

引用格式:孙婉馨,张黎,任小丽,等. 1998—2017年中国典型森林生态系统潜在蒸散的变化趋势及成因[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 920-932. [Sun W X, Zhang L, Ren X L, et al. Trends and influencing factors of potential evapotranspiration in typical forest ecosystems of China during 1998-2017[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 920-932.] DOI: 10.18402/resci.2020.05.10

1998—2017年中国典型森林生态系统潜在蒸散的变化趋势及成因

孙婉馨^{1,2,3}, 张黎^{1,2,4}, 任小丽^{1,2}, 何洪林^{1,2,4}, 吕妍^{1,2,3},
牛忠恩^{1,2,3}, 常清青^{1,2,3}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 国家生态科学数据中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:潜在蒸散(PET)是计算实际蒸散、评价区域干湿状况和合理规划水资源的关键因子。本文基于1998—2017年中国生态系统研究网络(CERN)11个森林生态系统定位研究站的逐日气象数据,分别采用Penman-Monteith和Priestley-Taylor两种方法计算各森林生态系统的潜在蒸散(PET_{PM} 和 PET_{PT}),分析近20年潜在蒸散年总量的变化趋势及成因,并量化了基于邻近国家气象站观测数据计算的 PET_{CMA} 偏差。两种方法均表明,近20年来7个森林生态系统的潜在蒸散呈下降趋势。风速是长白山温带针阔混交林和鹤山亚热带人工常绿阔叶林潜在蒸散变化的主导因子,而净辐射主导了其他9个森林的潜在蒸散变化。 PET_{CMA} 年总量较 PET_{PM} 偏高,主要是由于国家气象站下垫面的气温、风速和净辐射均高于森林定位研究站,而相对湿度偏低。北部和东部森林邻近气象站的风速和净辐射变化趋势偏高,导致 PET_{CMA} 变化趋势偏高,而其他森林邻近气象站 PET_{CMA} 变化趋势偏低主要源自相对湿度变化趋势偏高和净辐射变化趋势偏低。研究可为认识中国森林生态系统潜在蒸散的变化特征及其对气候变化的响应提供参考。

关键词:潜在蒸散;森林生态系统;变化趋势;气象因子;中国生态系统研究网络;Penman-Monteith方法;Priestley-Taylor方法

DOI :10.18402/resci.2020.05.10

1 引言

潜在蒸散(Potential Evapotranspiration, PET)表示在一定气象条件下,水分供应不受限制时,某一固定下垫面可能达到的最大蒸发蒸腾量^[1]。它是估算实际蒸散^[2]和作物需水量^[3]的基础,也是评价区域干湿状况^[4]和制定水资源管理决策^[5]的重要指标。PET的变化特征及其影响因素研究一直是国内外学者关注的热点问题^[6]。

20世纪50年代以来,随着全球变暖,包括中国在内的众多区域的蒸发皿蒸发量和PET的计算结果反而呈现出下降趋势^[7-9],中国区域太阳辐射的下降、风速的降低和相对湿度的增加被认为是引起PET下降的主要原因^[10-12]。例如,Zheng等^[12]发现日照时数是引起中国区域1960—2009年PET变化的重要因素;Wang等^[13]认为1961—2013年间中国区域PET的下降趋势由风速主导,其次是温度、日照

收稿日期:2019-10-07,修订日期:2020-03-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0500204);国家自然科学基金项目(31971512);中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-SW-STS-167)。

作者简介:孙婉馨,女,河北保定人,硕士生,研究方向为生态系统生态学。E-mail: sunwanxin95@126.com

通讯作者:张黎,女,安徽泾县人,高级工程师,博士,研究方向为生态系统生态学。E-mail: li.zhang@igsnr.ac.cn

2020年5月

时数和相对湿度;Liu等^[14]确定相对湿度是1960—2007年间全国尺度上对于PET变化最敏感的因素;Jiang等^[15]发现中国西南地区20世纪90年代前生长季PET的降低主要源自日照时数和风速的下降;Liu等^[16]认为1961—2014年间黄淮海平原PET的降低主要由相对湿度和日照时数引起。

以往研究往往基于气象部门的台站观测数据,采用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐的Penman-Monteith模型(PM)进行流域、国家和全球尺度PET的估算。由于森林结构和过程的复杂性以及数据的有限性,关于森林生态系统潜在蒸散的研究相对较少^[17-19]。已有研究表明,与FAO设定的参考作物相比,森林具有更大的叶面积指数、冠层导度和更低的反照率,因此PM方法可能会低估森林PET^[20,21]。利用PM方法计算森林潜在蒸散需要获取森林叶面积指数(LAI)和冠层导度的观测数据^[17],相对其他方法较为困难,且PET模拟值对植被参数差异的敏感性大于气候差异^[22]。也有研究^[20,21]认为,与PM、Hamon、Thornthwaite等方法相比,Priestley-Taylor方法估算森林PET的效果可能更好。并且,20世纪70年代末以来,随着中国城市化进程不断加快,许多原本位于野外的气象观测台站现多处于城镇边缘,甚至被动进入城市内部,气象观测环境的变化在一定程度上影响了气象观测要素的代表性,其观测数据存在着对温度的高估^[23]、相对湿度的低估^[24]等问题,无法准确表征自然生态系统的气象条件。由于这些偏差所引起的森林PET计算结果的不确定性尚不清楚。

本文基于中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)的11个野外森林生态系统台站近20年(1998—2017年)的长期气象观测资料,分别使用Penman-Monteith模型和Priestley-Taylor方法计算PET,定量分析了中国典型森林生态系统中的PET变化趋势及影响因素,量化了主要气象因子的贡献,并评价了基于国家气象台站观测数据计算的PET的偏差,为估算中国森林生态系统蒸散的变化特征及其对气候变化的响应提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文选用的中国11个森林生态系统跨越了温带、暖温带、亚热带和热带,林分类型包括混交林、针叶林、阔叶林和季雨林。图1展示了各森林生态系统的地理位置,表1列出了各森林生态系统的具体类型、海拔、年均温、年降水、优势种及土壤类型等信息。

1998—2017年11个森林生态系统的每日定位监测数据来自国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统(<http://www.cnern.org.cn/>),包括大气压、气温、相对湿度、10 m高度处风速和净辐射以及用来拟合短波辐射系数的日照时数。其中,茂县暖温带针阔混交林生态站、神农架常绿落叶阔叶混交林生态站和哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林生态站因加入CERN的时间较晚,数据的时间范围分别为2005—2017年、2008—2017年和2005—2017年。所有站点气象要素的有效数据比例为91.47%~100.00%。因异常和缺测导致的少量数据缺失,采用该站点当日的多年气象平均值插补。若数据缺失情况大于2个月,则利用CERN森林台站气象要素与周边邻近的中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)气象台站的逐日气象观测数

