua. Review on application of statistical downscaling techniques in China[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 30(6): 1408-1411. (in Chinese)

[14] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等. 气象资料的统计降尺度方法综述[J]. 地球科学进展,2011,26(8):837-847.
LIU Yonghe, GUO Weidong, FENG Jinming, et al. A summary of methods for statistical downscaling of meteorological data [J]. Advance in Earth Sciences, 2011, 26(8): 837-847. (in Chinese)

[15] AHMED K F, WANG G, SILANDER J, et al. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U. S. northeast[J]. Global Planetary Change, 2013, 100: 320-332.

[16] 张霞. 碧流河流域径流模拟及其对未来气候变化的响应研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.
ZHANG Xia. Runoff simulation in the Biliu River basin and its response to future climate change[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese)

[17] 娄伟,李致家,刘玉环. 多模式下泾河上游流域未来降水变化预估[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(6):1-16.
LOU Wei, LI Zhijia, LIU Yuhuan. Projection of future precipitation changes in upper Jinghe River basin using multiple models [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 1-16. (in Chinese)

[18] 韩世亮,陈泰霖. 气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):32-38.

HAN Shiliang, CHEN Tailin. Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 32–38. (in Chinese)

[19] 李毅,周牡丹. 新疆地区棉花和甜菜需水量的统计降尺度模型预测[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 70–79, 339–340.
LI Yi, ZHOU Mudan. Projections of water requirements of cotton and sugar beet in Xinjiang based on statistical downscaling model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(22): 70–79, 339–340. (in Chinese)

[20] 姚付启,董建华,范军亮,等. 基于数值天气预报后处理的参考作物蒸散量预报改进[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 293–303.
YAO Fuqi, DONG Jianhua, FAN Junliang, et al. Improvement of reference crop evapotranspiration forecasting based on numerical weather prediction post processing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 293–303. (in Chinese)

[21] 王倩,张郁,邹小娇. 基于 LMDI 的三江平原地区粮食增产影响因素研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(11): 103–109.
WANG Qian, ZHANG Yu, ZOU Xiaojiao. Study on the influencing factors of grain yield increase in Sanjiang Plain based on LMDI model[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(11): 103–109. (in Chinese)

[22] 周浩,雷国平,杨雪昕,等. RCPs 气候情景下三江平原典型流域耕地动态模拟[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 121–133.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin, et al. Simulation of cultivated land under RCPs scenarios in typical basin of Sanjiang Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 121–133. (in Chinese)

[23] 钱坤,陈梦婷,沈莹莹,等. 基于公共天气预报的三江平原 ET_0 预报模型比较及敏感性分析[J]. *节水灌溉*, 2021(4): 62–67.
QIAN Kun, CHEN Mengting, SHEN Yingying, et al. Comparison and sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration prediction models in the Sanjiang Plain based on public weather forecasting[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(4): 62–67. (in Chinese)

[24] 范星,陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(15): 6368–6380.
FAN Xing, CHEN Bin. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjiang Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6368–6380. (in Chinese)

[25] 束龙仓,王哲,袁亚杰,等. 近 40 年三江平原典型区土地利用变化及其对地下水的影响[J]. *水利学报*, 2021, 52(8): 896–906.
SHU Longcang, WANG Zhe, YUAN Yajie, et al. Land use change and its impact on groundwater in the typical district of Sanjiang Plain during the past 40 years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(8): 896–906. (in Chinese)

[26] 谢娟,栗晓玲. 基于 LMDI 的灌溉需水量变化影响因素分解[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 123–131.
XIE Juan, SU Xiaoling. Decomposition of factors affecting changes in irrigation water demand based on LMDI[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(7): 123–131. (in Chinese)

[27] 马亚强. 柴达木盆地生态需水量研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
MA Yaqiang. Study on ecological water demand in Qaidam Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)

[28] 章诞武,丛振涛,倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490–496.
ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparative analysis of trend test methods based on Chinese meteorological data[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490–496. (in Chinese)

[29] TALAEI P H, SABZIPARVAR A A, TABARI H. Observed changes in relative humidity and dew point temperature in coastal regions of Iran[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2012, 110(3): 385–393.

[30] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. *Global & Planetary Change*, 2013, 100: 172–182.

[31] 魏宾. 基于 SDSM 模型的新疆车尔臣河流域 ET_0 变化模拟[J]. *节水灌溉*, 2016(12): 108–111.
WEI Bin. Simulation of ET_0 change in Qarqan River Basin of Xinjiang based on SDSM model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(12): 108–111. (in Chinese)

[32] 戚颖,王斌,黄金柏,等. CRU 数据集在黑龙江省 ET_0 计算中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(4): 367–371.
QI Ying, WANG Bin, HUANG Jinbai, et al. Application of CRU dataset to calculation of ET_0 of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(4): 367–371. (in Chinese)

[33] 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. Spatio-temporal distribution characteristics of rice water demand in Heilongjiang Province from 1960 to 2015[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 279–290. (in Chinese)

[34] 宋悦,栗晓玲,牛纪苹,等. 陕西省参考作物蒸发蒸腾量的时空特征及其未来预测[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 225–234.
SONG Yue, SU Xiaoling, NIU Jiping, et al. Temporal and spatial characteristics and forecasting of reference crop evaporation in Shaanxi[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science)*, 2015, 43(9): 225–234. (in Chinese)

[35] LI Z, ZHENG F L, LIU W Z. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961—2009 and its projected changes during 2011—2099 on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154/155: 147–155.