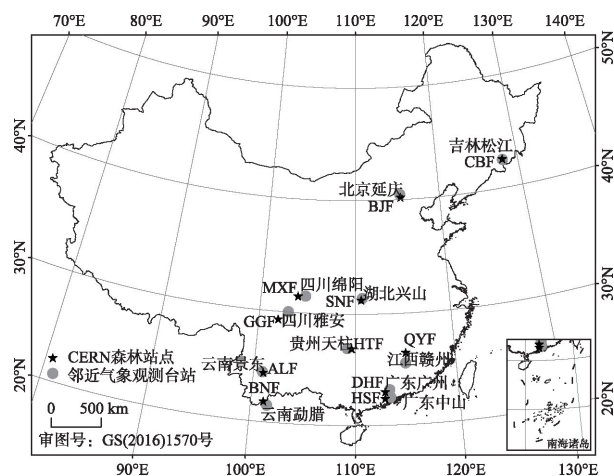


图1 中国11个典型森林生态系统地理位置示意图

Figure 1 Distribution of 11 typical forest ecosystems in China
注:国家气象台站的对应站点代码分别为:吉林松江-54285,北京延庆-54406,四川绵阳-56196,湖北兴山-57359,四川雅安-56287,江西赣州-57993,贵州天柱-57840,云南景东-56856,广东广州-59287,广东中山-59485,云南勐腊-56969。

表1 研究站点信息表

Table 1 Site characteristics of 11 typical forest ecosystem research stations

森林生态系统名称	海拔/m	年均温/°C	年降水/mm	优势种	土壤类型	参考文献
长白山温带针阔混交林(CBF)	801.00	3.62	727.93	蒙古栎、色木槭、红松、水曲柳	暗棕壤	文献[25]
北京暖温带落叶阔叶混交林(BJF)	1263.00	4.80	530.38	油松、华北落叶松、辽东栎	棕壤	文献[26]
茂县暖温带针阔混交林(MXF)	1826.00	9.30	825.20	云杉、红桦	棕壤	文献[27]
神农架亚热带常绿落叶阔叶混交林(SNF)	1750.00	10.64	1456.71	米心水青冈、锐齿槲栎、红桦	黄棕壤	文献[28]
贡嘎山亚高山暗针叶林(GGF)	3160.00	4.80	1860.50	峨眉冷杉、糙皮桦	暗棕壤	文献[29]
千烟洲亚热带人工常绿针叶林(QYF)	100.00	17.90	1489.00	湿地松、杉木、马尾松	红壤	文献[30]
会同亚热带次生常绿阔叶林(HTF)	700.00	16.47	1234.01	红栲、青冈、刨花楠	红壤、红黄壤	文献[31]
哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林(ALF)	2488.00	11.68	1728.54	木果石栎、多花含笑	黄棕壤	文献[32]
鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林(DHF)	290.00	22.25	1844.36	木荷、厚壳桂	赤红壤	文献[33]
鹤山亚热带人工常绿阔叶林(HSF)	80.00	21.98	1663.71	马占相思	赤红壤	文献[34]
西双版纳热带季雨林(BNF)	750.00	22.65	1396.70	番龙眼、千果榄仁	砖红壤	文献[35]

据的相关性进行插补。CERN森林台站与其邻近CMA台站的直线距离在4.96~136.75 km之间,平均相距62.01 km(图1)。国家气象台站的气象数据来自中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)。邻近国家气象台站的逐日气象数据还用于估算潜在蒸散,与基于CERN观测数据估算的潜在蒸散进行对比分析。

2.2 研究方法

2.2.1 潜在蒸散计算方法

(1) Penman-Momteith方法

采用1998年世界粮农组织(FAO)推荐的修正Penman-Momteith模型^[36](FAO56 PM)计算参考蒸散量,以该指标表示中国典型生态系统的潜在蒸散。该模型考虑了植被的生理特征,在全球范围内广泛应用^[37],其计算公式如下:

$$PET = \frac{0.408 \times k \times (R_{net} - G) + \gamma \times \frac{C_n}{T + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{k + \gamma \times (1 + C_d \times U_2)} \quad (1)$$

式中:PET是潜在蒸散(mm);k是温度随饱和水汽压变化的斜率; R_{net} 是净辐射(MJ/m^2);G是土壤热通量(MJ/m^2); γ 为湿度常数($kPa/^\circ C$); C_n 和 C_d 是由参考作物类型和计算时间步长确定的常数,在FAO56 PM公式中取值分别为900和0.34; T 为平均气温($^\circ C$), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa),

由 e_s 与相对湿度(%)的乘积计算得出; U_2 是2 m高度处风速(m/s),由10 m高处风速(U_{10} ,m/s)计算得:

$$U_2 = U_{10} \times \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (2)$$

在CERN台站,采用净辐射的观测数据输入公式(1)。对于CMA台站,通过FAO推荐方法进行净辐射的计算。

$$R_{net} = R_{ns} - R_{nl} \quad (3)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \times R_s \quad (4)$$

$$R_s = \left(a_s + b_s \times \frac{n}{N} \right) \times R_a \quad (5)$$

$$R_{nl} = \sigma \times \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] \times (0.34 - 0.14 \times \sqrt{e_a}) \times \left(1.35 \times \frac{R_s}{0.75 \times R_a} - 0.35 \right) \quad (6)$$

式中: R_{ns} 为短波净辐射; R_{nl} 为长波净辐射; α 为反照率,取值为0.23; R_s 为地面入射短波净辐射; a_s 为阴天时到达地球的太阳辐射比例,取值为0.25; b_s 为晴天时到达地球的太阳辐射比例,取值为0.50; n 为日照时数(h); N 为一天中太阳辐射的最大时间(h); R_a 为到达大气层的太阳辐射(MJ/m^2); σ 为Stefan-Boltzmann常数($4.903 \times 10^{-9} MJ/m^2 K^4 d$); $T_{max,K}$ 和 $T_{min,K}$ 分别为绝对温标的最高、最低温度($^\circ C$)。

(2) Priestley-Taylor方法

Priestley-Taylor方程(PT)是基于辐射的半经验

2020年5月

模型^[38],其计算公式如下:

$$\lambda PET = 1.26 \times \frac{k \times (R_n - G)}{k + \gamma} \quad (7)$$

式中: λ 为蒸发潜热系数(MJ/kg),取值为2.45;其他变量含义同式(1)。

2.2.2 敏感性分析

采用McCuen^[39]提出的敏感性系数法,量化PET计算结果对气象因子的敏感性(S),以消除气象因子量纲间的差异。计算公式为:

$$S_{v_i} = \lim_{v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta PET / PET}{\Delta v_i / v_i} \right) = \frac{\partial PET}{\partial v_i} \times \frac{v_i}{PET} \quad (8)$$

式中: v_i 为气象要素, S_{v_i} 为潜在蒸散对 v_i 的敏感性; Δv_i 和 ΔPET 分别为增加10%的气象要素变化率和相应的潜在蒸散变化率。 S_{v_i} 的绝对值越大,表示PET受该变量影响的可能性越大。如果 $S_{v_i} > 0$,PET将随变量的增加而增加,如果 $S_{v_i} < 0$,PET将随变量的增加而减少。

2.2.3 气象因子对PET的贡献

基于Roderick^[40]提出的贡献率算法,将气象要素对潜在蒸散的偏导数乘以其多年变化率,可计算该气象要素对PET变化趋势的贡献。计算公式如下:

$$\frac{dPET}{dt} = \frac{\partial PET}{\partial P_a} \times \frac{dP_a}{dt} + \frac{\partial PET}{\partial T} \times \frac{dT}{dt} + \frac{\partial PET}{\partial RH} \times \frac{dRH}{dt} + \frac{\partial PET}{\partial WS} \times \frac{dWS}{dt} + \frac{\partial PET}{\partial R_n} \times \frac{dR_n}{dt} + \delta \quad (9)$$

式中: t 为时间; P_a 为大气压; T 为平均气温; RH 为相对湿度; WS 为风速; R_n 为净辐射; δ 为误差项。等式

右边各项大于零意味着气象因子的变化对PET的变化具有正贡献,反之为有负贡献。

将各气象因子对PET变化趋势的贡献与PET的变化趋势做比值,可作为该气象因子对PET变化趋势的相对贡献率,计算公式如下:

$$c_{v_i} = \frac{\frac{\partial PET}{\partial v_i} \times \frac{dv_i}{dt}}{\frac{dPET}{dt}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: v_i 为气象要素; c_{v_i} 为气象要素对PET的相对贡献率。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸散变化趋势

将FAO56 PM公式计算的PET命名为PET_{PM};将PT公式计算的PET命名为PET_{PT}。1998—2017年,11个典型森林生态系统的PET多年平均值和变化趋势如图2所示。PET_{PM}年总量为440.49~942.52 mm,贡嘎山亚高山暗针叶林最低,西双版纳热带季雨林最高。其中北京暖温带落叶阔叶混交林、贡嘎山亚高山暗针叶林、鹤山亚热带人工常绿阔叶林和西双版纳热带季雨林的下降趋势达到统计显著水平,速率分别为-11.89 mm/a、-2.93 mm/a、-5.40 mm/a和-9.69 mm/a。

PET_{PT}的年总量较PET_{PM}偏高5.28%~26.93%。各个森林PET_{PT}与PET_{PM}变化趋势的方向一致,变化趋势的大小存在不同程度的差异。在北京暖温带落叶阔叶混交林、贡嘎山亚高山暗针

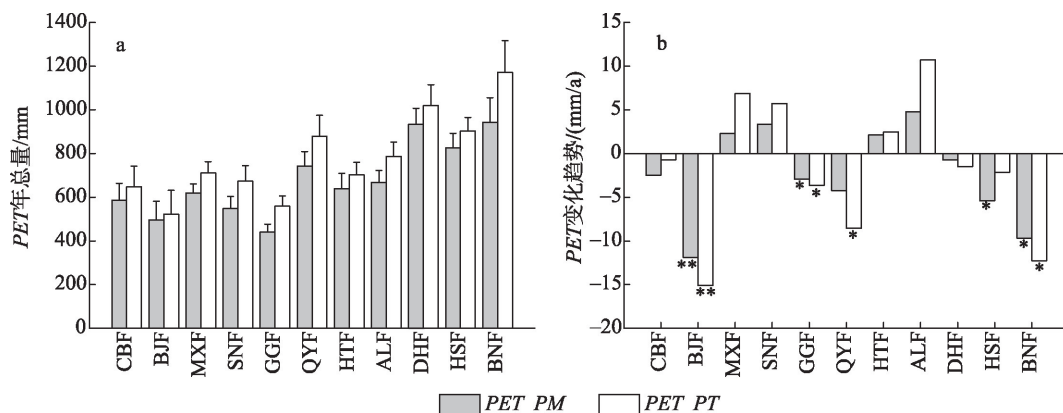


图2 CERN森林站点潜在蒸散年总量的多年平均值(a)及变化趋势(b)

Figure 2 Multi-year mean (a) and trends (b) of annual potential evapotranspiration at the forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN)

注:*表示回归系数通过0.05显著性水平的F检验;**表示回归系数通过0.01显著性水平的F检验。

叶林、会同亚热带次生常绿阔叶林和西双版纳热带季雨林,二者 PET 变化趋势的差异为 26.98%、24.93%、16.72%和 26.69%,在其他森林二者的平均偏差为 67.03%。与 PET_{PM} 结果类似,北京暖温带落叶阔叶混交林、贡嘎山亚高山暗针叶林和西双版纳热带季雨林的 PET_{PT} 具有显著下降趋势。此外,千烟洲亚热带人工常绿针叶林和哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林 PET_{PT} 变化趋势也达到显著水平。

利用 FAO56 PM 和 PT 两种方法计算的不同季节 PET 变化趋势大小存在一定差异,但二者关于不同季节对森林 PET 年总量变化趋势的相对贡献较为一致(表 2)。北京暖温带落叶阔叶混交林全年 PET 下降主要源自夏季和秋季的 PET 下降,两种方法计算出的夏季 PET 下降速率分别为 5.74 和 7.51 mm/a,秋季 PET 下降速率分别为 3.71 和 4.28 mm/a,夏秋两个季节对全年 PET 下降的总相对贡献可达 79.47%(PET_{PM})和 78.06%(PET_{PT})。贡嘎山亚高山暗针叶林夏季 PET 的显著下降主导了全年 PET 的下降,相对贡献为 64.63%(PET_{PM})和 61.19%(PET_{PT})。西双版纳热带季雨林春季和夏季 PET 显著下降,对年总量下降趋势的贡献达 62.77%(PET_{PM})和 62.49%(PET_{PT})。哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林 PET_{PT} 的上升主要源自春季和秋季 PET 的显著增加,贡献为 68.66%。

3.2 潜在蒸散变化成因分析

利用公式(8)-(9)量化了 FAO56 PM 方法计算

的潜在蒸散对大气压、平均气温、相对湿度、风速和净辐射这 5 个气象要素的敏感性,以及各气象要素对 PET 的贡献。由表 3 可知,总体上,各个森林生态系统的 PET_{PM} 对净辐射的敏感性(平均为 0.77)高于相对湿度(-0.30)、平均气温(0.29)、大气压(-0.24)和风速(0.07)。

不同森林生态系统间各气象因子对 PET_{PM} 的贡献大小存在差异(图 3)。对于 PET 年总量显著降低的鹤山亚热带人工常绿阔叶林,风速是导致潜在蒸散下降的主要气象因子,相对贡献率为 80.44%。同时,风速也是引起长白山温带针阔混交林 PET 下降的主导因子,相对贡献率为 94.81%。这两个森林生态系统其风速在 1998—2017 年间呈现出显著下降趋势(分别为每年 -0.05 m/s 和 -0.08 m/s, $p < 0.01$),是引起森林生态系统 PET 下降的主要原因。

对于 PET 年总量显著降低的北京暖温带落叶阔叶混交林、贡嘎山亚高山暗针叶林和西双版纳热带季雨林,净辐射是引起 PET 下降的主导因子,相对贡献率高达 80.10%、107.96%和 102.61%。同时,净辐射也是茂县暖温带针阔混交林、神农架亚热带常绿落叶阔叶林、千烟洲亚热带人工常绿针叶林、会同亚热带次生常绿阔叶林、哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林和鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林 PET 变化的主导因子,相对贡献率在 61.29%~189.91%之间。以上森林生态系统的 PET 均呈现出对净辐射

表 2 CERN 森林站点不同季节潜在蒸散的变化趋势

Table 2 Trends of potential evapotranspiration in different seasons at the forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN) (mm/a)

	春季		夏季		秋季		冬季	
	PET_{PM}	PET_{PT}	PET_{PM}	PET_{PT}	PET_{PM}	PET_{PT}	PET_{PM}	PET_{PT}
CBF	-1.21	-0.60	-0.65	-0.76	0.06	0.90	-0.67**	-0.25**
BJF	-1.65	-2.70*	-5.74**	-7.51**	-3.71**	-4.28**	-0.79**	-0.61**
MXF	0.44	1.76	1.71	3.84	-0.47	0.42	0.62	0.84
SNF	0.03	0.46	2.15	3.25	-0.31	-0.05	1.49	2.09
GGF	0.03	0.06	-1.89*	-2.24*	-0.77	-1.03	-0.30	-0.45
QYF	0.01	-1.36	-1.92	-2.69	-2.28*	-3.60**	-0.04	-0.90
HTF	-0.76	-0.72	2.43	2.81	-0.16	-0.04	0.61	0.44
ALF	2.10	4.26*	0.29	0.88	1.97	3.09*	0.40	2.48*
DHF	-0.54	-0.74	0.17	-0.21	-0.65	-0.73	0.29	0.18
HSF	-2.35**	-2.33*	-1.63	-0.85	-1.06	0.42	-0.36	0.62
BNF	-2.87*	-3.57*	-3.21*	-4.10*	-2.27	-2.91	-1.34	-1.70

注:春季:3—5月;夏季:6—8月;秋季:9—11月;冬季:12—2月;*表示 0.05 水平上显著;**表示 0.01 水平上显著。

表3 CERN森林站点潜在蒸散对气象要素的敏感性

Table 3 Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors at the forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN)

	大气压	平均气温	相对湿度	风速	净辐射
CBF	-0.27	0.11	-0.04	0.10	0.60
BJF	-0.23	0.15	-0.03	0.15	0.62
MXF	-0.25	0.28	-0.82	0.07	0.72
SNF	-0.34	0.25	-0.37	0.02	0.85
GGF	-0.41	0.13	-0.02	-0.01	0.91
QYF	-0.25	0.36	-0.04	0.04	0.83
HTF	-0.18	0.38	-0.06	0.10	0.71
ALF	-0.24	0.33	-1.11	0.04	0.75
DHF	-0.14	0.43	-0.72	0.11	0.76
HSF	-0.14	0.44	-0.07	0.11	0.76
BNF	-0.26	0.34	-0.02	0.01	0.96
平均	-0.24	0.29	-0.30	0.07	0.77

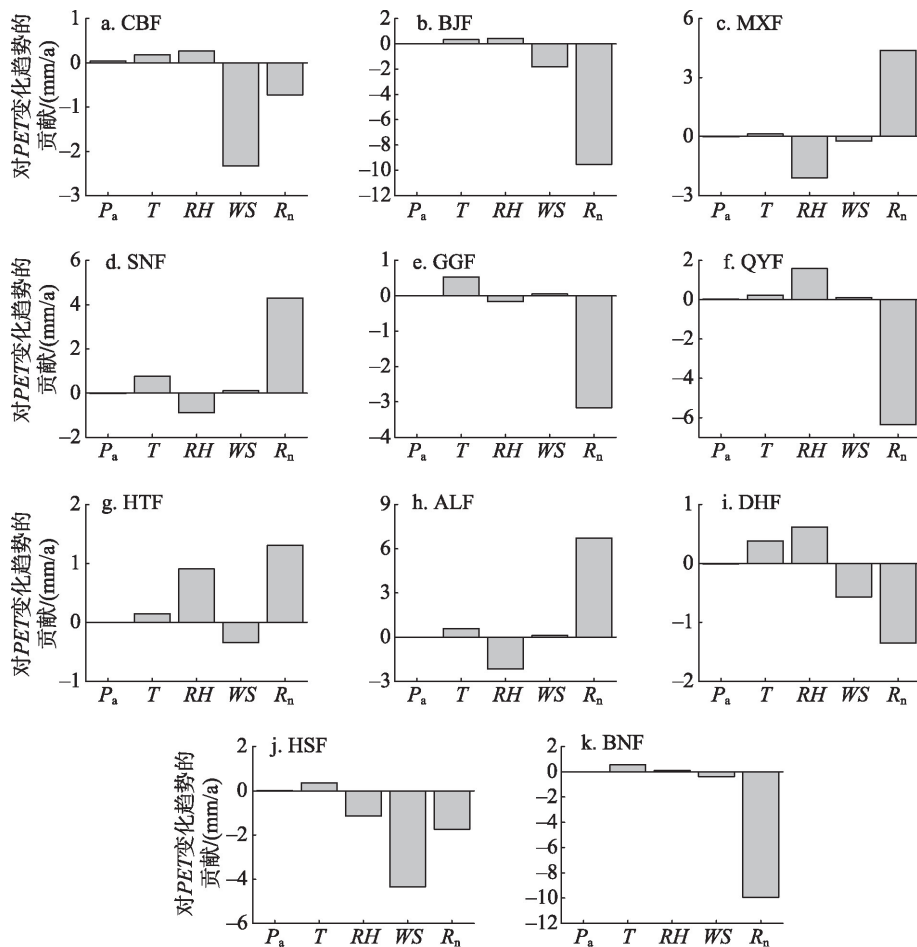


图3 不同气象要素对CERN森林站点潜在蒸散年总量变化趋势的贡献

Figure 3 Contribution of meteorological factors to the trends of potential evapotranspiration at the forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN)

注: P_a 为大气压, T 为平均气温, RH 为相对湿度, WS 为风速, R_n 为净辐射。

的高敏感性(0.62~0.96)。其中,北京暖温带落叶阔叶混交林、贡嘎山亚高山暗针叶林、千烟洲亚热带人工常绿针叶林和西双版纳热带季雨林的净辐射在研究时段内显著下降(-0.14~-0.09 MJ/m²/a, $p < 0.05$),哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林的净辐射在研究时段内显著上升(0.09 MJ/m²/a, $p < 0.05$),与PET对该气象要素的高敏感性共同决定了其在PET变化中的主导地位。尽管北京暖温带落叶阔叶混交林、鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林和西双版纳热带季雨林的净辐射在20年间也呈现出显著下降的趋势(-0.02~-0.01 m/s/a, $p < 0.05$),但由于这3个森林生态系统的PET对该气象要素的敏感性较小(0.01~0.15),导致其对PET下降的相对贡献低于净辐射。

3.3 与基于国家气象站观测的PET的比较

利用FAO56 PM方法,对比分析了基于CERN台站观测数据估算的PET_{PM}与基于气象站观测数据估算的PET(命名为PET_{CMA})在年总量和变化趋势上的差异(图4)。与PET_{PM}相比,PET_{CMA}多年平均值偏高125.48~382.01 mm,平均偏差为277.62 mm。对于二者在PET变化趋势上的差异,长白山温带针阔混交林、北京暖温带落叶阔叶混交林、千烟洲亚热带人工常绿针叶林、鹤山亚热带人工常绿阔叶林和西双版纳热带季雨林的PET_{CMA}变化趋势较PET_{PM}变化趋势偏高1.49~9.43 mm/a,平均偏差为6.37 mm/a,其余6个森林生态系统的PET_{CMA}变化趋势偏低-5.60~-0.12 mm/a,平均偏差为-1.88 mm/a。

与CERN森林台站相比,CMA站点往往具有较高的气温、风速和净辐射,以及较低的相对湿度(图5)。其中,净辐射平均偏高2.04 MJ/m²,平均气温偏高3.76°C,相对湿度偏低5.74%,风速偏高0.30 m/s。不同站点PET_{CMA}比PET_{PM}高的主导因素不完全相同。长白山温带针阔混交林、会同亚热带次生常绿阔叶林、鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林和鹤山亚热带人工常绿阔叶林的PET_{CMA}偏高主要是由于净辐射偏高(1.32~2.74 MJ/m²)。而对于北京暖温带落叶阔叶混交林、茂县暖温带针阔混交林、神农架亚热带常绿落叶阔叶混交林、贡嘎山亚高山暗针叶林、千烟洲亚热带人工常绿针叶林和哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林,除了净辐射偏高(1.36~2.90 MJ/m²)外,平均温度偏高(4.53~11.99 °C)和相对湿度偏低(-12.20%~-7.42%)也会引起PET_{CMA}偏高。西双版纳热带季雨林的PET_{CMA}偏高主要源自较大的风速(偏差为0.66 m/s)和较低的相对湿度(偏差为-1.03%)。

进一步比较了CERN台站与邻近气象站气象因子变化趋势的异同(表4),分析了PET_{CMA}与PET_{PM}变化趋势差异的原因。结果表明,对于5个PET_{CMA}变化趋势高于PET_{PM}的站点,长白山温带针阔混交林的邻近气象台站观测的风速变化趋势比CERN台站偏高0.04 m/s/a,北京暖温带落叶阔叶混交林邻近台站的净辐射变化趋势比CERN台站偏高0.14 MJ/m²/a,千烟洲亚热带人工常绿针叶林、鹤山亚热带人工常绿阔叶林和西双版纳热带季雨

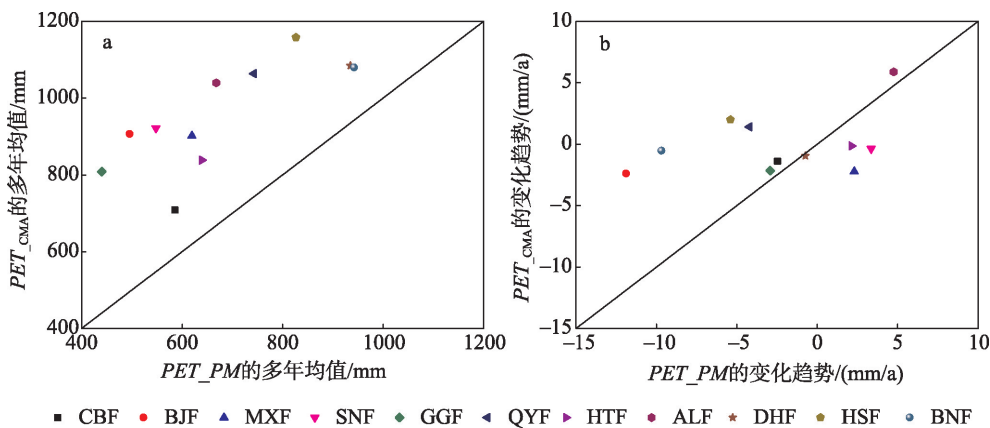


图4 PET_{PM}与PET_{CMA}在多年平均值(a)及变化趋势(b)上的比较

Figure 4 Comparison of PET_{PM} and PET_{CMA} in multi-year mean (a) and trends (b)

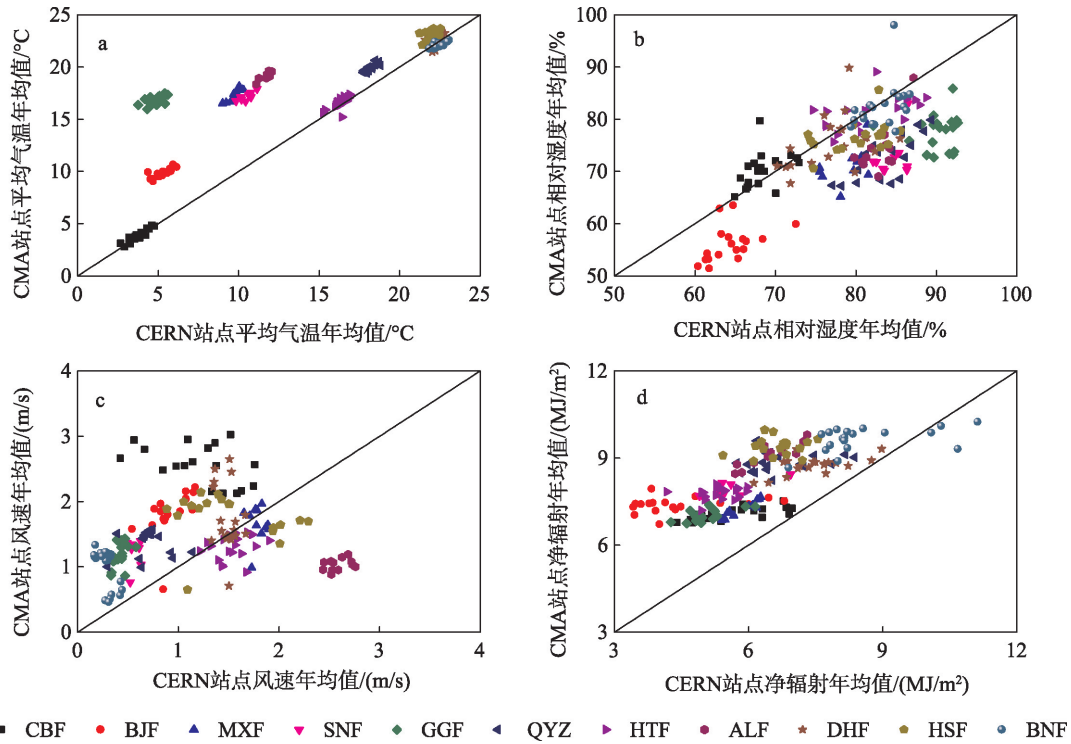


图5 CERN森林站点与邻近CMA站点平均气温(a)、相对湿度(b)、风速(c)和净辐射(d)年均值的比较

Figure 5 Comparison of annual mean of mean temperature (a), relative humidity (b), wind speed (c), and net radiation (d) between the forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN) and nearby China Meteorological Administration (CMA) sites

表4 气象要素的变化趋势

Table 4 Trends of meteorological factors

	大气压/(kPa/a)		平均气温/(°C/a)		相对湿度/(%/a)		风速/(m/s/a)		净辐射/(MJ/m ² /a)	
	CERN	CMA	CERN	CMA	CERN	CMA	CERN	CMA	CERN	CMA
CBF	-0.03**	0.01**	0.01	0.03	-0.07	0.00	-0.05**	0.00	-0.01	-0.02*
BJF	0.00	0.00	0.02	0.03	-0.13	-0.12	-0.02**	-0.04**	-0.14**	0.00
MXF	0.00	0.00	0.01	0.06	0.33*	0.50	-0.01	-0.06*	0.06	0.04
SNF	0.01*	-0.04	0.06	0.01	0.38*	0.43	0.01	0.03	0.05	0.04
GGF	0.00	0.00	0.04*	0.00	0.12	0.23	0.00	-0.01*	-0.04*	0.00
QYZ	-0.01*	-0.01*	0.02	0.02	-0.37*	0.17	0.00	0.01	-0.07*	0.00
HTF	0.00	0.00	0.01	0.02	-0.12	-0.07	-0.01	-0.01	0.02	-0.01
ALF	0.00	0.01	0.03	0.05*	0.24	0.49	0.01	0.01*	0.09*	0.04
DHF	0.01*	-0.02**	0.02	-0.06**	-0.07	0.43*	-0.01*	0.03	-0.01	0.01
HSF	-0.01*	-0.02**	0.02	-0.03	0.12	0.13	-0.08**	0.00	-0.02	0.03**
BNF	0.00	0.00	0.04*	0.00	-0.05	0.02	-0.01**	0.04**	-0.09*	-0.01

林的风速和净辐射变化趋势均偏高(分别为0.01~0.08 m/s/a和0.07~0.08 MJ/m²/a),这些站点是导致PET_{CMA}的变化速率高于PET_{PM}的原因。而对于其余6个PET_{CMA}变化速率低于PET_{PM}的站点,邻近气象站观测的相对湿度变化趋势偏高(0.05%/a~0.50%/a),同时,茂县暖温带针阔混交林、神农架亚

热带常绿落叶阔叶林、会同亚热带次生常绿阔叶林和哀牢山亚热带湿性常绿阔叶林的净辐射变化趋势偏低(-0.05~-0.01 MJ/m²/a),导致这6个森林生态系统PET_{CMA}的变化趋势低于PET_{PM}。

4 讨论

在气候变暖背景下,1998—2017年大部分森林

生态系统 PET 呈现下降趋势, 气温上升对森林 PET 变化的正贡献较为有限, 净辐射和风速相比其他气候因子对森林 PET 变化的贡献更大。关于 PET 变化的成因, 总体上与以往基于气象台站数据的大尺度研究结果^[12,13,41]类似。结合中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 涡度相关系统测定的潜热通量数据 (http://www.cnern.org.cn/data/init-DRsearch?classcode=SYC_A02), 计算得到 2003—2010 年长白山温带针阔混交林、千烟洲亚热带人工常绿针叶林、鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林和西双版纳热带季雨林 4 个森林生态系统的实际蒸散 (ET) 与 PET 的比值 (0.61~0.85), 该比例在已有研究的范围内 (0.43~0.91)^[21,42,43], 其中 ET/PET_{PM} 平均为 0.78, 略高于 ET/PET_{PT} (0.69)。

考虑到 FAO56 PM 公式中参考作物高度可能影响 PET 估算结果, 采用美国土木工程师协会环境与水资源分会 (ASCE-EWRI) 提出的 ASCE 标准 PM 公式^[44], 以完全覆盖的苜蓿 (高型参考作物) 为参考下垫面, 将式 (1) 中的常数 C_n 和 C_d 分别取值为 1600 和 0.38 (日尺度), 计算了下垫面参考作物为苜蓿时各森林生态系统 PET (PET_{ASCE}) 的大小及变化趋势。结果表明, PET_{ASCE} 在数值上略高于 PET_{PM} , 偏差为 11.35~142.81 mm, 但各森林生态系统 PET_{ASCE} 变化趋势与 PET_{PM} 的方向一致。 PET_{ASCE} 对各气象要素的平均敏感性排序与 PET_{PM} 一致, 为净辐射 (0.69) > 相对湿度 (-0.46) > 平均气温 (0.30) > 大气压 (-0.17) > 风速 (0.14)。同

时, 各森林生态系统的气象要素对 PET_{ASCE} 的贡献情况与 PET_{PM} 相似 (表 5)。这说明改变参考作物的高度后, 主要影响 PET 的大小, 不会造成 PET 变化趋势及气候因子贡献结果的变化。

由于气象观测场周边环境的差异, 国家气象台站测定的气温、太阳辐射和风速总体上高于自然森林, 并且在趋势上也存在一定程度的差异, 会造成对森林 PET 大小和趋势估计的偏差。与 CERN 森林生态系统定位台站相比, 邻近气象观测台站主要位于城市及周边^[23]。多种因素引发的“城市热岛效应”使气象台站测定的气温和太阳辐射均高于野外^[45]。并且, CERN 森林生态系统台站与邻近气象站在海拔高度上也存在较大差异, 除千烟洲亚热带人工常绿针叶林外, 其余 10 个 CERN 森林生态系统台站的海拔均明显高于邻近气象站 (偏高 46.30~2532.40 m), 这也是邻近气象站气温观测值偏高以及 PET_{CMA} 数值偏高的原因之一。同时, 森林蒸腾作用增加了大气中的水汽含量, 而绿植较少的城市及城郊的相对湿度则低于森林^[46]。林冠层对风速的降低作用也使森林生态系统的风速小于城市及周边^[47]。

此外, FAO56 PM 模型中采用 a_s 和 b_s 的默认值 (式 (5)) 会导致短波辐射计算的误差。辐射系数 a_s 和 b_s 体现了大气透明度及云量这 2 个关键要素^[48] 对地表辐射的影响。与观测值相比, 由日照时数计算的短波总辐射的年均值和变化趋势分别存在 -1.22~1.89 MJ/m² 和 -0.03~0.13 MJ/m²/a 的偏差 (表 6), 进而造成对 PET 估算结果的不确定性。而采用实测

表 5 不同气象要素对 PET_{ASCE} 变化趋势的贡献

Table 5 Contribution of meteorological factors to the trends of PET_{ASCE}

(mm/a)

	大气压	平均气温	相对湿度	风速	净辐射
CBF	0.03	0.22	0.48	-5.32	-0.71
BJF	0.00	0.40	0.74	-3.65	-9.41
MXF	-0.01	0.15	-3.65	-0.61	4.30
SNF	-0.02	0.80	-1.59	0.39	4.27
GGF	0.00	0.55	-0.29	-0.02	-3.14
QYF	0.02	0.25	2.78	0.25	-6.31
HTF	0.00	0.18	1.32	-0.79	1.37
ALF	0.00	0.67	-3.74	0.44	6.56
DHF	0.00	0.46	1.08	-1.23	-1.34
HSF	0.00	0.42	-2.00	-9.38	-1.72
BNF	0.00	0.60	0.17	-1.05	-9.92

表6 CERN森林台站辐射系数的拟合值及其对短波辐射计算结果的影响

Table 6 Fitting values of radiation coefficients of the forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN) and the influence on calculation results of short-wave radiation

	年均值/(MJ/m ²)			变化趋势/(MJ/m ² /a)			拟合的辐射系数		
	观测值	原始值	反推值	观测值	原始值	反推值	a_s	b_s	R^2
CBF	13.42	12.46	13.62	-0.04	-0.02	-0.02	0.28	0.53	0.60
BJF	10.15	11.60	8.96	-0.16	-0.02	-0.02	0.15	0.52	0.49
MXF	12.04	12.70	11.92	-0.02	0.01	0.01	0.18	0.64	0.86
SNF	12.61	12.76	12.51	0.01	-0.02	-0.02	0.20	0.63	0.61
GGF	9.06	10.95	8.50	0.08	0.07	0.10	0.13	0.72	0.69
QYF	12.10	13.94	11.44	-0.03	-0.04	-0.04	0.14	0.59	0.76
HTF	10.79	11.51	10.51	-0.03	0.03	0.03	0.20	0.59	0.63
ALF	14.29	13.95	14.21	0.04	0.10	0.12	0.23	0.58	0.83
DHF	13.15	12.78	12.92	-0.02	0.04	0.05	0.23	0.59	0.66
HSF	12.54	11.32	12.32	-0.03	0.08	0.08	0.28	0.50	0.47
BNF	15.41	15.26	15.46	-0.01	0.01	0.01	0.26	0.49	0.68

注:原始值表示基于默认参数值的计算结果,反推值表示基于拟合参数值的计算结果。

短波辐射数据拟合出的 a_s 和 b_s 值,短波总辐射计算值的偏差可减小 30.61%~82.04%。

根据第八次全国森林资源清查结果,中国森林覆盖率已达 21.61%^[49]。如果仅采用气象台站的观测数据来研究全国或区域 PET 的变化规律,可能存在对森林生态系统 PET 大小和变化趋势上估计的不确定性。未来需加强全国范围内自然生态系统长期定位监测台站气象数据的共享,并拓展自然生态系统中气象观测站点的密度和气象观测数据时间序列的长度,从而更准确地估计全国自然生态系统 PET 的大小及变化。

5 结论

本文基于 1998—2017 年中国生态系统研究网络 11 个森林生态系统定位研究站的逐日气象观测资料,分析了中国典型森林生态系统 PET 的变化趋势及成因,并评价了基于国家气象台站观测数据计算的 PET 结果对于森林 PET 的偏差,得出以下主要结论:

(1) 1998—2017 年,中国大部分森林生态系统的 PET 呈下降趋势,FAO56 Penman-Monteith 公式和 Priestley-Taylor 公式估算的 PET 变化趋势一致。净辐射作为高敏感因子,其变化主导了 9 个森林生态系统的 PET 变化。风速的显著下降趋势主导了长白山温带针阔混交林和鹤山亚热带人工常绿阔

叶林的 PET 变化。

(2) 与基于 CERN 典型森林生态系统观测数据计算的 PET 结果相比,基于中国气象局地面气象站观测数据计算的 PET 年总量偏大,这主要源自邻近气象台站具有较高的气温、风速、日照时数和较低的相对湿度。北部和东部森林邻近气象台站估算的 PET 在变化趋势上偏高,主要由于其风速和净辐射变化趋势偏高;其他区域邻近气象台站估算的 PET 在趋势上偏低,主要源自相对湿度变化趋势偏高和净辐射变化趋势偏低。

致谢: 感谢中国生态系统研究网络(CERN)长白山站、北京森林站、茂县站、神农架站、贡嘎山站、千烟洲站、会同站、哀牢山站、鼎湖山站、鹤山站、西双版纳站及数据中心的相关工作人员提供数据支持。感谢中国气象局(CMA)气象观测台站和国家气象信息中心(NMIC)提供数据支持。感谢葛蓉博士和朱晓波博士在本文修改过程中提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] 左大康. 现代地理学辞典[M]. 北京: 商务印书馆, 1990. [Zuo D K. Modern Geography Dictionary[M]. Beijing: The Commercial Press, 1990.]
- [2] Ohuura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating?[J]. Science, 2002, 298: 1345-1346.

- [3] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 24[M]. Rome: FAO (Food and Agriculture Organization), 1977.
- [4] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估[J]. 大气科学, 2017, 41(1): 43-56. [Jiang J, Jiang D B, Lin Y H. Changes and projection of dry/wet areas over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(1): 43-56.]
- [5] 全国水资源初步成果汇总技术小组. 中国水资源初步评价[M]. 北京: 水利部水资源研究及区划办公室, 1981. [National Water Resources Preliminary Results Summary Technical Team. Preliminary Evaluation of Water Resources in China[M]. Beijing: Water Resources Research and Regional Office of the Ministry of Water Resources, 1981.]
- [6] 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.
- [7] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551): 687-688.
- [8] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298: 1410-1411.
- [9] 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.
- [10] Fan Z X, Thomas A. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in Yunnan Province, SW China, 1961-2004[J]. Climatic Change, 2013, 116: 309-325.
- [11] 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.
- [12] Zheng C L, Wang Q. Spatiotemporal pattern of the global sensitivity of the reference evapotranspiration to climatic variables in recent five decades over China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(8): 1937-1947.
- [13] Wang Z L, Xie P W, Lai C G, et al. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961-2013[J]. Journal of Hydrology, 2017, 544: 97-108.
- [14] Liu C M, Zhang D, Liu X M, et al. Spatial and temporal change in the potential evapotranspiration sensitivity to meteorological factors in China (1960-2007)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 3-14.
- [15] Jiang S Z, Liang C, Cui N B, et al. Impacts of climatic variables on reference evapotranspiration during growing season in Southwest China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216: 365-378.
- [16] Liu Q, Yan C R, Ju H, et al. Impact of climate change on potential evapotranspiration under a historical and future climate scenario in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2018, 132(1-2): 387-401.
- [17] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Potential evapotranspiration from forest and pasture in the tropics: A case study in Kona, Hawaii[J]. Journal of Hydrology, 2012, 440-441: 52-61.
- [18] Zhang J J, Guo B N, Jiang Q O, et al. Study on microclimate characteristics and vertical variation of potential evapotranspiration of the *Robinia pseudoacacia* forest in the Loess Plateau of China[J]. Advances in Meteorology, 2013, 19: 1-11.
- [19] 孙慧珍, 朱晓明. 原始红松林与天然次生林潜在蒸发散对比[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(9): 40-41. [Sun H Z, Zhu X M. Comparison of potential evapotranspiration in primary forest and natural secondary forest of Korean pine[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(9): 40-41.]
- [20] Amatya D M, Harrison C A. Grass and forest potential evapotranspiration comparison using five methods in the Atlantic coastal plain[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001341.
- [21] Rao L Y, Sun G, Ford C R, et al. Modeling potential evapotranspiration of two forested watersheds in the southern Appalachians[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(6): 2067-2078.
- [22] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3): 169-190.
- [23] 邵全琴, 孙朝阳, 刘纪远, 等. 中国城市扩展对气温观测的影响及其高估程度[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1292-1302. [Shao Q Q, Sun C Y, Liu J Y, et al. Impact of urban expansion on meteorological observation data and overestimation to regional air temperature in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1292-1302.]
- [24] 周密, 常鸣, 赖安琪, 等. 未来土地利用类型对珠江三角洲气象场的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 2896-2904. [Zhou M, Chang M, Lai A Q, et al. Impacts of future land use on meteorological conditions over the Pearl River Delta Region[J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 2896-2904.]
- [25] 蔡礼蓉, 匡旭, 房帅, 等. 长白山阔叶红松林3个常见树种径向生长的影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1407-1413. [Cai L R, Kuang X, Fang S, et al. Factors influencing tree radial growth of three common species in broad-leaved Korean pine mixed forests in Changbai Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1407-1413.]
- [26] 马芳, 王顺忠, 冯金朝, 等. 北京东灵山优势种群树木死亡对空间格局与生境的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7669-7678. [Ma F, Wang S Z, Feng J C, et al. The study of the effect of tree

2020年5月

- death on spatial pattern and habitat associations in dominant populations of Dongling Mountains in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7669–7678.]
- [27] 李苗苗. 臭氧对几种楠木气体交换参数的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1888–1901. [Li M M. Effects of ozone on photosynthesis of several plants[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5): 1888–1901.]
- [28] 谢宗强, 孙鸿烈, 于贵瑞, 等. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 湖北神农架站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010. [Xie Z Q, Sun H L, Yu G R, et al. *China Ecosystem Positioning Observation and Research Dataset Forest Ecosystem Volume: Hubei Shennongjia Station*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.]
- [29] 刘涛, 孙守琴, 邱阳. 川西亚高山生态系统三种典型植物凋落物分解动态特征[J]. *山地学报*, 2017, 35(5): 663–668. [Liu T, Sun S Q, Qiu Y. Dynamics and differences in the decomposition of litters from three dominating plants in subalpine ecosystems in Western Sichuan, China[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(5): 663–668.]
- [30] 陈蝶聪, 王绍强, 黄昆, 等. 基于通量和光谱观测的中亚热带人工针叶林光能利用效率的反演[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3421–3432. [Chen D C, Wang S Q, Huang K, et al. Estimation of light-use efficiency of China's mid-subtropical planted coniferous forest based on flux measurements and spectral observations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3421–3432.]
- [31] 汪思龙. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 湖南会同站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012. [Wang S L. *China Ecosystem Positioning Observation and Research Dataset Forest Ecosystem Volume: Hunan Huitong Station*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.]
- [32] 张一平, 刘玉洪. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 云南哀牢山站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. [Zhang Y P, Liu Y H. *China Ecosystem Positioning Observation and Research Dataset Forest Ecosystem Volume: Yunnan Ailaoshan Station*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.]
- [33] 张倩媚. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 广东鼎湖山站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. [Zhang Q M. *China Ecosystem Positioning Observation and Research Dataset Forest Ecosystem Volume: Guangdong Dinghushan Station*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.]
- [34] 傅声雷, 林永标, 饶兴权, 等. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 广东鹤山站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. [Fu S L, Lin Y B, Rao X Q, et al. *China Ecosystem Positioning Observation and Research Dataset Forest Ecosystem Volume: Guangdong Heshan Station*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.]
- [35] 邓晓保, 唐建维. 中国生态系统定位观测与研究数据集森林生态系统卷: 云南西双版纳站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010. [Deng X B, Tang J W. *China Ecosystem Positioning Observation and Research Dataset Forest Ecosystem Volume: Yunnan Xishuangbanna Station*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.]
- [36] 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 (Food and Agriculture Organization), 1998.
- [37] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 159–167. [Jia W X, He Y Q, Wang X F, et al. Temporal and spatial change of the potential evaporation over Qilian Mountains and Hexi Corridor from 1960 to 2006[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 159–167.]
- [38] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81–92.
- [39] McCuen R H. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 1973, 18(1): 37–53.
- [40] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, DOI: 10.1029/2007GL031166.
- [41] Zhang Q, Xu C Y, Chen X. Reference evapotranspiration changes in China: Natural processes or human influences?[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 103(3–4): 479–488.
- [42] Song Q H, Braeckvelt E, Zhang Y P, et al. Evapotranspiration from a primary subtropical evergreen forest in Southwest China[J]. *Ecohydrology*, 2017, 10(4): e1826.
- [43] Olchev A, Novenko E. Estimation of potential and actual evapotranspiration of boreal forest ecosystems in the European part of Russia during the Holocene[J]. *Environmental Research Letters*, 2011, DOI: 10.1088/1748–9326/6/4/045213.
- [44] ASCE-EWRI. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*[R]. New York: Technical Committee Report, 2005.
- [45] 吴雪. 城市化进程对气温变化的分析: 以北京、郑州、南京、杭州城市为例[J]. *内蒙古气象*, 2019, (3): 42–45. [Wu X. Analysis of urbanization process on temperature changes: Taking Beijing, Zhengzhou, Nanjing and Hangzhou as examples[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2019, (3): 42–45.]
- [46] 杨雅君, 邹振东, 赵文利, 等. 6种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 881–889. [Yang Y J, Zou Z D, Zhao W L, et al. Comparative study on the thermal environment effect of six urban underlying surfaces[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(5): 881–889.]
- [47] 张功, 郑宁, 张劲松, 等. 人工林冠层的湍流微气象特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1787–1796. [Zhang G, Zheng N, Zhang J S, et al. Turbulence micro-meteorological characteristics over the plantation canopy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,

- 29(6): 1787–1796.]
- [48] 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 X, Wang P J, Huo Z G, 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.]
- [49] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014, (1): 1–2. [State Forestry Administration. Results of the eighth national forest resources inventory[J]. Forest Resources Management, 2014, (1): 1–2.]

Trends and influencing factors of potential evapotranspiration in typical forest ecosystems of China during 1998–2017

SUN Wanxin^{1,2,3}, ZHANG Li^{1,2,4}, REN Xiaoli^{1,2}, HE Honglin^{1,2,4}, LÜ Yan^{1,2,3},
NIU Zhongen^{1,2,3}, CHANG Qingqing^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. National Ecosystem Science Data Center, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Potential evapotranspiration (*PET*) is a key factor in calculating actual evapotranspiration, evaluating regional dry and wet conditions, and water resources management. Using daily meteorological data at 11 typical forest sites of the Chinese Ecosystem Research Network (CERN) in the past 20 years, we estimated *PET* by both the Penman-Monteith equation and Priestley-Taylor equation, and analyzed the trend of *PET* and its climate attribution. The results of the two methods indicate that *PET* in seven typical forest ecosystems in China showed decreasing trends in the past 20 years. Wind speed dominated *PET* changes in the Changbai Mountain temperate coniferous and broadleaved mixed forest and the He Mountain subtropical artificial evergreen broadleaved forest, while net radiation dominated *PET* changes in other forests. We also quantified the difference between *PET* at each forest site (*PET_{PM}*) and that estimated by meteorological data from a nearby site of China Meteorological Administration (*PET_{CMA}*). On average, *PET_{CMA}* is higher than *PET_{PM}*, mainly because the meteorological stations are mostly with higher temperature, wind speed, and net radiation, and lower relative humidity than the CERN forest sites. For the forests in northern and eastern China, *PET_{CMA}* trends were higher than *PET_{PM}*, because the former have higher wind speed and net radiation trends. In contrast, *PET_{CMA}* trends were lower than *PET_{PM}* for other forests, which are mainly due to their higher trend of relative humidity and lower trend of net radiation. The research can provide a reference for understanding the characteristics of the potential evapotranspiration in China's forest ecosystems and its response to climate change.

Key words: potential evapotranspiration; forest ecosystems; trends; meteorological factors; Chinese Ecosystem Research Network (CERN); Penman-Monteith method; Priestley-Taylor method